

**APCC 기후정보 활용성 강화를 위한 고해상도 MME  
계절내-계절예측시스템 기반구축 및 웹 콘텐츠 다양화**

**Establishment of High-resolution Multi-Model  
Ensemble (MME) Subseasonal to Seasonal (S2S)  
Prediction Framework and Diversification of Web  
Contents to Strengthen the Usability of APCC  
Climate Information**

**김유진, 김형진, 민영미, 송봉근, 양신일,  
이현주, 임아영, 임창묵, 정다은, 정임국  
기후사업본부 예측운영과**

**2024.12.**

**아시아·태평양경제협력체 기후센터**



# Executive Summary

Since its establishment in 2005, APCC (APEC Climate Center) has made great efforts to develop and improve the long-term seasonal forecast technology using the Multi-Model Ensemble (MME) and as a result, it has established a climate prediction system using various global models of the world's leading climate forecast operating and research institutes to provide climate monitoring information and long-term forecast and verification information on its website and platform every month.

The main Improvements in climate forecasts for the sixth phase (2022-2024) include early provision of forecast information, improved climate outlooks, establishment of a high-resolution MME seasonal forecast verification system, extension of the MME hindcast period, enhancement of the BSISO (Boreal Summer Intraseasonal Oscillation) sub-seasonal forecast system, expansion of the Southeast Asia FHEWS (Fire and Haze Early Warning System) to include Malaysia, establishment of an East Asia MME temperature seasonal forecast correction system, and dynamic web services through a new website.

- Since April 2022, the release date for forecast information has been moved forward by five days, from the 20th of each month to the 15th.
- To improve the APCC climate outlook that is posted and distributed monthly, a survey of the climate outlooks from other operational climate prediction institutions was conducted. Additionally, feedback on satisfaction and preferences from APCC climate outlook subscribers' s survey was collected. Based on these findings, a newly designed climate outlook with enhanced readability and visibility has been posted and distributed since November 2023.
- A data preprocessing and verification system was established in September 2022 to assess the predictability of high-resolution MME seasonal forecasts.
- The MME hindcast period has been extended from 1991-2010 to 1993-2020 for trial production and analysis of forecast information, with plans to apply this extended period in 2025. In relation to this, the hindcast period for APCC's in-house climate model, SCoPS, has been extended from 1982-2013 to 1982-2016 for the production of hindcast.
- To enhance the usability of BSISO forecast information, the area of BSISO impact anomaly has been expanded to include the Korean Peninsula within 10S-50N, 40E-160E, and the provision period has been extended from three weeks to four weeks.
- The FHEWS has been expanded to include Malaysia, with information being provided

since 2023.

- A linear trend correction system for relatively high MME temperature forecasts in East Asia has been established.
- Since February 2024, a new website has been providing dynamic web contents for climate forecasts, climate monitoring, and climate indices.

The demand and international interest in sub-seasonal forecasting information have surged, yet the development and predictive power of sub-seasonal forecasting technology remain lacking compared to other time scales. As a specialized institution that has produced and provided world-class seasonal forecast information, APCC aims to expand its scope to include sub-seasonal forecasting. As a preparatory step, APCC has established a system and conducted foundational research for operating the MME sub-seasonal forecasting system. Initially, a comprehensive review was conducted based on the current status of domestic and international MME sub-seasonal forecasting systems and internal research. This review helped assess usability and establish criteria suitable for APCC's operational MME sub-seasonal forecast through various sensitivity experiments for processing daily data from individual models. Additionally, the potential for utilizing MME on a sub-seasonal scale was diagnosed. During the 5th APCC MME Model Providers' Meeting, the possibility of securing sub-seasonal forecast data was explored, and real-time forecast information from some models was collected to develop a versatile and efficient pilot system consistent with the APCC MME seasonal forecast system. Furthermore, the potential use and improvement direction of the SCoPS model for sub-seasonal forecast were established through trial production of sub-seasonal forecasts using APCC's in-house model (SCoPS) and comparative evaluation of predictive power with S2S project models. These results are intended to be utilized in future operations of the APCC MME sub-seasonal forecast system and the development of core technologies.

Since 2011, APCC has been operating the WMO (World Meteorological Organization) Lead Center for Long Range Forecast Multi-Model Ensemble (LC-LRFMME) in collaboration with the Korea Meteorological Administration (KMA), providing high-quality climate forecast services that meet the needs of WMO member countries. The Lead Center collects and standardizes long-range forecast data from 15 Global Producing Centers (GPCs) around the world, applying deterministic and probabilistic MME methods to produce seasonal forecast results and verification outcomes. These are consistently and reliably provided to WMO member countries and general users through digital and graphical formats on its website. To strengthen international collaboration, the center offers tailored MME forecast information for various regional climate forums organized by the WMO. In 2024, to ensure more stable services and data management, the center upgraded its computing equipment, enhancing operational data processing capabilities and improving user convenience with an option

selection menu.

Additionally, APCC operated the WMO S2S (Subseasonal-to-Seasonal Prediction Project) International Coordination Office (ICO) to establish international collaboration in climate prediction. APCC actively engages with expert groups in the climate field by attending international conferences such as those organized by the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) and regional climate forums, continuously maintaining communication with these experts.

## 국문 요약

아시아·태평양경제협력체 기후센터(APCC, APEC Climate Center)는 2005년 설립 이후 다중모델앙상블(MME, Multi-Model Ensemble)을 활용한 장기 기후예측기술 개발 및 개선에 많은 노력을 기울여왔으며 그 결과 세계 유수현업기관 및 연구기관의 다양한 전지구모델을 활용한 기후예측시스템을 구축하여 매월 홈페이지를 통해 기후감시와 장기 계절예측(3/6개월) 및 검증정보, 계절내예측정보를 제공하고 있습니다.

6단계(2022~2024) 사업의 기후예측 주요 개선 사항으로는 예측정보 조기 제공, 기후전망 개선, 고해상도 MME 계절예측 검증시스템 구축, MME hindcast 기간 확장, BSISO (Boreal Summer Intraseasonal Oscillation) 계절내예측시스템 개선, 동남아시아 산불예측시스템의 말레이시아 지역확장, 동아시아 MME 기온 계절예측 보정 시스템 구축, 신규홈페이지를 통한 동적 웹 서비스입니다.

- 2022년 4월부터 예측정보 제공 시기를 기존 매월 20일에서 5일 앞당겨 매월 15일에 예측정보를 발표하기 시작하였습니다.
- 매월 게시 및 배포하는 APCC 기후전망 개선을 위해 타 기후예측 현업기관의 기후전망의 현황을 조사하고 APCC 기후전망 구독자의 만족도 및 선호도 조사 결과를 취합하여, 2023년 11월부터 가독성 및 가시성이 향상된 새로운 디자인의 기후전망을 게시 및 배포하고 있습니다.
- 2022년 9월부터 제공되는 고해상도 MME 계절예측에 대한 예측성 평가를 위해 관측자료 전처리와 검증시스템을 구축하였습니다.
- MME hindcast 기간을 1991~2010년에서 1993~2020년으로 확장하여 예측정보를 시험 생산 및 분석하여 2025년에 확장된 기간을 적용예정입니다. 이와 관련하여 APCC 자체 기후모델인 SCoPS의 hindcast 기간을 1982~2013년에서 1982~2016년까지 연장하여 예측정보를 생산하였습니다.
- BSISO 예측정보의 활용성 증대를 위해 영향장 제공 범위를 한반도가 포함되는 10S~50N, 40E~160E로 영역 확장하고 제공 기간을 기존 3주에서 4주로 확대하였습니다.
- 동남아시아 산불예측시스템의 지역을 말레이시아로 확장하여 2023년부터 정보를 제공하고 있습니다.
- 동아시아 지역의 상대적으로 높은 MME 기온 예측에 대한 선형추세 보정 시스템을 구축하였습니다.
- 2024년 2월부터 신규 홈페이지에서 기후예측, 기후감시, 기후지수 등의 정보를 동적 웹 콘텐츠로 제공하고 있습니다.

계절내예측정보에 대한 수요 및 국제적 관심은 급증하고 있으나, 계절내예측기술의 발전 및 예측력은 다른 시간 규모에 비해 여전히 부족한 실정입니다. APCC는 세계수준의 계절예측 정보를 생산·제공해온 전문기관으로 계절내예측으로 그 영역을 확장하고자 하며 이를 위한 준비단계로 APCC MME 계절내예측시스템 운영을 위한 체계구축 및 기반 연구를 수행하였습니다. 우선 국내외 MME 계절내예측시스템 및 센터 내 연구에 대한 현황 조사를 바탕으로 종합적인 리뷰를 통해 활용성을 파악하고 개별모델의 일자료 처리방안 마련을 위한 다양한 민감도 실험을 통해 APCC MME 계절내예측 현업 운영에 적합한 기준을 마련하였습니다. 또한 계절내 규모에서 MME 활용성에 대한 가능성을 진단하였으며, 제5차 APCC MME 자료제공회의를 통해 계절내예측자료 확보 가능성을 타진하였으며, 일부 모델에 대해서는 실시간 예측정보를 수집하여 APCC 계절예측 MME 시스템과 일관성을 고려한 범용적이고 효율적인 운영 시스템(Pilot System)을 개발하였다. 또한 APCC 자체모델(SCoPS)의 계절내예측 시범 생산 및 S2S 프로젝트 모델과의 상대적인 예측력 평가를 통해 SCoPS 모델의 계절내예측 활용 가능성 및 개선 방향을 수립하였다. 이러한 결과를 바탕으로 추후 APCC MME 계절내예측시스템 운영 및 핵심기술 개발 등에 활용하고자 합니다.

APCC는 2011년부터 기상청과 함께 WMO (World Meteorological Organization) 기후예측 다중모델앙상블 선도센터를 운영하여 WMO 회원국의 요구에 부합하는 고품질 기후예측 서비스를 제공하고 있습니다. WMO 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 전 세계 15개 GPC (Global Producing Center)에서 생산되는 장기예보 자료를 수집하여 표준화하며, 결정론적 및 확률론적 MME 기법을 적용하여 얻은 MME 계절예측 결과와 검증 결과를 홈페이지를 통해 디지털 및 그래픽 형태의 자료로 WMO 회원국 및 일반 사용자에게 지속적이고 안정적으로 제공하고 있습니다. 또한 국제적 협업 체계 강화를 위해 WMO에서 주관하는 다양한 지역 기후 포럼에 맞춤형 MME 예측정보를 제공하고 있으며, 2024년에는 보다 안정적인 서비스와 자료관리를 위해 선도센터 전산장비를 교체하여 현업자료 처리 기능 개선, 사용자 편의성을 위한 옵션 선택 메뉴 기능 개선이 이루어졌습니다.

이와 함께 APCC는 기후예측 분야 국제 협력에서 국제적 위상 확보와 협업체계 구축을 위해 WMO S2S (Subseasonal-to-Seasonal Prediction Project) 국제조정사무소(ICO, International Coordination Office)를 운영함과 동시에 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 지역기후포럼 등의 국제회의에 참석하여 기후분야 전문가 그룹과 지속적으로 소통을 하고 있습니다.

# 목차

Executive Summary .....	i
국문 요약 .....	iv
목차 .....	vi
표 차례 .....	ix
그림 차례 .....	xii
1. 서론 .....	1
2. 방법 및 자료 .....	3
2.1. MME 계절예측시스템 운영 및 개선 .....	3
2.1.1. 저해상도/고해상도 MME 계절예측시스템 운영 .....	3
2.1.2. 기후감시시스템 운영 .....	15
2.1.3. 동아시아 지역 확률계절예측시스템 운영 .....	15
2.1.4. MME 예측정보 조기제공 .....	16
2.1.5. 기후전망 개선 .....	16
2.1.6. ENSO 경보시스템 개선 .....	16
2.2. BSISO 계절내예측시스템 운영 및 개선 .....	17
2.2.1. BSISO 계절내예측시스템 운영 .....	17
2.2.2. BSISO 계절내예측시스템 개선 .....	18
2.3. APCC 자체예측모델(SCoPS) 운영 및 예측정보 제공 .....	19
2.3.1. SCoPS 계절예측정보 제공(매월, 3/6개월) 및 현안 대응 .....	19
2.3.2. 기상청 슈퍼컴 5호기를 활용한 SCoPS 계절예측 운영체계 구축 .....	19
2.3.3. hindcast 기간 확장 .....	20
2.4. 산불예측시스템 운영 및 지역확장 .....	21
2.4.1. 산불예측시스템 운영 및 예측정보 제공 .....	21
2.4.2. 입력자료 개선 및 지역확장 서비스 .....	21
2.5. 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현 .....	23
2.5.1. 신규 홈페이지용 동적 기후정보 웹 콘텐츠 디지털 자료 생산 시스템 구축 .....	23
2.5.2. 신규 홈페이지용 정적/동적 기후정보 웹 콘텐츠 생산 및 적용 테스트 .....	25
2.5.3. 기후평년값 동적 표출 서비스 .....	25
2.6. MME 계절예측 특성 고려한 기온 계절예측 보정 및 현업활용 기반 마련 .....	26

2.6.1. MME 기온의 계절예측 경향과 실제 기후변화 고려한 기온 예측 보정 방법 개발 .....	26
2.6.2. 자동화 시스템 구축 .....	26
2.7. 고해상도 MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축 .....	28
2.7.1. 계절내예측 모델 및 관측자료 .....	28
2.7.2. 계절내예측 검증 지수 및 지역 .....	30
2.7.3. 동아시아 지역 이상기후 예측을 위한 기반 연구 .....	31
2.8. 기후분야 국제협력 및 정책지원 .....	32
2.8.1. WMO 장기예보 선도센터 운영 .....	32
2.8.2. WMO S2S 국제조정사무소(ICO) 운영 .....	35
2.8.3. IPCC 등 기후분야 국제회의 참석 및 정부대표단 활동 .....	35
3. 결과 .....	37
3.1. MME 계절예측시스템 운영 및 개선 .....	37
3.1.1. 저해상도/고해상도 MME 계절예측시스템 운영 .....	37
3.1.2. 기후감시시스템 운영 .....	86
3.1.3. 동아시아 지역 확률계절예측시스템 운영 .....	86
3.1.4. MME 예측정보 조기제공 .....	91
3.1.5. 기후전망 개선 .....	94
3.1.6 ENSO 경보시스템 개선 .....	97
3.2. BSISO 계절내예측시스템 운영 및 개선 .....	100
3.2.1. BSISO 계절내예측시스템 운영 .....	100
3.2.2. BSISO 계절내예측시스템 개선 .....	104
3.3. APCC 자체예측모델(SCoPS) 운영 및 예측정보 제공 .....	107
3.3.1. SCoPS 계절예측정보 제공(매월, 3/6개월) 및 현안 대응 .....	107
3.3.2. 기상청 슈퍼컴 5호기를 활용한 SCoPS 계절예측 운영체계 구축 .....	107
3.3.3. hindcast 기간 확장 .....	108
3.4. 산불예측시스템 운영 및 지역확장 .....	110
3.4.1. 산불예측시스템 운영 및 예측정보 제공 .....	110
3.4.2. 입력자료 개선 및 지역확장 서비스 .....	112
3.4.3. 고해상도 격자자료 생산시스템 시험 구축 .....	116
3.5. 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현 .....	124
3.5.1. 신규 홈페이지용 동적 기후정보 웹 콘텐츠 디지털 자료 생산 시스템 구축 .....	124
3.5.2. 신규 홈페이지용 정적/동적 기후정보 웹 콘텐츠 생산 및 적용 테스트 .....	129

3.5.3. 기후평년값 동적 표출 서비스 .....	131
3.6. MME 계절예측 특성 고려한 기온 계절예측 보정 및 현업활용 기반 마련 .....	133
3.6.1. MME 기온의 계절예측 경향과 실제 기후변화 고려한 기온 예측 보정 방법 개발 .....	133
3.6.2. 자동화 시스템 구축 .....	139
3.7. 고해상도 MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축 .....	142
3.7.1. 국제협력을 통한 계절내예측 운영 기반체계 구축 .....	142
3.7.2. SCoPS 계절내예측자료 생산을 위한 기반체계 구축 .....	152
3.7.3. MME 계절내예측 현업운영을 위한 기반 연구 .....	176
3.7.4. 동아시아 지역 이상기후 예측을 위한 기반 연구 .....	205
3.8. 기후분야 국제협력 및 정책지원 .....	224
3.8.1. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 운영 실무 및 개선 지원 .....	224
3.8.2. WMO S2S 국제조정사무소(ICO) 운영 .....	252
3.8.3. IPCC 등 기후분야 국제회의 참석 및 정부대표단 활동 .....	252
4. 요약 및 결론 .....	271
4.1. APCC 기후예측시스템의 운영 및 예측정보 제공 .....	271
4.2. APCC 기후예측시스템 개선 .....	271
4.3. 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현 .....	273
4.4. MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축 .....	273
4.5. 기후분야 국제협력 및 정책지원 .....	274
사사 .....	276
References .....	277

## 표 차례

Table 2.1. Description of participating models in APCC MME. ....	3
Table 2.2. Methods of APCC MME. ....	4
Table 2.1. Description of participating models in APCC MME (2024). ....	3
Table 2.2. Methods of APCC MME. ....	4
Table 2.3. Defining the SST indices. ....	5
Table 2.4. Lists of verification methods for APCC MME forecast and hindcast. ....	8
Table 2.5. Information for NCEP/DOE Reanalysis 2. ....	8
Table 2.6. Information for CAMS_OPI. ....	9
Table 2.7. Information for OISSTv2 (NOAA) ....	9
Table 2.8. The domain for the verification region. ....	10
Table 2.9. Information for ERA-5 (ECMWF). ....	11
Table 2.10. Information for MERRA2 (GMAO). ....	12
Table 2.11. Information for CPC Global Unified Precipitation. ....	12
Table 2.12. Experimental design for extension of APCC MME hindcast period. ....	14
Table 2.13. Participant model description of APCC BSISO forecast system. ....	18
Table 2.14. Configuration of APCC HPC and KMA supercomputer. ....	20
Table 2.15. Climate monitoring variables by the period of climatological standard normals. ...	25
Table 2.16 . S2S model summary used in the study (as of Jan. 2024). ....	29
Table 2.17. Definition of geographic domain of 8 regions verified in this study. ....	31
Table 2.18. Characteristics of seasonal forecast model from GPCs. ....	34
Table 2.19. Reanalysis data used for verification of real-time forecast. ....	35
Table 2.20. Reanalysis data used for verification of hindcast. ....	35
Table 3.1. Lists of participating in APCC MME for 2022. ....	39
Table 3.2. Lists of participating in APCC MME for 2023. ....	40
Table 3.3. Lists of participating in APCC MME for 2024. ....	41
Table 3.4. List of APCC MME participating models upgraded in 2022: ECCC, HMC, JMA, and KMA. ...	49
Table 3.5. List of APCC MME participating models upgraded in 2024: ECCC and MGO. ....	54
Table 3.6. Description of PKNU CGCMv1.0 model. ....	62
Table 3.7. ACCs of low resolution (2.5° ) and high resolution (1.0° ) DMME hindcast for 2m	

temperature (t2m), precipitation (prec), temperature at 850hPa (t850), and geopotential height at 500hPa (z500). .....	70
Table 3.8. ACCs of low resolution (2.5° ) and high resolution (1.0° ) DMME forecast for 2m temperature (t2m), precipitation (prec), temperature at 850hPa (t850), and geopotential height at 500hPa (z500). .....	71
Table 3.9. ROC scores of low resolution (2.5° ) and high resolution (1.0° ) PMME hindcast for 2m temperature (t2m), precipitation (prec), temperature at 850hPa (t850), and geopotential height at 500hPa (z500). .....	72
Table 3.10. ROC scores of low resolution (2.5° ) and high resolution (1.0° ) PMME forecast for 2m temperature (t2m), precipitation (prec), temperature at 850hPa (t850), and geopotential height at 500hPa (z500). .....	73
Table 3.11. Lists of selected models for customized probabilistic MME over East Asia for 2022 by two criteria. ....	89
Table 3.12. Lists of selected models for customized probabilistic MME over East Asia for 2023 by two criteria. ....	90
Table 3.13. Lists of selected models for customized probabilistic MME over East Asia for 2024 by two criteria. ....	91
Table 3.14. Content of climate outlook of APCC, IRI, TCC, and CariCOF. ....	94
Table 3.15. Definition of APCC ENSO Alert categories. ....	98
Table 3.16. Configuration of APCC HPC and KMA supercomputer. ....	107
Table 3.17. Description of WMO S2S models in pilot system. ....	144
Table 3.18. Description of APCC MME participating models in pilot system. ....	146
Table 3.19. Ensemble method of SCoPS seasonal and subseasonal forecast. ....	153
Table 3.20. Summary of computational resource of running hindcast data. ....	156
Table 3.21. Component model configuration of SCoPS based on POEM/POEM2 .....	165
Table 3.22. List of variables exchanged between component models through OASIS3-MCT coupler (total 36 variables based on namcouple file) .....	166
Table 3.23. Overview of global land surface reanalysis/analysis data. ....	170
Table 3.24. Comparison of soil layer depths between SCoPS model and global land surface reanalysis/analysis data. ....	171
Table 3.25. Definition of sensitivity experiments for estimating climatology. ....	185
Table 3.26. Descriptions of S2S MME and Seasonal MME for skill comparison. ....	198

Table 3.27. Date of data collection from GPCs. ....	224
Table 3.28. Yearly Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of 2m temperature and precipitation. ....	228
Table 3.29. Yearly Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over East Asia of probabilistic real-time forecast of 2m temperature and precipitation. ....	229
Table 3.30. List of upgraded GPC' s seasonal forecast system for WMO LC-LRFMME in 2022~2024. ...	231
Table 3.31. Model description of long-range forecast system from GPC Montreal. ....	233
Table 3.32. Model description of long-range forecast system from GPC CMCC. ....	237
Table 3. 33. List of upgraded WMO LC-LRFMME' s seasonal forecast system in 2022~2024. ...	242
Table 3.34. The list of RCOF that WMO LC was participated in during the periods 2022~2024. ...	244

## 그림 차례

Figure 2.1. Schedule of prediction data collection by participating model in APCC MME. ....	4
Figure 2.2. The domain for the Nino indices (Nino 1+2, Nino 3, Nino 3.4, and Nino 4). ....	5
Figure 2.1. Method and Schedule of prediction data collection by participating models in APCC MME. ....	4
Figure 2.2. The domain for the Nino indices (Nino 1+2, Nino 3, Nino 3.4, and Nino 4). ....	6
Figure 2.3. The domain for the WIOD and EIOD index. ....	6
Figure 2.4. The domain for the ENSO-Modoki index. ....	7
Figure 2.5. Defining the APCC ENSO Alert information. ....	7
Figure 2.6. The domain map for the verification region. ....	10
Figure 2.7. Changes of APCC MME hindcast period during 2008-2023. ....	13
Figure 2.8. Distribution for hindcast period of individual models (bright green) and APCC MME (dark green). ....	14
Figure 2.9. Process for calculation part of East Asian customized probabilistic forecast system (from Kim et al, 2023). ....	15
Figure 2.10. APCC BSISO operating system. ....	17
Figure 2.11. APCC in-house model (SCoPS) operating system. ....	19
Figure 2.12. Difference of initial data for SCoPS hindcast and forecast data. ....	20
Figure 2.13. APCC Fire and Haze Early Warning System (FHEWS). ....	21
Figure 2.14. Sample structures of static and dynamic web pages in new APCC homepage. ....	23
Figure 2.15. Functional requirements of dynamic web contents in APCC homepage request for proposal (RFP). ....	24
Figure 2.16. Flow chart of the linear trend correction T2m automatic program ....	27
Figure 2.17. Forecast procedures at WMO LC-LRFMME. ....	32
Figure 3.1. The operation log for APCC MME prediction from 2022 to 2024. ....	38
Figure 3.2. Examples for outlier near the coastal line in the CWA (CWB) model' s forecast. (top) surface temperature, (bottom) 2-m temperature (from Kim et al., 2023). ....	42
Figure 3.3. ENSO Alert status history for January 2019-November 2024. ....	43
Figure 3.4. ENSO tracker information for each institution (NIWA, APCC, BoM, and NOAA) provided by PMC ( <a href="http://www.pacificmet.net/enso-tracker">www.pacificmet.net/enso-tracker</a> ). ....	44
Figure 3.5. Changes of APCC MME hindcast prediction skill (ACC) during 2013 to 2024 for	

2-m temperature (red) and precipitation (blue). .....	45
Figure 3.6. Changes of APCC MME (Black dot and line) and individual models (Color dot) real-time forecast prediction skill (ACC) during 2008JFM to 2023DJF for temperature at 850hPa (a) and precipitation (b). The sky blue line means the observed Nino3.4 index amplitude and R means the temporal correlation between APCC MME real-time forecast ACC and observed Nino3.4 index. ....	46
Figure 3.7. Distribution of hit rate for APCC probabilistic MME forecast during (1) 2008–2023, (2) 2008–2017, (3) 2014–2023, and (4) 2014–2023 minus 2008–2017: (a) temperature at 850hPa and (b) precipitation. ....	47
Figure 3.8. Changes of ROC score for APCC probabilistic MME forecast during 2013 to 2023. The sky blue line means the observed Nino3.4 index amplitude and R means the temporal correlation between ROC score for APCC probabilistic MME forecast and observed Nino3.4 index: (a) temperature at 850hPa and (b) precipitation. ..	48
Figure 3.9. ACC of individual models (symbols), mean ACC of them (black solid line), and ACC of MME (bar) of global temperature (left) and precipitation (right). ....	50
Figure 3.10. ACC of individual models and MME. ....	51
Figure 3.11. Nino3.4 forecast skill of MRI–CPS3 (solid line) and MRI–CPS2 (dashed line). ...	52
Figure 3.12. Difference between ACC of MME including MRI–CPS3 and MRI–CPS2. Positive values indicate that the skill of MME including MRI–CPS3 is better than that of MRI–CPS2. ....	52
Figure 3.13. ACC of individual models and MME. ....	53
Figure 3.14. Difference between ACC of CanSIPsv3 and CanSIPsv2.1. Positive values indicate that the skill of CanSIPsv3 is better than that of CanSIPsv2.1. ....	55
Figure 3.15. ROC Score of CanSIPsv3 and CanSIPsv2.1 for the globe. ....	55
Figure 3.16. Nino3.4 forecast skill of CanSIPsv3 (solid line) and CanSIPsv2.1 (dashed line). ..	56
Figure 3.17. ACC of individual models (symbols), mean ACC of them (black solid line), and ACC of MME (bar) of global temperature (left) and precipitation (right). ....	56
Figure 3.18. Difference between ACC of MME including CanSIPsv3 and CanSIPsv2.1. Positive values indicate that the skill of MME including CanSIPsv3 is better than that of CanSIPsv2.1. ....	57
Figure 3.19. Nino3.4 forecast skill of MME including CanSIPsv3 (solid line) and CanSIPsv2.1 (dashed line). ....	58

Figure 3.20. Mean bias distribution of MGOAM2.4. ....	59
Figure 3.21. Timeseries of Nino3.4 forecast of MGOAM2.4. ....	59
Figure 3.22. Nino3.4 forecast skill of MGOAM2.4. ....	60
Figure 3.23. ACC of individual models (symbols), mean ACC of them (black solid line), and ACC of MME (bar) of global temperature (left) and precipitation (right). ....	60
Figure 3.24. Difference between ACC of MME including MGOAM2.4 and MME excluding MGOAM2.4. Positive values indicate that the skill of MME including MGOAM2.4 is better than that of MME excluding MGOAM2.4. ....	61
Figure 3.25. Seasonal Anomaly Correlation Coefficients (ACC) of PKNU CGCMv1.0 (colored circle), APCC MME participating models (gray circle), and APCC MME (bar). Average skill of individual APCC MME participating models is shown by lines. ....	63
Figure 3.26. Monthly Temporal Correlation Coefficients (TCC) of Nino3.4 for PKNU CGCMv1.0 (black solid line), APCC MME participating models (gray solid line), and APCC MME (red solid line). Average skill of individual APCC MME participating models is shown in red dashed lines. ....	63
Figure 3.27. Seasonal Anomaly Correlation Coefficients (ACC) difference (%) between MME with PKNU CGCMv1.0 (DMME_wPKNU) and MME without PKNU CGCMv1.0 (DMME_woPKNU) with respect to DMME_wPKNU. ....	64
Figure 3.28. Seasonal Relative Operating Characteristics (ROC) scores difference (%) between PMME with PKNU CGCMv1.0 (PMME_wPKNU) and PMME without PKNU CGCMv1.0 (PMME_woPKNU) with respect to PMME_woPKNU. ....	65
Figure 3.29. (Left) Monthly Temporal Correlation Coefficients (TCC) of Nino3.4 for MME with PKNU CGCMv1.0 (orange solid line) and MME without PKNU CGCMv1.0 (orange dashed line) with respect to lead times. (Right) Monthly TCCs difference (%) between DMME_wPKNU with respect to DMME_woPKNU. ....	66
Figure 3.30. APCC Climate Outlooks for the Globe and the Pacific Islands Countries. ....	69
Figure 3.31. Yearly number of papers and news articles using APCC's seasonal climate information. ....	69
Figure 3.32. Seasonal distribution (a) of RMSE for 2-m temperature (top) and precipitation (bottom) in each experiment and the ratio of RMSE difference (b) from CTR (from Kim et al., 2023). ....	74
Figure 3.33. Trends of predicted temperature for each experiment during hindcast period and	

observed temperature during 1991–2020 (from kim et al., 2023). .....	75
Figure 3.34. Changes of ACC for real-time forecast of MME based on 1991–2010 hindcast period (Recent_MME, black line) and 1993–2016 hindcast period (New_MME, blue line) during 2021–2023. The right y-axis and shaded area(red: positive, blue: negative) indicate ACC difference between Recent_MME and New_MME: (a) 2-m temperature and (b) precipitation. ....	84
Figure 3.35. Changes of RMSE for real-time forecast of MME based on 1991–2010 hindcast period (Recent_MME, black line) and 1993–2016 hindcast period (New_MME, blue line) during 2021–2023. The right y-axis and shaded area(red: positive, blue: negative) indicate RMSE difference between Recent_MME and New_MME: (a) 2-m temperature and (b) precipitation. ....	85
Figure 3.36. Regression between the first two PCs of ENSO and precipitation anomaly over East Asia in (a) JFM to (l) DJF (from Kim et al., 2023). ....	87
Figure 3.37. Regression between area-averaged tropical Western Pacific precipitation anomaly and precipitation anomaly over East Asia in (a) JFM to (l) DJF (from Kim et al., 2023). ....	88
Figure 3.38. The structure of data receive alarm and automated pre-processing system process. ....	92
Figure 3.39. The report on the 4th APCC MME Model Providers’ Meeting. ....	93
Figure 3.40. APCC MME seasonal forecast page updated on 15th April 2022. ....	93
Figure 3.41. Results of 5-scale questionnaire on APCC Climate Outlook subscribers’ satisfaction. ....	95
Figure 3.42. New version of APCC Climate Outlook. ....	96
Figure 3.43. Monthly forecast information in APCC Climate Outlook. ....	97
Figure 3.44. Example of BSISO composite map displayed on the website. ....	101
Figure 3.45. Contents of BSISO monitoring. ....	102
Figure 3.46. Contents of BSISO forecast. ....	103
Figure 3.47. Contents of BSISO verification. ....	104
Figure 3.48. BSISO phase diagram graphic code before(left) and after(right) improvement. ....	106
Figure 3.49. Run-time for BSISO graphic code of phase diagram. ....	106
Figure 3.50. Flow chart of producing the SCoPS initial and forecast data. ....	108
Figure 3.51. Example logfile of SCoPS initialization for 2014-01-10. ....	109

Figure 3.52. Nino3.4 index (line) and difference(shading) between forecast using Argo and hindcast using WOD as ocean initial condition for the period of 2014. ....	109
Figure 3.53. Indonesia FHEWS results (Issued: 2024-07) .....	110
Figure 3.54. Malaysia FHEWS results (Issued: 2024-11) .....	111
Figure 3.55 Results of comparing individual model resolution differences .....	113
Figure 3.56. Comparison results of GFED3.1 and 4.1 (July, 1998). .....	114
Figure 3.57 Monthly precipitation comparison results by region .....	115
Figure 3.58 EOF results of Malaysia .....	116
Figure 3.59 2019 Actual Fire Occurrence Areas and FHEWS Results .....	117
Figure 3.60 Flow chart for FHEWS .....	118
Figure 3.61 Summary of Observation Data Processing Results .....	118
Figure 3.62 Summary of Individual Model Data Processing Results for the Hindcast Period ..	119
Figure 3.63 Summary of Individual Model Data Processing Results for the Forecast Period ..	119
Figure 3.64 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2024-04)	120
Figure 3.65 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2024-05)	120
Figure 3.66 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2024-06)	121
Figure 3.67 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2024-07)	121
Figure 3.68 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2023-04)	122
Figure 3.69 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2023-05)	122
Figure 3.70 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2023-06)	122
Figure 3.71 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2023-07)	123
Figure 3.72. Explanation of input data for climate outlook summary. ....	129
Figure 3.73. Example of climate forecast web contents in current homepage. ....	130
Figure 3.74. Example of climate forecast web contents in new homepage. ....	131
Figure 3.75. Climate starndard normals in climate monitoring webpage. ....	132
Figure 3.76. Monthly (January-Jun) spatial patterns of (left) corrected forecast, (middle) original forecast, and (right) observation of 2-m temperature anomalies averaged from 2013 to 2022 (dot: 10 percentile of both side, from Chap. 3.6 in 김유진 등, 2023). ....	134
Figure 3.77. Monthly (July-December) spatial patterns of (left) corrected forecast, (middle) original forecast, and (right) observation of 2-m temperature anomalies averaged from 2013 to 2022 (dot: 10 percentile of both side, from Chap. 3.6. in 김유진 등,	

2023)	134
Figure 3.78. Linear trend of 2-m air temperature from (upper) observations, (left) ERA5, (right) NCEP2, and (lower) model during 1991-2010. Model' s linear trend are mean of individual model' s linear trend produced at 2023.	136
Figure 3.79. Seasonal mean of (a) probability forecasts of T2m PMME above normal category, (b) normalized anomalies of T2m NCEP2 observation, and (c) normalized anomalies of T2m ERA5 observations, averaged East Asia, Northern Hemisphere, tropical region and the globe in the real-time forecast period.	137
Figure 3.80 Seasonal mean correction coefficient for linear trend correction.	138
Figure 3.81. Monthly ACC skills of original (purple) and corrected (green) T2m and differences (black) between them. Monthly 10-years (2014-2023) ACCs are averaged.	139
Figure 3.82. Graphical information of corrected T2m forecasts in East Asia for 2024 SON season. (first row) Original DMME forecasts, (second row) corrected DMME forecasts, (third row) original PMME forecasts, (fourth row) corrected PMME forecasts, and (fifth row) correction coefficients, $\alpha$ , produced at (left) one-month, (middle) two-month, and (right) three-month lead.	139
Figure 3.83. Graphical information of corrected T2m forecasts in East Asia for 2024 SON season. Monthly 10-year-averaged (first row) Original DMME forecasts, (second row) corrected DMME forecasts, (third row) original PMME forecasts, (fourth row) corrected PMME forecasts, and (fifth row) correction coefficients, $\alpha$ , produced at (left) one-month, (middle) two-month, and (right) three-month lead.	141
Figure 3.84. The 5th APCC Multi-Model Ensemble Model Providers' Meeting(Aug. 29- Sep. 1, 2023, Busan).	143
Figure 3.85. APCC MME Model Providers. The red box denotes an institute that has agreed to provide the subseasonal data.	143
Figure 3.86. MME subseasonal forecast procedures in pilot system.	145
Figure 3.87. Observations and 1~4 weeks subseasonal (deterministic and probabilistic) MME forecasts of temperature at 2m during 4~25 July 2022.	145
Figure 3.88. Python API data download program for ECMWF real-time Forecast.	147
Figure 3.89. Subseasonal forecast/hindcast dataset of APCC.	148
Figure 3.90. Subseasonal forecast/hindcast dataset of ECMWF.	149

Figure 3.91. Subseasonal forecast/hindcast dataset of HMC. ....	149
Figure 3.92. Subseasonal forecast/hindcast dataset of NCEP. ....	150
Figure 3.93. Target weeks of MME Subseasonal forecast pilot system. ....	151
Figure 3.94. Directories of MME subseasonal forecast pilot system. ....	151
Figure 3.95. Model description summary of SCoPS seasonal and subseasonal forecast system. ...	152
Figure 3.96. Example of SCoPS subseasonal forecast run script. ....	155
Figure 3.97. Run status of SCoPS subseasonal hindcast. ....	156
Figure 3.98. Configuration of initial forecast ensembles and restart run for real-time forecast of SCoPS. ....	157
Figure 3.99. Bias in long-term mean (climatology) of T2M at 1 and 4 weeks for 13 models, initialized in JJA. ....	158
Figure 3.100. Temporal evolution of biases in long-term mean (LTM) and long-term standard-deviation (KTS) of T2M and PREC over globe increasing lead days from 1 to 32 for 13 models, initialized in JJA. Bias is defined as a mean value of differences relative to the observed LTM and LTS over globe during all year around. ....	159
Figure 3.101. (upper) weekly ACC and accumulate ACC for 4 weeks of the global PREC from 9 models, initialized in JJA. (bottom) weekly ACC of the Australian precipitation from 9 models, initialized in DJF and JJA. ....	160
Figure 3.102. Relative skill difference (%) of mean of all models and MME predictions for T2M, PREC, and Z500 with SCoPS and without SCoPS of temperature with 3-4W means and 5-6W means, initialized in DJF. ....	161
Figure 3.103. Impact of land surface initialization on temperature prediction skill [Fig. 1 from Koster et al (2010)]. ....	163
Figure 3.104. Impact of land surface initialization on precipitation and temperature prediction skill [Figs. 3 and 8 from Koster et al (2011)]. ....	164
Figure 3.105. Comparison of various initial conditions' impacts on temperature predictability[Fig. 1 from Richter et al (2024)]. ....	165
Figure 3.106. Flow diagram of (left) atmosphere-ocean coupled initialization and (right) seasonal prediction in SCoPS. ....	167
Figure 3.107. Comparison of between (left) single bucket scheme and (right) multi-layer soil hydrology scheme (cf. Hagemann and Stacke (2014)). ....	169

Figure 3.108. Schematic diagram of ensemble cycle land surface initialization system with 5 ensemble members and 1-day exchange cycle. ....	174
Figure 3.109. Contributing centers in S2S and SubC projects; S2S data provider (black circle), Archiving data centre (blue circle), WMO Lead Center for long-range forecast MME (WMO LC-LRFMME) and sub-seasonal prediction MME (WMO LC-SSPMME). ....	177
Figure 3.110. S2S MME prediction systems from WMO LC-SSPMME, SubC, and IRI. ....	178
Figure 3.111. S2S model description used in the analysis for climatology. ....	179
Figure 3.112. S2S MME prediction systems from WMO LC-SSPMME, SubC, and IRI. ....	180
Figure 3.113. Weekly accumulated precipitation (mm/week) for climatology during the period 2003-2015. ....	180
Figure 3.114. Bias in long-term mean (climatology) of PREC at 1 and 4 weeks for 12 models. ....	181
Figure 3.115. Temporal evolution of biases in long-term mean (LTM) and long-term standard-deviation (KTS) of T2M, PREC, and Z500 over globe and East Asia, increasing lead days from 1 to 32 for 13 models. Bias is defined as a mean value of differences relative to the observed LTM and LTS over globe during all year around. ....	182
Figure 3.116. Pattern correlation coefficient (PCC) and root mean square error (RMSE) in long-term mean of T2M, PREC, and Z500 over globe and East Asia, increasing lead days from 1 to 32 for 13 models. ....	183
Figure 3.117. Relative skill difference of clim in terms of annual mean ACC and RMSE for the period 2002-2016 related to clim3w for each model and MME(%) of T2M, PREC, and Z500 over 8 regions. ....	185
Figure 3.118. Relative skill difference of clim in terms of annual and seasonal mean ACC and RMSE for the period 2002-2016 related to clim3w for MME(%) of T2M, PREC, and Z500 over 8 regions. ....	187
Figure 3.119. Diagram for individual models when Thursday is the MME forecast day. ....	188
Figure 3.120. Diagram for individual models when Monday is the MME forecast day. ....	188
Figure 3.121. ACC of individual models and MME T2M prediction over globe for 4 lead weeks depending on MME target forecast day from Thursday to Monday. The skill difference between MME forecasts at target day on Thursday and Monday is displayed with histogram. ....	189

Figure 3.122. ACC of individual models and MME T2M prediction over 8 regions for 4 lead weeks at target day on Thursday and Monday. ....190

Figure 3.123. ACC of individual models and MME T2M prediction over globe for 4 lead weeks depending on MME target forecast day from Thursday to Wednesday. ....191

Figure 3.124. MME forecast day at which prediction skill for MME becomes higher than that for ECMWF for each variable and region for 4 lead weeks. ....191

Figure 3.125. ACC for MME summer prediction of global temperature and precipitation with different number of participating models based on Monte-Carlo simulation. ....192

Figure 3.126. Relative skill difference of MME prediction with N models, with respect to N-1 models, of T2M and PREC for each week and region. ....192

Figure 3.127. TCC of 8 models and MME predictions for T2M at 4 weeks. ....194

Figure 3.128. Weekly ACC and accumulate ACC for 4 weeks of the globe temperature, precipitation and Z500 from 8 models and MME prediction. ....195

Figure 3.129. ACC of weekly mean T2M over globe for 8 individual models and multi-model ensemble. ....195

Figure 3.130. ACC of weekly mean prediction for ECMWF (blue line), average of 8 individual models (Mean, black line), and MME (red line) over globe for each variable and season. MME efficiency related to ECMWF (blue bar) and Mean (grey bar) for 8 lead weeks is displayed with histogram. ....196

Figure 3.131. MME efficiency related to mean skill of T2M, PREC, and Z500 prediction from 8 individual models for 4 lead weeks over 8 regions. ....197

Figure 3.132. Temporal correlation coefficient of 8 models for global T2M at 1/2/3/4 weeks, 3-4 week means(W34), and 1-4 week means (Month). ....199

Figure 3.133. Weekly ACC of the global T2M, PREC, Z500 and SST. 3-4 week means (W34) and 1-4 week means (Month) are also displayed with red dashed- and dotted-line. ....200

Figure 3.134. (a) TCC of 1-4 week means S2S MME prediction, (b) 1-month lead seasonal MME prediction, and (c) skill difference between (a) and (b) for T2M, PREC, Z500 and SST. ....201

Figure 3.135. Weekly ACC of 1-4 week means S2S MME prediction, 1-month lead seasonal MME prediction, and their relative skill difference for T2M, PREC, and Z500 for each region. ....202

Figure 3.136. Relative skill difference of 1-4 week means S2S MME prediction with respect to 1 week (white histogram) and 1-month lead seasonal MME prediction (blue histogram) for T2M, PREC, and Z500. ....	202
Figure 3.137. Kolmogorov-Smirnov test of observed weekly mean PREC for the period 2003-2015 with 5% significance level. ....	204
Figure 3.138. Kolmogorov-Smirnov test of T2M, PREC, and Z500 at 1 and 4 weeks from ECMWF and UKMO for the period 2003-2015 with 5% significance level. ....	205
Figure 3.139. Time series of monthly number of cold (upper) and warm (lower) extreme days since 1979, averaged in East Asia [70° E-155° E, 10° N-65° N]. Lower than 10 percentile and upper than 90 percentile 2-m temperature are defined as cold and warm extreme days, consecutively. ....	206
Figure 3.140. Monthly number of cold extreme days in hindcast period [1991-2010] over East Asia. ....	207
Figure 3.141. Monthly number of cold extreme days in the real-time forecast period [2013-2023] over East Asia. ....	208
Figure 3.142. Monthly number of warm extreme days in hindcast period [1991-2010] over East Asia. ....	209
Figure 3.143. Monthly number of warm extreme days in the real-time forecast period [2013-2023] over East Asia. ....	210
Figure 3.144. Differences of monthly number of cold extreme days between real-time forecast and hindcast period. ....	211
Figure 3.145. Differences of monthly number of cold extreme days between real-time forecast and hindcast period ....	212
Figure 3.146. Correlation coefficients between number of extreme cold days and SCM forecast anomalies of T850, U850, and V850, during 2010-2023. ....	213
Figure 3.147. Correlation coefficients between number of extreme warm days and SCM forecast anomalies of T850, U850, and V850, during 2010-2023. ....	213
Figure 3.148. Monthly correlation coefficients between number of extreme cold days and SCM forecast anomalies of T850 in East Asia during 2010-2023. ....	214
Figure 3.149. Monthly correlation coefficients between number of extreme cold days and SCM forecast anomalies of V850 in East Asia during 2010-2023. ....	214
Figure 3.150. Monthly correlation coefficients between number of extreme warm days and	

SCM forecast anomalies of T850 in East Asia during 2010–2023. ....	216
Figure 3.151. Monthly correlation coefficients between number of extreme warm days and SCM forecast anomalies of V850 in East Asia during 2010–2023. ....	217
Figure 3.152. Number of warm extreme days in August, 2022 from observation .....	218
Figure 3.153. Monthly mean T2m anomaly from (a) observation and (b) ECMWF forecasts start from 3, AUG, 2022. ....	219
Figure 3.154. Weekly means of T2m anomaly from observation in August 2022. ....	219
Figure 3.155. Weekly means of T2m anomaly from ECMWF. 3, 10, 17, 24, August, 2022 are start day of forecasts .....	220
Figure 3.156. Number of cold extreme days in January, 2011 from observation .....	221
Figure 3.157. Monthly mean T2m anomaly from (a) observation and (b) ECMWF forecasts start from 2, January, 2011, and (c) Seoul forecasts start from 1, January, 2011. ...	222
Figure 3.158. Weekly means of T2m anomaly from observation in January, 2011. ....	222
Figure 3.159. Weekly means of T2m anomaly from ECMWF. 2, 9, 16, 26, January, 2011 are start day of forecasts .....	223
Figure 3.160. Weekly means of T2m anomaly from ECMWF. 1, 9, 17, 25, January, 2011 are start day of forecasts .....	223
Figure 3.161. Monthly Schedule for WMOLC .....	225
Figure 3.162. Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of 2m temperature for three terciles, i.e., a) the above normal, b) near normal and below normal for the period JFM2017–SO2024. ROC score for PMME prediction is indicated by red line. The grey dots indicate the ROC score of the WMO LC-LRFMME individual GPCs and the blue dot indicates ECMWF. ....	226
Figure 3.163. Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of precipitation for three terciles, i.e., a) the above normal, b) near normal and below normal for the period JFM2017–SON2024. ROC score for PMME prediction is indicated by red line. The grey dots indicate the ROC score of the WMO LC-LRFMME individual GPCs and the blue dot indicates ECMWF. ....	227
Figure 3.164. NINO3.4 forecast from CanSIPsv2.1 and CanSIPsv3.0 for the periods of 1993–2009. ....	232

Figure 3.165. Global average of temporal correlation coefficient of (a) 2m temperature and (b) precipitation between CanSIPsv2.1 and CanSIPsv3.0 from GPC Montreal and difference of Montreal between CanSIPsv2.1 and CanSIPsv3.0. Spatial distribution of ACC of (c, e) 2m temperature and (d, f) precipitation for GPC Montreal' s seasonal forecast system in JJA season for the periods 1993-2009. ....234

Figure 3.166. ACC aggregated over globe and spatial distribution of ACC of (a, c) 2m temperature and (b, d) precipitation for GPC CMCC' s seasonal forecast system in NDJ season for the periods 1993-2009. ....236

Figure 3.167. Anomaly correlation coefficient (ACC) and Root Mean Square Error (RMSE) skill score for Nino-3.4 SST (regional average over 5° S-5° N, 170-120° W) during the forecast (2013-2021) and hindcast (1993-2009, 2003-2017) periods. ....239

Figure 3.168. Time series of the Nino-3.4 SST. Forecast and observation are highlighted with red and gray lines, respectively. The difference between forecast and observation is indicated by bar. Panels (a) shows GPC Pune and (b) shows GPC Tokyo. ....240

Figure 3.169. Change of logo for seasonal forecast graphic in GPC Seoul. ....242

Figure 3.170. Evolution of SASCOF. ....244

Figure 3.171. Group photos of SASCOF-28. ....245

Figure 3.172. Activity in SASCOF-28. ....245

Figure 3.173. Examples of the use of seasonal climate information from WMOLC-LRFMME (I). ...246

Figure 3.174. Group photos of ASEANCOF-23 and examples of the use of seasonal climate information from WMOLC-LRFMME. ....247

Figure 3.175. Progress of improvement in WMOLC-LRFMME. ....248

Figure 3.176. Samples of (a) Lambert Conformal projecion and (b) Stereographic projection. 249

Figure 3.177. Sea ice extent on WMOLC website. ....250

Figure 3.178. The results of the surveys to improve WMOLC-LRFMME website. ....251

Figure 4.1. Long-term implement system for APCC seamless prediction. ....274

# 1. 서론

아시아·태평양경제협력체 기후센터(APCC, APEC Climate Center)는 2005년 설립 이후 다중모델앙상블(MME, Multi-Model Ensemble)을 활용한 장기 계절예측기술 개발 및 개선에 많은 노력을 기울여왔으며 그 결과 세계 우수 현업기관 및 연구기관의 다양한 전지구모델을 활용한 기후예측시스템을 구축하여 매일 홈페이지를 통해 기후감시 정보와 장기 계절 예측(3/6개월) 및 검증정보를 제공하고 있다(Min et al. 2014; Min et al. 2017).

효율적 현업운영을 위해 과거 3개년(2018~2020)에 걸쳐 설립 초기에 개발된 자동예측시스템(AFS, Automated Forecast System) 개선이 이루어졌으며, 2019년 새로운 서버 도입 및 개선된 AFS의 운영으로 현업 효율성이 증가되고(운영시간 49% 감축) 이로써 예측정보 제공시기를 앞당길 수 있었다(25일→20일). 2022년에는 예측정보 제공시기를 20일에서 15일로 보다 앞당기고, 고해상도 MME 계절예측시스템을 구축하여 2022년 9월부터 현업운영 중에 있어 지속적인 MME 예측정보의 활용성 및 경쟁력 강화에 노력하고 있다. 이와 함께 사용자가 편리하고 친근하게 접근할 수 있도록 기후정보에 대한 개선을 꾸준히 진행 중이다.

지구 온난화로 인한 극한 기상·기후의 빈발과 이에 따른 사회·경제적 피해가 급증하면서 계절내예측에 대한 국내외 관심과 수요가 증가하고 있다. 이에 전 세계적으로 다양한 국제협력을 통해 기후예측 모델을 이용한 계절내예측 정보를 생산·활용하려는 시도가 점차 확대되고 있으며(WMO LC-SSPMME, SubC, IRI 등), APCC는 다양한 계절예측 정보를 수집·통합하여 고품질의 다중모델앙상블 예측정보를 제공해 온 전문기관으로서, 예측정보의 실효성·활용성 증대를 위해 계절내예측으로 연구를 확장하고자 한다. 이를 위해 2023년부터 2년에 걸쳐 MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축 과제를 수행하였다. 국내외 계절내예측자료 및 예측시스템에 대한 현황 파악을 시작으로 상이한 계절내예측 정보를 통합하고 생산하기 위한 다양한 민감도 실험 및 Pilot System 구축을 통해 계절내예측 기반 체계를 마련하였다. 또한 계절내예측 MME 기술개발 및 실시간 계절내예측 자료 수집을 위한 APCC 계절예측 자료제공기관들과의 국제적인 협력을 적극적으로 추진하였다. 본 연구를 통해 특히 계절내예측 규모에서의 MME 중요성과 효율성 등을 강조하였으며, APCC 예측모델(SCoPS)의 계절내예측 활용성을 진단하였다. 이를 통해 APCC는 기후예측의 신뢰성을 높이고, 다양한 분야에서의 활용 가능성 확장을 통해 최종적으로 기상-기후간 이음새없는 예측정보서비스를 제공하고자 한다.

따라서, 6단계(2022~2024) 사업에서는 크게 다음의 다섯 가지 주제로 분류하여 1) APCC 기후예측시스템의 운영 및 예측정보 제공, 2) APCC 기후예측시스템 개선, 3) 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현, 4) MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축, 5) 기후분야 국제협력 및 정책지원에 대한 과제를 수행하였다.

기후예측시스템 개선에서는 고해상도 MME 검증시스템 구축, MME hindcast 기간 확장, 기후전망 개선, BSISO (Boreal Summer Intra-Seasonal Oscillation) 계절내예측시스템 개선, APCC 자체예측모델(SCoPS) 운영체계 개선, 동남아시아 산불예측시스템 개선 및 말레이시아 지역확장, MME 기온 계절예측 보정 과제가 수행되었다. 이와 함께 신규 홈페이지 구축과 관련하여 APCC MME 계절예측 정보를 보다 이해하기 쉽고 편리하게 활용할 수 있도록 동적 기후정보

웹 콘텐츠를 제공하여 APCC MME 계절예측 정보의 활용성을 증진시키고자 하였다.

기후분야 국제협력 및 정책지원에서는 2011년부터 APCC의 MME 전문 기술력을 바탕으로 기상청과 함께 WMO (World Meteorological Organization) 장기예보 선도센터를 운영하여 WMO 회원국의 요구에 부합하는 고품질 기후예측 서비스를 제공하고 있으며, 기후예측 분야 국제 협력에서 국제적 위상 확보와 협업체계 구축을 위해 WMO S2S (Subseasonal-to-Seasonal Prediction Project) 국제조정사무소(ICO, International Coordination Office)를 운영하였고, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), WMO 지역기후포럼 등의 국제회의에 참석하여 기후분야 전문가 그룹과 지속적으로 소통하고 있다.

본 보고서에서는 현재까지 운영 중에 있는 APCC 기후예측 현업에 대한 전반적인 내용을 포함하면서 이와 함께 현업 시스템 개선 및 관련 연구, 국제협력 및 정책지원 과제 순으로 기술하였다.

## 2. 방법 및 자료

### 2.1. MME 계절예측시스템 운영 및 개선

#### 2.1.1. 저해상도/고해상도 MME 계절예측시스템 운영

APCC는 11개국 15개 기상·기후 관련 우수 현업·연구기관의 협조를 통해 신뢰도 높은 3·6개월 계절예측 정보를 생산·제공하고 있다. 이를 위해 각 현업·연구기관에서 운영하는 기후예측 모델에서 생산된 예측 자료를 수집하고 있으며, 2024년 기준 APCC에서 수집하는 각 기관별 예측 자료는 다음과 같다(Table 2.1).

Table 2.1. Description of participating models in APCC MME (2024).

기관 (국가)	모델명	모델해상도	양상불 개수 (F/H)	Hindcast 기간	참고문헌
APCC (한국)	SCoPS	T159L31	10/10	1982-2013	Ham <i>et al.</i> (2019)
BCC (중국)	CSM1.1m	T106L26	24/24	1991-2015	Wu, T., <i>et al.</i> (2014)
BOM (호주)	ACCESS-S2	N216L85	11/27	1981-2018	Wedd <i>et al.</i> (2022)
CMCC (이탈리아)	SPS3.5	0.5° × 0.5°, L46	50/40	1993-2016	Gualdi <i>et al.</i> (2020)
CWA (대만)	TCWAIv1.1	T119L40	30/30	1991-2020	Paek <i>et al.</i> (2015)
ECCC (캐나다)	CanSIPsv3	T63L49	40/40	1990-2020	Diro <i>et al.</i> (2024)
HMC (러시아)	SL-AV	0.72° × 0.9°, L96	41/11	1991-2015	Fadeev <i>et al.</i> (2019)
JMA (일본)	JMA/MRI-CPS3	T319L100	50/10	1991-2020	Hirahara <i>et al.</i> (2023)
KMA (한국)	GloSea6GC3.2	N216L85	84/28	1993-2016	Kim <i>et al.</i> (2019)
MetFR (프랑스)	Sys 8	T359L127	51/25	1993-2016	Batté <i>et al.</i> (2021)
MGO (러시아)**	MGOAM2.4	T63L25	10/10	1991-2020	Meleshko <i>et al.</i> (2014)
NASA (미국)	GEOS-S2S-2.1	0.5° × 0.5°, L72	10/4	1981-2016	Molod <i>et al.</i> (2020)
NCEP (미국)	CFSv2	T126L64	20/20	1982-2010	Saha <i>et al.</i> (2014)
PNU/RDA (한국)***	CGCM v2.0	T42L18	35/35	1980-2022	Ahn <i>et al.</i> (2018)
UKMO (영국)	GloSea6	N216L85	42/28	1993-2016	Williams <i>et al.</i> (2018)

\* 2023년 10월 CWB(Central Weather Bureau)에서 CWB(Central Weather Administration)으로 변경됨

\*\* MGO는 hindcast 기간 불일치 등의 이유로 APCC MME에 불참했으나, 2024년 모델 개선을 통해 MME에 참여함

\*\*\* 2023년 6월 PNU(Pusan National University)에서 PNU/RDA(Rural Development Administration)으로 변경됨

각 기관의 예측 자료의 수집 방식은 참여기관에서 운영하는 서버에서 APCC가 해당 예측 자료를 직접 다운로드하는 방식과 APCC ftp 서버에 각 참여기관이 예측 자료를 업로드하는 방식으로 수행된다. 각 참여기관별 예측 자료를 수집하는 방식 및 일정은 다음 그림과 같다 (Figure 2.1).

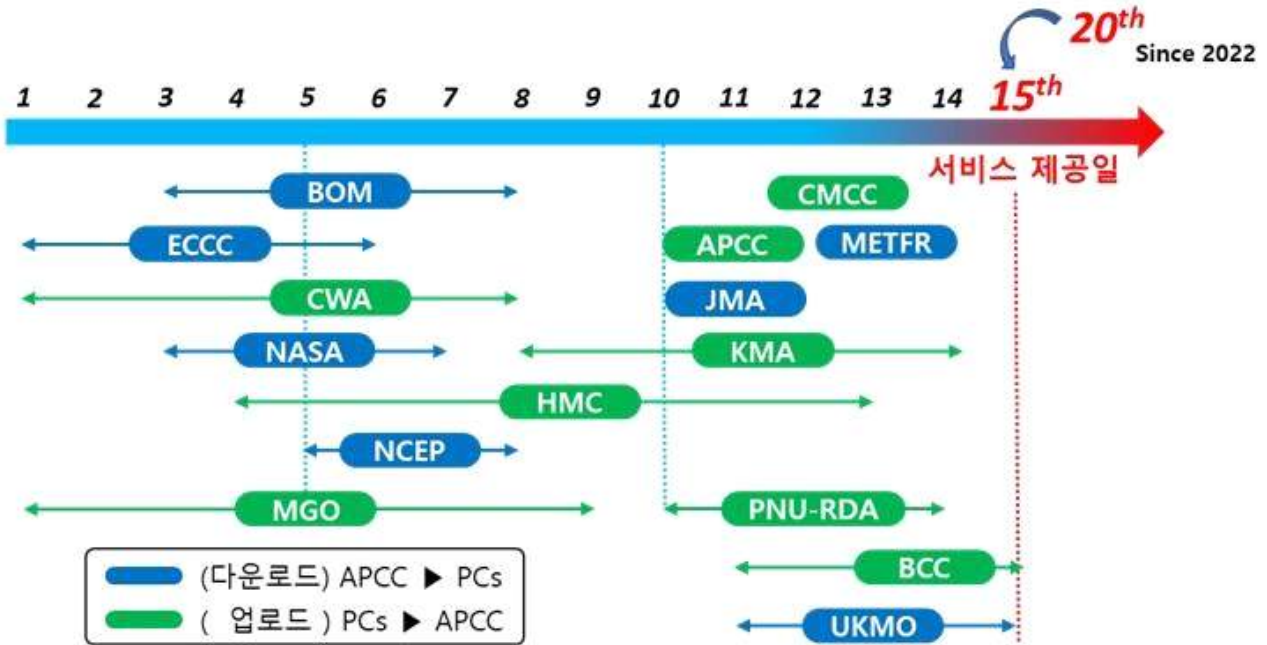


Figure 2.1. Method and Schedule of prediction data collection by participating models in APCC MME.

위와 같이 수집한 각 참여기관별 예측 자료는 자료의 형식을 일정한 규격으로 표준화하는 APCC 전처리 체계를 통해  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  해상도(고해상도)와  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  해상도(저해상도)의 두 가지 해상도로 재격자화하여 병행 생산·제공하고 있다. 이러한 체계를 통해 생산된 참여모델별 예측 표준화 자료를 활용하여 아래와 같은 결정론적(deterministic) 및 확률론적(probabilistic) 다중모델앙상블(Multi Model Ensemble, MME) 기법을 적용한 예측정보를 APCC MME 계절예측 시스템(Automated Forecast System, AFS)을 통해 산출한다(Table 2.2).

Table 2.2. Methods of APCC MME.

기법	명칭	설명
Deterministic	SCM	Simple average of individual model forecasts with equal weighting (Doblas-Reyes <i>et al.</i> 2000; Peng <i>et al.</i> 2002; Palmer <i>et al.</i> 2004; Wang <i>et al.</i> 2009)
Probabilistic	GAUS	Non-calibrated probabilistic MME with model weights being inversely proportional to the random error in the forecast probability (Min <i>et al.</i> 2009)

결정론적 및 확률론적 MME 기법을 적용한 계절예측 자료는 예측 분포장, 해수면 온도(sea surface temperature, SST) 기반의 엘니뇨 남방 진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 지수 예측 등의 다양한 콘텐츠 형태로 가공·생산되고 있다. SST 기반의 ENSO 지수 예측에는 Table 2.3에서 정의하는 ENSO 관련 지수가 있으며, 그 밖에 엘니뇨-라니냐 영향 지역인 인도·태평양 지역의 해수면 온도 편차(anomaly)장, 해수면 온도의 Hovmoller diagram (경도-시간 cross section), ENSO 발생 확률 정보 및 경보 정보 등과 함께 생산·제공되고 있다. 여기서, 해수면 온도 지수를 정의하는 영역은 Figure 2.2~2.4, ENSO 경보 정보는 Figure 2.5와 같이 정의하고 있다. ENSO 경보 정보의 경우 ONI(Oceanic Niño Index) 지수를 활용하여 ENSO 상황·예측에 대한 객관적 기준(Criteria)을 바탕으로 2020년 구축된 ENSO 경보 시스템을 통해 생산되고 있으며, 해당 시스템을 운영해오면서 제기된 몇 가지 개선사항들을 반영하기 위해 민감도 실험 등의 다양한 노력을 수행하여 2022년, ENSO 경보 기준을 개선하고, 월 1회(매월 15일)에서 월 2회(매월 15일, 말 일) 제공하는 등 시스템 개선이 이루어진 바 있다(김유진 외 2021; 김유진 외, 2022).

매년 APCC MME 계절예측 정보의 활용성을 강화하기 위해 사용자 수요조사를 시행하고 있으며, 예측정보의 조기 제공을 요구하는 다수 사용자의 수요(2020년)를 반영하여 참여기관들의 협조와 시스템 개선 등을 통해 2022년 4월부터 예측정보 제공일을 매월 20일에서 15일로 앞당긴 바 있다(김유진 외, 2022). 이로부터 APCC MME 계절예측 정보는 매월 15일 APCC 누리집(www.apcc21.org)을 통해 제공하고 있다.

Table 2.3. Defining the SST indices.

구분	지수 설명
Nino 지수	Nino 1+2 (0-10° S, 80° -90° W)
	Nino 3 (5° S-5° N, 90° -150° W)
	Nino 4 (5° S-5° N, 150° -160° W)
	Nino 3.4 (5° S-5° N, 120° -170° W)
인도양 쌍극자 (IOD) 지수	IOD = WIOD - EIOD
	WIOD (10° S-10° N, 50° -70° E)
	EIOD (10° S-0° , 90° -110° E)
ENSO-Modoki 지수	EMI = A - 0.5 × (B + C)
	A (10° S-10° N, 165° E-140° W)
	B (15° S-5° N, 110° W-70° W)
	C (10° S-20° N, 125° E-145° E)

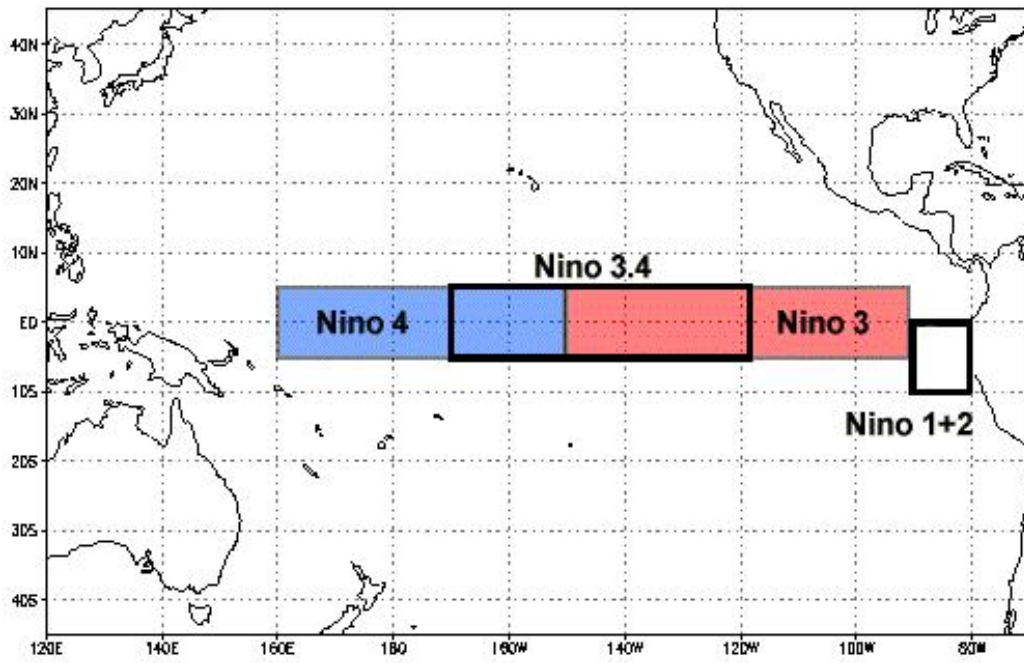


Figure 2.2. The domain for the Niño indices (Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4, and Niño 4).

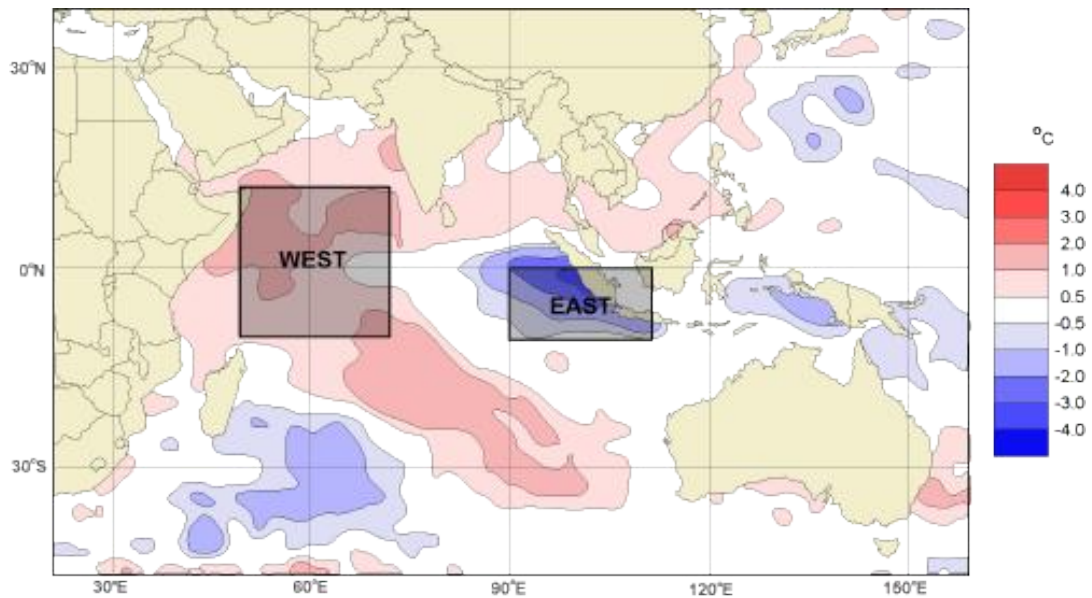


Figure 2.3. The domain for the WIOD and EIOD index.

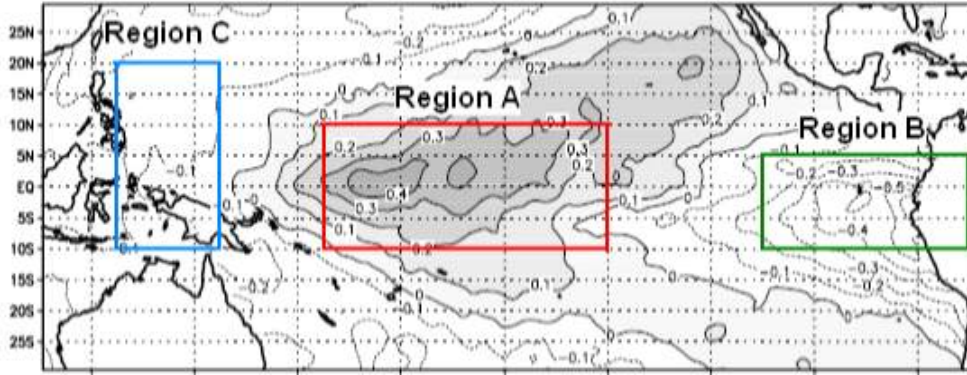


Figure 2.4. The domain for the ENSO-Modoki index.

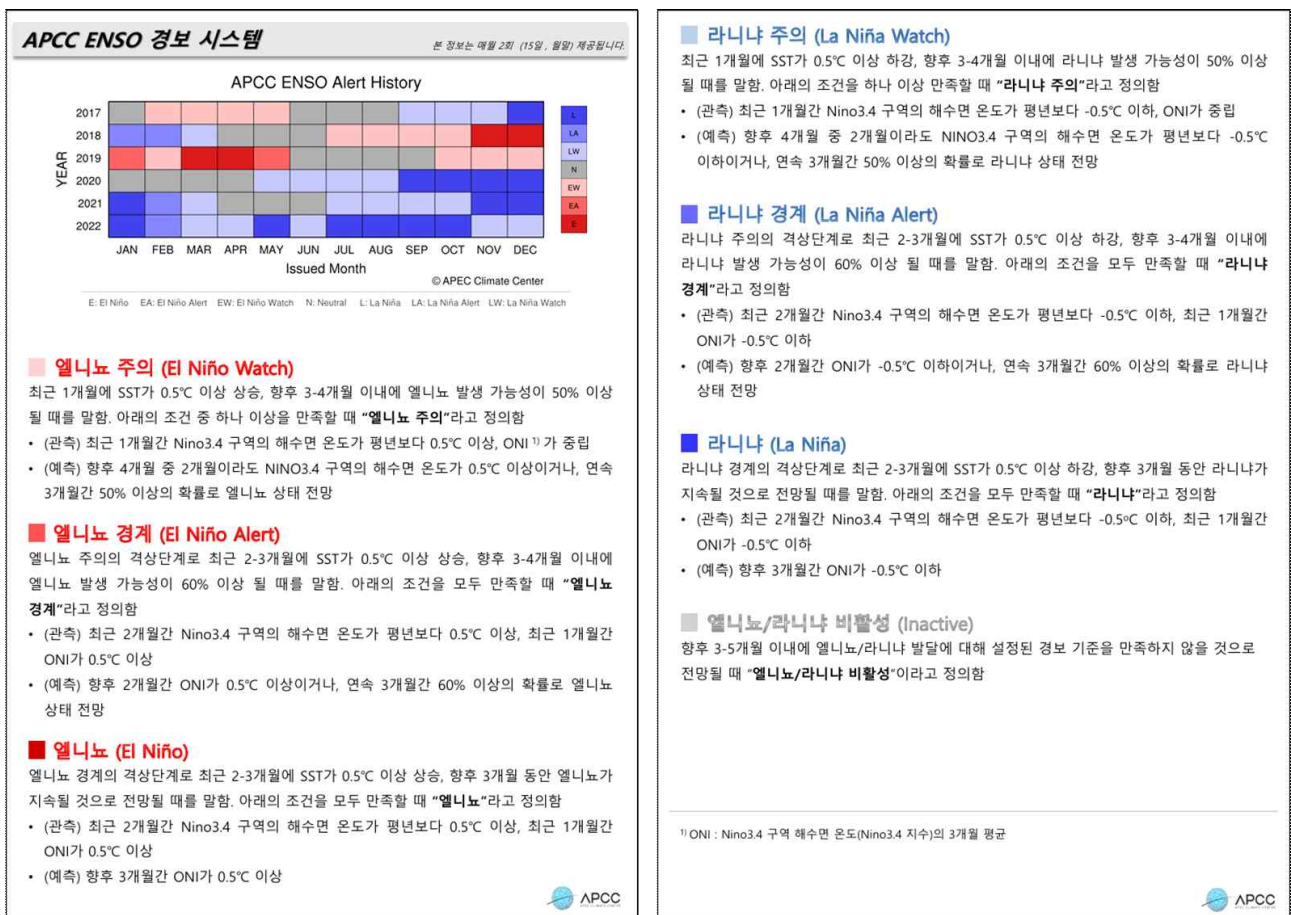


Figure 2.5. Defining the APCC ENSO Alert information.

APCC는 MME 계절예측 정보에 대한 신뢰성 확보를 위해 결정론적 및 확률론적 MME 기법에 따라 다양한 검증 기법을 적용하여 정량적이고 객관적인 예측 정확도 형태의 검증 정보를 함께 제공하고 있다. 이러한 검증 정보 종류는 WMO/CBS의 권고사항을 우선적으로 고려하였으며, 대체로 기후예측에 널리 사용하는 검증 기법(Anomaly Correlation Coefficient; ACC, Brier Skill Score; BSS, Heidke Skill Score; HSS, Ranked Probability Skill Score; RPSS) 또한 포함하여 APCC는 다음과 같은 APCC MME 계절예측 검증 정보를 산출하고 있다(Table 2.4).

Table 2.4. Lists of verification methods for APCC MME forecast and hindcast.

예측 종류	기준	검증 기법
결정론적 예측	WMO/CBS 권고	Mean Square Skill Score (MSSS)
	APCC 추가	Anomaly Correlation Coefficient (ACC)
확률론적 예측	WMO/CBS 권고	Reliability Diagram Relative Operating Characteristic (ROC)
	APCC 추가	Brier Skill Score (BSS)
		Heidke Skill Score (HSS) Ranked Probability Skill Score (RPSS)
해양지수 예측	APCC 추가	관측 지수값과 상호 비교

위와 같은 검증 정보를 산출하기 위해서는 신뢰도 높은 관측 및 재분석자료가 필요하며, 이와 동시에 정기적이고 신속한 검증 정보 제공을 위한 관측 및 재분석자료의 업데이트 주기 또한 중요하다. 이러한 사항들을 고려하여 APCC MME 계절예측 검증 정보 산출에 활용되는 관측 및 재분석자료는 다음과 같다(Table 2.5~2.7). 또한, 검증 정보는 Table 2.8에서와 같이 14 개 지역에 대해 제공하고 있으며, 각 지역의 범위는 Figure 2.6과 같다.

Table 2.5. Information for NCEP/DOE Reanalysis 2.

내 용	
자료 출처	<a href="ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/ncep.reanalysis2.derived/">ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/ncep.reanalysis2.derived/</a>
검증 변수	surface gauss : 2m 기온(air) pressure : 850hPa 기온(air), 500hPa 지위고도(hgt)
자료 기간	1979. 1. ~ 현재 (매월 업데이트)
자료 격자 정보	surface gauss: T62 Gaussian grid with 192x94 points pressure : 2.5 × 2.5 degree
참조	<a href="https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html">https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html</a>

Table 2.6. Information for CAMS\_OPI.

내 용	
자료 출처	<a href="ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/data-req/cams_opi_v0208">ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/data-req/cams_opi_v0208</a>
검증 변수	강수(comb)
자료 기간	1979. 1 ~ 현재 (매월 업데이트)
자료 격자 정보	2.5 × 2.5 degree
참조	<a href="https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/global_precip/html/wpage.cams_opi.html">https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/global_precip/html/wpage.cams_opi.html</a>

Table 2.7. Information for OISSTv2 (NOAA)

내 용	
자료 출처	<a href="ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/noaa.oisst.v2">ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/noaa.oisst.v2</a>
검증 변수	해수면온도(sst)
자료 기간	1981. 12. ~ 현재 (매월 업데이트)
자료 격자 정보	0.25 × 0.25 degree (1440 × 720 longitude/latitude)
참조	<a href="https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html">https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html</a>

Table 2.8. The domain for the verification region.

영역	위경도 범위
전지구	0° -360° E, 90° S - 90° N
열대	20° S - 20° N
북반구	0° -360° E, > 20° N
남반구	0° -360° E, < 20° S
동아시아	75° E-150° E, 15° N-60° N
남아시아	60° E-140° E, 10° S-35° N
북아메리카	190° E-310° E, 10° N-75° N
남아메리카	270° E-330° E, 60° S-10° N
호주	110° E-180° E, 50° S-0° N
남태평양	110° E-260° E, 50° S-20° N
북유라시아	25° E-190° E, 40° N-80° N
중동	25° E-75° E, 10° N-45° N
유럽	345° E-40° E, 30° N-75° N
아프리카	330° E-60° E, 40° S-40° N

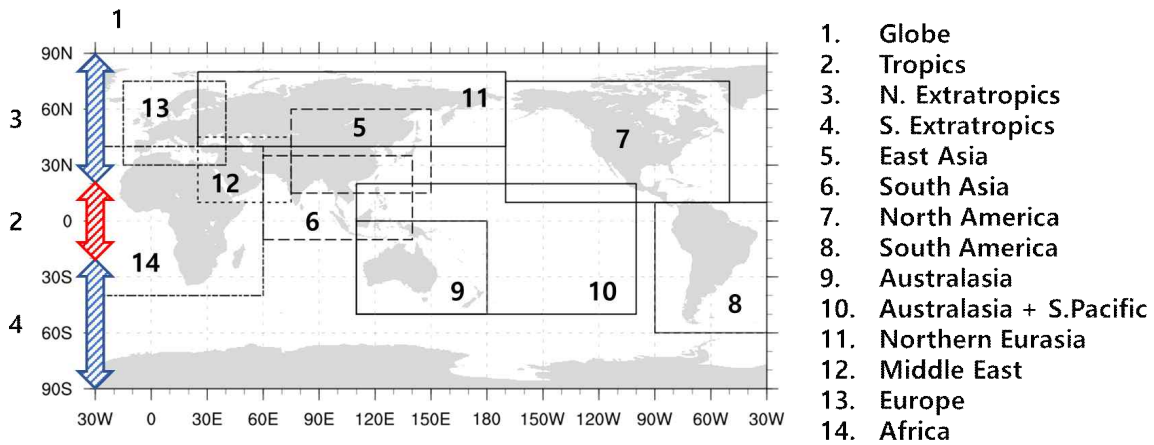


Figure 2.6. The domain map for the verification region.

### 2.1.1.1 MME 계절예측시스템 참여 모델 개선

APCC에 제공되는 15개의 전지구 기후예측 모델 중 5개(CWB, ECCC, HMA, JMA, KMA)는 2022년에, 2개(ECCC, MGO)는 2024년에 개선되었으며 2023년에는 모델명 변경 1건(PNU-RDA), 2024년에는 1개(PKNU)의 신규 모델 도입을 위한 사전 작업이 있었다. 모델이 개선되거나 신규 도입되면 과거예측자료(hindcast)를 수집 후 전처리 프로그램을 만들고 예측력을 분석하여 APCC MME 참여 적절성을 검토한다. 모델 자체 예측력 분석, 구 버전과의 예측력 비교, 타 모델 예측력과의 비교, MME 참여 전후 MME 예측력 변화 등을 결정론적 및 확률론적 관점에서 분석하였다.

### 2.1.1.2 고해상도 MME 검증시스템 구축 및 시험운영

2023년 구축된 MME 고해상도 검증시스템을 통해 검증 정보 생산에 사용되는 관측 자료는 ERA-5(Table 2.9), MERRA2(Table 2.10), CPC Global Unified Precipitation(Table 2.11), NOAA OISST version 2(Table 2.7)이며, 강수 변수의 경우 ERA-5, MERRA2, CPC 강수 관측자료 3종에 대해 검증값을 상호 비교하고자 하였다.

Table 2.9. Information for ERA-5 (ECMWF).

내 용	
자료 출처	<a href="https://cds.climate.copernicus.eu">https://cds.climate.copernicus.eu</a>
검증 변수	2m 기온(air), 850hPa 기온(air), 500hPa 지위고도(hgt)
자료 기간	1979. 1. ~ 현재 (매월 업데이트)
자료 해상도	0.25 × 0.25 (degree) (1440 × 721 longitude/latitude), 37 levels
참조	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <a href="https://doi.org/10.5065/D63B5XW1">https://doi.org/10.5065/D63B5XW1</a></li> <li>- Malardel, S., N. Wedi, W. Deconinck, M. Diamantakis, C. Kuhnlein, G. Mozdzynski, M. Hamrud, and P. Smolarkiewicz, 2015: A new grid for the IFS. Newsletter No. 146 - Winter 2015/16, ECMWF, 6 pp.</li> </ul>

Table 2.10. Information for MERRA2 (GMAO).

내 용	
자료 출처	<a href="https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/datasets?page=1&amp;keywords=MERRA-2">https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/datasets?page=1&amp;keywords=MERRA-2</a>
검증 변수	강수
자료 기간	1980. 1. ~ 현재 (매월 업데이트)
자료 해상도	1/2 × 5/8 (degree), 72 model levels (also interpolated to 42 pressure levels)
참조	Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 [product name(ex: MERRA-2 statD_2d_slv_Nx)]:[product summary(ex: 2d,Daily,Aggregated Statistics,Single-Level,Assimilation,Single-Level Diagnostics)] [product version(ex: V5.12.4)], Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)

Table 2.11. Information for CPC Global Unified Precipitation.

내 용	
자료 출처	<a href="http://www.esrl.noaa.gov/psd/grided/data.cpc.globalprecip.html">http://www.esrl.noaa.gov/psd/grided/data.cpc.globalprecip.html</a>
검증 변수	강수
자료 기간	1979. 1. ~ 현재 (매월 업데이트)
자료 해상도	0.5 × 0.5 (degree) (720 × 360), daily
참조	- Including text such as CPC Global Unified Precipitation data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at - <a href="https://www.esrl.noaa.gov/psd/">https://www.esrl.noaa.gov/psd/</a> in any documents or publications using these data

고해상도 검증 정보의 대상 영역은 Table 2.8과 동일하며, 검증 기법 또한 기존 MME 저해상도 검증시스템에서 사용하는 기법 그대로 사용하였다(Table 2.4). 이렇게 생산된 MME 고해상도 검증 정보는 기존 저해상도 검증 정보와 상호 비교함으로써 해상도 간 예측 정확도의 차이를 정량적으로 살펴보고자 하였다.

### 2.1.1.3 Hindcast 기간별 민감도 분석 기반 MME hindcast 기간 확장 및 프로세스 개선

APCC MME 계절예측 정보를 생산하기 위해 기후평년값의 기간으로 활용되는 hindcast 기간 선정 방법은 2019년을 기준으로 변경되었다. 2019년 이전 APCC MME의 hindcast 기간은 참여모델들의 공통 hindcast 기간을 선정하여 사용해 왔다. 하지만 시간이 지날수록 참여모델의

개선/개발이 이루어짐에 따라 개선/개발되는 모델의 hindcast 기간은 보다 최근으로 개선되기 시작하였으며, 이렇게 개선/개발된 모델의 hindcast 기간이 MME hindcast 기간과 현저히 차이가 날 경우 MME 참여 구성에 제외되었다. 이러한 모델들이 차츰 늘어나면서 MME 참여모델 공통 hindcast 기간은 점차 짧아질 가능성이 높아졌으며, MME 참여 구성에 제외되는 모델이 증가하자 MME 계절예측 성능에 부정적 영향이 초래될 것으로 전망되었다. 이에 따라 APCC는 MME hindcast 기간 선정 방법을 참여모델들의 공통 hindcast 기간에서 1991-2010년으로 고정된 기간으로 변경하였고, 이를 만족하지 못하는 참여모델의 hindcast 기간은 결측 처리하는 방법으로 변경하였다. Figure 2.7은 2008-2023년 기간 동안 APCC MME hindcast 기간의 변화를 나타내는 그림이며, 2019년 12월(2020JFM 예측)을 기준으로 1991-2010년 기간으로 변경되었음을 알 수 있다.

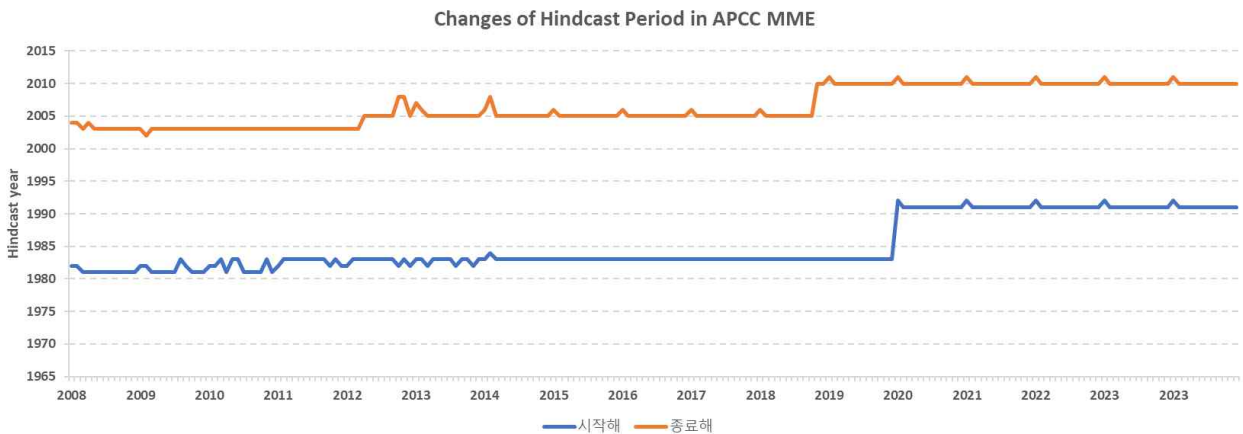


Figure 2.7. Changes of APCC MME hindcast period during 2008-2023.

변경된 MME hindcast 기간 선정 방법(1991-2010년) 하에 MME 및 참여모델별 hindcast 기간의 현황(Figure 2.8)을 살펴보면, CMCC, KMA, MetFR, UKMO 모델의 경우 hindcast 시작 해가 1993년으로써 MME hindcast 시작 해인 1991년 대비 2년의 공백이 발생하며, 이러한 경우는 해당 모델들의 hindcast 1991, 1992년에 대해 결측값(FillValue)으로 처리하여 MME에 참여할 수 있도록 하고 있다. 또한, MME 참여 기관과의 다양한 소통을 통해 참여모델 hindcast 기간 확장 협조를 지속적으로 요청하였으며, 이러한 노력으로 BoM, CWA, ECCC, MetFR에서 자체 모델의 hindcast 기간 확장(보라색 화살표)하여 예측자료를 제공해 주기 시작하였다. 더불어 APCC in-house 모델인 SCoPS의 경우 MME hindcast 기간에 부합하긴 하지만, 모델 개선을 통해 hindcast 종료 해를 2016년으로 확장하여 2025년에 적용 예정이다. 하지만 앞에서 상술했던 바와 같이 MME hindcast(1991-2010년)의 20년 기간은 기후평년 기간으로써 WMO 권고사항(최소 24년)을 만족하지 못하고, 2010년 이후의 최근 기후 특성을 반영하지 못한다는 지적에 따라 참여모델 hindcast의 결측해를 최소로 할 수 있는 두 가지 기간(1991-2014년, 1993-2016년)을 선정하여 Table 2.12와 같이 민감도 실험을 수행한 바 있다(김유진 외, 2023).

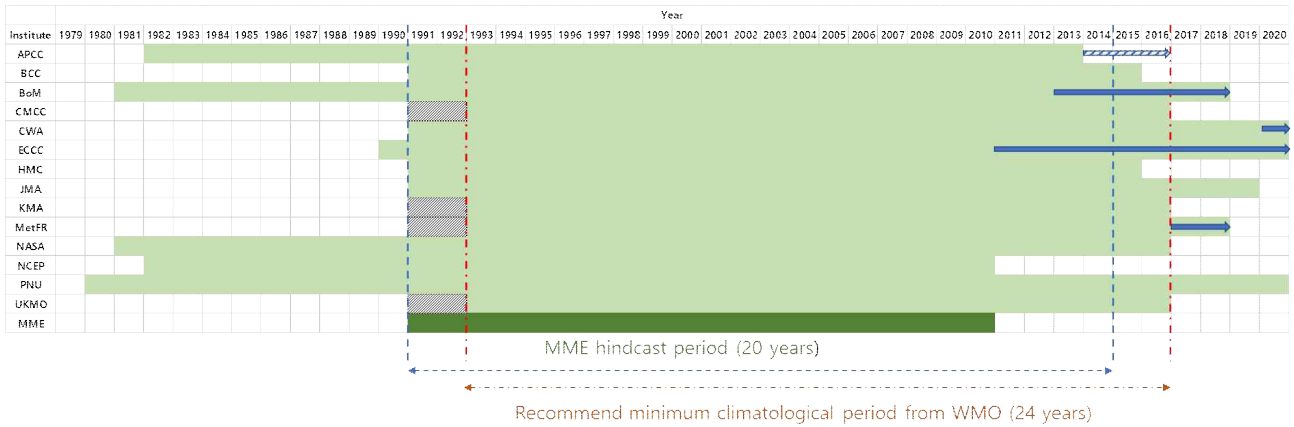


Figure 2.8. Distribution for hindcast period of individual models (bright green) and APCC MME (dark green).

Table 2.12. Experimental design for extension of APCC MME hindcast period.

실험명	Hindcast 기간	결측해 처리 방법	결측수
Control (CTR)	1991-2010년 (20년)	전체 결측 처리	8
MME1 (SCM1, GAUS1)	1991-2014년 (24년)	전체 결측 처리	13
MME2 (SCM2, GAUS2)	1991-2014년 (24년)	결측 처리 및 NCEP forecast 자료 활용	9
MME3 (SCM3, GAUS3)	1993-2016년 (24년)	전체 결측 처리	11
MME4 (SCM4, GAUS4)	1993-2016년 (24년)	결측 처리 및 NCEP forecast 자료 활용	5

해당 민감도 분석에는 Table 2.1에서와 같이 실제 APCC MME에 참여하는 모든 모델의 예측자료를 사용하였으며, 결정론적 MME 및 확률론적 MME 기법별로 분석을 수행하였다. 평가에 사용된 관측자료는 Table 2.5~2.7과 같으며, 여기서 사용된 예측 성능 평가는 결정론적 MME의 경우 ACC(anomaly correlation coefficient)와 RMSE(Root Mean Square Error), 확률론적 MME의 경우 ROC(Relative Operating Characteristics) score를 사용하였다.

본 민감도 분석 결과를 바탕으로 MME hindcast 기간 확장을 위해 두 가지 hindcast 기간 방안 중 보다 효율적인 기간을 선정하여 기존 AFS 시스템을 활용한 프로세스 개선을 수행하였다. 또한, MME hindcast 확장 기간에 따른 2022-2023년의 예측자료를 시험 생산함으로써 MME hindcast 기간 확장 전/후 예측 특성을 살펴보았다.

### 2.1.2. 기후감시시스템 운영

주별·월별·계절별 기후 감시 정보, 기후 지수, 가뭄 지수 정보를 홈페이지를 통해 제공하고 있다. 주별·월별·계절별 기후 감시 정보는 2m 기온, 상향장파복사, 강수량, 해수면 온도, 10m 바람, 500hPa 지위고도에 대해 NCEP 재분석 자료, NOAA 상향장파복사 자료, CPC 강수량 자료, OISST<sup>1)</sup> 자료를 사용하고 있다. 기후 지수는 해양·대기·몬순에 대해 제공하고 있으며 Niño3.4 등 태평양 해수면 온도 관련 지수뿐만 아니라 TNA, TSA, DMI 등 대서양 및 인도양 해수면 온도 관련 지수도 감시하고 있다. 전지구 가뭄 지수 현황은 지난 1, 3, 6, 12개월 기간에 대한 표준강수지수(SPI, Standardized Precipitation Index)에 기반하여 제공하고 있다.

### 2.1.3. 동아시아 지역 확률계절예측시스템 운영

2022년 개발·구축된 동아시아 지역 확률계절예측시스템은 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서의 지역 규모 계절 예측 및 해석이 이루어져야 한다는 권고를 수용하여 동아시아 지역에 대한 보다 효용성 높은 계절예측 정보를 산출하는 시스템으로써 국내 사용자가 관심 있는 동아시아 지역 규모의 예측 정보에 대한 실질적인 활용성을 높이고 있다(김유진 외, 2022).

본 시스템은 계산 체계와 가시화 체계로 구성되어 있으며, 계산 체계는 동아시아 계절예측에 밀접한 연관이 있는 ENSO와 서태평양 강수변동간 관련성을 활용하여 기후예측 모델의 재현성을 평가한 후, 우수한 재현성을 보이는 MME 참여모델을 선별하여 기온과 강수에 대한 확률론적 MME 예측 정보를 산출하는 방식이다. 영향 기후인자로 ENSO가 선정되는 경우 ENSO EOF 모드의 기후영향 재현성을 각각 참여모델마다 평가하여 모델 간 재현성 분포(spread)의 중간값을 기준으로 우수 모델을 선별하게 되고, 기후인자로 서태평양 강수가 선정되는 경우 동아시아 강수와 서태평양 강수에 대한 모델별 재현성을 평가하여 위와 마찬가지로 분포의 중간값을 기준으로 우수 모델을 선별하게 된다. 계산 체계의 산출 과정은 Figure 2.9와 같다.

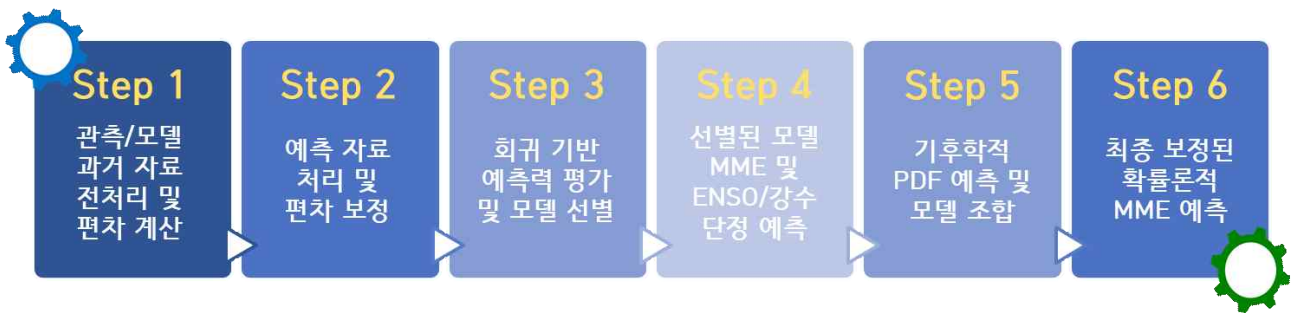


Figure 2.9. Process for calculation part of East Asian customized probabilistic forecast system (from Kim et al, 2023).

동아시아 지역맞춤형 확률계절예측 정보를 산출하기 위해 APCC MME 참여모델 예측자료 (Table 2.1)를 입력자료로 처방하고 있으며, 여기서 HMC(러시아) 및 MGO(러시아) 모델의 경우 해양 모델이 접합되지 않은 관계로 해당 모델들은 제외하였고 또한, 모델의 재현성을 평가하기

1) Optimal Interpolation Sea Surface Temperature

위한 관측 자료로 CAMS-OPI 강수 관측자료(Janowiak *et al.*, 1999)와 OISSTv2 해수면 온도 관측자료(Huang *et al.*, 2021)를 사용하고 있으며, HSS(Hiedke Skill Score) 검증 기법을 사용하여 각 모델의 hindcast(1991-2010년) 예측 정확도를 분석하였다.

가시화 체계는 위의 계산 체계에서 산출된 동아시아 지역맞춤형 확률계절예측 정보를 가시화하는 시스템으로써 APCC 누리집으로 제공되는 최종 동아시아 지역맞춤형 확률계절예측 가시화 자료를 생산하고 있다.

#### 2.1.4. MME 예측정보 조기제공

기존 20일에 제공되던 예측정보를 보다 조기에 제공하기 위해 내·외부적 사전 작업을 진행하였다. 내부적으로는 MME 참여 모델 자료 수집 알림 및 전처리 시스템을 구축하여 자료 처리 시간을 단축하였고 외부적으로는 자료 제공 기관의 협조 요청을 통해 자료 처리 시간을 확보하였다.

#### 2.1.5. 기후전망 개선

타 기관 기후전망을 조사하여 콘텐츠 및 디자인 측면에서 개선해야 할 점을 파악하고 기후전망 구독자의 만족도를 이해도, 가독성, 유용성, 다양성 측면에서 조사하였다.

#### 2.1.6. ENSO 경보시스템 개선

APCC는 최근 관측된 SST (Sea Surface Temperature)와 ONI (Oceanic NINO index) 지수를 활용하여 전문가의 주관적 해석을 배제하고 객관적인 정보만을 활용하여 2020년 11월부터 APCC ENSO 경보를 제공하고 있다. 기존 APCC ENSO 경보 시스템의 기준은 관측의 3개월 평균 NINO3.4 지수인 ONI 지표를 포함하고 있고, ONI의 특성상 ENSO 경보의 단계별로 Watch는 3개월, Alert는 4개월, 주의/경보는 5개월간까지의 관측 기간 조건이 필요하였다. 따라서 ENSO 상황의 사전 경보라기보다는 감시의 특성이 강한 결과가 도출되었다. 이에 2022년 APCC ENSO 조기 경보 정보의 활용성을 높이기 위해 ENSO 경보 시스템의 기준 조건 변경을 시도하였다.

## 2.2. BSISO 계절내예측시스템 운영 및 개선

### 2.2.1. BSISO 계절내예측시스템 운영

BSISO 계절내예측시스템의 입력장은 일별 OLR과 850hPa 수평바람장이 이용된다. 그러나 2023년 9월부터 기존에 사용하던 NOAA OLR 자료 제공 중단에 따라 2023년까지는 NOAA OLR 자료, 2024년 이후로 CPC blended OLR와 NCEP 850hPa 수평 바람장을 이용하여 북반부 여름철 5월에서 10월까지 매일 감시, 예측, 검증 BSISO 자료를 생산하고 홈페이지를 통해 실시간으로 제공되고 있다. Figure 2.10은 APCC BSISO 운영체계 및 현업 일정을 모식화 한 그림이다. 먼저 FTP 외부망을 통해 재분석자료 및 예측자료를 수집하고 1차 자료 품질확인을 거쳐 감시 및 예측 시스템에 입력되어 구동된다. 그리고 실시간 현업 모니터링과 함께 현업 일지를 작성하여 당일 현업 이슈를 기록한다. 재분석자료의 자료 수집은 제공기관에서 공식 자료 업데이트까지의 시간 지연이 있기때문에 감시 기준 날짜는 현재 날짜 기준 평균 3일의 지연이 있으며 감시 날짜를 기준일로 하여 예측 및 검증 자료가 생산된다.

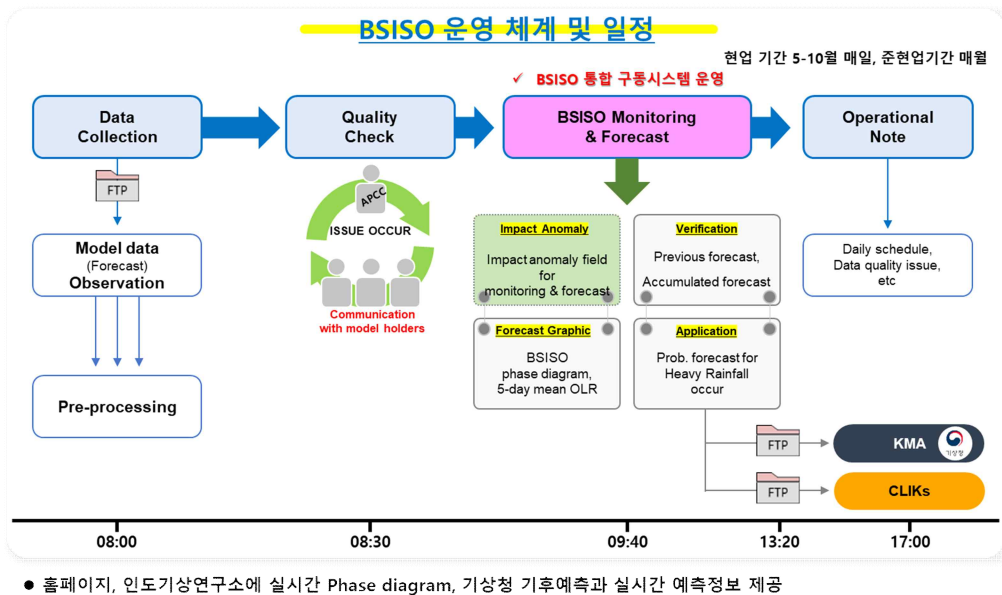


Figure 2.10. APCC BSISO operating system.

현재 BSISO 현업시스템의 예측 참여모델은 Table 2.13과 같다. 각 기관별로 NCEP에서 2개, 호주 기상청 1개, ECMWF 1개, 대만 기상청 1개 모델이 참여하여 총 5개의 참여모델 예측 자료를 이용하여 APCC BSISO 개별 모델 예측을 수행하고 있다. 주요 모델 변경 사항으로는 ECMWF의 경우 2023년부터 앙상블이 101개로 확대되고 자료 제공 주기도 매주 월, 목요일에서 매일 제공으로 변경되었다. 그리고 대만 기상청의 경우 기관명 약자가 2023년부터 CWB (Central Weather Bureau)에서 CWA (Central Weather Administration)로 변경되었다.

Table 2.13. Participant model description of APCC BSISO forecast system.

Institute	Model	Ensemble Size	Forecast Period	Update frequency	Resolution
NCEP	Climate Forecast System	4	40 days	Once a day	T126 L64
	Global Forecast System	1	16 days	Once a day	T574, T190 L64
Australia	Australian Community Climate and Earth-System Simulator Seasonal 2	33	40 days	Once a day	N216 L85
ECMWF	ECMWF Ensemble Prediction System	101	32 days	Once a day	T319 L137
CWA	Taiwan CWB 1-tier Global Atmosphere-Ocean Coupled Forecast System	3	40 days	Every 5 days	T119 L40

## 2.2.2. BSISO 계절내예측시스템 개선

APCC BSISO 현업 서비스의 실제 예보 활용성을 높이기 위해 지난 3년간 다양한 측면에서의 개선을 해왔다. 먼저 2022년에는 세계기상기구(WMO)의 기준에 따라 BSISO 감시, 예측, 영향장에 기후 평년기간을 1981~2010년에서 1991~2020년으로 현업시스템에 변경 적용하였다. 시운영을 거쳐 현업 안정성을 확보하여 본 현업에 적용하였고, 또한 홈페이지에 표출되는 BSISO 현업 콘텐츠의 가시성을 높이기 위해 GrADS와 NCL로 혼재되어 있던 그래픽 코드를 NCL로 일원화하고 일관성 있는 이미지를 생산 및 서비스하였다. 2023년에는 BSISO의 한반도 예보 활용성을 높이기 위해 그래픽 코드 수정을 통해 영향장 영역을 한반도를 포함하는 지역 (북위 40도에서 북위 50도까지 확대) 까지 확대 제공하고, 1개월 예보에서의 활용을 위해 BSISO 예측 지수 제공기간을 기존 3주에서 4주까지 연장 제공하였다. 그리고 일부 참여모델(ECMWF)에 대해 예측 자료 수집 즉시 BSISO 예측 자료 생산 체계를 마련하여 현재까지 1개월 예보에 활용하고 있다.

그리고 2023년 9월 17일부터 BSISO 계절내 예측시스템의 입력장이 되는 NOAA OLR 자료 제공이 중단됨에 따라 2023년 BSISO 현업은 9월 17일자로 조기 종료되었다. 이후 실시간으로 수집 가능한 OLR 대체 자료를 사용하기 위해 2024년부터 CPC blended OLR 자료를 활용하였다. 이에 앞서 변경된 OLR 자료의 실시간 수집 체계 및 전처리 과정을 수정하여 2024년 현업부터 CPC blended OLR 자료를 이용하여 현업서비스 하였다.

현업 운영 시간이 지남에 따라 참여 모델의 개선 및 변경이 발생하는데 이때 모델의 앙상블이 증가함에 따라 그래픽 코드의 수행 속도가 기하급수적으로 증가하는 문제로 인해 그래픽코드를 전면 교체하여 계산시간을 단축하였다. 이로 인해 ECMWF에서 예측된 BSISO 위상도는 실시간으로 기상청 기후예측-분석 통합시스템에 조기 제공 가능하게 되었다.

## 2.3. APCC 자체예측모델(SCoPS) 운영 및 예측정보 제공

### 2.3.1. SCoPS 계절예측정보 제공(매월, 3/6개월) 및 현안 대응

Figure 2.11은 APCC 자체 계절예측 모델인 SCoPS (Seamless Coupled Prediction system)의 운영 체계 및 현업 일정을 모식화 한 그림이다. SCoPS는 매월 7일경 초기 입력자료인 NCEP CFSR(Climae Forecast System Reanalysis) 및 Argo 자료를 수집하여 초기장을 만들고 대기-해양 초기화를 통해 6개월 예측자료를 생산한다. 생산된 예측자료는 후처리를 통해 예보도의 자료를 만들어 현업 팀 내 공유를 하고 매달 생산된 자료에 문제가 없다고 판단되면 APCC MME 참여모델로써 활용되고 있다.

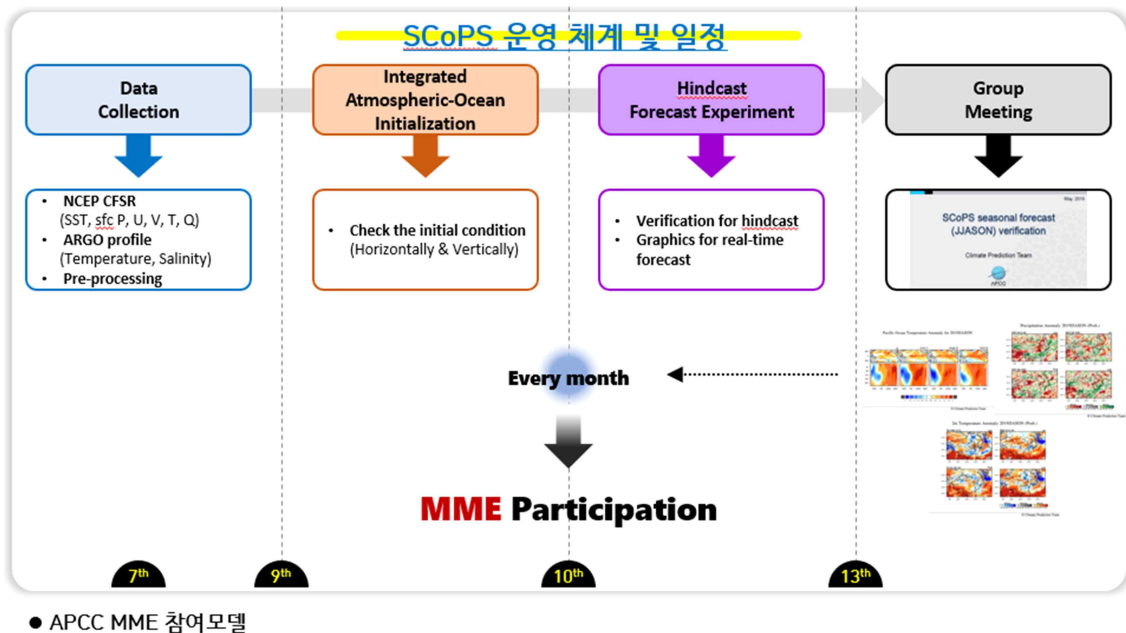


Figure 2.11. APCC in-house model (SCoPS) operating system.

### 2.3.2. 기상청 슈퍼컴 5호기를 활용한 SCoPS 계절예측 운영체계 구축

APCC는 HPC의 노후화 및 현업 안정성을 위해 그 대체 계산 자원으로써 기상청 슈퍼컴퓨터를 활용하고 있다. 몇 년의 주기에 걸쳐 슈퍼컴퓨터가 업그레이드 될 때 마다 공동활용시스템에 SCoPS 운영체계를 마련해왔으며 2022년에 슈퍼컴퓨터 5호기 공동활용시스템(두루)이 사용 가능함에 SCoPS 운영 체계를 새로이 구축하였다. 두루 시스템에 구축한 SCoPS의 포팅 환경설정은 Table 2.14와 같다. APCC HPC에 구축한 SCoPS 포팅 환경설정과의 주요 차이점으로는 컴파일러인데 기상청 슈퍼컴퓨터 4호기부터는 PGI 컴파일러가 도입되지 않아서 Intel 컴파일러로 대체하여 포팅하였다. 또한 각 시스템에 최적화된 포트란 컴파일러, MPI를 설정하였다.

Table 2.14. Configuration of APCC HPC and KMA supercomputer.

	APCC	KMA	
	HPC (2015~현재)	4호기 우리(2016~2021)	5호기 두루(2022~)
컴파일러	PGI 11.0	Intel 14.0	Intel 21.0
포트란	pgf90	ftn	lfort
MPI	openMPI	mpich	Intel MPI

2023년에는 2022년에 구축한 슈퍼컴퓨터 5호기 SCoPS 운영체제를 이용하여 SCoPS Hindcast (1982~2013년) 자료를 모두 생산하였고, HPC 불용 상황 발생 시 현업의 대체 자원으로 기상청 슈퍼컴퓨터 5호기를 즉각적으로 사용할 수 있는 체계를 마련하였다.

### 2.3.3. hindcast 기간 확장

현재 SCoPS Hindcast 기간은 1982~2013년이다. 계절예측 뿐만 아니라 계절내 예측에서 타기관 모델과 비교했을 때 현재 Hindcast 기간은 최근의 기후 특성을 반영하기에는 상대적으로 짧은 경향이 있다. 따라서 모델이 개발된 지 약 10년이 지난 시점에서 보다 최신 기후를 반영한 기후값을 생산하기 위해서는 hindcast를 최근으로 연장해야 될 필요성이 있다. 또한 내년에 계획되어 있는 APCC MME 계절예측 hindcast 기간 연장에 있어 SCoPS 모델 또한 missing value 없이 참여하기 위해서 올해 Hindcast 연장 작업을 시도하였다.

Hindcast를 연장 생산하기에 앞서 SCoPS의 Hindcast와 Forecast의 가장 큰 차이점은 초기 입력장이다(Figure 2.12). Hindcast의 경우 해양 초기장으로 연직 프로파일 WOD (World Ocean Database; MBT, XBT, PFL, OSD, CTD, DRB, MRB) 자료를 사용한다. 반면, Forecast의 경우 실시간 제공이 가능한 Argo 자료에서 수온과 염분 자료를 사용한다. 따라서 Hindcast 기간 연장을 위해서는 2014~2016년간의 연직 프로파일 WOD 자료를 먼저 수집하고 전처리 등을 거쳐 초기장 생산 체계를 구축해야 한다.

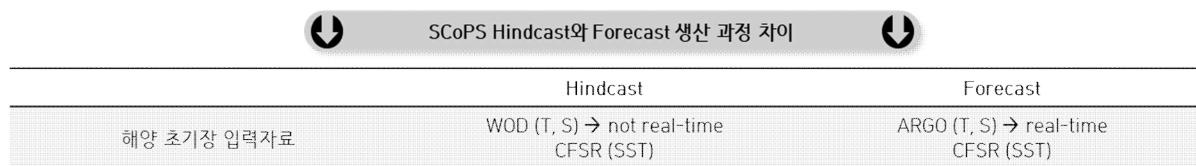
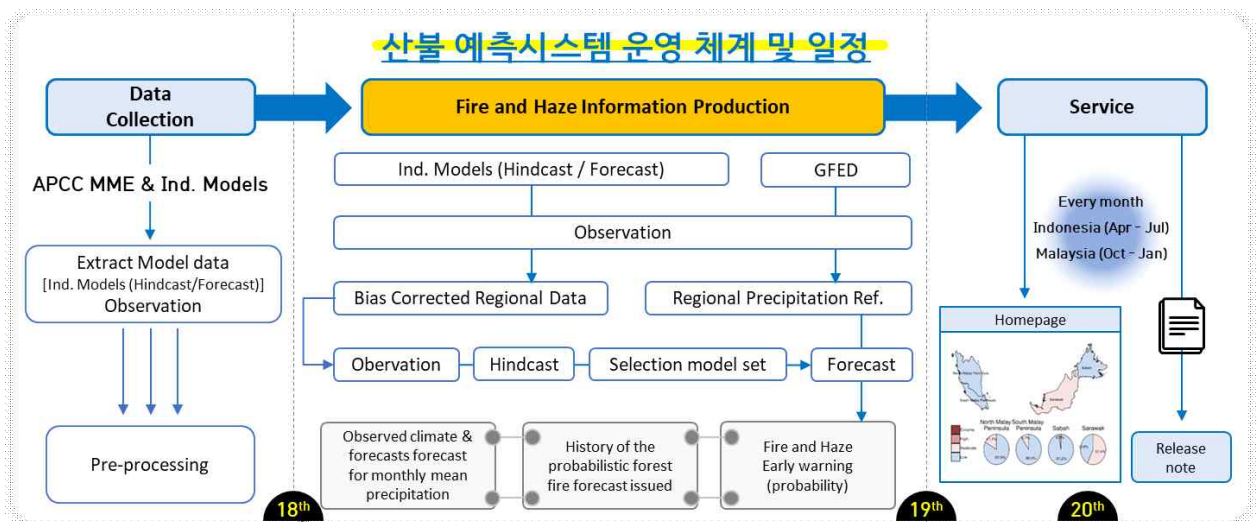


Figure 2.12. Difference of initial data for SCoPS hindcast and forecast data.

## 2.4. 산불예측시스템 운영 및 지역확장

### 2.4.1. 산불예측시스템 운영 및 예측정보 제공

APCC는 동남아 해양 국가들의 지리적 중심에 위치한 아시아 최대섬인 보르네오섬의 4개 지역(Barat, Selatan, Tengah, Timur)에 대한 화재 및 연무의 조기경보시스템(FHEWS, Fire and Haze Early Warning System)을 개발하여 2017년부터 보르네오 섬의 건기에 해당하는 8~10월 기간에 대한 가뭄상태를 예측하고 매년 4~7월 사이에 산불예측 조기경보 정보를 영문 홈페이지를 통해 제공하고 있으며, 또한 2023년부터는 말레이시아 지역의 2~4월 건기에 대해 매년 10~1월 사이에 동일한 정보를 서비스하고 있다(Figure 2.13).



- 인도네시아(4~7월)와 말레이시아(10~1월) 지역에 대한 산불 및 강수 확률 예측 정보 제공
- APCC MME에 활용되는 Hindcast 개별모델의 지역자료를 활용하여 지역 적합 모델을 선정하여 예측정보 제공
- 예측된 강수 정보를 각 지역의 강수량과 CO<sub>2</sub> 배출량 간의 관계를 기반으로 산불 위험 등급으로 변환하여 제공

Figure 2.13. APCC Fire and Haze Early Warning System (FHEWS).

### 2.4.2. 입력자료 개선 및 지역확장 서비스

#### 2.4.2.1. 입력자료 개선

산불예측시스템의 입력자료 개선은 크게 계절예측자료의 개별모델의 고해상도 자료 변경, National Aeronautics and Space Administration (NASA)의 Global Fire Emission Database (GFED)의 최신 버전 변경에 따른 자료 변경, Aphrodite 강수량자료의 변경이 있다. 산불예측시스템은 APCC에서 제공하는 MME를 생산하기 위한 개별모델 자료를 활용하여 화재 및 연무에 대한 조기경보시스템을 제공한다. 최근 APCC의 계절예측정보제공이 2.5° 에서 1° 로 변경됨에 따라 산불예측시스템의 입력자료에도 변경이 필요하다. 따라서 기존 저해상도 (2.5°)의 개별모델 자료와 새롭게 제공되는 고해상도 (1°)의 자료 비교를 통해 자료 변경에 대한 적절성을 평가하였다. 자료의 정량적 평가는 상관계수와 Root Mean Squared Error (RMSE)를 통해 저해상도에서 고해상도로 변경됨에 따른 자료 활용의 차이가 있는지 평가를 수행하였다. 상관계수가

0.9이상으로 해상도 변경에 따른 차이가 매우 잘 유지되고, RMSE가 근소한 차이가 나게 된다면 변경에 따른 산불예측 조기경보의 결과가 현재와 매우 유사하게 나타날 수 있을 것으로 사료된다. GFED의 변경은 자료제공 기간의 한계로 인해 시작되었다. GFED 3.1버전이 전 지구 자료로 2012년까지 자료제공을 하고 있다. 현재 APCC의 Hindcast 기간은 2010년으로 해당 기간 이내에 포함이 되고 있으므로, 변경을 하지 않아도 무방하지만 추후 지속적인 업데이트를 거치게 된다면 꼭 변경되어야 할 자료로 판단하였다. GFED 4.1 버전은 2016년까지의 자료를 제공하고 있으며 해상도가 0.5° 에서 0.25° 로 개선된 정보를 제공한다. APCC에서는 계절예측 모델의 성능 개선을 위해 지속적인 업데이트를 진행하고 있고, Hindcast의 기간 변경이 충분히 고려되어야 할 사안이므로 이를 복합적으로 고려하여 GFED의 버전은 3.1에서 4.1로 변경 적용하였다. 산불예측시스템의 예측정보 생산을 위해서는 강수량의 관측자료도 함께 활용된다. 과거에는 Aphrodite 강수량자료를 활용하였으나, 2007년까지의 자료 수집을 토대로 2010년의 Hindcast 기간을 충분히 보완하지 못하였다. 또한 최근 관측자료 정보의 부재로 Forecast 기간의 개별예측모델의 성능을 비교할 수 있는 관측정보가 없었다. 따라서 APCC의 Hindcast 기간을 고려할 수 있으면서 최근의 관측정보를 제공할 수 있는 자료를 기반으로 강수 관측자료를 변경하고자 하였다. 관측자료의 변경을 위한 자료 검증은 상관계수가 높고 RMSE가 낮은 자료들을 우선순위로 선정하여 시, 공간적인 측면을 모두 고려하여 우수하게 선정되는 관측자료로 대체하였다.

#### 2.4.2.2. 말레이시아 지역확장 개선

말레이시아와 인도네시아는 강수량의 월별 특성이 다르기 때문에, 건기도 다르게 정의되어야 한다. 말레이시아의 건기를 정의하기 위하여 강수 관측자료를 기반으로 말레이시아 지역의 EOF 분석을 수행하였다. 말레이시아는 지역별로 다른 기후특성을 보여주는데, 말레이시아 본토의 화재 및 연무의 발생 빈도가 보르네오섬의 빈도보다 많기 때문에 말레이시아 본토의 기후대를 중심으로 건기를 정의하고자 하였다. 또한 월별 강수량 자료를 Emission과 함께 비교하여 말레이시아의 실제 건기로 정의될 수 있는 기간을 규정하고자 하였다. 강수 관측자료는 CHIRPS로 변경됨에 따라 CHIRPS를 활용하였고, Emission은 GFED 4.1 버전을 통해 산출하였다.

#### 2.4.3. 고해상도 격자자료 생산시스템 시험 구축

산불예측시스템은 지역별로 정보를 제공하고 있다. 지역별 정보를 격자별로 제공하기 위해서는 현재의 FHEWS 프로세스를 새롭게 구성이 필요하다. FHEWS의 격자정보 생산을 위해서는 크게 관측자료의 처리와 Hindcast 자료 처리, Forecast 자료 처리를 통해 격자정보 결과를 생산할 수 있다. 관측자료는 강수 관측자료인 CHIRPS의 일자료를 수집하고, 월자료로 산출하여 지역별, 격자별 월자료를 생산한다. 생산된 CHIRPS와 APCC의 개별모델의 Hindcast 기간을 대상으로 오차보정을 수행하고, 평가지수 산출을 통해 Forecast에서 활용하기 위한 개별모델을 산출한다. 이후에 Forecast 기간의 개별모델 자료를 오차보정을 수행하고, Hindcast 기간의 평가를 통해 선정된 개별모델자료를 활용하여 최종 격자자료를 생산한다.

## 2.5. 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현

### 2.5.1. 신규 홈페이지용 동적 기후정보 웹 콘텐츠 디지털 자료 생산 시스템 구축

2015년에 구축된 웹 시스템은 신규 정보의 추가 및 웹 구조 변경, 사용자 편의를 위한 그림 기반의 기후예측 정보 웹 표출 등 개선에 있어 어려움이 있었다. 따라서 2022년에 기존 및 새로운 기후정보 웹 콘텐츠를 신규 홈페이지에 이관 및 적용할 수 있는 최신의 웹 서비스 기술을 적용한 시스템 구축을 위한 구성 계획을 수립하여 사업발주를 위한 제안요청서를 작성하였다.

APCC 홈페이지의 기후예측 정보는 Figure 2.14의 왼쪽 그림과 같이 그림 기반의 정적 웹 콘텐츠로 구성되어 있다. 신규 홈페이지에서는 Figure 2.14의 오른쪽 그림과 같이 기존의 정적 웹 콘텐츠와 함께 동적 서비스 구현을 위한 Single Page Application (SPA)을 적용하여 구성하게 된다. SPA는 최초 한번 전체 페이지를 불러오고 필요 시 응답 데이터를 사용해 페이지 특정부분을 렌더링해서 변경해주는 방식으로 동적 웹 서비스에 일반적으로 사용되는 기술이다.

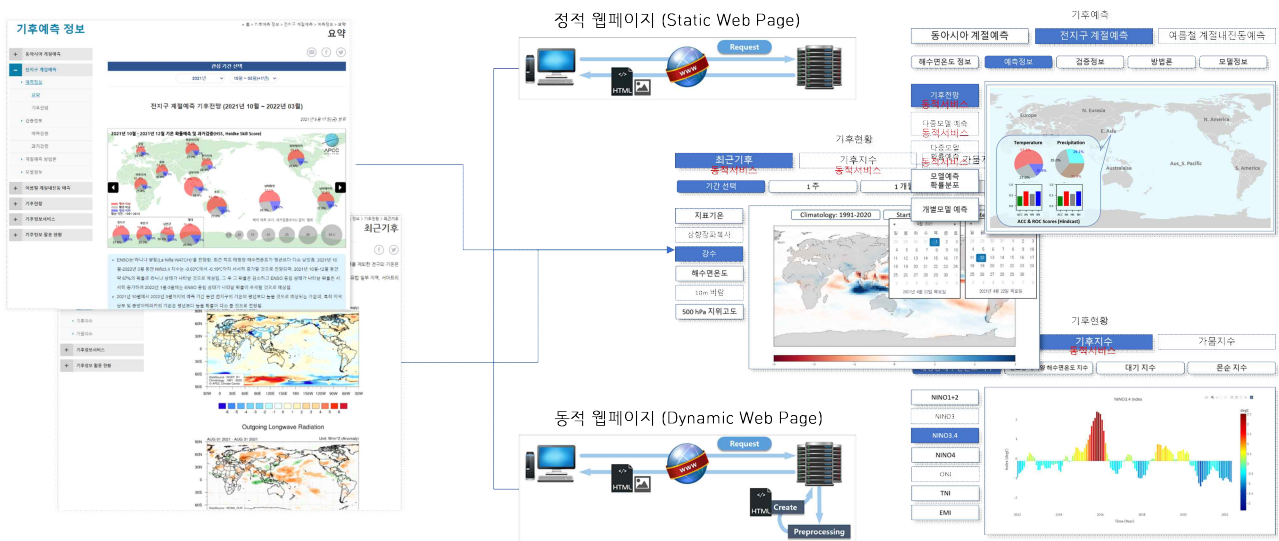


Figure 2.14. Sample structures of static and dynamic web pages in new APCC homepage.

신규 홈페이지의 제안요청서는 APCC 대외협력과 및 예측운영과가 협업으로 수립을 하였으며, 본 과제에서 다루고 있는 동적 서비스 관련 기능 요구사항은 Figure 2.15와 같다. 주로 기후예측, 기후감시, 기후지수 3가지 항목에 대한 세부메뉴로 구성되어 있으며 모두 앞에서 언급한 SPA에 의해 구현될 수 있도록 요구사항을 작성하였다.

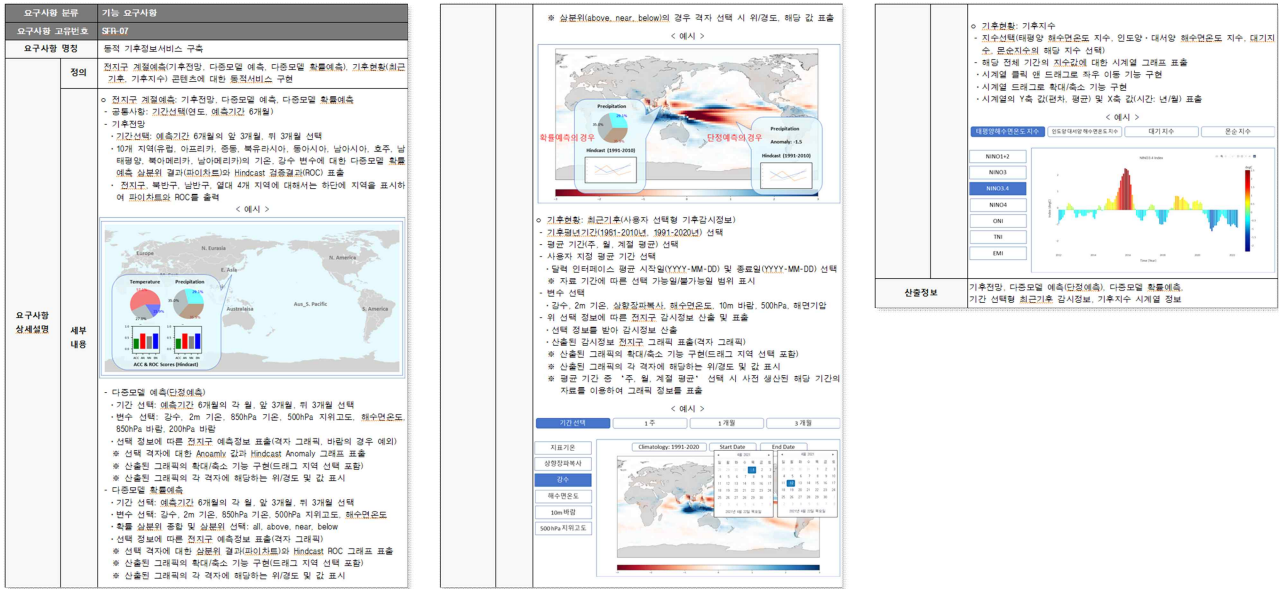


Figure 2.15. Functional requirements of dynamic web contents in APCC homepage request for proposal (RFP).

2023년에는 동적 기후정보 웹 콘텐츠 구현 및 표출을 위한 네 가지의 디지털 자료 생산 체계를 구축하였다. 여기서 주요 동적 기후정보 웹 콘텐츠는 MME 기법별 예측장, 참여모델별 예측장, 기후전망 요약맵, 기후 감시 지수, 기후 감시 anomaly 평균장이다. 기후감시 지수와 anomaly 평균장은 기존의 관측자료를 그대로 사용하게 되며, 나머지 MME 기법별 예측장, 참여모델별 예측장, 기후전망 요약맵을 위한 디지털 자료를 재생산 하였다.

첫 번째는 MME 기법별 예측 통합시스템이다. 현재 APCC AFS(Automated Forecast System)는 편차값(anomaly) 형태의 결정론적 MME와 3분위(평년 이상; above normal, 평년 비슷, near normal, 평년 이하, below normal) 예측 형태의 확률론적 MME에 대한 예측 정보를 생산하고 있으며, 해당 예측 정보는 편차 분포장 및 확률 분포장 형태로 제공되었다. 이를 동적으로 구현하기 위해 사용자가 특정 격자를 선택하면 선택한 격자의 편차값 혹은 3분위별 확률값을 표출함과 동시에 활용된 기후평년(hindcast) 기간에 대한 시계열 정보를 제공하는 기능을 고안하였다(김유진 외, 2023). 하지만 AFS에서 생산된 예측 정보의 디지털 자료는 예측해, 계절 단위로 분리되어 있기 때문에 동적 구현을 위해 다소 비효율적인 형태로 자료가 저장됨에 따라 예측 자료(hindcast)의 통합 및 디렉터리명 설정 방식 개선을 위한 MME 기법별 예측 통합시스템을 구축하여 한 파일 내에 다양한 정보를 포함할 수 있는 디지털 자료를 생산하도록 하였다.

두 번째는 개별모델 편차 자료 생산 시스템이다. 현재 APCC MME 참여모델(개별모델) 예측 자료는 단정 예측값 형태의 디지털 자료로써 생산 및 제공되고 있으나, 모델의 계통적 오차에 대한 문제 및 사용자들의 편의성 증진 등을 위해 APCC 누리집에서는 위의 MME 편차 분포장과 같이 개별모델별 편차 분포장 형태로 제공되었다. 이를 위해 그래픽 시스템에서 개별모델별 단정 예측자료로부터 편차값을 산출하는 과정을 거치게 되며, 이와 유사하게 개별모델 편차 정보를 활용하는 다른 계절예측 콘텐츠에서도 해당 콘텐츠 생산 시스템에서 편차값을 매번 산출하는 과정을 거치게 된다. 김유진 외(2023)에서는 개별모델 예측 정보를 동적 구현하기 위해 MME 예측 정보와 동일한 방식을 고안하였고, 현 AFS 시스템에서는 개별모델 예측 정보를 별도의 편차값 형태의 디지털 자료를 생산하거나 저장하지 않는 실정임에 따라 효율적인 동적

구현을 위해 개별모델의 편차값을 산출하여 hindcast 자료를 통합하는 등 한 파일 안에 다양한 정보가 포함된 디지털 자료를 생산하는 시스템을 구축하였다.

세 번째는 개별모델 확률 예측 생산 시스템이다. 개별모델 확률 예측 정보를 생산하기 위해 실시간 예측(forecast)에 대한 시스템을 구축된 바 있으나, 김유진 외(2023)에서 고안한 개별모델 확률 예측 동적 포출 방안과 같이 hindcast 기간 동안 3분위별 확률값의 변화를 포출하기 위해 hindcast 확률 예측 정보가 필요한 상황이다. 이에 따라 hindcast에 대해서도 확률 예측 자료를 생산하는 시스템을 구축하였다.

마지막으로 지역별 기후전망 요약맵 생산 시스템이다. 해당 시스템은 김유진 외(2023)에서와 같이 예측 정보와 검증 정보를 지역별로 한 눈에 보기 쉽게 요약한 정보(지도)를 생산하는 시스템으로써 14개 지역별로 결정론적 MME의 예측 편차값 평균과 확률론적 MME의 3분위별 예측 확률값을 비롯하여 예측 정확도인 ACC(결정론적 MME), ROC(확률론적 MME) score를 취합한 디지털 자료를 생산한다.

### 2.5.2. 신규 홈페이지용 정적/동적 기후정보 웹 콘텐츠 생산 및 적용 테스트

신규 홈페이지의 정적 웹 콘텐츠는 기존 그림파일을 그대로 사용하게 되며 일부 페이지의 구성 및 기능을 수정 또는 개선하였고 동적 웹 콘텐츠는 기존 관측자료와 디지털 자료 생산 시스템에서 생산된 자료를 이용하여 포출 기능을 테스트 하였다.

### 2.5.3. 기후평년값 동적 포출 서비스

신규 홈페이지는 2024년 2월부터 기후예측, 기후현황 등 정적/동적 기후정보서비스를 제공하고 있다. 현재 기후현황의 최근기후 페이지에서는 두 가지 기후평년기간(1981-2010, 1991-2020)에 대한 기후평년값(Climatological Standard Normals)을 뺀 편차값(Anomaly)을 동적 포출 서비스로 제공하고 있다(Table 2.15) 여기에 추가적으로 기후평년값을 제공하기 위해 사용자가 기후평년기간, 시작일/종료일, 윤년 여부, 변수를 선택하여 포출하도록 구성하였다.

Table 2.15. Climate monitoring variables by the period of climatological standard normals.

기후평년기간	제공 변수
1981-2010	강수(Precipitation), 지표기온(2m Temperature), 상향장파복사(Outgoing Longwave Radiation), 해수면온도(Sea Surface Temperature),
1991-2020	해면기압(Mean Sea Level Pressure), 10m 바람(10m Wind), 500hPa 지위고도(500hPa Geopotential Height)

## 2.6. MME 계절예측 특성 고려한 기온 계절예측 보정 및 현업활용 기반 마련

### 2.6.1. MME 기온의 계절예측 경향과 실제 기후변화 고려한 기온 예측 보정 방법 개발

본 연구에서는 동아시아 기온의 선형추세를 보정하기 위해 크게 선형추세 조정, 그리고 분위사상기법을 이용하였다. 두 방법 모두 격자 기반으로 보정을 적용하였고 대상인 동아시아 지역은 [15° N-60° N, 75° E-150° E]이다. 첫 번째 선형추세 조정 방법은 격자별 기온 예측의 선형추세를 빼고 관측의 것을 더하는 방법, 다시 말해 모델 예측의 선형추세를 실제를 고려하여 조정하는 방법이다. 이는 모델과 관측 기온의 장기적 경향 분석을 토대로 하기 위해 직관적으로 이해하기도 쉽고 현업에 적용하는 것도 용이할 것이라 판단한다. 두 번째 방법인 분위사상기법은 앞선 선행연구들 중 지역규모 모델이나 기후시나리오 자료 중 극한 기후나 평균, 표준편차의 편이를 보정으로 많이 쓰이는 것인데, 이를 계절예측에 적용하였다. 2023년, 두 가지 방법으로 개별모델을 보정 후, 이에 MME 기법을 적용하여 단정예측, 확률예측의 보정 후 MME를 생산하여 보정 전후의 예측 패턴과 예측력을 비교하였다. 그리고 선형추세 조정 방법이 기온의 장기경향을 보정하는데 더 적합하다고 판단하고, 2024년에는 선형추세 조정 방법을 적용하여 매일 보정자료를 생산하는 자동화 시스템을 개발하였다.

기온 보정의 훈련기간은 각 발생 시기 개별모델의 hindcast 기간을 가능한 많이 활용할 수 있도록 하였고, 타겟인 보정 기간은 2013년부터 2022년이다. 가장 최근인 2022년 12월을 예로 든다면, 보정의 타겟이 되는 시점은 2022년 12월이고, 이 시기 발행된 2022년 MME의 hindcast 기간은 1991-2010년인데 개별모델은 이보다는 길기 때문에(예: UKMO GLOSEA6, 1991-2016) 시작점은 91년으로 동일하더라도 뒷단은 개별모델별 가능한 시기까지 최대한 길게 선정하였다. 1991년 이전은 기후 변동성이 최근과 다를 수 있다고 판단하여 사용하지 않는다.

기온 예측 장기경향 보정의 기준이 되는 관측자료는 2022-2023년 연구에서는 NCEP2 reanalysis 자료(Kanamitsu, et al., 2002)를 사용하였으나, 2024년 연구에서는 고해상도 MME 시스템의 개발과 맞추어 새로운 기준 관측자료로 내부 검토중에 있는 ERA5 reanalysis 자료(Hersbach et al., 2020)를 사용하였다. 이는 1° x1° 고해상도 MME 수평 해상도와 일치한다.

### 2.6.2. 자동화 시스템 구축

현업에서 장기경향 보정을 매일 생산하기 위해서는 자동화 프로그램을 작성해 놓고 운영을 효율적으로 하는 것이 중요하다. 이에 자동화 프로그램을 위한 순서도를 작성하고, 이와 같은 순서로 시스템을 구축하였다(Figure 2.16). 보정하려는 예측 자료, 목표 연월은 yaml을 이용한 입력자료로 들어간다. 그 후, 순차적으로 모델의 선형추세, 관측의 선형추세를 계산하고 이를 이용해 보정계수,  $\alpha$ 를 구하고, 이로부터 개별모델을 보정, 이를 이용하여 DMME, PMME의 보정 예측값을 산출한다.

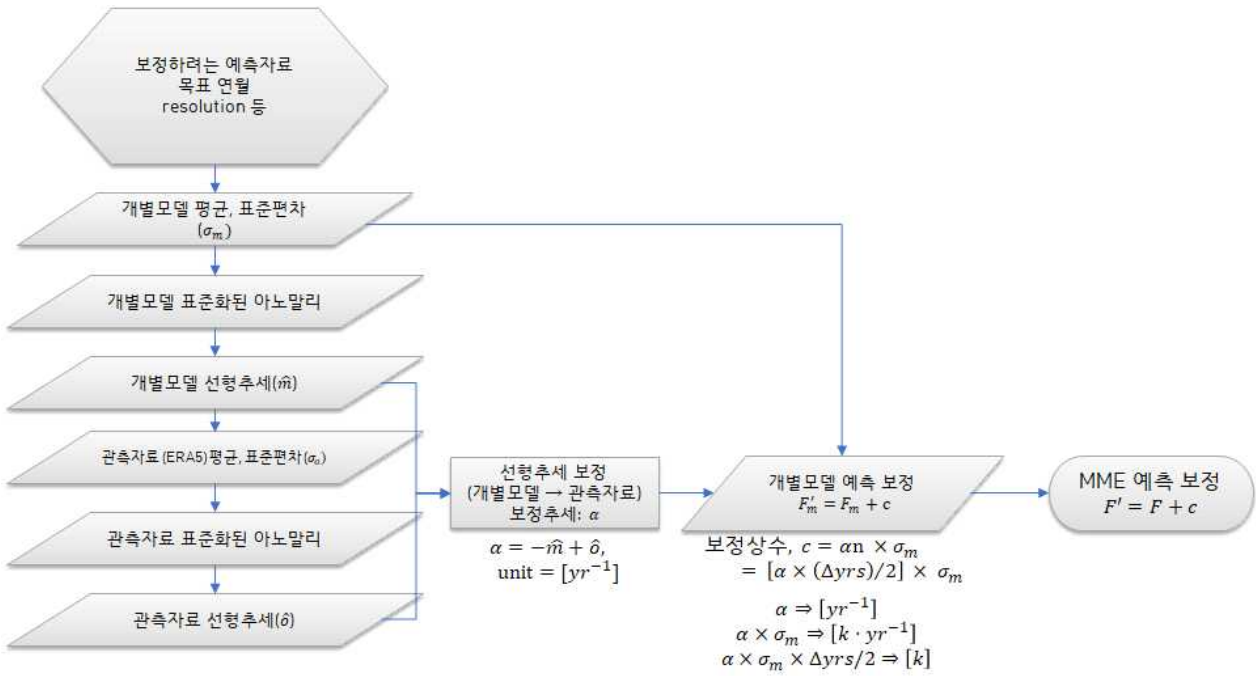


Figure 2.16. Flow chart of the linear trend correction T2m automatic program

## 2.7. 고해상도 MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축

### 2.7.1. 계절내예측 모델 및 관측자료

본 연구에서 사용된 계절내 예측자료는 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)에서 운영하는 국제협력 연구프로그램인 세계기상연구프로그램 (World Weather Research Programme, WWRP), 세계기후연구프로그램(World Climate Research Programme, WCRP), 세계 관측프로그램(The Observing System Research and Predictability Experiment, THORPEX)에서 공동으로 지원하는 S2S(Subseasonal-to-Seasonal) 프로젝트에 참여하는 총 12개 모델을 사용하였으며, 모델의 예측자료는 현재 ECMWF 데이터 포털에서 제공하고 있는 자료를 수집하였다. 또한, 본 연구에서는 MME를 위한 공통 과거재현기간을 확장하기 위해 SubC로부터 2010-2016년 NCEP 모델의 6시간 원시자료를 추가 수집하였다. 연구에 사용된 12개의 모델은 각각의 예측 스케줄과 전산자원에 따라 모델의 특성이 매우 상이하다(Table 2.16). 예를 들어, ECMWF, ECCO, NCEP은 예측(forecast)날짜와 동일한 날짜에 과거재현자료(hindcast 또는 reforecast)를 제공하고 있으며, UKMO, KMA, JMA는 매일 예측자료를 생산하고 과거재현자료는 고정된 날에 생산하고 있다. 즉, UKMO와 KMA는 한 달에 4회 고정된 날짜(1, 9, 17, 25일)에 제공하고 있으며, JMA는 매월 15일과 마지막 날에 과거재현자료를 생산하고 있다.

다양한 특성을 가진 모델 간 비교를 위해 자료를 동일한 기준으로 표준화할 필요가 있으며, 시간 해상도는 24시간 공간 해상도는 모두  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 로 변환하였다. 본 보고서는 현업을 목적으로 수행되는 바 예측날짜와 과거재현날짜가 동일한 모델만 활용해서 분석한 기존의 연구(문자연 등, 2018)와는 달리, 다양한 현업기관에서 생산·제공하고 있는 예측일이 상이한 모든 모델도 함께 활용하였다. 본 연구에서는 보다 다양한 모델의 예측정보를 활용하고자, 현재 S2S에서 제공하고 있는 12개 모델의 가장 최신 버전의 공통 과거재현자료(2003-2015년, hindcast@v2023)를 활용하였다. 모델의 예측성 등을 검증하기 위한 관측자료로 강수는 GPCP(Global Precipitation Climatology Project; Yin et al., 2004), 해수면온도는 NOAA OISSTv2(Reynolds et al., 2002)를 사용하였다. 그 외 주요 변수에 대해서는 Era5(ECMWF Reanalysis v5; Hersbach et al., 2020)를 사용하였으며, 이때 자료의 시간 및 공간 해상도는 모델자료와 동일하게  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 로 변환하여 사용하였다. 또한, 본 연구에서는 MME 계절내 예측 방법으로 결정론적 예측을 수행하였으며, 개별 참여모델의 예측값에서 공통 과거재현기간(15년)의 기후값을 뺀 편차값을 단순 평균하는 방법을 사용하였다. 확률론적 예측을 위해서는 확률분포를 구성함에 있어 일갈수량 자료를 사용할 경우 무강수일이 다수 포함되면서 확률분포 추정 시 어려운 점을 감안하여 주별 평균(1-7일) 자료를 사용하였다.

Table 2.16 . S2S model summary used in the study (as of Jan. 2024).

GPC name	Forecast				Hindcast				
	Model	Frequency	Time Range	Ens. Size	Model	Frequency	Exp.	Ens. Size	Period
ECMWF	ECMWF/CY47R3(1-5월)	2/week(Mon, Thu)	0-46	51	ECMWF/CY47R3(1-5월)	2/week(Mon, Thu)	on the fly	11	2003-2022
	ECMWF/CY48R1(6-12월)	Daily	0-46	101	ECMWF/CY48R1(6-12월)	2/week(Mon, Thu)	on the fly	11	2003-2022
Exeter	UKMO/GloSea6	Daily	0-60	4	UKMO/GloSea6	4/month(1/9/17/25)	on the fly	7	1993-2016
Montreal	ECCC/GEPS7	Weekly(Thu)	0-32	21	ECCC/GEPS7	Weekly(Thu)	on the fly	4	2001-2020
Seoul	KMA/GloSea6-GC3.2	Daily	0-60	4(8) <sup>2)</sup>	KMA/GloSea6-GC3	4/month(1/9/17/25)	on the fly	3(7)	1993-2016
Washington	NCEP/CFSv2	Daily	0-44	16	NCEP/CFSv2	Daily	fix	4	1999-2016
Tokyo	JMA/GEPS2203 (1-2월)	Weekly(Wed)	0-34	50	JMA/GEPS2203	-	-	-	-
	JMA/CPS3 <sup>5)</sup> (3-12월)	Daily	0-34	5	JMA/CPS3 <sup>5)</sup>	2/month(fixed day) <sup>3)</sup>	fix	5	1991-2020
Melbourne	BoM/POAMA P24	2/week (Sun, Thu)	0-62	33	BoM/POAMA P24	6/month(1/6/11/16/21/26)	fix	33	1981-2013
Moscow	HMCR/RUMS5	Weekly(Thu)	0-46	41	HMCR/RUMS5	Weekly(Thu)	on the fly	11	1991-2015
Toulouse	MetFR/CNRM-CM 6.1	Weekly(Thu)	0-47	25	MetFR/CNRM-CM 6.1	Every 7 days <sup>4)</sup>	fix	10	1993-2017
Beijing	CMA/BCC-CPS-S2Sv2	2/week(Mon, Thu)	0-60	4	CMA/BCC-CPS-S2Sv2	2/week(Mon, Thu)	on the fly	4	2008-2022
-	IAP/CAS-FGOALS-f2-V1.3	Daily	0-65	16	IAP/CAS-FGOALS-f2-V1.3	Daily	fix	4	1999-2018
-	ISAC-CNR/GLOBO	Weekly(Thu)	0-32	41	ISAC-CNR/GLOBO	Every 5 days <sup>5)</sup>	fix	5	1981-2010

2) 2023년 8월 17일부터 앙상블 수 확대

3) 매년 예측일은 동일 하나, 매월 예측일이 상이함(1/16,1/31,2/10,2/25,3/12,3/27,4/11,4/26,5/16,5/31,6/15,6/30,7/15,7/30,8/14,8/29,9/13,9/28,10/13,10/28,11/12,11/27,12/12,12/27)

4) 1993년 1월 1일 기준으로 7일 간격으로 예측정보 생산(매년 예측일이 상이함)

5) 매년 1월 1일 기준으로 5일 간격으로 예측정보 생산(매년 예측일은 동일 하나, 매월 상이함)

## 2.7.2. 계절내예측 검증 지수 및 지역

모든 예측은 개별모델의 공통 과거재현기간인 2002~2016년의 기후값에 대한 편차로 관측과 비교하여 검증하였다. 기후값 및 결정론적 MME 예보 검증에는 평균오차, PCC (Pattern Correlation Coefficient), ACC (Anomaly pattern Correlation Coefficient), 제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE) 지수를 적용하였고, 계절내 예측의 전반적인 성능 평가를 위해 8개 지역으로 나누어 분석하였다(Table. 2.17).

### 2.7.2.1 평균 오차

평균 오차(Mean Bias)는 예측자료와 관측자료의 편차에 대한 시간평균이며, 아래와 같이 나타낸다.

$$Mean\ Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i) \quad [2.1]$$

### 2.7.2.2 ACC

PCC는 두 공간분포에서 동일한 위치에 있는 값 간의 상관계수로, 주로 예측공간분포가 관측과 얼마나 유사한가를 나타내는 지수로 쓰이며, -1~1의 범위에 분포하고, 1에 가까울수록 두 패턴이 비슷함을 나타낸다. ACC는 PCC의 특별한 경우로 관측과 예측값의 직접적인 상관관계는 계절적 변동으로 인해 높은 값을 제공할 수 있으므로 아래 식과 같이 예측과 관측 모두에서 기후값을 제거하여 계산한 상관계수로 예측값을 검증한다.

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n w_i (f_i - \bar{f})^2 \sum_{i=1}^n w_i (o_i - \bar{o})^2}} \quad [2.2]$$

### 2.7.2.3 TCC

TCC는 한 지점에서 예측의 경년변동성이 관측과 얼마나 유사한지를 나타내는 지수로 쓰이며, -1~1의 범위에 분포하고, 양(음)의 값은 관측과의 경년변동성이 양(음)의 상관관계를 가진다.

### 2.7.2.3 제곱근오차

제곱근오차는 모델이 예측한 값과 관측값 사이의 오차를 나타내어 예측의 정확성을 살펴보는 척도로 사용되며, 아래 식과 같이 예측값이 관측값으로부터 갖는 오차를 제공하여 평균한 평균제곱오차의 제곱근으로 계산된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2}{n}} \quad [2.3]$$

Table 2.17. Definition of geographic domain of 8 regions verified in this study.

Region	Latitude	Longitude
Globe	90°S-90°N	0°-360°E
Tropics	20°S-20°N	0°-360°E
East Asia	15°N-60°N	75°-150°E
South Asia	10°S-35°N	60°-140°E
North America	10°N-75°N	190°-310°E
South America	60°S-10°N	270°-330°E
Australia	50°S-0°N	110°-180°E
Northern Eurasia	40°N-80°N	25°-90°E

### 2.7.3. 동아시아 지역 이상기후 예측을 위한 기반 연구

본 연구에서 동아시아 지역 이상기후를 정의 하기 위해 ERA5 재분석 자료 (Hersbach et al., 2020) 기온(2-m air temperature,  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) 일자료를 이용하였다. 격자별로 한랭, 온난 이상기후는 10, 90 퍼센타일을 기준으로 이보다 차가운, 그리고 따뜻한 날로 정의하였으며, 월별로 이상기후 일수를 산출하였다. 기준이 되는 기후기간은 1991-2010이고, 1979-2023 기간을 분석하였다.

계절예측자료는 비교적 긴 시간 자료가 축적되어 있는 T850, U850, V850을 사용하였으며, 기간은 2010-2023년, 14년이다. 계절예측자료와 월별 이상기후 일수의 TCC를 계산할 때는  $1^\circ \times 1^\circ$  로 관측과 모델예측 자료를 내삽하였다.

동아시아 이상기후를 분석하기 위한 계절내 기온 예측자료는 WMO 선도센터의 KMA, ECMWF 자료를 사용하였다. 2023년 생산된 hindcast 자료를 사용하였으며, KMA 모델은 hindcast 기간이 1993-2016, ECMWF 모델은 2003-2022로, 공통 기후 기간은 2003-2016, 14년으로 설정하여 이에 대한 아노말리를 분석하였다.

## 2.8. 기후분야 국제협력 및 정책지원

### 2.8.1. WMO 장기예보 선도센터 운영

2006년 11월 우리나라 기상청이 WMO 전지구 장기예측자료 생산센터(GPC, Global Producing Centre for Long-Range Forecast)로 지정되고, 2009년 4월에는 WMO로부터 다중모델 앙상블 예측 기술력을 인정받아 미국기상청과 함께 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 (LC-LRFMME, WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble)로 지정되었다.

세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 각 GPC에서 생산하는 장기예보 자료를 수집하고, MME 기법을 개발하여 서비스하고, 각 GPC의 예측자료와 MME 예측자료를 공통된 형태로 제공하는 ‘one-stop shop’ 이 되는 것을 궁극적인 목표로 하여 운영되고 있다 (Graham et al., 2011). 매달 ‘one-stop shop’ 으로서의 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 역할을 수행하기 위해 각 GPC들로부터 기후예측자료를 수집하고 MME 예측자료를 생산하여 매월 15일경에 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 누리집 (www.wmolc.org)를 통해 디지털 자료와 그림 형식의 다중모델앙상블 예측자료를 제공하고 있다. 또한 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에서 생산된 계절예측 정보는 WMO의 공식 계절예측정보로 실시간으로 WMO 누리집 (<https://community.wmo.int/latest-global-seasonal-forecasts>)과 기상청 누리집 (<https://weather.go.kr/w/weather/long-term/climte-prediction-wmo.do>)을 통해 사용자에게 제공되고 있다. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에서 한달 동안 주기적으로 수행되는 계절예측자료 수집에서부터 최종 계절예측정보를 회원국에게 제공하는 일련은 과정은 Figure 2.17과 같다.

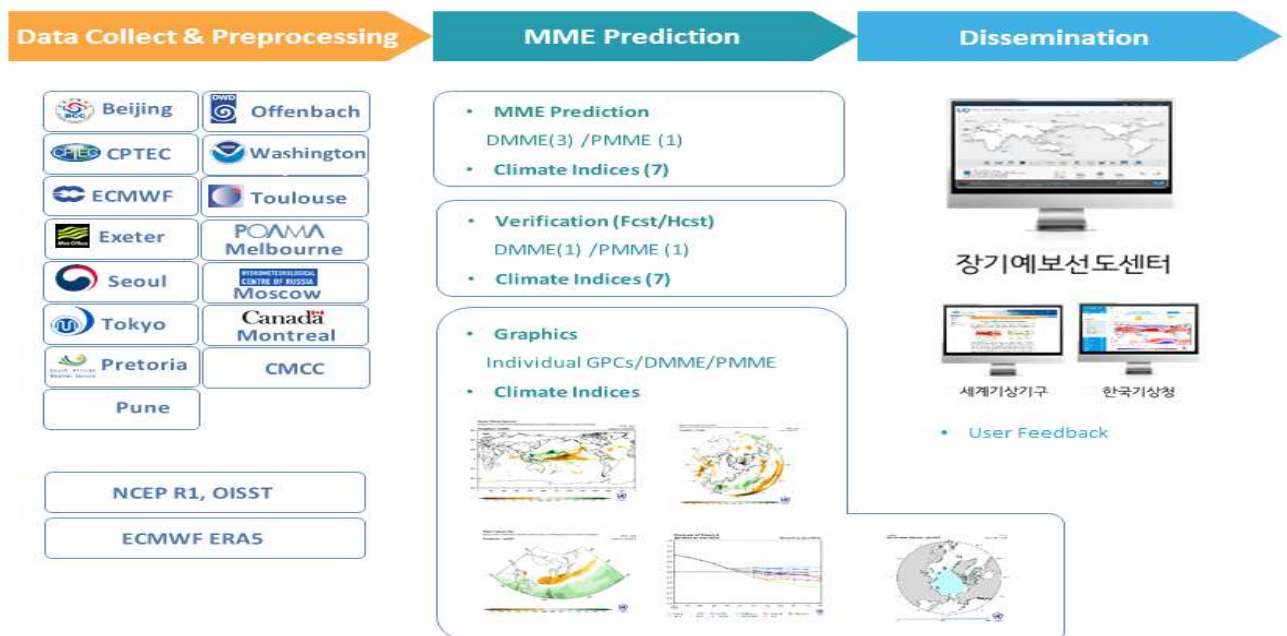


Figure 2.17. Forecast procedures at WMO LC-LRFMME.

세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 초창기에는 11개의 GPC로부터 계절예측자료를 수집하였다. 2010년 6월에 브라질의 CPTEC (Centre for Weather Forecasts and Climate Studies, GPC CPTEC)이 참여하면서 12개 GPC의 예측자료로 다년간 운영되어 오다가 2017년 독일 기상청 (Deutsche Wetterdienst, GPC Offenbach)이 추가되고, 2021년에는 CMCC (CentroEuro-Mediterraneosui CambiamentiClimatici)가 GPC (Global Producing Centre)로 지정되었으며, 2023년에는 인도 기상청 (GPC Pune)이 GPC로 승인되면서 현재는 총 15개의 GPC로부터 계절예측자료를 제공받고 있다(Table 2.18). 15개 GPC의 forecast와 hindcast 자료에 대한 표준화를 완료한 후, 9개 변수(2m 기온, 강수, 해수면온도, 해면기압, 850hPa 온도, 500hPa 지위고도, 850hPa u, 850hPa v, 해빙. 단, 해수면온도, 850hPa u/v, 해빙자료의 경우는 제공되는 GPC에 한함)에 대해 4개의 결정론적 MME 기법 (Simple Composite Method, SCM; Simple Linear Regression, SLR; Singular ValueDecomposition, SVD; Genetic Algorithm, GA)과 확률론적 MME 기법 (Min et al., 2009)으로 매월 3개월 계절예측자료를 생산하게 된다. Hindcast 기간은 GPC 간의 공통 hindcast 기간인 1993-2009년을 기준으로 한다. 각 기법에 대한 자세한 설명 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 누리집에서 확인 할 수 있어, 본 보고서에는 신지 않는다. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 운영을 통해 생산된 각 GPC와 MME의 예측 성능을 파악하기 위해 6개 변수 (2m 기온, 강수, 해수면온도, 해면기압, 850hPa 온도, 500hPa 지위고도. 단, 해수면온도의 경우는 제공되는 GPC에 한함)의 hindcast 및 forecast 에 대한 검증을 매월 수행하고 있다. 예측성능의 검증은 결정론적 예측과 확률론적 예측에 대해 수행하고 있다(결정론적 MME의 경우 SCM에 대한 검증만 수행함). hindcas 검증 또한 공통기준기간인 1993-2009년에 대해 계산된다. 검증에 사용되는 재분석 관측 자료는 forecast와 hindcast에 따라 다르며, Table 2.19와 2.20에 자세히 나타내었다. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 검증은 WMO 장기예보 표준 검증 체계 (WMO Long-Range Forecast Standardised Verification System, WMO LRF-SVS)에 의거하여 수행되고 있다. 결정론적 예측 검증에는 아노말리 상관계수분석(Anomaly Correlation Coefficient, ACC), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), MSSS와 Gerrity Skill Score (GSS)가 사용되고 확률 예측의 검증에는 Reliability Diagram, Roc Curve 및 Score, ROC map, Brier Score (BS), Brier Skill Score (BSS)가 이용하고 있다. 이렇듯 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에서는 WMO 회원국의 요구에 부합하는 고품질 서비스를 안정적으로 제공하는 역할과 함께 계절예측 정보의 활용성 증대를 위한 국내·외 협력 업무를 수행하고 있다. 따라서 본 과제에서는 2022년에서 2024년 동안 수행된 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 운영에 관한 전반적인 내용과 다중모델앙상블 시스템의 개선 사항, 그리고 계절예측정보의 활용성 증대를 위한 국내·외 협력업무 수행 결과를 정리하였다.

Table 2.18. Characteristics of seasonal forecast model from GPCs.

<2024년 8월 기준>

GPC	Beijing	CMCC	CPTEC	ECMWF	Exeter	Melbourne	Montreal	Moscow	Offenbach	Pretoria	Seoul	Tokyo	Toulouse	Washington
Institute	BCC	CMCC	CPTEC	ECMWF	UKMO	BoM	MSC	HMC	DWD	SAWS	KMA	JMA	MetFrance	NCEP/CPC
Country	China	Italy	Brazil	United Kingdom	United Kingdom	Australia	Canada	Russia	Germany	South Africa	Korea	Japan	France	United States
System Name	CSM1.1m	CMCC-SPS3.5		SEAS5	GloSea6-GC3.2	ACCESS-S2	CanSIPsv3.0	SL-AV	GCFS 2.1		Glosea6	JMA/MRI-CPS3	System8	CFSv2
System	Coupled	Coupled	2-tier	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled	2-tier	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled
Digital data download	o	o	o	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Data format	NetCDF	NetCDF	GRIB1	GRIB1	GRIB2	NetCDF	GRIB2	GRIB2	GRIB1	GRIB1	GRIB2	GRIB2	GRIB1	GRIB1
경로	FTP	FTP	FTP	Web	FTP	Web	Web	FTP	FTP	FTP	FTP	Web	Web	FTP
해상도	2.5°X2.5° (T106L26)	1.0°X1.0° (0.5° x 0.5°, L46) U200 U500	2.5°X2.5° (T126L42)	1.0°X1.0° (Tco319L91)	1.0°X1.0° (N216L85) U850 U500	N216L85 (N216L85)	T63L35, 1.1° x1.1° L85	0.9°lonx0.72°lat L96	2.5°X2.5° (T127)	2.5°X2.5° (T42L19)	2.5°X2.5° (N216L85)	1.25°X1.25° (TL319L100)	1.0°X1.0° (T359L137)	2.5°X2.5° (T126L64)
추가 변수	U850 V850 U200 V200 h200 h850	U850 V200 V500 V850 etc.	U850 V850	U850 V850	U200 V850 V500 V200 H850 H200	U850 V850 U200 V200	U850 V850 U200 V200	U850 V850 U200 V200	U850 V850 U200 V200	U850 V850 -	U850 V850 U200 U300 icfrc	U850 V850 U200 V200	U850 V850	-
<b>Forecast</b>														
Forecast period	6month (13mon)	6month (6mon)	5month (6mon)	5month (7mon)	5month (6mon)	5month (6mon)	12month (12mon)	3month (4mon)	5month (6mon)	3month (9mon)	6month (6mon)	6month (7mon)	5month (7mon)	9month (9mon)
Ensemble size	24	50	15	51	42	11	40	41	50	40	82	50	51	40
<b>Hindcast</b>														
Hindcast Period	1991-2015	1993-2016	1981-2010	1993-2016	1993-2016	1981-2018	1991-2020	1991-2015	1993-2019	1982-2009	1993-2016	1991-2020	1993-2018	1982-2010
Ensemble size	24	40	10	25	28	3	40	11	30	10	28	10	25	20

음영: 하늘색-2Tier, 분홍색-1Tier

경로: FTP - 자료 서버(IP:210.98.49.66)를 통해 수신, Web - 해당 GPC의 홈페이지를 통해 수신

Forecast Period, 해상도: 수집되는 자료 정보이며, 괄호는 해당 GPC의 계절예측모델 정보

Table 2.19. Reanalysis data used for verification of real-time forecast.

	NCEP-DOE Reanalysis-1	CAMS OPI	OISST v2
Source	NCEP/CPC	NCEP/CPC	NCEP/CPC
Variable	50hPa GPH (gpm), Sea level pressure (hPa), 2m temperature (K), 850hPa temperature (K)	Precipitation (mm/day)	Sea surface temperature (K)

Table 2.20. Reanalysis data used for verification of hindcast.

	ERA-interim	GPCP	OISST v2
Source	ECMWF	NASA	NCEP/CPC
Variable	50hPa GPH (gpm), Sea level pressure (hPa), 2m temperature (K), 850hPa temperature (K)	Precipitation (mm/day)	Sea surface temperature (K)

### 2.8.2. WMO S2S 국제조정사무소(ICO) 운영

WMO는 사회경제적 파급효과는 크지만 예측성이 취약한 계절내-계절 규모 예측능력 향상을 위해 세계기후연구프로그램 및 세계기상연구프로그램 공동으로 국제 연구 프로젝트인 S2S를 출범시켰다. 이에 우리나라 기상청/국립기상과학원은 S2S 예측 연구 분야의 국제 기여를 강화하기 위해 WMO와 양해각서를 체결하고 2013년 11월부터 국립기상과학원에 WMO S2S 국제조정사무소(ICO)를 유치·운영하였다. 그 후 기상청, 국립기상과학원 및 APEC기후센터는 2020년 제2차 기후협력회의를 통해 WMO S2S ICO의 운영을 APEC기후센터로 이관하기로 결정하고 WMO와의 양해각서를 개정(' 20.12.7)함으로써 APEC기후센터가 2021년 1월부터 WMO S2S ICO를 공식적으로 운영하게 되었다.

### 2.8.3. IPCC 등 기후분야 국제회의 참석 및 정부대표단 활동

UN 기후변화협약 등 국제 기후 협상의 주요 근거자료로 활용되는 IPCC 제6차 평가보고서(AR6)의 종합보고서가 제58차 IPCC 총회(2023년 3월 11일-19일, 인터라켄, 스위스)에서 승인되었다. 종합보고서는 IPCC 제6차 평가보고서 주기 중 승인된 3개의 특별보고서 및 3개의 실무그룹별 보고서를 종합한 것으로, 종합보고서의 승인은 요약보고서(SPM, Summary for Policy Maker)와 상세보고서(LR, Longer Report)를 중심으로 축조심사(line-by-line approval)를 통해 이루어졌다. IPCC에서는 2명의 선임연구원이 정부대표단의 일원으로 참석하여 SPM 및 LR의

의제 분석 및 대응 지원, SPM 분석 및 우리나라 검토 의견 반영을 위한 발언문 작성, SPM 승인을 위한 회원국 토의 내용 및 SPM 수정 관련 전문 작성, SPM 번역본 작성 및 보도자료 작성 지원 등을 수행하였다.

### 3. 결과

#### 3.1. MME 계절예측시스템 운영 및 개선

##### 3.1.1. 저해상도/고해상도 MME 계절예측시스템 운영

APCC는 MME 참여 기관인 11개국 15개의 기관 협조를 통해 각 모델의 예측 자료를 활용하여 결정론적 및 확률론적 MME 기법의 계절예측 정보를 매월 생산하였고, 2022-2024년 동안 총 36회의 계절예측 정보를 APCC 누리집 및 자료서비스 플랫폼(CLIKs)을 통해 제공(매월 15일 경)하였다. 또한, APCC MME 계절예측 정보를 보다 안정적으로 생산하고, 참여모델(기관)별 특이사항 및 이력 등을 관리하기 위해 각 참여모델(기관)별 개선·변경 및 특이사항, 자료 수집 일, 전처리/표준화 작업 수행일, MME 계절예측 정보 발행 일, MME 참여 목록 등을 정리한 별도의 현업일지(Figure 3.1)를 매월 작성하여 비치하고 있으며, MME 계절예측 정보의 일체에 대한 내부 점검 및 검토 과정을 거친 뒤 최종 제공하는 체계로 운영하였다.

APCC는 MME 계절예측 정보의 활용성을 높이기 위해 매년 사용자 수요조사를 시행하고 있다. 2019년 사용자 수요조사 결과에서는 보다 고해상도의 계절예측 정보를 요구하는 다수의 의견이 있었고, 이를 반영하기 위해 고해상도 MME 계절예측 시스템을 구축하였다(김유진 외, 2021). 6단계 사업(2022-2024년)에서는 본 시스템을 통해 고해상도( $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ )와 저해상도( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ )의 두 가지 해상도의 예측 자료를 생산하고 있으며, 자료서비스 플랫폼(CLIKs)에서 이를 병행 제공하고 있다.

APCC MME 참여모델의 구성은 참여 기관의 상황에 따라 모델의 개선·변경 사항 혹은 특이사항 등의 사유로 매월 구성이 달라질 수 있으며, 가능한 많은 모델이 참여할 수 있도록 참여 기관과의 긴밀한 교류와 참여 기관에서 제공하는 예측 자료에 대한 상시 모니터링을 통해 많은 노력을 기울이고 있다. 또한, 2022-2024년 기간 동안 MME 참여 기관명의 변경을 비롯한 참여모델의 다양한 개선·변경사항이 있었다. 부산대학교(Pusan National University, PNU)의 CGCMv2.0 모델은 국립농림과학원(Rural Development Administration, RDA)에 이관됨에 따라 PNU/RDA로 기관명이 변경되었으며, 대만기상청은 2023년 10월부터 기관의 승격으로 기관명이 CWB(Central Weather Bureau)에서 지금의 CWA(Central Weather Administration)로 변경되었다. 기관명의 명칭 변경으로 사용자에게 혼돈을 최소화하기 위해 APCC 누리집 및 자료서비스 플랫폼에 해당 변경사항의 안내와 함께 변경 전/후를 구분하여 제공하도록 하였다. 러시아 MGO 기관의 MGOAM 모델의 경우 과거 기후 재현(hindcast) 기간이 MME에 참여하는 타 모델들의 hindcast 기간과 차이가 커 MME 참여에 제외되어 왔지만, 2024년 9월 MGOAM-2에서 MGOAM2.4 모델로 개선되면서 hindcast 기간의 확장됨에 따라 MME 참여가 가능하게 되었다. 이와 함께 타 참여모델의 개선·변경사항 및 개선 효과와 관련된 내용은 3.1.1.1 절에서 상세히 후술하고자 한다. 이러한 변동 사항을 반영하여 2022-2024년 기간 동안 MME 계절예측 정보에 참여한 기관 및 모델 현황은 다음과 같다(Table 3.1~3.3).



Table 3.1. Lists of participating in APCC MME for 2022.

예측 계절	MME 참여기관(모델)	참여 수	제공일
2022JFMAMJ	APCC, BCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	14	(2021) 12.20
2022FMAMJJ	APCC, BCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	14	1.20
2022MAMJJA	APCC, BCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	14	2.21
2022AMJJAS	APCC, BCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	14	3.21
2022MJJASO	APCC, BCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	14	4.15
2022JJASON	APCC, BCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, UKMO	13	5.16
2022JASOND	APCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	12	6.15
2022ASONDJ	APCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	13	7.15
2022SONDJF	APCC, BCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	14	8.16
2022ONDJFM	APCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, UKMO	12	9.15
2022NDJFMA	APCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, UKMO	12	10.17
2022DJFMAM	APCC, BCC, BoM, CMCC, CWB, ECCO, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	13	11.15

Table 3.2. Lists of participating in APCC MME for 2023.

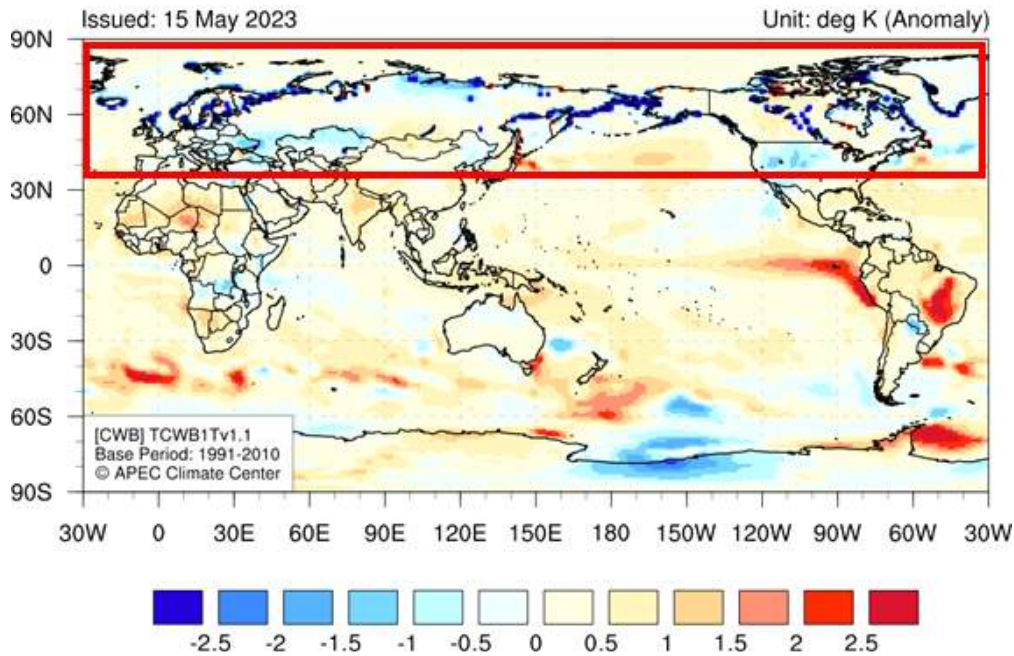
예측 계절	MME 참여기관(모델)	참여 수	제공일
2023JFMAMJ	APCC, BoM, CMCC, CWA, ECCC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	12	(2022) 12.15
2023FMAMJJ	APCC, BoM, CMCC, CWA, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	13	1.16
2023MAMJJA	APCC, BCC, BoM, CMCC, CWA, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	14	2.15
2023AMJJAS	APCC, BoM, CMCC, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, UKMO	11	3.15
2023MJJASO	APCC, BoM, CMCC, CWA, ECCC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	12	4.17
2023JJASON	APCC, BoM, CMCC, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, UKMO	11	5.15
2023JASOND	APCC, BoM, CMCC, ECCC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	11	6.15
2023ASONDJ	APCC, BoM, CMCC, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	12	7.17
2023SONDJF	APCC, BoM, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	11	8.16
2023ONDJFM	APCC, BoM, CMCC, ECCC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	11	9.15
2023NDJFMA	APCC, BoM, CMCC, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	12	10.16
2023DJFMAM	APCC, BoM, CMCC, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA	11	11.15

Table 3.3. Lists of participating in APCC MME for 2024.

예측 계절	MME 참여기관(모델)	참여 수	제공일
2024JFMAMJ	BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	11	(2023) 12.15
2024FMAMJJ	APCC, BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	12	1.15
2024MAMJJA	APCC, BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	12	2.15
2024AMJJAS	APCC, BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NCEP, PNU/RDA, UKMO	11	3.15
2024MJJASO	APCC, BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	12	4.15
2024JJASON	APCC, BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	12	5.16
2024JASOND	APCC, BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	12	6.17
2024ASONDJ	APCC, BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	12	7.15
2024SONDJF	APCC, BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	12	8.16
2024ONDJFM	APCC, BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MGO, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	13	9.19
2024NDJFMA	APCC, BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MGO, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	13	10.15
2024DJFMAM	APCC, BoM, CMCC, ECCO, HMC, JMA, KMA, MGO, MetFR, NASA, NCEP, PNU/RDA, UKMO	13	11.15

대만기상청(CWA)의 경우 2023JJASON 계절부터 예측값에 이상치(outlier)가 확인됨에 따라 MME 참여모델에서 제외하였다. 김유진 외(2023)에 따르면, CWA 예측 편차장 상에서 북위 30도 이상의 영역의 해안선 부근에 이상치가 나타나며(Figure 3.2), 해안선 부근에서 실시간 예측(forecast)값과 기후평년값으로 활용되는 hindcast 예측값과의 차이가 크게 나타났다. 이러한 현상은 지표 기온 관련 변수(t2m, ts)에서만 나타났으며, 특히 5월~11월 특정 예측 기간에서 그 차이가 두드러지게 나타남을 확인하였다. 해당 문제에 대한 상세 원인을 파악하기 위해 CWA와 공동 분석을 수행하였고, 대기모델과 해양모델의 접합 과정에서의 발생한 문제로 추정되고 있다. CWA는 해당 문제점을 해결하기 위해 개선 방안을 모색하고 있으며, 곧 도입(2025년)할 CWACFSv2 모델에서는 해당 문제가 해결되기를 기대하고 있다. 해당 문제가 해결되기 전까지 APCC MME 예측 신뢰성의 문제로 CWA 모델을 MME 참여모델에서 제외하였고, 단일 모델 예측정보는 이와 상관없이 계속해서 제공하였다.

## Surface Temperature for June 2023



## Temperature at 2m for June 2023

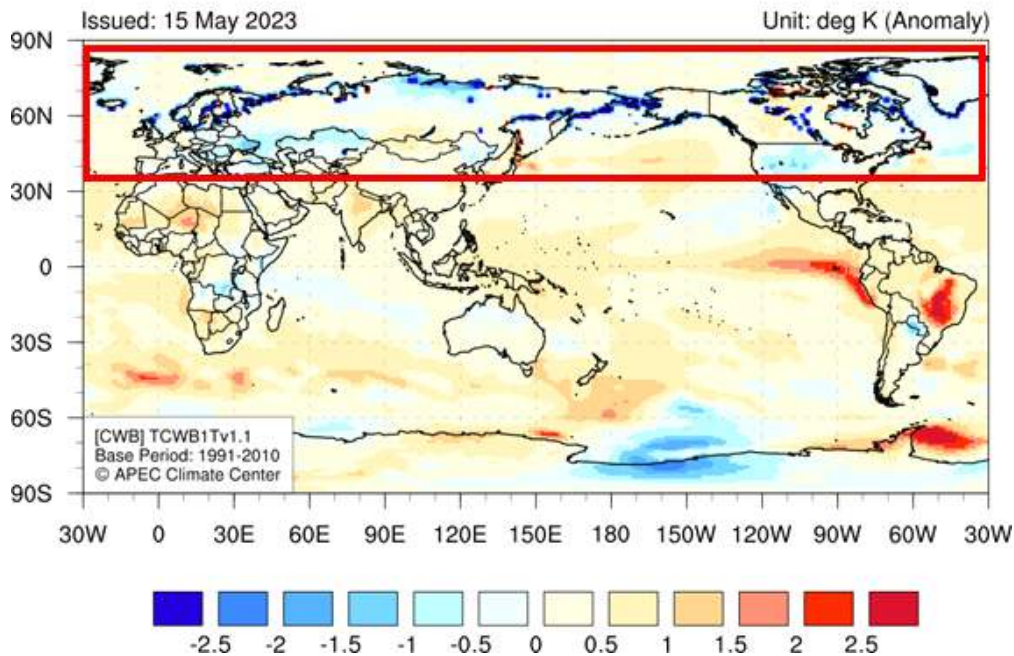
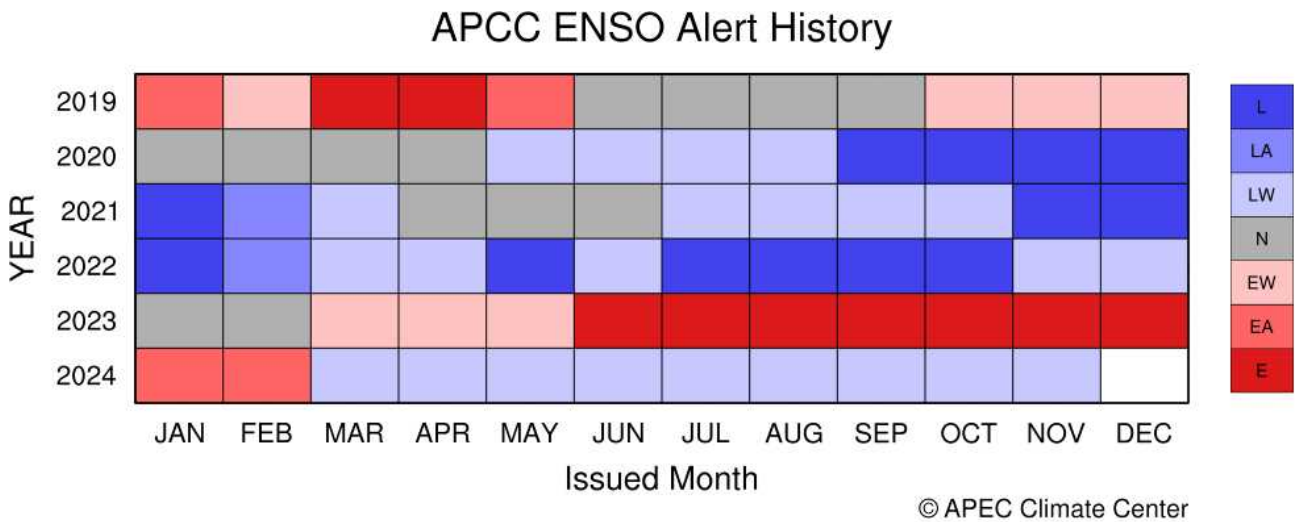


Figure 3.2. Examples for outlier near the coastal line in the CWA (CWB) model's forecast. (top) surface temperature, (bottom) 2-m temperature (from Kim et al., 2023).

2020년에 구축되어 2022년 4월, ENSO 경보 기준과 업데이트 주기 등을 개선한 ENSO 경보 시스템을 통해 생산된 ENSO 경보 정보는 매월 2회(15일, 월 말) APCC 누리집을 통해 제공하고 있으며, 2022-2024년 기간 동안 운영하여 총 67회의 ENSO 경보 정보를 제공하였다. 특히

2023-2024년의 경우 비교적 강한 엘니뇨가 발달하고 쇠퇴하는 해로써 ENSO 활동이 활발하여 ENSO 경보 정보의 관심이 많은 기간이라고 할 수 있다. APCC 누리집에서는 당월 ENSO 경보 정보뿐만 아니라 과거 5-6년의 ENSO 경보 이력을 제공하고 있으며, 2019-2024년 기간의 ENSO 경보 이력은 다음과 같다(Figure 3.3).



E: El Niño EA: El Niño Alert EW: El Niño Watch N: Neutral L: La Niña LA: La Niña Alert LW: La Niña Watch

Figure 3.3. ENSO Alert status history for January 2019~November 2024.

유사한 ENSO 조기경보 정보를 제공하는 타 기관(BoM, NIWA, NOAA)의 ENSO 경보 정보와 APCC ENSO 경보를 비교하기 위해 PMC(The Pacific Meteorological Council)에서 제공([www.pacificmet.net/enso-tracker](http://www.pacificmet.net/enso-tracker))하는 ENSO 경보 정보를 비교하였다(Figure 3.4). 관측된 Nino3.4 지수는 2023년 12월까지 2.0에 가까운 강한 엘니뇨 상태로 발달하다가 그 이후부터 점차 쇠퇴하였고, 2024년 5월부터 중립상태로 접어들면서 2024년 8월부터 최초로 음의 값으로 변화하였다. 하지만 NIWA, NOAA, BoM 기관에서 제공하는 ENSO 경보 정보는 엘니뇨가 쇠퇴하기 시작하는 기간에도 여전히 “El Nino” 단계의 다소 강한 경보를 내었고, BoM의 경우에만 Nino3.4 지수가 중립상태로 될 시기에 “Neutral” 단계로 경보 수준이 낮아짐을 알 수 있다. 반면 APCC ENSO 경보는 엘니뇨가 쇠퇴하는 2024년 1월부터 “El Nino Alert” 단계로 한 단계 낮은 경보를 제시함에 따라 타 기관들에 비해 시의적절이 ENSO의 발달/쇠퇴 정보를 제시했다고 볼 수 있다. 다만 2024년 3월 예측분부터 APCC MME 참여모델들의 대부분이 라니냐 예측 경향에 따라 “La Nina Watch” 단계를 실제 관측에 비해 이르게 예측하였다. 타 기관에서 예측한 ENSO 경보 또한 실제 관측된 ENSO 상태에 비해 “La Nina Watch” 단계를 이르게 예측하는 경향을 보였으나, NIWA와 BoM의 경우 APCC보다 두 달 늦은 2024년 5월 예측분부터 라니냐를 내다보았다. 2023-2024 ENSO 예측의 경우 많은 기후모델들이 예측을 다소 못한 부분도 있지만 APCC ENSO 경보시스템이 모델들의 예측을 과하게 반영하고 있는지에 대한 검토 및 분석이 필요하며, ENSO 경보 기준에 대한 개선 필요성이 제기된다.

### Pacific Regional Climate Centre ENSO tracker

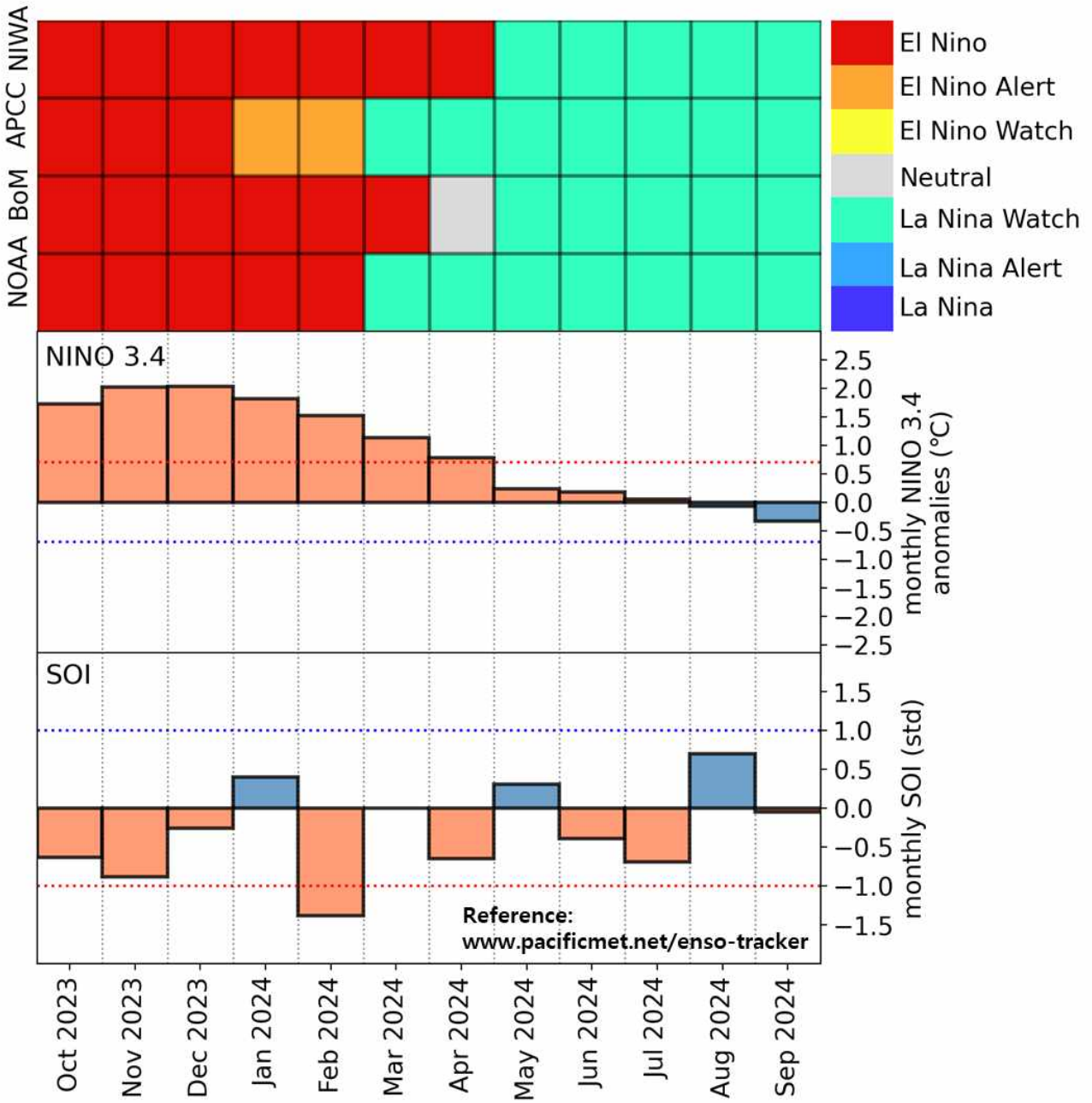


Figure 3.4. ENSO tracker information for each institution (NIWA, APCC, BoM, and NOAA) provided by PMC ([www.pacificmet.net/enso-tracker](http://www.pacificmet.net/enso-tracker)).

APCC는 MME 계절예측 정보의 예측 수준을 진단하고 신뢰성을 높이기 위해 결정론적 및 확률론적 MME 기법에 따라 예측 정확도를 매년 평가하고 있다. 먼저 본 연구의 대상 기간인 2022-2024년의 결정론적 MME 예측 정확도를 평가하기 위해 2013년을 기준으로 hindcast 예측에 대한 연평균 ACC(anomaly correlation coefficient)를 분석하였다(Figure 3.5). 그 결과, hindcast 예측 정확도는 2013년으로부터 꾸준히 향상되어 오면서 2013년 대비 2024년의 hindcast 예측 정확도는 전구 기온 약 16.33%, 전구 강수 약 22.02%가 향상되었다.

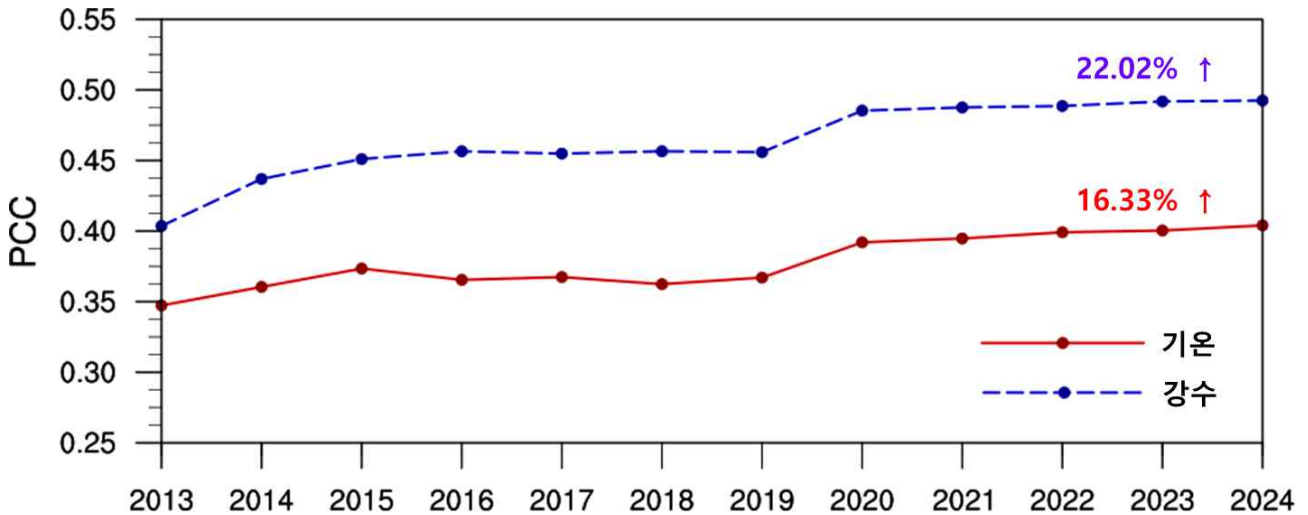
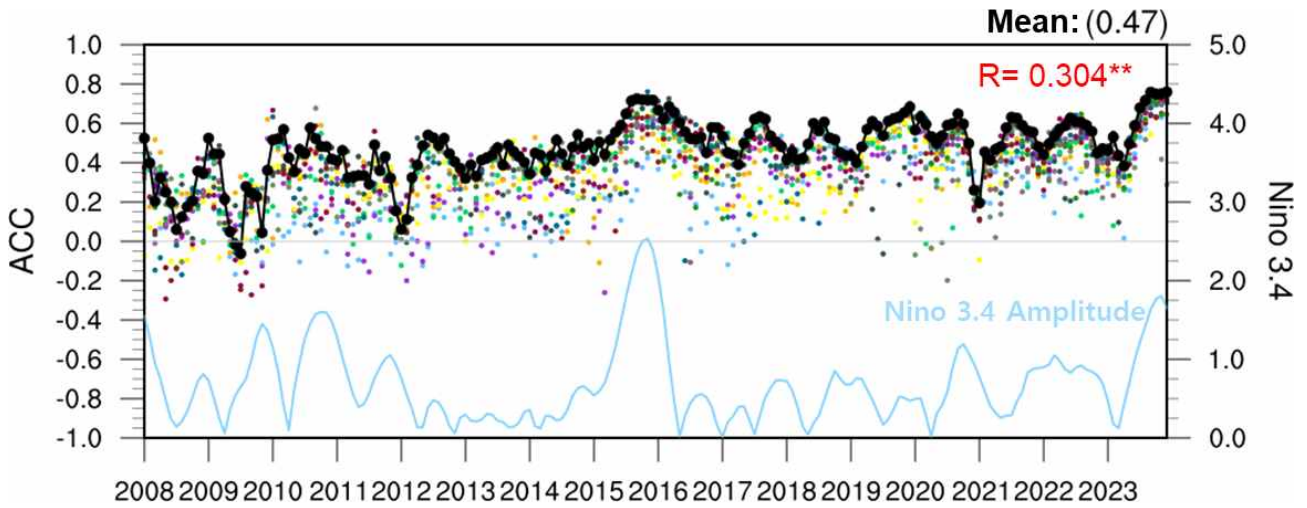


Figure 3.5. Changes of APCC MME hindcast prediction skill (ACC) during 2013 to 2024 for 2-m temperature (red) and precipitation (blue).

Hindcast 예측뿐만 아니라 실시간 예측(forecast)에 대해서도 결정론적 MME의 예측 정확도를 분석하였고, MME 참여모델들의 예측 정확도를 함께 분석하여 MME 계절예측 정보의 예측 수준을 비교하였다. Figure 3.6은 2008년부터 2023년까지 APCC MME와 MME 참여모델들의 실시간 기온(t850) 및 강수(prec) 예측에 대한 계절별 예측 정확도(ACC)에 대한 시계열 분석 결과로써 일부 계절을 제외하고 대체로 참여모델들의 예측 정확도에 비해 MME 예측 정확도가 높게 나타나며, 전 기간 평균 예측 정확도는 강수(0.38)보다 기온(0.47)에서 저금 더 높게 나타났다. 이러한 예측 정확도는 ENSO의 발생 강도(amplitude)와 밀접한 연관성이 나타나는데, 이를 확인하기 위해 Nino3.4의 강도(절대값)와 MME 예측 정확도 간 시간 상관분석을 수행하였다. 그 결과, 99% 신뢰 수준에서 기온 0.304, 강수 0.595의 상관계수를 보이면서 기온 및 강수 예측 정확도는 ENSO 발생 강도와 시간 상관성이 높은 것으로 나타났으며, 특히 강수가 기온보다 상관성이 높게 나타났다. 2023년의 경우 엘니뇨가 강하게 발달한 해로써 2023년 MME 기온 예측의 경우 전 기간에 걸쳐 매우 우수한 예측 정확도를 보였으며, MME 강수 예측의 경우에도 평균 예측 정확도보다 높은 예측 수준으로 나타나긴 하지만 기온보다 높은 상관관계인 점에서 기대 수준은 못미치는 것으로 나타났다. 이는 최근 기후변화에 따른 ENSO의 발달 강도와 강수 발생 형태, 강도 등 관련성의 변화에 대해 추가 분석이 필요함을 시사한다.

### (a) T850: Global



### (b) PREC: Global

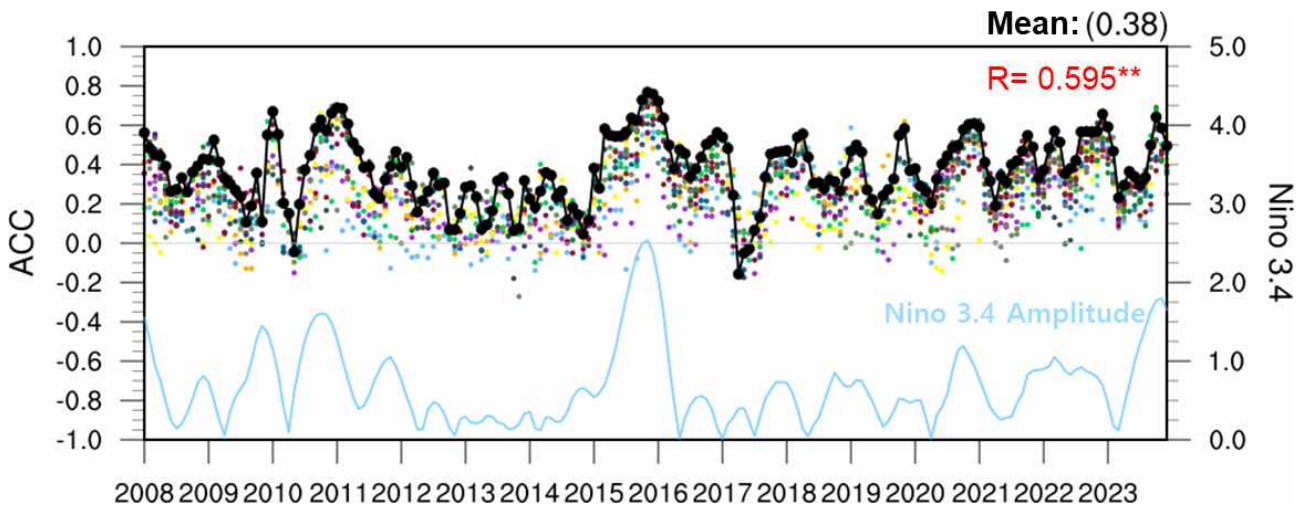


Figure 3.6. Changes of APCC MME (Black dot and line) and individual models (Color dot) real-time forecast prediction skill (ACC) during 2008JFM to 2023DJF for temperature at 850hPa (a) and precipitation (b). The sky blue line means the observed Nino3.4 index amplitude and R means the temporal correlation between APCC MME real-time forecast ACC and observed Nino3.4 index.

결정론적 MME와 마찬가지로 확률론적 MME에 대해서도 예측 정확도를 평가 및 진단하였다. 먼저 Figure 3.7은 2008-2023년 기간 동안 APCC 확률론적 MME 기온(t850) 및 강수(prec) 예측에 대한 적중률(hit rate)을 분석하였고, 과거 대비 최근 예측 적중률의 변화를 살펴보고자 과거 10년(2008-2017년) 기간과 최근 10년(2014-2023년) 기간의 예측 적중률과 그 차이를 분석한 결과이다. 그 결과, 전 기간 및 전 지구 평균 예측 적중률은 기온 57.09, 강수 36.58로써 강수에 비해 기온의 적중률이 더 높은 특성을 보였으며, 과거 10년 기온 예측 적중률(54.67)에 비해 최근 10년 기온 예측 적중률(61.01)이 더 높게 나타남에 따라 과거 대비 최근 확률론적 MME 기온 예측 수준이 향상되었음을 의미한다. 하지만 강수 예측 적중률은 과거 10년에 비해

최근 10년에서 다소 하락하는 것으로 나타나는데, 이는 위에서 언급한 바와 같이 해당 원인 분석과 최근 강수 발생 형태, 강도 등의 변화를 함께 살펴보아야 할 필요성이 제기된다.

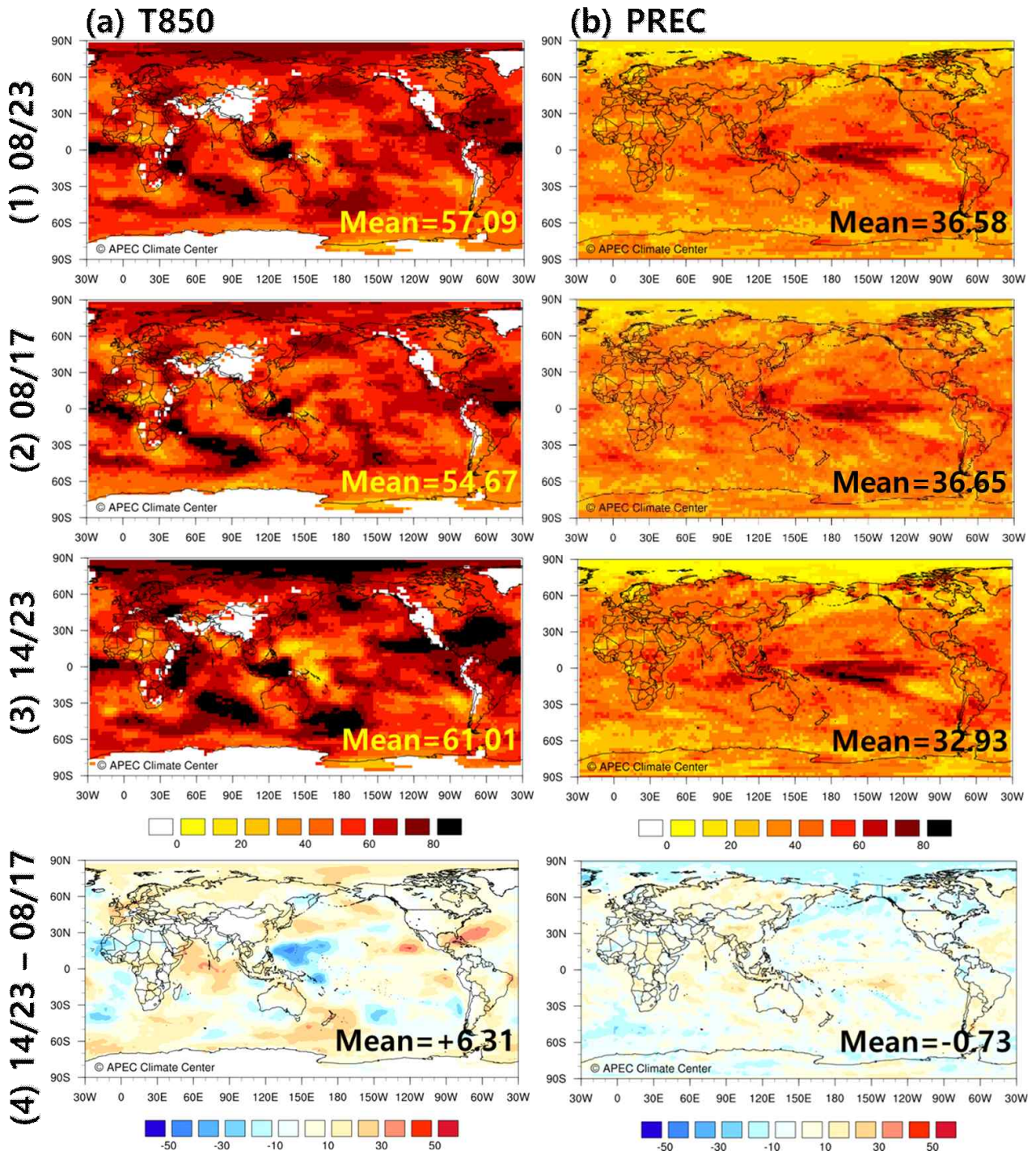


Figure 3.7. Distribution of hit rate for APCC probabilistic MME forecast during (1) 2008-2023, (2) 2008-2017, (3) 2014-2023, and (4) 2014-2023 minus 2008-2017: (a) temperature at 850hPa and (b) precipitation.

확률론적 MME는 가우시안(gaussian) 정규 분포를 기반으로 3분위 예측(평년 이상; above normal, 평년 비슷, near normal, 평년 이하, below normal) 정보를 제공함에 따라 이를 3분위 예측별로 보다 정교한 검증 기법인 ROC(Relative Operating Characteristic) score로써 예측 적중률을 분석하였다. Figure 3.8은 2008-2023년 기간 동안 APCC 확률론적 MME 계절별 기온(t850) 및 강수(prec) 예측에 대한 ROC score를 3분위 별로 시계열 분석한 결과로써 기온 및 강수 모두 예측 오/적중률의 기준이 되는 ROC score 0.5를 기준으로 일부 계절을 제외하고는 대체로 기준 이상의 수준을 보였다. 결정론적 MME와 유사하게 ROC score와 ENSO 강도와와의 시간 상관성 분석을 수행한 결과, ENSO 강도와 결정론적 MME 상관관계보다 확률론적 MME와의 상관관계가 더 높게 나타났으며, 강수보다 기온의 상관성이 더 높은 것으로 나타났다. 2017년 이후로 기온 및 강수 예측 적중률이 증가하는 경향이 있으며, 이는 ENSO 강도와와의 상관성 분석에서와 같이 최근 강도 높은 ENSO 발생 빈도와 관련이 있다.

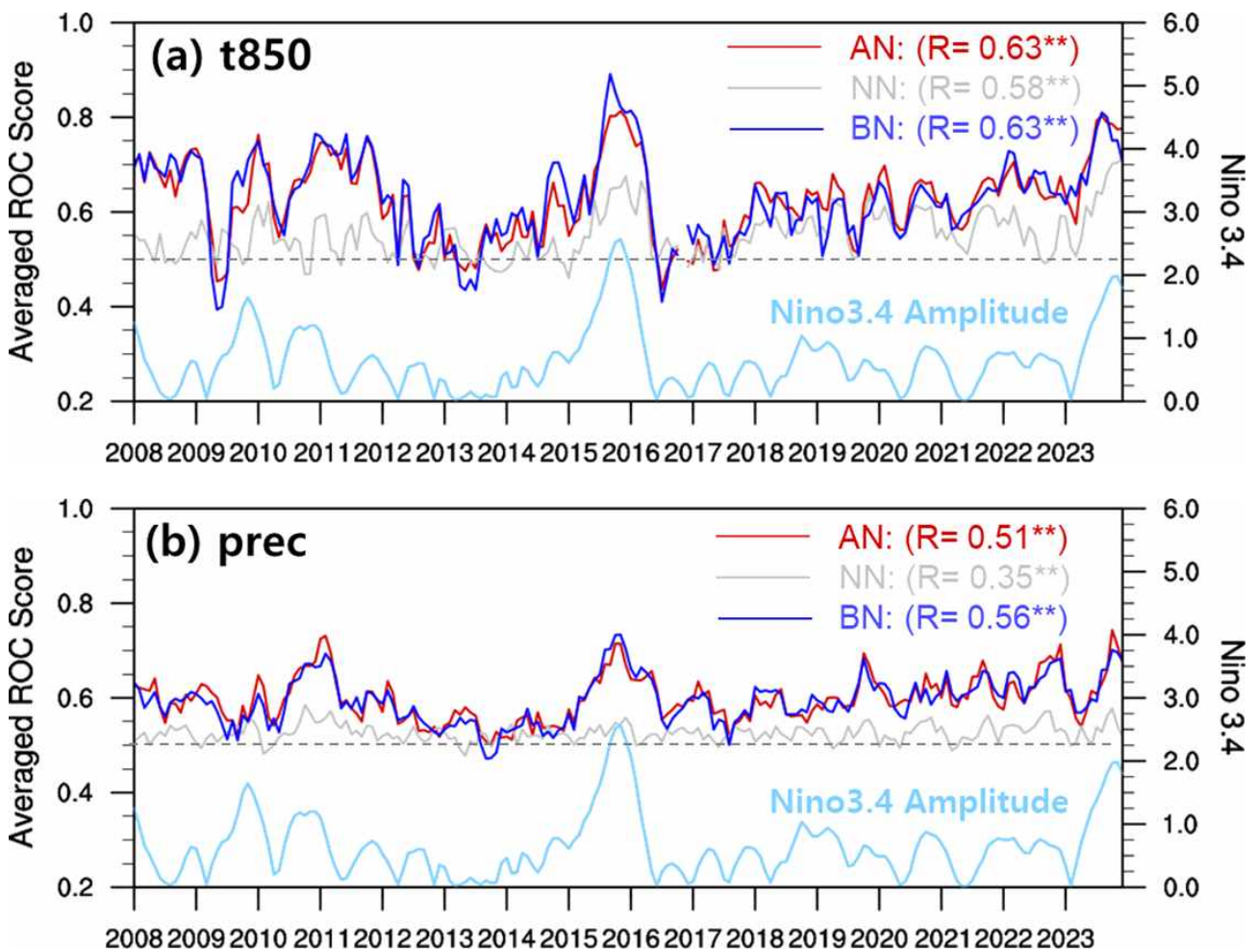


Figure 3.8. Changes of ROC score for APCC probabilistic MME forecast during 2013 to 2023. The sky blue line means the observed Nino3.4 index amplitude and R means the temporal correlation between ROC score for APCC probabilistic MME forecast and observed Nino3.4 index: (a) temperature at 850hPa and (b) precipitation.

### 3.1.1.1 MME 계절예측시스템 참여 모델 개선

#### 3.1.1.1.1 2022년 개선 및 변경 모델: CWB, ECCC HMC, JMA, KMA

CWB(현재 CWA)는 2022년 6월부터 새로운 머신에서 생산된 TCWB1Tv1.1의 예측자료를 APCC에 제공하고 있으며 ECCC CanSIPsv2.1은 2021년 12월부터 2024년 6월까지 활용되었다. 또한 HMC, JMA, KMA 총 3개의 모델이 개선되었는데 HMC SL-AV-072L96는 11월에, JMA MRI-CPS3과 KMA GloSea6GC3.2는 4월에 현업 적용되었다(Table 3.4).

Table 3.4. List of APCC MME participating models upgraded in 2022: ECCC, HMC, JMA, and KMA.

Organization	ECCC		HMC	
System name	CanSIPsv2	CanSIPsv2.1	SL-AV	SL-AV-072L96
Spatial resolution	- T63L35 (1hPa) - ~1.4x1.4 deg(L79)(0.075hPa)	- T63L35 (1hPa) - ~1x1 deg(L85)(0.1hPa)	1.125lat *1.40625lon L28 (10mb)	0.72lat*0.9lon L9.6 (0.04mb)
Ensemble size (F/H)	20/20	20/20	20/10	41/11
Lead time	12 months	12 months	3 months	3 months
Hindcast period	1981-2010	1991-2020	1990-2015	1991-2015
Atmospheric model	- CanAM4 - GEM 4.8-LTS13	- CanAM4 - GEM 501	-	-
Ocean model	- CanOM4 - NEMO 3.6	- CanOM4 - NEMO 3.6	-	-
Land surface model	- CLASS 2.7 - ISBA	- CLASS 2.7 - ISBA	-	-
Sea-Ice model	- Cavitating fluid approach - CICE 4	- Cavitating fluid approach - CICE4	-	-
Organization	JMA		KMA	
System name	MRI-CPS2	MRI-CPS3	GloSea5GC2	GloSea6GC3.2
Spatial resolution	TL159L60 (0.1hPa)	TL319L100 (0.01hPa)	N216L85	N216L85
Ensemble size (F/H)	52/10	50/10	42/12	84/28
Lead time	5 months	6 months	6 months	6 months
Hindcast period	1979-2014	1991-2020	1991-2010	1993-2016

Atmospheric model	JMA-GSM	JMA-GSM	UM 8.6	UM 11.5
Ocean model	MRI.COMv3	MRI.COMv4.6	NEMO 3.4	NEMO 3.6
Land surface model	JMA SiB	JMA SiB	JULES 8.6	JULES 5.6
Sea-Ice model	Interactive sea ice model	Interactive sea ice model	CICE 4.1	CICE 5.1.2

CWB TCWB1Tv1.1 모델은 2022년 5월, CWB에서 운영하는 HPC가 개선됨에 따라 개선된 HPC 환경으로 예측 자료를 재생산하여 제공하였으며 기존 자료와의 차이를 비교한 결과 다소 큰 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 차이에도 CWB는 모델명 및 버전을 분리하지 않고 기존과 동일하게 제공한다는 방침에 따라 APCC 계절예측정보 사용자에게 별도의 안내를 통해 혼동을 방지하고자 하였다.

ECCC CanSIPsv2.1 모델의 ACC<sup>6)</sup>의 경우 지역 및 계절별로 예측력 증감이 골고루 나타난다(그림 생략). 특히 2m 기온의 예측력 향상은 과반의 계절과 지역에서 나타나며 해수면 온도를 제외한 나머지 변수의 예측력은 전지구에서 대부분의 계절에서 상승하였다. CanSIPsv2.1의 전지구 기온에 대한 예측력은 MME에 참여하는 14개 모델 중 상위권에 위치하며 전지구 강수에 대한 예측력 또한 타 모델과 비교하여 상위권이다(Figure 3.9).

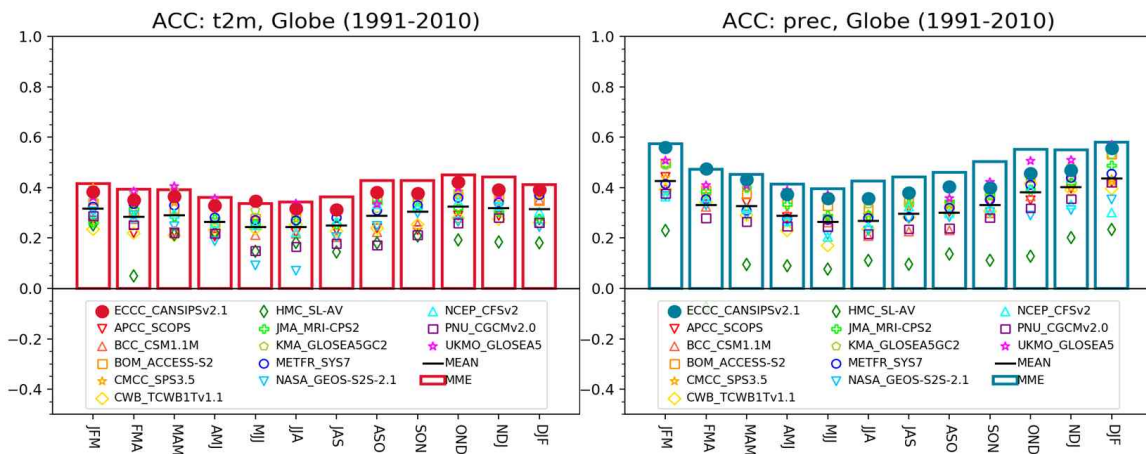


Figure 3.9. ACC of individual models (symbols), mean ACC of them (black solid line), and ACC of MME (bar) of global temperature (left) and precipitation (right).

HMC의 SL-AV 모델은 수평/수직 해상도의 개선, 앙상블 멤버 확대, 초기/경계 조건, hindcast 기간 등이 변경되었으며, HMC 모델 변경 전/후의 예측력을 평가하기 위해 가용한 NDJ 계절의 hindcast에 대해서 예측력 변화를 분석하였다(Figure 3.10). 그 결과 기온을 제외한

6) Anomaly Correlation Coefficient

대체로 모든 변수에서 예측력의 향상이 나타났다.

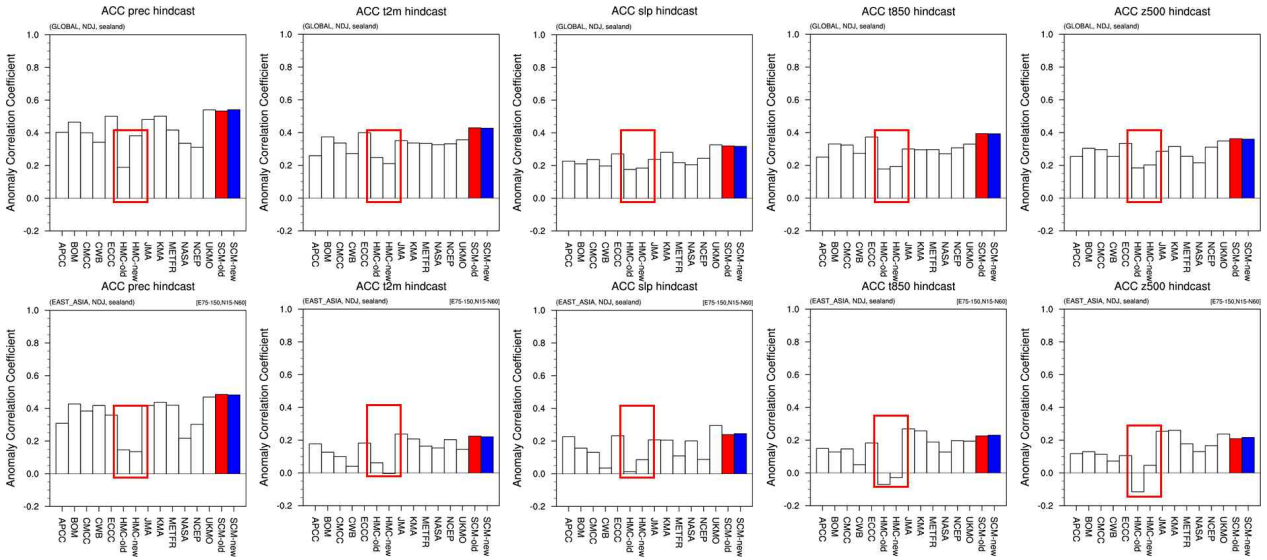


Figure 3.10. ACC of individual models and MME.

JMA MRI-CPS3의 forecast 자료는 매일 생산되는데 APCC의 MME 예보 일정을 고려하되 충분한 앙상블 멤버 확보를 위해 매일 1일에서 10일에 생산된, 총 10일 치의 자료를 사용하여 총 50개(10일\*5개/1일)의 앙상블을 취하도록 하였다. hindcast 자료는 1990년 12월 12일~2020년 12월 27일까지 15일 간격으로 존재하며 예측 타겟의 첫 월보다 한 달 및 두 달 전의 일자에 생산된 두 개의 자료를 선택하여 구성하였다. MRI-CPS2와 MRI-CPS3의 Niño3.4 예측력을 비교했을 때 모든 선행 시간에서 MRI-CPS3의 예측력이 더 높으며(Figure 3.11) MME에 대한 JMA MRI-CPS3의 참여는 MME 예측력 향상에도 영향을 미쳤다(Figure 3.12).

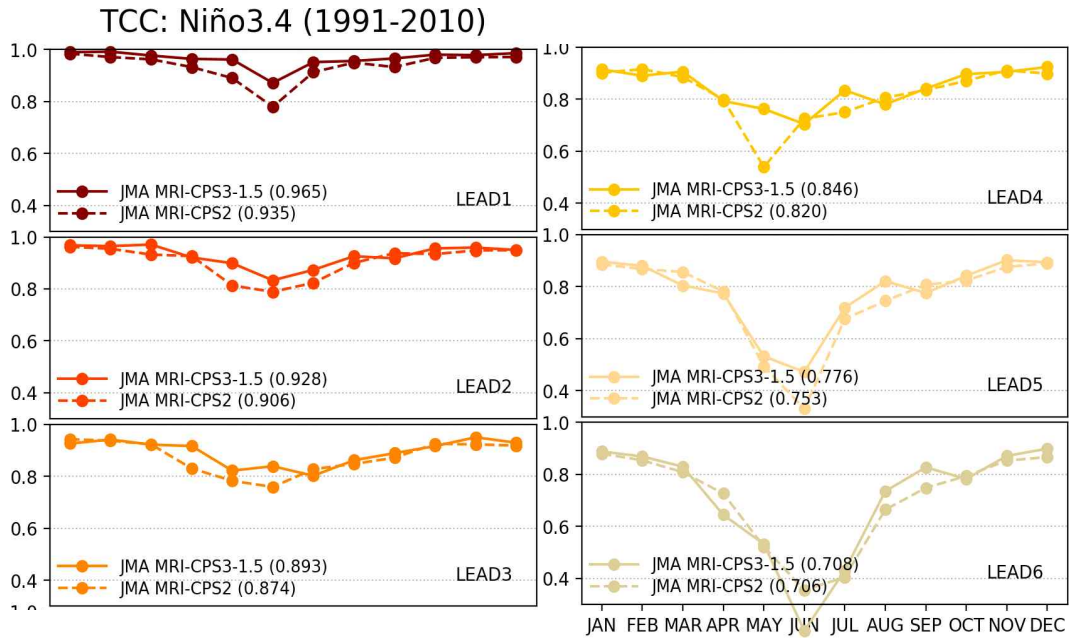


Figure 3.11. Niño3.4 forecast skill of MRI-CPS3 (solid line) and MRI-CPS2 (dashed line).

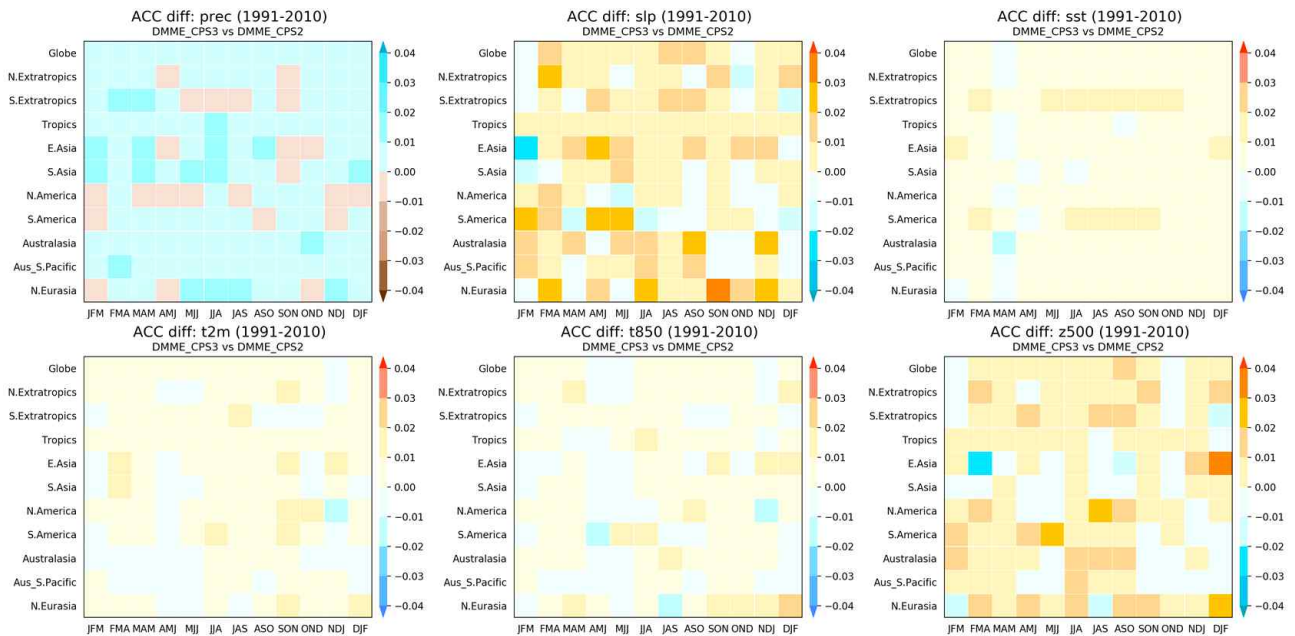


Figure 3.12. Difference between ACC of MME including MRI-CPS3 and MRI-CPS2. Positive values indicate that the skill of MME including MRI-CPS3 is better than that of MRI-CPS2.

KMA는 2022년 2회의 모델 변경이 있었다. 2022년 3월, 기존 GloSea5GC2에서 GloSea6GC3.2로 개선됨에 따라 전처리 프로그램의 수정과 가용한 계절(AMJ)에 대한 예측력 비교를 수행하였다(Figure 3.13). 전구 강수는 기존에 비해 예측력이 향상되었으며, 특히 동아시아 지역의 500hPa 지위고도와 해면기압의 예측력이 가장 많이 향상된 것으로 나타났다. 2022년 11월에는 GloSea6GC3.2는 앙상블 멤버의 확대가 있었다.

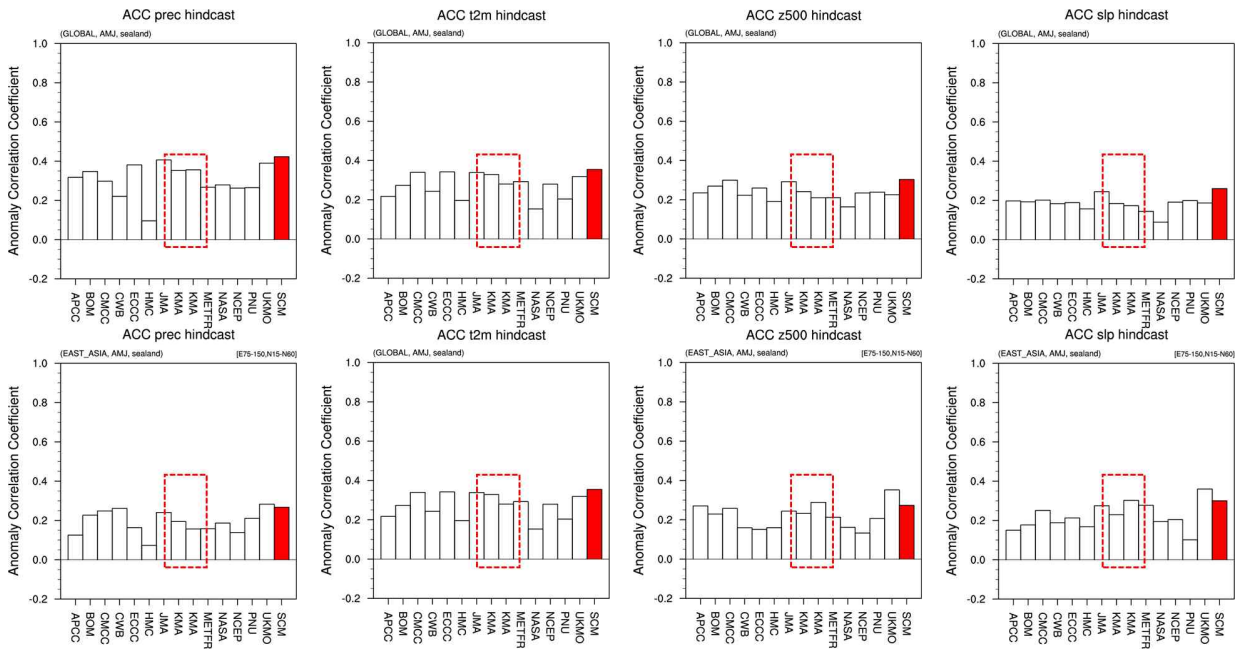


Figure 3.13. ACC of individual models and MME.

### 3.1.1.1.2 2023년 기관명 변경 모델: PNU/RDA

부산대학교의 전지구 접합대순환 모형 PNU CGCM이 2023년 6월부터 국립농업과학원과 부산대학교 간의 ‘장기 농업기후 예측시스템 이관·활용을 위한 합의각서’에 근거하여 PNU/RDA CGCM으로 변경되었으며 국립농업과학원은 APCC의 MME에 지속적으로 참여할 것을 합의하였다. 이에 2023년 6월부터 APCC 홈페이지([www.apcc21.org](http://www.apcc21.org)) 및 CLIK([cliks.apcc21.org](http://cliks.apcc21.org))을 통해 변경된 기관명으로 이미지 자료 및 NetCDF 포맷의 자료가 제공되고 있다.

### 3.1.1.1.3 2024년 개선 및 신규 모델: ECCC, MGO, PKNU

2024년에는 Table 3.5와 같이 ECCC와 MGO의 모델이 개선되었으며 PKNU(부경대학교)의 CGCMv1.0 모델의 APCC MME 신규 참여는 현재 가능성을 타진 중이다. ECCC의 CanSISv3은 2024년 7월부터, MGO의 MGOAM2.4는 2024년 9월부터 APCC MME에 반영되었다. MGO의 모델은 기존까지 APCC MME에 참여하지 않았으나 개선된 모델인 MGOAM2.4의 hindcast 기간 및 앙상블 멤버수 확장과 예측력 향상 등을 고려하여 올 9월부터 APCC MME에 참여하기 시작했다.

Table 3.5. List of APCC MME participating models upgraded in 2024: ECCC and MGO.

Organization	ECCC		MGO	
System name	CanSIPsv2.1	CanSIPsv3	MGOAM-2	MGOAM2.4
Spatial resolution	- T63L35 (1hPa) ~1x1 deg(L85)(0.1hPa)	- T63L49 (1hPa) ~ 1 x 1 deg Yin-Yang grid (L85) (0.1hPa)	T42L14	T63L25
Ensemble size (F/H)	20/20	40/40	10/6	10/10
Lead time	12 months	12 months	3 months	3 months
Hindcast period	1991-2020	1990-2020	1979-2004	1991-2020
Atmospheric model	- CanAM4 - GEM 501	- CanESM5.1p1 - GEM 5.2	MGOAM-2	MGOAM2.4
Ocean model	- CanOM4 - NEMO 3.6	- CanNEMO 3.4 - NEMO 3.6	SMIP-2/HFP type simulation	SMIP-2/HFP type simulation
Land surface model	- CLASS 2.7 - ISBA	- CLASS 3.6.2 and CTEM - ISBA	MGOAM2.4	MGOAM2.4
Sea-Ice model	- Cavitating fluid approach - CICE4	- LIM 2 - CICE 6	SMIP-2/HFP type simulation	SMIP-2/HFP type simulation

ECCC CanSIPsv3의 ACC는 많은 지역 및 계절에서 향상되었고 해수면 온도 및 500hPa 지위 고도를 제외한 변수의 연평균 ROC Score는 모든 계절 및 카테고리에서 향상되었다(Figure 3.14, Figure 3.15). 다만 해수면 온도와 500hPa 지위 고도의 연평균 예측력 하락은 평년보다 낮은 확률 카테고리(Below normal, BN)에서만 소수점 셋째 자리 수준으로 근소하게 나타났다. CanSIPsv3의 Niño3.4 연평균 예측력은 1개월 선행 시간에서만 CanSIPsv2.1을 능가하였고 그 외의 선행 시간에서는 하락하였지만, 그 차이는 소수점 셋째 자리에서 나타난다(Figure 3.16).

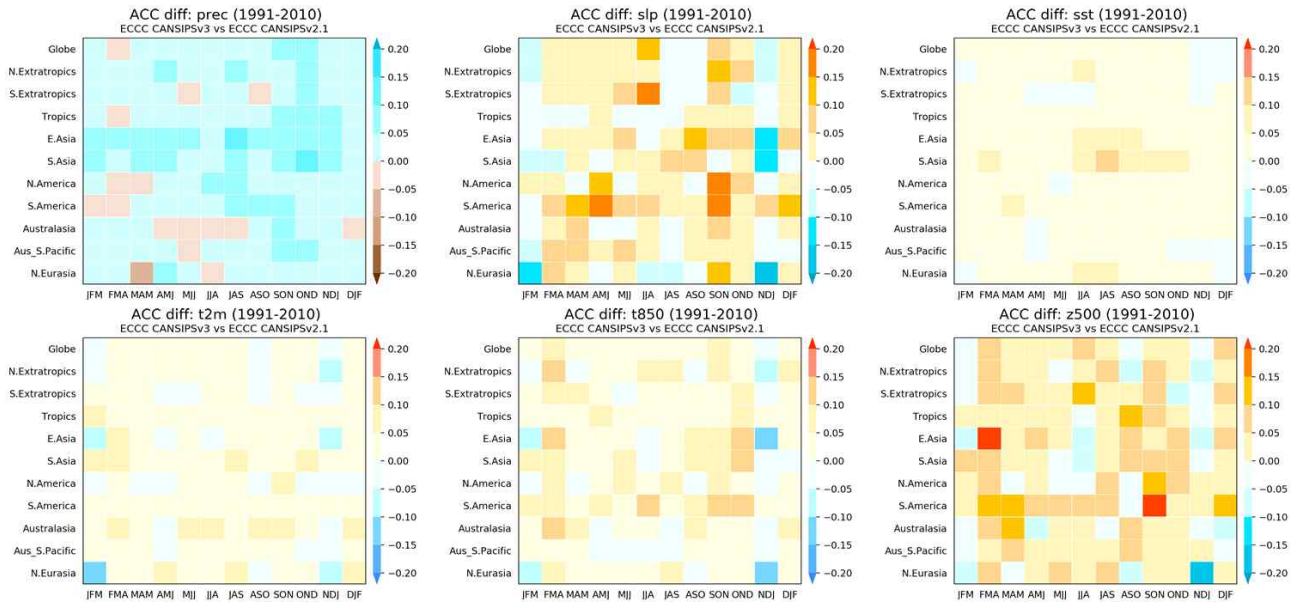


Figure 3.14. Difference between ACC of CanSIPsv3 and CanSIPsv2.1. Positive values indicate that the skill of CanSIPsv3 is better than that of CanSIPsv2.1.

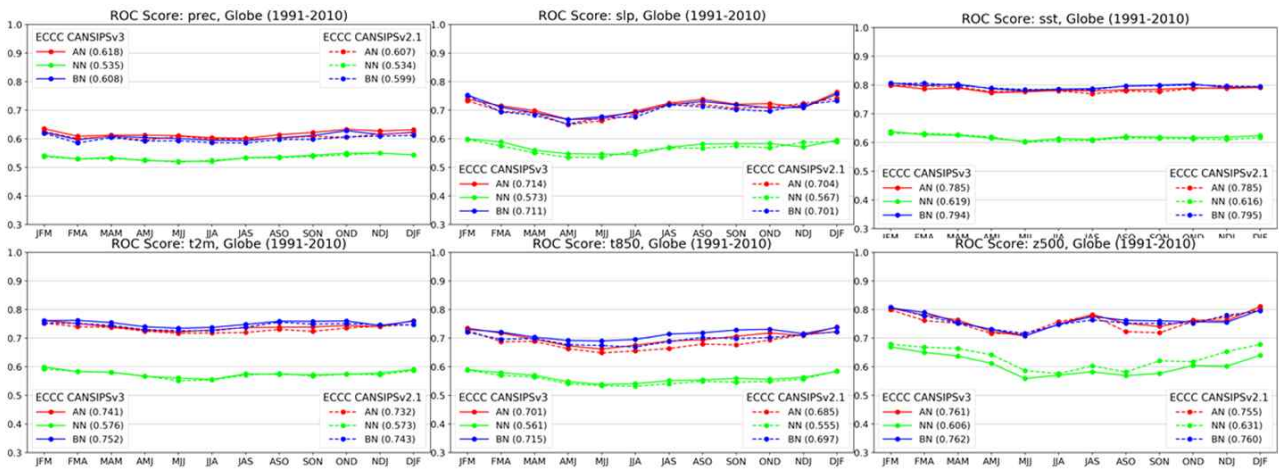


Figure 3.15. ROC Score of CanSIPsv3 and CanSIPsv2.1 for the globe.

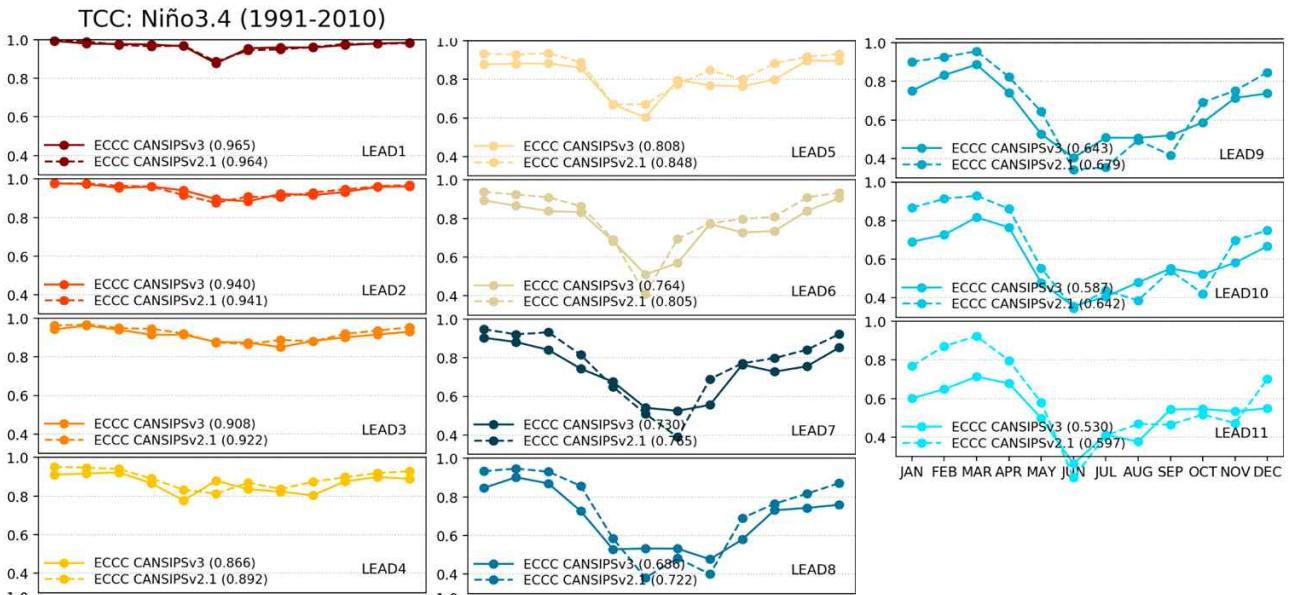


Figure 3.16. Niño3.4 forecast skill of CanSIPsv3 (solid line) and CanSIPsv2.1 (dashed line).

CanSIPsv3의 전지구 6개 변수(강수, 해면 기압, 해수면 온도, 2m 기온, 850hPa 기온, 500hPa 지위고도)에 대한 예측력은 MME에 참여하는 13개 모델의 평균 예측력 이상이며 특히 해수면 온도 예측력은 모든 계절에서 MME의 예측력에 준하거나 그 이상이다 (Figure 3.17).

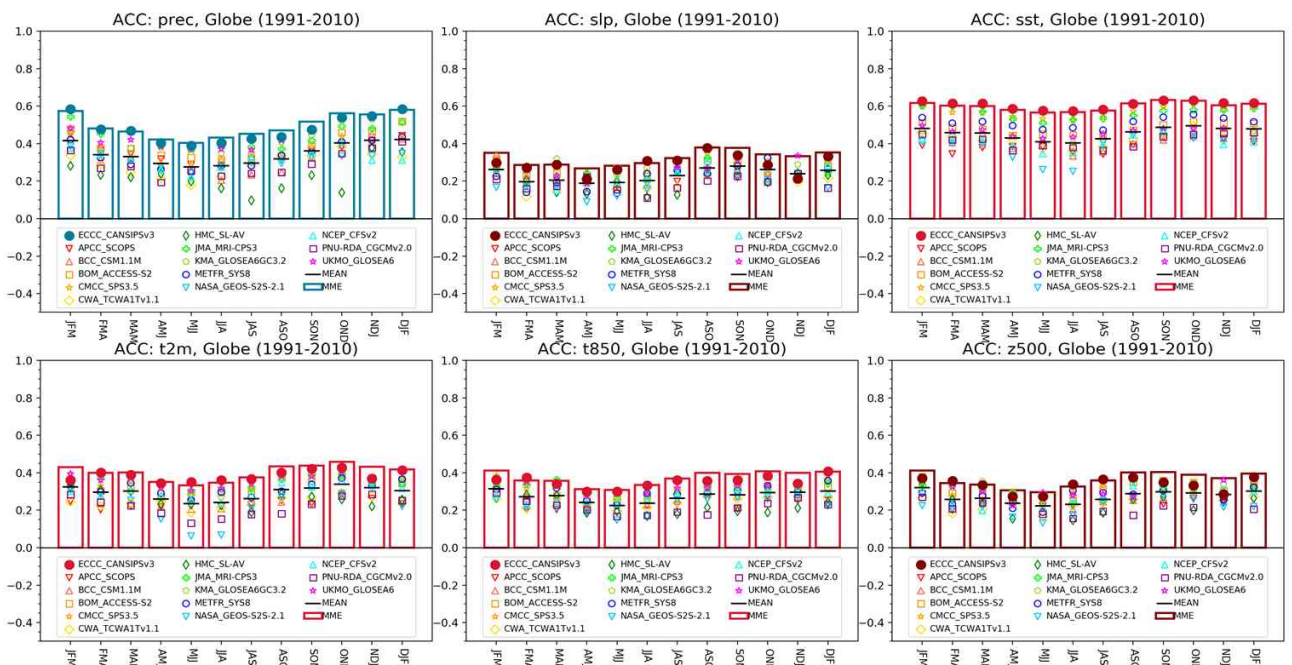


Figure 3.17. ACC of individual models (symbols), mean ACC of them (black solid line), and ACC of MME (bar) of global temperature (left) and precipitation (right).

CanSIPsv3을 포함한 MME는 과반의 지역 및 계절에서 예측력이 향상되나 해면기압은 모든 지역에서 JFM 계절의 예측력이 하락하며 이는 CanSIPsv2.1과 CanSIPsv3의 예측력 비교 결과와 유사하다(Figure 3.18). MME의 Niño3.4 연평균 예측력은 CanSIPsv3의 포함 여부에 따라 크게 변하지 않는다(Figure 3.19).

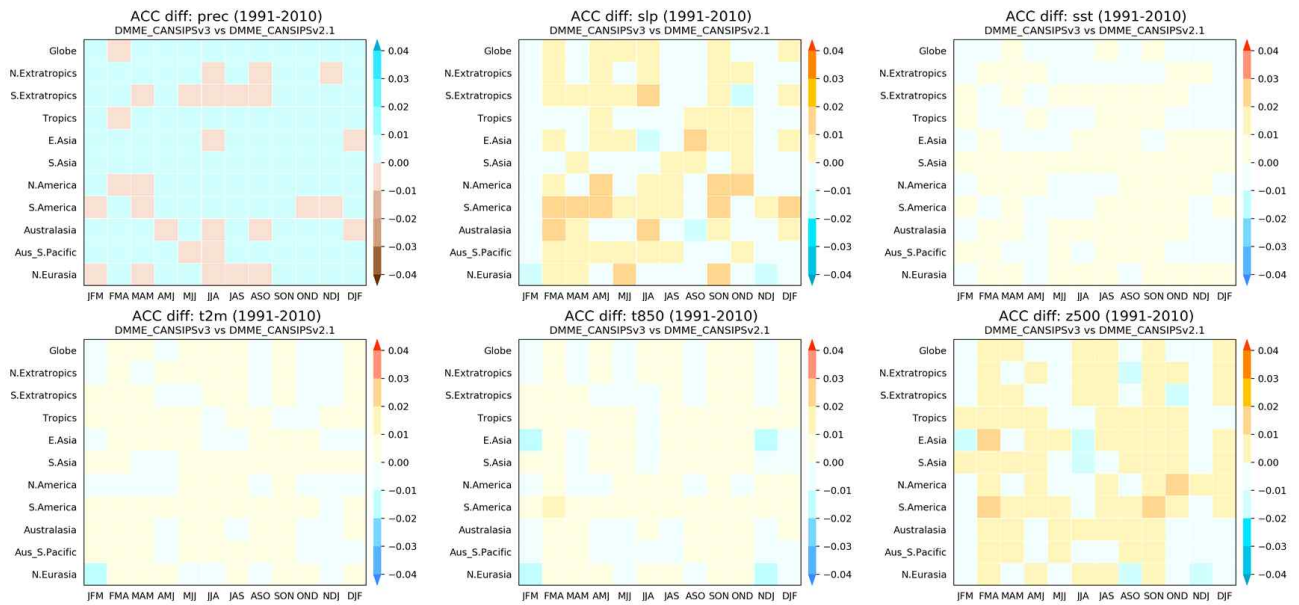


Figure 3.18. Difference between ACC of MME including CanSIPsv3 and CanSIPsv2.1. Positive values indicate that the skill of MME including CanSIPsv3 is better than that of CanSIPsv2.1.

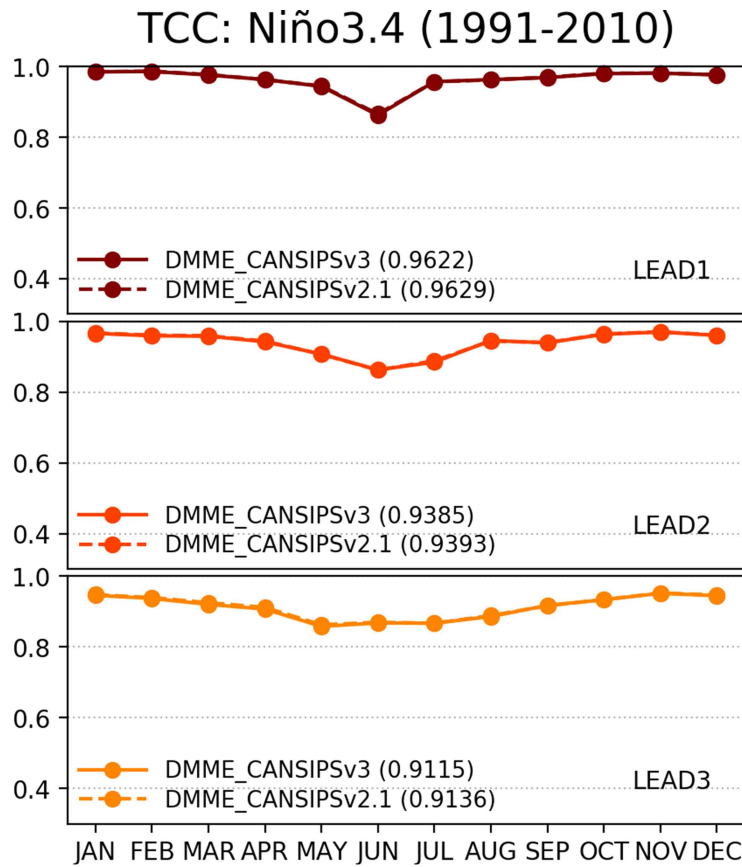


Figure 3.19. Niño3.4 forecast skill of MME including CanSIPsv3 (solid line) and CanSIPsv2.1 (dashed line).

CanSIPsv2.1 대비 CanSIPsv3의 예측력은 많은 지역 및 계절에서 예측력이 향상되었으며 MME 포함 때에도 과반의 지역·계절의 예측력 향상에 기여함을 알 수 있었다. 이렇게 수집 및 분석된 CanSIPsv3 자료는 2024년 7월 예측(2024ASONDJ)부터 APCC MME 예측에 참여하였으며 홈페이지를 통해서도 제공되고 있다.

MGO의 MGOAM-2가 MGOAM2.4로 개선됨에 따라 12개월 과거예측자료 수집 및 전처리 프로그램을 개발하여 모델 개선 전후 예측력 변화 및 MME 참여에 따른 예측력 변화를 살펴보았다. 해면 기압, 2m 기온, 850hPa 기온은 티베트 고원 및 안데스산맥 등 지대가 높은 지역과 남극 등에서 큰 편향이 나타났으며 다른 모델과 달리 500hPa 지위 고도의 편향이 컸다(Figure 3.20).

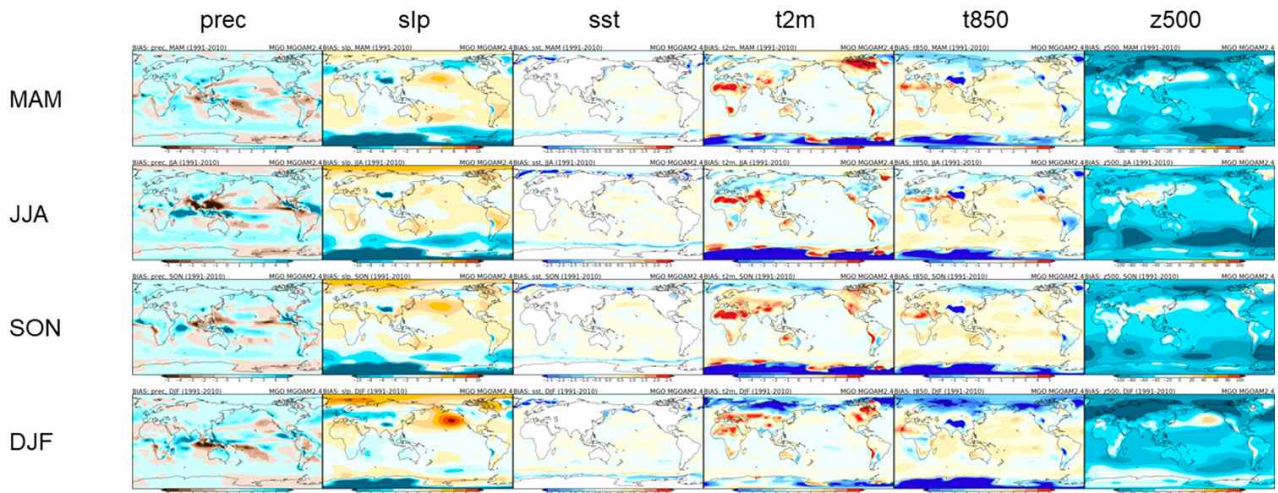


Figure 3.20. Mean bias distribution of MGOAM2.4.

또한 MGOAM2.4는 대기-해양 접합 모델이 아니므로(2-Tier) 예측 선행 시간에 따른 Niño3.4 시계열 및 그 예측성은 접합 모델(1-Tier)의 모습과 다른데 예측 선행 시간에 상관 없이 Niño3.4의 양상불 스프레드가 거의 없으며 북반구 여름철 예측성이 0.6 이하로 떨어진다 (Figure 3.21, Figure 3.22).

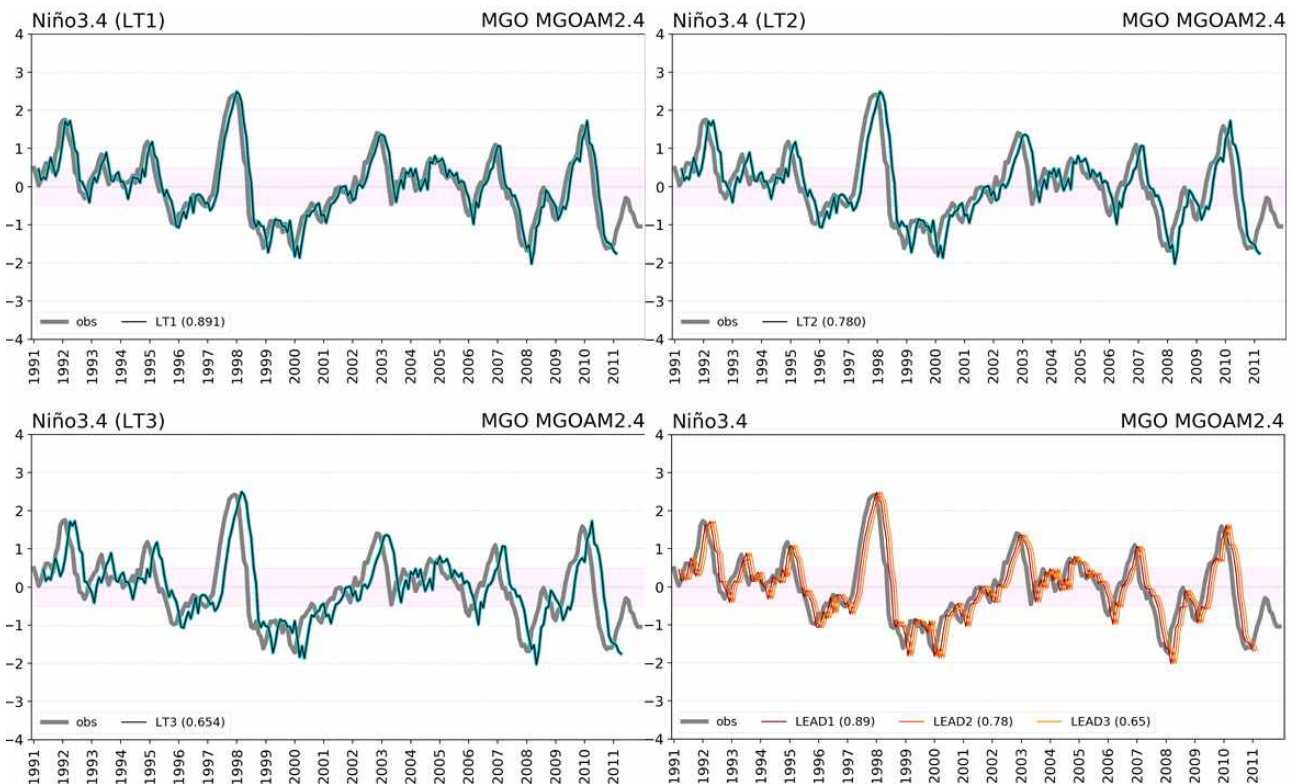


Figure 3.21. Timeseries of Niño3.4 forecast of MGOAM2.4.

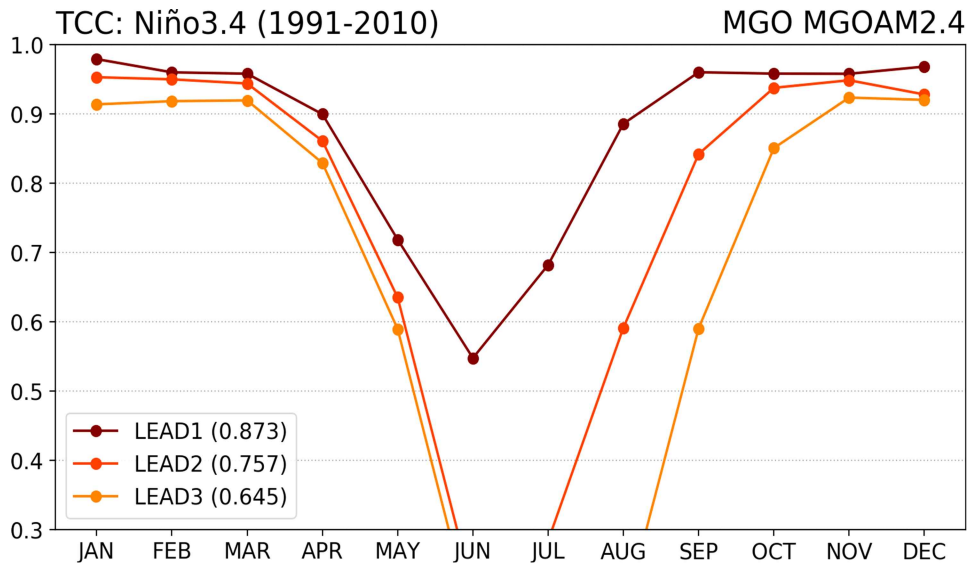


Figure 3.22. Niño3.4 forecast skill of MGOAM2.4.

MGOAM2.4의 전지구 6개 변수에 대한 예측력은 MME에 참여하는 14개 모델의 평균 예측력을 전반적으로 밀돌지만 모델들의 계절 간 차이가 있어 MGOAM2.4가 항상 하위권의 예측력을 보이는 것은 아니다(Figure 3.23). 또한 절반 정도의 지역과 계절에서 MGOAM2.4의 참여에 의한 MME 예측력 상승이 확인된다(Figure 3.24).

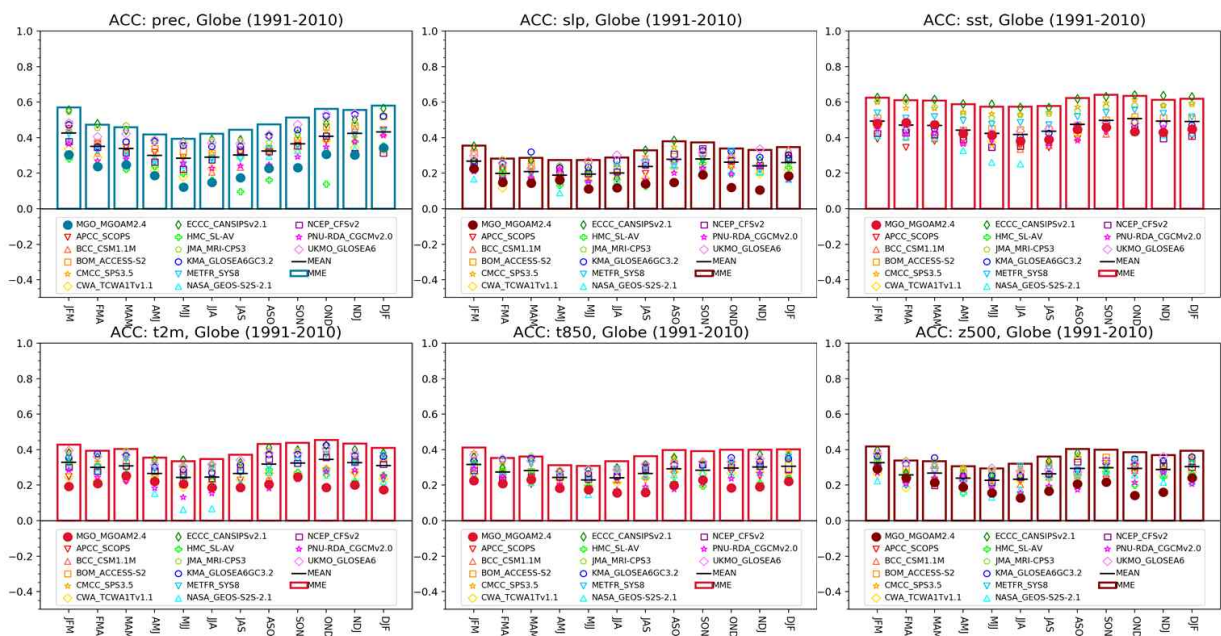


Figure 3.23. ACC of individual models (symbols), mean ACC of them (black solid line), and ACC of MME (bar) of global temperature (left) and precipitation (right).

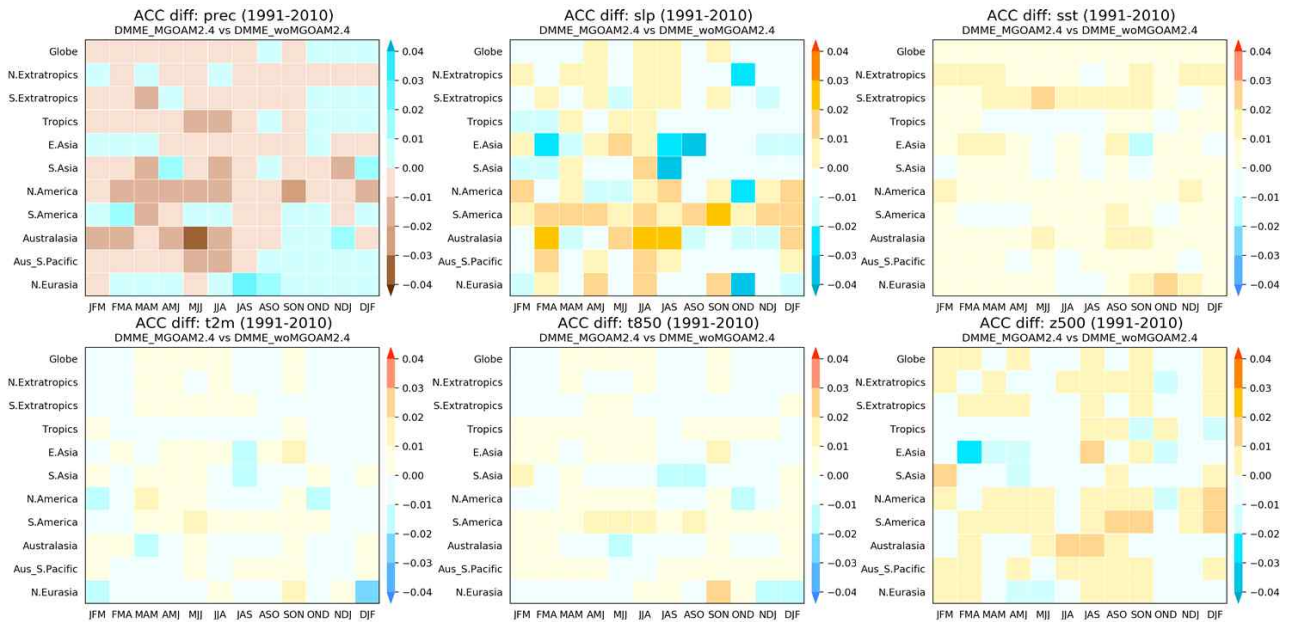


Figure 3.24. Difference between ACC of MME including MGOAM2.4 and MME excluding MGOAM2.4. Positive values indicate that the skill of MME including MGOAM2.4 is better than that of MME excluding MGOAM2.4.

MGOAM2.4의 hindcast 기간이 APCC MME에 참여하기에 충분해졌으나 여전히 2-Tier 모델이므로 APCC MME에 참여하되 ENSO 예측에는 참여하지 않는 것으로 결정하였다. 2024년 9월 예측(2024ONDJFM)부터 3개월 MME 예측 적용(ENSO 예측 제외) 및 홈페이지에 정보 제공을 시작하였다.

또한 APCC는 MME 참여모델의 다양성 확보를 위해 대내외적인 노력을 기울이고 있으며, 2024년 우리나라 국립부경대학교(Pukyong National University, PKNU)의 기후예측 모델인 CGCMv1.0을 APCC MME에 도입을 추진하였다. 이를 위해 PKNU CGCMv1.0 모델의 전 계절 hindcast 자료를 수집하여 예측 자료 처리 프로그램 개발과 해당 모델의 예측력 및 APCC MME 예측력에 미치는 영향을 분석하였다. PKNU CGCMv1.0 모델의 세부 정보는 다음과 같다(Table 3.6).

Table 3.6. Description of PKNU CGCMv1.0 model.

항 목	내 용
기관명 및 모델명	국립부경대학교(Pukyong National University, PKNU), CGCMv1.0
대기 및 모델명	CAMS6 / CLM5
대기 및 육지 모델 해상도	f19_g16 (~1.9° × 2.5° )
해양 및 해빙 모델명	POP2 / CICE5
해양 및 해빙 모델 해상도	gx1v6 (~1.0° × 1.0° )
양상블 개수(FCST/HCST)	31/31
선행 시간	4개월
Hindcast 기간	1993-2016년
자료 업데이트 주기	매월 10일

PKNU CGCMv1.0 모델의 자체 예측 성능을 살펴보기 위해서 APCC MME와 참여모델들의 예측 성능을 함께 비교 분석하였다. 먼저 각 예측 변수별로 PKNU CGCMv1.0 모델과 MME 및 참여모델의 예측 성능(Anomaly Correlation Coefficient, ACC)을 전 계절로 비교하였다(Figure 3. 25). PKNU CGCMv1.0의 ACC는 대체로 APCC MME 참여모델들의 평균 ACC와 유사하게 나타나지만, 강수의 경우 ASO-DJF 계절의 예측 성능, 해면기압(slp) 및 500hPa 지위고도(z500)의 경우 SON 계절의 ACC가 다소 낮은 수준을 보인다. 특히 해수면온도(sst)를 제외한 변수에서 SON 계절의 ACC가 낮은 공통점을 보임에 따라 해당 계절의 PKNU CGCMv1.0의 모델 예측 특성을 면밀히 분석해야 할 필요가 있다. 그럼에도 불구하고 sst의 경우 APCC MME 참여모델들의 평균 ACC보다 유사하거나 조금 더 높은 수준으로 나타났다.

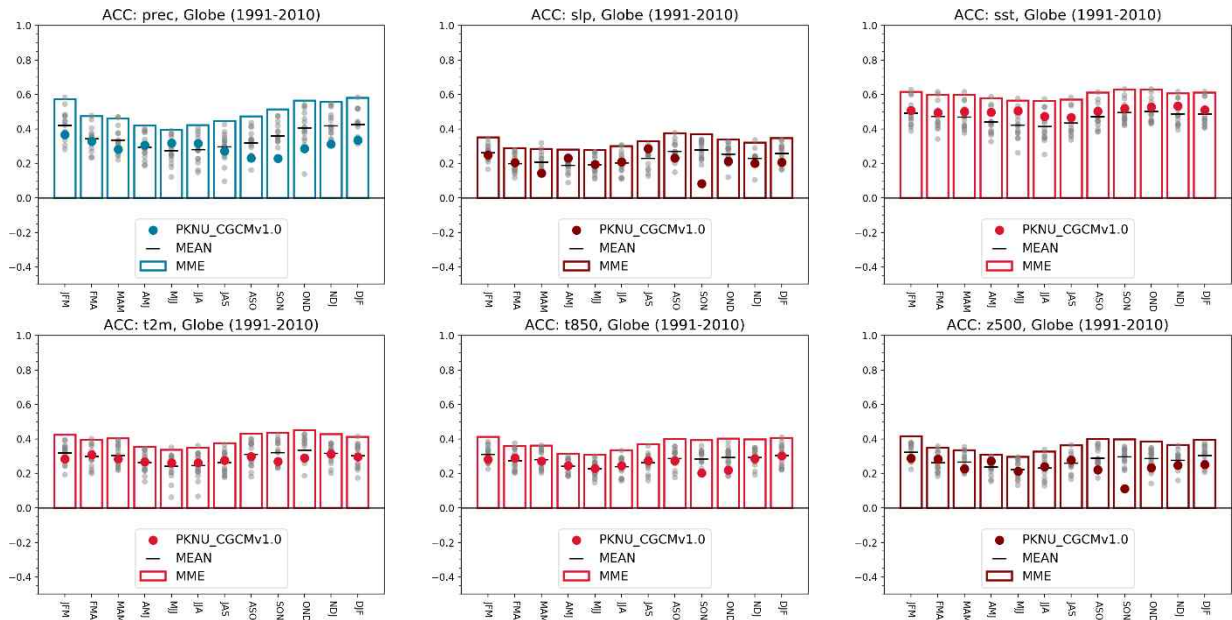


Figure 3.25. Seasonal Anomaly Correlation Coefficients (ACC) of PKNU CGCMv1.0 (colored circle), APCC MME participating models (gray circle), and APCC MME (bar). Average skill of individual APCC MME participating models is shown by lines.

다음으로 PKNU CGCMv1.0 모델에서 예측한 Nino3.4 지수와 APCC MME 및 참여모델들에서 예측한 Nino3.4 지수의 시간적 예측 성능(Temporal Correlation Coefficients, TCC)을 비교하였다(Figure 3.26). PKNU CGCMv1.0 모델에서 예측한 Nino3.4 지수는 선행시간이 길어질수록 APCC MME Nino3.4지수 예측과의 TCC 차이가 벌어지는 특징을 보이긴 하지만, 일부 계절을 제외하고는 모든 선행시간(LEAD1~3)에서 APCC MME 참여모델들의 평균 TCC와 유사한 성능을 보였다. 특히 일부 선행시간-계절(LEAD1-JAN, LEAD1-FEB, LEAD1-MAY, LEAD2-JAN, LEAD2-FEB, LEAD2-JUN, LEAD3-FEB, LEAD3-JUL)에서는 APCC MME에 준하는 예측 성능을 보이기도 하였다.

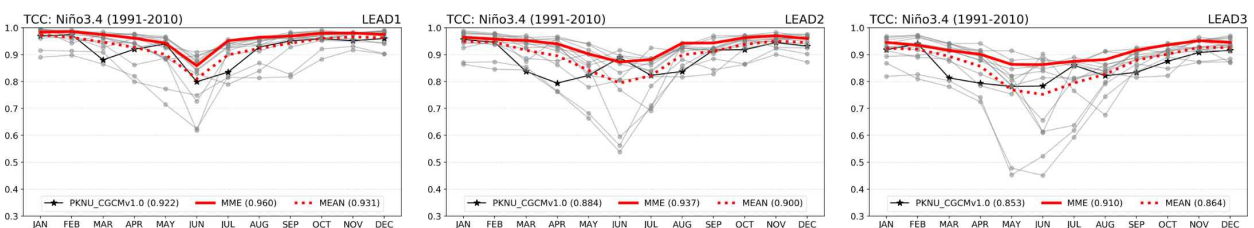


Figure 3.26. Monthly Temporal Correlation Coefficients (TCC) of Niño3.4 for PKNU CGCMv1.0 (black solid line), APCC MME participating models (gray solid line), and APCC MME (red solid line). Average skill of individual APCC MME participating models is shown in red dashed lines.

PKNU CGCMv1.0 모델이 MME에 참여하는 경우 MME 예측 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위해 2024년 기준으로 기존 14개 개별모델이 참여한 MME와 기존 14개 개별모델에서 PKNU CGCMv1.0이 참여한 MME의 예측 성능을 비교 분석하였다. 먼저 결정론적 MME(DMME)에 대한 PKNU CGCMv1.0 참여 전(DMME\_woPKNU)과 참여 후(DMME\_wPKNU)의 공간 예측 성능(ACC)의 차이 비율(%)을 분석한 결과(Figure 3.27), 변수 및 계절별로 상이하지만 DMME\_wPKNU가 DMME\_woPKNU에 비해 기온(t2m)을 제외하고는 연평균 ACC가 향상되는 것을 보이며, 특히 sst의 경우 전 계절에서 ACC의 향상이 나타났다. 기온의 경우에도 PKNU CGCMv1.0 참여 전/후 ACC 차이 비율이 연평균 -0.05% 수치로 나타나긴 하지만 이는 통계적으로 큰 차이가 없다고 할 수 있다. 하지만 상술한 PKNU CGCMv1.0 모델의 자체 예측 성능 평가 결과와 유사하게 sst를 제외한 SON 계절의 모든 변수에서 DMME\_woPKNU의 ACC가 DMME\_wPKNU에 비해 하락하는 것으로 나타나면서, 추후 해당 원인에 대한 추가 분석을 수행할 필요가 있으며, MME 예측 시스템상에서 후처리 과정 등의 개선 방안을 모색할 필요성이 있다.

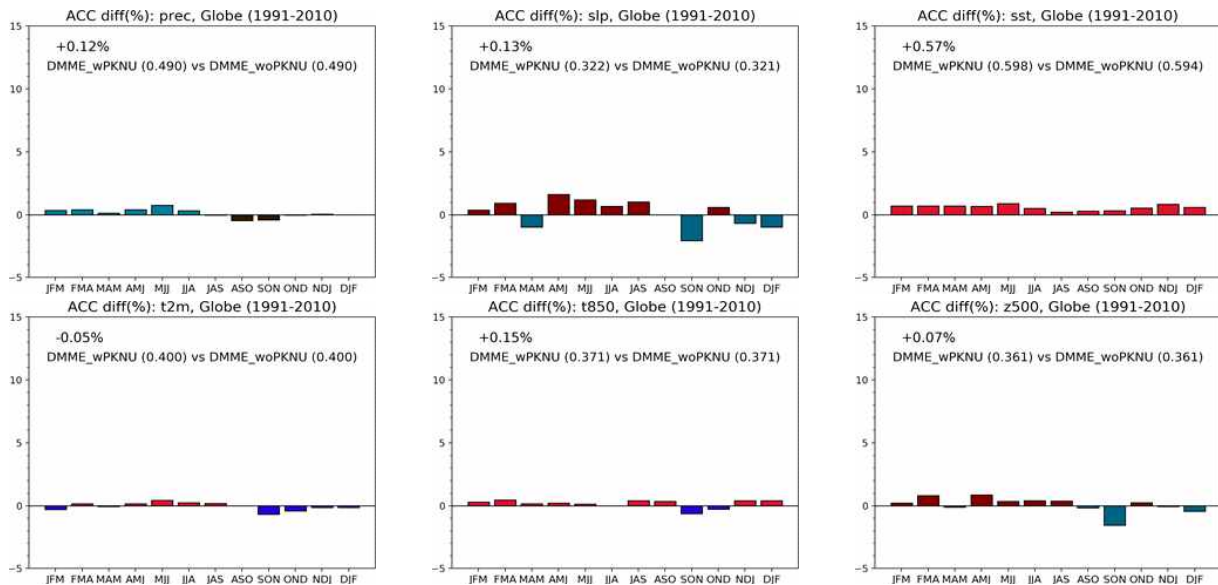


Figure 3.27. Seasonal Anomaly Correlation Coefficients (ACC) difference (%) between MME with PKNU CGCMv1.0 (DMME\_wPKNU) and MME without PKNU CGCMv1.0 (DMME\_woPKNU) with respect to DMME\_wPKNU.

다음은 확률론적 MME(PMME)에 대한 PKNU CGCMv1.0의 참여 전(PMME\_woPKNU)과 참여 후(PMME\_wPKNU)의 예측 정확도(Relative Operating Characteristic, ROC score)를 3분위 확률 카테고리(평균 이상; Above Normal, AN, 평균 비슷; Near Normal, NN, 평균 이하; Below Normal, BN)별로 분석하고 그 차이를 비율로써 제시하였다(Figure 3.28). 그 결과, PMME의 PKNU 참여 전/후 각각 ROC score는 계절 및 각 확률 카테고리별로 상이하게 나타났다. PMME\_wPKNU 강수(prec)의 경우 SON 계절 및 NN 카테고리를 제외하고는 PMME\_woPKNU에 비해 예측 정확도의 향상이 나타났으며, PMME\_wPKNU 기온(t2m)의 경우 PMME\_woPKNU에 비해 연평균 정확도가 다소 하락하는 것으로 나타나지만, 이는 매우 적은 차이로써 통계적으로

둘 간의 예측 정확도 차이가 거의 없다고 봐도 무방한 수준이다. 이 외의 변수들의 예측 정확도는 일부 계절 및 확률 카테고리를 제외하고 대체로 PMME\_wPKNU가 PMME\_woPKNU에 비해 높게 나타났다. 특히 해면기압(slp) 및 500hPa 지위고도(z500) 변수에서 일부 계절 및 확률 카테고리를 제외하고 예측 성능 향상이 뚜렷하게 나타났다.

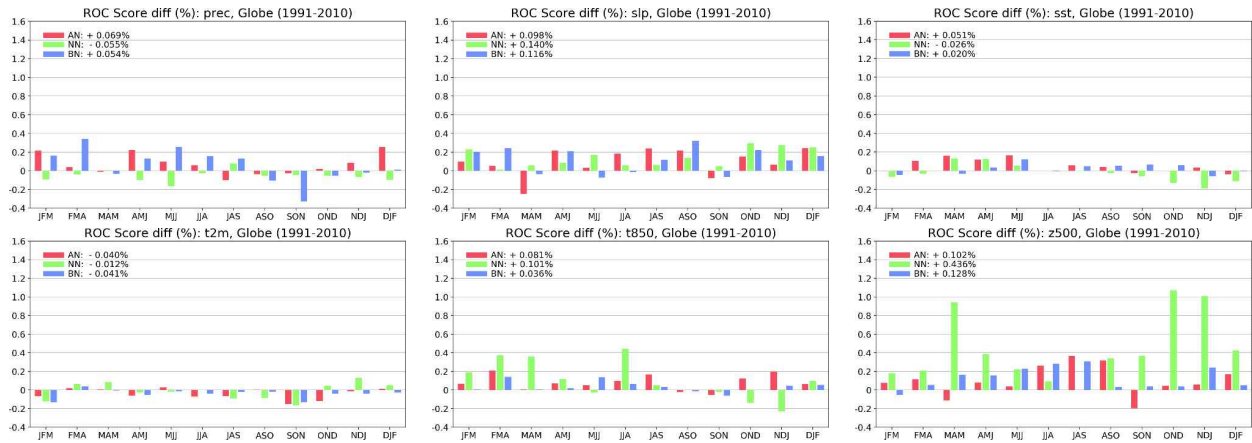


Figure 3.28. Seasonal Relative Operating Characteristics (ROC) scores difference (%) between PMME with PKNU CGCMv1.0 (PMME\_wPKNU) and PMME without PKNU CGCMv1.0 (PMME\_woPKNU) with respect to PMME\_woPKNU.

마지막으로 PKNU CGCMv1.0의 MME 참여 전(DMME\_woPKNU)과 참여 후(DMME\_wPKNU)의 Nino3.4 지수 예측 성능(TCC)을 선행시간(LEAD)별로 분석하였고, 또한 PKNU 참여 전/후 DMME TCC 차이 비율(%)을 함께 살펴보았다(Figure 3.29). DMME\_wPKNU와 DMME\_woPKNU 각각 예측한 Nino3.4 지수는 거의 유사한 예측 수준을 보이며, 선행시간이 길어질수록 연평균 TCC의 차이는 줄어드는 특징을 보였다. 특히 LEAD2의 JUN, LEAD3의 MAY와 JUL에서 PKNU CGCMv1.0의 MME 참여가 다소 긍정적 영향을 미치는 것으로 나타났다.

결론적으로, PKNU CGCMv1.0의 예측 성능은 대체로 MME 참여모델들의 평균 수준과 유사하거나 높게 나타나지만, 해수면온도를 제외한 변수들에 대해 특정 계절(SON)의 예측력이 타 모델에 비해 낮은 특징이 나타남에 따라 이에 대한 추가 분석이 필요하다. 이러한 PKNU CGCMv1.0이 MME에 참여하는 경우 대체로 기존 MME에 비해 예측 성능이 유사하거나 향상되며, 특히, PKNU CGCMv1.0이 참여한 확률론적 MME의 해면기압과 500hPa 지위고도에서 예측 성능의 향상이 뚜렷하게 나타남에 따라 PKNU CGCMv1.0가 APCC MME에 신규 참여함으로써 예측 신뢰도에 긍정적 효과가 있을 것으로 기대한다.

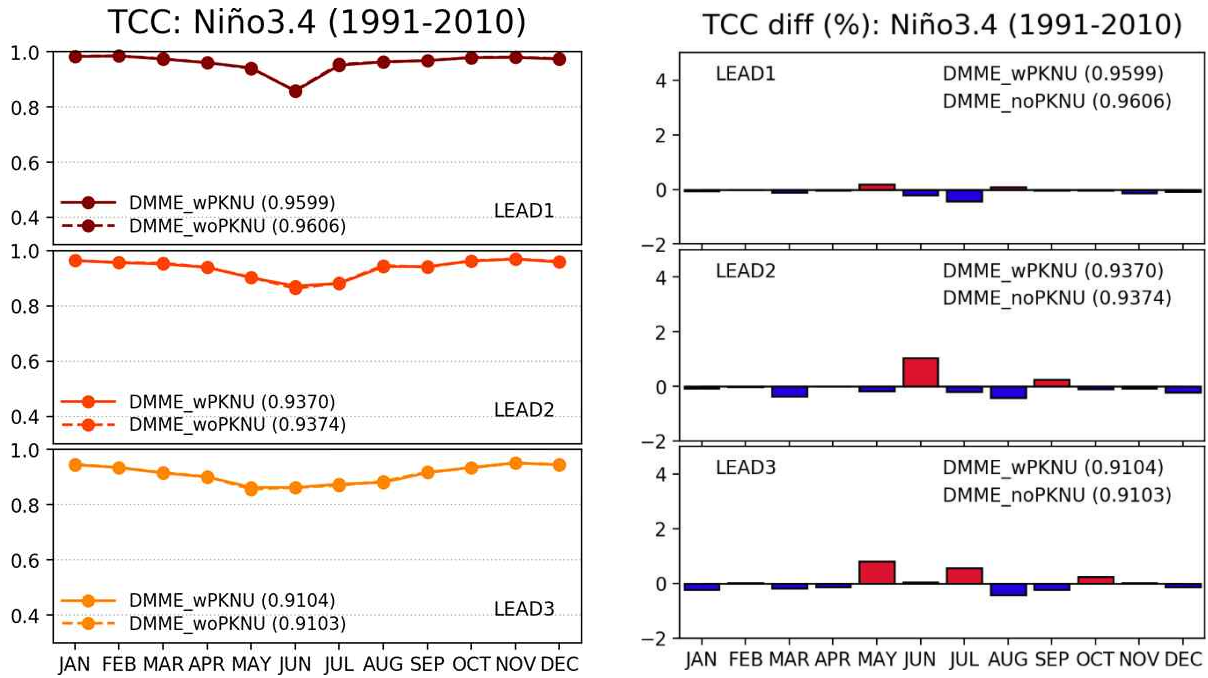


Figure 3.29. (Left) Monthly Temporal Correlation Coefficients (TCC) of Niño3.4 for MME with PKNU CGCMv1.0 (orange solid line) and MME without PKNU CGCMv1.0 (orange dashed line) with respect to lead times. (Right) Monthly TCCs difference (%) between DMME\_wPKNU with respect to DMME\_woPKNU.

PKNU CGCMv1.0의 MME 신규 참여 및 자료 제공을 위해 기존 MME 참여모델들과 같이 일정한 규격 및 형식으로 가공하는 자료 처리 프로세스가 필요하다. 따라서 수집한 PKNU CGCMv1.0의 hindcast 자료를 기반으로 아래와 같이 자료 처리 프로세스를 구축하였다.

○ 자료 처리 프로그램 개발

1. 원시 자료 특성 파악

1-1. 원시 자료(hindcast) 수집 현황

- 원시 자료 경로: /data02/OPER/PERM/PKNU\_CGCMv1.0
- 원시 자료 크기 및 형식: 약 871Gb (NetCDF)

1-2. 원시 자료(hindcast) 상세 특성

- 원시 자료해상도:
  - (시간) daily, 141일 (공간) 수평 144×96, 약 2.5° × 1.8947°
- 원시 자료 변수 (디렉토리명):

변수명	디렉토리명	단위	변수명	디렉토리명	단위
상향 장파 복사 에너지	FLUT	W/m <sup>2</sup>	200hPa U wind	U_200	m/s
강수	PRECT	m/s	200hPa V wind	V_200	m/s
해면기압	PSL	Pa	200hPa U wind	U_200	m/s
해수면온도	SST	K	200hPa V wind	V_200	m/s
기온	TREFHT	K	860hPa 지위고도	Z3_850	gpm
850hPa 기온	T_850	K	500hPa 지위고도	Z3_500	gpm
850hPa U wind	U_850	m/s	200hPa 지위고도	Z3_200	gpm
850hPa V wind	V_850	m/s			

- 파일명 형식: SEASON\_{연도}{initial\_월}{initial\_일}e{양상블}\_{디렉토리명}.nc

### 1-3. 원시 자료 1차 변환 (일→월)

- 원시 자료는 일 자료로써 원활한 처리를 위해 월 자료로 변환이 필요함에 따라 아래와 같은 프로그램 작성 및 수행함

: /data02/OPER/PERM/PKNU\_CGCMv1.0/monmean.sh

- 위 프로그램 수행 시 아래의 경로에 월 평균 자료 산출됨

: /data01/OPER/Hres\_PRE/PKNU\_CGCMv1.0/DATAIN/HINDCAST

## 2. 자료 처리 프로그램 개발 및 구축

### 2-1. 자료 처리 프로그램 개발 현황

- 프로그램 경로: /data01/OPER/Hres\_PRE/PKNU\_CGCMv1.0/RUN

- 프로그램 종류: python 및 환경 파일인 yaml 파일로 구성

• Hindcast: (메인 프로그램) PKNU\_HCST.py (환경 파일) PKNU\_HCST.yaml

• Forecast: (메인 프로그램) PKNU\_FCST.py (환경 파일) PKNU\_FCST.yaml

• 소스 프로그램 및 기타 파일

: /data01/OPER/Hres\_PRE/PKNU\_CGCMv1.0/RUN/my\_package

소스 프로그램 및 기타 파일명	내 용
esmf_regrid.py	grid 체계 변환 (regrid)
nc_out_1_0_deg.py	고해상도(1도) 자료 출력부
nc_out_2_5_deg.py	저해상도(2.5도) 자료 출력부
land_NCEP2.nc	land-sea mask 자료 (저해상도)
ismask_1deg.nc	land-sea mask 자료 (고해상도)

## 2-2. 자료 처리 프로그램 수행 방법 및 결과

### - 환경 파일(yaml) 수정

: 처리하고자 하는 변수, 예측 월, hindcast 기간, 해상도 수정

```
DataList:
- Institution_name : PKNU
  Model_name      : CGCMv1.0
  Variable_name   : slp_olr_prec_sst_t2m_t850
                  u850_u200_v850_v200_z850_z500_z200
  Forecast_month  : DEC
  Start_year      : 1993
  End_year        : 2016
  Resolution      : 1.0

# JAN, FEB: 1994-2017
# Other Seasons: 1993-2016
```

### - 프로그램 수행

: 각 메인 프로그램 수행

```
$:> python PKNU_HCST.py
```

### - 자료 처리 산출물 결과

#### • 고해상도 (1도)

*/data01/OPER/Hres\_AFS/DATA/MME\_IN/HINDCAST/PKNU\_CGCM1.0*

*/data01/OPER/Hres\_AFS/DATA/MME\_IN/FORECAST/PKNU\_CGCM1.0*

#### • 저해상도 (2.5도)

*/data01/OPER/Hres\_AFS/Lres\_DATA/MME\_IN/HINDCAST/PKNU\_CGCM1.0*

*/data01/OPER/Hres\_AFS/Lres\_DATA/MME\_IN/FORECAST/PKNU\_CGCM1.0*

### 3.1.1.2 전지구·동아시아·태평양도서국 기후전망 게시·배포

MME 계절예측 및 검증 정보 생산이 완료되면 매월 15일경 홈페이지 및 이메일을 통해 예측정보를 게시·배포한다. 9개 지역에 대해 다양한 변수의 월별 및 계절별 예측정보를 그래픽으로 제공하고 있으며 지역별로 요약된 예측 정보, 예측 및 검증 정보를 한눈에 볼 수 있는 형식의 지도 등도 홈페이지에서 제공하고 있다. 기후 감시, ENSO 예측, 기온 및 강수 예측, 검증 정보와 관련 설명을 포함한 기후전망문 또한 이메일을 통해 배포하고 있다(Figure 3.30). 2024년 11월 기준 전지구 기후전망은 1천여 명의 구독자가, 태평양도서국은 100여 명의 구독자가 구독 중이다. 특히 ENSO 예측 정보는 APCC 홈페이지 제공에 그치지 않고 기상청 기후정보포털에 월 2회 제공함으로써 사용자의 활용성을 도모하고 있으며 Pacific Meteorological Desk & Partnership 홈페이지에서 다른 기관들과 함께 ENSO Tracker 정보에도 기여하고 있다.

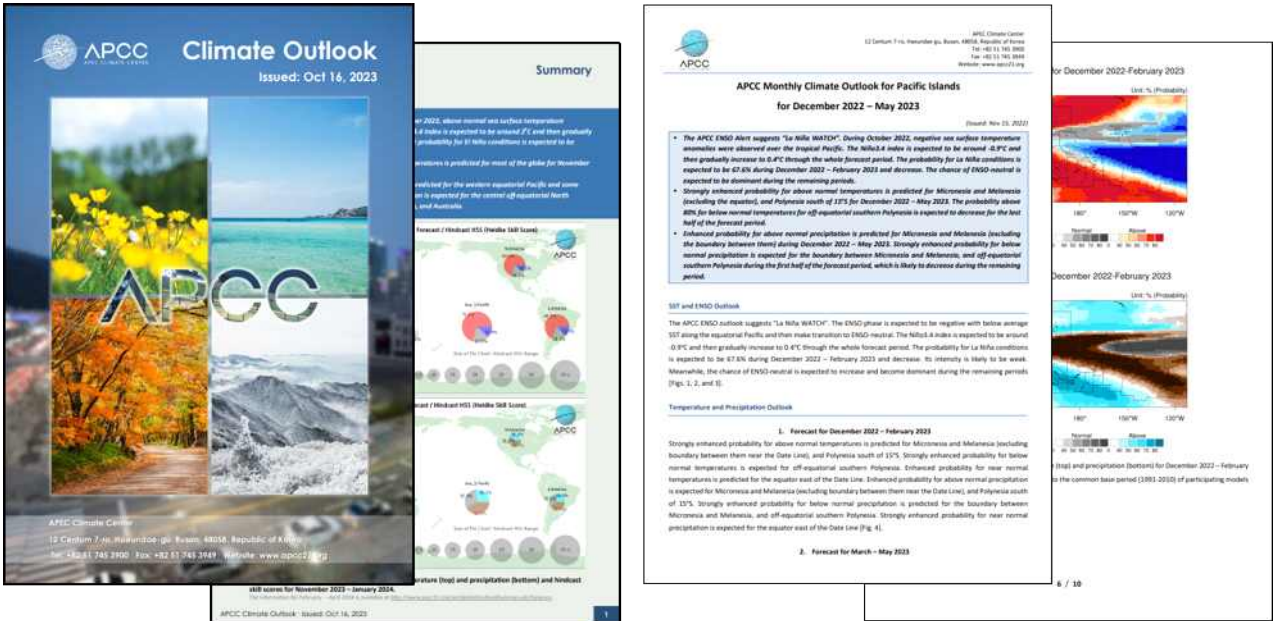


Figure 3.30. APCC Climate Outlooks for the Globe and the Pacific Islands Countries.

### 3.1.1.3 기후예측정보 활용 실적 관리

2020년부터 APCC의 기후 정보 활용도를 관리하기 위하여 관련 연구, 논문, 기사, 뉴스 등을 조사 및 수집하고 있다. 2024년 11월 기준 APCC의 기후정보를 활용한 논문은 2022년부터 2024년, 3년간 총 5건이 출판되었으며 국내 기사는 16건, 국외 기사는 27건이 쓰였다(Figure 3. 31). 이뿐만 아니라 지역기후포럼(Regional Climate Outlook Forum, RCOF) 등에서도 APCC의 예측 정보가 직접적으로 사용되고 있다.

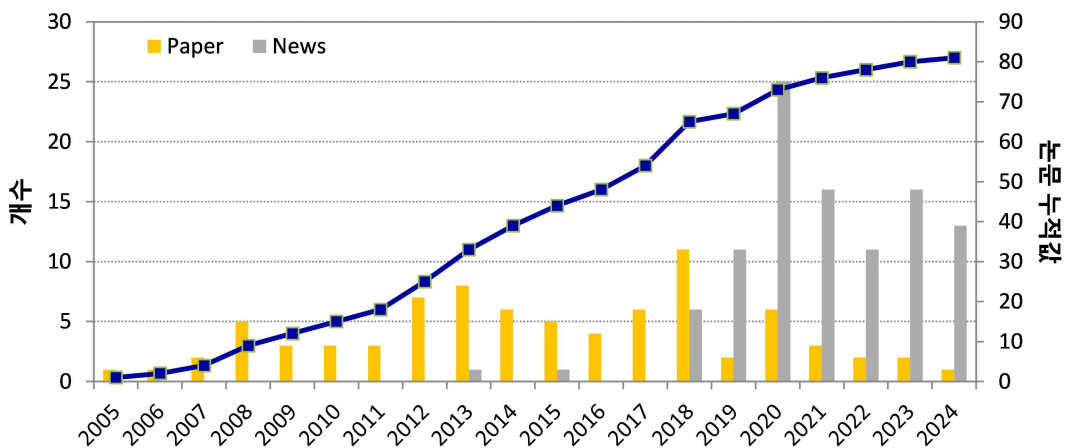


Figure 3.31. Yearly number of papers and news articles using APCC's seasonal climate information.

### 3.1.1.4 고해상도 MME 검증시스템 구축 및 시험운영

고해상도 MME 검증시스템을 통하여 고해상도 forecast 및 hindcast MME 예측에 대한 1년 치의 고해상도 검증자료를 시험 생산하였다. 고해상도 hindcast 예측의 경우 기존 저해상도 MME 검증시스템과 동일한 계절(JFM-DJF)을 대상으로 하여 검증 정보를 생산하였고, 고해상도 forecast 예측의 경우 고해상도 관측 자료(ERA-5)의 업데이트 주기를 고려하여 2023MJJ부터 2024AMJ 예측에 대해 검증 정보를 생산 완료하였다. 또한, 강수 변수의 경우 관측/재분석자료 간 불확실성 및 현업 운영 측면에서의 적합성을 판단하기 위해 CPC 관측 및 ERA-5, MERRA2 재분석자료의 3종 강수에 대한 검증 정보 생산하였다. 시험운영을 통해 생산된 고해상도 검증 정보는 매월 해당 결과를 요약 정리하여 별도의 검증 일지를 작성하였다. 시험 생산한 고해상도 MME 검증 정보에 대한 특성 및 정확도 수준을 파악하기 위해 기존 저해상도 검증 정보와 상호 비교하였다. 먼저 결정론적 MME(DMME) hindcast 예측(1991-2010년)에 대하여 저해상도(2.5°) 및 고해상도(1.0°) MME 계절별 예측 정확도(ACC)를 비교하였으며, 두 해상도의 ACC 중 높은 ACC의 값을 회색 음영 처리하였다(Table 3.7). 그 결과, 기온(t2m)의 경우 SON, OND 계절을 제외하고 고해상도 ACC가 더 높게 나타났고, 강수(prec), 850hPa 기온(t850), 500hPa 지위고도(z500)의 경우 대체로 저해상도 MME 예측에 대한 ACC가 더 높은 특징을 보였다.

Table 3.7. ACCs of low resolution (2.5°) and high resolution (1.0°) DMME hindcast for 2m temperature (t2m), precipitation (prec), temperature at 850hPa (t850), and geopotential height at 500hPa (z500).

검증 계절 (v2024)	검증 변수									
	t2m		prec				t850		z500	
	2.5°	1.0°	2.5°	1.0° : ERA5	1.0° : MERRA2	1.0° : CPC	2.5°	1.0°	2.5°	1.0°
JFM	0.428	0.448	0.559	0.539	0.520	0.261	0.411	0.389	0.409	0.393
4FM	0.399	0.417	0.485	0.458	0.440	0.174	0.357	0.332	0.342	0.323
MAM	0.413	0.442	0.465	0.452	0.424	0.189	0.367	0.350	0.343	0.326
AMJ	0.369	0.404	0.426	0.421	0.398	0.192	0.315	0.301	0.310	0.296
MJJ	0.340	0.400	0.409	0.414	0.389	0.174	0.313	0.301	0.301	0.287
JJA	0.348	0.402	0.429	0.417	0.404	0.190	0.339	0.310	0.330	0.302
JAS	0.375	0.408	0.445	0.417	0.404	0.198	0.359	0.320	0.347	0.317
ASO	0.434	0.465	0.467	0.428	0.423	0.205	0.395	0.358	0.393	0.368
SON	0.443	0.442	0.516	0.464	0.455	0.232	0.392	0.341	0.394	0.378
OND	0.455	0.452	0.567	0.509	0.506	0.242	0.402	0.361	0.382	0.365
NDJ	0.425	0.431	0.556	0.523	0.516	0.238	0.389	0.353	0.361	0.344
DJF	0.420	0.426	0.585	0.551	0.545	0.254	0.412	0.381	0.402	0.388

MME hindcast 예측뿐만 아니라 forecast 예측(2023MJJ-2024AMJ)에 대해서도 동일하게 해상도별 ACC를 비교하였다(Table 3.8). 그 결과, 기온(t2m)과 강수(prec)의 경우 모든 예측에 대해 ERA-5 재분석자료를 사용한 고해상도 검증 정보가 저해상도에 비해 높은 ACC를 보였고, 850hPa 기온과 500hPa 지위고도의 경우 저해상도와 고해상도 ACC의 차이가 예측 계절별로 상이하게 나타났다.

Table 3.8. ACCs of low resolution (2.5°) and high resolution (1.0°) DMME forecast for 2m temperature (t2m), precipitation (prec), temperature at 850hPa (t850), and geopotential height at 500hPa (z500).

검증 계절	검증 변수									
	t2m		prec				t850		z500	
	2.5°	1.0°	2.5°	1.0° : ERA5	1.0° : MERRA2	1.0° : CPC	2.5°	1.0°	2.5°	1.0°
2023MJJ	0.517	0.713	0.364	0.531	0.095	0.079	0.496	0.624	0.632	0.631
2023JJA	0.588	0.783	0.338	0.451	0.131	0.104	0.589	0.738	0.701	0.713
2023JAS	0.618	0.807	0.294	0.539	0.186	0.259	0.679	0.794	0.738	0.753
2023ASO	0.636	0.842	0.335	0.580	0.187	0.353	0.717	0.822	0.799	0.823
2023SON	0.737	0.865	0.498	0.692	0.692	0.532	0.758	0.799	0.738	0.758
2023OND	0.743	0.841	0.641	0.743	0.258	0.568	0.749	0.742	0.695	0.681
2023NDJ	0.698	0.792	0.586	0.672	0.284	0.506	0.750	0.734	0.767	0.746
2023DJF	0.657	0.779	0.495	0.551	0.200	0.434	0.760	0.749	0.803	0.766
2024JFM	0.638	0.784	0.289	0.461	0.173	0.266	0.737	0.750	0.779	0.769
2024FM	0.626	0.753	0.153	0.337	0.106	0.172	0.678	0.670	0.714	0.685
2024MAM	0.579	0.713	0.034	0.318	0.103	0.135	0.697	0.683	0.694	0.670
2024AMJ	0.595	0.738	0.222	0.462	0.139	0.201	0.727	0.751	0.738	0.696

위와 비슷하게 확률론적 MME(PMME)에 대해서도 ROC score를 활용한 예측 정확도를 저해상도 및 고해상도 hindcast와 forecast 각각에 대해 상호 비교하였다. 먼저 MME hindcast ROC score의 경우 강수는 ERA-5 재분석자료를 사용한 고해상도 검증 정보가 저해상도에 비해 높은 수치를 보였으며, 500hPa 지위고도는 반대로 NCEP2 자료를 사용한 저해상도 검증 정보가 더 높은 수치를 보였다(Table 3.9). 또한, 기온 및 850hPa 기온의 경우 계절별로 저해상도 및 고해상도 ROC score의 차이가 상이하게 나타났다.

Table 3.9. ROC scores of low resolution (2.5°) and high resolution (1.0°) PMME hindcast for 2m temperature (t2m), precipitation (prec), temperature at 850hPa (t850), and geopotential height at 500hPa (z500).

검증 계절 (v2024)	검증 변수									
	t2m		prec				t850		z500	
	2.5°	1.0°	2.5°	1.0° : ERA5	1.0° : MERRA2	1.0° : CPC	2.5°	1.0°	2.5°	1.0°
JFM	0.725	0.737	0.602	0.623	0.611	0.581	0.694	0.698	0.768	0.761
4FM	0.721	0.728	0.586	0.603	0.594	0.559	0.677	0.685	0.754	0.745
MAM	0.712	0.723	0.593	0.605	0.598	0.554	0.667	0.676	0.731	0.715
AMJ	0.696	0.705	0.588	0.598	0.593	0.552	0.638	0.648	0.709	0.681
MJJ	0.694	0.702	0.586	0.604	0.595	0.555	0.633	0.643	0.679	0.672
JJA	0.699	0.704	0.581	0.599	0.592	0.569	0.644	0.649	0.712	0.688
JAS	0.707	0.705	0.584	0.601	0.595	0.565	0.657	0.653	0.727	0.698
ASO	0.722	0.719	0.593	0.607	0.603	0.564	0.671	0.666	0.726	0.706
SON	0.718	0.715	0.600	0.615	0.610	0.566	0.676	0.663	0.728	0.719
OND	0.717	0.716	0.613	0.626	0.618	0.574	0.678	0.666	0.727	0.714
NDJ	0.713	0.715	0.608	0.623	0.614	0.584	0.682	0.672	0.733	0.721
DJF	0.721	0.729	0.608	0.628	0.617	0.582	0.696	0.692	0.770	0.755

MME forecast ROC score의 경우 기온과 강수는 모든 예측에 대해 ERA-5 재분석자료를 사용한 고해상도 검증 정보가 NCEP R2 재분석자료를 사용한 저해상도에 비해 높은 수치를 보였으며, 850hPa 기온의 경우도 2024AMJ 예측을 제외한 나머지 예측에서 ERA-5 재분석자료를 사용한 고해상도 ROC가 더 높게 나타났다(Table 3.10). 반면 500hPa 지위고도의 경우 저해상도 및 고해상도 ROC의 차이가 예측별로 상이하게 나타났다. 이러한 결과를 종합해보면, 저해상도 및 고해상도 검증 정보에 활용되는 관측 및 재분석자료간 불확실성이 존재하겠지만, 고해상도 MME forecast의 경우 저해상도 MME에 비해 격자가 상세해짐에 따라 기온과 강수의 예측 정확도가 더 높아지는 것을 확인할 수 있었고, 강수의 경우 MERRA2와 CPC보다 ERA-5 재분석자료를 활용한 검증 정보가 더 높은 예측 정확도 수치를 보였다. 본 검증 정보는 APCC MME 계절예측 정보의 신뢰성을 평가하는 자료인 만큼 고해상도 검증 정보의 현업 적용 시기 및 방안에 대해 해당 결과를 바탕으로 내부적인 토의가 필요하겠다.

Table 3.10. ROC scores of low resolution (2.5°) and high resolution (1.0°) PMME forecast for 2m temperature (t2m), precipitation (prec), temperature at 850hPa (t850), and geopotential height at 500hPa (z500).

검증 계절	검증 변수									
	t2m		prec				t850		z500	
	2.5°	1.0°	2.5°	1.0° : ERA5	1.0° : MERRA2	1.0° : CPC	2.5°	1.0°	2.5°	1.0°
2023MJJ	0.661	0.753	0.556	0.607	0.522	0.546	0.657	0.682	0.812	0.809
2023JJA	0.684	0.789	0.571	0.609	0.539	0.545	0.680	0.760	0.858	0.871
2023JAS	0.700	0.831	0.580	0.625	0.542	0.572	0.738	0.811	0.865	0.891
2023ASO	0.742	0.873	0.606	0.632	0.563	0.585	0.750	0.821	0.841	0.869
2023SON	0.758	0.849	0.626	0.641	0.589	0.605	0.757	0.782	0.842	0.855
2023OND	0.760	0.817	0.674	0.657	0.605	0.644	0.746	0.757	0.862	0.860
2023NDJ	0.748	0.790	0.650	0.654	0.610	0.620	0.743	0.756	0.880	0.871
2023DJF	0.765	0.812	0.623	0.639	0.593	0.616	0.732	0.742	0.894	0.885
2024JFM	0.769	0.821	0.589	0.639	0.581	0.602	0.708	0.736	0.856	0.856
2024FM	0.752	0.785	0.555	0.605	0.557	0.572	0.708	0.708	0.827	0.817
2024MAM	0.761	0.802	0.552	0.590	0.556	0.575	0.727	0.733	0.831	0.837
2024AMJ	0.783	0.809	0.569	0.602	0.549	0.563	0.765	0.752	0.851	0.848

### 3.1.1.5 Hindcast 기간별 민감도 분석 기반 MME hindcast 기간 확장 및 프로세스 개선

APCC MME hindcast 기간 확장을 위한 민감도 실험 결과(김유진 외, 2023)를 기반으로 현업적인 관점에서 보다 효율적인 MME hindcast 기간 확장 방안을 수립하고자, 이에 앞서 hindcast 기간 확장 민감도 분석 주요 결과를 요약하고자 한다. 먼저 결정론적 MME의 hindcast 기간별 기온 및 강수의 RMSE를 살펴보았다(Figure 3.32). 각 실험에 대한 RMSE는 계절별로 상이하게 나타나고, 대체로 기준 실험인 CTR의 RMSE와 크게 벗어나지 않지만, 1993-2016년의 hindcast 기간의 MME가 기온의 경우 MAM-MJJ 계절에서, 강수의 경우 NDJ-DJF 계절에서 CTR에 비해 오차가 다소 줄어드는 것으로 나타났다. 다만, 일부 계절(기온의 경우 OND, 강수의 경우 JAS-SON)에서는 오차가 다소 증가하는 것으로 나타나긴 하지만 그 오차는 2% 미만으로 작은 차이로써 유의하지 않은 것으로 나타났다.

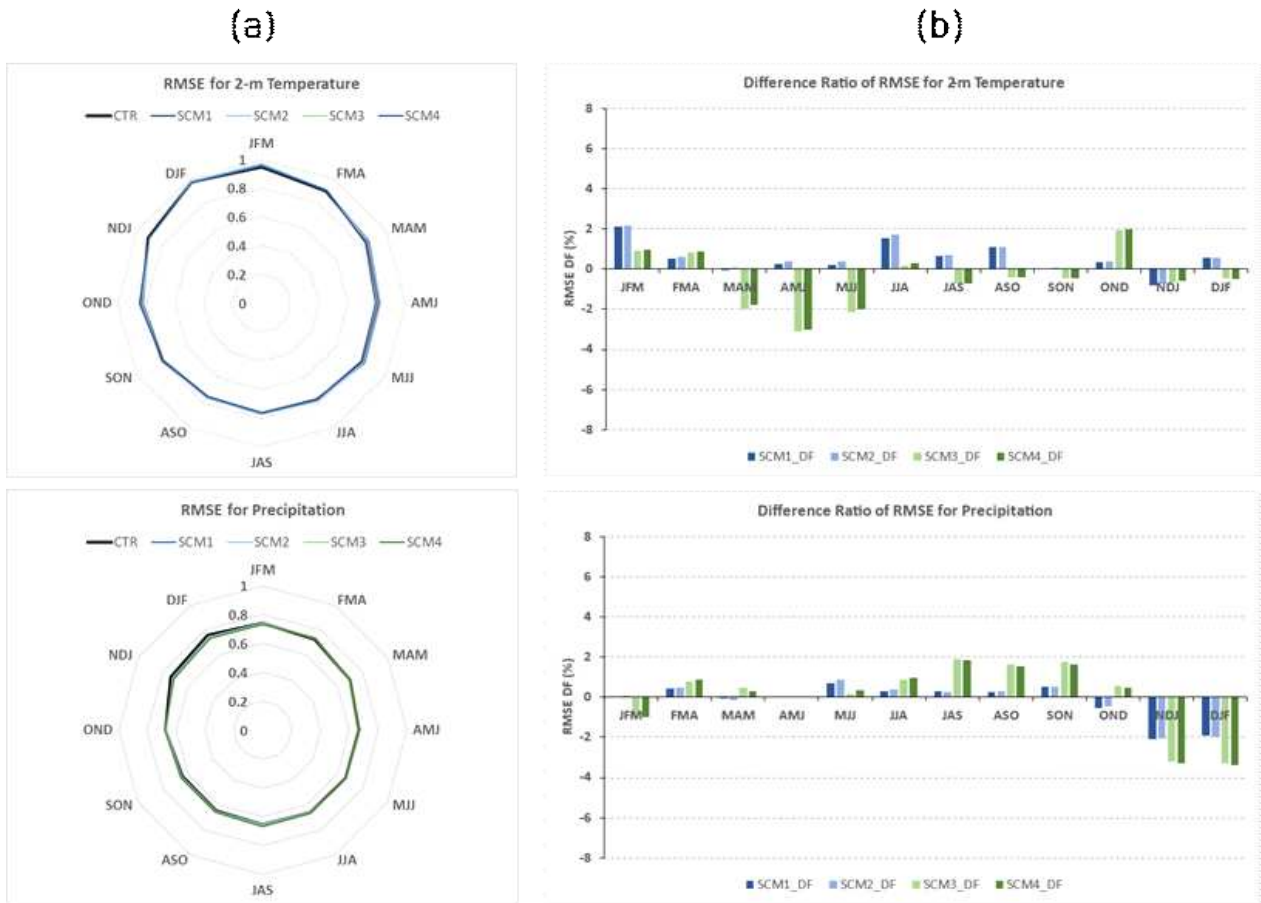


Figure 3.32. Seasonal distribution (a) of RMSE for 2-m temperature (top) and precipitation (bottom) in each experiment and the ratio of RMSE difference (b) from CTR (from Kim et al., 2023).

MME hindcast 기간 확장의 효용성은 예측 성능의 변화보다 최근 기후의 경향성 혹은 변동성을 잘 모의하는 것이 중요하다. 따라서 Figure 3.33과 같이 MAM, JJA, SON, DJF 계절에 대한 관측된 기온의 선형 추세(1991-2020년)와 각 실험별 예측된 기온 선형 추세에 대해 상호 비교한 결과, MAM과 JJA 계절의 관측된 기온 선형 추세는 극 지역에서 온난 경향이 나타나지만, 모든 실험에서 예측된 기온의 경우 이를 대체로 모의하지 못하는 것으로 나타났으며, JJA 계절 기온의 경우 SCM2(1991-2014년)의 선형 추세와 관측 추세간 지역 상관관계가 CTR에 비해 높게 나타났다. 하지만 그 외 계절에서는 대체로 관측된 기온 선형 추세 분포와 SCM4(1993-2016년)에서 예측된 기온 선형 추세의 분포가 CTR보다 높은 상관성이 나타났다. 이는 비록 비교 대상 기간이 다르긴 하지만 1993-2016년의 hindcast 기간을 사용한 MME의 예측 기온 경향성이 WMO에서 정의하는 기후평년 기간(1991-2020년)에 대한 기온 경향성과 유사성이 높은 것을 확인할 수 있다.

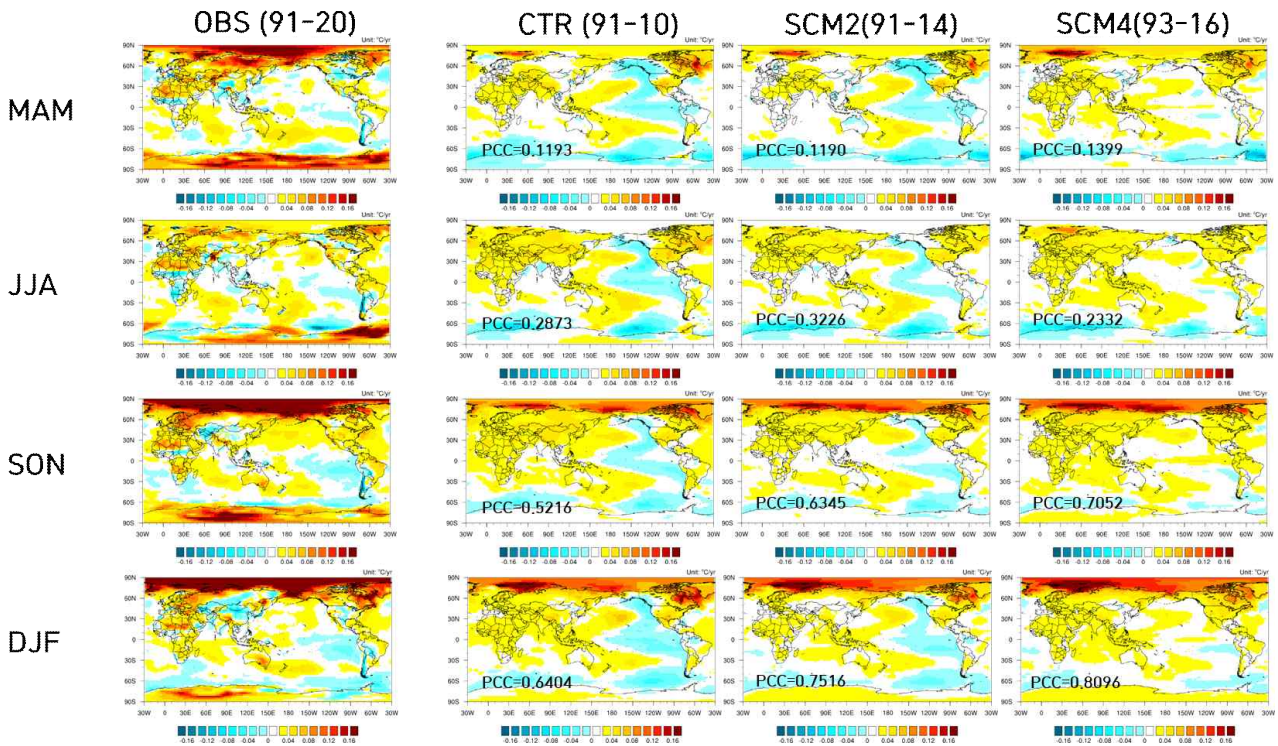


Figure 3.33. Trends of predicted temperature for each experiment during hindcast period and observed temperature during 1991-2020 (from kim et al., 2023).

따라서 MME hindcast 기간 확장을 위한 민감도 실험 결과, 1993-2016년의 hindcast 기간으로 확장하는 방안이 비교적 최근 기후의 경향성 및 변동성에 대한 유사성이 높은 장점이 있으며, 현업 운영의 측면에서 참여모델의 결측해 처리 비중이 적기 때문에 그 효용성이 높다고 할 수 있다. 이에 내부적인 토의를 통해 향후 APCC MME hindcast 기간을 1993-2016년 기간으로 확장하고자 한다. 또한, NCEP forecast 자료를 hindcast 자료로 활용하는데 예측값의 이상치와 불규칙한 결측에 있음에 따라 현업 효율성을 고려하여 Table 2.19의 MME3 방안을 적용하고자 한다.

위 결과를 바탕으로 MME hindcast 기간의 확장(1993-2016년)을 위해 기존 AFS 시스템을 기반으로 관련 프로세스를 개선하고 변경을 수행하였다. 해당 프로세스 개선 및 변경 사항은 아래와 같다.

○ MME hindcast 기간 확장을 위한 AFS 프로세스 개선 및 변경

A. MME AFS(Automated Forecast System) 현황

A-1. AFS 시스템 서버 환경 및 경로

- AFS 시스템 서버: 10.100.9.116 (afsdev; MME 현업용 단독 서버)
- AFS 시스템 경로: /data02/OPER/AFS/RUN/Manage\_MME

A-2. AFS 시스템 구성 및 운영 현황

- AFS 시스템 구성

프로그램 및 설정 파일	내 용
<b>메인 프로그램 및 환경설정 파일</b>	
FCST_SCM_MME_3month.py	Forecast SCM 3개월 예측 생산 프로그램
FCST_SCM_MME_6month.py	Forecast SCM 6개월 예측 생산 프로그램
FCST_GAUS_MME_3month.py	Forecast GAUS 3개월 예측 생산 프로그램
FCST_GAUS_MME_6month.py	Forecast GAUS 6개월 예측 생산 프로그램
HCST_SCM_MME_3month.py	Hindcast SCM 3개월 예측 생산 프로그램
HCST_SCM_MME_6month.py	Hindcast SCM 6개월 예측 생산 프로그램
HCST_GAUS_MME_3month.py	Hindcast GAUS 3개월 예측 생산 프로그램
HCST_GAUS_MME_6month.py	Hindcast GAUS 6개월 예측 생산 프로그램
FCST_SCM_MME_3month.yaml	Forecast SCM 3개월 예측 생산 환경 설정 파일
FCST_SCM_MME_6month.yaml	Forecast SCM 6개월 예측 생산 환경 설정 파일
FCST_GAUS_MME_3month.yaml	Forecast GAUS 3개월 예측 생산 환경 설정 파일
FCST_GAUS_MME_6month.yaml	Forecast GAUS 6개월 예측 생산 환경 설정 파일
HCST_SCM_MME_3month.yaml	Hindcast SCM 3개월 예측 생산 환경 설정 파일
HCST_SCM_MME_6month.yaml	Hindcast SCM 6개월 예측 생산 환경 설정 파일
HCST_GAUS_MME_3month.yaml	Hindcast GAUS 3개월 예측 생산 환경 설정 파일
HCST_GAUS_MME_6month.yaml	Hindcast GAUS 6개월 예측 생산 환경 설정 파일
<b>확률 예측을 위한 포트란 파일 (so_package)</b>	
PMME.F / PMME.so	확률 예측 앙상블 평균 처리 프로그램
PROB.F / PROB.so	확률분포 및 카테고리별 확률 예측 산출 프로그램
TERC.F / TERC.so	(forecast용) 기후평년기간(hindcast) 확률분포 및 카테고리별 확률 예측 산출 프로그램
TERC_HIND.F / TERC_HIND.so	(hindcast용) 기후평년기간(hindcast) 확률분포 및 카테고리별 확률 예측 산출 프로그램
<b>소스 프로그램 및 기타 파일 (my_package)</b>	
calc_SCM_MME_IN.py	(단정예측용) 개별모델 처리 관련 소스 프로그램
calc_GAUS_MME_IN.py	(확률예측용) 개별모델 처리 관련 소스 프로그램
make_season_month_name.py	예측 월/계절명 처리 관련 소스 프로그램
nc_out_1_0_deg_DMME.py	(단정예측용) 1도 해상도 출력 관련 소스 프로그램
nc_out_2_5_deg_DMME.py	(단정예측용) 2.5도 해상도 출력 관련 소스 프로그램
nc_out_1_0_deg_PMME.py	(확률예측용) 1도 해상도 출력 관련 소스 프로그램
nc_out_2_5_deg_PMME.py	(확률예측용) 2.5도 해상도 출력 관련 소스 프로그램
read_MODEL_HIND_TIME.py	개별모델 hindcast 시간 정보 입력 관련 소스 프로그램
lsmask_1deg.nc	land-sea mask 자료

- AFS 시스템 운영 현황

: 위의 프로그램 및 설정 파일을 이용하여 1991-2010년 hindcast 기간(기후평년기간) 기반의 저/고해상도 예측 자료를 생산하며, 다양한 그래픽 처리를 통해 매월 15일 누리집을 통해 제공함

#### B. MME hindcast 기간 확장을 위한 AFS 개선 및 변경 사항

※ 민감도 실험 결과 및 내부 토의를 통해 hindcast 확장 기간을 1993-2016(24년)으로 설정함

### B-1. 환경파일(yaml) 개선 및 통합

- 기존 AFS 시스템은 forecast 및 hindcast의 3/6개월 예측 자료를 생산하기 위해 8개의 환경파일(yaml)을 수동으로 설정 및 수정해야 하고, 저/고해상도 예측 자료를 생산하기 위해 환경파일을 총 16회 수동 설정 및 수정해야 함
- AFS 시스템의 안정적 운영을 위해 수동 작업의 비중을 낮추고자 2개의 환경파일만으로 forecast 및 hindcast의 3/6개월 예측자료를 생산할 수 있도록 개선함

(개선 전)

FCST\_SCM\_MME\_3month.yaml / FCST\_SCM\_MME\_6month.yaml

FCST\_GAUS\_MME\_3month.yaml / FCST\_GAUS\_MME\_6month.yaml

HCST\_SCM\_MME\_3month.yaml / HCST\_SCM\_MME\_6month.yaml

HCST\_GAUS\_MME\_3month.yaml / HCST\_GAUS\_MME\_6month.yaml

→ 총 8개 파일 설정/수정 (저/고해상도 수행: 총 16회 설정/수정)

(개선 후)

MME\_3month.yaml / MME\_6month.yaml

→ 총 2개 파일 설정/수정 (저/고해상도 수행: 총 4회 설정/수정)

※ 개선 후 총 **12회 수동 작업 감소**

### B-2. 참여모델 결측해의 처리 관련 hindcast 생산 프로그램 개선

- 확률예측의 경우 참여모델의 결측해가 있는 경우 처리 과정에서 해당 모델을 MME에서 참여 제외하고 있기 때문에 프로그램 내 해당 결측해만 해당 모델을 제외시키기 위한 별도의 조건문을 설정하여 주고 있음
- 참여모델의 개선/변경 등으로 결측해를 추가 설정해야 하는 경우, 특히 hindcast 생산 프로그램에서 다음과 같은 3개의 구간의 조건문을 수정해야 함

(계속)

(예시) HCST\_GAUS\_MME\_3month.py

(첫번째 단계) line 157-184

```
# remove "CMCC_SPS3.5", "KMA_GLOSEA6GC3.2", "METFR_SYS8", "UKMO_GLOSEA6"
# in insti_model_list
# JAN: FillValue in 1992, 1993
# Other Seasons: FillValue in 1991, 1992
if fcst_month == "JAN":
    if iyear == 1992 or iyear == 1993:
        if "CMCC_SPS3.5" in insti_model_list:
            insti_model_list.remove("CMCC_SPS3.5")
        if "KMA_GLOSEA6GC3.2" in insti_model_list:
            insti_model_list.remove("KMA_GLOSEA6GC3.2")
        if "METFR_SYS8" in insti_model_list:
            insti_model_list.remove("METFR_SYS8")
        if "UKMO_GLOSEA6" in insti_model_list:
            insti_model_list.remove("UKMO_GLOSEA6")
    else:
        if iyear == 1991 or iyear == 1992:
            if "CMCC_SPS3.5" in insti_model_list:
                insti_model_list.remove("CMCC_SPS3.5")
            if "KMA_GLOSEA6GC3.2" in insti_model_list:
                insti_model_list.remove("KMA_GLOSEA6GC3.2")
            if "METFR_SYS8" in insti_model_list:
                insti_model_list.remove("METFR_SYS8")
            if "UKMO_GLOSEA6" in insti_model_list:
                insti_model_list.remove("UKMO_GLOSEA6")
        if iyear == 1991:
            if "CWB_TCWB17v1.1" in insti_model_list:
                insti_model_list.remove("CWB_TCWB17v1.1")
#-----
```

(두번째 단계) line 207-227

```
# "CMCC_SPS3.5", "KMA_GLOSEA6GC3.2", "METFR_SYS8", "UKMO_GLOSEA6"
# have FillValue in 1991, 1992 -----
if model == "CMCC_SPS3.5" or model == "KMA_GLOSEA6GC3.2" or \
model == "METFR_SYS8" or model == "UKMO_GLOSEA6":
    if fcst_month == "JAN":
        hcst_syear = 1994
        hcst_eyear = 2011
    else:
        hcst_syear = 1993
        hcst_eyear = 2010
else:
    hcst_syear = hind_syear
    hcst_eyear = hind_eyear

if model == "CWB_TCWB17v1.1":
    if fcst_month == "JAN" or "FEB":
        hcst_syear = 1992
        hcst_eyear = 2010
    else:
        hcst_syear = 1991
        hcst_eyear = 2010
```

(세번째 단계) line 254-272

```
if model == "CMCC_SPS3.5" or model == "KMA_GLOSEA6GC3.2" or \
model == "METFR_SYS8" or model == "UKMO_GLOSEA6":
    if fcst_month == "JAN":
        if iyear < 1994:
            hcst_syear = 1992
        else:
            if iyear < 1993:
                hcst_syear = 1991
            else:
                hcst_syear = hind_syear
    if model == "CWB_TCWB17v1.1":
        if fcst_month == "FEB":
            if iyear < 1992:
                hcst_syear = 1991
            else:
                hcst_syear = 1992
        else:
            hcst_syear = hind_syear
```

- AFS 시스템의 안정성 확보를 위해 해당 부분을 아래와 같이 1개의 구간의 조건문만으로 참여모델별 결측해 처리를 할 수 있도록 개선하였음

(예시) 개선된 HCST\_GAUS\_MME\_3month.py

line 169-266

```
# for-loop: target year
for iyear in year_list:

    print(iyear)

    insti_model_list = insti_model.split(' ')
    real_insti_model_list = []

    real_hcst_syear = []
    real_hcst_eyear = []

    nmod = 0

    for model in insti_model_list:

        m_hcst_syear = hind_syear
        m_hcst_eyear = hind_eyear

        # have FillValue in Missing Years -----
        if model == "APCC_SCOFS":
            if fcst_month == "JAN":
                m_hcst_syear = 1994
                m_hcst_eyear = 2014
            else:
                m_hcst_syear = 1993
                m_hcst_eyear = 2013

        if model == "BCC_CSM1_1M":
            if fcst_month == "JAN":
                m_hcst_syear = 1994
                m_hcst_eyear = 2016
            else:
                m_hcst_syear = 1993
                m_hcst_eyear = 2015

        if model == "BOM_ACCESS_G1":
            if fcst_month == "JAN":
                m_hcst_syear = 1994
                m_hcst_eyear = 2013
```

(중략)

```
if model == "MSC_CANSIPSv2":
    if fcst_month == "JAN":
        m_hcst_syear = 1994
        m_hcst_eyear = 2011
    else:
        m_hcst_syear[nmod] = 1993
        m_hcst_eyear[nmod] = 2010

if model == "NCEP_CFSv2":
    if fcst_month == "JAN" or fcst_month == "FEB":
        if fcst_month == "JAN":
            m_hcst_syear = 1994
            m_hcst_eyear = 2011
        if fcst_month == "FEB":
            m_hcst_syear = 1993
            m_hcst_eyear = 2011
    else:
        m_hcst_syear = 1993
        m_hcst_eyear = 2010

if iyear >= m_hcst_syear and iyear <= m_hcst_eyear:
    real_insti_model_list.append(model)
    real_hcst_syear.append(m_hcst_syear)
    real_hcst_eyear.append(m_hcst_eyear)
```

(중략)

line 288-293

```
for model in real_insti_model_list:

    print(" ", model)

    hcst_syear = real_hcst_syear[nmod]
    hcst_eyear = real_hcst_eyear[nmod]
```

### B-3. 결측해 자료 관리 체계 개선

- MME 참여모델의 hindcast 자료 디렉터리는 연도별로 구성되어 있으며, MME 생산 프로그램에서는 MME hindcast 기간에 대한 지정된 참여모델별 hindcast 경로에서 자료가 존재하여야 처리가 가능함
- 이에 MME hindcast 기간 내 결측해가 존재하는 참여모델의 hindcast 자료의 경우 해당 결측해의 디렉터리를 생성하고, 임의로 결측값(fillvalue)으로 채워진 dummy 파일을 함께 생성하여 주고 있음
- 이러한 이유로 현재 예측 자료 제공일에 위의 dummy가 함께 업데이트되고 있으며, 사용자에게 정보의 혼란을 줄 수 있다는 지적이 있었음
- 따라서 해당 결측해의 자료를 현업으로 활용하는 경로가 아닌 별도의 경로를 활용하여 dummy 파일을 해당 경로에 생산하고, 모델 개선/변경이 없다면 한 번 생산한 dummy 파일을 활용/관리할 수 있도록 개선함

(개선 전) 기존 참여모델 결측해 dummy 파일 경로

```
[oper@afsdev JUN]$ ls
1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016
[oper@afsdev JUN]$
[oper@afsdev JUN]$
[oper@afsdev JUN]$
[oper@afsdev JUN]$
[oper@afsdev JUN]$
[oper@afsdev JUN]$
```

: CMCC의 경우 hindcast 기간은 1993-2016년으로써 현 MME hindcast 기간인 1991-2010년 대비 1991년과 1992년이 결측해임에 따라 1991, 1992 디렉터리를 생성 후 변수별 dummy 파일을 생산함. 하지만, 이는 현업으로 운영하는 경로에서 이루어지는 만큼 예측 정보 제공일에 해당 dummy 경로 및 파일의 업데이트가 함께 이루어지고 있는 실정임.

(개선 후)

```
[cmlim@afsdev HINDCAST2021]$ ls
APCC_SCOPS BOM_ACCESS-S1 CMCC_SPS3.5 FillValue JMA_NRI-CPS2 METFR_SYS7 MSC_CANSIPsv2 NCEP_CFSv2 UKMO_GLOSEA5
BCC_CSM1.1M BOM_ACCESS-S2 CWB_TCWB1Tv1.1 HMC_SL-AV KMA_GLOSEA5G2 METFR_SYS8 NASA_GEOS-S2S-2.1 PNU_CGCMv2.0 UKMO_GLOSEA6
[cmlim@afsdev HINDCAST2021]$
[cmlim@afsdev HINDCAST2021]$
[cmlim@afsdev HINDCAST2021]$
[cmlim@afsdev HINDCAST2021]$
```

: 현업으로 운영하는 경로 외 별도의 경로(FillValue)에서 모든 참여모델의 결측해를 생산/관리할 수 있도록 개선함

calc\_SCM\_MME\_IN.py(예시) line 58-67

```
nyear = hindcast_eyear - hindcast_syear + 1
for n in range(0, nyear):
    if os.path.isfile(model_path_file_name[n]):
        model_path_file_name[n] = model_path_file_name[n]
    else:
        year = hindcast_syear + n
        dummy_file = hindcast_model_dir_path + "FillValue" + "/" + model_name + "/" + forecast_month + "/" + str(year) + "/" + variable_name + ".nc"
        model_path_file_name[n] = dummy_file
```

: 참여모델 hindcast 자료가 없는 경우(결측해) 위에서 만들어진 결측해 경로에서 dummy 파일을 읽어들이도록 개선함

B-4. 그 밖의 hindcast 기간 확장을 위한 AFS 개선 및 변경 사항

- 현재 예측 자료 생산을 위한 환경파일(yaml)은 즉석에서 설정/수정하여 필요한 예측 자료 생산 이후 별도의 저장 혹은 관리가 이루어지고 있지 않으며, 이에 향후 예측 자료의 재생산 및 history 관리를 위해 아래와 같이 별도의 경로로 매월 예측자료의 환경파일을 저장하여 관리할 수 있도록 개선함

위와 같이 AFS 시스템 프로세스의 개선 및 변경을 통해 1993-2016년 hindcast 기간의 MME 예측자료를 시험 생산하였으며, 그 과정 및 결과는 다음과 같다.

○ MME hindcast 기간 확장을 위한 개선된 AFS 시스템 시험 운영

**A. 개선된 AFS 시스템 시험 운영 및 수행 방법**

A-1. 개선된 AFS 시스템 시험 운영 경로 및 구성

- 시험 운영 경로: /data01/cmlim/OPER/AFS/RUN/Manage\_MME\_HCST\_Expand
- 개선된 AFS 시스템 구성

프로그램 및 설정 파일	내 용
<b>메인 프로그램 및 환경설정 파일</b>	
FCST_SCM_MME_3month.py	Forecast SCM 3개월 예측 생산 프로그램
FCST_SCM_MME_6month.py	Forecast SCM 6개월 예측 생산 프로그램
FCST_GAUS_MME_3month.py	Forecast GAUS 3개월 예측 생산 프로그램
FCST_GAUS_MME_6month.py	Forecast GAUS 6개월 예측 생산 프로그램
HCST_SCM_MME_3month.py	Hindcast SCM 3개월 예측 생산 프로그램
HCST_SCM_MME_6month.py	Hindcast SCM 6개월 예측 생산 프로그램
HCST_GAUS_MME_3month.py	Hindcast GAUS 3개월 예측 생산 프로그램
HCST_GAUS_MME_6month.py	Hindcast GAUS 6개월 예측 생산 프로그램
MME_3month.yaml	3개월 예측 생산 환경 설정 파일
MME_6month.yaml	6개월 예측 생산 환경 설정 파일
<b>확률 예측을 위한 포트란 파일 (so_package)</b>	
PMME.F / PMME.so	확률 예측 앙상블 평균 처리 프로그램
PROB.F / PROB.so	확률분포 및 카테고리별 확률 예측 산출 프로그램
TERC.F / TERC.so	(forecast용) 기후평년기간(hindcast) 확률분포 및 카테고리별 확률 예측 산출 프로그램
TERC_HIND.F / TERC_HIND.so	(hindcast용) 기후평년기간(hindcast) 확률분포 및 카테고리별 확률 예측 산출 프로그램
<b>소스 프로그램 및 기타 파일 (my_package)</b>	
calc_SCM_MME_IN.py	(단정예측용) 개별모델 처리 관련 소스 프로그램
calc_GAUS_MME_IN.py	(확률예측용) 개별모델 처리 관련 소스 프로그램
make_season_month_name.py	예측 월/계절명 처리 관련 소스 프로그램
nc_out_1_0_deg_DMME.py	(단정예측용) 1도 해상도 출력 관련 소스 프로그램
nc_out_2_5_deg_DMME.py	(단정예측용) 2.5도 해상도 출력 관련 소스 프로그램

nc_out_1_0_deg_PMME.py	(확률예측용) 1도 해상도 출력 관련 소스 프로그램
nc_out_2_5_deg_PMME.py	(확률예측용) 2.5도 해상도 출력 관련 소스 프로그램
read_MODEL_HIND_TIME.py	개별모델 hindcast 시간 정보 입력 관련 소스 프로그램
lsmask_1deg.nc	land-sea mask 자료

## A-2. 개선된 AFS 시스템 수행 방법

### - 환경 파일(yaml) 수정

: 아래 예시의 노란색 음영 수정

```

- Model_name      : APCC_SCOPS          (MME 참여 모델 구성)
                  ... (중략)
                  UKMO_GLOSEA6
Variable_name     : prec                (예측 변수명)
                  slp
                  t2m
                  t850
                  z500
                  u200
                  u850
                  v200
                  v850
Forecast_month    : MAY                 (타깃 예측 월)
Forecast_year     : 2024                (타깃 예측 해)
Hindcast_syear    : 1993                (hindcast 시작해)
Hindcast_eyear    : 2016                (hindcast 종료해)
Resolution        : 2.5                 (해상도)
Issued_date       : 15 Feb 2020         (발행 일 정보)

# JAN: 1994-2017
# Other Seasons: 1993-2016

- Model_name      : APCC_SCOPS          (MME 참여 모델 구성)
                  ... 중략
                  UKMO_GLOSEA6
Variable_name     : sst
Forecast_month    : MAY                 (타깃 예측 월)
Forecast_year     : 2024                (타깃 예측 해)
Hindcast_syear    : 1993                (hindcast 시작해)
Hindcast_eyear    : 2016                (hindcast 종료해)
Resolution        : 2.5                 (해상도)
Issued_date       : 15 Feb 2020         (발행 일 정보)

# JAN: 1994-2017
# Other Seasons: 1993-2016

```

### - 프로그램 수행

: 각 메인 프로그램 수행

```
$:> python *메인프로그램.py
```

\* 메인프로그램:

```
FCST_SCM_MME_3month.py  FCST_SCM_MME_6month.py  
FCST_GAUS_MME_3month.py FCST_GAUS_MME_6month.py  
HCST_SCM_MME_3month.py  HCST_SCM_MME_6month.py  
HCST_GAUS_MME_3month.py HCST_GAUS_MME_6month.py
```

- 자료 처리 산출물 경로

: /data01/cmlim/OPER/AFS/RUN/Manage\_MME\_HCST\_Expand/DATA/MME\_OUT

※ 산출물의 데이트 format 및 속성 등은 기존과 동일

## B. MME hindcast 기간 확장을 위한 개선된 AFS 시스템 시험 운영 결과

### B-1. 개선된 AFS 시스템 산출물 정합성 테스트

- 개선된 AFS 시스템의 정합성을 확인하기 위해 기존 AFS 시스템 및 개선된 AFS 시스템 각각 동일한 1991-2010년 hindcast 기간의 SCM 및 GAUS 예측 결과를 상호 비교하였음
- 무작위 계절을 선정하여 아래와 같이 개선 전/후 시스템에서 생산된 SCM 및 GAUS 모두 차이가 없는 것으로 나타남

변 수	개선된 AFS - 기존 AFS (SCM)	개선된 AFS - 기존 AFS (GAUS)
prec	0	0
slp	0	0
t2m	0	0
t850	0	0
z500	0	0
u200	0	-
u850	0	-
v200	0	-
v850	0	-
sst	0	0

### B-2. 개선된 AFS 시스템 시험 운영 결과

- hindcast 기간을 1993-2016년으로 확장하여 2021년~2024년의 실제 현업으로 생산된 Forecast 및 Hindcast 예측과 동일한 모델 구성으로 예측자료 생산 완료함

위와 같이 AFS 시스템 프로세스 개선 및 변경과 시험 운영을 통해 생산된 1993-2016년 hindcast 기간의 MME 예측자료와 기존 1991-2010년 hindcast 기간의 MME 예측자료 간 상호비

교를 수행하였다. Figure 3.34는 기존 hindcast 기간(1991-2010년) MME(Recent\_MME, 검은선)와 확장된 hindcast 기간(New\_MME, 1993-2016년) MME(파란선)의 forecast 기온(t2m, a) 및 강수(prec, b) 예측(2021-2023년)에 대한 ACC의 변화 그 차이(오른쪽 축, 음영)를 나타낸 그림으로써 기온의 경우 전반적으로 0에서 -0.1 범위로 ACC의 하락이 나타나지만, 강수의 경우 두 MME의 ACC 차이가 대체로 0.05 미만의 차이로써 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. APCC MME 검증 정보는 다양한 목적으로 활용됨에 따라 hindcast 기간 확장된 MME 기온 예측의 성능 하락에 관한 부분은 추가 분석이 필요할 것으로 사료된다.

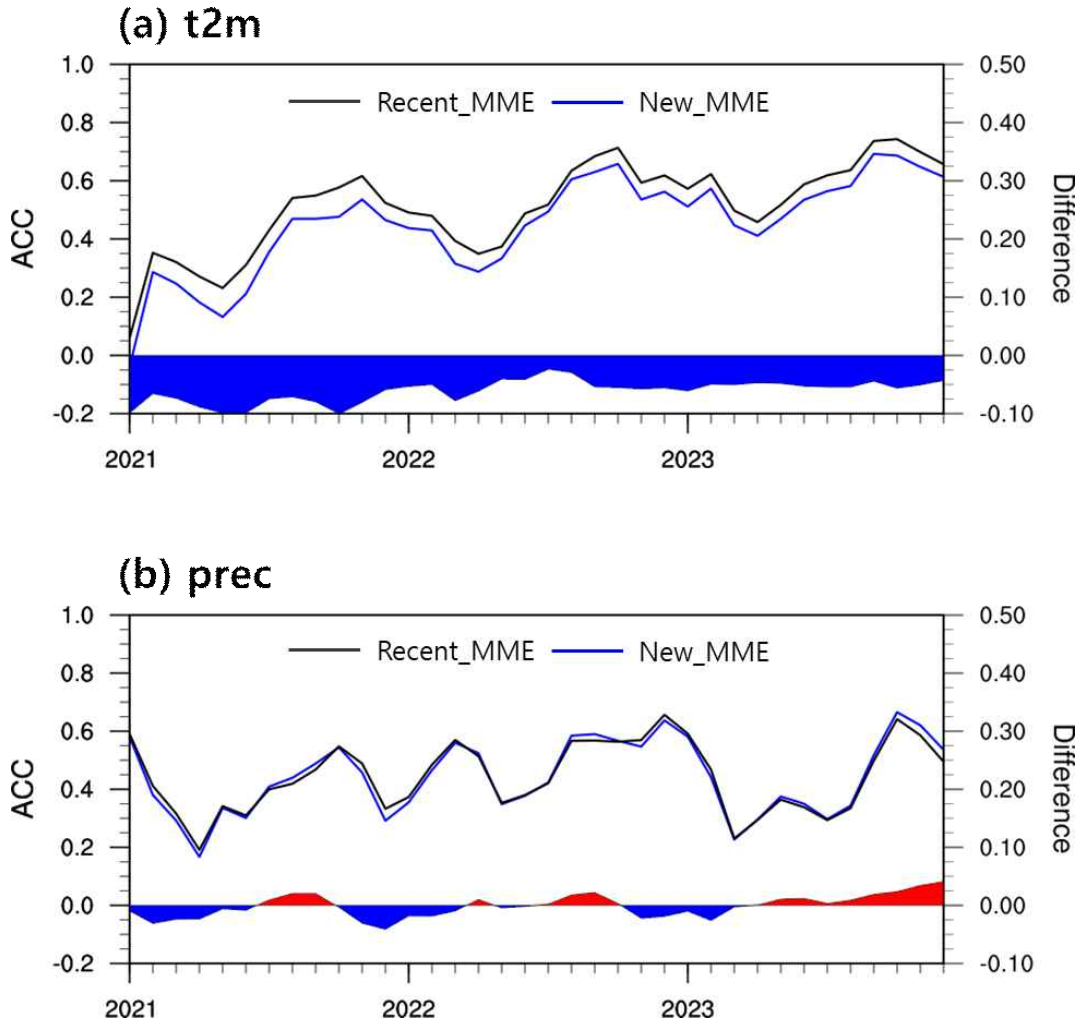


Figure 3.34. Changes of ACC for real-time forecast of MME based on 1991-2010 hindcast period (Recent\_MME, black line) and 1993-2016 hindcast period (New\_MME, blue line) during 2021-2023. The right y-axis and shaded area(red: positive, blue: negative) indicate ACC difference between Recent\_MME and New\_MME: (a) 2-m temperature and (b) precipitation.

ACC와 유사하게 오차(RMSE)에 대한 분석도 Figure 3.35와 같이 수행하였다. 그 결과, 기존 MME에 비해 hindcast 기간 확장된 MME의 RMSE가 기온 및 강수 모두 대체로 낮게 나타나면서 정량적 오차에 있어서 hindcast 기간이 확장된 MME가 보다 나은 결과를 나타내었고, 특히 강수의 경우 모든 경우에서 New\_MME의 RMSE가 더 낮게 나타났다. 다만, 그 차이는 매우 적은 값으로써 해석에 유의가 필요하다.

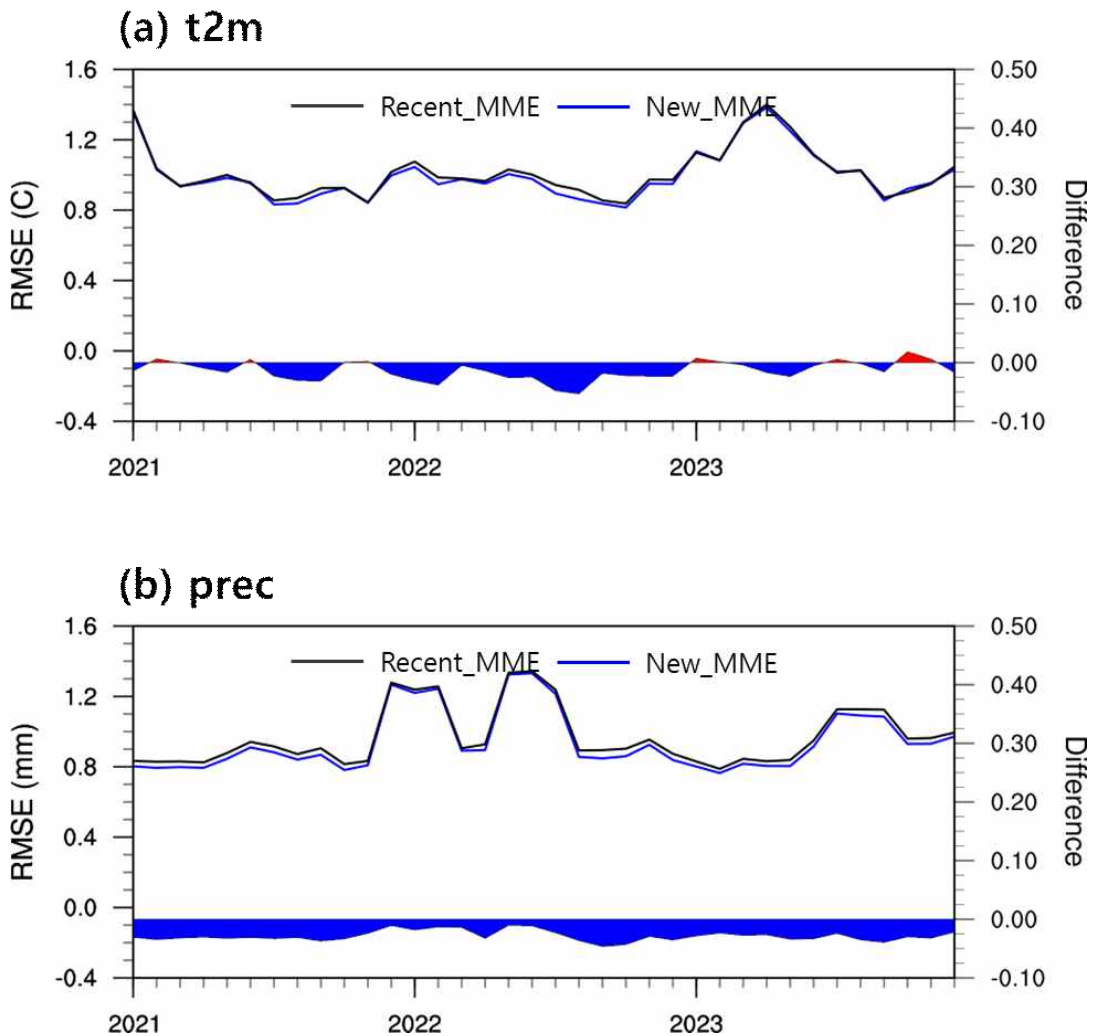


Figure 3.35. Changes of RMSE for real-time forecast of MME based on 1991-2010 hindcast period (Recent\_MME, black line) and 1993-2016 hindcast period (New\_MME, blue line) during 2021-2023. The right y-axis and shaded area (red: positive, blue: negative) indicate RMSE difference between Recent\_MME and New\_MME: (a) 2-m temperature and (b) precipitation.

따라서 MME hindcast 기간을 1993-2016년으로 확장할 경우 실시간 예측에서 기존 MME에 비해 공간 성능(ACC)은 다소 하락하거나 유사한 성능을 보이며, 예측값 자체의 오차(RMSE)가 다소 줄어드는 것으로 나타나면서 hindcast 기간 확장의 효용성을 확인할 수 있다.

### 3.1.2. 기후감시시스템 운영

주별·월별·계절별 기후 감시 정보는 APCC 홈페이지를 통해 정기적으로 업데이트되고 있으며 특히 월별 기온 및 강수 감시 정보는 설명과 함께 제공되고 있다. 기후 지수는 태평양 해수면온도 지수 7개, 인도양 및 대서양 해수면온도 지수 4개, 대기 지수 8개, 몬순 지수 5개에 대해 매월 중순 텍스트 파일과 이미지 파일을 동시에 제공하고 있다. 각 지수별 계산 방법은 홈페이지에서 확인할 수 있다. 전지구 가뭄 지수 현황 또한 매월 중순 업데이트되고 있다. 2023년에는 APCC 기후감시시스템 운영에 사용되던 상향장파복사(Outgoing Longwave Radiation, OLR) 자료인 NOAA daily non-interpolated OLR 자료가 9월 17일을 마지막으로 제공이 중단됨에 따라 NOAA에서 권고한 CPC blended OLR 자료로 교체하였다.

### 3.1.3. 동아시아 지역 확률계절예측시스템 운영

2022년에 구축된 동아시아 지역 확률계절예측시스템은 과거 예측자료를 활용하여 2020년부터 2024년의 동아시아 맞춤형 확률 예측 정보를 제공하고 있으며, 본 연구를 통해 2022-2024년 기간 동안 총 36회의 동아시아 맞춤형 확률 예측 정보를 생산 및 제공하였다. 해당 기간 동안 매 계절 동아시아 지역의 대표 기후인자인 ENSO와 서태평양 강수에 대하여 동아시아 강수와 관련성 정보를 기준으로 높은 재현성을 보이는 MME 참여모델들을 선별하여 확률론적 MME 예측 정보를 산출하는 방식으로써 관측 기반의 모델 선별 기준은 다음(Figure 3.36, 3.37)과 같으며, 기후평년 기간 등의 변동 사항이 없으므로 2023년 결과와 동일하다(김유진 외, 2023). 이러한 기준하에 각 기후인자별 재현성을 평가하여 높은 재현성을 보이는 모델들의 공통 모델들을 참여모델로 하여 동아시아 지역에 대한 확률론적 MME 계절예측 정보를 생산하고, 매 계절 참여모델 목록을 정리하여 별도로 비치하고 있다. 본 정보는 APCC 국문 누리집에서 제공되며 앞서 상술한 바와 같이 MME 계절예측 정보 제공 방식 및 일정과 동일하게 매월 15일 경 제공하고 있다.

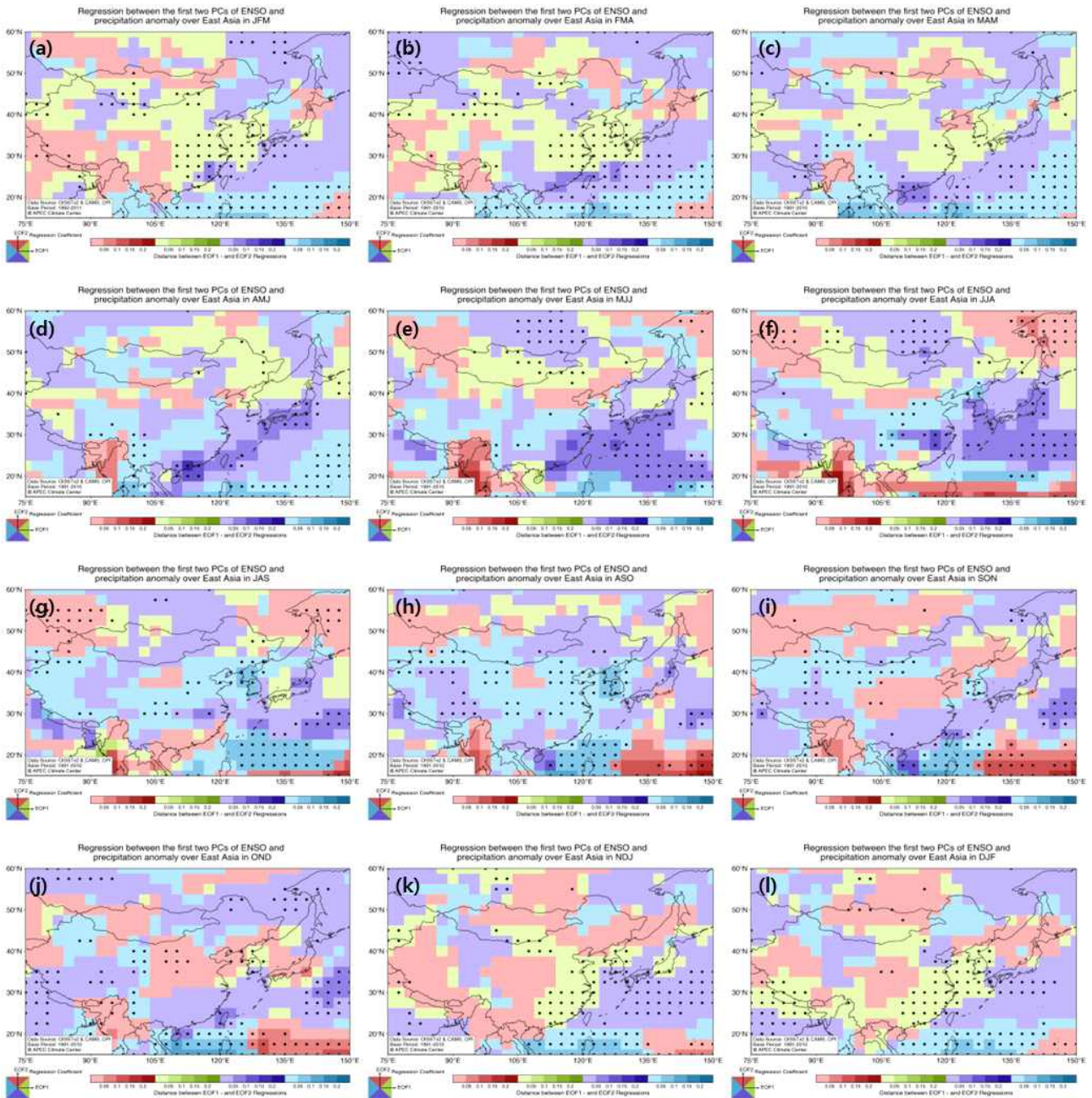


Figure 3.36. Regression between the first two PCs of ENSO and precipitation anomaly over East Asia in (a) JFM to (l) DJF (from Kim et al., 2023).

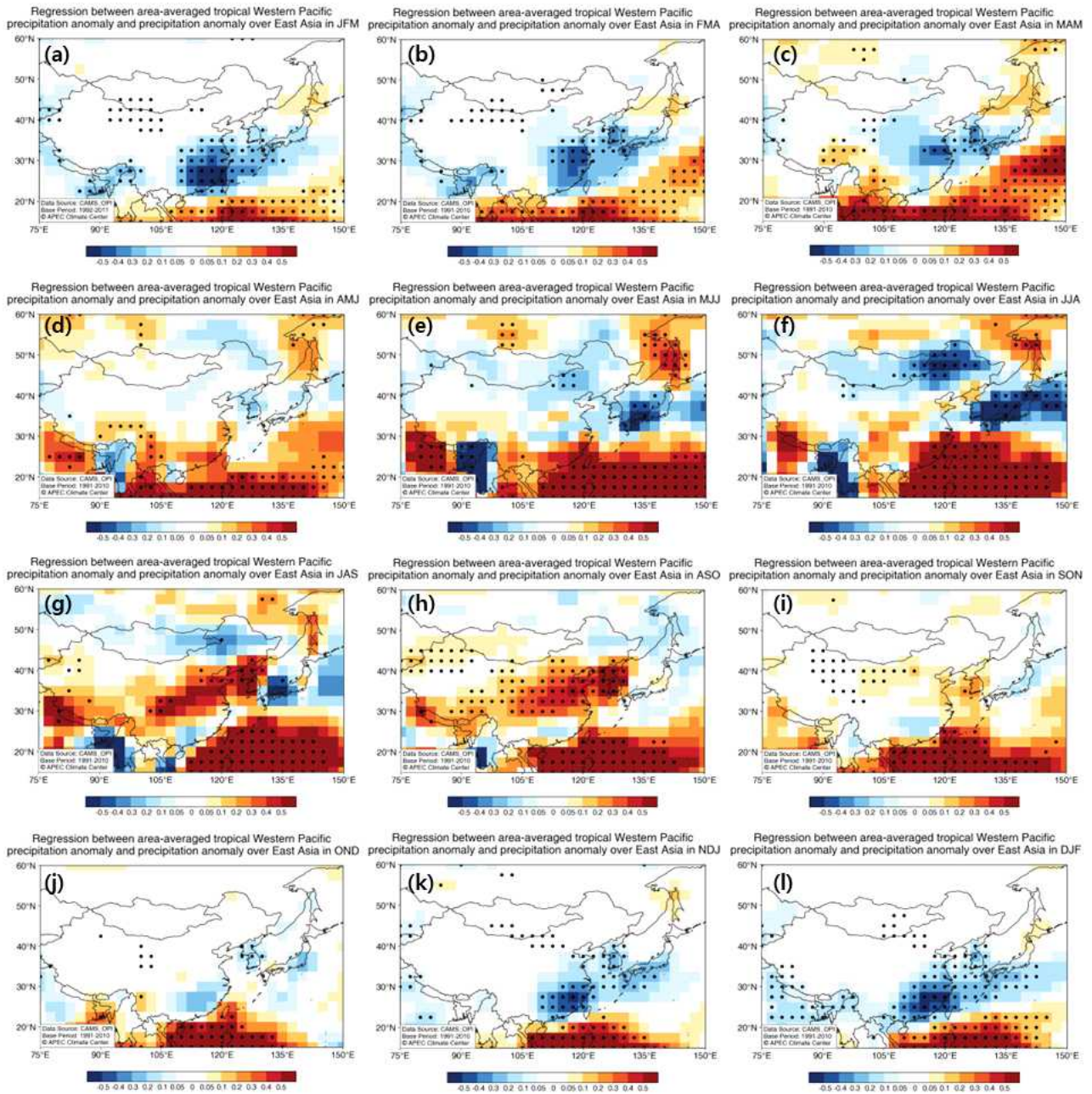


Figure 3.37. Regression between area-averaged tropical Western Pacific precipitation anomaly and precipitation anomaly over East Asia in (a) JFM to (l) DJF (from Kim et al., 2023).

위와 같은 선별 기준으로 2022-2024년 기간 동안 기후인자별 선별된 모델의 목록은 다음과 같다(Table 3.11~3.13). 계절별로 선별된 모델 구성은 상이하지만, 2022-2024년 동안 ENSO와 동아시아 강수 관련성으로 선별된 모델은 APCC, BoM, CMCC, JMA, MetFR, UKMO의 모델이 가장 많이 선별되었으며, 서태평양 강수와 동아시아 강수 관련성으로 선별된 모델은 APCC, BoM, CMCC, JMA, KMA, UKMO의 모델이 가장 많이 선별되었다. 여기서 공통되는 APCC, BoM, CMCC, JMA, UKMO의 모델은 타 모델이 비해 기후인자별 관련성을 잘 재현하는 빈도가 높은 모델로써 동아시아 맞춤형 확률 예측에 긍정적인 영향을 미치는 모델로 나타났다. 본 동아시아 맞춤형 확률 예측은 3개월 계절 평균에 대한 예측 정보로써 월별 시간 규모의 예측 정보가 필요하다는 지적이 제기된 바 있으며, 이를 위한 연구가 후속되어야 할 것이다.

Table 3.11. Lists of selected models for customized probabilistic MME over East Asia for 2022 by two criteria.

예측 계절	ENSO와 동아시아 강수 관련성 선별 모델 목록	서태평양 강수와 동아시아 강수 관련성 선별 모델 목록
2022JFM	CMCC, CWB, JMA, KMA, MetFR, NASA, UKMO	CMCC, CWB, JMA, KMA, MetFR, ECCC, NASA, UKMO
2022FMA	APCC, CMCC, CWB, JMA, NASA, UKMO	APCC, CMCC, CWB, JMA, KMA, NASA, UKMO
2022MAM	BoM, CMCC, JMA, MetFR, UKMO	BCC, BoM, CMCC, CWB, JMA, MetFR, UKMO
2022AMJ	APCC, CMCC	CMCC, CWB, JMA, KMA, PNU
2022MJJ	APCC, BCC, CMCC, JMA, MetFR	APCC, BCC, BoM, CMCC, JMA, KMA, NASA, NCEP, PNU, UKMO
2022JJA	CMCC, JMA, MetFR	APCC, BCC, CMCC, JMA, NCEP, PNU
2022JAS	JMA, MetFR, ECCC, PNU	APCC, JMA, ECCC, NCEP, PNU
2022ASO	BoM, JMA, PNU	APCC, BoM, CWB, JMA, ECCC, NASA, NCEP, PNU
2022SON	APCC, CWB, JMA, KMA, UKMO	APCC, BCC, BoM, CWB, JMA, KMA, ECCC, NCEP, UKMO
2022OND	BoM, CMCC, JMA, MetFR	BoM, CMCC, CWB, JMA, KMA, MetFR, UKMO
2022NDJ	BoM, JMA, KMA, MetFR, UKMO	BoM, CMCC, CWB, JMA, KMA, MetFR, UKMO
2022DJF	APCC, BoM, JMA, KMA, MetFR, PNU, UKMO	APCC, BoM, CMCC, CWB, JMA, MetFR, ECCC, UKMO

Table 3.12. Lists of selected models for customized probabilistic MME over East Asia for 2023 by two criteria.

예측 계절	ENSO와 동아시아 강수 관련성 선별 모델 목록	서태평양 강수와 동아시아 강수 관련성 선별 모델 목록
2023JFM	CMCC, JMA, KMA, MetFR, NASA, UKMO	CMCC, JMA, KMA, MetFR, ECCC, NASA, UKMO
2023FMA	CMCC, JMA, KMA, NASA, UKMO	APCC, CMCC, JMA, KMA, NASA, UKMO
2023MAM	CMCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO	BCC, CMCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO
2023AMJ	APCC, CMCC, CWB	APCC, CMCC, JMA, KMA, UKMO
2023MJJ	APCC, CMCC, JMA, MetFR	APCC, CMCC, JMA, KMA, PNU, UKMO
2023JJA	CMCC, JMA, MetFR	APCC, CMCC, JMA, MetFR, NCEP
2023JAS	JMA, MetFR, ECCC, PNU/RDA	APCC, JMA, ECCC, NCEP, PNU/RDA
2023ASO	BoM, JMA, PNU/RDA	APCC, BoM, JMA, ECCC, NASA, NCEP, PNU/RDA
2023SON	APCC, JMA, KMA, UKMO	APCC, BoM, JMA, KMA, ECCC, NCEP
2023OND	BoM, CMCC, JMA, MetFR, PNU/RDA, UKMO	BoM, CMCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO
2023NDJ	BoM, JMA, KMA, MetFR, UKMO	BoM, CMCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO
2023DJF	APCC, BoM, JMA, KMA, PNU/RDA	APCC, BoM, CMCC, ECCC, JMA, MetFR

Table 3.13. Lists of selected models for customized probabilistic MME over East Asia for 2024 by two criteria.

예측 계절	ENSO와 동아시아 강수 관련성 선별 모델 목록	서태평양 강수와 동아시아 강수 관련성 선별 모델 목록
2024JFM	CMCC, KMA, MetFR, NASA, UKMO	CMCC, JMA, KMA, MetFR, NASA, UKMO
2024FMA	CMCC, JMA, KMA, NASA, UKMO	APCC, CMCC, JMA, KMA, NASA, UKMO
2024MAM	CMCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO	CMCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO
2024AMJ	APCC, CMCC	CMCC, JMA, PNU/RDA
2024MJJ	APCC, CMCC, JMA, MetFR	APCC, CMCC, JMA, KMA, PNU/RDA, UKMO
2024JJA	CMCC, JMA, MetFR	APCC, CMCC, JMA, NCEP, PNU/RDA
2024JAS	JMA, MetFR	ECCC, JMA, NCEP, PNU/RDA
2024ASO	BoM, JMA, PNU/RDA	APCC, BoM, ECCC, JMA, NASA, NCEP, PNU/RDA
2024SON	APCC, ECCC, JMA, KMA, UKMO	APCC, BoM, ECCC, JMA, NCEP
2024OND	BoM, CMCC, JMA, MetFR, PNU/RDA, UKMO	BoM, CMCC, ECCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO
2024NDJ	BoM, JMA, KMA, MetFR, UKMO	BoM, CMCC, ECCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO
2024DJF	APCC, BoM, JMA, PNU/RDA	APCC, BoM, CMCC, ECCC, JMA, MetFR, UKMO

### 3.1.4. MME 예측정보 조기제공

#### 3.1.4.1. 필요성

APCC는 AFS 개선을 통한 예측 시스템 효율성 향상과 다양한 MME 기법들의 효용성 점검 후 2019년 11월부터 예측정보 제공 시기를 매월 25일에서 닷새 앞당긴 20일에 홈페이지와 이메일을 통해 전지구·태평양도서국·동아시아 지역에 대한 기후전망을 영문 및 국문으로 게시 및 배포를 시작한 바 있으나 타 기관과 비교하면 APCC의 20일은 여전히 늦은 편이었다<sup>7)</sup>. 또한 2020년에 수행한 APCC 예측정보 활용도 조사에 따르면 예측정보의 조기제공은 사용자 요구의 우선순위 중 하나였다. 이에 APCC MME 예측정보를 조기에 제공함으로써 이러한 상황을

7) CPC NMME(Climatic Prediction Center North American Multi-Model Ensemble)는 9일, C3S(Copernicus Climate Change Service)는 13일, IRI(International Research Institute for Climate and Society)는 16일경에 예측정보 발표

해결하고 사용자 요구를 충족하여 정보의 활용성을 높이고자 하였다.

### 3.1.4.2. 예측정보 조기제공을 위한 내·외부적 사전 작업

#### 3.1.4.2.1. 내부: 모델자료 수집 알림 및 전처리 시스템을 통한 자료처리 시간 단축

2021년에 개발된 모델자료 수집 여부 알림 기능을 통해 담당자의 수동적인 모니터링 작업 과정이 단축되었으며 이 기능과 연계된 개별모델 전처리 자동화 시스템을 통해 담당자의 전처리 작업 과정 또한 단축되었다(Figure 3.38). 이로써 자료 수집 및 전처리에 걸리는 시간을 단축하여 APCC의 예측정보를 조기에 제공하기 위한 사전 준비 시간을 확보할 수 있게 되었다.

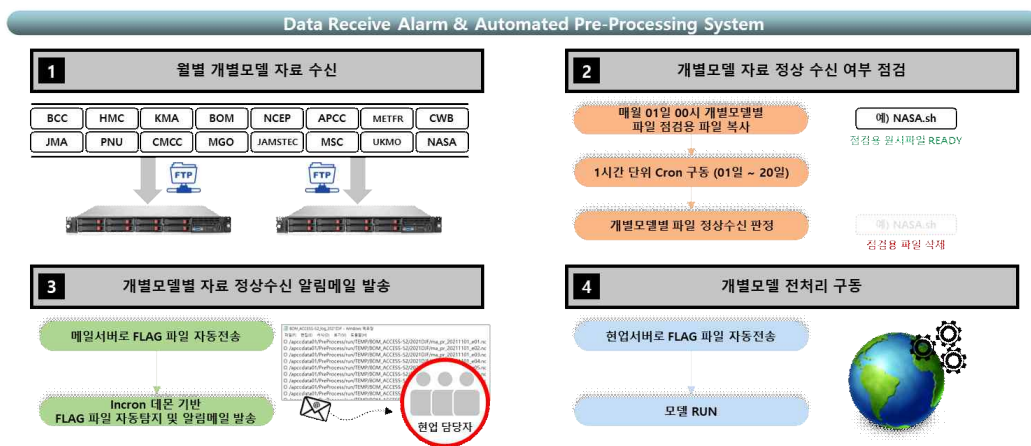


Figure 3.38. The structure of data receive alarm and automated pre-processing system process.

#### 3.1.4.2.2. 외부: 자료제공기관 협조 요청 및 개별모델 예측자료 조기 수집을 통한 자료처리 시간 확보

2021년에 개최된 모델자료 제공기관 회의(Model Providers' Meeting, MPM)에서 APCC의 예측정보 조기제공의 필요성을 역설하고 각 기관들의 예측자료 조기제공을 요청하였으며 (Figure 3.39), 기관들의 적극적인 협조를 통해 이탈리아 기상청 및 한국 기상청 자료를 기존보다 수일 앞서 수집할 수 있게 되었다.

members to provide original resolution model data to APCC. In regards to the issue of reference observation data in the new system with 1-degree resolution data, Dr. Kim shared that ERA5 for temperature and other atmospheric variables, and CPC or MERRA2 data for precipitation, would be used as reference observation data. With new system, APCC could provide finer forecast data which would be more beneficial to the users although a few issues still existed such as inconsistency issues. APCC plans to provide discrepancy information and accumulate forecast data and skills in order to overcome the issues and from next year of 2022, the pilot system would be operated.

Lastly, Dr. Kim introduced APCC's plan on **early release** of APCC MME forecast from 20th of each month to the 15th. Currently, APCC has been generating MME prediction data twice at the 15th for Korea seasonal forecast and at 20th for the global official MME outlook. The **early release** of APCC MME forecast would be more useful for climate forecasters and APCC would like to begin to release the data on the 15th in 2022. Dr. Kim highlighted the importance of member participation and cooperation on the issue.

Figure 3.39. The report on the 4<sup>th</sup> APCC MME Model Providers' Meeting.

### 3.1.4.3. 예측정보 조기제공 개시

2022년 4월부터 매월 15일에 APCC MME 예측정보를 발표하고 15일이 휴일이면 다가오는 평일에 홈페이지와 이메일을 통해 발표하기 시작했다. 또한 홈페이지 및 이메일을 통해 구독자에게 홍보하였으며 홈페이지 내의 기후전망 발표일 안내문도 변경하였다(Figure 3.40).

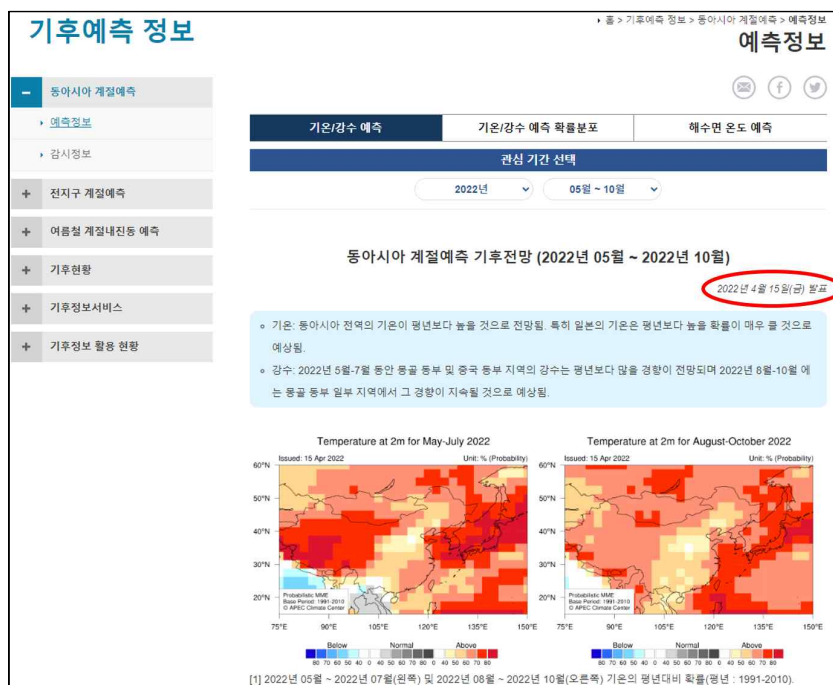


Figure 3.40. APCC MME seasonal forecast page updated on 15<sup>th</sup> April 2022.

### 3.1.5. 기후전망 개선

#### 3.1.5.1. 필요성

APCC는 2013년부터 홈페이지 및 이메일을 통해 향후 6개월에 대한 전지구 기온 및 강수 전망을 발표해 오고 있다. 내용은 크게 향후 6개월의 ENSO 예측 및 기온/강수 전망 요약, 과거 1개월 혹은 2년의 기후 감시 정보, 자세한 ENSO 예측 및 기온/강수 전망 설명으로 구성되어 있다. 이러한 기후전망의 디자인은 2020년에 APCC 홈페이지 중 기후예측정보 페이지 재구성 결과 함께 개선된 바 있으나 2023년 기준, 약 9년간 유지되어 온 줄글 형식뿐만 아니라 색상 조합 및 그림 배치 등을 고려해 보았을 때 APCC의 기후전망은 디자인 측면에서 가독성을 개선할 만한 여지가 있었다.

#### 3.1.5.2. 타 기관 기후전망 조사 및 APCC 기후전망 구독자 만족도 조사

Table 3.14와 같이 IRI는 APCC와 유사하게 전 지구에 대한 기후전망을 생산하고 있으며 ENSO 모니터링, ENSO 및 기온/강수에 대한 전망을 확률론적으로 설명한다. 디자인 역시 APCC와 유사한데 페이지 상단에 전 지구 확률예측 그림 및 요약을 보여주고 있으나 이메일을 통한 전망문의 파일 제공은 하고 있지 않다. TCC는 콘텐츠 측면에서 가장 다양하다. 지역은 동아시아에 한정하고 있으나 요약, ENSO 및 기온/강수의 모니터링 및 예측뿐만 아니라 속도 퍼텐셜 등 대규모 순환 분석에 대한 정보도 제공하고 있다. 카리브해역의 섬나라를 대상으로 하는 CariCOF 전망문 또한 APCC와 마찬가지로 요약뿐만 아니라 ENSO와 기온/강수의 모니터링과 예측을 수행하고 있다. TCC와 CariCOF의 기후전망문은 PDF 형식의 파일로 매월 제공하고 있다.

Table 3.14. Content of climate outlook of APCC, IRI, TCC, and CariCOF.

Organization	Region	Summary	Monitoring			Forecast			Note
			ENSO	T <sup>a</sup>	P <sup>b</sup>	ENSO	T <sup>a</sup>	P <sup>b</sup>	
APCC	Globe	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
IRI	Globe		✓			✓	✓	✓	
TCC	East Asia	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Additional analysis
CariCOF	Caribbean	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

a Temperature

b Precipitation

타 기관과의 비교뿐만 아니라 APCC의 전지구 기후전망 구독자의 만족도 및 새로운 디자인에 대한 선호도를 조사하였다. 설문 문항은 소속, 업무 분야, 거주 국가를 확인하는 일반적인 문항과 APCC 기후전망 콘텐츠 중 본인의 업무에 활용한 경험이 있는 콘텐츠가 무엇인지, 어떤

업무에 주로 활용하는지에 대한 문항, APCC 기후전망의 가독성(내용 구성이 적절하며 읽기 쉬움), 이해 난이도(읽기 쉬우며 복잡하지 않고 명확함), 내용의 다양성(기후 모니터링부터 예측까지 아우르는 정도), 활용도(본인 업무에의 유용성)에 대한 척도형 문항, 새로운 디자인에 대한 선호도 및 의견 문항, 기타 의견 문항으로 구성하였다(Figure 3.30). 2023년 10월에서 11월, 총 한 달여 동안 설문 웹페이지 공유 및 설문지 배포를 통해 조사하여 총 11인의 결과를 취합하였다.

APCC 기후전망 내용의 특성을 5점 척도로 조사한 결과에 따르면 이해도 4.7점, 가독성 4.5점, 활용성 4.3점, 콘텐츠 다양성 4.2점 순으로 사용자 만족도가 높았다(Figure 3.41). 콘텐츠 다양성에 대한 상대적으로 낮은 척도는 추가 답변 중 ‘3개월 평균이 아닌 1개월 기후 전망’, ‘열대 사이클론 전망’, ‘아열대 제트 및 시베리아 고기압 등 기후 예측 영향 인자에 대한 정보’ 등 제공 정보 확대에 대한 의견과 일치한다. 기후전망 디자인에 대한 선호도 조사 결과에 따르면 응답자 모두 새로운 디자인에 대해 긍정적인 의견을 밝혔다. 본 조사를 통해 APCC 기후전망의 이해 난이도는 쉬운 편이나 콘텐츠 다양성에 대한 개선의 여지가 있음을 알 수 있었다. 기후전망의 새로운 디자인에 대해서는 모두 긍정적인 응답을 보였다.

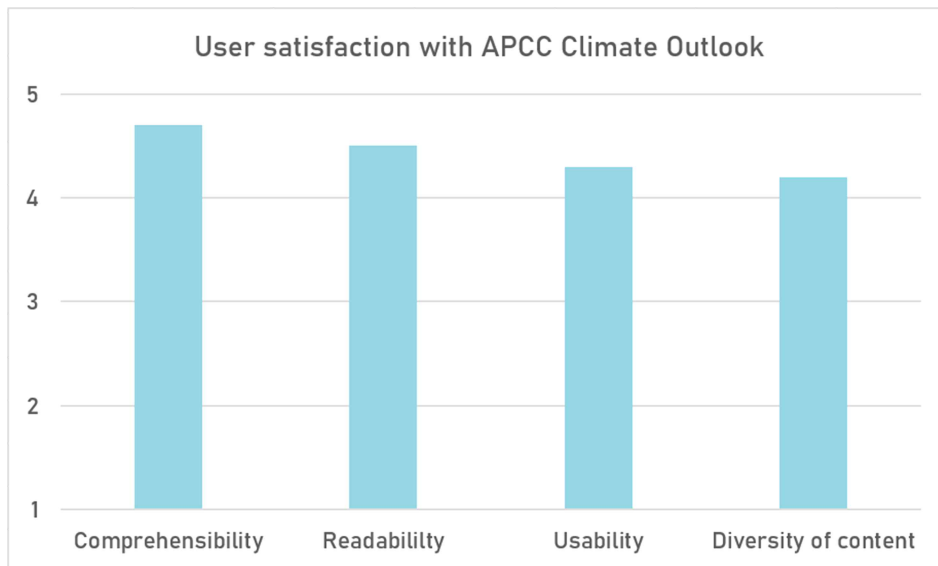


Figure 3.41. Results of 5-scale questionnaire on APCC Climate Outlook subscribers' satisfaction.

#### 3.1.5.4. 개선된 기후전망 배포

타 기관 기후전망 디자인 및 구독자 만족도 조사 결과를 종합하여 2023년 11월부터 새로운 디자인의 기후전망 배포를 시작하였다(Figure 3.42). 기후전망 콘텐츠 순서는 기존과 같다. 하지만 기존에는 기후전망 앞부분에 글을 배치하고 뒷부분에 그림을 배치한 ‘선 설명 후 그림’ 배치로 인해 글과 그림을 동시에 확인하기 불편했던 점을 해소하고자 글과 그림을 한 페이지에 병치함으로써 가독성을 높였다.

기온 및 강수 확률예측 서술 방식인 ‘기온/강수가 평년보다 높을(낮을)/많을(적을) 확률이 매우(다소) 클 것으로 전망됨’이라는 표현에 대한 안내 도식을 추가 삽입하여 이해도를 높였으며 단순한 줄글 형식에서 벗어나 글머리 기호 및 확률 카테고리와 강도를 색상으로 차별화하여 표현함으로써 가독성을 한 번 더 높였다.

또한 2024년부터는 월별 예측정보를 추가 제공하기 시작하였다. 기존에는 예측 타겟 6개월 중 선행 시간 1-3개월 평균 및 4-6개월 평균에 대한 이미지와 설명만 제공했으나 콘텐츠 다양성에 대한 사용자 요구를 반영하여 월별 예측정보 이미지를 부록으로 제공하고 있다(Figure 3.43).

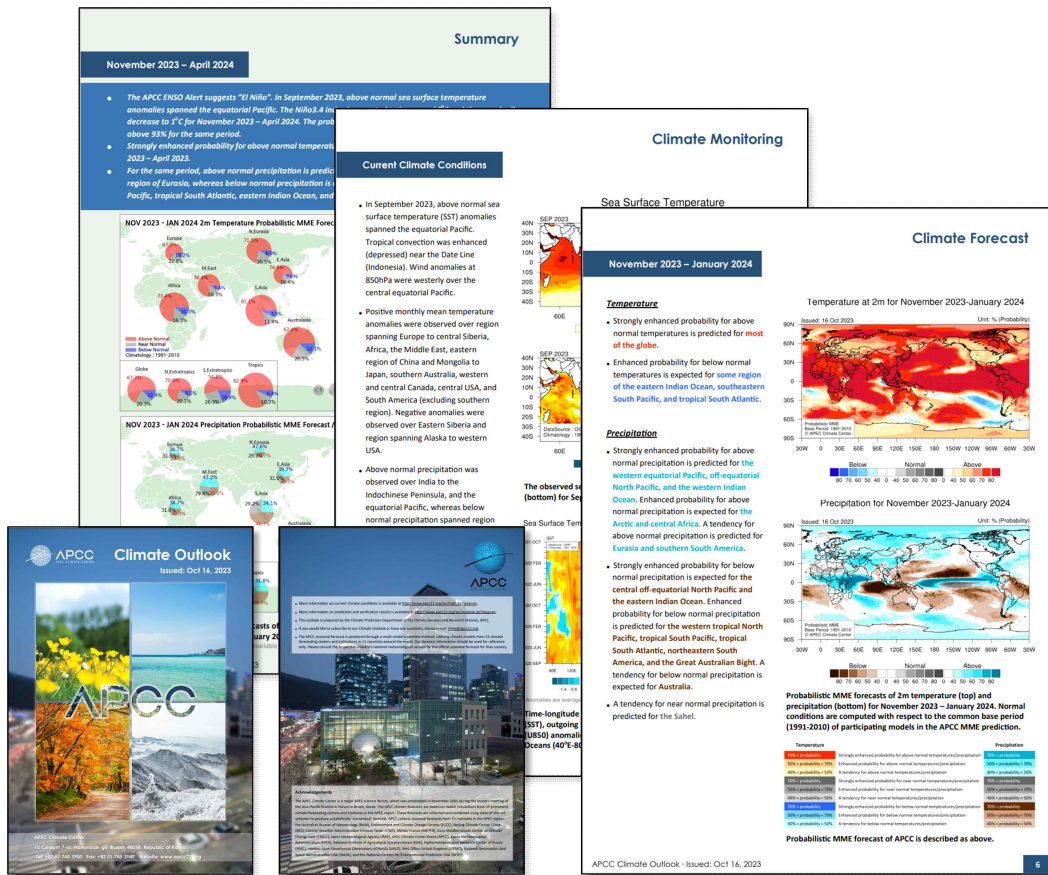


Figure 3.42. New version of APCC Climate Outlook.

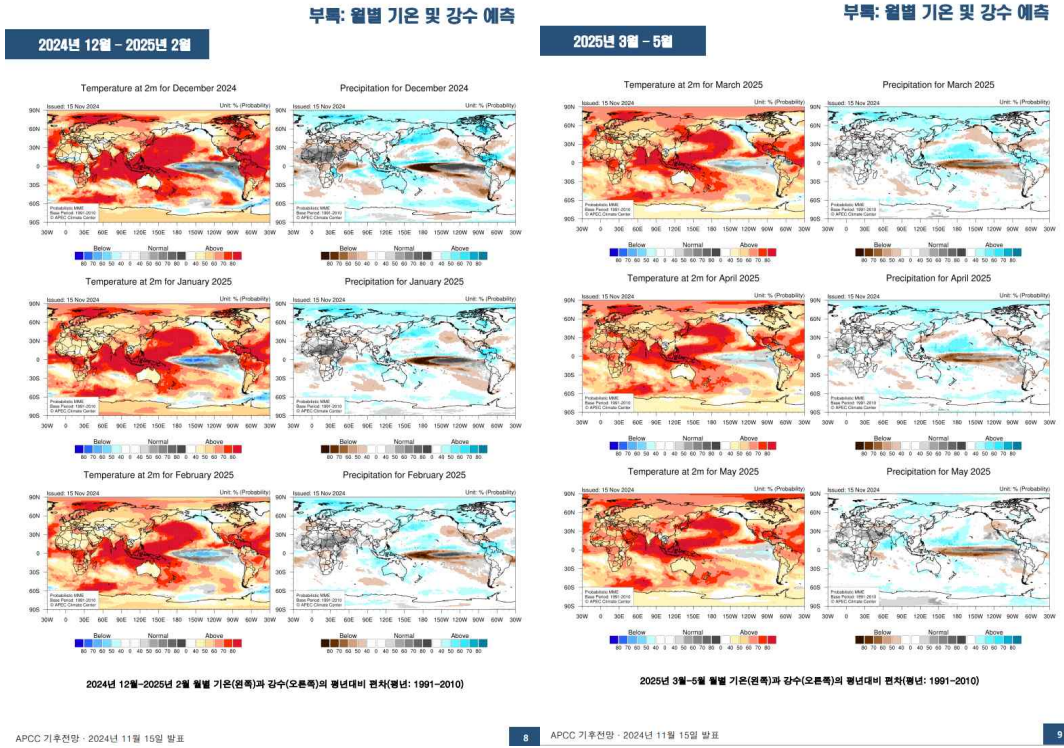


Figure 3.43. Monthly forecast information in APCC Climate Outlook.

### 3.1.6 ENSO 경보시스템 개선

APCC ENSO 경보시스템 개선의 주요 내용은 관측의 NINO3.4와 ONI 지수의 감시 기간을 축소 조정하고 확률 예보의 예측 조건을 완화하여 객관적인 정보만을 이용하여 기존보다 ENSO 상황의 조기 경보가 가능해지도록 하였고 이를 통해 사용자가 직감할 수 있는 경보 정보를 생산하고자 하였다.

Table 3.15는 APCC ENSO 경보시스템의 7개 카테고리별 조건을 나타낸 것이다. 카테고리별 조건이 변경됨에 따라 일부 카테고리의 국문 명칭 및 정의 또한 변경하였다. 발달은 주의(Watch)로, 주의/경보(El Niño/La Niña)는 엘니뇨/라니냐로 변경하였다. 예를 들어 기존 엘니뇨 주의/경보 단계에서는 관측의 NINO3.4와 ONI 지속 조건이 각각 5개월, 3개월이었지만 이를 2개월, 1개월로 축소 조정하고 예측의 ONI 지속 조건을 4개월에서 3개월로 기간을 축소 조정하고 경계 및 주의 조건을 위한 예측 확률 조건을 각각 70%, 55%에서 60%, 50%로 완화하였다. 이로 인해 기존보다 ENSO 진행 단계를 좀 더 관측과 유사한 상태로 사용자가 직관적으로 범주화해서 알 수 있게 되었다.

Table 3.15. Definition of APCC ENSO Alert categories.

	기존	변경
El Niño Watch (발달 → 주의)	(관측) 최근 1개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 0.5℃ 이상, 최근 1개월간 ONI가 중립 (예측) 향후 6개월 중 1개월이라도 NINO3.4 구역의 SST가 0.5℃ 이상이고, 연속 3개월간 55% 이상의 확률로 엘니뇨 상태 전망	(관측) 최근 1개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 0.5℃ 이상, 최근 1개월간 ONI가 중립 (예측) 향후 4개월 중 2개월이라도 NINO3.4 구역의 SST가 0.5℃ 이상이거나, 연속 3개월간 50% 이상의 확률로 엘니뇨 상태 전망
	<b>Definition:</b> 향후 6개월 이내에 엘니뇨가 발생할 수 있고 그 확률이 55% 이상	<b>Definition:</b> 최근 1개월에 SST가 0.5℃ 이상 상승, 향후 3-4개월 이내에 엘니뇨 발생 가능성이 50% 이상
El Niño Alert (경계)	(관측) 최근 3개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 0.5℃ 이상, 최근 1개월간 ONI가 0.5℃ 이상 (예측) 향후 2개월간 ONI가 0.5℃ 이상이고, 연속 3개월간 70% 이상의 확률로 엘니뇨 상태 전망	(관측) 최근 2개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 0.5℃ 이상, 최근 1개월간 ONI가 0.5℃ 이상 (예측) 향후 2개월간 ONI가 0.5℃ 이상이거나, 연속 3개월간 60% 이상의 확률로 엘니뇨 상태 전망
	<b>Definition:</b> 향후 2개월간 ONI가 0.5℃ 이상이고, 그 확률이 70% 이상	<b>Definition:</b> 최근 2-3개월에 SST가 0.5℃ 이상 상승, 향후 3-4개월 이내에 엘니뇨 발생 가능성이 60% 이상
El Niño (주의/경보 → 엘니뇨)	(관측) 최근 5개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 0.5℃ 이상, 최근 3개월간 ONI가 0.5℃ 이상 (예측) 향후 연속 4개월간 ONI가 0.5℃ 이상	(관측) 최근 2개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 0.5℃ 이상, 최근 1개월간 ONI가 0.5℃ 이상 (예측) 향후 연속 3개월간 ONI가 0.5℃ 이상 전망
	<b>Definition:</b> 현재 엘니뇨가 진행중이고, ONI가 예측기간 동안 지속적으로 0.5℃ 이상	<b>Definition:</b> 최근 2-3개월에 SST가 0.5℃ 이상 상승, 향후 3개월 동안 엘니뇨 지속 전망
Inactive 중립	(관측) NINO3.4 구역의 SST가 평년과 비슷, ONI가 중립** (예측) 향후 엘니뇨 및 라니냐 발달 상황 나타나지 않음	향후 6개월 이내에 엘니뇨/라니냐 발달에 대해 설정된 경보 기준을 만족하지 않을 것으로 전망
	<b>Definition:</b> 향후 6개월 이내에 엘니뇨 혹은 라니냐의 발달 가능성이 없음	<b>Definition:</b> 향후 6개월 이내에 엘니뇨 혹은 라니냐의 발달 가능성이 없을 것으로 전망
La Niña Watch (발달 → 주의)	(관측) 최근 1개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 -0.5℃ 이하, 최근 1개월간 ONI가 중립 (예측) 향후 6개월 중 1개월이라도 NINO3.4 구역의 SST가 -0.5℃ 이하이고, 연속 3개월간 55% 이상의 확률로 라니냐*** 상태 전망	(관측) 최근 1개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 -0.5℃ 이하, 최근 1개월간 ONI가 중립 (예측) 향후 4개월 중 2개월이라도 NINO3.4 구역의 SST가 -0.5℃ 이하이거나, 연속 3개월간 50% 이상의 확률로 라니냐 상태 전망
	<b>Definition:</b> 향후 6개월 이내에 라니냐가	<b>Definition:</b> 최근 1개월에 SST가 0.5℃ 이상

	발생할 수 있고 그 확률이 55% 이상	하강, 향후 3-4개월 이내에 라니냐 발생 가능성이 50% 이상
La Niña Alert (경계)	(관측) 최근 3개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하, 최근 1개월간 ONI가 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하 (예측) 향후 2개월간 ONI가 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하이고, 연속 3개월간 70% 이상의 확률로 라니냐 상태 전망	(관측) 최근 2개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하, 최근 1개월간 ONI가 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하 (예측) 향후 2개월간 ONI가 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하이거나, 연속 3개월간 60% 이상의 확률로 라니냐 상태 전망
	Definition: 향후 2개월간 ONI가 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하이고, 그 확률이 70% 이상	Definition: 최근 2-3개월에 SST가 $0.5^{\circ}\text{C}$ 이상 하강, 향후 3-4개월 이내에 라니냐 발생 가능성이 60% 이상
La Niña (주의/경보 → 라니냐)	(관측) 최근 5개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하, 최근 3개월간 ONI가 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하 (예측) 향후 연속 4개월간 ONI가 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하	(관측) 최근 2개월간 NINO3.4 구역의 SST가 평년보다 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하, 최근 1개월간 ONI가 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하 (예측) 향후 연속 3개월간 ONI가 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하 전망
	Definition: 현재 라니냐가 진행중이고, ONI가 예측기간 동안 지속적으로 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 이하	Definition: 최근 2-3개월에 SST가 $0.5^{\circ}\text{C}$ 이상 하강, 향후 3개월 동안 라니냐 지속 전망

\* 엘니뇨: 3개월 평균 Nino3.4 지수 (ONI)  $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$

\*\* 중립: 3개월 평균 Nino3.4 지수,  $-0.5^{\circ}\text{C} < \text{ONI} < 0.5^{\circ}\text{C}$

\*\*\* 라니냐: 3개월 평균 Nino3.4 지수 (ONI)  $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$

2022년 4월부터 변경된 기준을 적용한 ENSO 경보를 APCC 홈페이지와 기후전망을 통해 매일 제공하고 태평양 지역기후 센터 ENSO Tracker에 매일 제공하고 있다. 그리고 ENSO 경보를 발표하는 월 (issued month)의 관측 해수면 온도를 최대한 반영하기 위해 매일 2회 (15일 및 익월 1일) 발표하고 있다.

## 3.2. BSISO 계절내예측시스템 운영 및 개선

### 3.2.1. BSISO 계절내예측시스템 운영

여름철 계절내 진동(BSISO, Boreal Summer Intraseasonal Oscillation)은 15~60일 주기로 적도 인도양에서 발생하여 점진적으로 북동진하며 아시아지역의 여름 몬순과 대기 순환, 날씨에 영향을 주는 대규모 대류현상이다. APCC는 아시아지역의 BSISO 지수의 감시 및 예측정보를 매년 5~10월의 기간에 홈페이지를 통해 제공하고 있다. 예측운영과에서는 매년 5월부터 10월까지 매일 BSISO 현업시스템을 운영하고 실시간 현업 모니터링을 통해 안정적인 서비스를 제공한다. 올해는 4월 17일부터 4월 28일까지 약 2주간 준 현업기간을 거쳐 현업시스템 구동의 안정성을 확보하고 4월 28일에 현업을 시작하였다.

BSISO 현업서비스의 주요 내용은 감시, 예측, 검증 정보가 있으며 BSISO 모드별, 기간별 평균 특징을 살펴볼 수 있는 합성장을 제공하고 있다(Figure 3.44~3.47). 감시정보는 실시간 BSISO의 입력자료가 되는 가장 최신의 재분석자료의 날씨를 기준으로 현재 날씨보다 3일 전의 감시 자료가 생산되며, 생산되는 감시 콘텐츠로는 BSISO 지수를 포함하여 BSISO 위상도, 시계열, 재구성장, BSISO 영향 편차장, 상향장파복사 및 850hPa 수평바람 편차장이 있다. 생산된 모든 감시 정보는 홈페이지를 통해 실시간 제공되고 있다. BSISO 예측정보는 BSISO 감시날짜를 기반으로 생산되며 예측에는 총 4개 기관(NCEP, BOM, ECMWF, CWB)의 5개 개별 모델 자료가 이용된다. 생산되는 예측 콘텐츠로는 BSISO 예측 지수를 포함하여 BSISO 위상도, 상향장파복사 편차장, BSISO 영향 편차장, 극한강수 발생확률, 검증이 있다. 생산된 모든 예측 정보는 홈페이지를 통해 실시간 제공되고 있다. BSISO 합성장은 과거 30년 기간(1991-2020년, 단 강수의 경우 1997-2020년 자료를 사용) 동안 BSISO 강도가 강했을 때에 대해 2개 모드 및 8개 위상과 관련된 주요 변수를 합성한 것이다. BSISO 합성장은 같은 기후 기간 사용중에는 동일하며 BSISO에 대한 일반적인 변수들의 특징을 보여준다. BSISO 합성장은 BSISO 정의 페이지에 표출되고 있다. 또한 과거 BSISO 감시 및 예측 지수는 CLIK (CLimate Information toolKit; <http://cliks.apcc21.org>)을 통해 홈페이지에 제공되고 있고 실시간 BSISO 지수는 홈페이지 BSISO 메뉴 내 실시간 제공되고 있다.

BSISO

아래 그림은 BSISO 관련 변동성을 살펴보기 위해 과거 30년 기간(1991~2020년) 동안 강한 BSISO가 발생한 경우에 대해 2개의 모드 및 8개의 위상과 관련된 주요 변수의 합성장을 나타낸 것이다. (단, 강수의 경우 1997~2020년 자료를 사용하였음)

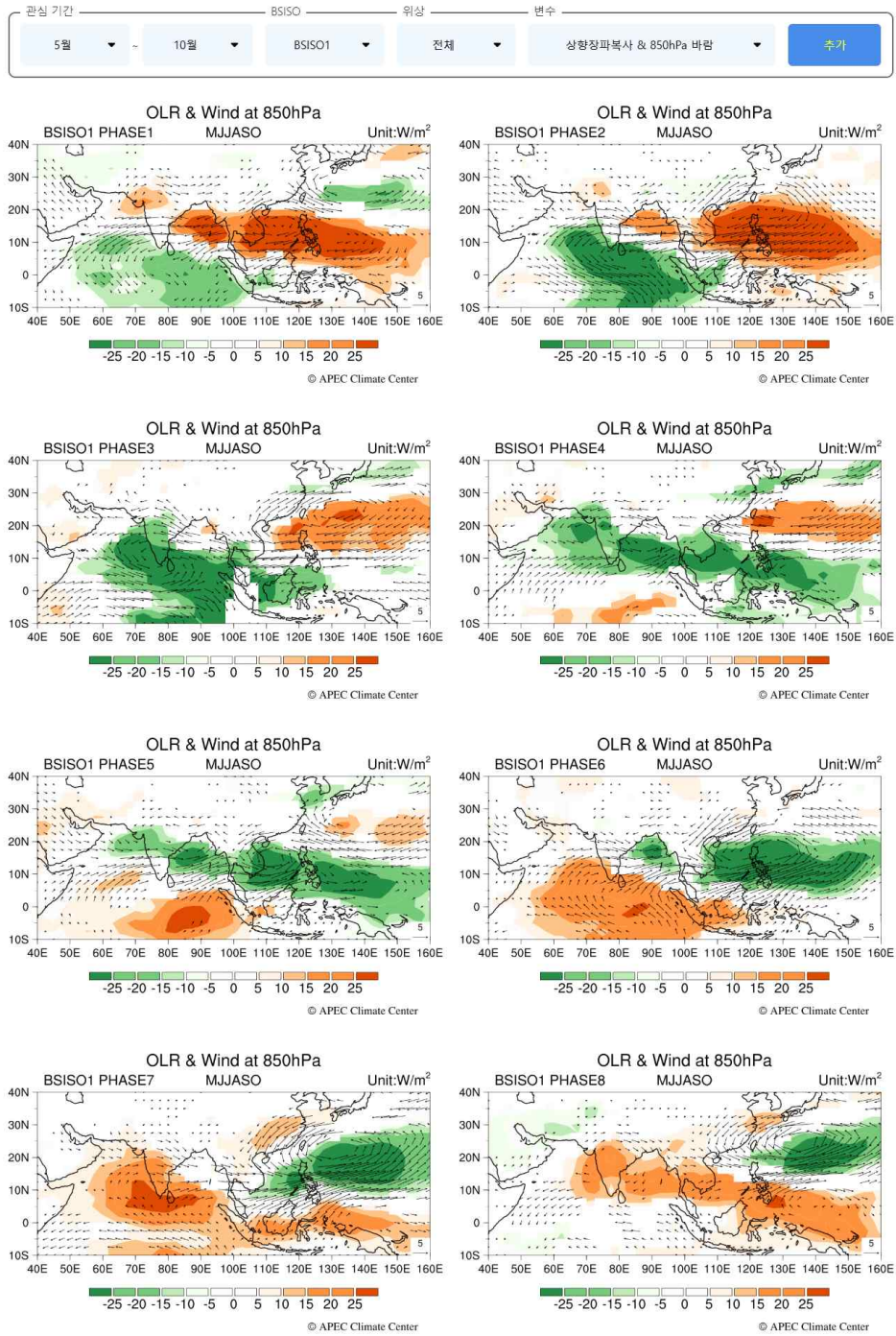


Figure 3.44. Example of BSISO composite map displayed on the website.

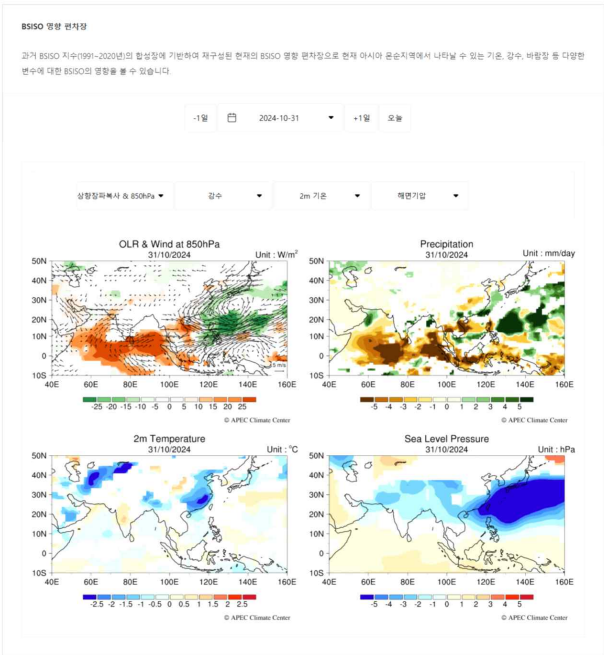
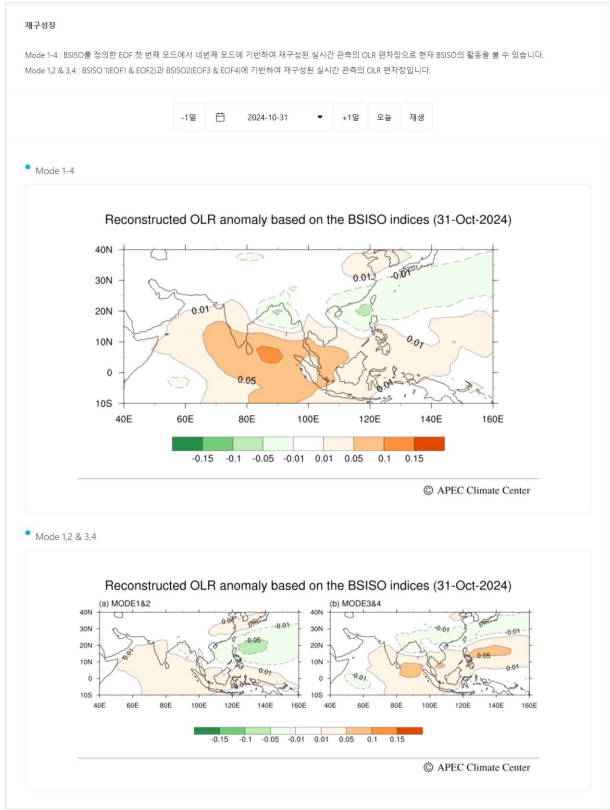
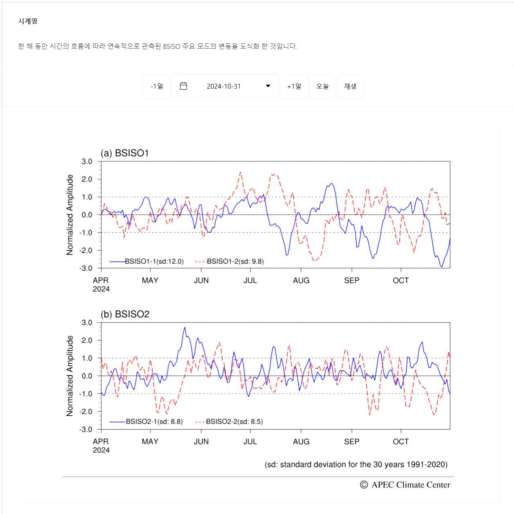
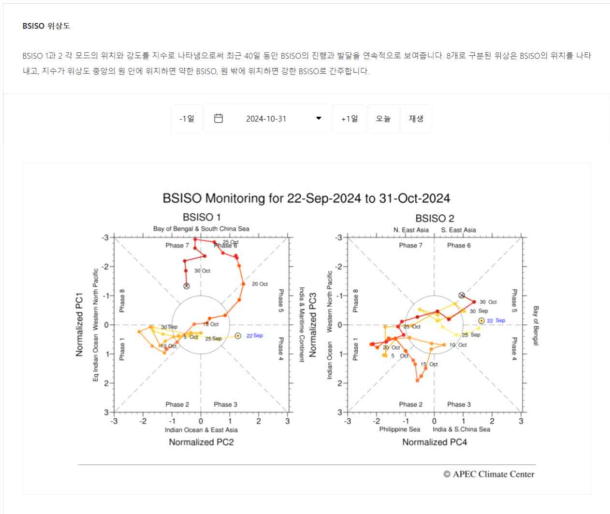


Figure 3.45. Contents of BSISO monitoring.

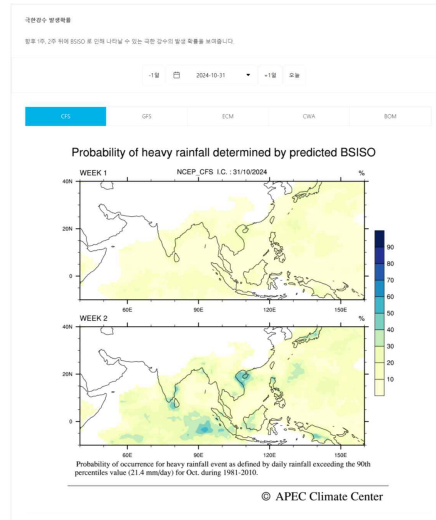
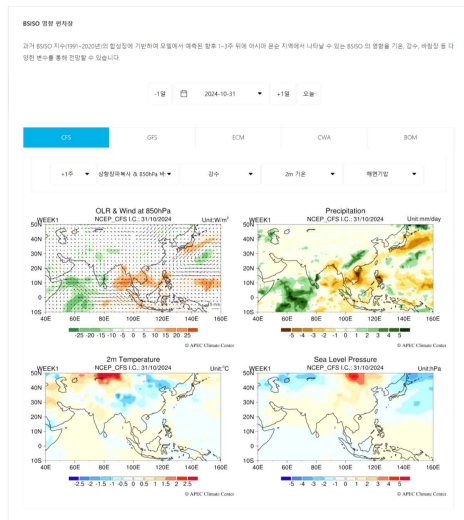
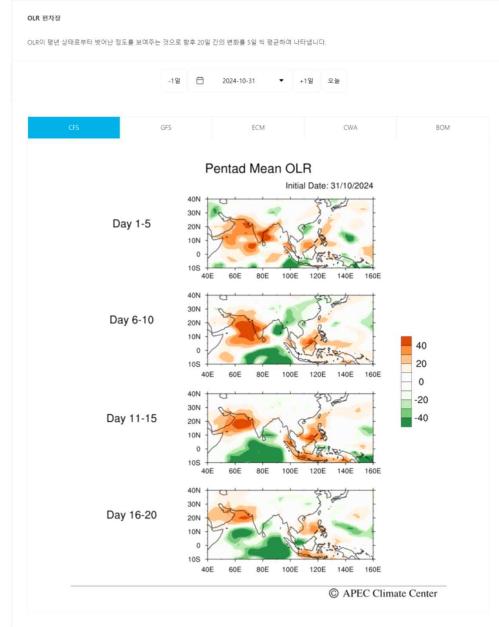
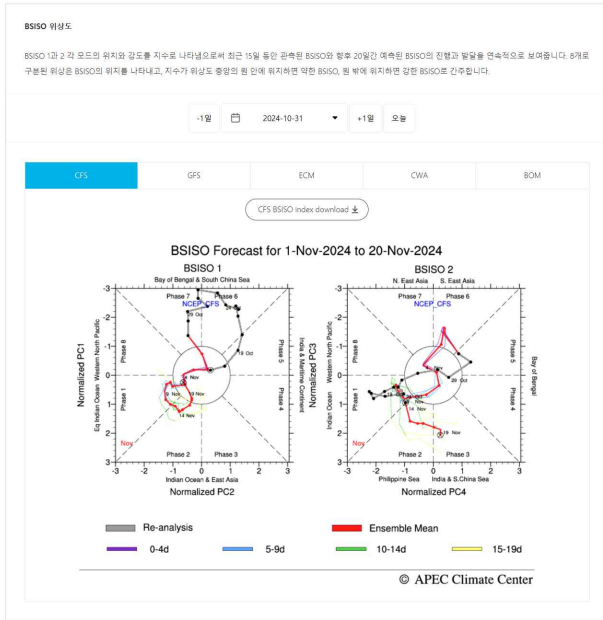


Figure 3.46. Contents of BSISO forecast.

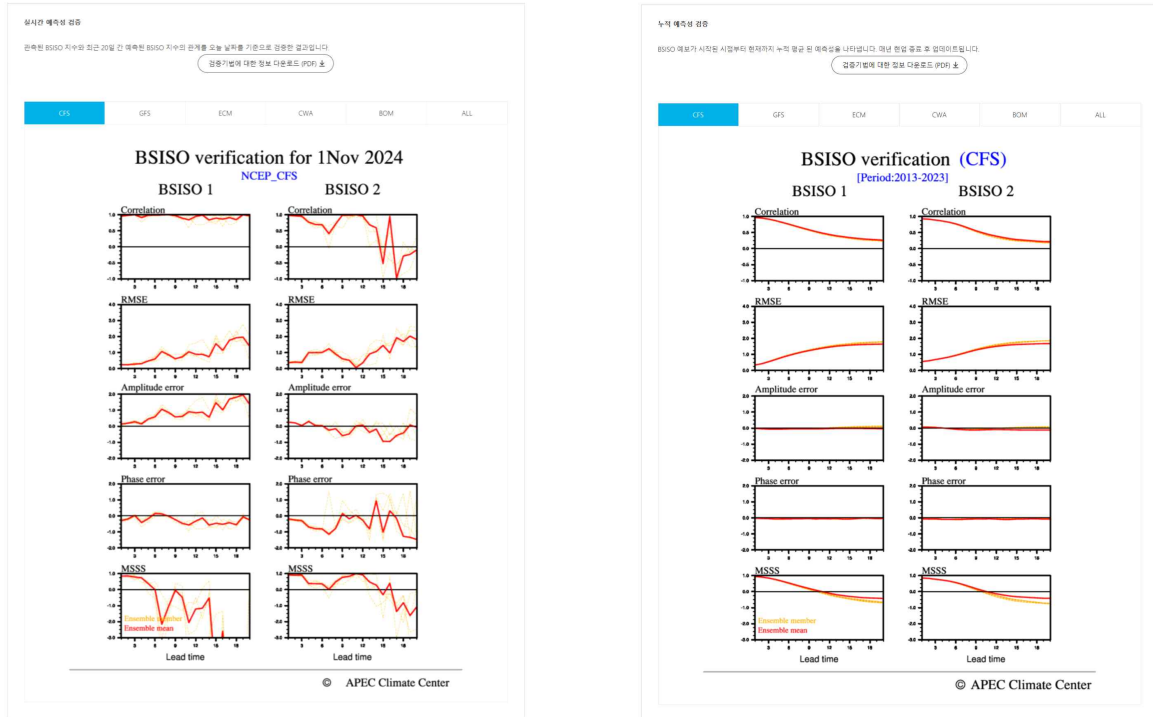


Figure 3.47. Contents of BSISO verification.

BSISO 정보는 국내에서는 기상청 기후예측과에 BSISO 지수, 위상도, 영향장을 매주 제공하여 1개월 예보에 활용하고 기상청 기후예측-분석통합시스템에 실시간 조기 제공되고 있다. 국외에서는 인도 기상연구소에서 예측정보를 실시간 활용하여 홈페이지에 제공하고 있고 베트남 기상청에서도 BSISO 영향장을 활용하고 있다. 2022년에는 ECMWF 뉴스레터 가을호에 APCC BSISO 소개글이 실렸다. 그리고 2023 WMO summit에서 국/내외 연구진에 의해 APCC BSISO 지수를 활용한 연구 2건의 발표가 진행되었다.

### 3.2.2. BSISO 계절내예측시스템 개선

#### 3.2.2.1. BSISO 그래픽 코드 일원화 및 이미지 개선

2022년에는 BSISO 현업시스템 내 그래픽 표출부의 코드 언어를 모두 NCL로 변경 작성하여 홈페이지에 표출되는 이미지의 통일성을 높이고자 하였다. 동일한 콘텐츠는 지도의 모양이나 위/경도축, 폰트, 색상 등 그래픽 속성을 통일시켰다.

#### 3.2.2.2. BSISO 현업시스템 신 평년기간(1991~2020년) 적용

기후 평년값은 세계기상기구(WMO)의 기준에 따라 10년마다 갱신하는 것을 권고한다. 이에 따라 2022년부터 APCC BSISO 현업시스템에서는 아노말리 계산을 위해 이용되는 재분석자료의 기후값을 1981~2010년에서 신 평년 기간인 1991~2020년으로 조정하여 기후값을 재생산하여 최신의 기후 패턴과 경향성을 반영하여 BSISO를 생산하였다. 개선 과정에서 기존 코드 형식은 최대한 유지한 채 개선에 필요한 부분만 일부 수정하였고, 현업시스템 내 부재 코드(MV-EOF 생산, 일별 영향장 입력자료)는 직접 개발하고 자료를 재생산하였다.

### 3.2.2.3. BSISO 영향장 영역 확장

2023년에는 한반도에 미치는 BSISO의 영향을 보다 명확하게 나타내기 위해 영향장 계산 영역을 기존 10S~40N, 40E~160E에서 10S~50N, 40E~160E로 위도를 북쪽으로 10도 확장하였다. 이를 통해 감시 및 예측 BSISO 지수가 한반도에 미치는 영향을 보다 직관적으로 확인할 수 있게 되었다. 개선된 이미지는 2023년 5월부터 홈페이지 공식 제공되고 있다.

### 3.2.2.4. BSISO 영향장 예측기간 확장

영향장 확장과 더불어 기상청과 APCC(기후분석과)간 1개월 월간 예보토의에서 BSISO의 한반도 예측 활용성을 높이기 위해 예측기간을 기존 3주에서 4주 이상으로 확대하였다. 활용할 수 있는 최대한의 예측 기간을 활용하여 BSISO 예측지수를 생산하고 있고 홈페이지에는 제공 모델 예측 기간이 짧은 GFS를 제외한 모든 참여 모델에 대해 공통적으로 4주까지 예측 영향장을 제공하고 있다.

### 3.2.2.5. BSISO 영향장 예측지수 조기 제공

기상청-APCC(기후분석과) 1개월 월간 예보토의 일정을 위해 BSISO 예측지수를 조기 생산할 수 있게끔 2023년에 현업 시스템을 개선하였다. 기존의 예측 지수는 감시 지수 생산 날짜를 기준으로 예측이 되기 때문에 3일의 지연이 있다. 하지만 ECMWF 예측 지수의 경우 매주 월요일에 예측자료가 수집되면 화요일에 조기 생산이 되게끔 하였다. 그래서 이는 매주 수요일에 월간 예보토의에서 활용되고 있다. 또한 2024년부터 ECMWF 예측 위상도의 경우 매일 기상청 기후예측-분석 통합시스템을 통하여 제공되고 있다.

### 3.2.2.6. BSISO OLR 입력자료 변경

BSISO 예측시스템의 입력 자료이자 NOAA에서 제공하는 non-interpolated OLR 실시간 일별 자료가 2023년 9월 17일을 마지막으로 제공 중단됨에 따라 NOAA/CPC blended OLR 자료를 활용한 BSISO 현업 체계 개선을 수행하였다. 먼저 NOAA/CPC blended OLR 실시간 일별 자료 수집 체계를 구축하였다. 그리고 변경된 OLR 자료 전처리체계를 마련하여 이를 입력장으로 BSISO 현업 콘텐츠를 2023년 10월 3일 이후부터 현재까지 생산 및 서비스하고 있다.

### 3.2.2.7. BSISO 그래픽 코드 개선

해마다 BSISO 예측 참여 모델이 개선 혹은 변경됨에 따라 모델의 앙상블 또한 증가하는 경우가 있다. 이럴 경우 그래픽 코드 계산 시간이 기하급수적으로 증가하여 현업 운영이 아주 오래 소요되는 문제점이 발생하였다. 이로 인해 자료 미제공 및 오류 발생에 따른 시스템 재가동이 필요할 때, 9시간 이상 소요되는 그래픽 코드로 인해 애로 사항이 있었다. 예를 들어 ECMWF 모델의 앙상블 개수가 100개 이상으로 늘어나면서 예측 위상도 콘텐츠의 그래픽 작업 수행 시간이 하루 9시간까지 소요되는 것을 확인하였다. 앙상블이 증가할수록 그래픽 코드 내 반복 연산이 계산 메모리를 증가시키고 이로 인해 작업 속도가 현저히 감소하는 것이 이유이다. 따라서 프로그램 로직 및 배열 등을 Figure 3.48과 같이 수정하였다. NCL의 plot의 배열을 제거하였고 개선된 예측 그래픽 코드로 동일 작업을 수행하면 앙상블 102개의 예측 모델에 대한 위상도 그래픽 코드 계산 시간은 약 9시간에서 30초로 감소되었다(Figure 3.49). 이로 인해 현업 수행의 효율성이 높아지고 오류 발생 시 코드 재수행 등의 대응이 실시간으로 가능하게 되었다. 그리고 실시간으로 조기 생산되는 해당 모델의 위상도 이미지는 기상청 기후예측-분석 통합 시스템에 매일 제공되고 있다.

```

plot = new(2,graphic)
do n=0,1
  if(n.eq.0) then
    pltTitle= "BSISO 1"
    opt@tiMainString = pltTitle
    plot(n) = mjo_phase_background12(wks, opt) ;
  generic phase space background
  else
    pltTitle= "BSISO 2"
    opt@tiMainString = pltTitle
    plot(n) = mjo_phase_background34(wks, opt) ;
  generic phase space background
  end if
end do

(중략)
do nt=1,ntim-1
(중략)
plot@$unique_string("dum")$ =
gsn_add_polyline(wks, plot(0),
(/xBegin,pc2(ee,nt)/), (/yBegin,pc1(ee,nt)/), pLine)

(중략)

```

```

plot = new(1,graphic)
plot2 = new(1,graphic)
pltTitle= "BSISO 1"
opt@tiMainString = pltTitle
plot = mjo_phase_background12(wks, opt) ;
generic phase space background
pltTitle= "BSISO 2"
opt@tiMainString = pltTitle
plot2 = mjo_phase_background34(wks, opt) ;
generic phase space background

(중략)
do nt=1,ntim-1
(중략)
plot@$unique_string("dum")$ = gsn_add_polyline(wks,
plot, (/xBegin,pc2(ee,nt)/), (/yBegin,pc1(ee,nt)/),
pLine)

(중략)

```

Figure 3.48. BSISO phase diagram graphic code before(left) and after(right) improvement.

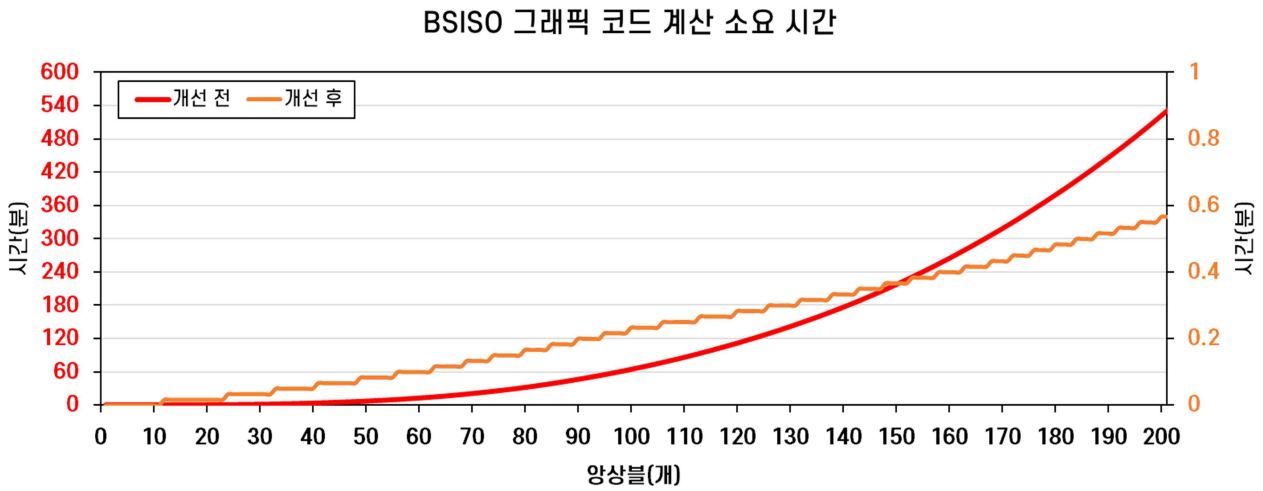


Figure 3.49. Run-time for BSISO graphic code of phase diagram.

### 3.3. APCC 자체예측모델(SCoPS) 운영 및 예측정보 제공

#### 3.3.1. SCoPS 계절예측정보 제공(매월, 3/6개월) 및 현안 대응

SCoPS는 APCC 자체 계절예측모델로 2017년 11월부터 매달 APCC MME의 참여모델로 활용되고 있다. SCoPS의 초기조건은 NCEP CFS (National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System) 재분석자료와 Argo (Array for Real-time Geostrophic Oceanography) 자료를 이용하고 대기 초기조건은 3차원 넷징(nudging), 해양 초기조건은 EAKF (Ensemble Adjustment Kalman Filter) 기법을 이용하여 3차원 넷징으로 생산된다. 매달 1, 5일에 생산된 총 10개 앙상블을 이용하여 매월 6개월 계절 예측자료를 생산한다.

현업 운영 일정은 매월 7일경 초기장 생산을 위한 재분석자료를 다운로드하고 자료 전처리를 거쳐 3차원 넷징 및 초기화 기법을 적용시킨다. 그리고 생산된 초기장을 이용하여 6개월 계절 예측 자료를 만들고 이는 후처리를 거쳐 매월 10~12일경 APCC MME에 참여모델로써 제공된다. 또한 SCoPS 자체 예보도의 자료 생산을 위해 계절별 예측 자료 검증 및 주요 변수의 결정론 및 확률론적 예보 공간장을 생산하여 센터 내부에 공유하고 있다.

#### 3.3.2. 기상청 슈퍼컴 5호기를 활용한 SCoPS 계절예측 운영체계 구축

SCoPS의 현업 운영 중 APCC HPC 노후화에 따른 불규칙한 시스템 오류와 계산시간 지연 등의 문제가 있어왔다. 이로 인해 현업의 안정적인 운영을 위한 대체 전산자원의 필요성이 꾸준히 대두되었고 현실적으로 대체가능한 계산 자원으로 기상청 슈퍼컴퓨터가 언급되어 왔다. 이에 따라 지난 몇 년간 기상청 슈퍼컴퓨터가 구축되면 SCoPS 모델을 포팅하고 hindcast 자료를 생산하여 안정성 테스트 및 대체자원을 준비했다. 2022년부터 일반 사용자에게 슈퍼컴퓨터 5호기 공동활용분 시스템(두루) 사용이 공식화됨에 따라 SCoPS 운영시스템을 이식하고 시운영하여 시스템 안정성을 확보하고 현업 운영 대체자원 활용을 위한 사전 준비를 하였고, 올해 두루 시스템을 이용하여 SCoPS Hindcast 생산 작업을 완료하였다.

APCC HPC와 슈퍼컴퓨터에 구축한 SCoPS의 포팅 환경설정을 Table 3.16과 같고 주요 차이점으로는 기상청 슈퍼컴퓨터 4호기부터는 PGI 컴파일러가 도입되지 않아서 Intel 컴파일러로 대체하였다.

Table 3.16. Configuration of APCC HPC and KMA supercomputer.

	APCC	KMA	
	HPC (2015~현재)	4호기 우리(2016~2021)	5호기 두루(2022~)
컴파일러	PGI 11.0	Intel 14.0	Intel 21.0
포트란	pgf90	ftn	lfort
MPI	openMPI	mpich	Intel MPI

### 3.3.3. hindcast 기간 확장

SCoPS Hindcast 기간은 1982~2013년에서 1982~2016년까지 연장 생산하고자 하였다. Figure 3.50은 SCoPS Hindcast 생산 과정을 모식화 한 그림이다. 먼저 APCC FTP 서버를 통해 SCoPS Hindcast의 해양 입력자료가 되는 WOD 자료를 수집 체계를 구축하여야 한다. 수집체계를 통하여 WOD 자료를 수집하는데, 2014년부터 이후로 WOD 버전이 변경되면서 기존에는 WOD13을 사용했지만 현재는 WOD18 자료를 수집하였다. 이로 인해 연직 내삽층이 40개에서 137개로 변경되어 기존보다는 좀 더 연직으로 촘촘한 격자를 가지는 프로파일 자료를 수집할 수 있게 되었다. 자료 수집이 완료되면 해당 자료를 SCoPS 초기장 생산체계에 입력자료로 삽입할 수 있게 전처리해주는 과정이 필요하다. 매트랩을 이용하여 전지구에 흩어져있는 아스키 형태의 지점 원자료를 수평 및 연직 등격자로 자료를 변환해야 한다. 그리고 필요 변수만을 추출하여 SCoPS 초기장 입력자료 양식에 맞게 전처리하였다. 그리고 전처리 된 WOD 자료는 CFSR 대기 변수 및 SST 자료와 함께 3차원 자료동화되어 최종적으로 SCoPS 초기장으로 만들어진다. SCoPS 초기장 자료는 매일 구성 모델(해양, 대기, 해빙) 간 플럭스를 주고 받으며 일별로 생산이 되므로 2014년 1월 1일부터 2016년 12월 31일까지의 초기장으로 매일 6개월 예측 hindcast를 생산하면 계절 예측 hindcast 연장이 완료된다.

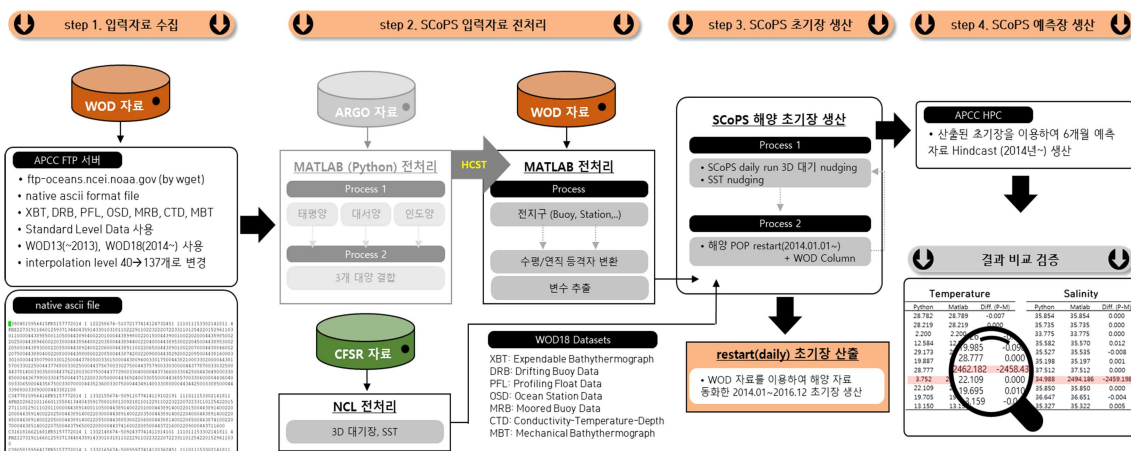


Figure 3.50. Flow chart of producing the SCoPS initial and forecast data.

Figure 3.51은 2014년 1월 10일 초기장의 로그파일 중 일부이다. 기존에 해당 기간은 forecast 자료만 생산했던 기간으로 WOD 자료 없이 Argo 자료로만 초기장 nudging이 이루어져 수온(T)과 염분(S) 자료동화에 사용된 지점 수는 304개 지점이었다. 그러나 우측 그림에서 해당 기간 hindcast 생산에서는 Argo 자료 사용 없이 WOD 자료를 이용하여 초기장을 생산하였고 자료 동화에 사용된 지점수는 600개 지점 이상으로 나타났다. 이 과정을 통해 생산된 초기장을 이용하여 2014년 1월부터 2016년 12월까지 총 36개 초기장에 대한 6개월 계절 예측자료를 생산하여 Hindcast 자료를 생산하였다.

```

yr=      2014
mn=      1
dy=1033  10
rs_yr=2014
rs_mn=   1
rs_dy=1033  11
LAT=   3.3608143458194935    1.2050242366806374    -2.003496
LON=   161.93751264983342    139.43749865719508    116.9374
file_sst=/data27/chal79/ATM_nudg/Tool_package/KSC/TMISST/cfsrss201
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/CTD/20140110T.dat doesnot exist
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/OSD/20140110T.dat doesnot exist
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/MRB/20140110T.dat doesnot exist
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/PFL/20140110T.dat doesnot exist
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/DRB/20140110T.dat doesnot exist
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/MBT/20140110T.dat doesnot exist
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/XBT/20140110T.dat doesnot exist
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/OSD/20140110S.dat doesnot exist
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/CTD/20140110S.dat doesnot exist
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/MRB/20140110S.dat doesnot exist
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/PFL/20140110S.dat doesnot exist
file=/data19/baoqiang/SHU/data/WOD/DRB/20140110S.dat doesnot exist
Total number of T profiles=    304
Total number of S profiles=    304
allocation is done

yr=      2014
mn=      1
dy=1033  10
rs_yr=2014
rs_mn=   1
rs_dy=1033  11
LAT=   3.3608143458194935    1.2050242366806374    -2.003496
LON=   161.93751264983342    139.43749865719508    116.9374
file_sst=/lfs/data27/chal79/ATM_nudg/Tool_package/KSC/TMISST/cfsrss
file=/lfs/data27/chal79/data/WOD/MBT/20140110T.dat doesnot exist
PFL data is used instead of ARGO
Total number of T profiles=    691
Total number of S profiles=    617
allocation is done

```

Figure 3.51. Example logfile of SCoPS initialization for 2014-01-10.

Figure 3.52는 Figure 3.50의 과정을 거쳐 연장 생산된 2014년도 hindcast 자료를 이용하여 NINO 3.4 지수를 구한 것이다. 실선은 2014년도 예측값 및 관측값을 나타낸 것인데 WOD 자료를 이용하여 생산한 hindcast 자료, Argo 자료를 이용하여 생산한 기존 forecast 자료, OISST 관측값으로 각각 구한 NINO3.4 지수이다. 초기 입력자료로 Argo나 WOD를 사용한 자료의 NINO3.4 지수를 봤을 때, 지수의 시간 변동성이 크게 다르지 않고 그 값의 차이도 미미하게 나타났다. Shading으로 나타낸 부분이 두 지수간의 차이인데 그 차이값에 있어 양이나 음의 값으로 치우치는 뚜렷한 특징은 나타나지 않고 평균적으로 절대값 약 0.05 미만의 차이값을 나타내는 것으로 확인하였다.

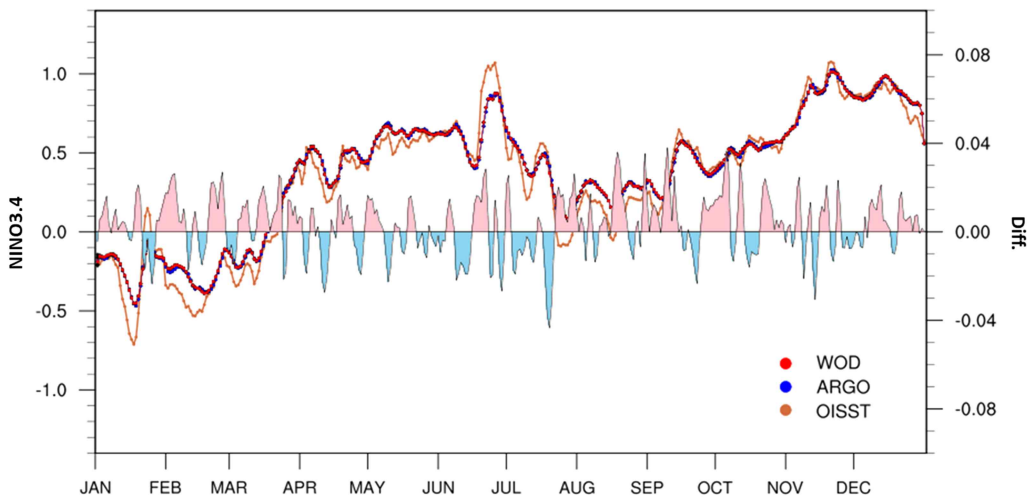


Figure 3.52. Nino3.4 index (line) and difference(shading) between forecast using Argo and hindcast using WOD as ocean initial condition for the period of 2014.

### 3.4. 산불예측시스템 운영 및 지역확장

#### 3.4.1. 산불예측시스템 운영 및 예측정보 제공

산불예측시스템은 APCC의 영문홈페이지를 통해서 제공되고 있으며, 2022년까지는 인도네시아 보르네오 섬의 4개 지역 (Barat, Selatan, Tengah, Timur) 지역을 대상으로 제공하고 있었으나 말레이시아 지역확장 연구를 통해 2023년부터는 인도네시아와 말레이시아 4개 지역을 대상으로 서비스를 홈페이지를 통해서 제공하고 있다. 인도네시아의 보르네오섬의 FHEWS는 매년 4월에서 7월사이에 매월 20일 1회 정보제공을 홈페이지를 통해 수행한다. 예보 기준은 4가지 (Low, Moderate, High, Extreme)로 제공되며, 지역별 색을 통해 쉽게 정보를 구분할 수 있도록 설계하였다. Figure 3.53은 2024년 인도네시아의 마지막 산불예측정보제공 결과인 7월의 예보 결과를 보여준다.

Probabilistic Forest Fire Forecast (issued : 2024-07) for 2024: AUG-OCT (%)

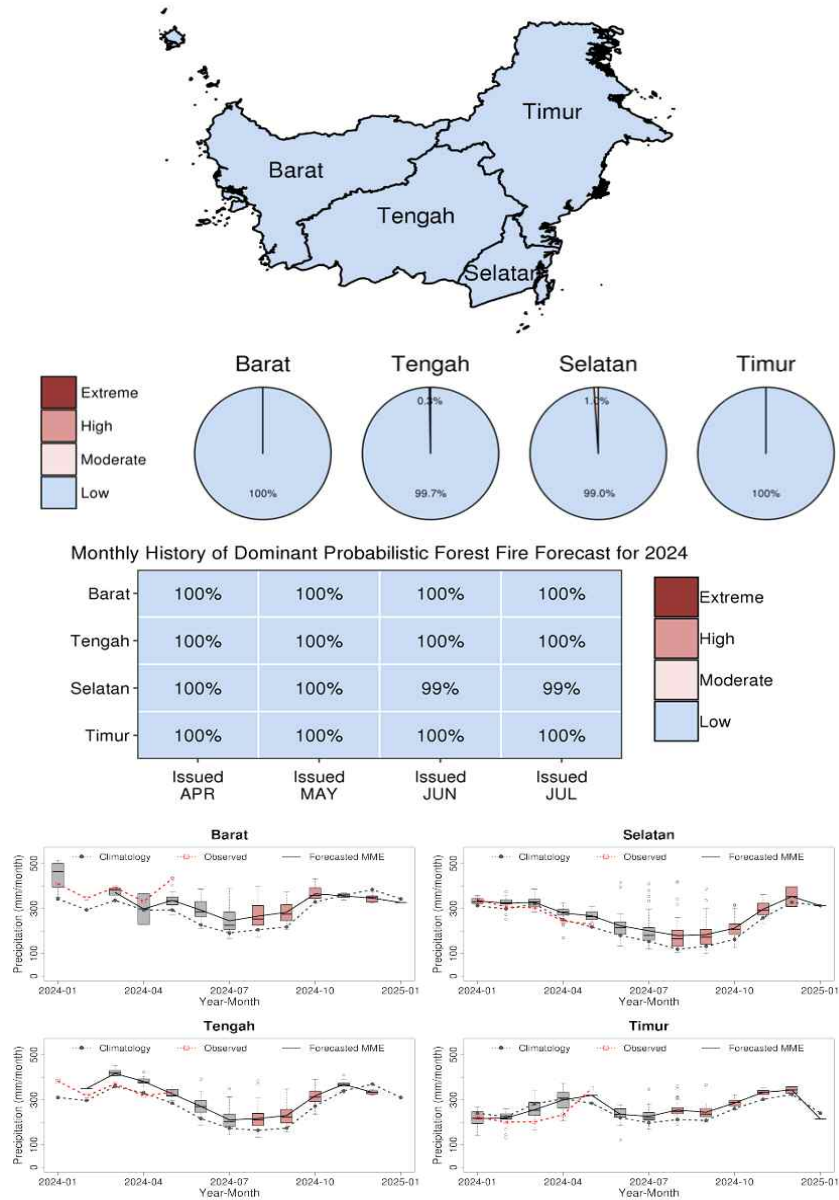


Figure 3.53. Indonesia FHEWS results (Issued: 2024-07)

말레이시아는 말레이시아 전역을 대상으로 4개 지역 (North Malay Peninsula, South Malay Peninsula, Sawarak, Sabah)의 정보를 제공한다. 말레이시아의 건기는 인도네시아와 다른 2월에서 4월이 최대 건기로, 건기를 대상으로 매년 10월부터 차년도 1월까지 매월 20일에 예측정보를 홈페이지를 통해 제공한다. Figure 3.54는 말레이시아의 11월 예측정보를 보여준다.

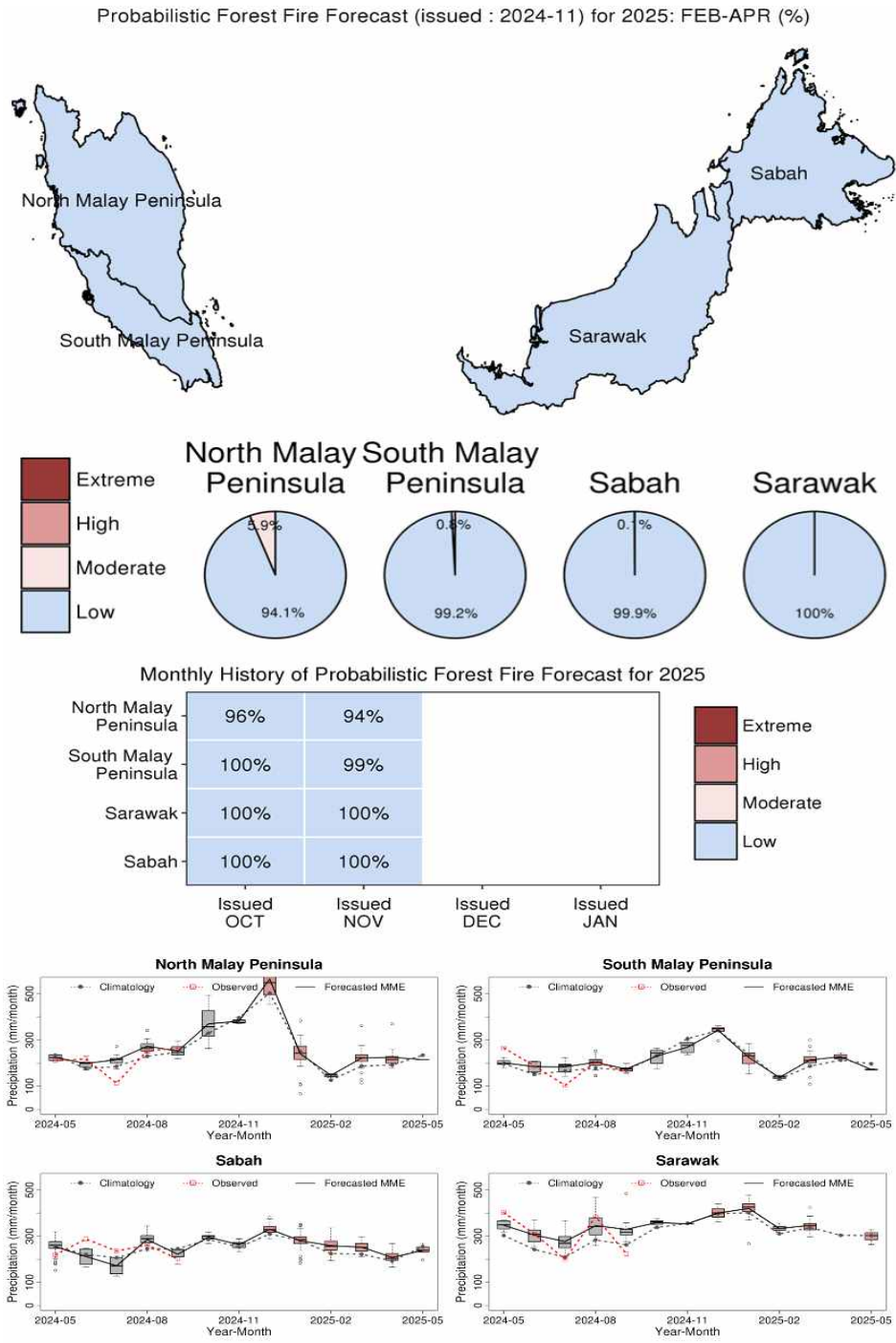
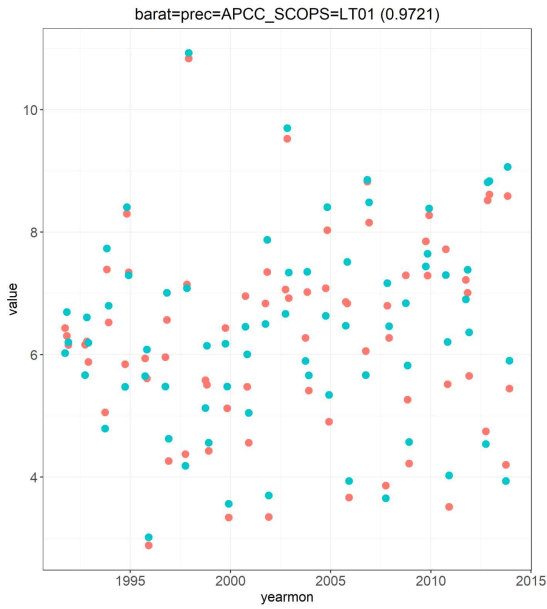


Figure 3.54. Malaysia FHEWS results (Issued: 2024-11)

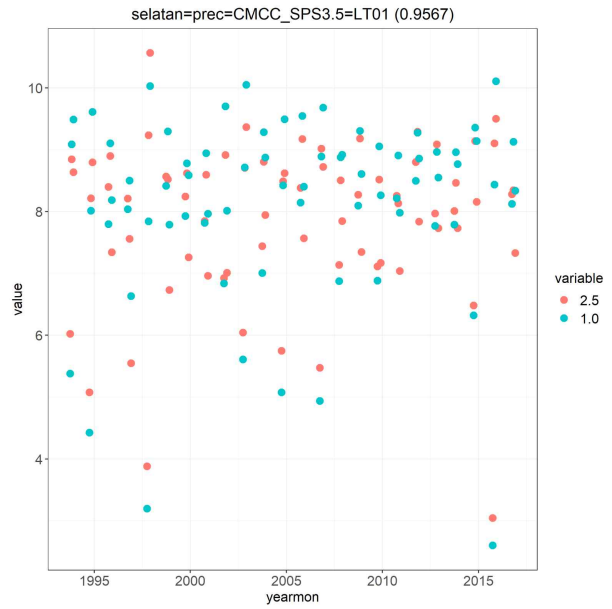
## 3.4.2. 입력자료 개선 및 지역확장 서비스

### 3.4.2.1. 입력자료 개선

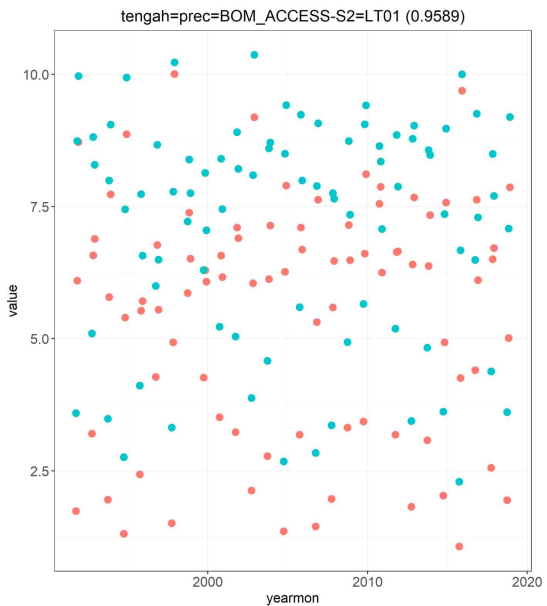
APCC의 개별모델이 개선됨에 따라서, 산불예측시스템의 개선이 함께 동반되어야 한다. 개별모델의 해상도가 2.5° 에도 1° 로 변경됨에 따라 고해상도 자료를 활용하여 산불예측시스템을 제공할 수 있도록 전체 시스템을 개선하였다. 또한 변경을 통한 정보 제공의 차이가 있는지를 검증하고, 변경에 따른 문제가 발생하지 않는지를 검증하였다. 개별모델의 제공 이름의 변경에 따른 경로 변경또한 함께 진행되었다. APCC의 개별모델의 이름이 모델의 업데이트로 인해 지속적으로 변경되고, 신규로 추가되거나 제거되는 모델명이 지속적으로 이루어져왔다. 기존의 산불예측 시스템에서는 개별모델의 정보를 현업을 운영하는 연구자가 직접 입력하여 운영하도록 설계되었으나, 현재는 APCC MME의 Attribute 정보를 자동으로 불러 활용된 개별모델의 정보를 자동으로 불러 활용할 수 있도록 설계변경 및 시스템이 변경되었다. 변경된 시스템을 통해 APCC의 개별모델이 업데이트되는 것을 항상 실시간으로 반영할 수 있도록 변경되었다. Figure 3.55는 고해상도의 개별모델과 기존의 개별모델의 정보가 유사한 정보를 제공하는지 평가한 결과이다. 해상도에 따른 지역별 정보차이가 크게 없기 때문에 산불예측시스템의 입력자료인 개별모델을 1° 로 변경 적용하였다.



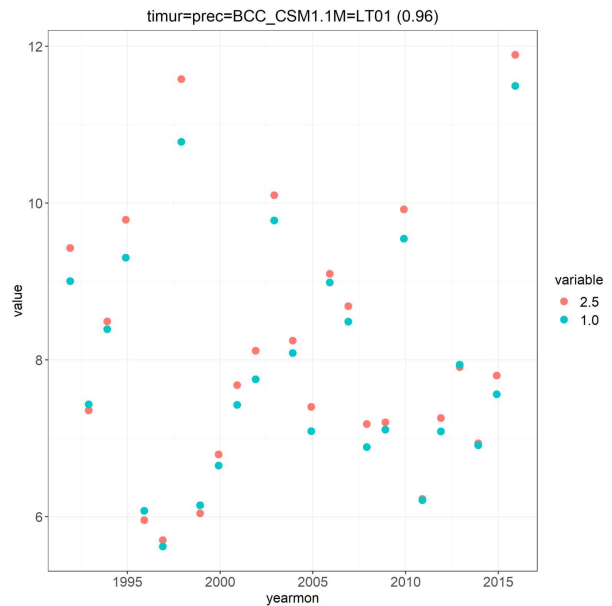
APCC SCOPS (Lead Time: 1, Barat)



CMCC SPS3.5 (Lead Time: 1, Selatan)



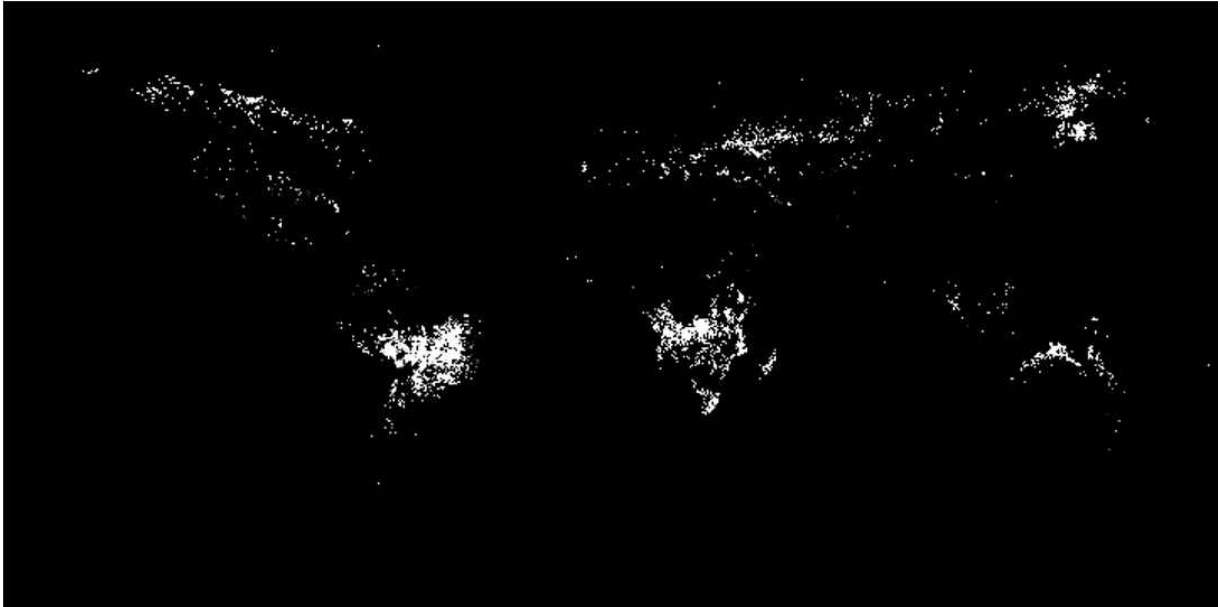
BOM ACCESS-S2 (Lead Time: 1, Tengah)



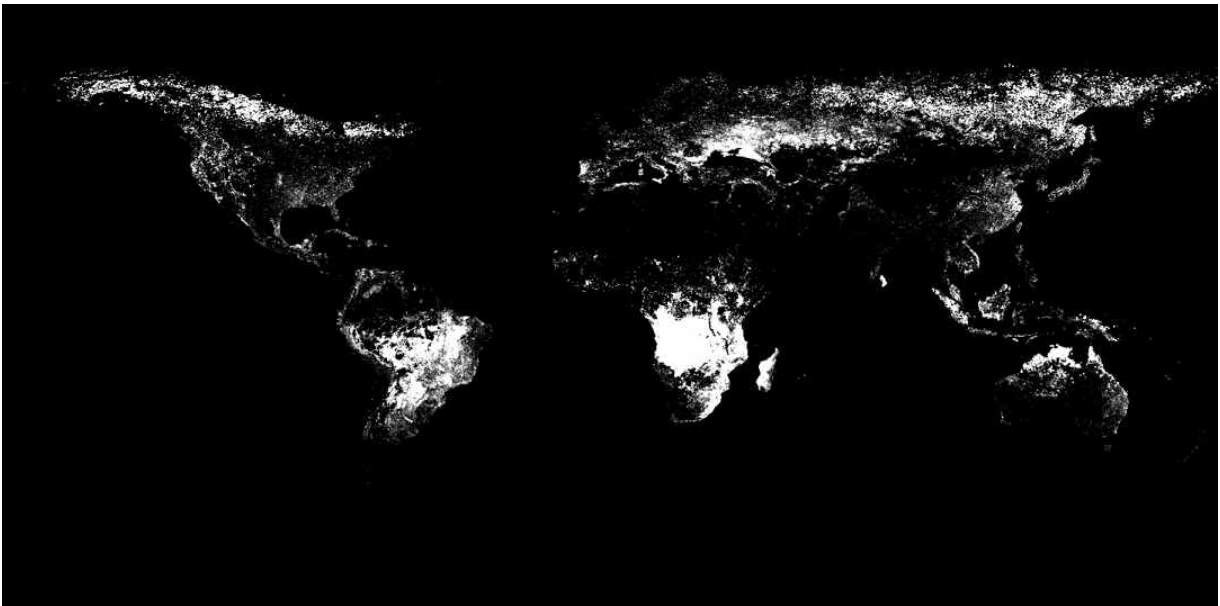
BCC CSM1.1M (Lead Time: 1, Timur)

Figure 3.55 Results of comparing individual model resolution differences

GFED는 전 지구에서 발생하는 화재와 그로 인해 발생하는 대기 중 배출물의 데이터를 제공하는 데이터베이스이다. 주로 위성 관측 데이터에서 얻은 화재 관련 정보를 기반으로 하며, 특히 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 위성 데이터를 활용한다. 월별 데이터를 NASA의 Earth Data 포털을 통해 다운로드 할 수 있다. 기존의 산불예측시스템에서는 3.1버전의 0.5°의 해상도 자료를 제공하고 있었으나, 현재의 4.1버전은 0.25°의 정보를 제공한다. Figure 3.56은 변경 전 후의 GFED 정보를 보여준다. 해상도가 개선됨에 따라 지역별로 자세한 대기 배출물 정보를 제공하는 것을 확인할 수 있다.



GFED3.1



GFED4.1

Figure 3.56. Comparison results of GFED3.1 and 4.1 (July, 1998).

산불예측시스템은 개별모델의 강수정보와 GFED의 대기 중 배출물 정보를 활용하여 예측 정보를 생산한다. 개별모델의 강수자료는 관측자료를 활용하여 Hindcast 기간의 오차보정 계수를 산출하고 이를 기반으로 Forecast의 오차보정 정보를 생산한다. APCC의 Hindcast의 기간은 1991년에서 2010년으로 변경되었으나, Aphrodite 관측자료의 정보는 2007년까지 수집된 자료를 활용하여 오차보정 계수를 산출한다. 따라서 오차보정을 위한 관측자료의 정보가 충분히 반영되지 않는 문제가 있고, 예측정보의 정확도를 판단할 수 있는 최신의 관측자료가 없다는 단점이 존재하였다. 따라서 1991년부터 자료를 제공하면서 현재까지 관측자료를 꾸준히 제공하고 있는 자료로 변경하였다. Figure 3.57은 관측자료를 비교 분석하여 Aphrodite와 유사한 정보를 선택하기 위한 결과를 보여준다. 현재의 산불예측시스템의 관측자료는 Aphrodite에서 CHIRPS로 변경되어 운영한다.

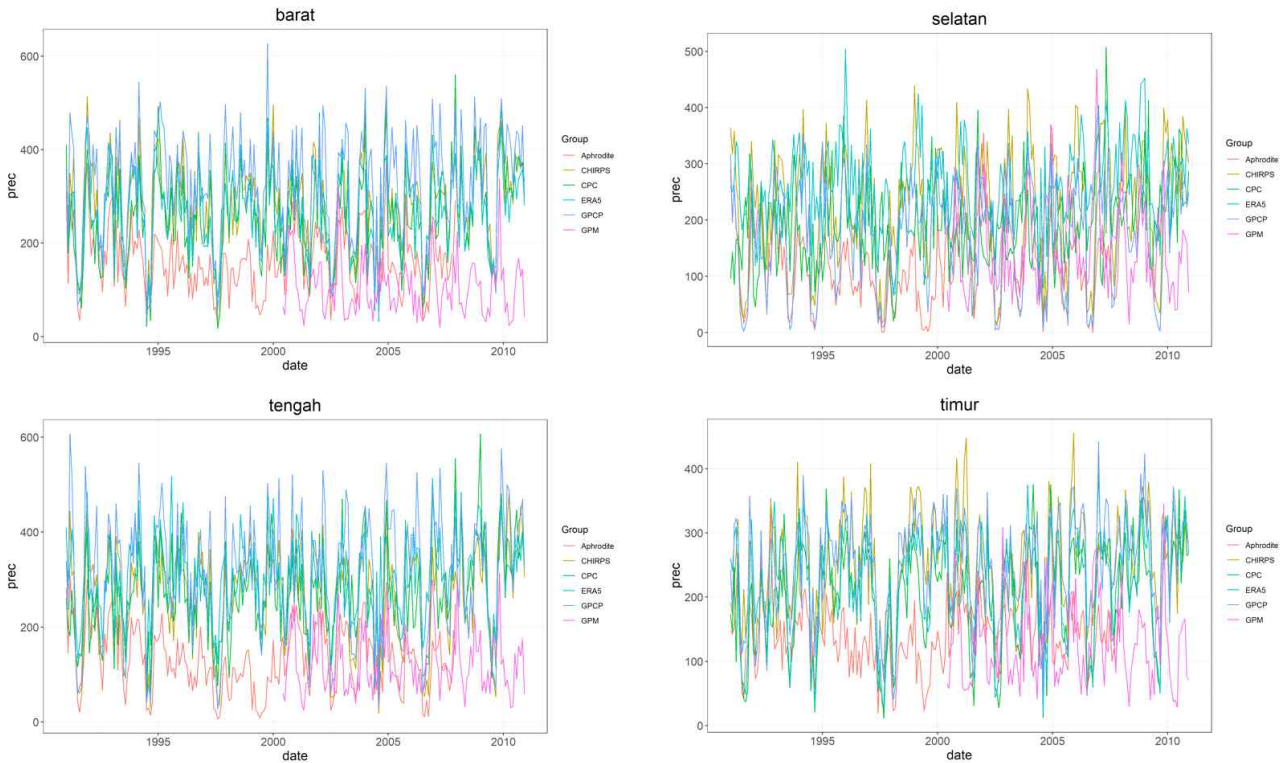


Figure 3.57 Monthly precipitation comparison results by region

### 3.4.2.2. 말레이시아 지역확장 개선

산불예측시스템은 인도네시아의 보르네오섬의 건기를 대상으로 제공되고 있다. 따라서 말레이시아의 지역 확장을 위해서는 말레이시아의 건기를 정의하고 현업 시스템을 위한 설계를 새롭게 구성하였다. 말레이시아의 건기는 EOF분석을 통해 실제 건기를 파악하고, 지역별 강수량 분석 및 탄소 배출 분석 수행을 통해 정의하였다. 말레이시아는 2월부터 4월이 강수량이 가장 적은 월로 정의할 수 있고, 해당월의 명확한 정의를 위해 EOF분석을 추가로 수행한 결과는 Figure 3.58과 같다. 지역별로 계절적 차이를 보여주고 있지만, 보르네오 상단의 경우 산불이 자주 발생하는 지역이 아니고, 연무로 인한 피해의 경우 말레이시아 본토의 피해가 크다. 따라서 말레이시아 본토의 가장 건기라고 평가할 수 있는 2월에서 4월을 대상으로 산불예측 서비스를 운영할 수 있도록 설계하였다. 따라서 매월 10월에서 차년도 1월까지 1회 정보를 APCC의 영문홈페이지를 통해 제공한다.

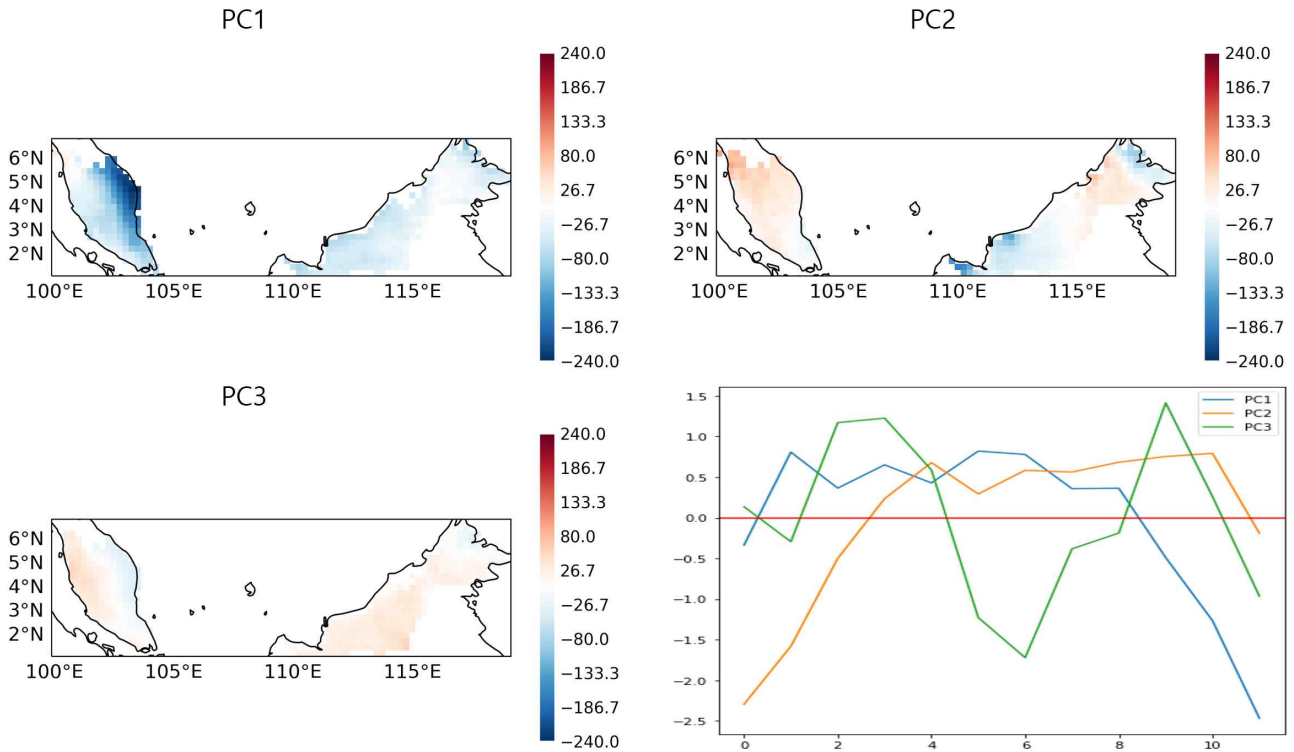


Figure 3.58 EOF results of Malaysia

### 3.4.3. 고해상도 격자자료 생산시스템 시험 구축

FHEWS의 관측자료가 Aphrodite에서 CHIRPS로 변경됨에 따라 해상도가  $0.25^\circ$ 로 개선되었다. 또한 실제 산불이 발생하는 지역은 Province 전역이 아닌 일부 지역임을 MODIS를 통해 실제 관측이 되고 있다. 산불예측시스템을 생산하기 위한 Forecast의 오차보정 생산이 Sforecast의 알고리즘을 통해 생산이 되게 되는데, Sforecast는 지점자료 기반으로 계절예측자료를 생산할 수 있는 상세화 프로그램이다. 지점자료 기반의 오차보정 계절예측정보를 고해상도로 변경된 CHIRPS를 활용하면 모든 격자별로 오차보정된 Forecast정보를 생산할 수 있고, 이를 활용하면 실제 산불이 자주 발생하는 지역에 대한 구체적인 예측정보를 제공할 수 있다. Figure 3.59는 2019년도의 FHEWS결과와 실제 MODIS를 통해 화재를 관측한 결과를 보여준다. Tengah 지역과 Selatan지역의 경우 조기경보가 High로 높은 경보를 예측하였는데, 실제 모든 지역에서 화재가 발생하고 있는 것은 아님을 알 수 있다. 실제 화재가 발생하는 지역이 해당 Province에서 많이 발생할 수 있으나, 모든 영역에서 화재가 발생하는 것으로 정보를 제공하는 것은 부족하다고 판단하고, 격자정보를 제공하기 위해서 시스템을 재설계하였다.

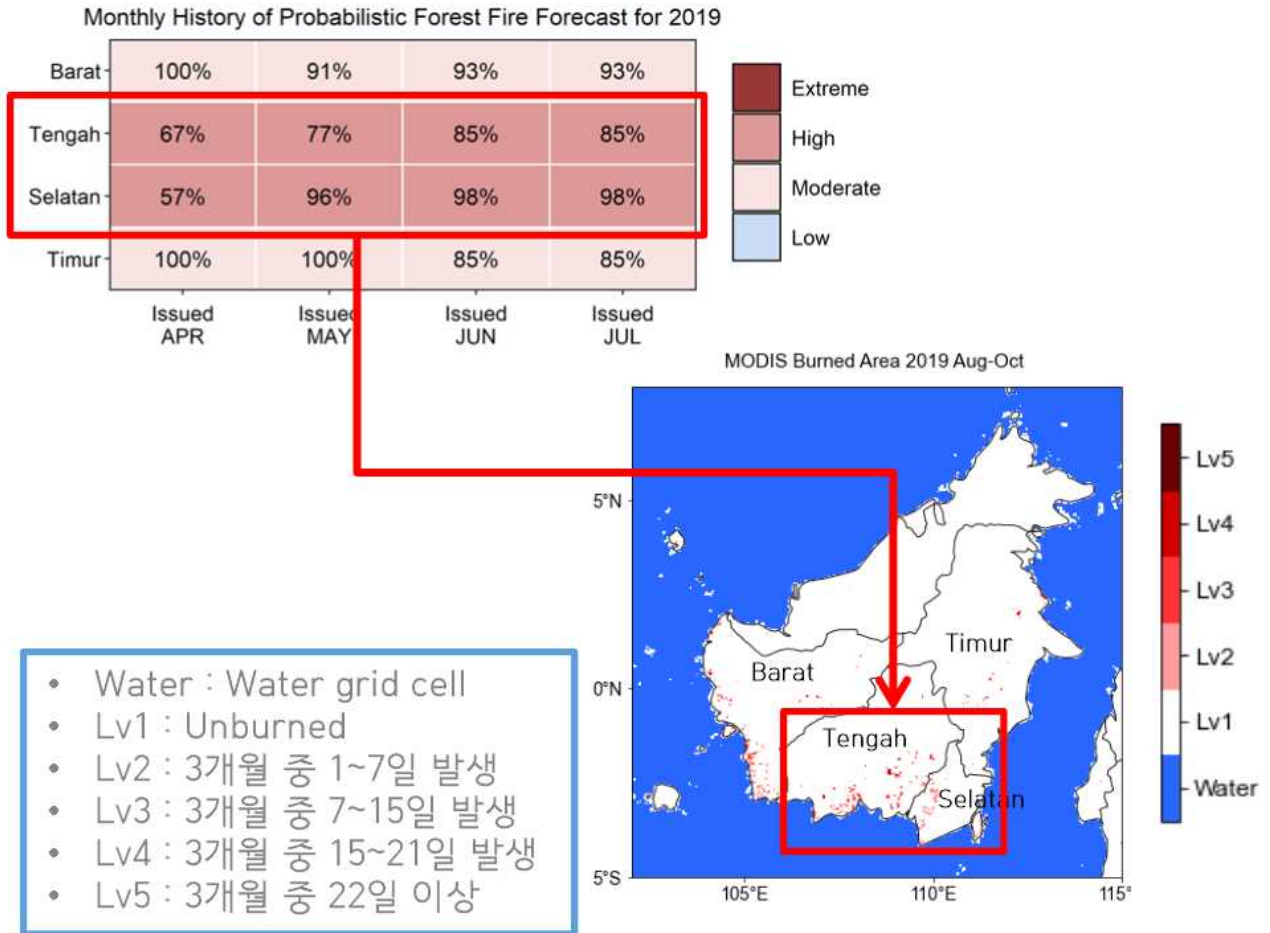


Figure 3.59 2019 Actual Fire Occurrence Areas and FHEWS Results

Figure 3.60은 산불예측정보를 격자형태로 제공하기 위한 시스템을 구축하기 위한 Flow Chart를 보여준다. 기존의 시스템은 Province 기반으로 관측자료를 처리하였으나, 격자정보 생산을 위해 CHIRPS의 해상도에 따르는 격자정보를 모두 새롭게 처리하는 관측자료 처리프로세스를 새롭게 설계 및 시스템을 구성하였다. Hindcast 자료 처리 또한 수집된 CHIRPS의 관측자료 격자정보를 기반으로 처리될 수 있도록 설계되었다. 또한 Province 기반의 기존의 예측정보 생산과정에 비해 많은 정보를 포함하는 격자형태의 자료처리 시스템의 효율적인 처리를 위해 자료의 저장방식이 유동적으로 가동하도록 설계되었다. 과거자료와 비교하여 관측자료와 Hindcast의 자료가 동일하다면, 처리를 실시하지 않고 넘어갈 수 있도록 설계되었다. 따라서 변화가 있는 자료를 찾아서 계산하여 산출과정에 소요되는 시간을 최소화하고자 하였다. 이후 Forecast의 오차정보 생산 및 최종 개별모델 선택을 통해 격자형태의 예측정보를 제공할 수 있다.

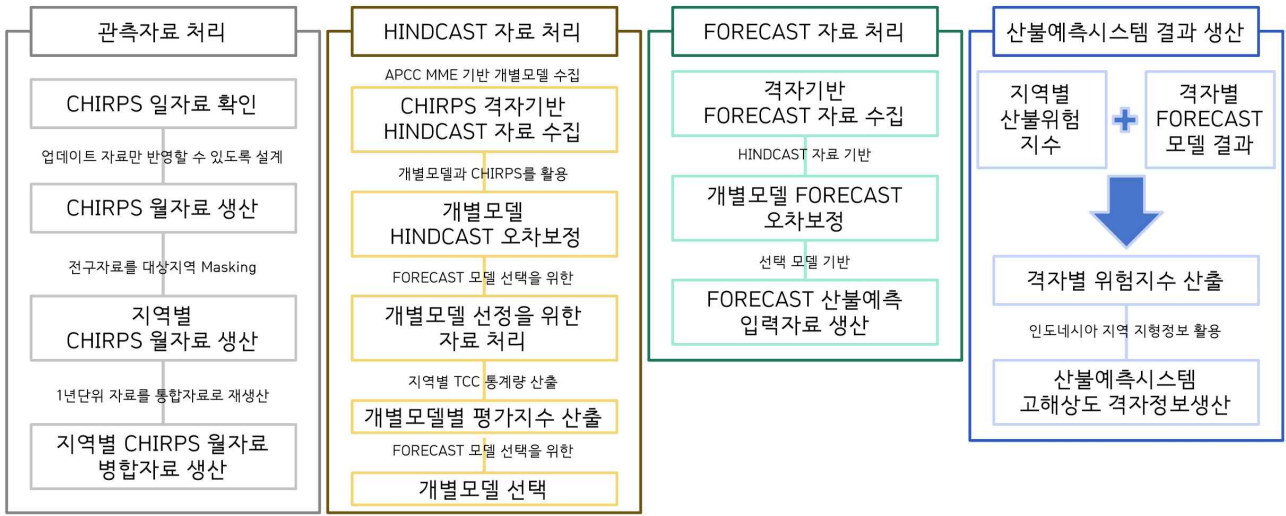


Figure 3.60 Flow chart for FHEWS

Figure 3.61에서 Figure 3.63은 관측자료 처리와 Hindcast 자료 처리, Forecast 자료 처리의 결과 일부를 보여주고 있다. 관측자료의 처리는 우선 CHIRPS의 일자료를 수집하여 월자료로 재산출하고, 연구대상 영역을 추출한다. 추출된 자료를 Netcdf 형태로 저장하고 이를 지역과, 격자별로 저장하여 활용할 수 있도록 설계되었다. 자료의 양이 증가함에 따라 모든 자료처리 방식은 중복처리를 최대한 배제하여 수행할 수 있도록 설계되었다. Hindcast 기간의 개별모델 자료 처리는 CHIRPS 해상도를 대상으로 개별모델의 오차보정을 수행하고, 개별모델의 평가지수를 산출한다. 평가지수는 개별모델을 선택하는데 활용되며, 선정된 개별모델을 기반으로 FHEWS의 결과를 산출하게 된다.

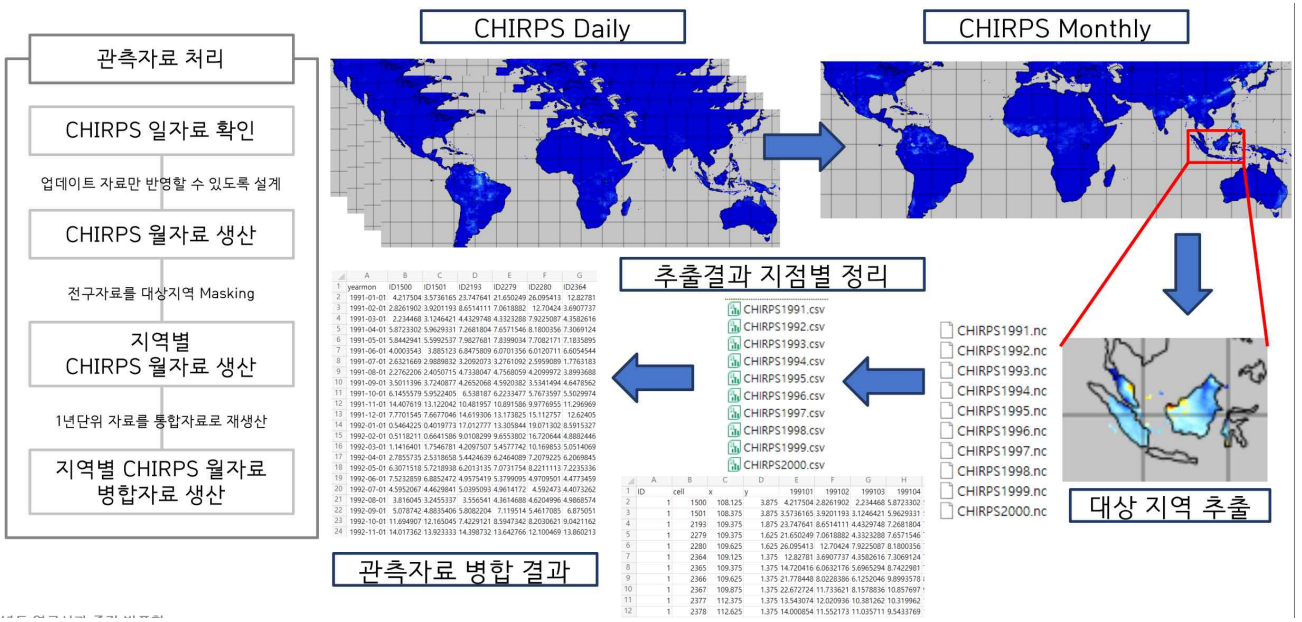


Figure 3.61 Summary of Observation Data Processing Results

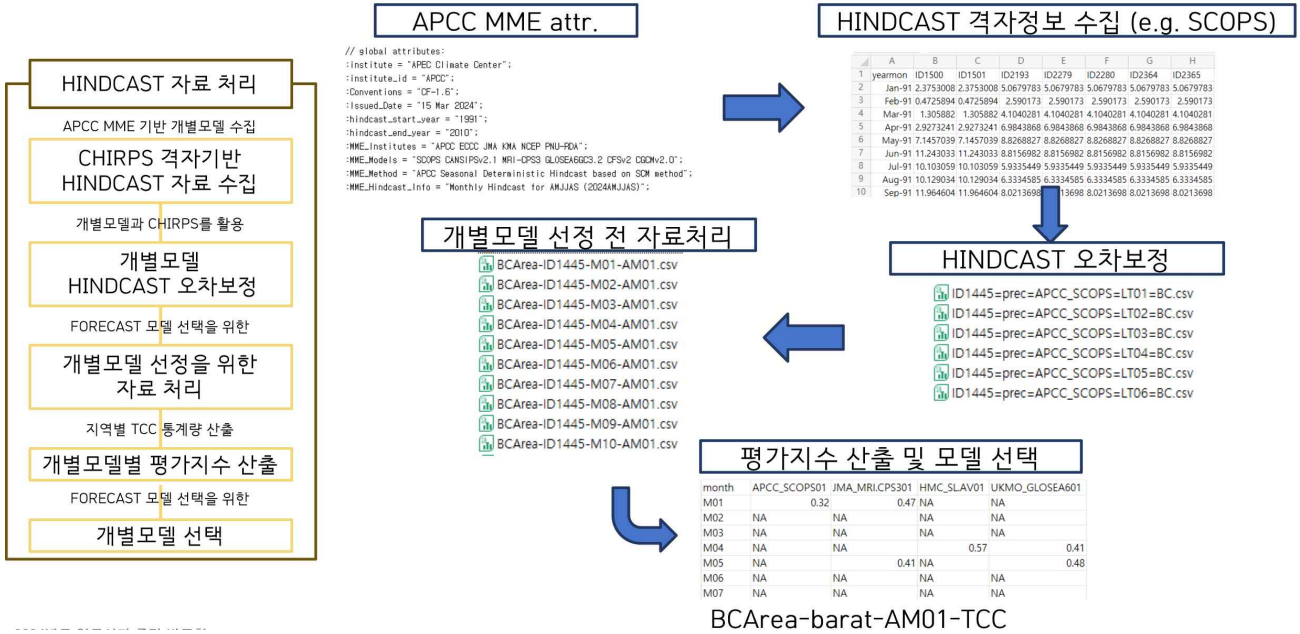


Figure 3.62 Summary of Individual Model Data Processing Results for the Hindcast Period

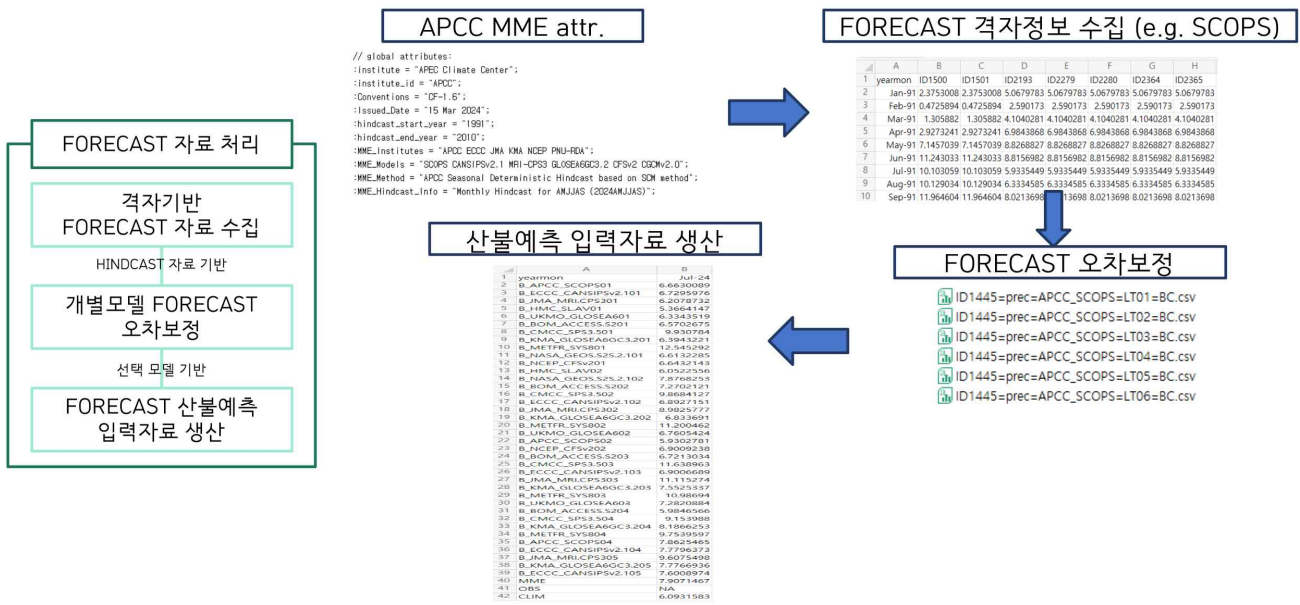


Figure 3.63 Summary of Individual Model Data Processing Results for the Forecast Period

Figure 3.64에서 Figure 3.67은 2024년도에 운영한 산불예측시스템의 현재 생산 결과와 격자정보 생산결과를 함께 비교한 결과이다. 실제 2024년도의 모든 조기경보는 Low로 낮은 상태를 제공하고 있으나, 화재가 자주 발생하는 지역의 경우 조기경보가 Moderate로 예보하고 있음을 알 수 있다. 2019년의 MODIS결과를 통해 실제 화재가 자주 발생하는 지역의 경우 Barat과 Tengah, Selatan의 남부지역과 Timur의 동부지역이라는 것을 알 수 있다. 4월에서 7월로 예보를 위한 리드타임이 가까워질수록 해당지역의 조기경보가 강해지고 있다는 것을 알 수 있다.

이는 추후의 지속적인 연구로, 실제 관측과 비교를 통해 결과를 다시 비교한다면 격자정보 제공의 필요성을 더 높일 수 있을것으로 사료된다.

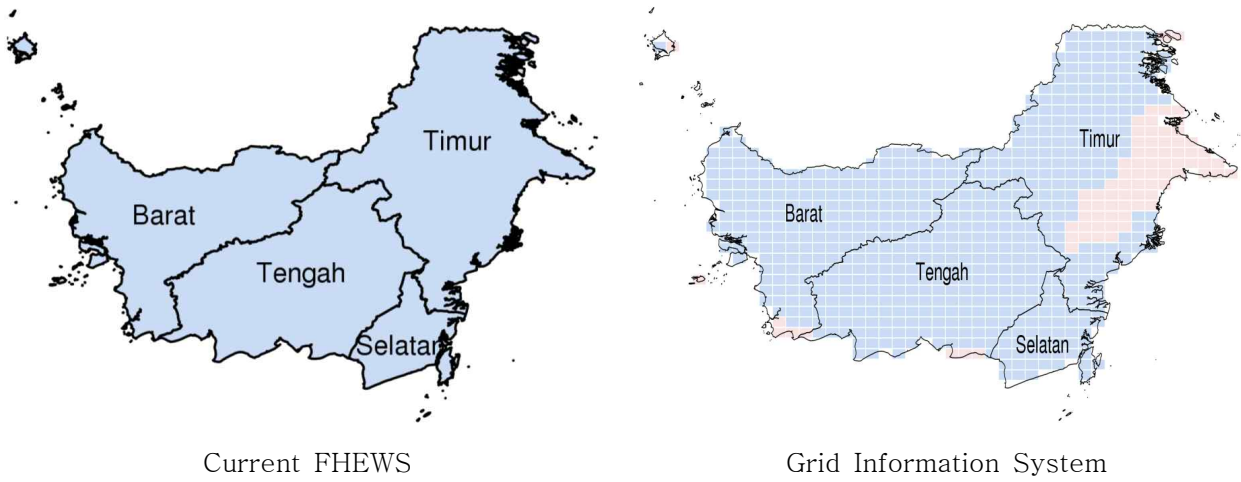


Figure 3.64 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2024-04)

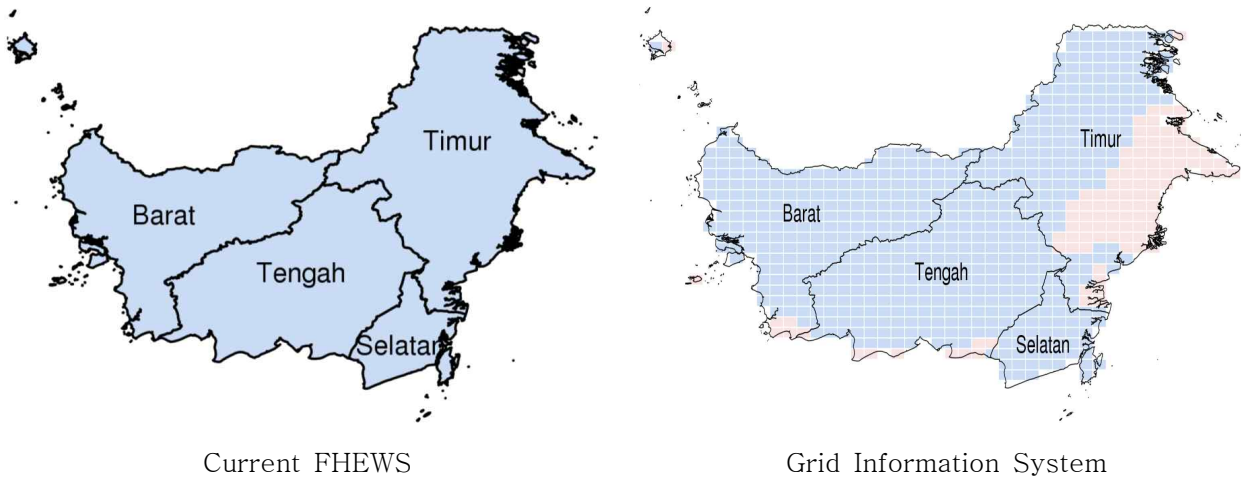
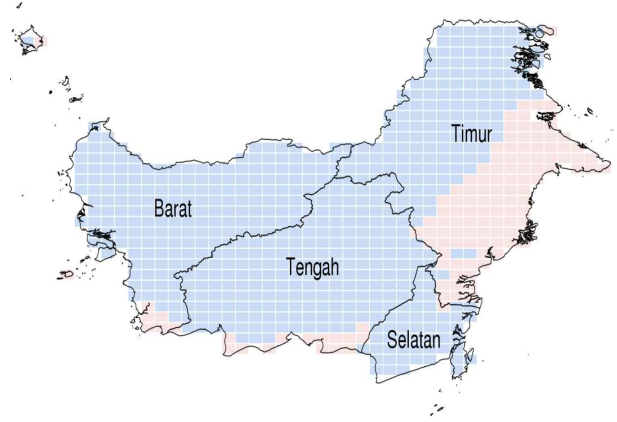


Figure 3.65 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2024-05)



Current FHEWS

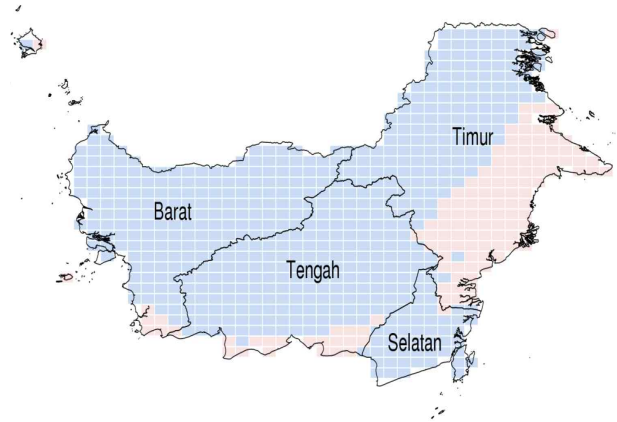


Grid Information System

Figure 3.66 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2024-06)



Current FHEWS



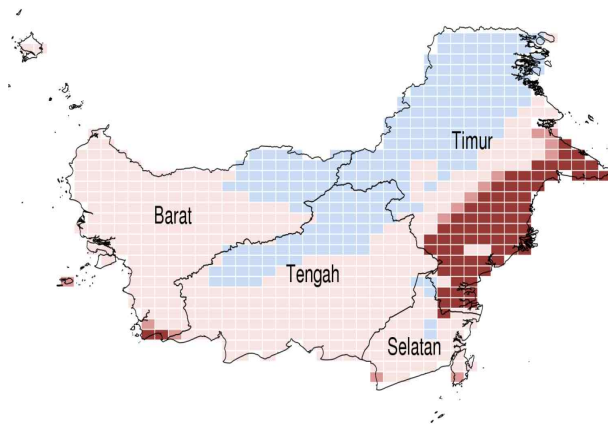
Grid Information System

Figure 3.67 Comparison REsults of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2024-07)

지역의 세부정보를 제공하는 격자정보 제공시스템은 조기경보가 강해질수록 더 많은 역할을 할 수 있는데, 실제 2023년도의 강한 조기경보 예측정보를 대상으로 비교하면 Figure 3.68에서 Figure 3.71과 같다. 2023년의 FHEWS 결과를 보면 4월과 5월의 경우 모든 지역에서 Moderate를 제공하고 있지만, 격자정보를 살펴보면 Timur지역의 화재 상승발생지역에서는 경보다 강해지는 것을 알 수 있다. 6월과 7월의 결과를 보면 Selatan지역의 경보가 High로 상승하는 것을 알 수 있는데, 이는 해당지역의 격자정보들이 Moderate에서 High로 조기경보 하고 있는 격자도 함께 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 정보를 기반으로 격자정보와 기존의 Province 기반의 정보 제공의 예보 방향은 같다고 할 수 있다. 또한 격자정보의 생산 신뢰성을 검증한 결과라고 할 수 있으며, 격자정보의 생산을 통해 해당지역의 상세한 FHEWS 정보를 제공할 수 있음을 알 수 있다.



Current FHEWS

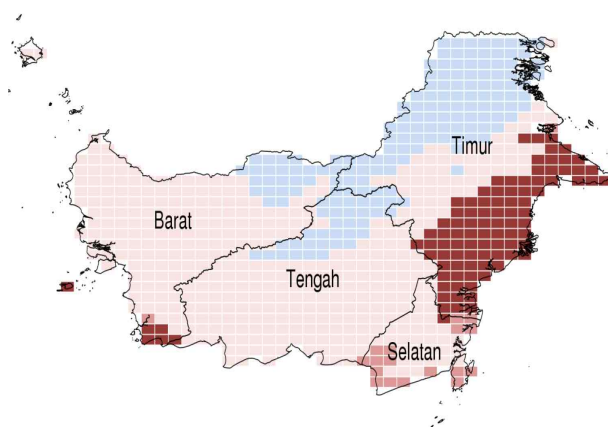


Grid Information System

Figure 3.68 Comparison Results of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2023-04)



Current FHEWS

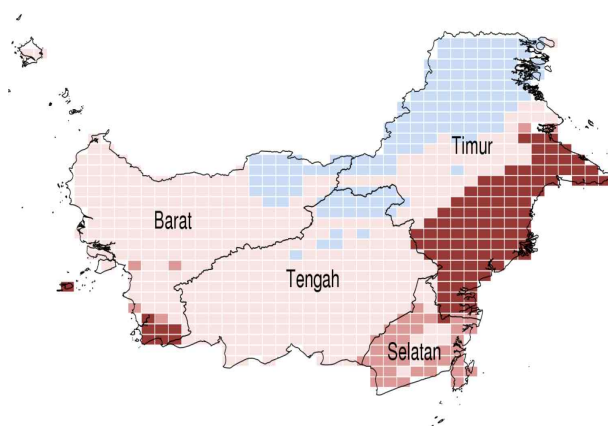


Grid Information System

Figure 3.69 Comparison Results of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2023-05)

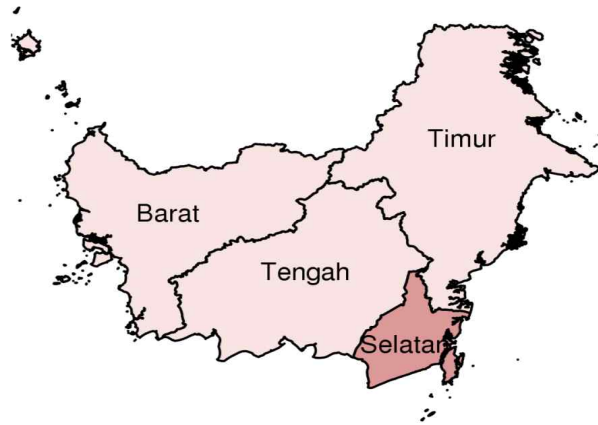


Current FHEWS

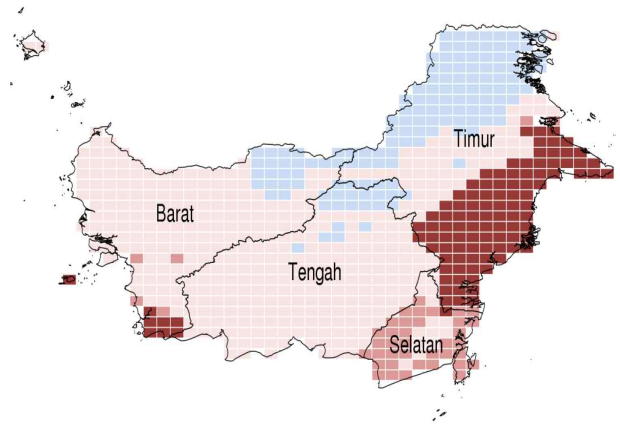


Grid Information System

Figure 3.70 Comparison Results of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2023-06)



Current FHEWS



Grid Information System

Figure 3.71 Comparison Results of Grid Information Production in FHEWS (Issued: 2023-07)

### 3.5. 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현

#### 3.5.1. 신규 홈페이지용 동적 기후정보 웹 콘텐츠 디지털 자료 생산 시스템 구축

신규 구축된 APCC 홈페이지에서 동적 기후정보 웹 콘텐츠 표출을 위해 2.5.1절에서 상술하였듯이 4가지 시스템을 구축하였다. 첫 번째는 MME 기법별 예측 통합시스템이다. 결정론적 및 확률론적 예측 정보를 동적으로 구현하기 위해 hindcast 예측 자료의 통합과 동적 누리집 DB에서 보다 효율적인 자료 관리를 위해 디렉터리명을 일원화하여 예측 자료를 재구축하는 시스템이며, CDO(Climat Data Operator) 소프트웨어를 사용하여 한 파일내에 다양한 정보를 취합(merge)하는 방식이다. 해당 시스템의 구축 내용은 다음과 같다.

```
- 시스템 경로: ${AFS}/RUN/DYNAMIC_HOME/PAGE/MME/
- 메인 프로그램: MME_merge.sh

#!/bin/sh

SYEAR=2024
EYEAR=2024

MONTH=( DEC )
SEAS1=( DJF )
SEAS2=( MAM )

VAR=( t2m prec sst t850 z500 slp u850 v850 u200 v200 )
MODEL=( SCM GAUS )

YEAR=$SYEAR

while [ $YEAR -le $EYEAR ];do

nd=0

while [ $nd -le 1 ];do

nm=0
maxmon=`expr ${#MONTH[@]} - 1`

while [ $nm -le $maxmon ];do

F_3M_IDIR=/data02/OPER/AFS/DATA/MME_OUT/3-MON/FORECAST/${MODEL[$nd]}/${MONTH[
```

`{nm}`

`F_6M_IDIR=/data02/OPER/AFS/DATA/MME_OUT/6-MON/FORECAST/${MODEL[nd]}/${MONTH[`

`{nm}`

`H_3M_IDIR=/data02/OPER/AFS/DATA/MME_OUT/3-MON/HINDCAST/${MODEL[nd]}/${MONTH[`

`nm}`

`H_6M_IDIR=/data02/OPER/AFS/DATA/MME_OUT/6-MON/HINDCAST/${MODEL[nd]}/${MONTH[`

`nm}`

`F_ODIR=/data02/OPER/AFS/RUN/DYNAMIC_HOMEPAGE/MME_hindcast/FORECAST/${MODEL[nd]}/${MONTH[`

`H_ODIR=/data02/OPER/AFS/RUN/DYNAMIC_HOMEPAGE/MME_hindcast/HINDCAST$YEAR/${MODEL[nd]}/${MONTH[`

(생략)

위와 같이 본 프로그램은 셸 스크립트로 작성되었으며, 원하는 예측해, 월, 계절, 변수, MME 기법 종류, 입력 예측 자료 경로 등을 수정하여 프로그램을 실행하면 사용자가 지정한 경로에 설정한 예측 기간, 변수, MME 기법별 자료가 재구축되어 동적 누리집 DB 체계로 전달 되는 방식이다.

동적 웹 콘텐츠 구현을 위한 개별모델 편차 자료 생산 시스템은 2.5.1절에서와 같이 MME 참여모델에 대한 3/6개월 편차값에 대한 공간 분포와 함께 hindcast 기간의 시계열 정보를 표출하기 위해 개별모델별 편차값을 산출하고 hindcast 예측 자료를 통합하는 시스템을 구축하였다. 본 시스템은 3개의 메인 프로그램으로 구성되어 있으며, 개별모델별 편차값 산출, 자료 병합, 홈페이지 서버 전송 순으로 이루어졌다. 이 메인 프로그램은 간단한 셸 스크립트 형태로 작성되었으며, 그 중 개별모델별 편차값 산출 프로그램은 NCL의 소스 프로그램 기반으로 수행 된다. 각 메인 프로그램의 내용은 다음과 같다.

- 시스템 경로: `{AFS}/RUN/Manage_Model_Anomaly/`

- 메인 프로그램: `01.model_anom.sh`

- 소스 프로그램: `param.ncl`

`model_fcst_anom_monthly.ncl`

`model_fcst_anom_season.ncl`

`model_hcst_anom_monthly.ncl`

`model_hcst_anom_season.ncl`

<메인 프로그램: `01.model_anom.sh` 내용>

`MODEL=( APCC_SCOPS BCC_CSM1.1M BOM_ACCESS-S2 CMCC_SPS3.5 CWA_TCWA1Tv1.1`

```

ECCC_CANSIPsv3   HMC_SL-AV   JMA_MRI-CPS3   KMA_GLOSEA6GC3.2   METFR_SYS8
NASA_GEOS-S2S-2.1 NCEP_CFSv2 PNU-RDA_CGCMv2.0 UKMO_GLOSEA6 MGO_MGOAM2.4
)
MONTH=DEC   # JUN, JUL ...
FSEAS1=DJF # JJA, JASO ...
FSEAS2=MAM # SON, OND ...
YEAR=2024

SYEAR=( 1991 1991 1991 1993 1991 1991 1991 1991 1993 1993 1991 1991 1991 1993 1991 )
EYEAR=( 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 )
)

FLAG=( O O X X O O X O O X O O X X ): lead-time 6개월 여부

(생략)

```

위와 같이 해당 메인 프로그램은 처리할 모델, 예측 월, 계절, 해, hindcast 시작해, 종료해, 6개월 lead-time 여부 등을 설정하여 준다. 메인 프로그램의 설정을 통해 4개의 NCL 소스 프로그램에서 개별모델별 편차값을 산출하며, 최종산출물 경로를 아래와 같이 설정하여 준다.

<소스 프로그램: model\_fcst\_anom\_monthly.ncl 예시>

(중략)

```

; anomaly
month_number = 0
nfcstmon = dimsizes(fcst(:,0,0))
fcst(:,,:) = fcst(:,,:) - clim(0:nfcstmon-1,:,:)
var          = fcst(:,,:)

out_data_dir =
"/data02/OPER/AFS/RUN/Manage_Model_Anomaly/MME_IN_ANOM/FORECAST/" + MODEL +
"/" + FMONTH + "/" + FYEAR

```

(생략)

본 프로그램을 실행하면 위에서 지정한 경로에 참여모델별 편차값에 대한 예측 자료가 산출된다. 자료 병합 프로그램은 아래와 같이 CDO를 이용하여 hindcast 연별 예측 자료를 한 파일로 통합해주는 역할을 하며, 수행하고자 하는 예측 월, 계절, 해, 모델명을 설정하여 준다.

- 시스템 경로: \${AFS}/RUN/Manage\_Model\_Anomaly/
- 메인 프로그램: 02.homepage\_pro.sh

```
#!/bin/sh
```

```
SYEAR=2024
```

```
EYEAR=2024
```

```
MONTH=( DEC )
```

```
SEAS1=( DJF )
```

```
SEAS2=( MAM )
```

```
VAR=( t2m prec sst t850 z500 slp u850 v850 u200 v200 )
```

```
MODEL=( APCC_SCOPS BCC_CSM1.1M BOM_ACCESS-S2 CWA_TCWA1Tv1.1 CMCC_SPS3.5
```

```
ECCC_CANSIPsv3 HMC_SL-AV KMA_GLOSEA6GC3.2 JMA_MRI-CPS3 METFR_SYS8
```

```
NASA_GEOS-S2S-2.1 NCEP_CFSv2 PNU-RDA_CGCMv2.0 UKMO_GLOSEA6 MGO_MGOAM2.4)
```

```
year=$SYEAR
```

```
while [ $year -le $EYEAR ];do
```

(생략)

홈페이지 서버 전송 프로그램은 위의 최종 병합된 편차값 예측 자료를 홈페이지 서버로 전송하는 역할을 수행한다.

동적 웹 콘텐츠 구현을 위한 개별모델 확률 예측 생산 시스템은 2.5.1절에서와 같이 MME 참여모델에 대한 3/6개월 3분위 확률값에 대한 공간 분포와 함께 hindcast 기간의 확률값 변화 정보를 표출하기 위해 개별모델별 확률 정보를 산출하고 hindcast 확률 예측 자료를 통합하는 시스템을 구축하였다. 본 시스템은 3개의 메인 프로그램으로 구성되어 있으며, 개별모델 편차 자료 생산 시스템과 유사하게 3개의 메인 프로그램으로 구성되어 있으며, 개별모델별 hindcast 확률 정보 산출, 자료 병합, 홈페이지 서버 전송 순으로 이루어졌다. 이 메인 프로그램은 python과 설정 파일은 yaml로 구성되어 있으며, AFS 확률 예측 시스템을 활용하여 아래와 같이 포트란 so 파일과 패키지 python 파일로 이루어졌다.

- 시스템 경로: \${AFS}/RUN/Manage\_Model\_Prob/

- 메인 프로그램: HCST\_GAUS\_MODEL\_3month.py / HCST\_GAUS\_MODEL\_3month.yaml

HCST\_GAUS\_MODEL\_6month.py / HCST\_GAUS\_MODEL\_3month.yaml

```

- 모듈 소스 코드: ${AFS}/RUN/Manage_Model_Prob/my_package
calc_GAUS_MME_IN.py          calc_SCM_MME_IN_NCEP_SST.py.monthly
calc_SCM_MME_IN.py.monthly  make_season_month_name.py
nc_out_1_0_deg_PMME.py      nc_out_2_5_deg_PMME.py
read_MODEL_HIND_TIME.py     calc_SCM_MME_IN_NCEP_SST.py
calc_SCM_MME_IN.py          lsmask_1deg.nc          nc_out_1_0_deg_DMME.py
nc_out_2_5_deg_DMME.py

- Fortran 프로그램 소스 코드 : ${AFS}/RUN/Manage_Model_Prob/so_package
PMME.F    PMME.so    PROB.F    PROB.so    so_test.py    TERC.F    TERC_HIND.F
TERC_HIND_NCL.F  TERC_HIND_NCL.so  TERC_HIND.so  TERC_NCL.F  TERC_NCL.so
TERC.so

```

<설정부 수정: HCST\_GAUS\_MODEL\_3month.yaml 내용 예시>

DataList:

```

- Model_name      : APCC_SCOPS
  Variable_name   : prec
                  slp
                  t2m
                  t850
                  z500
                  sst
  Forecast_month  : JUN
  Forecast_year   : 2023
  Hindcast_year   : 1991
  Hindcast_eyear  : 2010
  Resolution      : 1.0
  Issued_date     : 15 Feb 2023

```

위에서와 같이 처리하고자 하는 모델명, 변수, 예측시간, 예측해, hindcast 기간, 해상도, 발행일 정보를 입력하면 메인 프로그램에서 사용자가 지정한 경로에 모델별로 확률예측자료가 산출되며, 동적 홈페이지 DB에서 읽어들이는 구조와 동일하게 설정됨에 따라 바로 전달이 가능하다.

기후전망 요약맵은 14개 지역별 단정예측 평균값 및 확률예측 평균값과 14개 지역별 hindcast 검증결과(ACC, ROC score)를 계산하는 프로그램으로 나누어진다. Figure 3.72는 기후전망 요약맵의 동적 웹 콘텐츠에 사용되는 14개 지역별 자료에 대한 설명을 나타낸다.

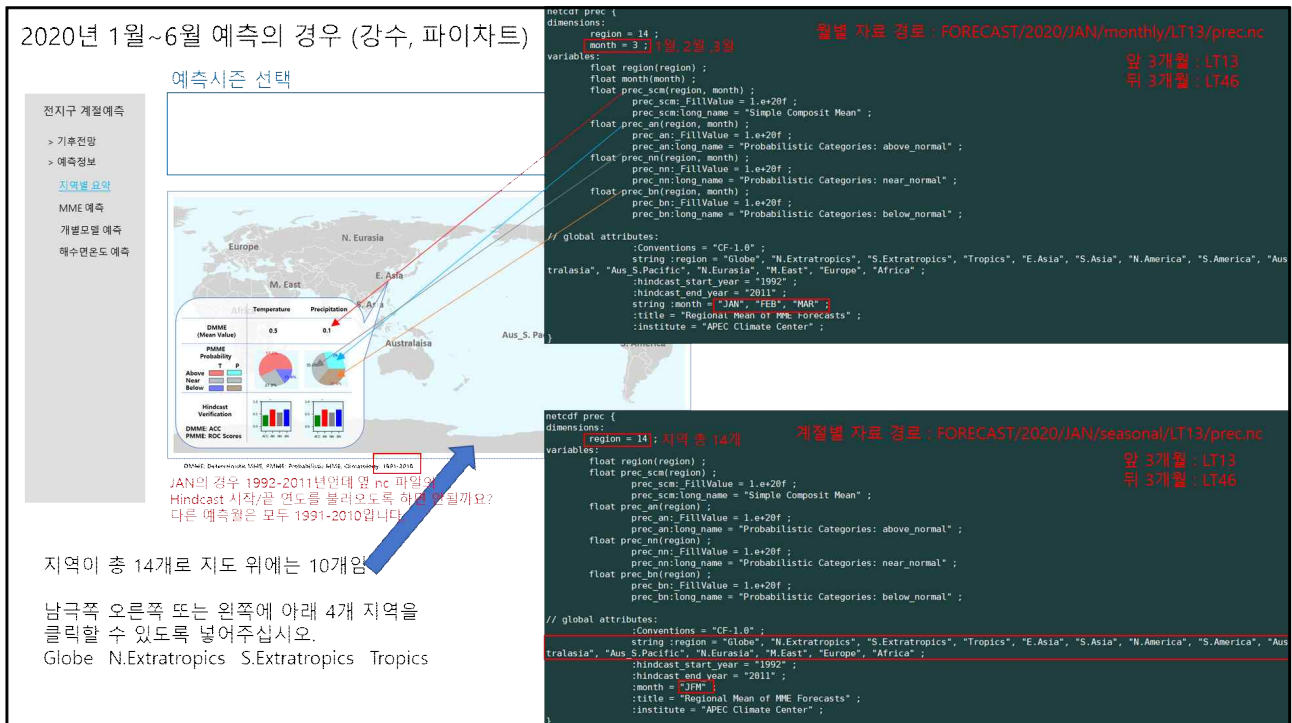


Figure 3.72. Explanation of input data for climate outlook summary.

### 3.5.2. 신규 홈페이지용 정적/동적 기후정보 웹 콘텐츠 생산 및 적용 테스트

신규 홈페이지의 정적 웹 콘텐츠는 기존 홈페이지의 구성을 대부분 가져오되 일부 페이지의 구성 및 기능을 수정 또는 개선하였다. 수정 및 개선된 사항은 기후전망 부분에 기온 및 강수 예측정보를 추가하고 BSIO 예측 및 검증 페이지에 과거 자료 조회가 가능하도록 기능을 추가하였다. 동적 웹 콘텐츠는 지역별 요약, 예측정보(MME 및 참여모델), 기후감시 지수와 anomaly 평균장으로 구성되며, 동적 기후정보 웹 콘텐츠 디지털 자료 생산 시스템을 통해 생산된 자료를 사용하여 구현되었다. Figure 3.73은 기존 홈페이지의 기후예측 정보 콘텐츠 예시를 나타내고 Figure 3.74는 신규 홈페이지의 예시를 나타낸다.

### 기후예측 정보

- + 동아시아 계절예측
- **전지구 계절예측**
- 예측정보
- 요약
- 기후전망
- 검증정보
- 예측검증
- 과거검증
- 계절예측 방법론
- 모델정보
- + 여름철 계절내진동 예측
- + 기후현황
- + 기후정보서비스
- + 기후정보 활용 현황

[홈](#) > [기후예측 정보](#) > [전지구 계절예측](#) > [예측정보](#) > [요약](#)

요약

관심 기간 선택  
2023년 | 12월 ~ 05월(+1년)

**전지구 계절예측 기후전망 (2023년 12월 ~ 2024년 05월)**  
2023년 11월 15일수 발표

**2023년 12월 - 2024년 2월 기온 적률예측 및 과거검증(H5S, Heidke Skill Score)**

- APCC ENSO 정보는 "엘니뇨(El Niño)"를 제시함. 최근 적도 태평양 해수면 온도는 평년보다 높았음. 2023년 12월-2024년 5월 동안 Niño3.4 지수는 약 2°C에서 서서히 감소하여 0.5°C 이상의 값을 유지할 것으로 전망되며 엘니뇨가 발생할 확률은 85% 이상일 것으로 예상됨.
- 2023년 12월-2024년 5월 동안 일부 지역을 제외한 전지구 대부분 지역의 기온은 평년보다 높을 확률이 매우 클 것으로 전망됨.
- 같은 기간 동안 적도 서태평양, 동아프리카 반도에서 사인도양에 이르는 지역의 강수는 평년보다 많고 북위 10°-20° 중앙 태평양, 열대 남대서양, 호주 북부의 강수는 평년보다 적을 것으로 전망됨.

기후전망

2023년 11월 15일수 발표  
 12월-2024년 5월 동안  
 은 85% 이상일 것으로  
 것으로 전망됨.  
 20° 중앙 태평양, 열대

- + 여름철 계절내진동 예측
- + 기후현황
- + 기후정보서비스
- + 기후정보 활용 현황

**기후전망 (2023년 12월 ~ 2024년 02월)**

Temperature at 2m for December 2023-February 2024

Precipitation for December 2023-February 2024

- 열대지역, 북태평양, 북극, 남태평양 남부, 인도양, 호주 북부의 기온은 평년보다 높을 확률이 매우 클 것으로 전망됨. 유라시아, 북아메리카, 남극의 기온은 평년보다 높을 확률이 다소 클 것으로 예상됨.
- 남태평양 남동부 일부 지역의 기온은 평년보다 낮을 확률이 다소 클 것으로 전망됨.
- 적도 서태평양, 북위 0°-5° 태평양, 동아프리카 반도에서 사인도양에 이르는 지역의 강수는 평년보다 많을 확률이 매우 클 것으로 전망됨. 북극, 유라시아, 남아메리카 남부의 강수는 평년보다 많을 경향이 전망됨.

CBS Data Source: ERSSTv5  
Base Period: 1991 - 2020  
© APEC Climate Center

Figure 3.73. Example of climate forecast web contents in current homepage.

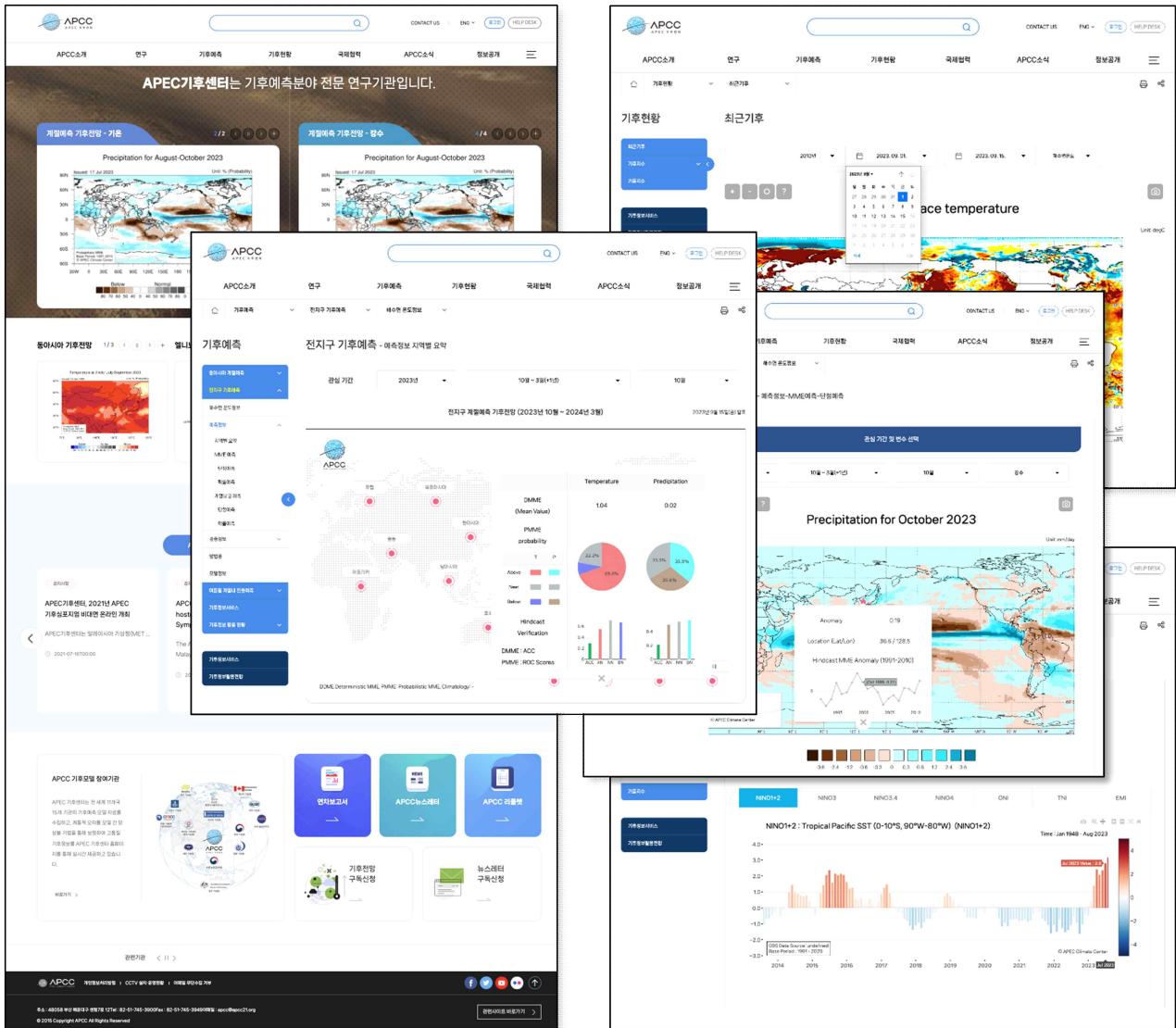


Figure 3.74. Example of climate forecast web contents in new homepage.

### 3.5.3. 기후평년값 동적 표출 서비스

신규 홈페이지 기후현황 최근기후 페이지에서는 해당 변수에 대한 편차값과 함께 기후평년값을 제공하고 있으며, 여기서 사용자가 기후평년기간, 시작일/종료일, 윤년 여부, 변수를 선택하면 동적으로 표출되는 전지구 기후평년값을 확인할 수 있다(Figure 3.75). 기후평년값 동적 표출 서비스는 2024년 10월부터 제공하고 있다.

기후현황

- 최근기후
- 분석값
- 기후평년값
- 기후지수
- 가뭄지수

최근기후 기후평년값

평년기간: 1991-2020    시작일: 9월 16일    종료일: 9월 23일    월: 예    변수: 지표기온    조회

Temperature at 2m

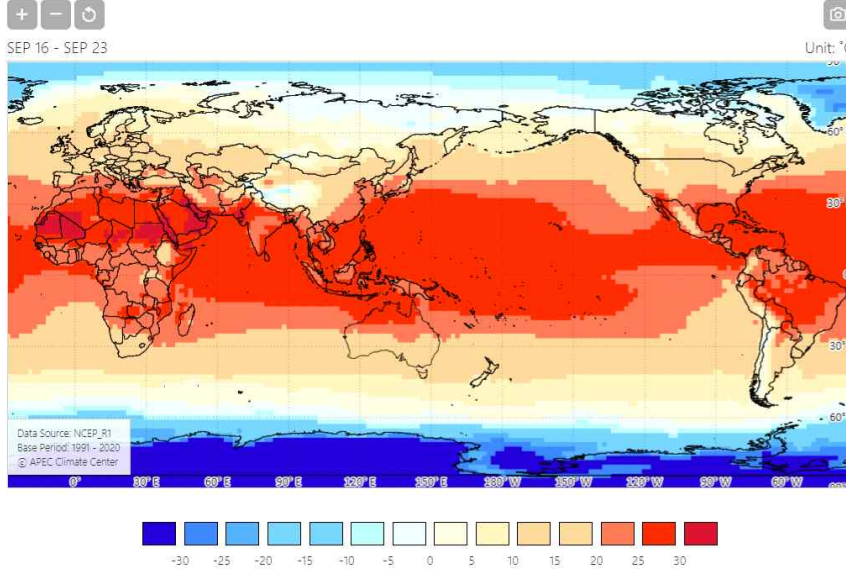


Figure 3.75. Climate standard normals in climate monitoring webpage.

## 3.6. MME 계절예측 특성 고려한 기온 계절예측 보정 및 현업활용 기반 마련

### 3.6.1. MME 기온의 계절예측 경향과 실제 기후변화 고려한 기온 예측 보정 방법 개발

실시간 예측 기간인 2013-2022년, 동아시아 기온의 장기경향을 월별로 보정 후, 10년간 평균한 기온 아노말리 예측 패턴을 보정 전 예측 패턴, 기온 관측과 비교하였다(Figures 3.76, 3.77). 보정 전 기온의 예측 패턴은 10년 평균적으로 온난하게 예측하였으나 이에 비해 실제 관측(NCEP2)은 예측과 달리 온난하지만은 않고, 육지에서도 한랭한 지역이 존재하기에 동아시아는 실제로 온난화 양상이 지역별로 상이한 것을 보인다. 그리고 선형추세를 보정하였을 때 지역별로 관측과 유사하게 보정이 된 것을 확인하였다. 특히 4-6월은 예측 스킬이 많이 향상되었는데, 실제 관측에서와 같이 티벳 고원을 포함한 육지 일부분에서 기온이 한랭하도록 보정된 것이 향상에 기여한 것으로 판단된다. 또한 보정 전후 단정예측, 확률예측의 PCC, ROC 스킬을 10년 평균하여 비교했을 때도 보정 후 스킬이 안정적으로 향상되는 것을 보였고 이로써 보정이 예측 스킬 측면에서도 장기적으로 유의미하게 긍정적 역할을 하는 것을 확인하였다.

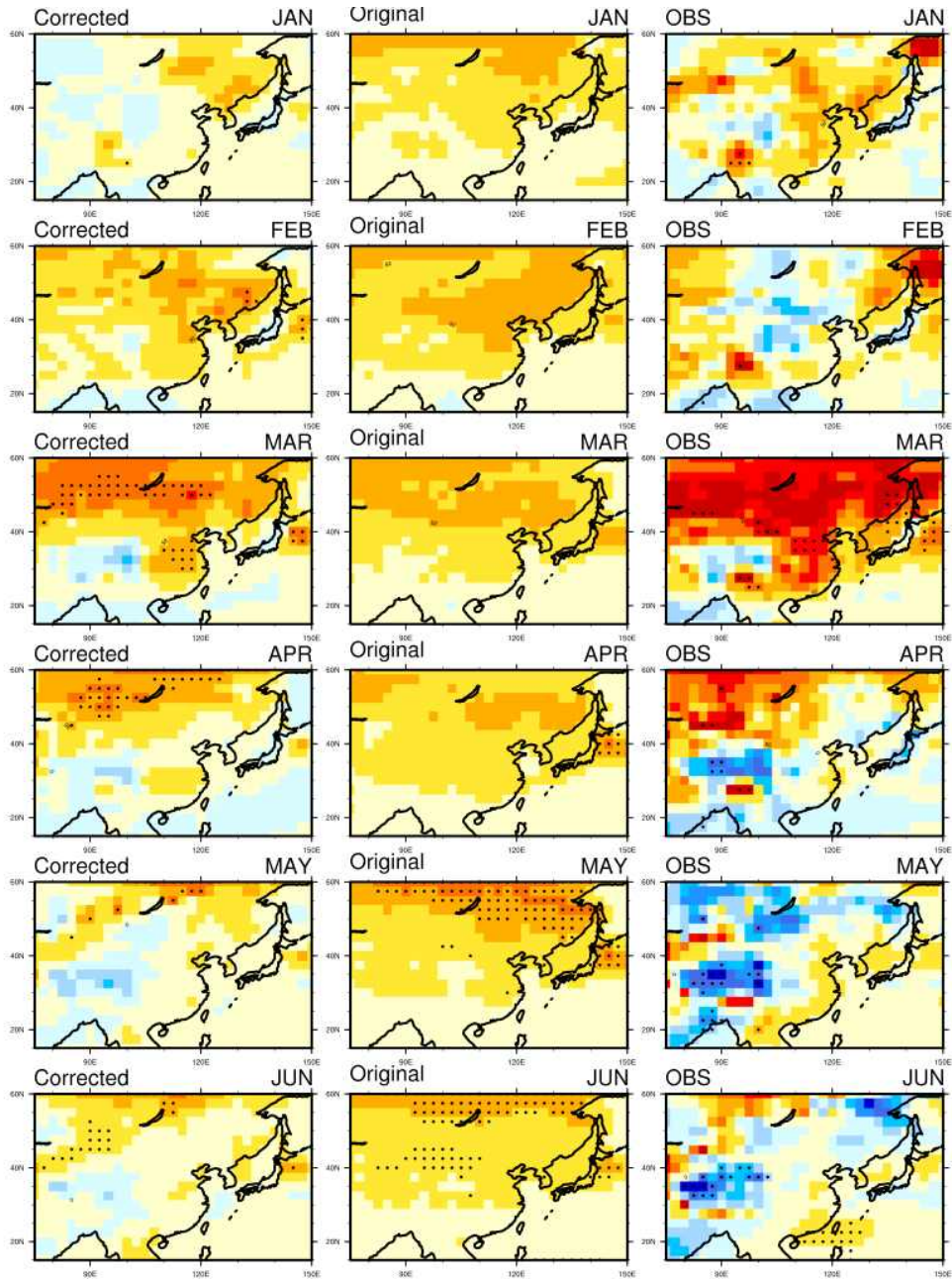


Figure 3.76. Monthly (January–Jun) spatial patterns of (left) corrected forecast, (middle) original forecast, and (right) observation of 2-m temperature anomalies averaged from 2013 to 2022 (dot: 10 percentile of both side, from Chap. 3.6 in 김유진 등, 2023).

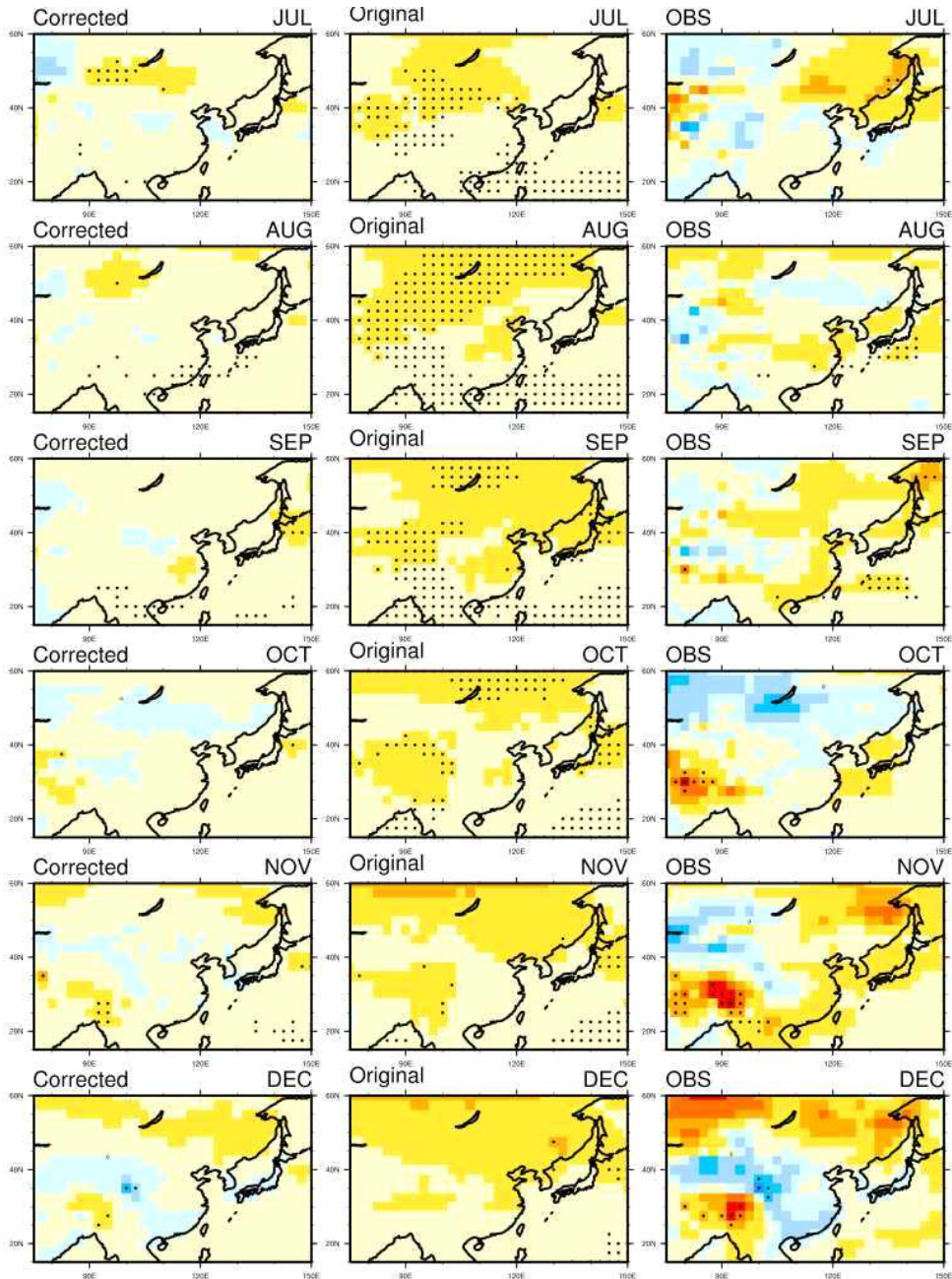


Figure 3.77. Monthly (July-December) spatial patterns of (left) corrected forecast, (middle) original forecast, and (right) observation of 2-m temperature anomalies averaged from 2013 to 2022 (dot: 10 percentile of both side, from Chap. 3.6. in 김유진 등, 2023)

ERA5가 기준자료가 되었을 때도 정도의 차이는 있지만 대체적으로 장기경향 보정은 보정 후 예측 패턴과 예측 스킬에 긍정적 영향을 끼친다. APCC MME는 2023년부터 고해상도 ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) 계절예측 자료를 시험 생산하고 있는데, 이를 검증하기 위한 기준 관측 자료로 ERA5를 사용한다. 이에, 동아시아 MME 기온의 장기경향 보정 또한 ERA5를 기준으로 변경하였다. 이에 ERA5와 NCEP2 모델의 기후기간 기온 아노말리와 선형추세를 비교하였다 (Figure 3.78). ERA5는 NCEP2에 비해 온난화 경향이 좀 더 강하다. NCEP2에서는 육지 일부 지역에서 오히려 음의 선형추세가 나타나는 지역이 있는데, ERA5는 모든 지역이 양의 선형추세가 나타나고, 특히 아열대 서태평양 지역 기온의 온난화가 강하게 나타난다. 그럼에도 모델의 온난화가 관측에

비해 강하게 나타나기 때문에 ERA5로 기준을 변경하여도 온난화를 보정할 필요성이 있다.

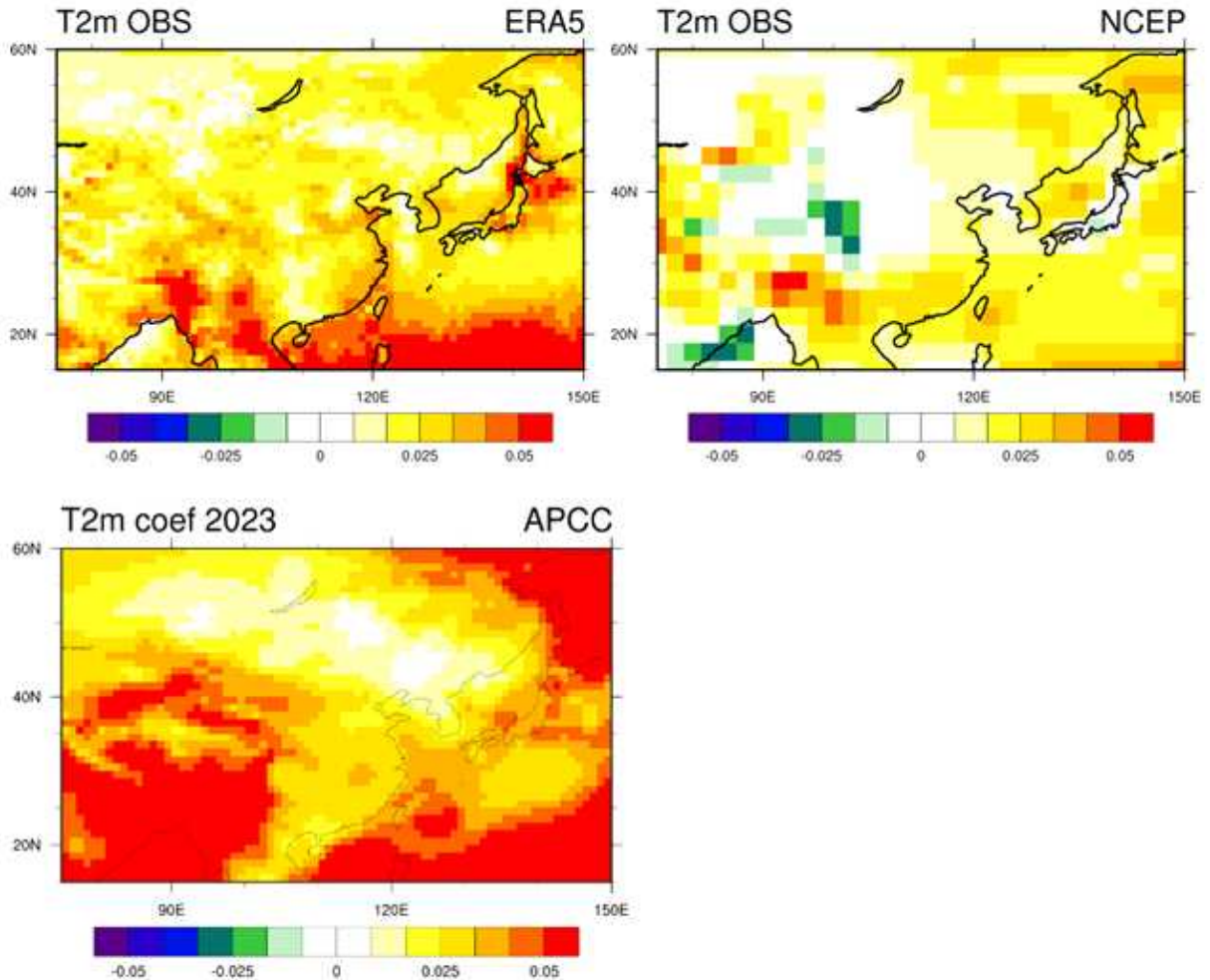


Figure 3.78. Linear trend of 2-m air temperature from (upper) observations, (left) ERA5, (right) NCEP2, and (lower) model during 1991–2010. Model’s linear trend are mean of individual model’s linear trend produced at 2023.

실시간 예측기간인 2013년부터 관측자료와 확률예측자료를 비교해보면, ERA5는 NCEP2 자료에 비해 동아시아 지역 기온이 높게 기록되었다 (Figure 3.79). 또한 북반구, 열대, 전구에서도 NCEP2 보다는 높은 기온이 나타나는 경향이 있다. 하지만 ERA5와 PMME를 비교하면, 여전히 동아시아 지역은 MME 예측은 관측에 비해 높은 기온을 예측하며, 보정의 필요성이 보인다. 따라서 과거재현기간 기간 기온의 선형추세, 실시간 예측기간의 기온의 삼분위 예측을 비교하면 온난화 정도는  $NCEP2 < ERA5 < \text{모델 예측}$ 임을 알 수 있고, ERA5 기준으로도 장기간 기온 경향 보정의 여지가 있다고 판단된다.

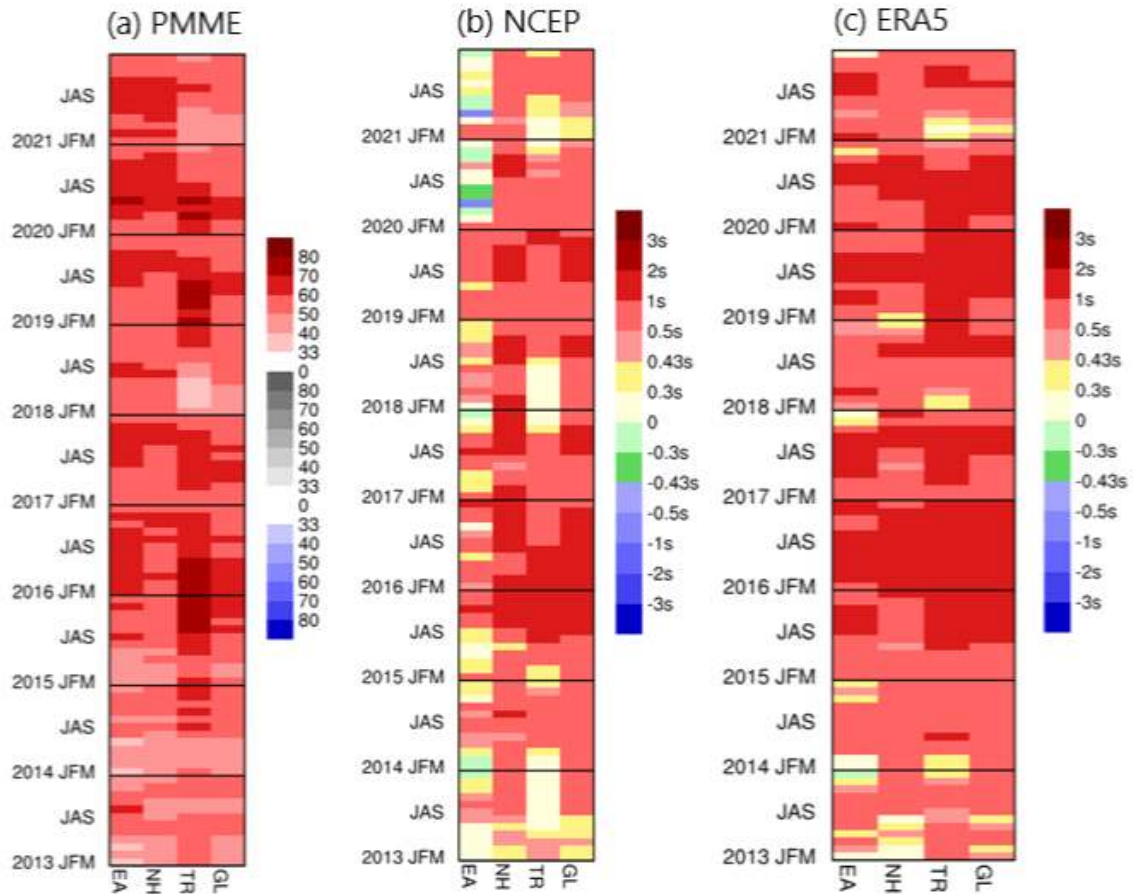


Figure 3.79. Seasonal mean of (a) probability forecasts of T2m PMME above normal category, (b) normalized anomalies of T2m NCEP2 observation, and (c) normalized anomalies of T2m ERA5 observations, averaged East Asia, Northern Hemisphere, tropical region and the globe in the real-time forecast period.

Figure 3.80은 ERA5 기준 2023년 고해상도 기온 예측의 보정계수,  $\alpha$ 의 계절별 평균이다. 보정계수는 모델의 선형추세를 제거하고, 관측의 것을 더한 값으로 실제 장기경향 보정의 방향과 정도를 알 수 있다. 계절별 보정계수 패턴을 살펴보면 봄철을 제외하고 다른 계절들에 모두 음의 방향으로 보정이 되었고 특히 육지에서 많은 보정이 되었다. 해양은 모델, 관측 모두 양의 선형추세가 강하여 보정의 정도는 작았다.

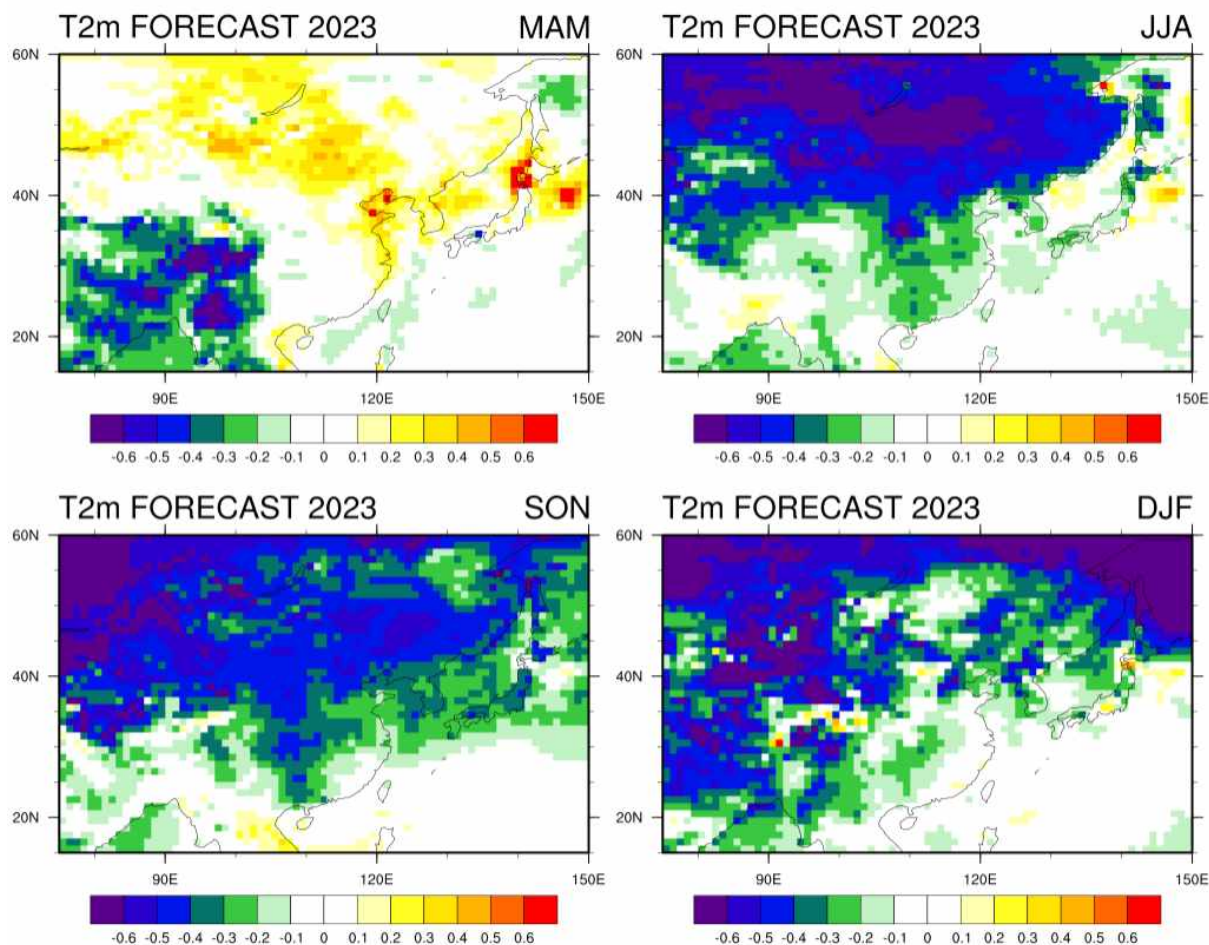


Figure 3.80 Seasonal mean correction coefficient for linear trend correction.

ERA5 기준 보정 전후, 단정예측, DMME의 ACC 스킬을 월별로 2014-2023년 기간 평균하여 Figure 3.81에 나타내었다. 검정색으로 나타나는 스킬의 보정전후 차이는 4, 5, 6, 8, 11, 12월에 향상이 나타난다. 이는 NCEP2 기준 보정 보다는 보정의 효과가 다소 떨어지지만, ERA5 기준 보정 역시 스킬의 향상이 나타나는 시기인 4, 5, 6, 8, 11, 12월에 유용한 자료가 될 수 있을 것이라 판단한다.

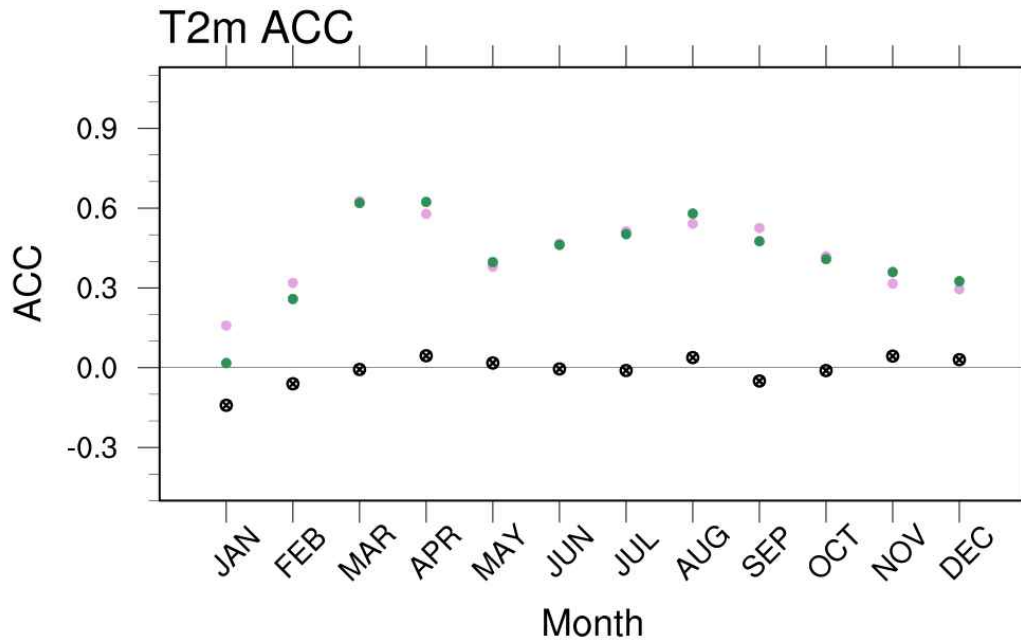


Figure 3.81. Monthly ACC skills of original (purple) and corrected (green) T2m and differences (black) between them. Monthly 10-years (2014-2023) ACCs are averaged.

### 3.6.2. 자동화 시스템 구축

Figures 3.82, 3.83은 보정 프로그램을 실행 후 얻을 수 있는 그래픽 자료이다. 총 30장의 그림을 생산하여 보정 전후 예측의 차이를 그래픽 자료로 보여준다. PPT 슬라이드 두 장에 그림들을 배열하는데, 첫 번째 슬라이드는 예측시점의 보정전후 기온 예측 비교, 두 번째 슬라이드는 예측 시점 전 10년 동안의 보정 전후 기온 예측과 관측의 평균 비교로 요약할 수 있다.

2024  
SON

DMME ORIG

DMME CORR

PMME ORIG

PMME CORR

ALPHA

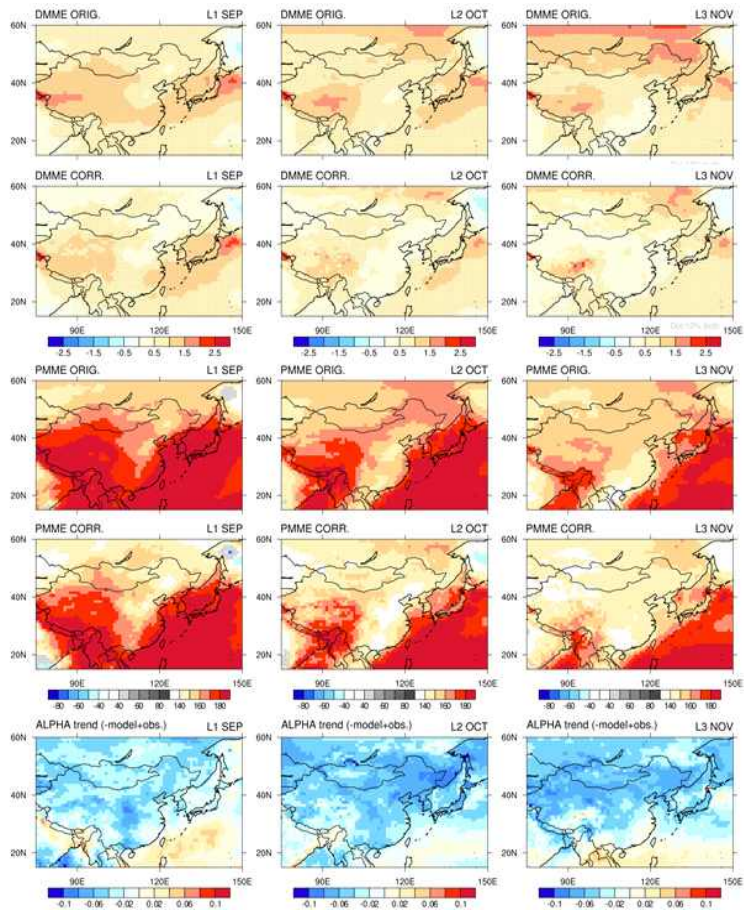


Figure 3.82. Graphical information of corrected T2m forecasts in East Asia for 2024 SON season. (first row) Original DMME forecasts, (second row) corrected DMME forecasts, (third row) original PMME forecasts, (fourth row) corrected PMME forecasts, and (fifth row) correction coefficients,  $\alpha$ , produced at (left) one-month, (middle) two-month, and (right) three-month lead.

2014-2023  
SON

DMME ORIG

DMME CORR

PMME ORIG

PMME CORR

OBS

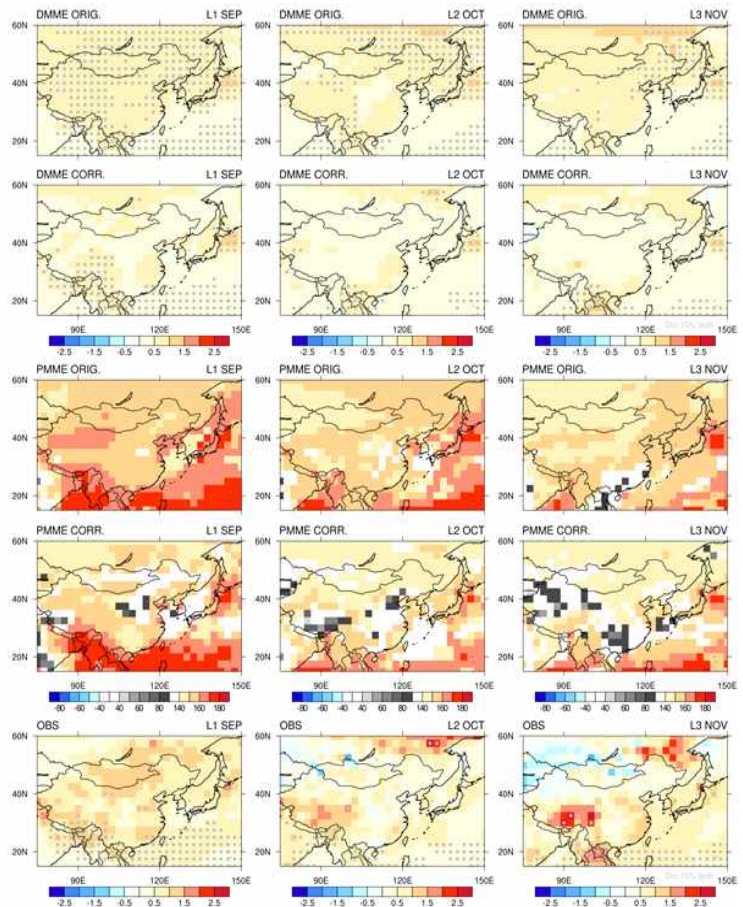


Figure 3.83. Graphical information of corrected T2m forecasts in East Asia for 2024 SON season. Monthly 10-year-averaged (first row) Original DMME forecasts, (second row) corrected DMME forecasts, (third row) original PMME forecasts, (fourth row) corrected PMME forecasts, and (fifth row) correction coefficients,  $\alpha$ , produced at (left) one-month, (middle) two-month, and (right) three-month lead.

## 3.7. 고해상도 MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축

### 3.7.1. 국제협력을 통한 계절내예측 운영 기반체계 구축

#### 3.7.1.1. 국제협력을 통한 계절내예측 자료 확보

APCC는 계절예측정보를 제공해주는 모델제공기관의 자료 생산·제공 현황 및 검증 결과 공유를 통해 개별참여 모델을 정확히 파악하고, APCC MME 자료제공기관에 대한 소속감 고취 및 자발적 참여 유도를 위해 2014년부터 APCC MME 모델제공기관 회의(MPM, Model Providers' Meeting)을 2년마다 정기적으로 개최하고 있다. 2023년에는 제5차 회의로 각 기관이 예측시스템 현황 및 최근 개선 사항을 공유하고 APCC MME 예측시스템 개선 방안 논의를 위해 8월 29일~31일까지 부산에서 개최되었다(Figure 3.84). 이번 회의에서는 APCC를 포함해 총 10개 기관(호주/미국/러시아/캐나다/일본/대만/한국 기상청, APEC 기후센터, 이탈리아 유럽지중해 기후변화센터, 한국 국립농업과학원)에서 참여하였다.

제5차 회의에서는 각 기관의 기후예측시스템 현황 발표와 개선방안 등이 논의 되었다. 현황 발표에서는 APCC MME 계절예측에 참여하고 있는 현재 모델 버전에 대한 설명, 모델의 예측성 평가 결과, 최근 모델 개선사항 및 향후 계획이 공유되었고, 개선방안에서는 데이터 활용 정책과 MME 계절내예측 정보 생산을 위한 데이터 제공 가능 여부도 함께 논의 되었다. 특히, APCC MME 계절내예측시스템 구축을 위한 계획 공유 및 계절내예측자료 제공에 대한 적극적인 참여를 독려하여 추가 기후정보서비스에 대한 협력체계를 강화하고자 하였다. 이를 위해 APCC 계절내예측의 중/장기 계획을 공유하고, 회원기관으로부터 계절내예측 자료제공을 요청 하였다. 그 결과, 4개 기관(러시아/호주/미국/캐나다 기상청)은 계절내예측자료 제공에 동의하였고, 이탈리아 유럽지중해 기후변화센터는 향후 이음새없는 예측자료 생산예정이며 이후 자료 제공에 동의하였다. 일본 및 한국 기상청은 내부 논의를 거쳐 자료제공 동의 여부를 추후 회신할 예정이고 APCC 또한 2024년에 SCoPS를 활용한 계절내예측자료 시범 생산을 계획 중임을 공유하였다. 이번 회의를 통해 4개 기관 자료제공 동의, 2개 기관 자료제공 예정, 2개 기관 내부 논의 후 자료제공 여부 결정이라는 성과를 이루어 냈다.

제5차 모델제공기관 회의의 계절내예측 자료제공에 대한 후속조치로 회의에 참여하지 못한 자료제공기관(중국/영국/프랑스 기상청, 미국 해양대기청, 러시아 중앙지구물리연구소)에게도 회의록과 함께 자료제공에 대한 요청 서한을 발송하였다. 그 결과 2024년에 APCC를 포함한 3개 기관(APCC, HMC, NCEP)으로부터 계절내예측 자료를 수집하고 있으며, 호주 BOM의 경우 신규 슈퍼컴퓨터에서 계절내예측 자료를 생산 중으로 샘플자료를 제공받았으며 향후 자료제공에 대한 협의를 진행 예정이다. Figure 3.85는 14개 APCC 모델제공기관을 나타내며 빨간색 표시는 앞에서 말한 4개 기관을 나타낸다.



Figure 3.84. The 5th APCC Multi-Model Ensemble Model Providers' Meeting(Aug. 29- Sep. 1, 2023, Busan).

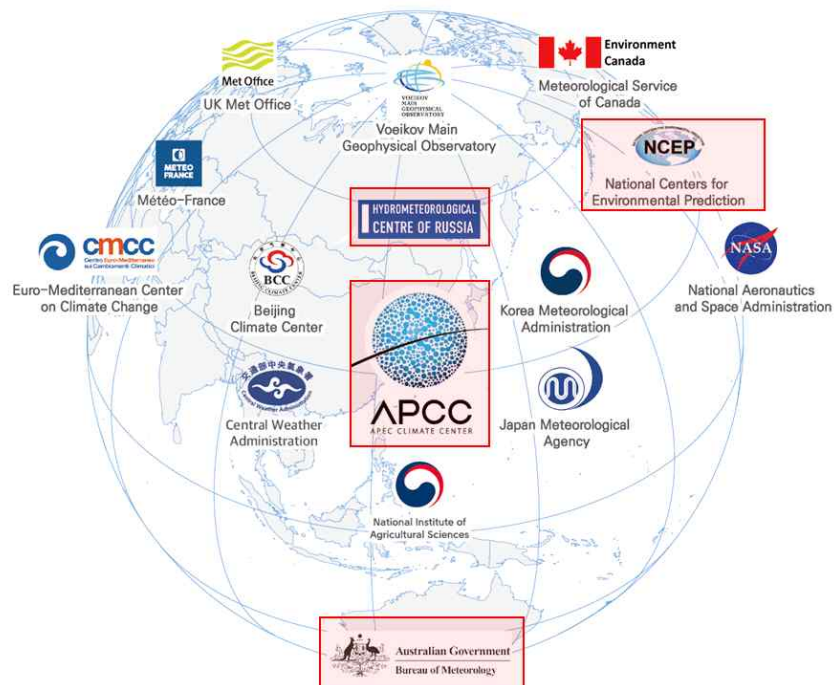


Figure 3.85. APCC MME Model Providers. The red box denotes an institute that has agreed to provide the subseasonal data.

### 3.7.1.2. MME 계절내예측 Pilot 시스템 구축

2023년에 MME 계절내예측 운영 기반체계를 구축하기 위해 우선적으로 WMO S2S 자료를 활용하여 특성이 상이한 개별모델의 전처리 및 MME 수행을 위한 Pilot 시스템을 개발하였다 (Figure 3.86). 시스템 개발에 사용된 언어는 Python version 3이고 개별모델 전처리와 MME 수행을 위한 기관명, 변수명, 예측일 등의 입력정보를 받기 위해 Yaml을 사용하였다. 이것은 현재 APCC에서 운영 중인 MME 계절예측시스템과 동일한 것으로 향후 상호 코드 호환성과 효율성을 고려해 시스템을 구축하였다. 개별모델 전처리시스템에 사용된 자료는 Table 3.17의 ECMWF, Montreal, Seoul, Exeter, Washington 5개 GPC (Global Producing Centres)에서 제공하는 계절내예측으로 2022년도 forecast와 hindcast이고, 사용된 공통변수는 prec, olr, t2m, sst, z500, u850, u200, v850, v200이며, 자료 해상도는 모두  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  이다. MME 예측시스템에는 기존 MME 계절예측에 사용된 기법과 동일한 단정(deterministic) 예측과 확률(probabilistic) 예측 기법을 적용하였다. Pilot 시스템을 통해 생산된 2022년 7월 4일부터 25일까지 1~4주에 대한 지표기온의 관측값과 예측결과(단정 및 확률 예측)를 Figure 3.87에 나타내었다.

Table 3.17. Description of WMO S2S models in pilot system.

CPC Name	Center	Data Resolution	Forecast Frequency	Forecast Time range	Forecast Ens. Size	Hindcast Frequency	Hindcast Ens. Size	Hindcast period
ECMWF	ECMWF	1.5°	2/week (Mon, Thu)	0-46	51	2/week (Mon, Thu)	11	2002-2016
Exeter	UKMO	1.5°	Daily	0-60	4	4/month (1, 9, 17, 25)	7	1993-2016
Montreal	ECCC	1.5°	Weekly (Mon, Thu)	0-32	21	weekly (Thu)	4	2001-2020
Seoul	KMA	1.5°	Daily	0-60	4	4/month (1, 9, 17, 25)	3	1993-2016
Washington	NCEP	1.5°	Daily	0-44	16	1/week (Thu)	4	1999-2010

### MME Subseasonal Forecast Pilot System (Preprocessing/MME/Graphics)

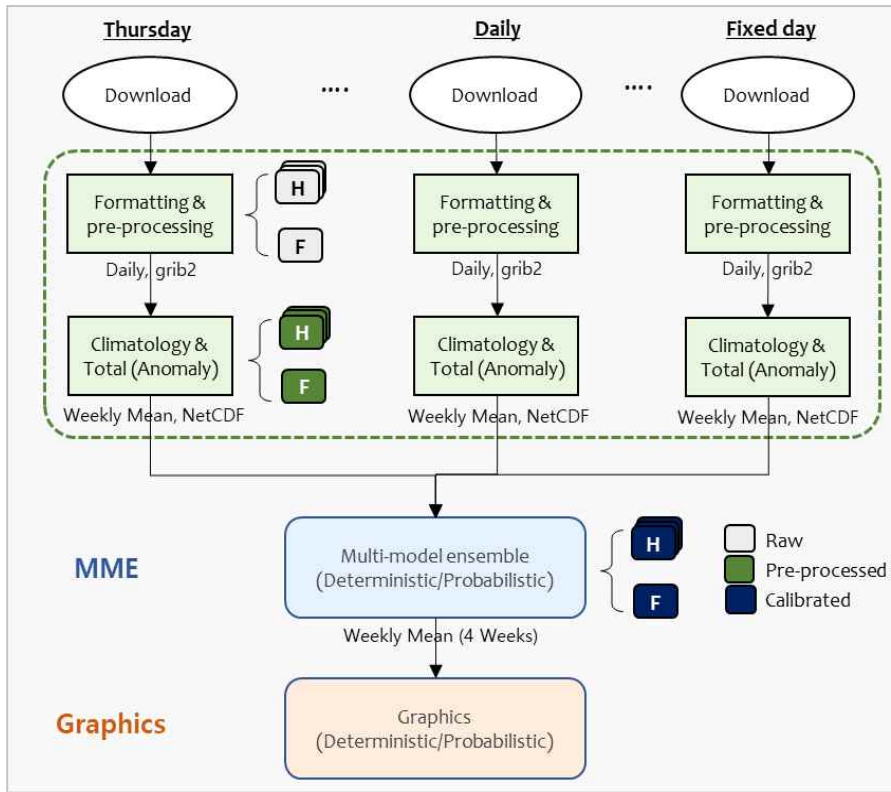


Figure 3.86. MME subseasonal forecast procedures in pilot system.

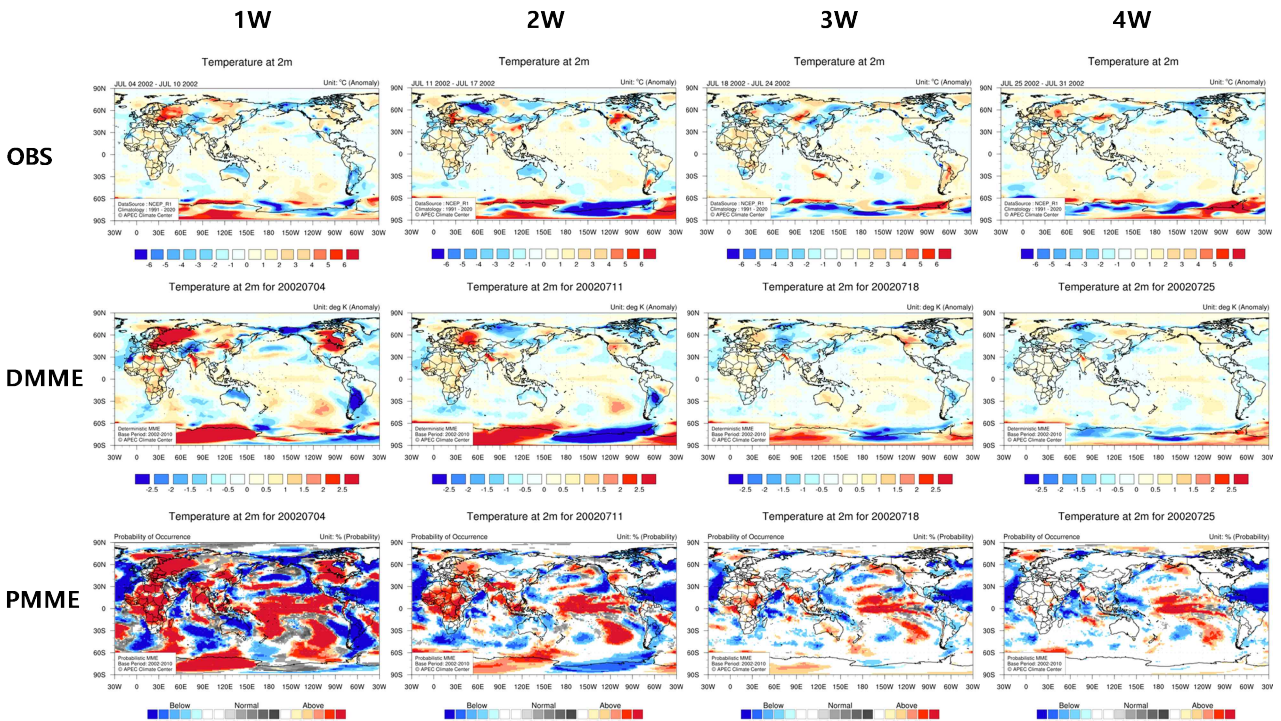


Figure 3.87. Observations and 1~4 weeks subseasonal (deterministic and probabilistic) MME forecasts of temperature at 2m during 4~25 July 2022.

2024년에는 제5차 모델제공기관 회의에서 논의되어 계절내예측 자료제공 요청에 동의한 3개 기관의 개별모델 자료와 ECMWF의 개별모델 자료를 사용하여 기존에 구축된 pilot 시스템을 개선하였다. 시스템 개선에 사용된 계절내예측 자료는 2024년도 기준 forecast와 hindcast이고(Table 3.18) 개별모델의 공통변수는 t2m, sst, maxt2m, mint2m, prec, olr, mslp, t850, u200, u850, v200, v850, z200, z500의 총 14종이다. 자료 해상도는 APCC와 HMC는  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  이고, ECMWF와 NCEP는  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  이다. 4개 기관의 개별모델 계절예측 자료 수집은 APCC는 자체 생산, HMC는 APCC ftp 서버로 업로드, ECMWF와 NCEP은 ECMWF의 S2S archive에서 Python API를 사용하여 다운로드하게 된다(<https://apps.ecmwf.int/datasets>) (Figure 3.88). 단, NCEP 실시간 forecast의 경우에는 ECMWF S2S archive로의 업로드 지연으로 NCEP ftp 서버로부터 직접 다운로드를 수행하게 된다(<http://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/S2S/S2SRT>).

Table 3.18. Description of APCC MME participating models in pilot system.

Center	Model Name	Data Resolution	Forecast Frequency	Forecast Time range	Forecast Ens. Size	Hindcast Frequency	Hindcast Ens. Size	Hindcast period
APCC	SCOPS	$1.0^{\circ}$	Weekly (Tue)	d 0-60	10	6/month (1,5,10,15,20,25), fixed	5	2003-2016
ECMWF	CY49R1	$1.5^{\circ}$	Weekly (Thu)	d 0-46	101	16/month (1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23,25,27,29,31 excluding 29 February) on the fly	11	past 20 years (2004-2023)
HMC	RUMS	$1.0^{\circ}$	Weekly (Tue)	d 0-46	41	Weekly (Tue), on the fly	11	1991-2020
NCEP	CFSv2	$1.5^{\circ}$	Weekly (Thu)	d 0-44	16	Daily, fixed	4	1999-2010

```

#!/usr/bin/env python

import os
from ecmwfapi import ECMWFDataServer

#=====

# Real-time forecast date ---
fdate = "2024-11-07"
#-----

date_split = fdate.split('-')
YYYY = date_split[0]
MM = date_split[1]
DD = date_split[2]

YYYYMMDD = date_split[0] + date_split[1] + date_split[2]

# Output directory
out_dir = "/data02/songbg/S2S_DATA/ECMWF/FORECAST/" + YYYY + "/" + YYYYMMDD + "/"
os.makedirs(out_dir, exist_ok=True)

#=====

server = ECMWFDataServer()

# Mean Sea Level Pressure (MSLP)
server.retrieve({
    "class": "s2",
    "dataset": "s2s",
    "date": fdate,
    "expver": "prod",
    "levtype": "sfc",
    "model": "glob",
    "origin": "ecmf",
    "param": "151",
    "step": "0/to/1104/by/24",
    "stream": "enfo",
    "time": "00:00:00",
    "type": "cf",
    "target": out_dir + "S2S_ECMWF_forecast_" + YYYYMMDD + "_cf_" + "MSLP" + ".grib"
})

```

Figure 3.88. Python API data download program for ECMWF real-time Forecast.

MME 계절내예측의 전단계로 각 개별모델 자료에 대한 전처리(표준화) 과정을 수행하게 된다. 이를 위해 서로 다른 개별모델 계절내예측 일별 자료의 구성 형식을 파악하여 전처리 프로그램을 작성하여야 한다. Figure 3.89에서 3.92는 APCC, ECMWF, HMC, NCEP의 4개 개별모델에 대한 계절내예측 14개 변수의 일별 시간 스텝을 나타낸다. 일반적으로 기온(t2m)과 해수면 온도(sst)는 일평균(daily average)으로, 일최고/일최저기온(maxt2m, mint2m)은 6시간 간격의 최고/최저기온을 생산 후 일최고/일최저를 선택하여 사용하게 된다. 강수(prec)와 상향장파복사(olr)는 누적값으로 생산하게 되며, 강수의 경우 모델에 따라 6시간 또는 24시간 누적값을 제공하며, 상향장파복사의 경우에는 24시간 누적값을 제공하게 된다. 그리고 해면기압(mslp)은 24시간 간격으로, 나머지 pressure level 변수도 24시간 간격으로 제공하게 된다.

APCC 기후예측모델은 예측자료 생산 후처리 과정을 통해 자료를 생산하게 되며, 이 후처리를 통해 14개 변수 모두 동일한 60개의 시간 스텝을 가지게 된다. ECMWF는 기온(t2m)과 해

수면온도(sst)는 24시간 평균값, 일최고/일최저기온(maxt2m/mint2m)은 6시간 간격의 max/min 기온으로 여기서 최고/최저를 선택하여 사용하며, 강수(prec)는 6시간 스텝으로 24시간 누적값을 사용하며 상향장파복사(olr)는 24시간 누적값을 사용한다. 그리고 해면기압(mslp)과 pressure level 변수(t850, u200, u850, v200, z200, z500)는 모두 24시간 순간값을 사용한다. HMC의 경우 기온(t2m)과 해수면온도(sst)는 24시간 평균값, 일최고/일최저기온(maxt2m/mint2m)은 6시간 간격의 max/min 기온 중 선택된 최고/최저값, 강수(prec)와 상향장파복사(olr)는 24시간 누적값, 해면기압(mslp)과 pressure level 변수(t850, u200, u850, v200, z200, z500)는 모두 24시간 순간값을 사용한다. NCEP은 ECMWF와 유사하게 기온(t2m)과 해수면온도(sst)는 24시간 평균값, 일최고/일최저기온(maxt2m/mint2m)은 6시간 간격의 max/min 기온으로 여기서 최고/최저를 선택하여 사용하며, 강수(prec)는 6시간 스텝으로 24시간 누적값을 사용하며 상향장파복사(olr)는 24시간 누적값을 사용한다. 앞에서 기술한 자료 형식은 모두 APCC로 수집되었을 때의 경우로(기관마다 후처리 방법이 다름) 실제 모델에서 생산된 원자료 형식과는 차이가 있을 수 있다.

### APCC Forecast/Hindcast

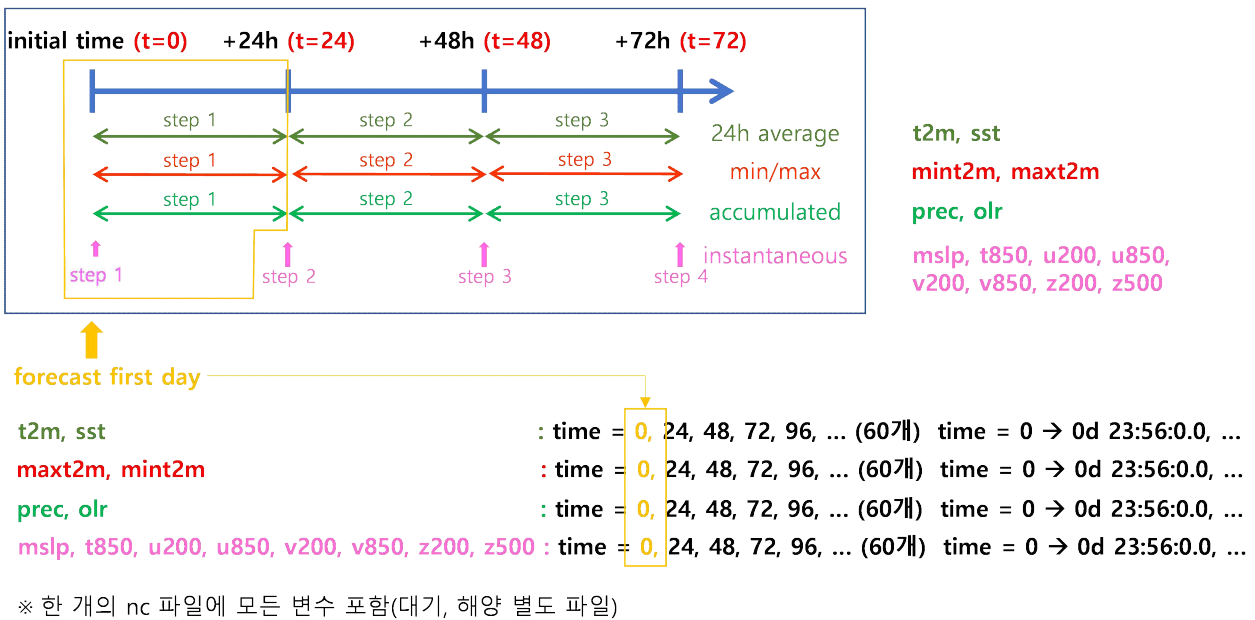
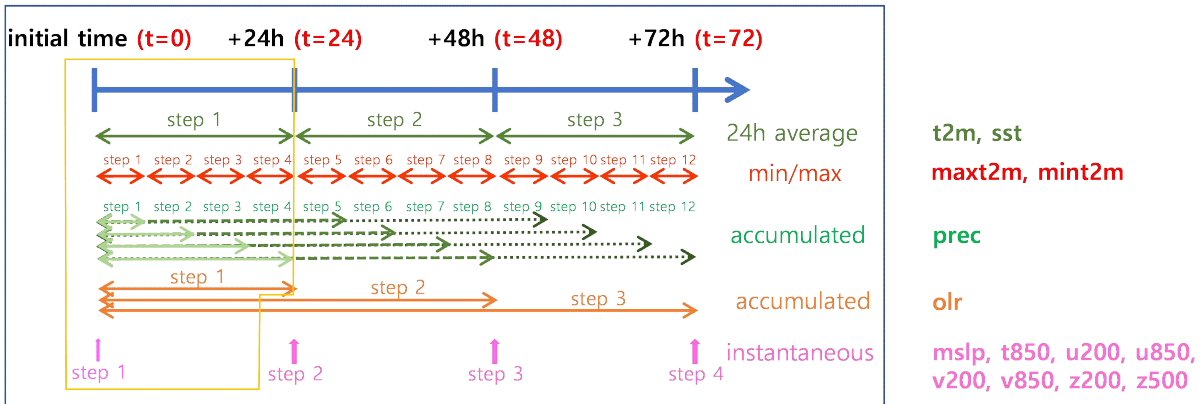


Figure 3.89. Subseasonal forecast/hindcast dataset of APCC.

## ECMWF Forecast/Hindcast



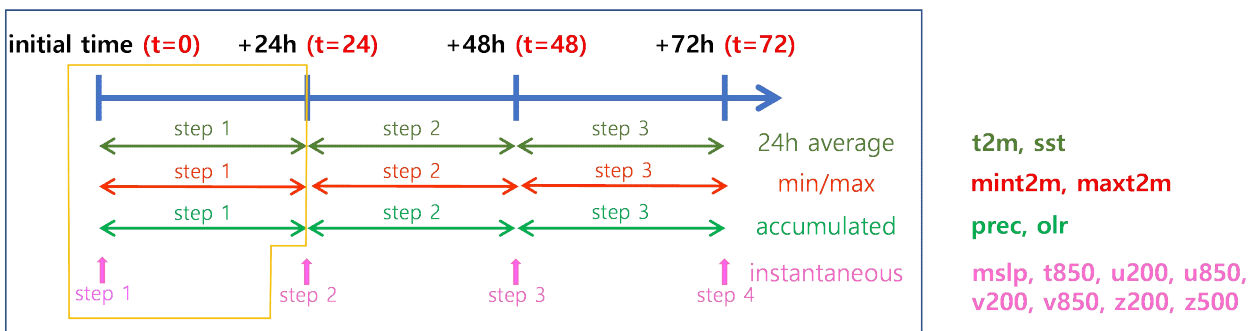
↑ forecast first day

t2m, sst	: forecast_time0 = 1d, 2d, 3d, 4d, ... (46개)	1d: 0~24, ...
maxt2m, mint2m in the last 6 hours	: forecast_time0 = 6, 12, 18, 24, ... (184개)	max/min
prec	: forecast_time0 = 0, 6, 12, 18, 24, ... (185개)	24-0, 48-24, ...
olr	: forecast_time0 = 0, 24, 48, 72, ... (47개)	24-0, 48-24, ...
mslp, t850, u200, u850, v200, v850, z200, z500	: forecast_time0 = 0, 24, 48, 72, ... (47개)	

※ 한 개의 grib 파일에 하나의 변수 포함, 따라서 변수별 forecast\_time0가 다름

Figure 3.90. Subseasonal forecast/hindcast dataset of ECMWF.

## HMC Forecast/Hindcast



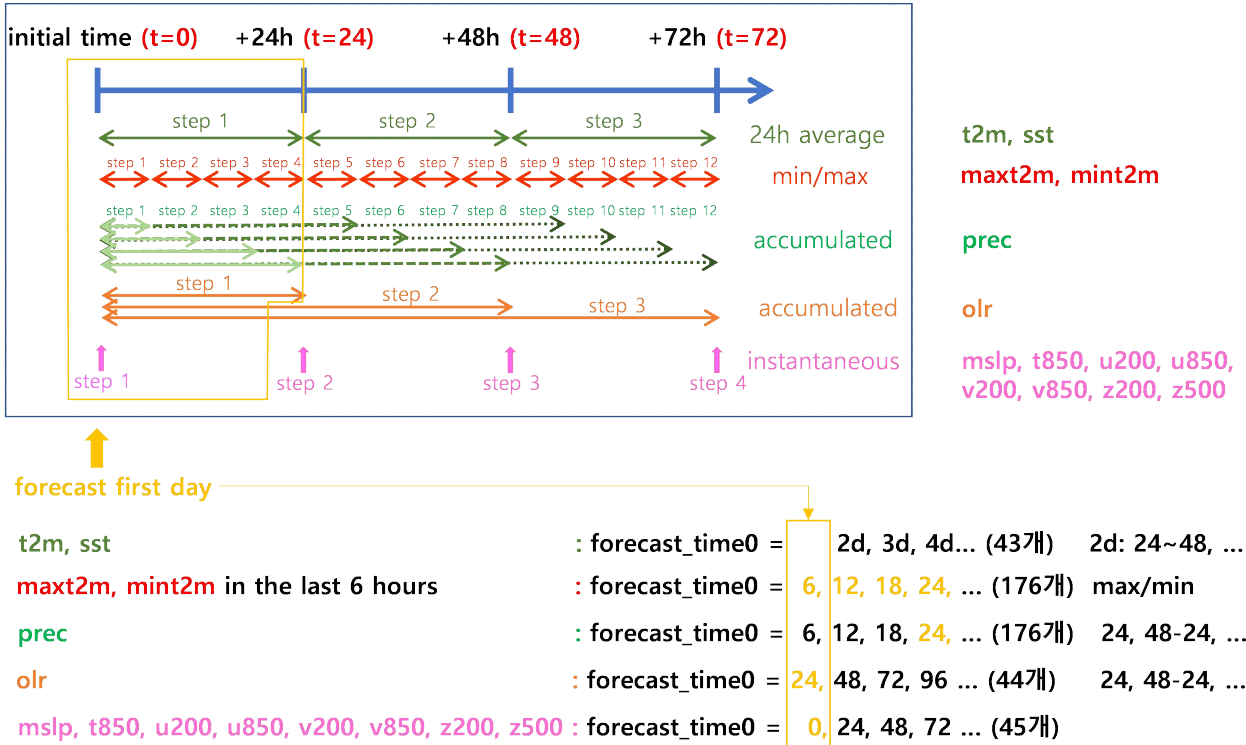
↑ forecast first day

t2m, sst	: forecast_time1 = 1d, 2d, 3d, 4d, ... (46개)	1d: 0~24, ...
maxt2m, mint2m	: forecast_time1 = 1d, 2d, 3d, 4d, ... (46개)	1d: 6~24, ...
prec, olr	: forecast_time1 = 24, 48, 72, 96, ... (46개)	
mslp, t850, u200, u850, v200, v850, z200, z500	: forecast_time0 = 0, 24, 48, 72, ... (47개)	

※ 한 개의 grib 파일에 모든 변수 포함

Figure 3.91. Subseasonal forecast/hindcast dataset of HMC.

## NCEP Forecast/Hindcast



※ 한 개의 grib 파일에 하나의 변수 포함, 따라서 변수별 forecast\_time0가 다름

Figure 3.92. Subseasonal forecast/hindcast dataset of NCEP.

각 개별모델의 forecast와 hindcast의 초기예측일(Initial date)은 앞에서 기술한 Table 3.18과 같이, APCC와 HMC의 forecast 초기예측일은 MME 적용 예측일(MME forecast date)인 월요일 대비 지난 화요일(last Tuesday)이고 ECMWF, NCEP은 MME 적용 예측일인 월요일 대비 지난 목요일(last Thursday)이다. Hindcast의 경우, APCC는 forecast 초기 예측일과 가장 가까운 날을 선택(1, 5, 10, 15, 20, 25일 중 선택) 적용하였고 ECMWF, HMC, NCEP은 forecast 초기예측일과 같은 일을 사용하게 된다.

MME 계절내예측을 위해 한 주의 시작 예측일을 월요일, 끝 예측일을 일요일로 적용하여 1주, 2주, 3주, 4주 등(개별모델마다 lead time이 다름)에 대한 주별 평균을 계산하였다. Figure 3.93과 같이 1월 6일이 초기예측일인 경우 1월 10일~16일까지의 평균이 1주 평균값이 된다. 각 모델의 기후값은 각 모델의 forecast 초기예측일과 동일하거나 가장 가까운 hindcast 자료의 날짜를 이용하여 월요일부터 일요일까지의 주별 평균 기후값을 계산하여 사용하게 된다.

Figure 3.94는 pilot 시스템의 디렉터리 구조로 자료 표준화를 위한 전처리(PRE), 다중모델 앙상블(MME), 자료입출력(DATA), 그래픽(FIG)으로 구성된다. “PRE” 디렉터리 아래의 “기관명”은 계절내예측자료를 제공하는 센터명이며, “RUN”은 Python 프로그램을 실행하는 디렉

터리, “DATAIN” 은 전처리표준화에 사용되는 forecast와 hindcast 자료 입력 디렉터리이다. “DATA” 아래의 “MME\_IN” 은 MME에 사용되는 전처리표준화된 forecast와 hindcast 자료 입력 디렉터리이고 “MME\_OUT” 은 MME 수행 후 forecast와 hhindcast 자료가 저장되는 디렉터리이다.

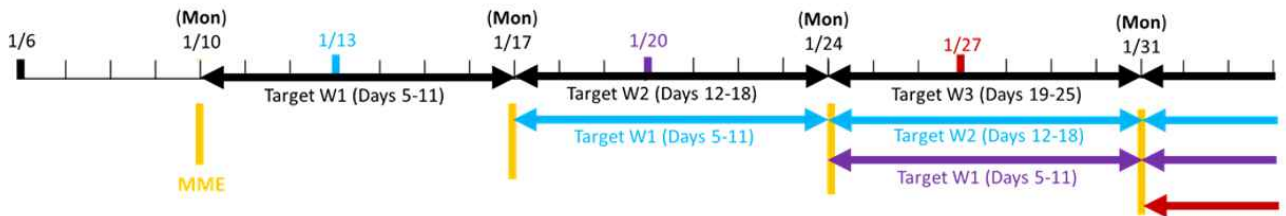


Figure 3.93. Target weeks of MME Subseasonal forecast pilot system.

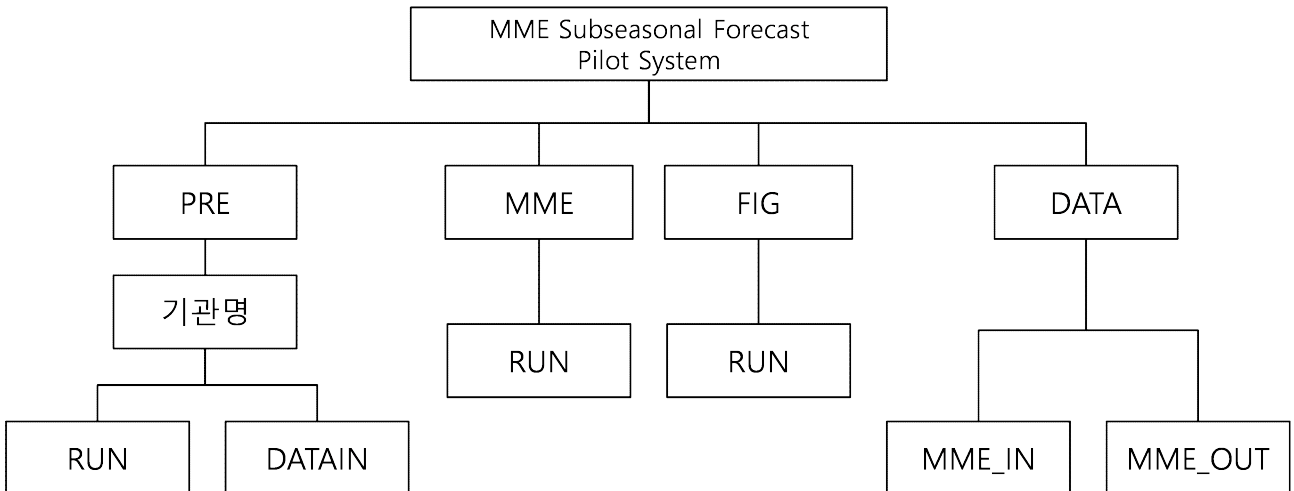


Figure 3.94. Directories of MME subseasonal forecast pilot system.

### 3.7.2. SCoPS 계절내예측자료 생산을 위한 기반체계 구축

APCC SCoPS 기후예측모델을 APCC 고해상도 MME 계절내예측시스템 참여모델의 일환으로 활용하기 위해 2023년부터 모델의 계절내예측자료 생산 가능성 및 개선 필요 사항을 파악하였다. 그리고 SCoPS 계절내예측시스템은 기존의 계절예측시스템에서 예측 기간, 예측 주기, 초기장, 앙상블 크기, hindcast 기간 등을 재설정하여 구축되었다.

Figure 3.95는 SCoPS 계절예측시스템과 계절내예측시스템의 특징을 비교한 것이다. 계절예측과 계절내예측의 주요 차이는 예측 기간, 예측 주기, hindcast 기간 및 주기, 앙상블 구성 기법이다. 예측 기간의 경우, 계절예측에서는 6개월 예측을 하고 있지만 계절내예측은 2개월 예측(60일)을 목표로 하고 있다. 그리고 hindcast의 앙상블 개수는 계절예측이 10개인 반면 계절내예측은 5개이고 위에서 언급한 것과 같이 앙상블 구성 방법에도 차이가 있다. 그리고 hindcast의 예측자료 생산주기는 계절예측은 월 1회, 계절내예측은 월 6회 초기장을 이용하여 생산하였다. hindcast 기간은 기존 계절예측에서 1982년부터 2013년까지 32년이었지만 계절 및 계절내예측에서 공통적으로 hindcast는 2016년까지 연장하여 생산하였다. 그 중 계절내예측 hindcast는 2003~2016년 기간으로 설정하고 생산하였다. 그리고 계절내예측의 최종 제공 변수는 유동적으로 설정이 가능하게끔 대기 및 해양 모델 후처리는 계절예측과 동일한 변수로 모델의 원 해상도 그대로 대기는 0.7도 해양은 0.5도로 추출하였다. 이후 추가 후처리를 통해 MME 제공용 혹은 분석용으로 필요한 변수를 재추출할 수 있게 하였다.

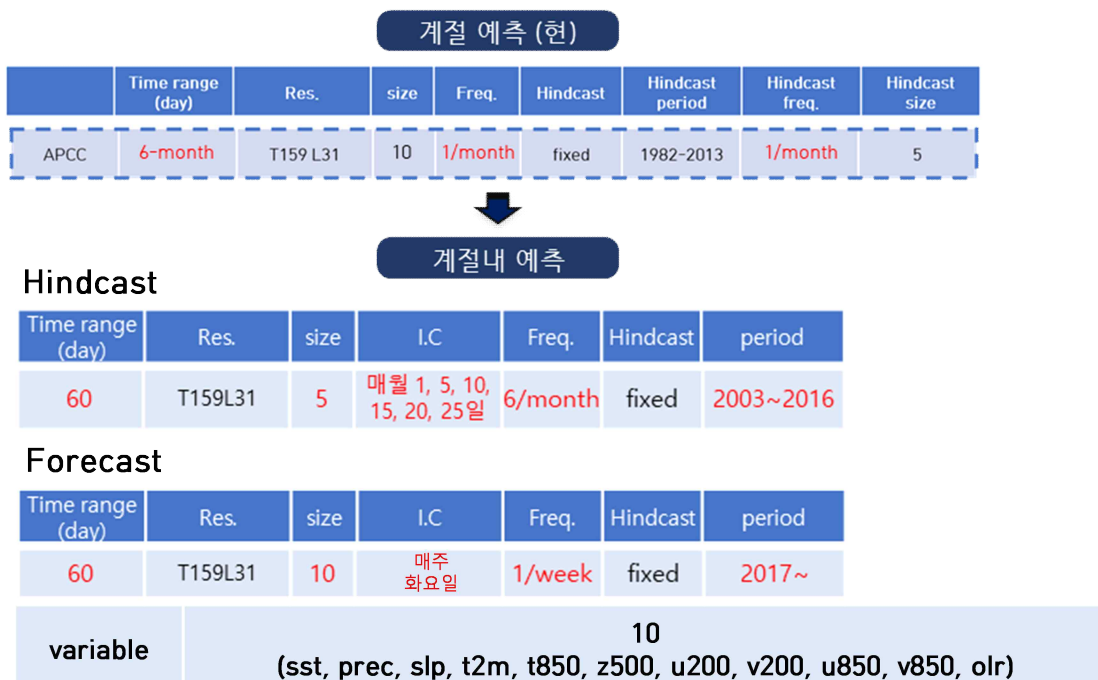


Figure 3.95. Model description summary of SCoPS seasonal and subseasonal forecast system.

계절내예측시스템의 특징을 자세히 살펴보면 먼저 계절내예측의 예측 기간은 60일로 약 2개월의 예측 기간을 설정하였다. 초기장 날짜를 포함하여 줄리안데이(julian day) 기준 60일의 예측 자료가 생산되어 최대 8주까지의 예측이 가능하다.

그리고 앙상블은 현재 SCoPS 계절예측에서는 가우시안(Gaussian) 분포를 따르는 섭동장(perturbation)을 생산하여, 매월 1, 5일에 해당하는 초기장에서 각 5개의 섭동장을 계산하고 이를 합쳐 10개의 앙상블 멤버를 구성하고 있다. 그러나 통상적으로 계절내예측은 초기장으로부터 예측 타겟(target) 기간까지의 선행 시간에 따라 예측성이 민감하게 반응하고 0주부터의 예측도 의미가 있기 때문에 1, 5일의 앙상블을 통합 선정하는 것과 같이 시간 지연(time-lag) 기법으로 앙상블을 구성하는 것은 예측성에 제약이 있을 것으로 판단하였다. 따라서 계절내예측 hindcast의 경우 각 초기장 날짜에서 5개의 섭동장으로만 앙상블을 구성하였다. 5개의 섭동장을 제한한 이유는 타 기관과 비교 및 현실적인 현업 내부 상황 등을 먼저 고려하여 수행 가능한 범위의 개수를 선택하였다(Table 3.19).

초기장 날짜는 매해/매월 날짜가 바뀌는 계절내 real-time forecast 날짜에 대비하여 hindcast는 매월 1, 5, 10, 15, 20, 25일의 초기장을 사용하여 한 달에 6회 생산하였다. 그래서 forecast anomaly 계산 시 hindcast 시작 날짜(D)를 0일에서 최대 2일까지(D~D+2) 선택하여 기후값을 계산할 수 있게 하였다.

Table 3.19. Ensemble method of SCoPS seasonal and subseasonal forecast.

	현재	계획	방법론
계절예측	매월 1, 5일에 계산된 5개의 섭동장	-	섭동+시간지연
계절내예측	-	해당일에 계산된 10개 이상의 섭동장	섭동

마지막으로 hindcast 기간은 기존 계절 예측에서 1982년부터 2013년까지 총 32년이었는데 이는 최신 기후를 반영하기에는 한계가 있고 계절 예측에 현재 참여하고 있는 국내외 타 모델과 비교했을 때도 상대적으로 짧기 때문에 연장 생산이 필요하다고 판단하였다. 따라서 계절 및 계절내 예측 모두 공통적으로 hindcast 기간은 최대 2016년까지 3년을 연장 생산하였다. 그리고 계절내 hindcast의 시작 년도는 타 기관 현황 및 사용 가능한 과거 SCoPS 초기장 현황을 파악하여 2003년부터 2016년까지 총 14년을 목표로 생산하였다.

### 3.7.2.1. SCoPS 계절내예측 시범 생산

계절내예측 자료의 초기장 중 2003년부터 2013년까지의 초기장은 계절예측 자료 생산을 위해 기존에 일별로 생산되어 있던 초기장을 사용하였다. 그리고 2014년부터 2016년까지는 올해 새롭게 연장한 초기장을 사용하였다. 런을 수행하기 전 계절내예측 런에 필요한 초기장 날짜에 해당하는 리스타트(restart) 파일을 추출 및 수집하였다. 그리고 매월 1, 5, 10, 15, 20,

25일 초기장을 이용하여 60일의 예측자료를 생산하였다. hindcast 본 실험에 앞서 2023년의 매주 수요일에 해당하는 날짜를 이용하여 여름철, 겨울철의 계절내예측 자료를 먼저 수행하였고 이를 타 기관 계절내예측 자료와 비교 분석하여 SCoPS의 계절내예측 가능성을 먼저 살펴보았다. 해당 결과는 3.7.2.2에서 살펴볼 수 있다.

Figure 3.96은 SCoPS 계절내예측을 위한 2003년 1월 1일 초기장에 해당하는 런 스크립트 예시이다. 예측 런은 134개의 CPU를 이용하였고 수행 속도를 높이기 위해 초기장 시간 별로(hindcast 경우 12개월×14개년=168개) 독립적인 셸을 구성하여 병렬로 구동하였다. 스크립트 내에 'NDAY' 라는 변수가 예측 일수를 설정하는 파트인데 계절내 예측에서는 60일이 기본으로 설정되어 있다. 그리고 case 구문에서 'DY' 라는 변수가 조건문으로 반복되는데 이 부분이 초기장 날짜를 선택하는 파트이다. 현재는 계절내예측에서 1, 5, 10, 15, 20, 25일로 설정되어 있지만 초기장만 만들어져 있으면 예측장 런 수행 시 어느 날짜든 선택할 수 있게끔 설정되어 있다. 예측장 런의 결과물은 해양 모델의 경우 일별로, 대기 모델의 경우 일별 자료가 하나의 월별 파일에 저장된다.

예측장 런은 케이스가 매우 많아서 Figure 3.97과 같이 런 상황표를 만들어 실시간으로 현황을 관리하였다. 모델 런이 성공적으로 수행되었을 경우, 앙상블 당 약 12GB의 결과물이 생산된다. 초기장 당 앙상블이 총 5개이기 때문에 Figure 3.97에서 한 칸이 약 60GB를 차지한다.

Table 3.20은 SCoPS 계절내예측 hindcast 계산 자원 및 공간 자원을 나타낸 것이다. SCoPS는 기본적으로 초기장 계산 시 CPU 254개, 예측장 계산 시 CPU 134개(대기모델: 120개, 해양모델 12개, 해빙모델: 2개)를 사용한다. 134개의 CPU를 이용하여 60일을 예측할 때, 앙상블 당 계산 시간은 약 2시간이 소요되며 앙상블 5개를 셸 하나로 순차 구동 시 약 10시간이 소요된다. 그러나 이는 최소 시간이며 할당된 HPC 계산 노드의 컨디션에 따라 앙상블 당 2시간에서 4시간 이상 소요되기도 한다. 그리고 hindcast 기간은 총 14년이고 각 해마다 issued date는 72개이므로 계산 시간은 총 10,080시간(420일)이 소요된다. 센터에서 가용한 HPC 계산 노드 전체를 사용했을 때 8개의 Job을 동시에 수행할 수 있어서 계산 시간 단축을 위해 최대한 많은 동시 작업을 수행하였다. 이로 인해 실제 계산 수행 시간은 약 3개월이 소요되었다.

```

#!/bin/sh
#PBS -l select=134
#PBS -o 200301.out
#PBS -e 200301.err
#PBS -u scops
#PBS -N s2s_200301
set -o
set -x
#####
# to run 5-ensemble fcsts
# with this script
#-----
module rm netcdf/4.1.3
module load netcdf/3.6.3

ulimit -s unlimited
ulimit -v unlimited
#
##### User's section #####
##
## - Define architecture
arch=Linux      # Linux/SX/ibm_power4/crayx1/crayxd1/crayxt
chan=MPI1       # MPI1/MPI2
RES=159
LEV=31
host=`uname -n`
#####
# carry out 1 12-ensemble run for a given year
my_year=2003

ice_init=1999
MONN=1
DY="1 5 10 15 20 25"

.....

tday=`expr $tday + $edy`
done
KK=`expr $tday + $DY - 1`

if (((my_year%4 == 0)) && (((my_year%100 != 0) || ((my_year%400 == 0))))
then
case ${DY} in
1 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=60 ; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
2 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=60 ; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
3 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=60 ; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
4 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=60 ; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
5 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=60 ; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
6 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=60 ; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
7 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=60 ; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
8 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=60 ; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
9 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=60 ; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
)

```

Figure 3.96. Example of SCoPS subseasonal forecast run script.

		R: running O: complete																																			
sub-seasonal	JAN					Feb					Mar					Apr					May					Jun											
	01-01	01-05	01-10	01-15	01-20	01-25	02-01	02-05	02-10	02-15	02-20	02-25	03-01	03-05	03-10	03-15	03-20	03-25	04-01	04-05	04-10	04-15	04-20	04-25	05-01	05-05	05-10	05-15	05-20	05-25	06-01	06-05	06-10	06-15	06-20	06-25	
2000																																					
2001																																					
2002																																					
2003	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2004	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2005	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2006	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2007	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2008	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2009	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2010	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2011	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2012	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2013	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2014	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2015	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
2016	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		

sub-seasonal	JUL					AUG					SEP					OCT					NOV					DEC										
	07-01	07-05	07-10	07-15	07-20	07-25	08-01	08-05	08-10	08-15	08-20	08-25	09-01	09-05	09-10	09-15	09-20	09-25	10-01	10-05	10-10	10-15	10-20	10-25	11-01	11-05	11-10	11-15	11-20	11-25	12-01	12-05	12-10	12-15	12-20	12-25
2000																																				
2001																																				
2002																																				
2003	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2004	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2005	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2006	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2007	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2008	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2009	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2010	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2011	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2012	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2013	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2014	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2015	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2016	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	

Figure 3.97. Run status of SCoPS subseasonal hindcast.

그리고 공간 자원의 경우 모델 아웃풋 (RAW) 자료가 케이스당 60GB로 Hindcast 14개 년도의 72개 issued date (매월 1, 5, 10, 15, 20, 25일)를 생산하면 약 59TB를 차지한다. 그리고 해당 자료를 일별 자료로 후처리할 경우 케이스당 45GB로 Hindcast 기간에 총 44TB를 차지한다.

Table 3.20. Summary of computational resource of running hindcast data.

계산 자원	CPU (core)	수행 시간/case (a)	연도 (b)	issued date/년 (c)	총 시간 (a)*(b)*(c)
		134	10 시간	14	72

공간 자원	용량/case (a)	연도 (b)	issued date/년 (c)	총 용량 (a)*(b)*(c)	
	RAW	60 GB	14	72	≈ 59TB
	POST	45 GB	14	72	≈ 44TB

계절내예측 실시간 forecast 자료를 생산하기 위해서는 앞에서 기술한 계절내예측 hindcast 생산 이후 마지막 날짜(2016년 12월 31일)의 리스타트(restart) 파일을 사용하여 2017~현재까지의 초기장 자료를 생산하여야 한다. 여기서 hindcast와 forecast의 초기장 앙상블 개수가 각각 5개, 10개로 서로 다르기 때문에 Figure 3.15와 같이 hindcast 마지막 날짜의 첫 번째 앙상블 리스타트(restart) 파일을 forecast의 첫 번째와 두 번째 앙상블로 적용하고 섭동을 적용하여 초기장을 생산하였다. 이런 방식으로 실시간 forecast를 위한 10개의 앙상블을 구성하였다.

실시간 forecast의 초기장 및 예측자료 생산을 위한 계산 자원은 hindcast의 경우와 동일하며, 초기장 계산 시 CPU 254개, 예측장 계산 시 CPU 134개(대기모델: 120개, 해양모델 12개, 해빙모델: 2개)를 사용한다. 134개의 CPU를 이용하여 60일을 예측할 때, 앙상블 당 계산 시간은 약 2시간이 소요되며 앙상블 10개를 쉘 하나로 순차 구동 시 약 20시간이 소요된다. 2017~현재까지(2024)의 초기장 생산에는 약 2개월이 소요되었다.

실시간 forecast의 예측자료는 매주 화요일 초기장을 이용하여 생산하게 된다(Figure 3.98). 계절내예측의 최종 제공 변수는 hindcast의 경우와 같이 대기 및 해양 모델의 원 해상도 그대로 대기는 0.7도 해양은 0.5도로 추출하였다. 이후 추가 후처리를 통해 MME 제공용 혹은 분석용으로 필요한 변수를 재추출할 수 있게 하였다.

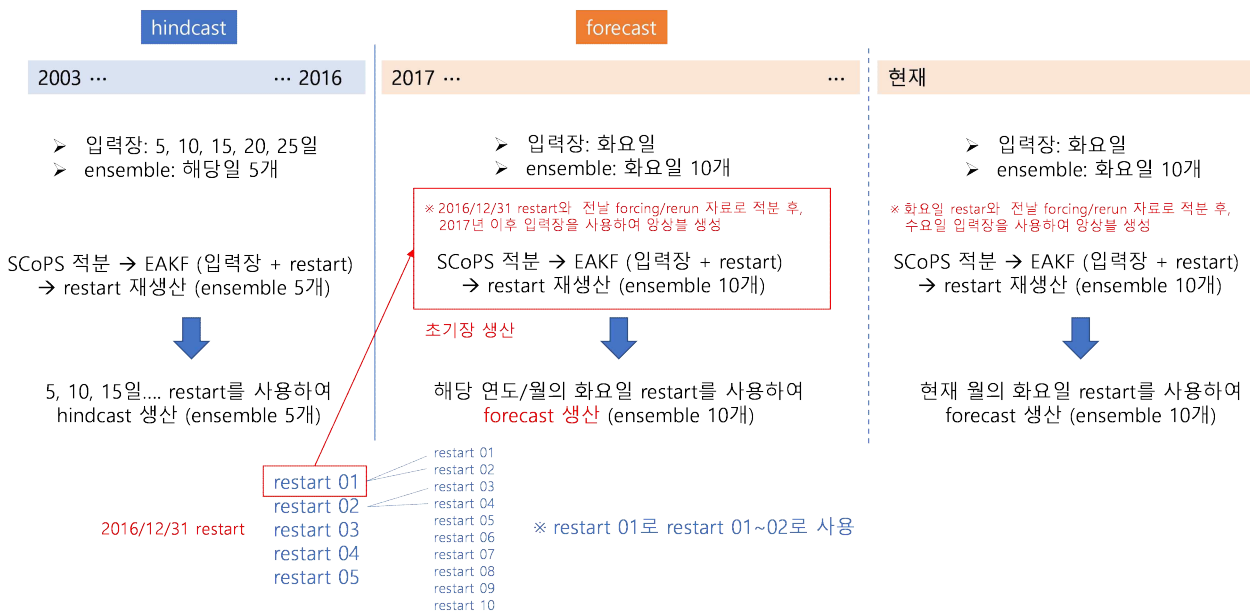


Figure 3.98. Configuration of initial forecast ensembles and restart run for real-time forecast of SCoPS.

최종적으로 생산된 SCoPS 계절내예측 hindcast와 실시간 forecast 자료는 향후 7단계 아태사업과제에서 SCoPS 모델의 개선 및 계절내예측 현업에 활용될 예정이다.

### 3.7.2.2 SCoPS 계절내예측 예측성 평가

APCC 자체모델(SCoPS; Ham et al., 2019)의 계절내예측 활용성 평가를 위해, 2023년 수요일을 초기조건으로 겨울철/여름철 60일의 Hindcast 예측정보를 4개월에 걸쳐 시범 생산하였다. 그 결과를 우선적으로 S2S 개별모델과 상대적인 예측력 비교를 통해 계절내예측에서의 SCoPS 모델의 활용성을 진단하고, 계절내예측 현업운영을 위한 Hindcast 자료를 생산하고자 한다. 이를 위해 앞서 2장에서 설명한 S2S 개별모델과의 예측력을 비교평가하고자 한다. Figure 3.99는 2003~2015년 기간에 대한 SCoPS 모델의 전구 기온 기후값을 12개 개별모델과 비교한 그림이다. 그 결과, 기온은 1주부터 대부분의 대륙(미국 서부 제외)에서 강한 음의 오차를 보이며 4주까지 유지되는 경향을 보인다. 이에 반해 지위고도는 다른 변수에 비해 관측과의 오차는 작은

것으로 나타나며(그림 미 제시. 강수는 모델 적분 1일에 initial shock을 보이며 이는 추후 면밀한 분석이 필요해 보인다. SCoPS 모델의 기후값 재현능력은 12개 개별모델의 범주에 속하면서 안정적인 기후값 생산을 확인하였다(Figure 3.100).

### Mean Bias in Climatology (T2M, JJA)

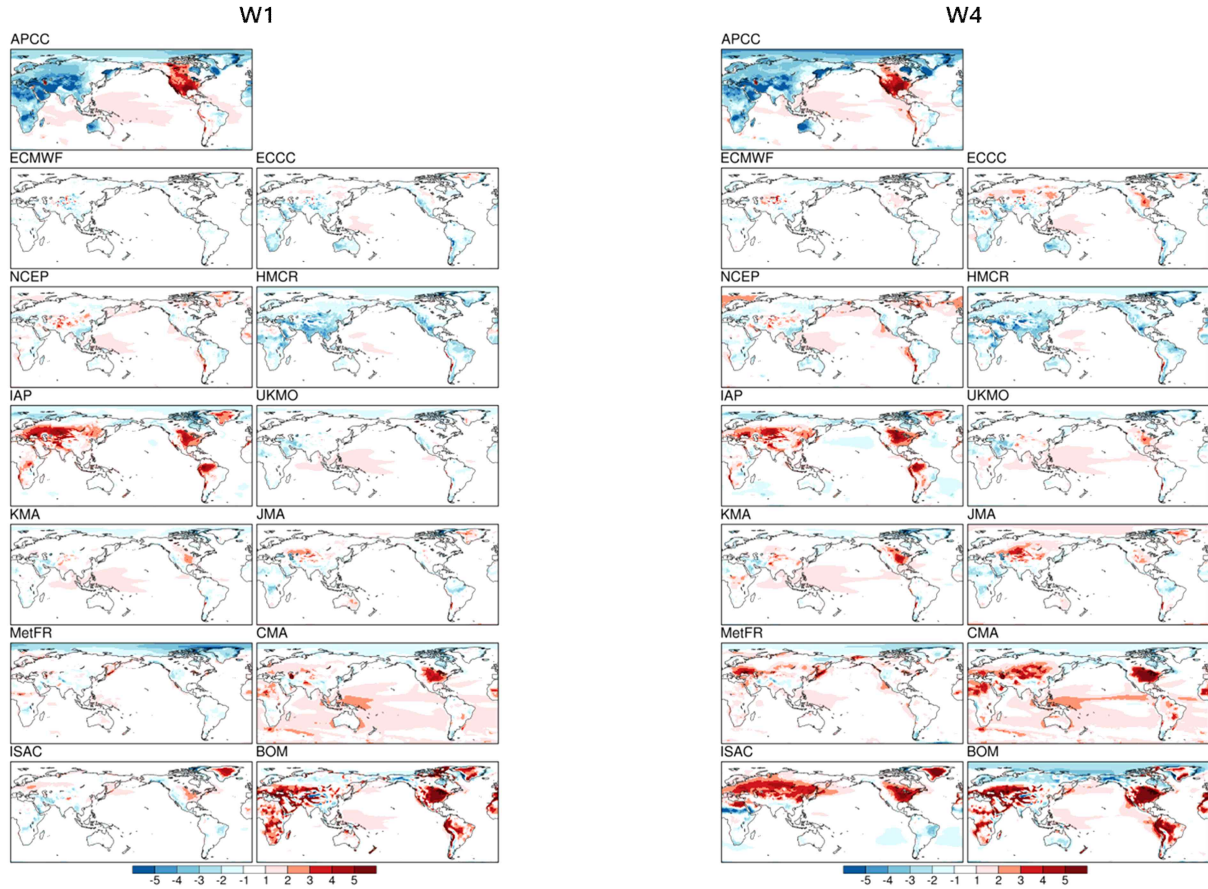


Figure 3.99. Bias in long-term mean (climatology) of T2M at 1 and 4 weeks for 13 models, initialized in JJA.

### Bias Mean Long-Term Mean & Standard-Deviation (JJA)

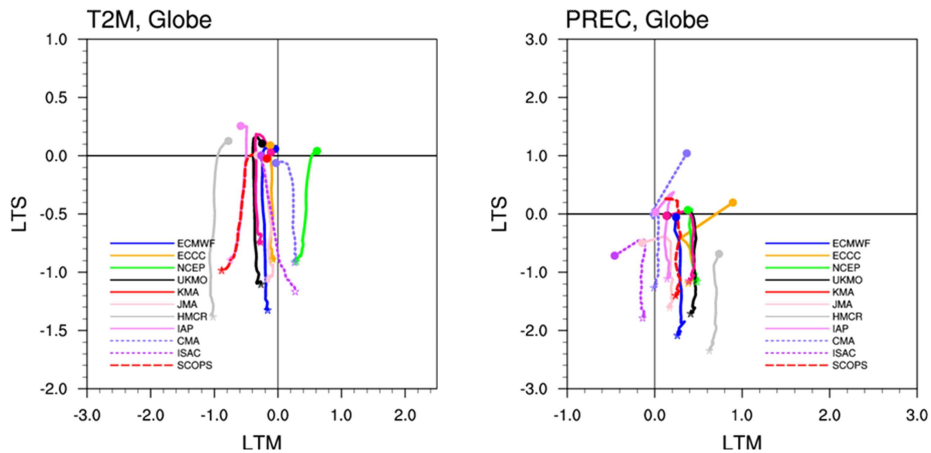
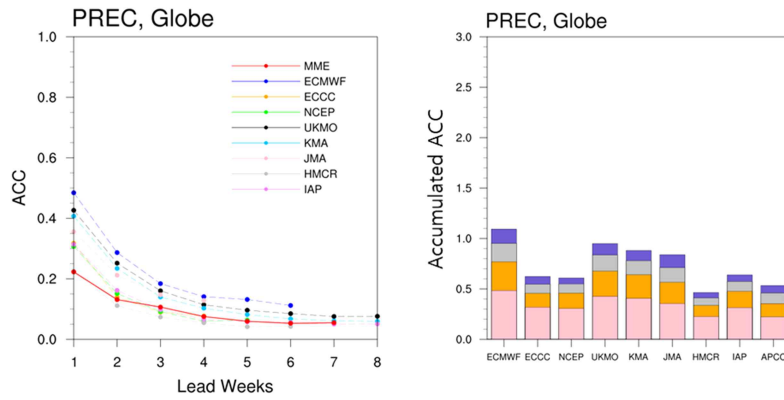


Figure 3.100. Temporal evolution of biases in long-term mean (LTM) and long-term standard-deviation (LTS) of T2M and PREC over globe increasing lead days from 1 to 32 for 13 models, initialized in JJA. Bias is defined as a mean value of differences relative to the observed LTM and LTS over globe during all year around.

다음으로 주별 예측력을 살펴보면(MME 예측일 기준으로 주 정의), 1~2주에서는 S2S 모델에 비해 전반적으로 예측력이 떨어지면서 하위그룹에 포함되는 것을 확인 할 수 있다. 기후값 분석에서 강수 1일에 initial shock이 있으며, 특히 1주 예측력이 S2S 개별모델 예측력에 비해 상당히 낮은 점을 감안하면 SCoPS 모델의 초기화 기법 또는 초기 자료 개선이 필요함을 시사하며 이는 아태사업 7차년도에 SCoPS 모델의 개선을 위한 방향 수립의 기초자료로 활용될 것이다(Figure 3.101). 3주 이상 리드가 길어질수록 SCoPS는 S2S 모델 예측력의 중/하위 그룹에 포함되며 특히 ENSO 및 BSISO/MJO 연관성이 높은 호주/남아시아 지역 강수 예측력은 S2S 예측모델의 중/상위 그룹에 포함되는 고무적인 결과를 보인다. 또한, SCoPS 참여 여부에 따른 MME 예측력 변화를 살펴보았다(Figure 3.102). SCoPS 개별모델 자체 예측력은 S2S 모델의 중/하위 그룹이기 때문에 SCoPS가 참여한 9개 모델(ECMWF, ECCC, NCEP, IAP, JMA, KMA, HMCR, UKMO, SCoPS)의 평균 예측력은 SCoPS가 참여하지 않은 8개 모델에 비해 예측력은 떨어지는 것으로 나타났다. 하지만 SCoPS가 참여함으로써 3주 이상부터는 MME 예측력이 올라가는 것을 확인할 수 있다. 이는 예측력이 낮은 3주 이상에서 SCoPS 참여로 인한 MME 예측력 향상을 기대할 수 있으며, 이는 MME 참여모델의 다양화에 기여하는 것으로 판단된다. 다른 계절에 대한 SCoPS 검증 결과와 함께 종합적으로 판단해야 하겠지만, 여름철/겨울철 결과로는 계절내예측 BSISO 및 MME 참여모델 확장 의미로 SCoPS 활용 가능성을 확인 할 수 있었다.

### Weekly Skill: ACC (JJA)



### Weekly Skill: ACC (PREC, AU)

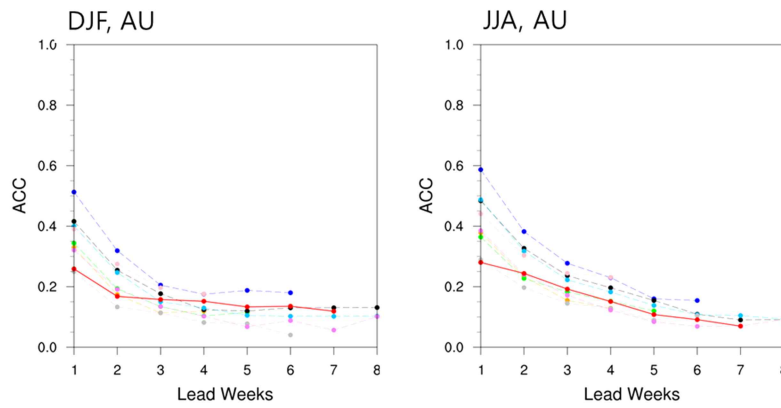


Figure 3.101. (upper) weekly ACC and accumulate ACC for 4 weeks of the global PREC from 9 models, initialized in JJA. (bottom) weekly ACC of the Australian precipitation from 9 models, initialized in DJF and JJA.

## Mean and MME Skills w/APCC and w/o APCC (DJF)

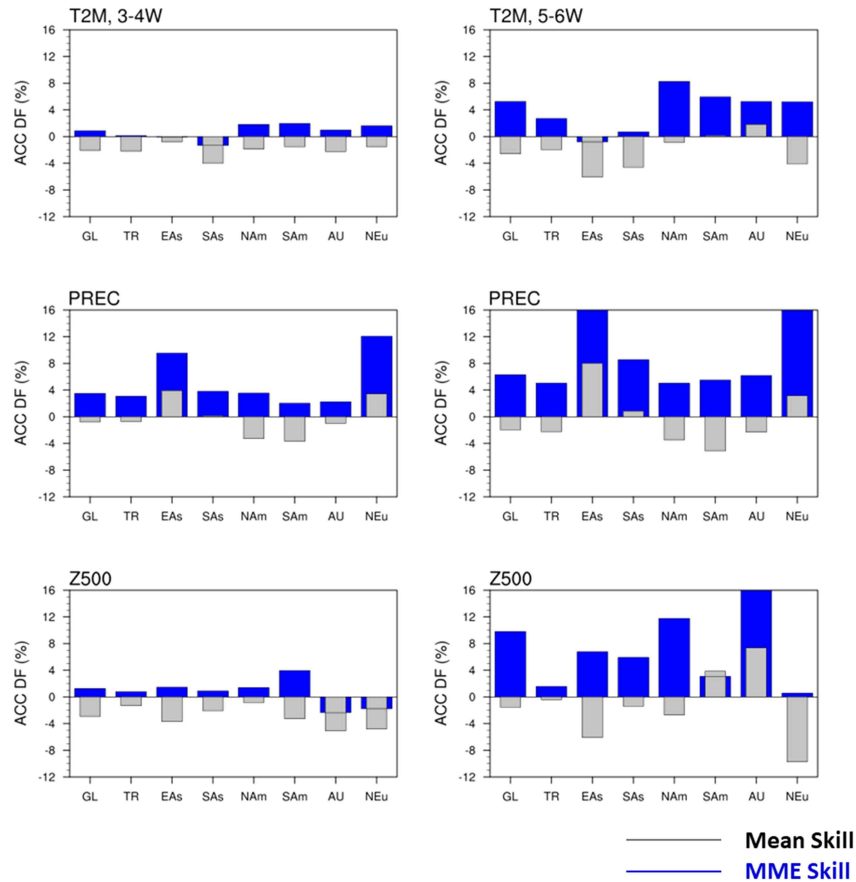


Figure 3.102. Relative skill difference (%) of mean of all models and MME predictions for T2M, PREC, and Z500 with SCoPS and without SCoPS of temperature with 3-4W means and 5-6W means, initialized in DJF.

### 3.7.2.3 SCoPS 계절내예측 개선 기반 마련

#### 3.7.2.3.1. 도입 배경 및 국내의 기술 동향

기후변화로 인한 극한 기상·기후 현상의 증가와 그에 따른 사회·경제적 피해 급증으로 정확한 계절내-계절(Subseasonal to Seasonal, S2S) 규모 예측(2주-2개월)에 대한 국내의 수요가 크게 증가하고 있다. 따라서, 전 세계적으로 S2S 예측 성능 향상을 위한 다양한 시도가 이루어지고 있으며, 특히 초기화(initialization) 기술의 고도화가 예측 정확도 개선의 핵심 요소로 주목받고 있다.

현재 아태기후센터(APEC Climate Center, APCC) SCoPS(Seamless Coupled Prediction System) 계절예측시스템은 대기-해양 초기화 시스템만을 활용하고 있어, 지면 초기 조건의 불확실성이 존재할 수 있다. 지면 상태가 대기 대순환(general circulation) 및 계절 변동성(seasonal variability)에 미치는 영향을 고려할 때, SCoPS 계절예측시스템에 대한 정확한 지면

초기화(land-surface initialization) 기술의 개발이 시급한 상황이다. 지면 초기화란 수치 모델에서 다양한 지면 변수(토양 수분, 지표면 온도, 적설량, 식생 상태 등)의 초기 조건을 설정하는 과정(Koster *et al* 2011)을 의미한다.

우선, 지면 초기화 기술에 관한 국내외 기술 동향을 살펴보았다. 국내의 경우, 기상청과 KIAPS(차세대수치예보모델개발사업단)와 같은 기관들은 모델의 예측 정확도를 높이기 위해 지면 초기화 기술을 발전시키고 있다. 특히, GloSea6 또는 KIM(Korea Integrated Model)과 같은 최신 예측시스템은 향상된 지면 초기화 기법을 포함하고 있고, 지속적으로 위성 관측 자료와 현장 관측 자료를 활용하여 정교한 지면 초기화 작업을 수행하고자 하는 노력이 진행 중이다. 국외의 경우, 지면 초기화에 관한 연구는 지난 수십년간 꾸준히 발전해왔고, UKMO(영국 기상청), NCAR(미국 국립대기연구소) 등 주요 모델링 센터는 지면 초기화가 중요한 역할을 하는 대기-지면-해양 결합 모델을 채택하고 있다. 이러한 시스템은 장기 계절예측뿐만 아니라 단기 기상 예보에도 매우 중요한 역할을 하고 있다.

지면 초기화는 토양 수분(soil moisture)을 주로 중요한 변수로 고려하였다(예: Koster *et al* 2004; Seneviratne *et al* 2010). 초기 연구로는 Koster *et al* (2004)가 NASA GMAO(Global Modeling and Assimilation Office) 시스템에 지면 초기화 적용을 통해 계절내예측 성능을 높임을 보였고, 최근까지도 Dirmeyer *et al* (2018)이 토양 수분 초기화가 S2S 예측 스킬을 높이는 주요 요인임을 제시하였다. 선행 연구들은 토양 수분 이외에도 다른 지면 변수 - 눈 깊이(Xu and Dirmeyer 2011), 잎 면적 지수(Orth and Seneviratne 2014), 지표면 알베도(Zeng *et al* 2021), 지하수(Keune *et al* 2016) 등 - 의 중요성도 강조하였다.

최근 지면 초기화 연구는 더욱 정교해지고 있다. 고도화된 자료 동화(또는 초기화) 기법을 활용하여 ECMWF(유럽중기예보센터)와 NOAA(미국 해양대기청) 등 주요 기후센터에서는 지면 자료동화시스템(LDAS)을 개발하였고, 위성과 지상 관측 자료를 통합하고 있다. 위성 기반 관측 자료의 경우, NASA(미국 항공우주국)의 SMAP(토양 수분 패시브 위성) 및 ESA(유럽 우주국)의 Sentinel 시리즈 등의 위성 관측이 토양 수분, 식생, 눈 덮임 등 자료를 제공하여 지면 초기화의 품질을 크게 향상시키고 있다. 이에 따라, NASA의 GLDAS(전지구 지면자료동화시스템)은 고품질의 전 지구 지면 자료를 생산하며 널리 활용하고 있다. 더불어, ECMWF는 지면 초기화 과정에 기계학습 기법을 활용하므로 더욱 효율적인 초기화가 기대된다(Rodríguez-Fernández *et al* 2019).

GEWEX(글로벌 에너지와 물 교환 프로젝트) 및 WCRP(세계 기후 연구 프로그램)과 같은 국제 프로젝트는 다중 모델 프레임워크를 통해 전 세계적으로 지면 초기화 기법을 표준화하고 비교하는 데 기여하고 있다. 예를 들어, GSWP(Global Soil Wetness Project)-2 프로젝트(Dirmeyer *et al* 2006)는 11개의 지면 모델(CLM2, Noah, ISBA, HY-SSiB, ORCHIDEE 등)을 활용하는 국제 프로젝트로 전 지구 지면의 수분 및 에너지 수지를 분석하고, 개별 지면 모델의 성능을 평가한다. 개별적으로 CLM(Community Land Model)과 Noah-MP, JSBACH와 같은 지면 모델에 대한 초기화 기법도 꾸준히 개선되고 있다.

### 3.7.2.3.2. 지면 초기화 관련 주요 논문(3편) 요약

Koster *et al* (2010)는 지면 초기화가 북미 지역 기온/강수 S2S 예측에 미치는 영향을 제시하였다. 지면 초기화를 적용하였을 경우, 북미 지역에서 45일 예측 선행시간까지 유의미한 기온 예측 스킬 향상이 나타나며, 초기 토양 수분 분포가 극단적일수록 그 효과가 더 크게 나타났다. 강수 예측의 경우, 북미 대륙을 가로지르는 띠 모양의 지역에서 30일 예측 선행시간까지 작지만 지면 초기화 적용에 의한 유의미한 스킬 향상이 나타났고, 마찬가지로 초기 토양 수분 분포가 극단적일 때 예측 스킬 향상이 더 뚜렷했다.

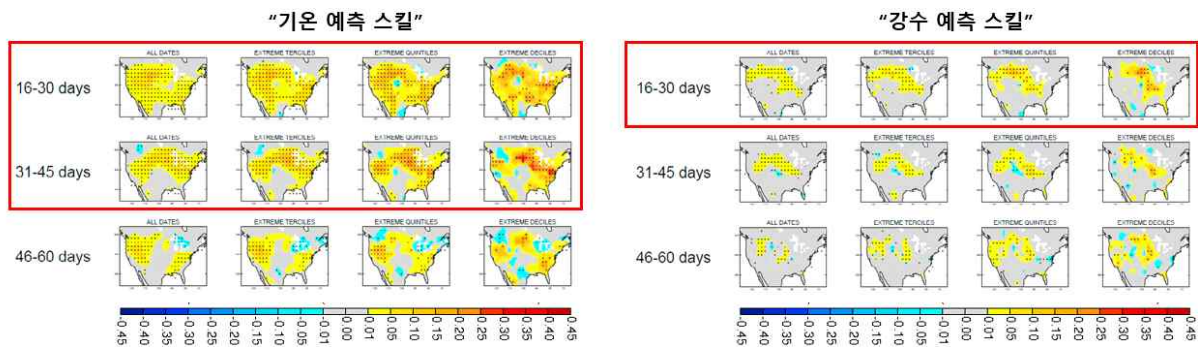


Figure 3.103. Impact of land surface initialization on temperature prediction skill [Fig. 1 from Koster *et al* (2010)].

Koster *et al* (2011)은 토양 수분 초기화가 전 지구 강수량과 기온 예측에 미치는 영향을 평가하였다. Koster *et al* (2010)의 결과와 유사하게, 토양 수분 초기화가 기온 예측에 더 큰 영향을 미치며, 강수 예측에는 제한적인 영향을 미친다는 것을 보여주었다. 지역별로 토양 수분 초기화 효과의 차이가 나타났고, 저자는 지면과 대기 상호작용(land-surface interaction)이 이와 같은 차이를 발생시킬 것이라고 해석하였다.

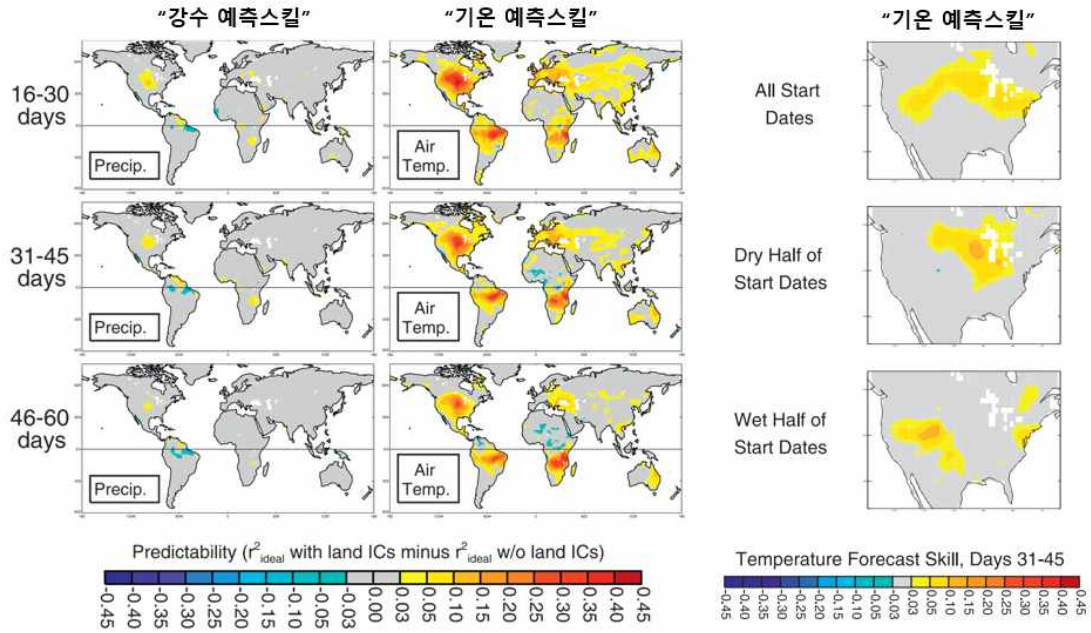


Figure 3.104. Impact of land surface initialization on precipitation and temperature prediction skill [Figs. 3 and 8 from Koster et al (2011)].

Richter et al (2024)은 최근 CESM2(Community Earth System Model Version 2) 전지구 모형을 활용하여 계절내예측에서 대기, 해양, 지면, 해양-대기 및 지면-대기 상호작용의 영향력을 분석하였고, 흥미로운 결과를 제시하였다. 먼저, Dirmeyer에 의해 알려진 유명한 가설과 저자에 의해 기후 모델을 활용해 새롭게 구성한 결과를 통해 다양한 대기, 지면, 해양의 초기 조건이 계절내 예측에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 가설과 달리, 4주 이내의 계절내 규모에서 지면의 단독적인 영향보다는 지면-대기 상호작용이 예측 정확도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 기온 예측의 경우, 1주에는 지면-대기 상호작용이 가장 중요하고, 3-4주에는 대기 초기 조건이 가장 중요, 4주 이후부터는 해양 초기 조건(특히, 열대)이 중요한 것으로 나타났다. 강수 예측의 경우, 주로 대기 초기 조건에 의존하며, 4주 이후부터는 해양 상태(열대 지역)가 더 중요한 것으로 나타났다. 한편, 3-6주 예측에 지면 단독 조건의 영향이 미미하였다.

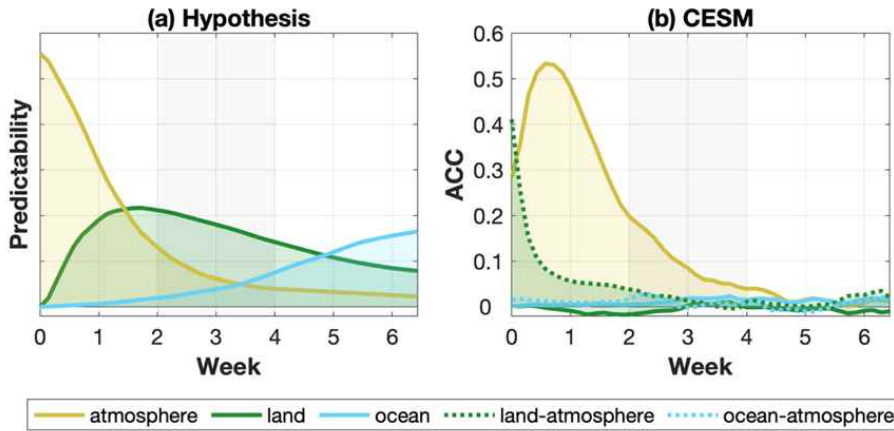


Figure 3.105. Comparison of various initial conditions' impacts on temperature predictability [Fig. 1 from Richter et al (2024)].

### 3.7.2.3.3. APCC SCoPS 계절 예측시스템 개요

#### 3.7.2.3.3.1. APCC SCoPS 모델 구성

연구 보고서(예: Wang *et al* 2015; APCC, 2018)와 APCC SCoPS의 기반 시스템인 POEM에 관한 논문(Xiang *et al* 2012)을 참고하여 APCC SCoPS 계절 예측시스템의 개발 현황을 파악하였다. SCoPS는 POEM/POEM2 기후예측시스템을 기반으로 2012년부터 2015년까지 수행된 “Development of APCC Seamless Prediction System” 프로젝트로부터 개발되었다. 대기(ECHAM5)와 해양(POP2), 해빙 모델(CICE4)이 OASIS3-MCT 커플러로 결합된 시스템이다.

Table 3.21. Component model configuration of SCoPS based on POEM/POEM2

성분	모델 및 버전	수평해상도	연직해상도
대기	ECHAM5 v5.3 (Roeckner <i>et al</i> 2003)	T159 (약 0.75° × 0.75°)	31층
해양	POP2 v2.0.1 (Smith <i>et al</i> 1992)	gx1v3 [320(동서) × 384(남북)]	40층
해빙	CICE4 v4.1 (Hunke and Lipscomb 2010)	POP2와 동일함.	-

ECHAM5은 MPI(독일 막스플랑크 연구소)가 개발한 대기 순환 모델로, 대규모 대기 순환, 강수, 대류, 구름 물리와 같은 다양한 과정을 포함한다. POP2는 NCAR에서 개발된 해양 순환 모델로, 해양 물리적 과정인 열염순환, 해류, 염분 및 열 분포를 상세히 모의하며, 엘니뇨-남반 진동(ENSO)과 같은 해양-대기 상호작용을 연구하는 데 특히 유용하다. CICE4는 해빙의 열역학적 및 역학적 과정을 정밀히 모의하는 모델로, 북극과 남극 해빙의 성장, 융해, 이동 등을 계산함. 대기와 해양 모델과 결합하여 극지방 기후 변동성 및 중위도에 미치는 영향을 연구하는 데 활용되고 있다.

연구보고서(APCC, 2018)에 따르면, APCC는 SCoPS를 개선하기 위해 POEM2 시스템을 기반에 해빙 모델을 결합하고 대기 모델의 버전업과 해상도 개선(T42L19 → T159L31), 해양 모델의 해상도 개선(3도에서 1도), 커플러 교체(OASIS3.0 → OASIS3-MCT), 지면 과정 개선(Hagemann *et al* 2006) 등 다양한 방면의 개선 현황(이력)을 보고하였다.

### 3.7.2.3.3.2. APCC SCoPS 대기-해양 결합 초기화

새로운 지면 초기화 과정의 구현을 위해 기존 SCoPS 대기-해양 결합 초기화 과정의 운영 현황을 파악하였다. SCoPS의 각 성분 모델은 매일 00 UTC에 OASIS3-MCT 커플러를 통하여 총 36개의 변수를 교환하고 있다.

Table 3.22. List of variables exchanged between component models through OASIS3-MCT coupler (total 36 variables based on namcouple file)

성분	변수명(long_name)	변수명(short_name)		비고
		출발(Send)	도착(Recive)	
대기 → 해양 (5개)	Zonal wind stress	TAUXW_AG	TAUXW_OG	
	Meridional wind stress	TAUYW_AG	TAUYW_OG	
	Total heat flux (except solar radiation)	THFW_AG	THFW_OG	
	Solar radiation	SWRW_AG	SWRW_OG	
	Total water flux	TWFW_AG	TWFW_OG	
해양 → 대기 (3개)	Sea surface temperature	SST2A_OG	SST2A_AG	
	Surface zonal current	UOC2A_OG	UOC2A_AG	
	Surface meridional current	VOC2A_OG	UOC2A_AG	
대기 → 해빙 (11개)	Atmospheric level height	ALG_AG	ALG_IG	
	Zonal wind velocity	ZONWD_AG	ZONWD_IG	
	Meridional wind velocity	MERWD_AG	MERWD_IG	
	Specific humidity	SHUM_AG	SHUM_IG	
	Air density	ARHO_AG	ARHO_IG	
	Air potential temperature	AIRPT_AG	AIRPT_IG	
	Air temperature	AIRT_AG	AIRT_IG	
	Downward shortwave radiation	DSWR_AG	DSWR_IG	
	Downward longwave radiation	DLWR_AG	DLWR_IG	
	Rainfall	RAINI_AG	RAINI_IG	
	Snow fall	SNOWI_AG	SNOWI_IG	
해빙 → 대기 (3개)	Ice fraction	IFR2A_IG	IFR2A_AG	
	Ice surface temperature	IST_IG	IST_AG	
	Ice albedo	ALBIC_IG	ALBIC_AG	
해양 → 해빙 (7개)	Sea surface temperature	SST2I_OG	SST2I_IG	
	Sea surface salinity	SSS_OG	SSS_IG	
	Surface zonal current	UOC2I_OG	UOC2I_IG	
	Surface meridional current	VOC2I_OG	VOC2I_IG	

	Zonal SSH gradient	DHDX_OG	DHDX_IG	
	Meridional SSH gradient	DHDY_OG	DHDY_IG	
	Ice freeze/melt heat flux	QICE_OG	QICE_IG	
해빙 → 해양 (7개)	Ice fraction	IFR20_IG	IFR20_OG	
	Zonal stress (between ocean and ice)	TXOI_IG	TXOI_OG	
	Meridional stress (between ocean and ice)	TYOI_IG	TYOI_OG	
	Melting fresh water flux	MELT_IG	MELT_OG	
	Salt flux	SALT_IG	SALT_OG	
	Net ocean-ice heat flux	MELTH_IG	MELTH_OG	
	Penetrative shortwave (from ice to ocean)	SWTHR_IG	SWTHR_OG	

대기와 해양은 각각 CFSR(Climate Forecast System Reanalysis) 재분석자료의 3차원 넷징과 EAKF (Ensemble Adjustment Kalman Filter)를 활용하는 해양관측 자료 동화 과정을 거친다. CFSR는 NCEP에서 제공하는 고해상도 전지구 결합 재분석자료로, 대기-해양-지면-해빙 상호작용이 고려된 균질한 자료(시간 해상도는 6시간이며 수평 해상도는 약 38km)이다. EAKF 필터는 앙상블 조정 칼만 필터(Anderson 2001), 기존 EnKF(앙상블 칼만 필터)와 달리 관측값에 인위적인 섭동을 가하지 않고도 모델 상태를 관측과 일관되게 조정할 수 있는 순차적 자료동화 기법이다. SCoPS는 해양 초기화에 이 기법을 활용하고 있다. 대기-해양 결합 초기화 과정은 해양 관측자료(Argo, XBT 등)와 CFSR SST를 활용하여 해양 초기장을 개선하는 반면, 현재 식생과 해빙 초기화는 기후값을 처방하는 수준에 머물러 있다.

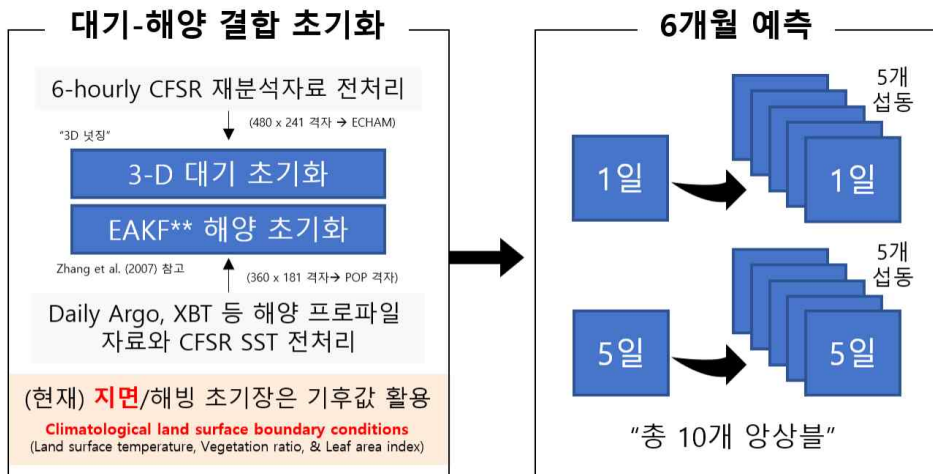


Figure 3.106. Flow diagram of (left) atmosphere-ocean coupled initialization and (right) seasonal prediction in SCoPS.

SCoPS 시스템을 활용한 계절예측의 경우, 매월 1일과 5일의 초기 조건으로부터 시작해 7개월간(스핀업 포함)의 적분을 수행한다. 계절예측을 구성하는 앙상블 멤버는 총 10개이며, 초기 조건에 작은 섭동을 주어 독립적인 앙상블로 구성하였다. 초기 1개월은 모델의 스핀업 기간

으로 간주하며, 이후 6개월의 예측 결과를 분석에 활용하고 있다. 앞서 언급하였듯이, 대기와 해양과 달리 지면 변수(토양 수분, 눈 덮임 등)는 식생 기후값과 3차원 대기 넷징에 의한 간접 초기화 효과만 존재하므로, 반드시 지면 초기화가 요구된다. 해양 초기화를 위해 구현된 EAKF 필터를 활용하여 향후 새로운 지면 초기화 과정을 개발할 예정이며, 이는 토양 수분과 눈 덮임과 같은 지면 변수들의 초기장 품질을 향상시킬 것으로 기대한다.

### 3.7.2.3.3.2. ECHAM5의 지면 과정(Surface processes)

지면 과정은 ECHAM5의 매뉴얼(Roecker *et al* 2003)에 기술되어 있다. 특히, 이 매뉴얼의 6.1장 ‘Heat budget of the soil’ 과 6.2장 ‘Water budget’ 을 통하여 지면 초기화와 밀접하게 관련된 물리 과정을 상세히 이해할 수 있다.

지면 에너지 균형(surface energy balance)은 대기와 지면 사이를 연결하는 중요한 요소로, 특히 토양 온도와 수분이 핵심 변수로 작용한다. 토양 온도의 경우, 태양 복사, 대류, 지중 열전도 등 다양한 물리적 과정을 통해 조절되며, 이러한 과정을 대기로부터의 에너지 교환에 큰 영향을 미친다. 토양 수분의 경우, 증발, 강수 침투, 지하 배수 등 복잡한 물 순환(water cycle) 과정에 관여하며, 지면의 상태, 대기와의 상호작용 등을 통해 균형을 조절한다.

SCoPS의 토양 온도는 5개의 토양층(깊이: 0.065m, 0.254m, 0.913m, 2.902m, 5.7m)을 가지며, 층마다 연직 방향의 열 확산 방정식(thermal diffusion equation)에 의해서 계산된다.

$$C_s \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial G}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial t} \left( - \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad [3.1]$$

$C_s = \rho_s c_s$ 는 토양의 용적 열용량(volumetric heat capacity),  $\rho_s$ 는 토양 밀도[ $\text{kg m}^{-3}$ ],  $c_s$ 는 토양 비열[ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ],  $G$ 는 지열 열속(thermal ground heat flux),  $\lambda_s = \rho_s c_s k_s$ 는 열전도도 (thermal conductivity) [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ],  $k_s$ 는 열확산도(thermal diffusivity) [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ],  $z$ 는 깊이[m]를 나타낸다. 즉, 이 체계는 토양 온도의 초기 상태를 반영하지 못하므로 초기화 대상 변수에서 토양 온도를 제외하였다.

SCoPS의 토양 수분은 전통적인 ‘bucket scheme’ 을 따르기 때문에, 단일 층의 수분 함량(포화 깊이) 값으로 물 수지 식(water budget equation)에서 다뤄짐. 이와 달리, ERA5-Land나 GLDAS와 같은 지면 모델 자료의 경우 대부분 다층 구조(multi-layer soil hydrology) 스킴을 따르기 때문에 수분 변수의 단위 변환에 주의해야 한다.

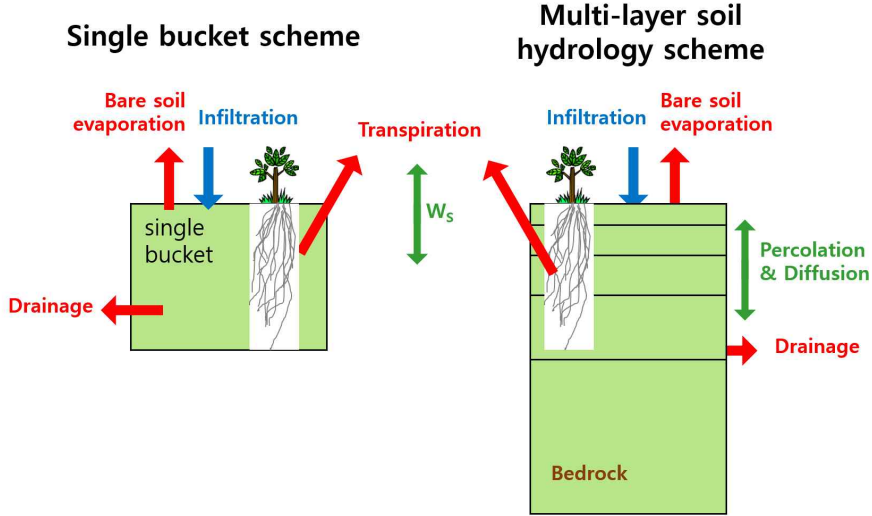


Figure 3.107. Comparison of between (left) single bucket scheme and (right) multi-layer soil hydrology scheme (cf. Hagemann and Stacke (2014)).

SCoPS의 물 순환은 임관(canopy)에 의한 눈(snow)과 비(rain)의 차단(interceptions), 토양으로 침습 (infiltration), 유출(runoff and drainage) 등의 영향을 물 수지 방정식에서 종합적으로 고려한다. 먼저, canopy에 의한 눈 차단(interception of snow by the canopy) 항은 아래와 같이 정의된다.

$$\rho_w \frac{\partial h_{snc}}{\partial t} = c_v S + E_{snc} - \rho_w h_{snc} [U(T_c) + U(v_c)] \quad [3.2]$$

$E_{snc} < 0$ 일 경우는 승화(Sublimation)에 해당하며, 반대로  $E_{snc} > 0$ 일 경우는 승화(Deposition)에 해당한다.  $h_{snc}$  최대값은 잎 면적 지수(LAI)를 활용하여  $h_{snc}^{max} = h_0 LAI$ 로 정의된다.

지표 눈(snow at the surface)에 관한 항은 아래와 같이 정의된다.

$$\rho_w \frac{\partial h_{sn}}{\partial t} = (1 - c_v)S + E_{sn} - M_{sn} + \rho_w h_{snc} U(v_c) \quad [3.3]$$

ice sheet나 빙하 격자일 경우는  $h_{sn} = 0$ 으로 정의되며, 나머지는  $E_{sn} < 0$ 일 경우 승화(Sublimation),  $E_{sn} > 0$ 일 경우 승화(Deposition)에 해당한다. Snow melt flux는  $M_{sn} = \frac{C_s}{L_f} \left( \frac{T^* - T_0}{\Delta t} \right)$ 와 같이 정의된다.

canopy에 의한 비 차단(interception of rain by the canopy)은 아래와 같이 정의된다.

$$\rho_w \frac{\partial h_{wc}}{\partial t} = c_v R + E_{wc} + \rho_w h_{snc} U(T_c) \quad [3.4]$$

$E_{wc} < 0$ 일 경우는 증발(Evaporation)에 해당하며,  $E_{wc} > 0$ 일 경우는 응결(dew formation)에 해당한다.

토양 수분(soil water)은 양동이(bucket) 크기를 결정하는 격자별 최대 깊이  $h_{cws}$  (maximum field capacity 또는 storage capacity)의 깊이를 초과할 수 없다( $h_{ws} \leq h_{cws}$ ). 토양 수분의 미분항은 관련 수식은 아래와 같다.

$$\rho_w \frac{\partial h_{ws}}{\partial t} = (1 - c_v)R + E_{ws} + M_{sn} + M_{snc} - R_s - D \quad [3.5]$$

$E_{ws} < 0$ 일 경우는 Bare-soil evaporation과 evapotranspiration에 해당하며,  $E_{ws} > 0$ 일 경우는 응결(dew formation)에 해당한다. Snow melt flux on canopies는  $M_{snc} = \rho_w h_{snc} U(T_c)$ 와 같이 정의된다. 여기서,  $c_v$ 는 interception parameter,  $S$ 는 snowfall rate,  $\rho_w$ 는 물 밀도,  $T_c$ 는 최하층 기온,  $v_c$ 는 최하층 풍속,  $T_0$ 는 빙결 기온[K],  $M_{sn}$ 은 snow melt,  $M_{snc}$ 는 snow melt in canopy,  $R_s$ 는 surface runoff,  $D$ 는 drainage,  $h_{cws}$ 는 maximum field capacity,  $h_0$ 는  $2 \times 10^{-4}$ m를 의미한다.

초기화 과정에 주의해야 할 부분으로는 양동이의 깊이와 식생 기후 경계값이다. 양동이 크기를 결정하는 격자별 최대 깊이  $h_{cws}$ 의 분포도 함께 업데이트해야 한다(현재, Hagemann et al 2006). 또한, 토양 수분과 식생 타입, 잎 면적 지수(LAI), vegetation cover 등의 함수로 정의되는 항들은 SCoPS에 식생 과정이 없으므로, Hagemann et al (2006)의 기후 연주기(annual cycle) 값을 처방하므로, 최신 식생 자료와 비교해볼 필요가 있다.

### 3.7.2.3.4. 지면 초기화 기술 도입기반 구축 및 개선

#### 3.7.2.3.4.1. 자료 수집 및 운영환경 구축

지면 초기화 기술 도입기반 마련을 위해 지면 초기화에 활용이 가능한 지면 분석자료를 조사하였다. 조사 대상 변수는 토양 수분과 눈 덮임 변수이며, 이 변수를 포함하는 신뢰도 높은 지면 재분석 또는 분석자료의 자료 기간, 시간/공간 해상도, 자료의 지연 기간(data latency) 등을 조사하였다.

Table 3.23. Overview of global land surface reanalysis/analysis data.

(자료 이름)		자료 기간	시/공간 해상도	지연 기간(latency)	
재분석 자료	ERA5-Land	01/01/1940 - 현재	1시간 / $0.25^\circ \times 0.25^\circ$	5일 또는 >30일	
	MERRA2	01/01/1980 - 현재	1시간 / $0.5^\circ \times 0.625^\circ$	3-4주	
	CFSR	01/01/1979 - 01/01/2011	6시간 / 약 38km	종료	
분석 자료	GLDAS	Delayed Product	01/01/2000 - 현재	3시간 / $0.25^\circ \times 0.25^\circ$	약 3개월
		Early Product	01/09/2024 - 현재	3시간 / $0.25^\circ \times 0.25^\circ$	2주 이내

...

SCoPS는 1982년 1월부터 초기화가 가능하므로 1982년부터 현재까지의 43년의 전체 기간을 포함하는 ERA5-Land와 MERRA2 자료를 지면 초기화에 활용할 수 있다. 이 자료들은 모두

SCoPS ECHAM5보다 높은 공간 해상도를 가짐. 배포에 30일 이상의 latency 기간이 필요하므로, Forecast까지 적용할 수 없다. 단, ERA5의 경우는 초기분 성격의 ERA5T(Early Product) 자료를 5일 latency로 활용할 수 있다.

CFSR 자료는 ERA5와 MERRA2 자료에 비해 자료의 전체 기간도 짧고 시공간 해상도도 낮으므로 후보에서 제외하였다. NASA가 생산하는 전 지구 지면 분석시스템 GLDAS는 비교적 최신 지면 자료동화 시스템의 자료이므로 2000년 이후에 생산한 SCoPS 모의 결과를 비교하는 데 활용할 예정이다.

Table 3.24. Comparison of soil layer depths between SCoPS model and global land surface reanalysis/analysis data.

(단위=m)	모델 (SCoPS)	지면 재분석/분석 자료		
		ERA5-Land	MERRA2	GLDAS
Soil layer-1	single bucket	0.07	0.0988	0.1
Soil layer-2		0.28	0.1952	0.4
Soil layer-3		1.0	0.3859	1.0
Soil layer-4		2.89	0.7626	2.0
Soil layer-5			1.5071	
Soil layer-6			10.0	

토양층 구조를 비교해보면, SCoPS는 단일 층이고 격자별 최대 수분 포화 깊이( $h_{cws}$ , Hagemann *et al* 2006)가 고정되어 있다. ERA5 토양층의 최대 깊이는 2.89m로 상대적으로 얇지만, MERRA2의 경우는 마지막 토양층의 깊이가 10m로 가장 깊다. MERRA2 자료는 다른 자료보다 토양층 수도 많고, 지표 1m 이내의 상층 뿌리존(root zone)에 층이 조밀하게 분포하는 특징이 있다. 단, MERRA2 토양층의 5번째 층(1.5m)과 6번째 층(10m)의 간격이 8.5m로 상당히 멀다는 점에 유의해야 한다. CFSR은 4개의 토양층을 가지며, 그 구성은 ERA5와 유사함. GLDAS의 토양층 구성은 지면 모델(Noah와 CLSM)마다 다르다. 정리하면, 탑층(Soil layer-1)이나 뿌리층(약 1m 깊이)까지만 초기화하는 것이 좋을지 고민 중이며, 아직 지면 재분석자료의 종류를 한 가지만 고르는 것은 어려운 단계이므로, 이 부분은 7단계 1차년도(2025년)에 실험을 통해 살펴볼 예정이다.

지면 자료의 토양 수분이 SCoPS와 서로 다른 토양 수분의 형태와 단위를 가지기 때문에 안정적인 지면 초기화를 위해서는 단위 변환 전략을 미리 마련할 필요가 있다.

- SCoPS: 단일 포화 깊이(soil wetness “ $w_s$ ” [m])
- ERA5-Land: 층별 부피 비율(Volumetric soil moisture [ $m^3 m^{-3}$ ])

$$ws = \sum_{i=1}^n sm_i \delta z_i \quad [3.6]$$

※  $sm_i$ : i번째 층의 부피 비율( $m^3 m^{-3}$ ),  $\delta z_i$ : i번째 층의 토양 두께(m),  $n$ : 토양층 총 개수.  
연직 적분에 토양 수분을 어느 층까지 계산에 포함할 것인지 결정해야 함.

- MERRA2: 지면, Root-Zone, 전체 누적 수분 포화도(unit-less soil wetness [0-1])

$$ws = ws_{unitless} \times h_{cws} \quad [3.7]$$

※  $h_{cws}$ : maximum field capacity (m).  $ws_{unitless}$ 에도 surface(표층)와 root-zone(뿌리권), profile(전체 프로파일)에 관한 3가지 수분 변수가 존재하므로, 포화 깊이를 결정할 때 적절한 깊이를 고민해야 함.  $h_{cws}$ 도 MERRA2 자료와 불일치하기 때문에 초기화 과정에 함께 바꿔줄 필요가 있음.

- GLDAS(Noah): 층별 단위면적당 토양 수분(soil moisture [ $kg m^{-2}$ ])

$$ws = \frac{1}{\rho_w} \sum_{i=1}^n sm_i \quad [3.8]$$

※  $sm_i$ : i번째 층의 토양 수분( $kg m^{-2}$ ),  $\delta z_i$ : i번째 층의 토양 두께(m),  $\rho_w$ : 물의 밀도( $1000 kg m^{-3}$ ),  $n$ : 토양층 총 개수. ERA5 자료의 단위 변환 과정과 유사함.

MERRA2 자료를 제외한 나머지 자료는 격자별 최대 수분 깊이( $h_{cws}$ ) 정보를 제공하지 않는다. 최대 수분 깊이 값을 그대로 사용할 경우, 단위 변환된 지면 재분석자료의 토양 수분이 이 최대값보다 클 수 없으므로 수분값과 최대값 등을 비교하는 분석 과정이 반드시 요구된다.

동시에 APCC HPC 클러스터에 운영환경(전산 기반)을 구축하였다. APCC HPC 클러스터의 사양(CPU, 메모리, 운영체제 등)은 다음과 같다.

- CPU : Intel(R) Xeon(R) CPU (3.47GHz, 6코어\*2칩)
- 노드수 : 103개 노드(총 1,235코어 가용)
- 노드당 메모리/운영체제 : 32GB / CentOS Linux release 6.0 (Final)
- 파일 시스템(스토리지) 규모 : /lfs = 약 2.3PB, /home = 약 2TB

포트란 컴파일러와 과학데이터 처리 등과 관련한 전산 환경은 다음과 같이 구성하였다.

- 포트란 컴파일러/MPI 라이브러리 : PGI 컴파일러(버전=11.10) / Open MPI (버전=1.4.4)
- 과학데이터 처리 : NCO 4.1.0, CDO 1.5.4
- 스크립트 언어 : Python 3.10, Bash Shell Script

HPC 모듈(module) 파일 기반 pbs, netcdf와 같은 필수 라이브러리는 다음과 같이 불러온다.

- module load pbs/12.2.4.142262 pgi/11.10 openmpi/1.4.4
- module load netcdf/4.2.1.1 cdo/1.5.4 nco/4.1.0 ncview python/3.7.1-anaconda

지면 초기화와 관련한 실험과 소스코드, 실행파일, 스크립트 등을 포함하는 초기화 체계 운영 디렉토리 구조는 다음과 같이 설계하였다. 이 구조는 초안이며, 앞으로 운영해나가며 구조와 역할을 더 구체화할 것이다.

- /APCC SCoPS/
  - ├── \*.sh # 실행 스크립트
  - ├── \*.f90 # 포트란 코드
  - ├── \*.py # 전/후처리 파이썬 스크립트
  - ├── source/ # 지면/해양 초기화 포트란 코드 디렉토리
  - ├── source\_regrid/ # Regridding 루틴 포트란 코드 디렉토리
  - └── poem2\_ice\_fcst\_sr\_pgi\_nc4/ # APCC SCoPS 소스 코드 디렉토리

한정된 스토리지 공간을 효율적으로 활용하기 위해 지면 초기화 체계가 생산하는 자료들에 대한 데이터 관리 정책을 수립하였다. 입력자료에는 CFSR, ERA5, MERRA2 등 재분석 자료, 해양 관측 자료 등이 존재하며, 중간/최종 산출물로는 초기화 적용 여부에 대한 SCoPS 예측 결과들이 발생할 것이다. 앞으로는 후처리 후 예측결과 삭제, 입력자료와 최종 결과만 보관하는 정책을 도입하여 저장 공간을 최소화 하고자 한다.

### 3.7.2.3.4.2. 시스템 진단 및 개선

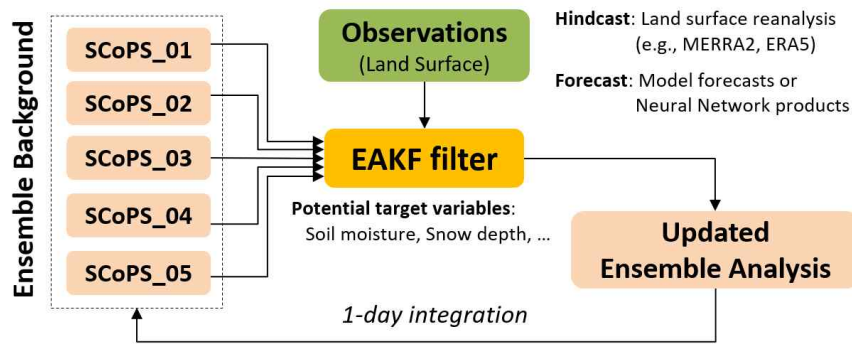
현재 SCoPS 예측시스템은 OASIS3-MCT 커플러를 통해 결합 교환주기를 자유롭게 조절할 수 없다. SCoPS 결합 교환 주기가 86400초(1일)로 하드코딩되어 있으므로, 모델 간 교환주기 변경 시 소스 코드 수정이 불가피하다.

이를 개선하기 위해 교환주기를 namcouple을 포함한 각 모델의 namelist에서 설정할 수 있도록 코드를 파악하고 수정하였다. 각 성분 모델의 시간 간격(dt) 비교를 통해 안정적 구동이 가능한 최소 교환주기 21600초 (6시간)으로 설정하였고, 이를 통해 지면 분석장의 일변화 특성을 모델 초기장에 반영할 수 있다. 이와 같은 개선은 다양한 종류의 결합 실험이 용이하고, 대기-지면 상호작용의 모사 능력이 개선될 것으로 기대한다.

### 3.7.2.3.5. 지면 초기화 운영 체계 및 연구 주제 발굴

#### 3.7.2.3.5.1. 시범 운영 체계 설계

기존 대기-해양 결합 초기화의 EAKF 필터를 활용하는 지면 초기화 시범 운영 체계를 설계하였다. 초기화 시작은 1982년 1월 2일 00UTC을 기준으로 하며, 대상 변수로는 기술 동향 조사 결과를 바탕으로 토양 수분(m)과 눈 덮임(m)을 선정하였다.



“Block diagram of ensemble cycled land surface analysis”

Figure 3.108. Schematic diagram of ensemble cycle land surface initialization system with 5 ensemble members and 1-day exchange cycle.

시범 입력자료는 MERRA2 지면 재분석자료로 선정하였고, 차년도에 활용 가능한 지면 초기화 주기를 1일부터 12시간, 6시간까지 다양하게 조절하며 결합 강도에 관한 예측 민감도를 살펴볼 것이다. 단, Forecast(준실시간, Near-Real-Time)의 경우 대부분의 지면 분석장은 data latency가 5일 이상으로(표 3 참고), 매주 계절내예측 운영에 직접 활용이 어려운 상황이다. 이와 같은 제약사항을 극복하기 위해서는 모델 예측장(SCoPS, ERA5T 등)을 활용하거나 기계학습(Neural Network) 기반 지면 상태 예측 기법(Rodríguez-Fernández et al 2019)을 도입하는 것도 좋은 대안이 될 수 있다.

시범 운영 체계는 (1) 입력자료 전처리와 (2) 초기화 단계, (3) 앙상블 예측 수행 과정인 3가지 단계로 구분이 가능하다. (1) 전처리 과정에선 MERRA2 자료의 원본 자료(raw data)를 수집하고, 격자 변환(raw data에서 T159)과 단위 변환(raw에서 미터), masking, 연직 보간 등 다양한 작업을 수행한다. 이 작업은 기존 해양 초기화 과정과 동일하게 포트란 기반의 전처리 코드를 활용한다. 두 번째로 (2) 초기화 단계에선 EAKF 필터를 통한 update 수행 및 지면 초기장과 관측값 결합(증분 반영), 이상치 검토가 이뤄진다. 예측 시작일까지 초기화 주기 간격으로 ECHAM5 restart 파일에 지면 변수만 업데이트하게 된다. 마지막으로 (3) 앙상블 예측 수행 단계에서는 매월 1일과 15일 초기장으로부터 60일 적분을 수행한다. 10개 앙상블 멤버에 대한 예측결과를 통해 후처리 수행 후 생성한 원본 결과 자료를 삭제한다.

APCC SCoPS와 초기화 체계의 소스 코드에 대한 버전을 효율적으로 관리하기 위한 규칙을 마련하였다(2025년 1월부터 1.0 버전을 지정하고 관리할 예정).

- APCC SCoPS : scops\_x.y # poem2\_ice\_fcst\_sr\_pgi\_nc4  
(초기값: x=y=0; 소규모 업데이트: y+=1; 대규모 업데이트: x+=1)
- 초기화 소스코드(Fortran) : land\_init\_x.y # SCoPS와 동일함.
- 전후처리 스크립트(Python/Bash) : process\_x.y # SCoPS와 동일함.

### 3.7.2.3.5.2. 연구 주제 발굴 및 필요한 계산자원 제시

지면 초기화 체계를 기반으로 예측 민감도 실험을 구성하였다. 먼저, 변수별 지면 초기화가 예측 정확도에 미치는 개별 영향과 결합 영향을 살펴보기 위해 다음과 같은 세부 실험을 구성하였다. 공통적으로 MERRA2 지면 재분석자료를 활용하며, 1982-2016년 대상 매월 1일/15일 시작 및 60일 적분, 5개 앙상블 멤버를 가지도록 설계하였다.

- └── CTRL : 현재 운영 중인 SCoPS 예측결과(Hindcast)
- └── EXP1 : 토양 수분(soil wetness) 초기화
  - | └── EXP1\_1 : Hagemann et al (2006)의 최대 포화 깊이(m)
  - | └── EXP1\_2 : MERRA2 최대 포화 깊이(m)
- └── EXP2 : 눈 덮임(snow depth) 초기화
- └── EXP3 : 토양 수분+눈 덮임 결합 초기화
- └── ... (추가적인 식생 기후 업데이트 고려 가능)

MERRA2 이외에도 앞서 조사한 ERA5, GLDAS-Noah, GLDAS-CLSM 등과 같은 지면 자료에 관해서도 위 실험을 적용하고, 상호 비교 분석을 수행할 것이다. 또한, 지면 초기화 주기(6시간, 12시간, 1일)를 조절하여 지면-대기 결합 강도를 살펴볼 예정이다.

교환주기가 빈번할수록 소요시간이 증가하기 때문에, SCoPS 계산량 증가에 대응을 위한 병렬 효율성을 검토할 것이다. 기준이 되는 성능은 1일 예측(앙상블 5개)을 위해 134코어 사용 시 약 14분이 소요(해양 초기화 포함)된다.

APCC HPC 시스템 기준 각 민감도 실험에 필요한 계산자원을 정량적으로 제시하였다. 예상 공간은 초기장/입력장만 산정하였다. 지면 초기화 기반 실험의 경우, 최대 25,200회 수행이 예상되며 예상 소요기간 및 공간은 약 8-9개월, 최소 36TB이다. 25,200회의 산출 근거는 최소 3개 실험(EXP1-3) × 10개 멤버 × 매달 2회(1일, 15일) × 35년(1982-2016년)이다. 기타 자료 민감도 실험(ERA5, MERRA2, GLDAS), 결합강도 실험(6/12/24시간) 등은 전체 기간이 아닌 초기 10년에 대해서만 수행함으로써 계산 규모를 축소하는 등의 노력이 필요하다.

### 3.7.2.3.6. 요약 및 결론

이 연구는 기후변화로 인한 극한 기상/기후 현상의 증가와 그에 따른 사회/경제적 피해 급증으로 인해 계절내-계절(S2S) 규모 예측의 중요성이 높아지는 상황에서, APCC SCoPS 계절예측시스템의 예측 성능을 향상시키기 위한 지면 초기화 도입기반을 구축하였다. 현재 SCoPS는 대기-해양 초기화 시스템만을 활용하고 있으므로 지면 초기 조건의 불확실성이 존재하며, 특히 육지에서의 예측 정확도 개선이 시급한 상황이다. 이 불확실성을 해소하기 위해 ERA5-Land, MERRA2, GLDAS 등 다양한 지면 재분석/분석자료를 조사하여 MERRA2를 시범 자료로 선정하였다. MERRA2는 토양층 구조가 상세하고 특히 지표 1m 이내의 상층 뿌리권(root-zone)에 층

이 조밀하게 분포하는 등 다른 자료에 비해 상대적으로 안정적인 특징을 보였다. 또한, 자료마다 각기 다른 토양 수분 변수의 단위 변환 전략을 수립하고, EAKF 기반의 자료 동화 체계를 제시하였다. 시스템 개선 측면에서는 OASIS3-MCT 커플러의 결합 교환주기를 기존 86,400초(1일)을 수정하여 지면의 일변화 특성을 모델 초기장에 반영할 수 있도록 모델 소스 코드와 초기화 체계를 개선하였다. 이 과정에서 각 성분 모델의 시간 간격(dt) 비교를 통해 안정적 구동이 가능한 최소 교환주기(6시간)를 도출하였다.

향후 계획으로는 먼저 SCoPS 시스템을 활용하는 다양한 민감도 실험을 통해 지면 초기화의 효과를 정량적으로 평가할 예정이다. 여기에는 CTRL 실험과 초기화 실험(EXP1-3) 비교, 다양한 지면 재분석자료 활용 실험, 그리고 교환주기 민감도 실험 등이 포함됨. 또한, 준실시간 예측 운영 시 발생하는 data latency 이슈를 해소하기 위해 기계학습 기법 도입이나 모델 예측장 활용 방안도 연구할 계획이다. 결론적으로 이 연구를 통해 구축된 지면 초기화 도입기반은 향후 APCC SCoPS의 예측 성능 향상에 기여할 것으로 기대한다. 특히 토양 수분과 눈 덮임과 같은 주요 지면 변수들의 초기화를 통해 육지에서의 예측 정확도가 개선될 것으로 예상하며, 이는 동아시아 몬순, 아시아-태평양 극한 기후 현상 등 S2S 예측 수준에 있어 중요한 진전이 될 것으로 기대한다.

### 3.7.3. MME 계절내예측 현업운영을 위한 기반 연구

#### 3.7.3.1 계절내예측 현황 조사 및 기후값 재현 능력 분석

현재 다양한 현업기관에서 계절내 예측시스템을 운영하고 있으며, 계절내 예측에 관한 국제간 프로젝트(WWRP/WCRP S2S, NOAA/CPO Subseasonal Experiment; SubC)를 통해 자료를 제공하고 있다. SubC 참여하는 모델은 대부분 북미 모델로 구성되어 있으며, 준실시간(2~3일 지연)으로 IRI Data Library를 통해 자료가 공개 되어있으며, S2S는 2023년 CPTEC 모델 참여로 현재 전세계 13개 모델이 참여하고 있고 연구 및 교육 목적으로 ECMWF, IRI, CMA로부터 받을 수 있다(Figure 3.109). 이렇게 공개된 자료를 활용하여 다양한 예측정보들이 생산되고 있다. 예를 들어, 일본 Tsukuba 대학에서 운영 중인 S2S Museum은 S2S 자료를 활용하여 매일(3주 지연) 기본 변수(해면기압, 지위고도, 강수, 해수면 온도 등) 뿐만 아니라 다양한 기후지수(ANO, NAO, MJO 등) 및 원격상관 지수(EA, PNA, WA, WP 등)에 대해서 업데이트되고 있다. 또한 Climate Hazards Center에서는 SubX 예측자료를 활용하여 매주 목요일 전구 및 식량안보 취약지역(아프리카, 중미, 서남 및 중앙아시아)에 대해서 강수, 평균/최고/최저 기온의 정보를 제공하고 있다.

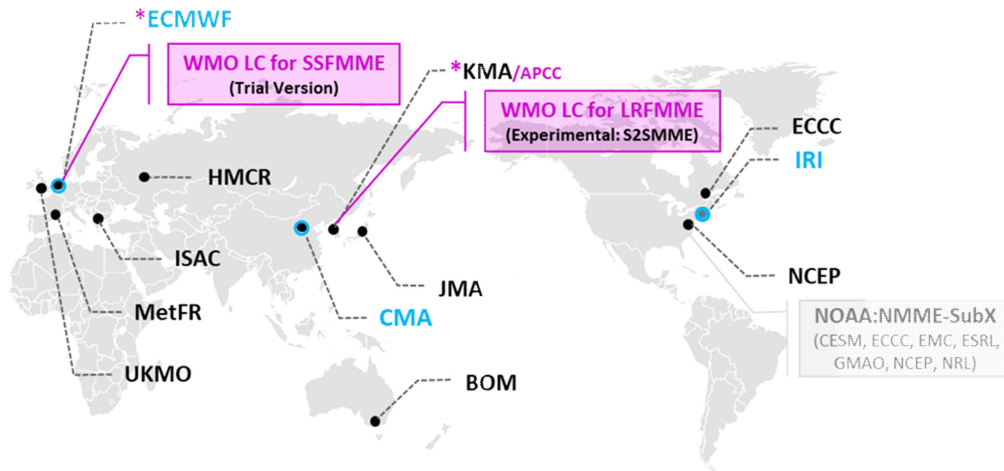


Figure 3.109. Contributing centers in S2S and SubC projects; S2S data provider (black circle), Archiving data centre (blue circle), WMO Lead Center for long-range forecast MME (WMO LC-LRFMME) and sub-seasonal prediction MME (WMO LC-SSPMME).

일부 기관에서는 MME 계절내예측시스템을 시범운영 중이며(Figure 3.110), WMO 장기예보 선도센터에서는 S2S 모델을 활용하여 MME 계절내예측시스템을 2016년부터 시험 운영해 오고 있으며, 현재 5개 모델(ECMWF, NCEP, UKMO, ECCC, KMA)이 참여하여 MME 계절내예측정보를 WMO 회원국에 제공하고 있다. 최근 2023년 WMO Expert Team on Operational Climate Prediction 회의에서 ECMWF가 WMO 계절내예측 선도센터로 새로 지정되면서 기존의 WMO 장기예보 선도센터에서 시범운영 해오던 MME 계절내예측 업무를 수행할 예정이며 현재 6개 모델(CMA, ECMWF, UKMO, KMA, NCEP, ECCC)을 활용하여 주 1회, 향후 1~4주에 대한 예측정보를 시범 생산하고 있다. SubX 모델을 활용한 계절내 MME 예측시스템은 현재 IRI는 연구 목적으로 개발 중이며, NOAA/CPC에서는 NMME에서 SubX 모델을 활용한 MME 계절내예측정보를 현업에 활용 중이다.

현재 다양한 기관에서 MME를 활용한 계절내예측정보를 생산/활용 중인 시점에서, 후발주자인 APCC가 우수 기관과의 차별성과 경쟁력 확보를 위해서는 센터만의 강점을 살린 체계적인 전략 수립이 필요하다. 특히, 다년간 계절 및 계절내 예측에서 축적해 온 경험을 바탕으로 계절과 계절내 예측을 통합하는 활용 기술개발, 특히 동아시아 지역에 특화된 예측 콘텐츠 개발을 통한 통합 예측정보 제공이 핵심 전략이 될 수 있을 것으로 보인다.

WMO LC-SSF MME: ECMWF (Operation, <https://charts-dev.ecmwf.int/wmo/>)

Type	Product/Variable	Frequency/Period	Region	Model	Note
<ul style="list-style-type: none"> <li>Probabilities (terciles)</li> <li>Ensemble mean (anomalies)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2m temperature</li> <li>500hPa geopotential height</li> <li>850hPa temperature</li> <li>Mean sea level pressure</li> <li>Precipitation</li> <li>Sea surface temperature</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weekly/Week 1,2,3,4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Global</li> <li>Europe, Central Europe, North West/South Europe, South West/East Europe</li> <li>Northern/Southern Africa, Africa</li> <li>North Atlantic, Arctic, Antarctic</li> <li>North/Central/South America</li> <li>Southern/Western/Eastern Asia</li> <li>South East Asia &amp; Indonesia</li> <li>Eurasia, Middle East &amp; India</li> <li>Australasia, West/East Tropic, Equatorial Pacific, Pacific</li> <li>South Atlantic &amp; Indian Ocean</li> <li>North/South Pole</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beijing</li> <li>ECMWF</li> <li>Exeter</li> <li>Montreal</li> <li>Seoul</li> <li>Tokyo</li> <li>Toulouse</li> <li>Washington</li> <li>(Customizable) Multi-model</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Initialized around Thursday</li> <li>Every Monday: Weekly means for calendar week (Mon to Sun)</li> <li>Model climate: closest reforecast start dates for 1999-2010</li> <li>S2S datasets@ECMWF</li> </ul>
* Plan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Time evolution of forecast anomalies and probabilities from both individual and multi-model ensemble at a give geographical point</li> <li>2/week, week 1-6, verification information, move to an open data policy gradually</li> </ul> <p style="text-align: right;">(Agenda 4.5@ET-OCPS 2022, WMO OMM)</p>				

SubC: NOAA (Research, [weather.ou.edu/~kpegion/subc](http://weather.ou.edu/~kpegion/subc))

Type	Product/Variable	Frequency/Period	Region	Model	Note
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ensemble mean (anomalies)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2m temperature</li> <li>500hPa geopotential height</li> <li>200hPa geopotential height</li> <li>Mean sea level pressure</li> <li>Surface temperature</li> <li>Precipitation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weekly/Week 1,2,3,4, 3-4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Global</li> <li>North America</li> <li>Northern Hemisphere (only for Z500)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ESRL-FIMr1p1</li> <li>RMSAS-CCSM4</li> <li>EMC-GEFSv12_CPC</li> <li>GMAO-GEOS-V2p1</li> <li>ECCC-GEPS7</li> <li>NCEP-CFSv2</li> <li>SUBC-MME</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Initialized around Wednesday</li> <li>Every Friday: Weekly means for Saturday-Friday</li> <li>Model climate: 1999-2016</li> <li>SubC datasets@IRI</li> </ul>
<p>&gt; Used for real-time forecasts for North America in CPC operational forecasts (Week 3-4 Outlooks; temperature &amp; precipitation (Exp.))</p>					

IRI Subseasonal MME Forecast (Under development, <https://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/ForecastsS2S>)

Type	Product/Variable	Frequency/Period	Region	Model	Verification	Note
<ul style="list-style-type: none"> <li>Median probabilities</li> <li>Biweekly probabilities</li> <li>Weekly probabilities</li> <li>Flexible biweekly probabilities</li> <li>Flexible weekly probabilities</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2m temperature</li> <li>Precipitation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weekly/week 3-4</li> <li>Weekly/week 2-3, 3-4</li> <li>Weekly/week 2, 3, 4</li> <li>Weekly/week 2-3, 3-4</li> <li>Weekly/week 1, 2, 3, 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Global, Africa</li> <li>Asia, Australia</li> <li>Europe, Pacific</li> <li>Middle East</li> <li>North/Central/South America</li> <li>Caribbean</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Multi-model (only)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>RPSS(weekly 2-3, 3-4)</li> <li>RPSS(weekly 1, 2, 3, 4)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Every Thursday: Weekly means for Saturday - Friday</li> <li>SubC datasets@IRI</li> </ul>

Figure 3.110. S2S MME prediction systems from WMO LC-SSPMME, SubC, and IRI.

ECMWF 데이터 포털에서 수집한 12개의 S2S 프로젝트 모델 자료에 대한 전처리 확인을 위해 개별모델의 기후값을 우선 평가하고자 한다(Table 2.25). 본 연구의 목적은 아니지만, 모델 기후값 오류에 대한 진단연구는 모형성능 개선을 위해 필수적인 부분이며 본 연구에서도 계절내 모델 기후값이 얼마나 관측과 유사한지, 선행시간에 따른 변화는 없는지, 지역별/변수별 차이를 분석하였다. 여기서 기후값은 대부분의 개별모델의 공통재현기간 2003~2015년(13년)에 대한 결과값이며, 공통재현기간에 포함되지 않는 모델에 대해서는 관측자료 활용 가능성(GPCP, 1996년 10월부터 제공)을 고려하여 기후값을 산정하였다(Figure 3.111).

Hindcast (@v2023)						
Model	Frequency	Exp.	Ens. Size	Period	Climatology	Analysis Data Size
ECMWF/CY47R3(CY47R3)	Thu	on the fly	11	2003-2022	2003-2015 (13 years)	1/week x 52 week x 13 year = <u>676</u>
ECCC/GEPS7	Thu	on the fly	4	2001-2020		
NCEP/CFSv2	Thu	fix	4	1999-2010		
HMCR/RUMS5	Thu	on the fly	11	1991-2015		
IAP/CAS-FGOALS-f2-V1.3	Thu	fix	4	1999-2018		
UKMO/GloSea6	4/month (1, 9, 17,25)	on the fly	7	1993-2016		4/month x 12 month x 13 year = <u>624</u>
KMA/GloSea6-GC3	4/month (1, 9, 17, 25)	on the fly	3(7)	1993-2016		2/month x 12 month x 13 year = <u>312</u>
JMA/CPS3 <sup>5</sup>	2/month (fixed day)	fix	5	1991-2020		
MetFR/CNRM-CM 6.1	Every 7 days	fix	10	1993-2017		
CMA/BCC-CPS-S2Sv2	Thu	on the fly	4	2008-2022	2008-2022 (15 years)	1/week x 52 week x 15 year = <u>780</u>
ISAC-CNR/GLOBO	Every 5 days	fix	5	1981-2010	1997-2010 (14 years)	73/year (every 5 days) x 14 year = <u>1022</u>
BOM/POAMA24	6/month (fixed day)	fix	33	1981-2013	1997-2013 (17 years)	4/month x 12 month x 17 year = <u>816</u>

Figure 3.111. S2S model description used in the analysis for climatology.

Figure 3.112~114는 12개 개별모델의 장기간 기후값에 대한 기온 및 강수의 1, 4주 오차를 나타낸 것이다. 기온의 경우, 대부분 모델들은 대륙에서 과소모의(cold bias) 하는 경향을 보이며, 선행시간이 1주에서 4주로 증가할수록 관측과의 오차는 증가한다. 저해상도 모델인 IAP, BOM 모델의 경우 북극지역 강한 음의 오차를 보이고, 내륙 고산지역 및 아프리카 지역에서는 강한 양의 오차를 보인다. 초기 선행시점부터 4주까지 ECMWF 모델이 관측과의 기후값 기온 오차는 가장 작은 것으로 나타났다. 강수의 경우 강한 대류 활동으로 인해 강수 변동성이 큰 열대지역에서 관측과의 양의 오차(wet bias)가 전반적으로 크게 나타나며(특히, warm pool 지역), 아프리카 지역 강수는 과소 모의하는 경향을 보였다(ISAC 제외). 특히, 대기 모델인 HMCR, ISAC은 다른 모델에 비해 해양에서 관측과의 오차가 크게 나타나는 특징이 있으며, 이는 앞서 기온에서 저해상도 모델의 오차와 더불어 모델의 해상도 및 대기-해양 접합 등이 계절내 예측 기후값 모의 능력에 중요한 요인임을 확인 할 수 있다.

### Mean Bias in Climatology

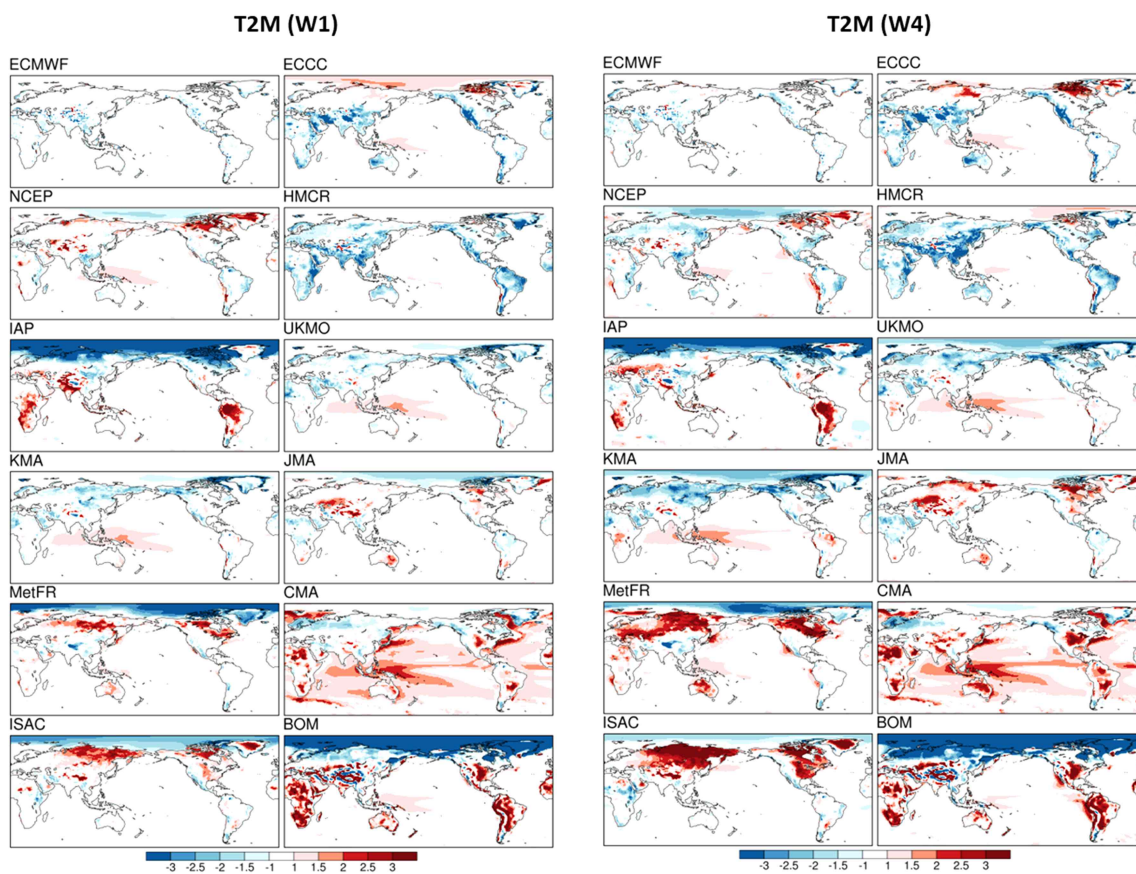


Figure 3.112. S2S MME prediction systems from WMO LC-SSPMME, SubC, and IRI.

### Weekly Accumulation (Climatology)

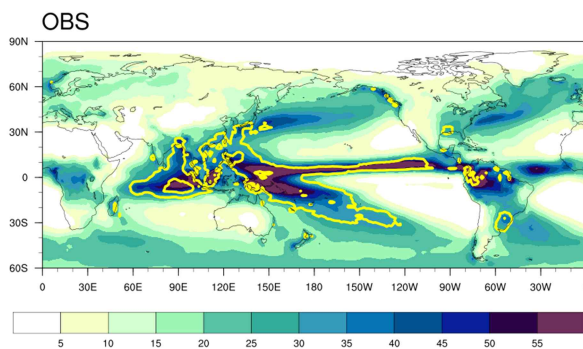


Figure 3.113. Weekly accumulated precipitation (mm/week) for climatology during the period 2003-2015.

## Mean Bias in Climatology

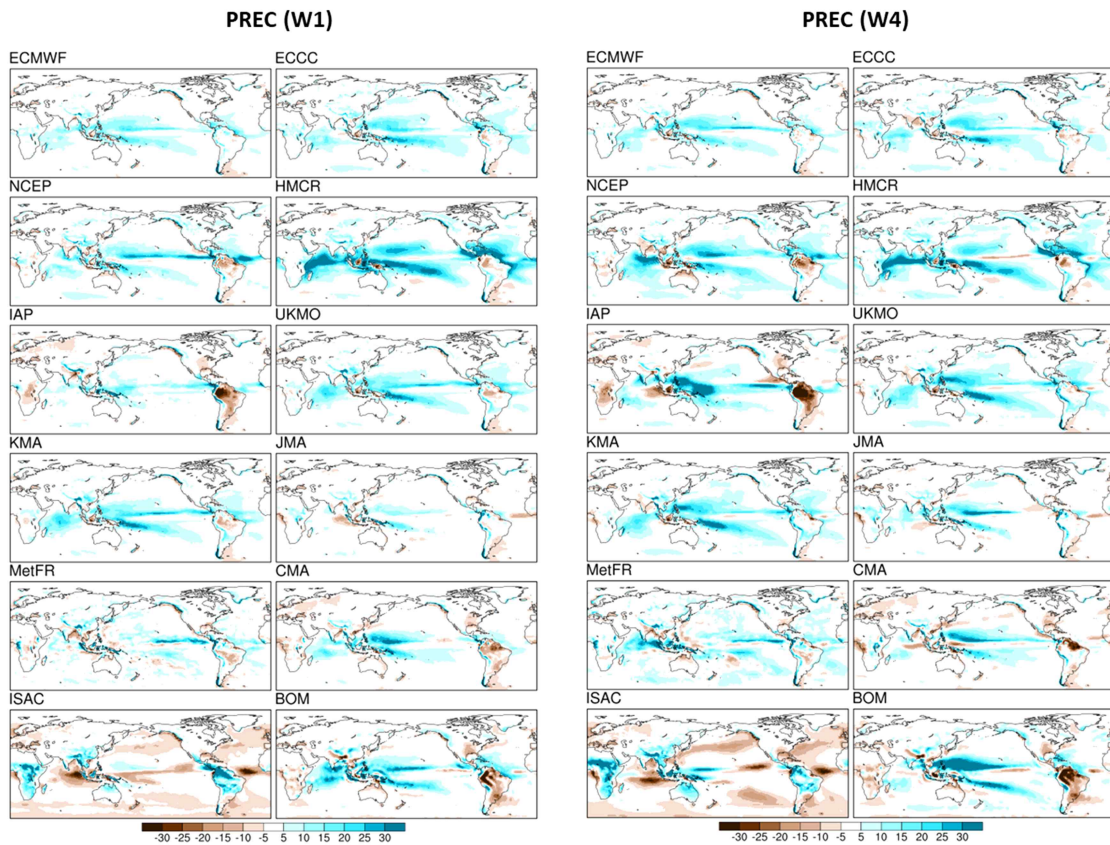


Figure 3.114. Bias in long-term mean (climatology) of PREC at 1 and 4 weeks for 12 models.

Figure 3.115~116은 S2S 12개 모델의 장기간 기후값 평균(Long-Term Mean, LTM) 및 변동성(Long-Term Standard-Deviation, STS)의 오차를 나타낸 것으로, 선행시간이 1일(동그라미)에서 32일(화살표)로 길어짐에 따른 차이를 확인할 수 있다. 기온 및 지위고도는 초기 선행시간에서 대부분의 모델은 관측과 유사하며, 전구 및 동아시아 지역(적도) 지역은 기온을 과소(과대) 모의하는 경향을 보인다. 강수는 다른 변수와 달리 선행시간에 따른 오차 증가는 크지 않으며, HMCR 관측과의 장기간 기후값 평균의 오차가 가장 크게 나타난다. 또한, 예측날짜에 대한 경년변동성이 실제 관측과 얼마나 다른지를 Figure 3.115의 표준편차값의 오차를 통해 확인할 수 있으며, 변수/모델/지역에 관계없이 선행시간이 증가할수록 모델이 모의한 변동성은 감소하는 경향이 뚜렷하다.

기후값의 공간분포 유사성 및 절대값 차이를 검증하고자 PCC/RMSE 지수를 적용한 결과를 Figure 3.116에 제시하였다. 선행시간이 증가함에 따라 대부분 지역/변수/모델에서 공간분포 유사성은 떨어지고 절대오차는 증가한다. 상층 지위고도장의 경우, 기본패턴에서 남북 방향 경도가 주를 이루기 때문에 PCC 통계 특성상 전구와 동아시아에서 성능 감소가 거의 나타나지 않는다(문자연 등, 2018). 초기 선행시점에서의 성능과 선행시간에 따른 성능 감소폭을 종합적으로 고려할 때, 기후값 재현성이 가장 높은(낮은) 모델은 ECMWF(HMCE, ISAC, IAP, BOM)이며

이는 기존의 연구들과 일치하는 결과를 보이며, 본연구에서 활용한 자료의 수집 및 전처리/표준화 작업이 안정적으로 되었음을 확인하였다.

### Bias in Long-Term Mean (LTM) and Standard-Deviation (LTS)

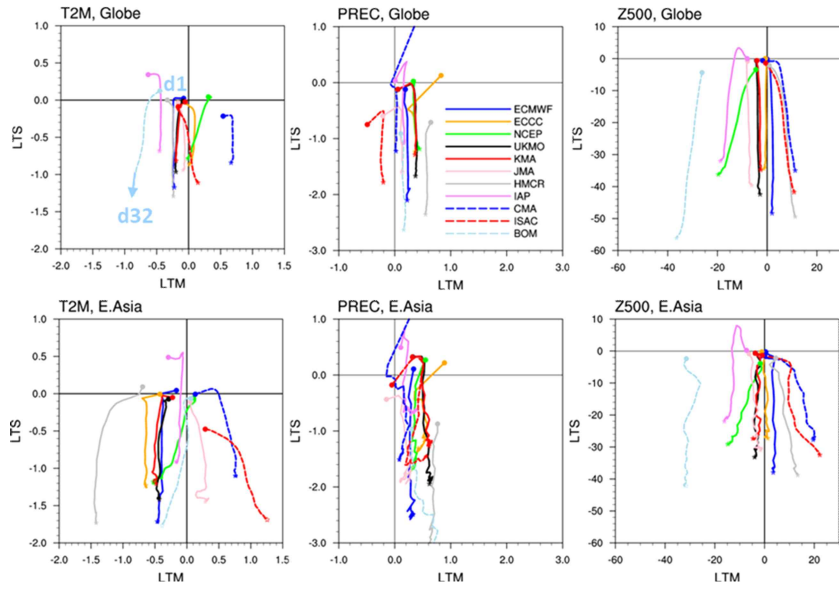


Figure 3.115. Temporal evolution of biases in long-term mean (LTM) and long-term standard-deviation (KTS) of T2M, PREC, and Z500 over globe and East Asia, increasing lead days from 1 to 32 for 13 models. Bias is defined as a mean value of differences relative to the observed LTM and LTS over globe during all year around.

### Pattern Correlation (PCC) and Root Mean Square Error (RMSE)

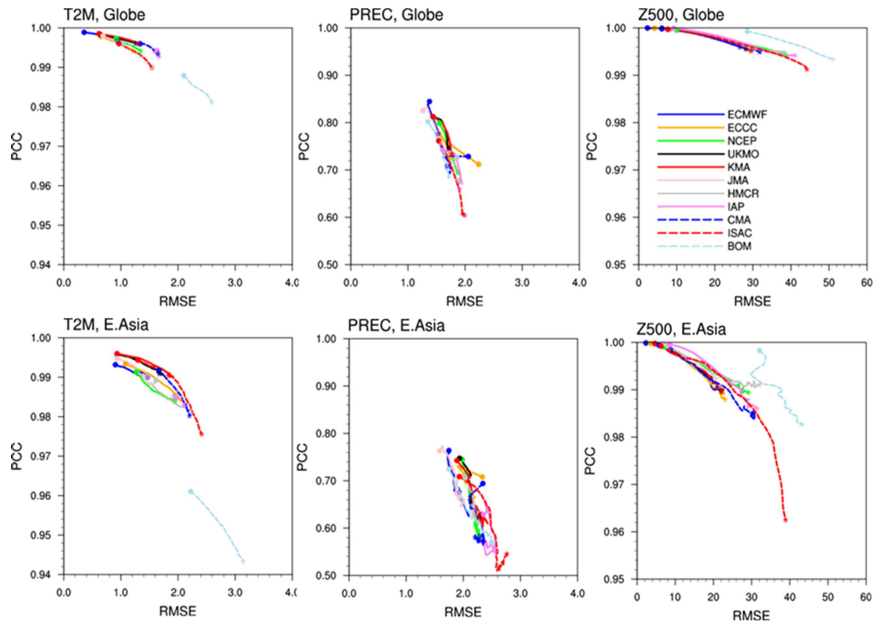


Figure 3.116. Pattern correlation coefficient (PCC) and root mean square error (RMSE) in long-term mean of T2M, PREC, and Z500 over globe and East Asia, increasing lead days from 1 to 32 for 13 models.

### 3.7.3.2 MME 계절내예측 현업운동을 위한 민감도 실험

#### 3.7.3.2.1 일자료 처리 방안 마련을 위한 민감도 실험

MME 계절내예측을 수행함에 있어서 모델의 기후값 계산 방법과 MME 예측시작 시점을 정하는 것은 중요한 이슈가 된다. 본 연구에서는 다양한 특성을 가진 개별모델의 일자료를 MME 현업시스템에 처리하기 위한 두 가지 이슈에 대한 민감도 실험을 수행하였다. 여기서 MME를 위한 주(예, 월~일 평균)를 정의하기 위해서는 SubC 사용자 가이드라인에 따라 예측 날짜를 일치시키는(Target-based) 방법을 사용하였다. 참고로 김가영 등(2019)은 타 모델(ECMWF, ECCO, NCEP) 대비 KMA 모델의 상대적인 예측력 차이를 분석하기 위해 선행시간을 일치시키는(Lead-based) 방법과 Target 방법을 KMA에 적용하여 살펴보았다. 이는 기준이 되는 3개 모델은 예측날짜와 과거재현날짜가 목요일로 동일한 모델로써, 고정일(1, 9, 17, 25일)에 과거재현 예측정보를 생산하는 KMA와 객관적으로 기후값을 비교하기 어려운 상황이었으며, 가능한 한 동일한 조건으로 맞추기 위해 Target 방법과 Lead 방법으로 기후값을 생산하여 비교/분석하였다. 그 결과, 전반적으로 두 방법 사이에는 예측력 차이가 크지 않았으며 Target 방법으로 기후값을 처방했을 때 동아시아 지역에서 다소 높은 예측력을 보였다. 하지만 본 연구는 예측날짜와 과거재현날짜가 상이한 다양한 모델을 통합하는 MME 연구이기 때문에 Lead 방법을 적용할 수 없으며, MME 예측일(예, 월요일)을 기준으로 Target 방법으로 개별모델의 기후값을 계산하였다. MME 예측은 최대한 많은 모델의 예측결과를 확인하기 위해 4주 예측까지는 6개 모델이 모두 활용된 결과이지만, 5주부터는 참여모델의 예측길이 한계로 인해 참여모델 수가 점차 줄어든다.

#### 3.7.3.2.2. 기후값 추정을 위한 민감도 실험

계절내 예측에서는 기후값 정의에 대한 표준이 없기 때문에 개별모델의 예측성 향상을 위해 모델의 예측자료 특성을 고려하여 다양한 방법으로 기후값을 정의하고 있다(Ham et al., 2019; 김가영 등, 2019; 김가은 등, 2021). 하지만 현재 계절내예측에서 기후를 정의하는 방법 중 가장 일반적인 방법은 예측날짜와 동일하거나 가장 가까운 과거재현날짜의 예측자료(hindcast)를 기후기간동안 평균하는 방법(clim)으로 현재 WMO 중장기 선도센터와 WMO 계절내예측 선도센터에서 계절내 MME를 위해 활용하는 방법이다. 본 연구에서는 과거재현자료 수를 늘이는 방법을 다양한 모델에 적용하여 최종적으로 MME 계절내예측에 영향을 미치는지 알아보았다. 즉, clim3w은 예측날짜와 동일하거나 가장 가까운 과거재현날짜를 포함하여 그 앞/뒤의 과거재현자료까지 활용한 방법으로, clim으로 기후값을 정의할 때보다 샘플 수를 3배로 늘리는 방법이다. 이 실험을 위해서는 기본적으로 예측날짜보다 과거재현날짜가 앞서 제공되어야 하는데 다행히도 대부분의 모델은 안정적인 운영을 위해 예측날짜보다 짧게는 2주(예, ECMWF), 길게는 1달(예, UKMO, KMA) 정도 선행하여 과거재현자료를 생산하고 있다. 또한 JMA 같은 모델은 과거재현자료를 한 번에 전체 기간에 대해서 제공하기 때문에 clim3w 방법은 현업적으로도 적용가능한 방법이기 때문에 본 연구에서 함께 평가하였다. 또한, ECMWF의 경우 매주 2회(월/목) 예측 및 과거재현정보를 생산하기에 다른 모델에 비해 사실상 활용할 수 있는 과거재현자료가 많다. 따라서 본 연구에서는 이 부분도 추가 분석하였다(Table 3.25).

Figure 3.117은 clim과 clim3w 방법으로 계산한 두 가지 기후값에 대한 2002~2016년 개별

모델 및 MME 예측자료(편차)에 대한 평균 예측력(ACC) 및 예측오차(RMSE) 차이를 지역별, 변수별로 나타내었다. 여기서 예측력 차이는 clim3w에 대한 clim의 상대적인 차이(%)로 나타냈으며, 양의 값은 clim 실험의 ACC 예측력이 clim3w에 비해 높고, 음의 값은 그 반대를 의미한다. 예측력 오차 또한 clim3w 대비 clim의 오차를 나타낸 것으로, 양의 값은 clim3w 관측과의 오차가 작고 음의 값은 clim 오차가 작다는 것을 의미한다.

Table 3.25. Definition of sensitivity experiments for estimating climatology.

Experiment	Definition
clim	Same or closest reforecast to the first day of target forecast
clim3w	Same or closest 3-set reforecast to the first day of target forecast
ECMWF_clim3s	Same or closest 3-set reforecast to the first day of target forecast
ECMWF_clim2s	Same or closest 2-set reforecast to the first day of target forecast
ECMWF_clim1s	Same or closest 1-set reforecast to the first day of target forecast

Relative Skill Difference w/clim (ANU, %)

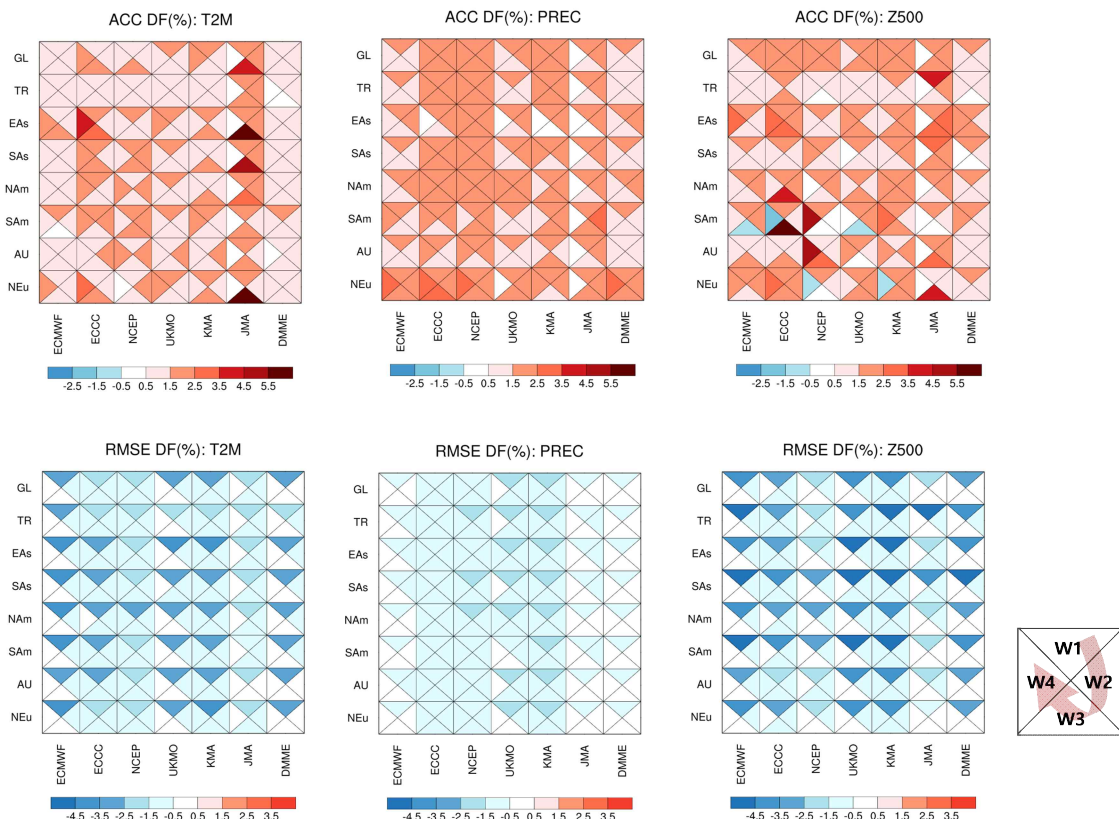


Figure 3.117. Relative skill difference of clim in terms of annual mean ACC and RMSE for the period 2002–2016 related to clim3w for each model and MME(%) of T2M, PREC, and Z500 over 8 regions.

민감도 실험의 결과, 15년의 과거재현기간 자료 기준으로 기후값 추정에 따른 개별모델의 연평균 예측력 차이는 크지 않았으며, 개별모델의 경우 Z500에서 일부 지역(남미와 유라시아 대륙, 3-4주)을 제외하고는 대부분의 지역/변수에서 clim이 높은 예측력을 보였다. MME 또한 지역/변수에 관계 없이 두 기후값에 따른 예측력 차이는 크지 않았으며(전구 지표기온 약 1-2% 내외), clim이 상대적으로 높은 예측력을 보였다. 두 기후값에 따른 예측오차를 상대적인 RMSE 비율로 살펴보면, ACC와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 계절이 바뀌어 기온이 급변하는 시기 등에는 연평균과 다른 결과가 도출될 가능성도 있기에 MME에 대한 민감도 결과를 계절별로도 살펴보았다(Figure 3.118). 지역/변수별 차이가 있긴 하지만, 연평균보다 계절별로 살펴본 기후값에 따른 민감도가 다소 크게 나타나며 상대적으로 지위고도가 민감하게 나타났다. 하지만 연평균과 동일하게 clim 방법이 전반적으로 모든 선행주와 지역에서 clim3w 보다 높은 예측력을 보였다. 즉, clim과 clim3w 방법에 따른 예측력 및 예측오차의 차이는 유의하지 않으며, 상대적으로 예측날짜와 동일하거나 가장 가까운 과거재현자료를 기후값으로 활용하는 경우가 계절내 MME에서는 가장 안정적인 결과를 보였다. 또한 추가적으로 수행한 ECMWF 결과 또한 앞선 실험과 동일하게 clim이 방법이 전반적으로 모든 변수/지역/주에서 높은 예측력과 관측과의 낮은 오차를 보였다.

사실상 clim3w 방법으로 개별모델에서 활용하고 있는 과거재현자료의 경우 매주 과거재현 자료를 생산하는 ECMWF, ECCO, NCEP의 경우는 3주간의 예측값이 기후값으로 활용되는 반면, 고정일에 과거재현자료를 생산하는 일부 모델의 경우 예측날짜와 동일하거나 가장 가까운 과거재현자료 3개를 활용할 때 자료의 길이가 3주 이상이며 경우에 따라서 JMA는 한 달 정도의 자료를 활용하는 경우가 발생하기도 한다. 이러한 이유로 특히 JMA에서 clim3w 예측력이 다른 모델에 비해 상대적으로 낮은 것으로 추측된다. 따라서 단일 모델의 예측력 향상을 위해 기후값을 생산하는 방법과 달리 특성이 상이한 다양한 모델을 MME 하는 경우에는 모델별로 다른 기간의 과거재현자료를 기후값으로 활용하는 건 객관적인 비교/분석 등을 저해하는 결과를 초래한다. 따라서 MME는 가능한 한 동일한 방법으로 개별모델을 처리하는 것이 가장 적합하다고 할 수 있다. 즉, 현업적 관점에서 다양한 지역/변수/계절에 대한 MME 예측력을 종합적으로 고려했을 때, 다양한 모델을 활용하여 MME를 생산하는 현업기관에서는 clim이 방법으로 기후값을 생산하는 게 가장 간단하고 효율적인 방법으로 판단된다.

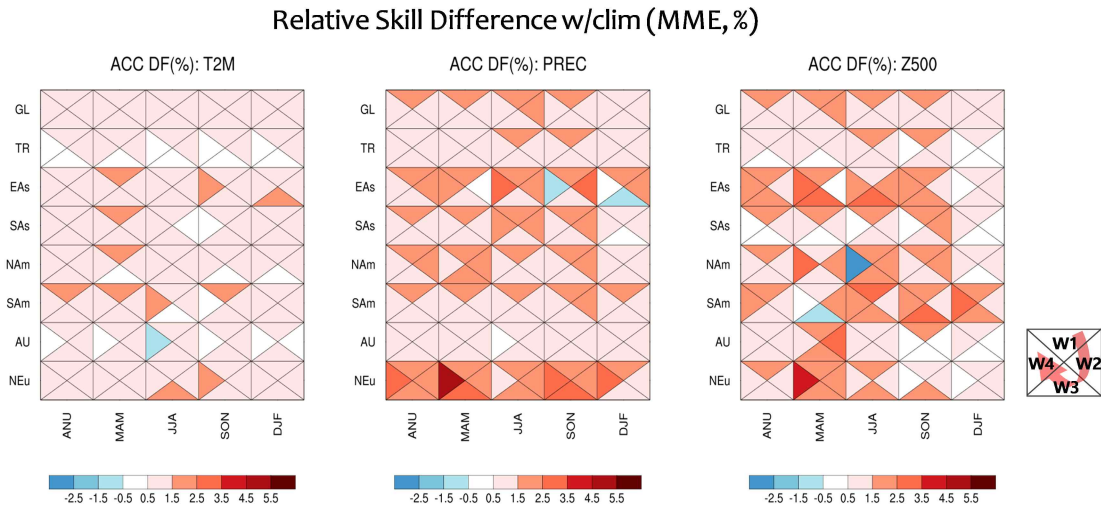


Figure 3.118. Relative skill difference of clim in terms of annual and seasonal mean ACC and RMSE for the period 2002-2016 related to clim3w for MME(%) of T2M, PREC, and Z500 over 8 regions.

### 3.7.3.2.3. MME 예측일(Target-Day)에 따른 민감도 실험

매주 계절내 MME를 구성하는 각 모델의 예측 시작일이 상이하므로 MME 계절내예측 시작 시점을 정하는 것 또한 중요한 이슈가 된다. WMO 장기예보 선도센터의 계절내예측시스템은 처음 구축할 당시 MME 참여모델의 선행시간 손실을 최소화하기 위해 MME 예측 시작일을 목요일로 정한 바 있다. 하지만 MME 예측의 시작이 월요일로 정하는 것이 실제 계절내 예측 자료의 활용 면에서 더 필요하다고 판단되어 2016년부터는 월요일로 변경하여 매주 월요일 예측을 수행한다(이우섭 등, 2017). 현재 WMO 계절내 선도센터 역시 월요일을 기준으로 주 1회 계절내 MME 예측정보를 생산/제공하고 있으며, NMME-SubX 자료를 활용하는 NOAA는 대부분의 모델들의 예측 시작일이 수요일인 점을 감안하여 현재 목요일 MME를 수행하고 있다. 따라서 본 연구에서는 MME 예측일에 따른 예측력 차이를 살펴보고, APCC MME 계절내예측 현업 운영에 가장 적절한 예측일을 선정하고자 한다.

본 연구에서 활용 중인 S2S 모델들의 과거재현자료를 살펴보면 크게 목요일 예측정보를 제공하는 모델(ECMWF, ECCO, NCEP과 고정일에 예측정보를 제공하는 모델(KMA, UKMO, JMA)로 나눌 수 있다. 예측력 평가 및 기술 개발을 위한 연구의 경우 리드에 따른 예측력 감소를 최소화하기 위해 대부분 목요일 예측자료를 그대로 활용하지만, 사실상 현업에서는 목요일 예측자료를 목요일 바로 활용할 수 없을뿐더러 자료 수집 및 전처리/표준화 등의 시간들이 추가적으로 필요하다. 따라서 본 연구에서는 현업운영을 위한 실질적인 예측력 평가를 위해 MME 예측일을 달리하면서 이에 따른 예측력 변화를 살펴보고자 한다. 예를 들어 MME 예측일을 목요일로 하는 경우 이는 이론적인 예측력으로 목요일 예측모델에게 상당히 유리한 평가이다. 예를 들어, 1월 13일을 타깃으로 MME를 수행한 경우, 목요일 예측모델들에서의 1주 예측은 예측력 손실 없이 1월 13일의 예측자료 중 첫 번째 리드 예측정보를 바로 활용하여 목~금요일 평균한 자료가 되며, 고정일에 예측정보를 제공하는 KMA은 1월 9일 예측자료 중 다섯 번째 리드 자료를 시작으로 1월 13일부터 1월 19일까지(목~금요일) 1주일 평균한 자료가 된다

(Figure 3.119). 반면 MME 예측일을 월요일로 하는 경우 ECMWF는 목요일 예측자료 중 다섯 번째 리드의 월요일 자료를 시작으로 월~일요일까지 평균이 1주가 된다(Figure 3.120).

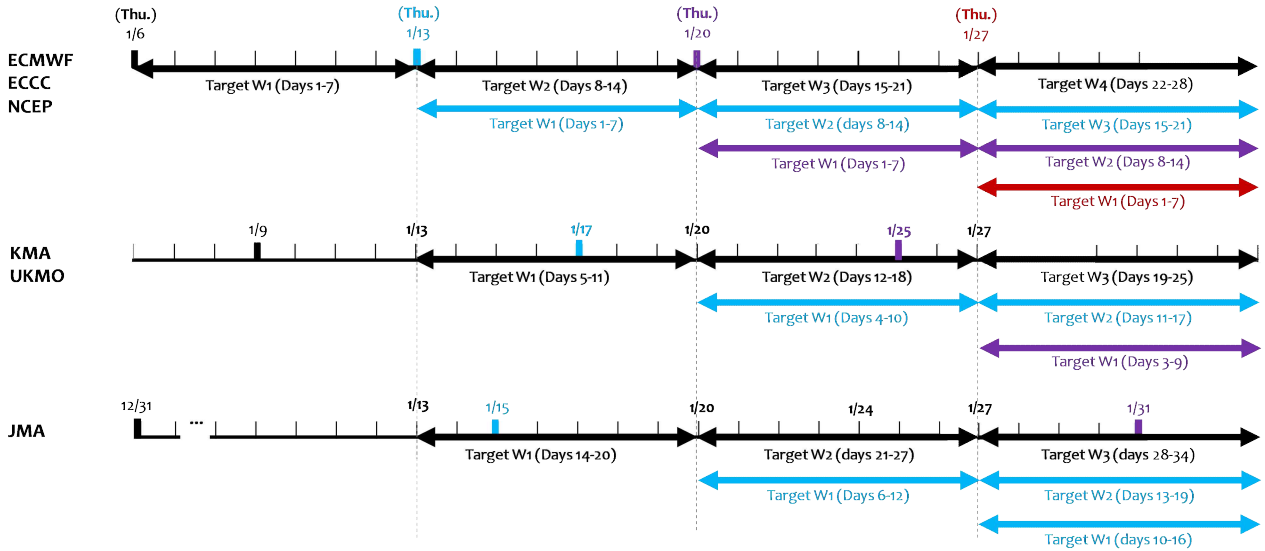


Figure 3.119. Diagram for individual models when Thursday is the MME forecast day.

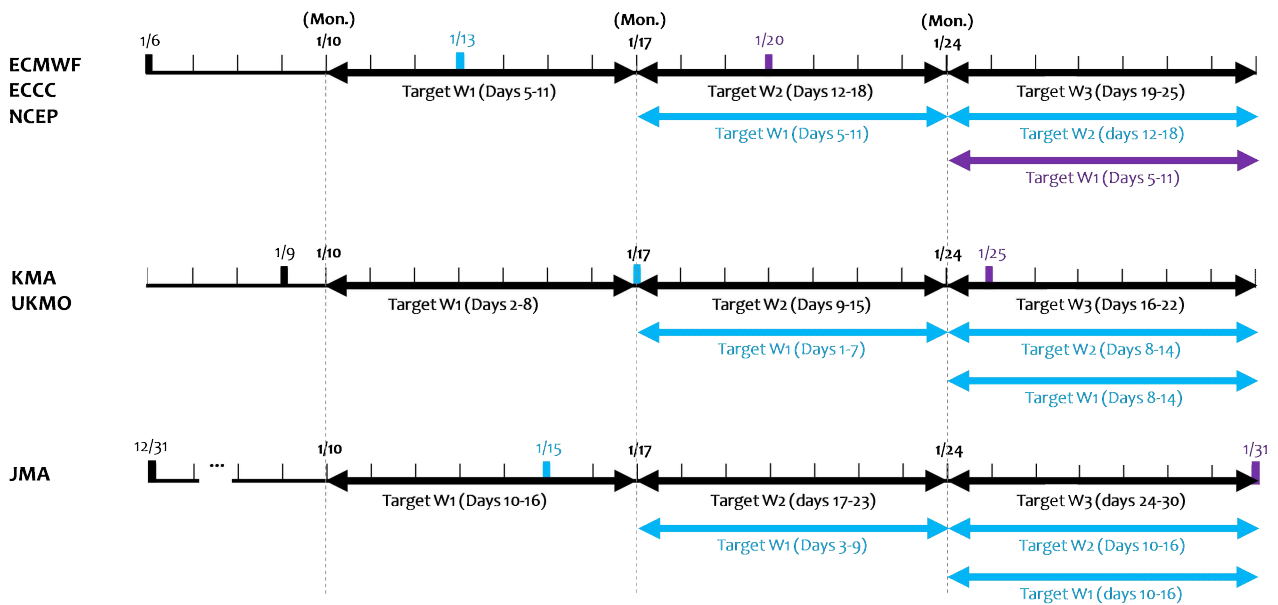


Figure 3.120. Diagram for individual models when Monday is the MME forecast day.

MME 예측일을 목요일(이론적인 예측력)에서 하루씩 변경 해가면서 개별모델 및 MME 예측력 변화를 살펴보았다(Figure 3.120). 목요일 예측모델의 경우, 예상할 수 있듯이 MME 예측일을 목요일에서 월요일로 갈수록(리드가 증가할수록) 예측력이 감소하며 예측력 감소는 1~2주에서 크게 나타났다, 이에 비해 고정일 모델의 경우 예측일에 따른 예측력 변화는 거의 없는

것으로 보인다. MME 또한 예측일이 목요일에서 월요일로 갈수록 예측력이 점진적으로 감소하며, 목요일 예측모델에 비해서는 예측일에 따른 민감도가 작은 경향이 있다. 앞서 언급한 바와 같이 목요일을 예측일로 했을 경우는 이론적인 예측력이며, 현업 스케줄 등을 고려했을 때 현실적으로 MME 가능한 월요일을 현실적 예측력으로 보고 목요일과 월요일에 대한 예측력 차이를 살펴보았다. 기온 및 지위고도의 경우 2주에서 약 ACC 0.15~0.2 예측력 차이를 보이며, 강수는 1주에서 0.10% 예측력 차이를 보인다. 하지만 4주 이상부터는 MME 예측일에 따른 전구 예측력 차이는 크지 않은 것으로 보이며 지역적으로도 동일한 결과를 보였다.

목요일과 일요일을 예측일로 했을 때 개별모델과 MME 예측력을 상대적으로 비교해 보면 목요일 예측의 경우(이론적 예측), 1~2주에서는 대부분의 지역에서 ECMWF가 예측력이 가장 높게 나타나며 3~4주부터는 MME와 유사한 예측력을 보인다(Figure 3.121-122). ECMWF는 초기 2주까지 매우 높은 대기 해상도로 모의를 수행하고, 앙상블 수가 다른 모델에 비해 상대적으로 많으며, 다양한 형태의 앙상블 수행과 자료동화 기법을 적용하기 때문에 초기 1~2주 성능이 높은 것으로 알려져 있다(문자연 등, 2018). 이러한 ECMWF가 리드 손실 없이 첫 번째 리드 예측 자료부터 활용함으로써 목요일 예측의 경우 예측성이 상당히 높게 나타났다. 이에 반해 월요일 예측의 경우(현실적 예측), 전반적으로 1주부터 MME 예측성이 ECMWF 보다 다소 높게 나타났다. 즉, 월요일을 예측일로 하는 경우는 예측성이 상당히 높은 초기 며칠의 ECMWF 예측정보를 활용하지 못하면서 나타난 결과로 해석된다.

### Anomaly Pattern Correlation (T2M)

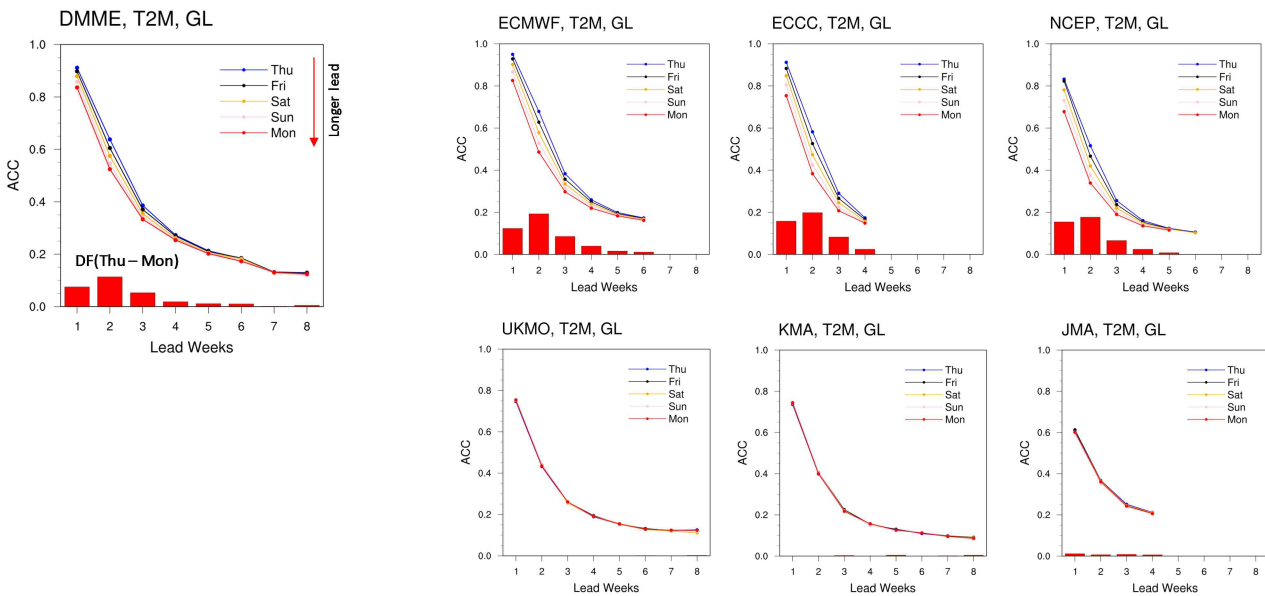


Figure 3.121. ACC of individual models and MME T2M prediction over globe for 4 lead weeks depending on MME target forecast day from Thursday to Monday. The skill difference between MME forecasts at target day on Thursday and Monday is displayed with histogram.

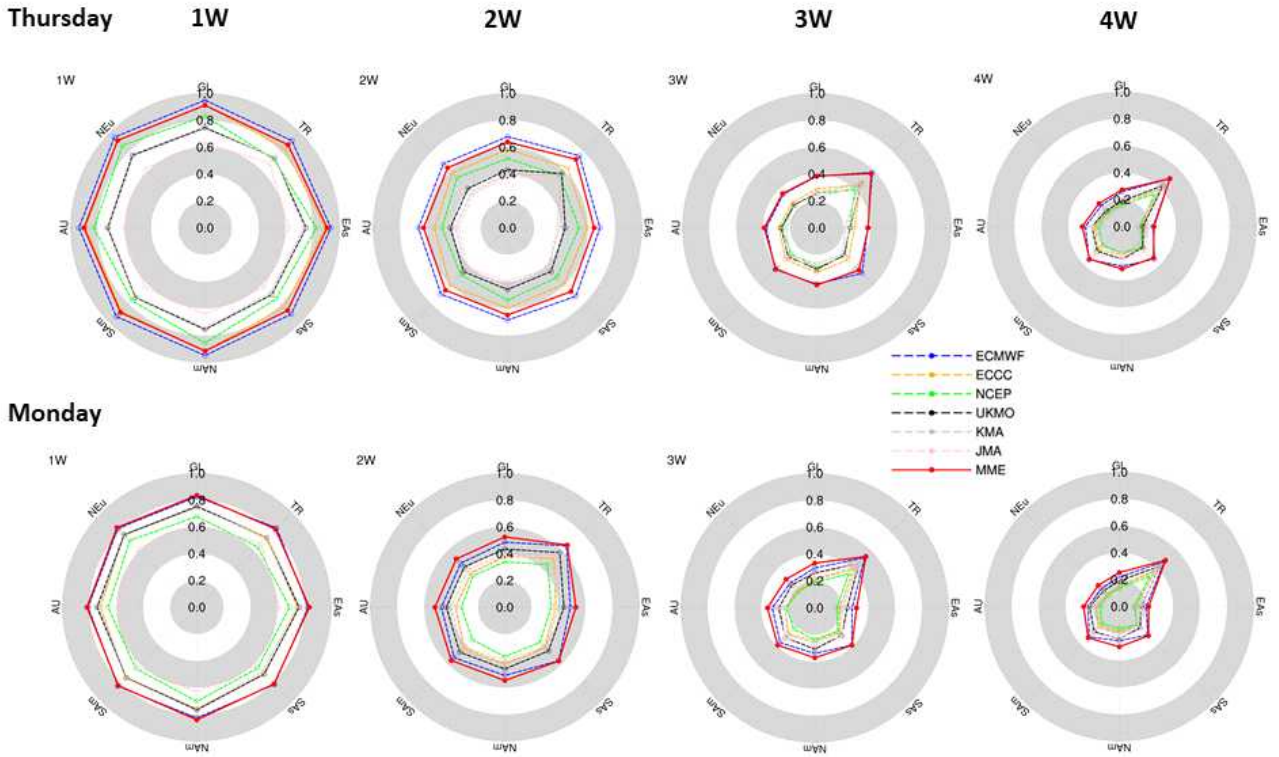


Figure 3.122. ACC of individual models and MME T2M prediction over 8 regions for 4 lead weeks at target day on Thursday and Monday.

과거재현자료 15년(2002~2016년)자료를 기반으로 했을 때, MME가 ECMWF 보다 예측력이 높아지는 시점을 찾기 위해 MME 예측일(목→수요일)에 따른 전구 기온의 ACC 변화를 살펴보았다(Figure 3.123). 초기 1주에서는 네 번째 리드 예측자료를 시작으로 하는 일요일까지는 ECMWF 예측력이 MME 보다 높게 나타났다. 2주에서 4주로 갈수록 그 시점이 점차 당겨지며 2주에서는 토요일, 3~4주에서는 앞선 결과와 같이 목요일부터 MME 예측력이 높게 나타났다. 분명 이러한 시점은 지역과 변수별로 다르게 나타날 것이며, 이를 Figure 3.124에 정리하였다. 기온 및 지위고도에 비해 강수는 MME가 ECMWF보다 예측력이 높아지는 시점이 초기 1~2주에서는 하루 정도 빠른 편이며 3~4주에서는 변수/지역 관계없이 모두 MME가 높은 예측력을 보였다. 이를 통해 선행시간 3주 이상부터는 MME 예측일에 상관없이 MME 예측력이 ECMWF보다 높게 나타나며 S2S 규모에서 MME 활용 가능성 또한 확인하였다. 결론적으로, 개별모델 예측일(선행시간 최소화), 리드에 따른 예측력 감소, 자료 수집 및 MME 시스템 운영시간, 예측자료 활용도(calendar week)를 종합적으로 고려했을 때, APCC 현업 목적으로 MME 예측일은 월요일이 가장 적합한 것으로 판단된다.

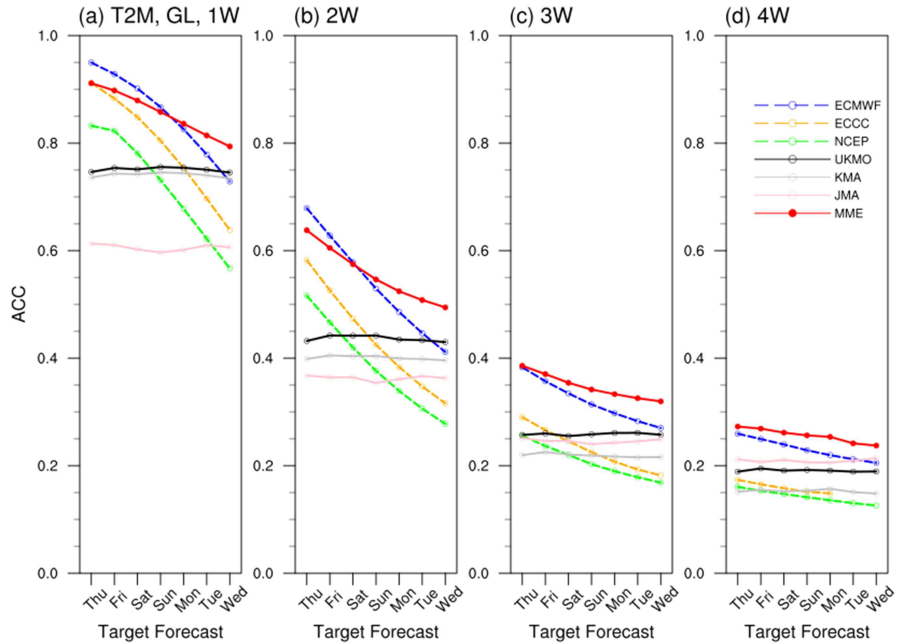


Figure 3.123. ACC of individual models and MME T2M prediction over globe for 4 lead weeks depending on MME target forecast day from Thursday to Wednesday.

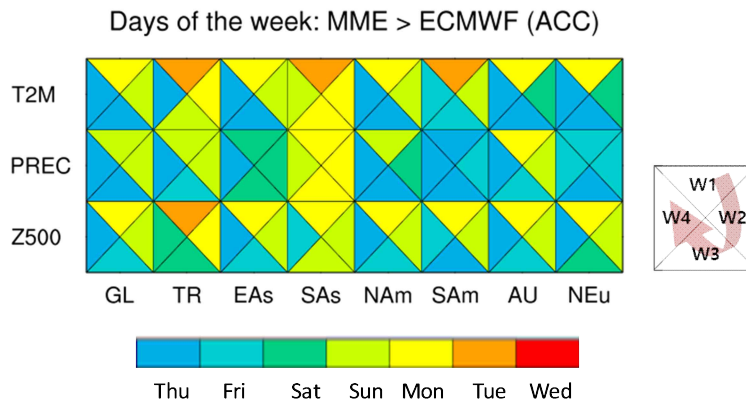


Figure 3.124. MME forecast day at which prediction skill for MME becomes higher than that for ECMWF for each variable and region for 4 lead weeks.

### 3.7.3.2.3. 참여 모델 수 증가에 따른 MME 예측력 민감도 실험

APCC가 S2S MME 현업을 하기 위해서 적당한 모델 수는 어느 정도가 되어야 하는지에 대한 해답을 찾기 위해 참여모델 수 증가에 따른 MME 예측력 변화를 살펴보았다. 이를 위해, 무작위, 반복을 허용하는 Monte-Carlo 실험을 500번 수행하였으며 Figure 3.125는 여름철 초기화된 기온 및 강수에 대한 결과이다. 즉, 여름철 13주 x 13년 (2003년~2014년) x 모델 수 변화(7경우, 2~8개) x 500번 실험으로 총 591,500번 샘플을 분석한 결과이다. 전구 기온 및 강수 결과

를 살펴보면, 참여모델 증가에 따른 MME 예측성 향상은 1-4주 모두 나타나며, 1주에서 4주로 갈수록 예측력 향상이 커진다. 즉, 계절내규모에서도 참여모델 수가 많으면 MME 예측력이 높아짐을 확인 할 수 있으며, 전반적으로 모델 5~6개부터 MME 예측력이 수렴하는 결과를 보인다. 이러한 특징은 지역적으로도 동일하게 나타나며, 참여모델 수에 따른 예측력 민감도는 예측력이 낮은 지역(동아시아, 유라시아 대륙)에서 크게 나타는 경향을 보인다(Figure 3.126). 이는 2023년 제5차 APCC MME 자료제공회의 결과(S2S 자료제공 동의 4개(NCEP, BOM, ECCO, HMCR), 내부 논의 필요 2개(JMA, KMA), 잠재적 참여가능(ECMWF, APCC) 2개)가 상당히 고무적임을 확인할 수 있다. 즉, MME 효율성 분석 및 민감도 실험 결과를 통해, APCC S2S MME 현업운영 가능성(예측성 보장)을 확인할 수 있었다.

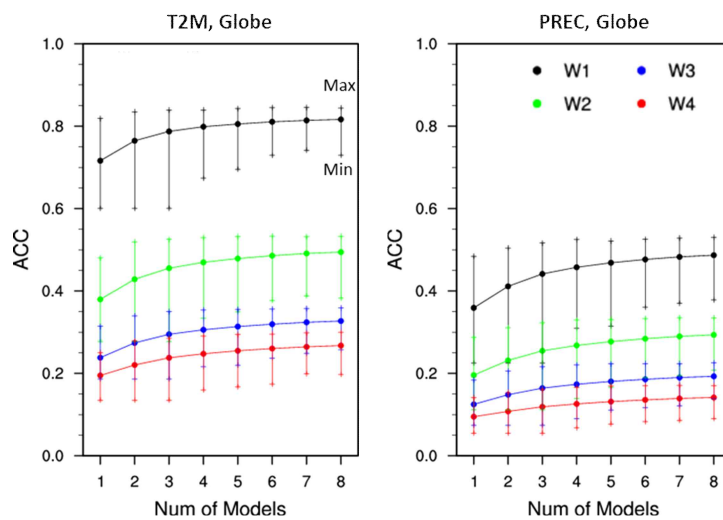


Figure 3.125. ACC for MME summer prediction of global temperature and precipitation with different number of participating models based on Monte-Carlo simulation.

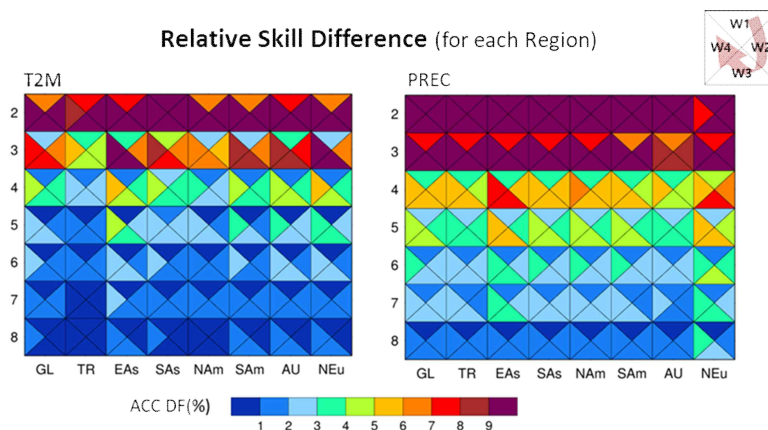


Figure 3.126. Relative skill difference of MME prediction with N models, with respect to N-1 models, of T2M and PREC for each week and region.

### 3.7.3.3 개별모델 및 MME 예측력 평가

개별모델 및 MME의 주평균 예측력 평가를 위해서는 개별모델의 공통재현기간(2003-2015년)을 포함하는 8개 모델(ECMWF, ECCO, NCEP, UKMO, JMA, KMA, HMCR, IAP)을 활용하였다. 이때, 주 정의, 기후값 활용 방법, MME 구성 방법 등은 2023년 S2S MME 현업운영을 위한 민감도 실험 결과를 바탕으로 하였다. 즉, 본 연구에서는 주를 MME 예측일 “월요일”을 기준(Target)으로 월~일요일 평균으로 정의하였으며, 그 결과 개별모델 별 활용되는 예측정보의 리드가 상이하다(Figure 3.120). 기후값은 MME 예측일을 기준으로 개별모델별로 가장 가까운 reforecast 자료를 활용하는 방법으로 계산하였다. MME는 8개 개별모델의 편차를 단순 평균하는 방법을 사용하였다. MME 예측은 최대한 많은 모델의 예측결과를 확인하기 위해 4주 예측까지는 8개 모델이 모두 활용된 결과이지만, 5주부터는 참여모델의 예측길이 한계로 인해 참여 모델 수가 상이한 결과이다.

Figure 3.127은 8개 개별모델 및 MME의 4주 기온 예측의 공간분포를 나타내었다. 개별모델 기온의 경우 해양지역에서 4주까지 높은 예측력이 유지되고, 일부 모델(ECMWF) 및 MME에서는 중위도 대륙지역까지 moderate 예측성능을 보인다. 강수의 경우, 신뢰할 만한 예측력은 주로 열대 해양 지역에 국한되어 있으며, 대륙의 예측력은 대부분 3~4주에는 사라지는 경향을 보인다. 하지만 적도 태평양은 4주까지 일관되게 높은 예측력을 보이고 있으며, 이는 ENSO 활동과 관련성이 있음을 시사한다. 일부 모델(ECMWF, JMA, KMA)는 최대 3~4주까지 MJO 변동성을 예측하면서 열대 인도양 및 Maritime Continent 지역에서 moderate 예측력을 4주까지 유지됨을 알 수 있다. 전반적으로 개별모델에 비해 MME 예측력이 지역/변수 상관없이 높게 나타나며, 4주까지 높은 예측력이 지속되는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 강수는 3~4주 예측력 자체는 여전히 낮은 한계점이 있다.

Figure 3.128은 전구 기온/강수/지위고도에 대한 8개의 개별모델 및 MME 예측자료의 전구 주별(1-8주) 예측성 및 1-4주 누적 예측성을 보여준다. 여기서 MME는 8개 모델 예측의 단순평균값으로, 1~4주까지는 8개 모델이 모두 참여하고, 5주부터는 개별모델의 예측길이 한계로 인해 참여모델 수가 점차 줄어든다. 개별모델을 먼저 살펴보면, 모든 모델은 선행시간이 1주에서 8주로 증가할수록 예측력이 떨어지며, 예측력 감소율은 선행시간이 증가할수록 줄어드는 경향을 보였다(1주→2주 가장 크게 나타남). 변수별로는 SST가 다른변수에 비해 선행시간 증가에 따른 예측력 감소율이 낮고, 지역적으로는 상대적으로 예측력이 높은 지역(적도 및 해양을 포함)이 대륙에 비해 선행시간 증가에 따른 예측력 감소율이 낮다. 누적된 예측성능 중 1주 선행시간의 예측성이 가장 큰 부분을 차지하고, 개별모델 중 ECMWF, UKMO, KMA 4주까지 높은 예측성을 유지하는 것으로 나타났다.

전구 기온/강수/지위고도에 대한 MME 예측성을 살펴보면, 모든 선행시간(1주~8주)까지 개별모델에 비해 높은 예측력을 보이며, 선행시간 증가에 따른 예측력 감소율은 개별모델 평균보다 약 5~10% 정도 낮고(그림 미제시), 특히 예측력 감소가 크게 나타나는 선행시간(1주→2주)에서 예측력 감소율이 상대적으로 작은 경향을 보이며 이는 MME의 긍정적인 효과라고 볼 수 있다. 또한 누적된 예측성능 또한 4주까지 높은 예측성을 유지하며, 1주 일부지역(적도 및 남미 지역에서 지표기온)을 제외하고는 지역/변수/주 관계없이 모든 개별모델에 비해 MME 예측력이

우수하게 나타난다(Figure 3.129). 개별모델 및 MME 주별 예측성능 평가를 통해, S2S 규모에서 MME의 긍정적인 효과를 확인하였다.

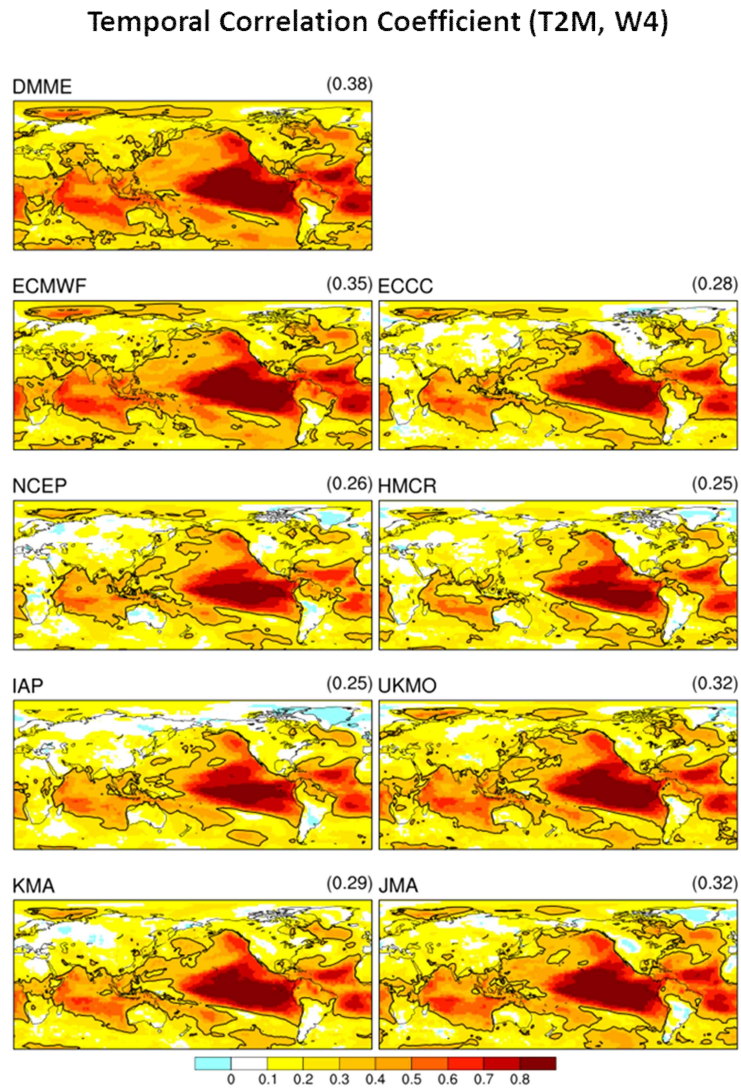


Figure 3.127. TCC of 8 models and MME predictions for T2M at 4 weeks.

### Weekly Skill: Anomaly Pattern Correlation

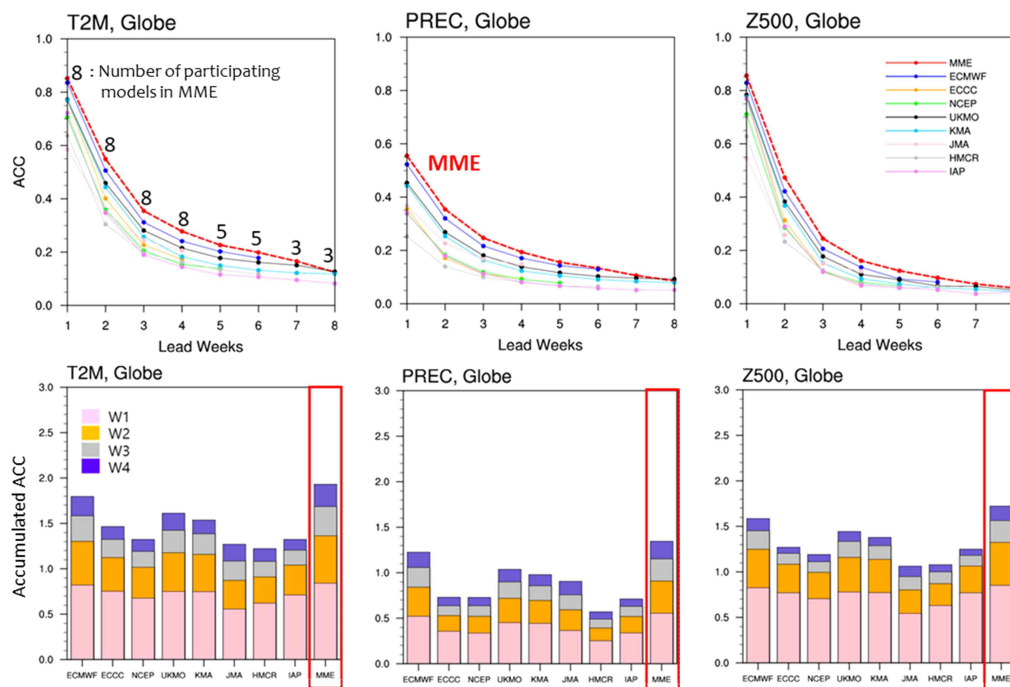


Figure 3.128. Weekly ACC and accumulate ACC for 4 weeks of the globe temperature, precipitation and Z500 from 8 models and MME prediction.

### Weekly Skill: ACC (for each Week/Region)

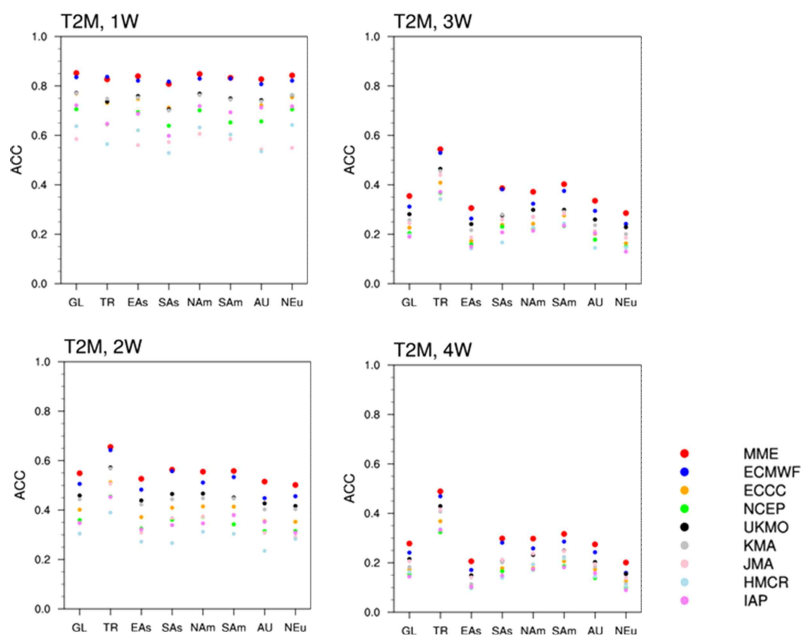


Figure 3.129. ACC of weekly mean T2M over globe for 8 individual models and multi-model ensemble.

### 3.7.3.4 MME 효율성 평가

앞서 살펴본 계절내규모에서의 MME 효과를 좀 더 구체적으로 살펴보기 위해, 8개 개별모델의 평균 예측력 대비 MME 예측력의 상대적인 비율로 MME 효율성을 평가하였다. 또한, 개별 모델 중 최고의 예측력을 보이고 있는 ECMWF에 대비 MME의 효율성도 함께 평가하였다. MME 예측력은 지역/변수/주 상관없이 개별모델 평균 예측력 보다 높으며, 1-4주 평균 기온은 약 40%, 강수는 60% 이상의 예측 효율성을 보인다(Figure 3.130). 또한, 개별모델 최고의 예측력을 보이는 ECMWF 대비 약 10% 이상 높은 예측력을 보인다. 이러한 MME 효율성은 1주에서 4주로 갈수록 증가하며, 4주에서 MME 효율성이 가장 크게 나타났다. 5주부터는 앞서 설명한 바와 같이 개별모델의 예측길이 차이로 1~4주와 함께 객관적으로 비교하긴 어려워 분석에서 제외하였다. 변수별로 살펴보면, 강수에서 MME 효율성이 크게 나타나며, 기본적으로 예측력이 높은 SST가 MME 효율성이 상대적으로 낮게 나타난다. 지역적으로 살펴보면(Figure 3.131) 모든 지역에서 MME 효율성이 개별모델 평균에 비해 높음을 확인할 수 있고, 특히 예측력이 낮은 지역(예, 동아시아, 유라시아 대륙 등)에서 효율성이 높게 나타나는 경향을 보였다. 계절별로도 예측력이 낮은 봄, 가을이 예측력이 높은 가을, 겨울에 비해 MME 효율성이 높게 나타난다. 이는 상대적으로 예측력이 낮은 변수/계절/지역/주에서 MME 효율성이 높게 나타나는 특징을 확인할 수 있었다.

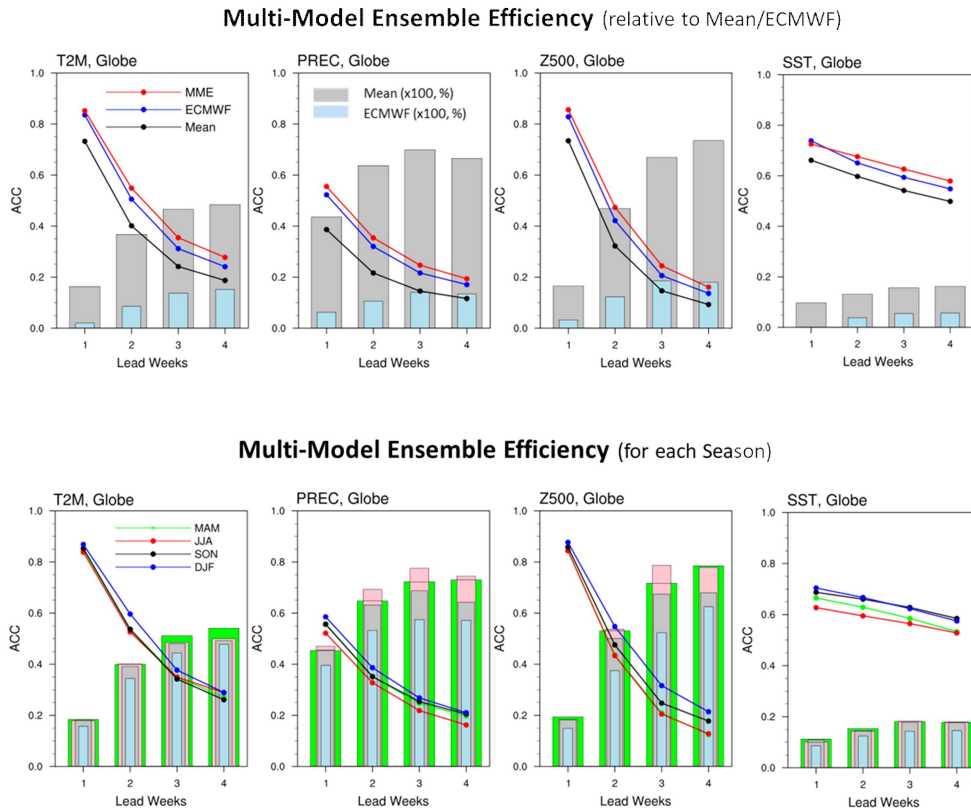


Figure 3.130. ACC of weekly mean prediction for ECMWF (blue line), average of 8 individual models (Mean, black line), and MME (red line) over globe for each variable and season. MME efficiency related to ECMWF (blue bar) and Mean (grey bar) for 8 lead weeks is displayed with histogram.

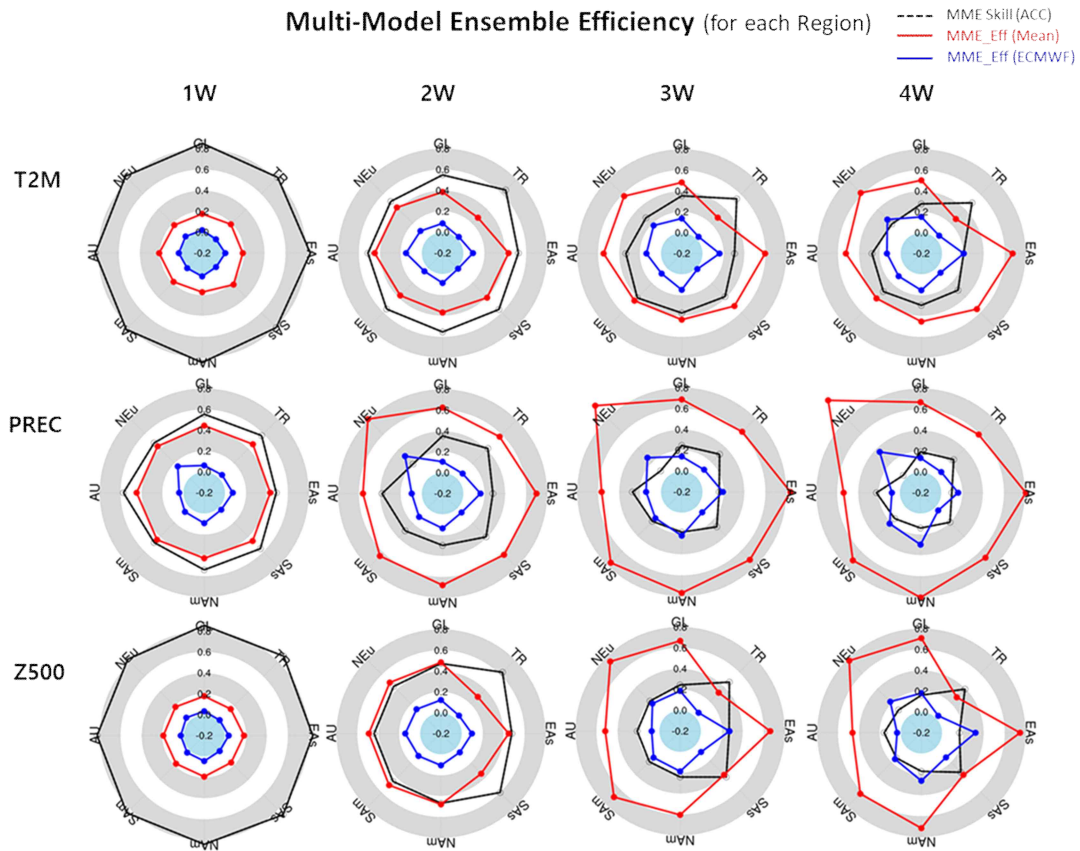


Figure 3.131. MME efficiency related to mean skill of T2M, PREC, and Z500 prediction from 8 individual models for 4 lead weeks over 8 regions.

### 3.7.3.5 활용성 증대를 위한 다양한 시간규모에서의 예측력 비교평가

개별모델 및 MME는 3주 이상부터는 예측성능이 급격히 떨어지며, 또한 MME를 수행하는데 있어서 소요되는 시간적인 문제(개별모델 자료 전송, 전처리 시간 등) 때문에 소실되는 예측력이 높은 개별모델의 초기 선행시점을 고려하면 계절내시간규모(2주~2달)의 MME 예측성에는 여전히 한계가 존재한다. 또한 예측성이 낮은 3주 이상의 예측정보를 개선하기 위한 기술 개발(예, 후처리, AI 기술 적용 등)에는 많은 시간이 소요되기 때문에, 7차년도 사업(2005년~27년) 중 S2S MME 현업운영을 목표로 하는 현 시점에서는 “주” 평균 예측 정보 제공이 최선인지에 대한 새로운 시각으로 살펴볼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 “주” 평균 뿐만 아니라, 다양한 시간규모(3~4주 평균, 1~4주 평균)에 대한 예측력 비교 평가를 통해 최적의 예측 콘텐츠를 찾아보고자 한다.

최종적으로 현재 APCC에서 매월 홈페이지를 통해 제공하고 있는 MME 계절예측의 월예보(1-month lead)와의 상대적인 예측력 비교를 위해, 동일 조건(동일 재현시간 및 관측자료) 하에서 예측성능을 분석하였다. 즉, 계절내 예측의 1-4주 평균 예측정보는 8개 개별모델의 단순평균이며, 계절예측의 월예보는 현재 APCC MME 계절예측에 참여하는 14개 개별모델의 단순평균이다. 기후값은 모든 모델의 동일 기후재현기간인 2003년~2010년(8년)이며, 관측자료 및 해상

도는 아래 Table 3.26과 같다. Figure 3.132는 개별모델의 전구 기온에 대한 다양한 시간규모의 예측력을 비교한 그림이며, Figure 3.133은 계절내예측 MME 기온/강수/지위고도/해수면온도의 선행 주수 별 예측성능을 3~4주 평균 및 1~4주 평균과 함께 나타내었다. MME는 변수에 상관 없이 모두 1주에서 4주로 갈수록 예측력이 떨어지며, 1~4주 평균 예측력은 전반적으로 약 1~2주 정도의 예측력을 보이고, 3~4주 평균 예측력은 2~3주 정도의 높은 예측력을 보인다. 특히, 해수면온도의 경우 1~4주 평균 예측력은 1주 정도의 높은 예측력이 유지되며, 이러한 특성은 지역별로도 동일한 결과를 보인다(그림 미제시). 즉, 계절내예측자료를 활용하여 biweekly(2주 평균) 또는 1-4주 평균(월) 정보는 예측력이 높은 최신의 1~4주 평균 예측정보를 매주 제공하여 이는 타기관과의 차별성 및 APCC 최종목표 “seamless prediction”에 부합하는 예측 콘텐츠로 유효성이 있는 것으로 판단된다.

Table 3.26. Descriptions of S2S MME and Seasonal MME for skill comparison.

	계절내 예측	계절 예측(APCC 공식예보)
참여모델	8개 (ECMWF, ECCO, NCEP, HMCR, KMA, JMA, IAP, UKMO)	14개 (APCC, BCC, BOM, CMCC, CWB, HMCR, JMA, JMA, MetFR, ECCO/MSO, NASA, NCEP, PNU, UKMO)
기후값	2003-2010년(8년)	
관측자료	ERA5, GPCP, OISST	
해상도	1.5°x1.5°	

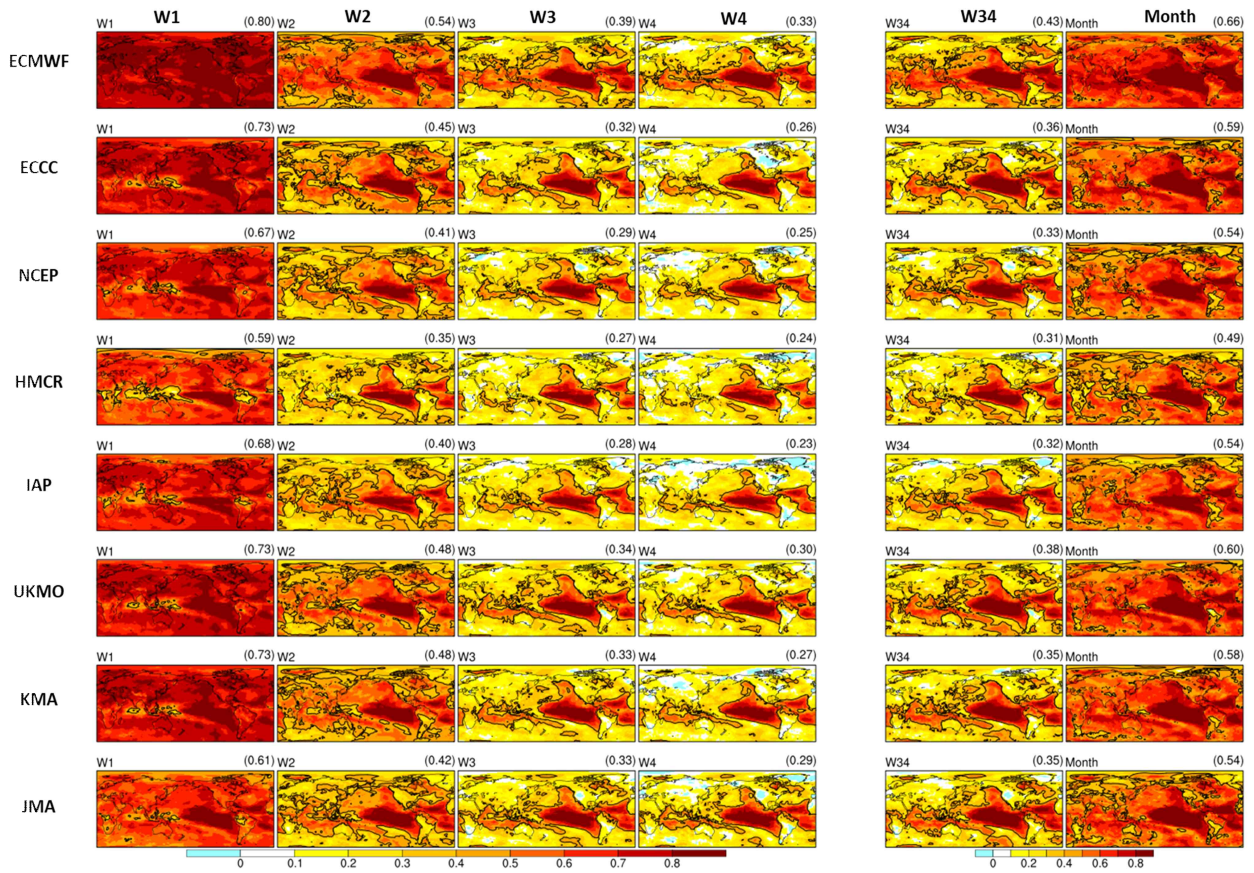


Figure 3.132. Temporal correlation coefficient of 8 models for global T2M at 1/2/3/4 weeks, 3-4 week means(W34), and 1-4 week means (Month).

### Weekly Skill (MME, Globe)

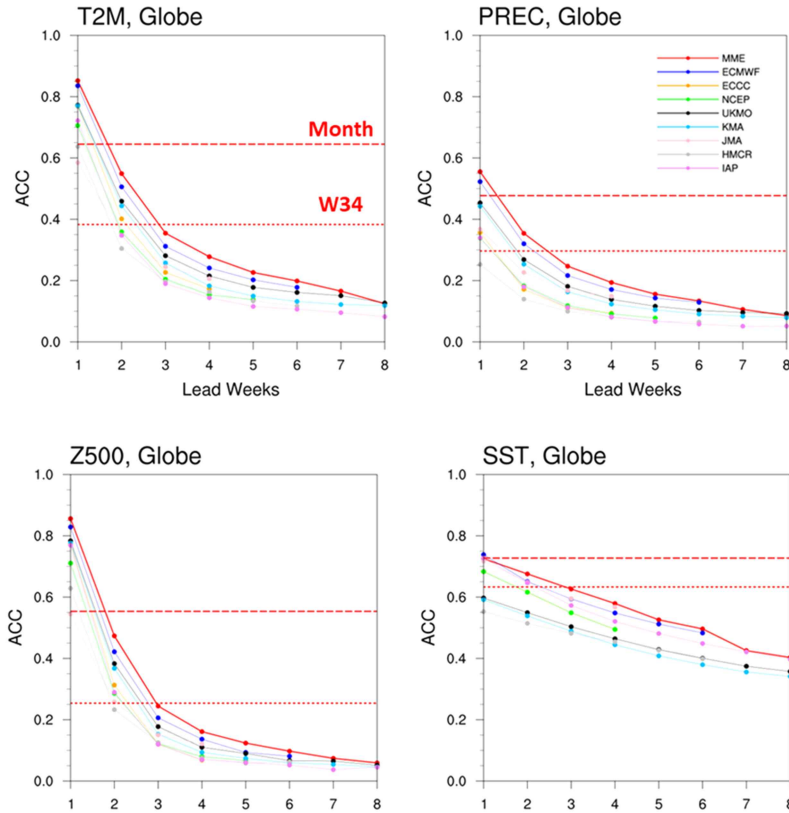


Figure 3.133. Weekly ACC of the global T2M, PREC, Z500 and SST. 3-4 week means (W34) and 1-4 week means (Month) are also displayed with red dashed- and dotted-line.

그렇다면 마지막으로 현재 APCC에서 제공하고 있는 계절예측 월예보 대비 예측력은 어느 정도인지 평가하기 위해, 계절내 MME 1~4주 평균 및 계절 MME 월예보 예측성능 공간분포 및 예측력 차이를 Figure 3.134에 나타내었다. 그 결과, 계절내예측 MME 1~4주 평균 예측력은 계절예측 MME 월예보 보다 예측력이 월등히 높음을 확인할 수 있다. 전반적으로 계절예측 MME 월예보는 계절내예측 MME의 약 3주 정도의 예측력을 보인다(그림 미제시). 특히, 계절예측 MME 예측력이 낮은 지역(예, 고위도 대륙)에서 계절내예측 MME 1~4주 평균 예측력 향상이 크게 나타난다(동아시아, 유라시아 대륙 등; Figure 3.134~135). 이는 계절예측정보는 경계조건에 영향을 크게 받는 반면, 계절내예측은 초기조건 및 경계조건 모두 영향을 받는 시간 규모로 경계조건보다 자체 역학으로 인한 기온 현상 및 강수 발생이 높은 고위도 지역에서 계절내예측의 예측력 향상이 큰 것으로 보여진다. 이는 기존 계절예측정보의 예측력 한계였던 고위도 지역에 대한 예측정보 활용도 증대 측면에서 아주 중요한 결과라고 할 수 있다. 다양한 시간규모에 대한 예측력 비교평가 결과를 종합하면, 계절내예측 MME 1~4주 평균 예측력은 계절내예측 MME 1주 예측력의 평균 기온의 약 75%, 강수 86%, 지위고도 65% 정도로 유지하고 있으며, 계절예측 MME 월예보에 비해 기온 약 75%, 강수 25%, 지위고도 113% 높은 예측력을 보인다

(Figure 3.136). 이는 예측력이 높은 최신의 1~4주 평균(월) 예측정보 매주 제공 “Frequently updated information with high predictability” 함으로써 계절내예측 가용한 자료의 최대 활용 측면에서 추후 APCC S2S MME의 예측 콘텐츠로 활용 가능할 것으로 보인다.

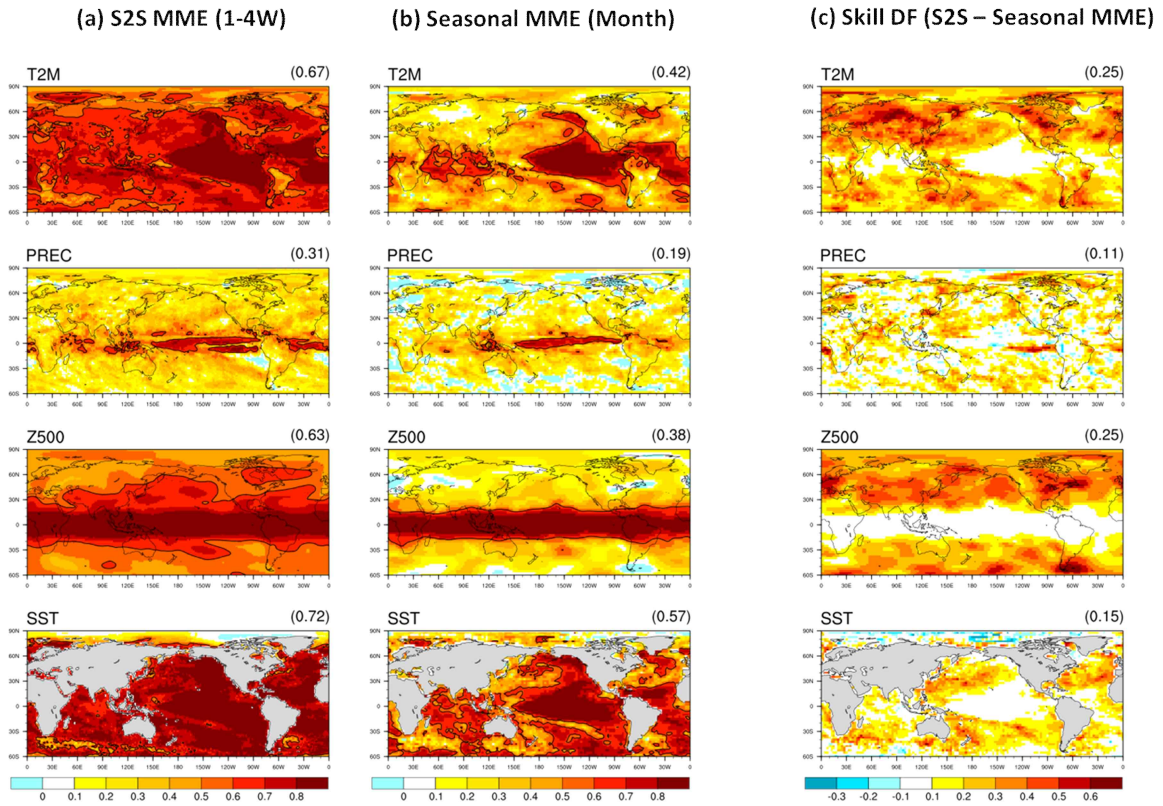


Figure 3.134. (a) TCC of 1-4 week means S2S MME prediction, (b) 1-month lead seasonal MME prediction, and (c) skill difference between (a) and (b) for T2M, PREC, Z500 and SST.

### Weekly ACC Skill (MME, Region)

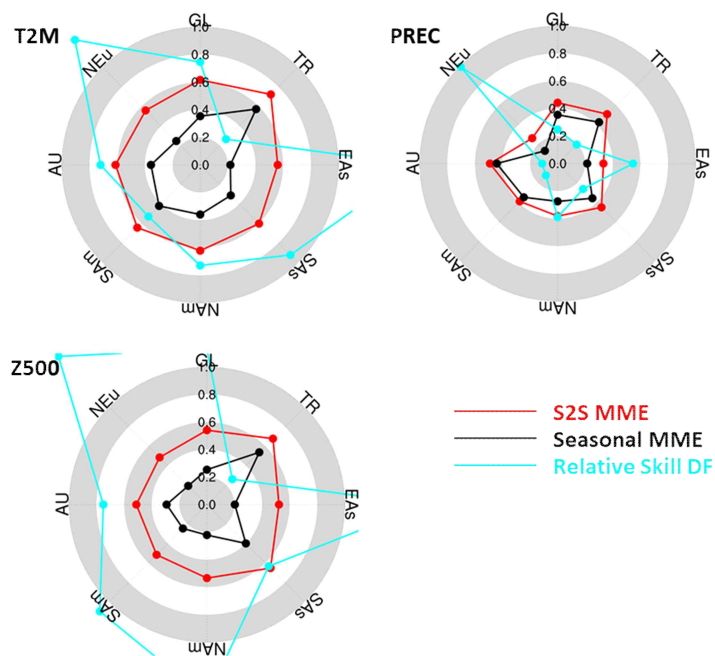


Figure 3.135. Weekly ACC of 1-4 week means S2S MME prediction, 1-month lead seasonal MME prediction, and their relative skill difference for T2M, PREC, and Z500 for each region.

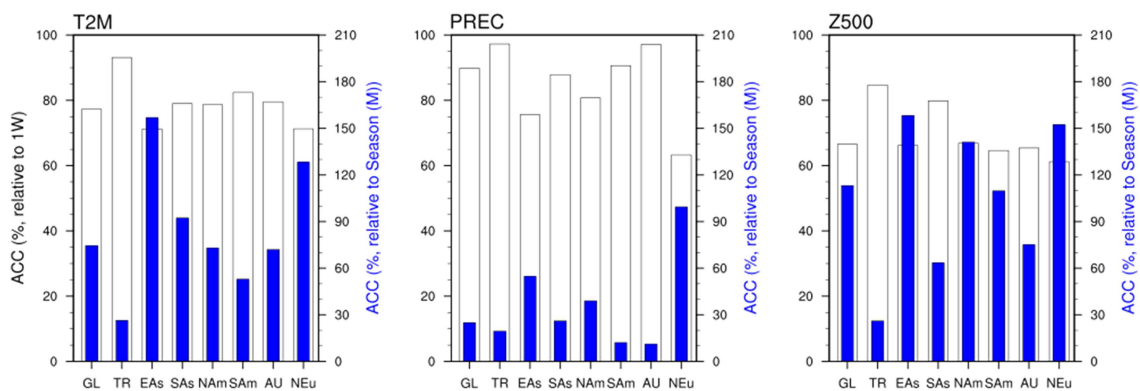


Figure 3.136. Relative skill difference of 1-4 week means S2S MME prediction with respect to 1 week (white histogram) and 1-month lead seasonal MME prediction (blue histogram) for T2M, PREC, and Z500.

### 3.7.3.6 개별모델 계절내 예측자료 확률분포 특성 분석

개별모델의 앙상블 자료를 활용한 확률예측정보 추정을 위해서는 앙상블 자료를 특정 분포로 가정하는 모수화 기법(parametric approach)과 경험적인 확률분포를 사용하는 비모수화 기법(non-parametric approach)이 주로 활용되고 있다. 현업적 측면에서는 계산 시간 및 안정적인 경험 분포 추정을 위한 샘플 수의 제약으로 인해 비모수화 방법보다는 모수화 기법이 주로 사용되고 있다(Min et al., 2009). 앞서 설명한 바와 같이 모수화 기법은 자료를 특정 분포로 가정하여 특정 기준값(예, 평년보다 높음/비슷함/낮음)에 대한 면적으로 확률을 계산하기 때문에 자료에 대한 변수별 확률분포도 평가가 선행되어야 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 우선 관측 기온 및 강수 주별 평균에 대한 Kolmogorov-Smirnov 분포도 검정을 수행하였다. 이는 샘플자료가 이론적 분포(예, 정규분포)를 따르는지에 대한 통계검정방법이며, 과거재현기간(2003-2015년)에 대한 관측 기온의 경우 1/2/3/4주, 3-4주 평균, 1-4주 평균 모두 유의수준 5%에서 전구지역 모두 정규 분포를 따르는 것으로 확인되었다(그림 미 제시). 기온과 달리, 강수의 경우 주 평균 분포가 일부 지역에서 정규분포를 따르지 않는 것으로 확인되며(Figure 3.137), 일부 예외 지역은 대부분 사막이거나 월 평균 강수량이 상당히 적은 지역과 일치한다. 각 주의 결과와 달리 3-4주 평균 또는 1-4주 평균은 정규분포를 따르지 않는 영역이 다소 줄어드는 경향을 보였다. 관측에 이어 개별모델에 대한 분포도 검정을 수행하였으며, ECMWF와 UKMO에 대한 일부 결과를 Figure 3.138에 나타내었다. 기온/지위고도/해수면 온도는 1/2/3/4주, 1-4주 평균에 대해서 전구 대부분 지역에서 정규분포를 따르며, 강수의 경우 1/2/3/4주, 1-4주 평균 모두 정규분포를 따르지 않는 지역이 나타나며, 관측에 비해 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이는 계절내 규모에서 강수의 경우 특정 지역(사막 또는 월 평균 강수량이 적은 지역)에서는 정규분포를 따르지 않음을 확인하였으며, 현재 APCC S2S MME를 위해 구축한 Pilot 시스템 확률기법이 계절예측기술을 그대로 적용하여 정규분포를 가정한 모수화 기법인 점을 감안하면 추후 강수에 대해서는 확률예측기법 수정이 필요함을 시사한다.

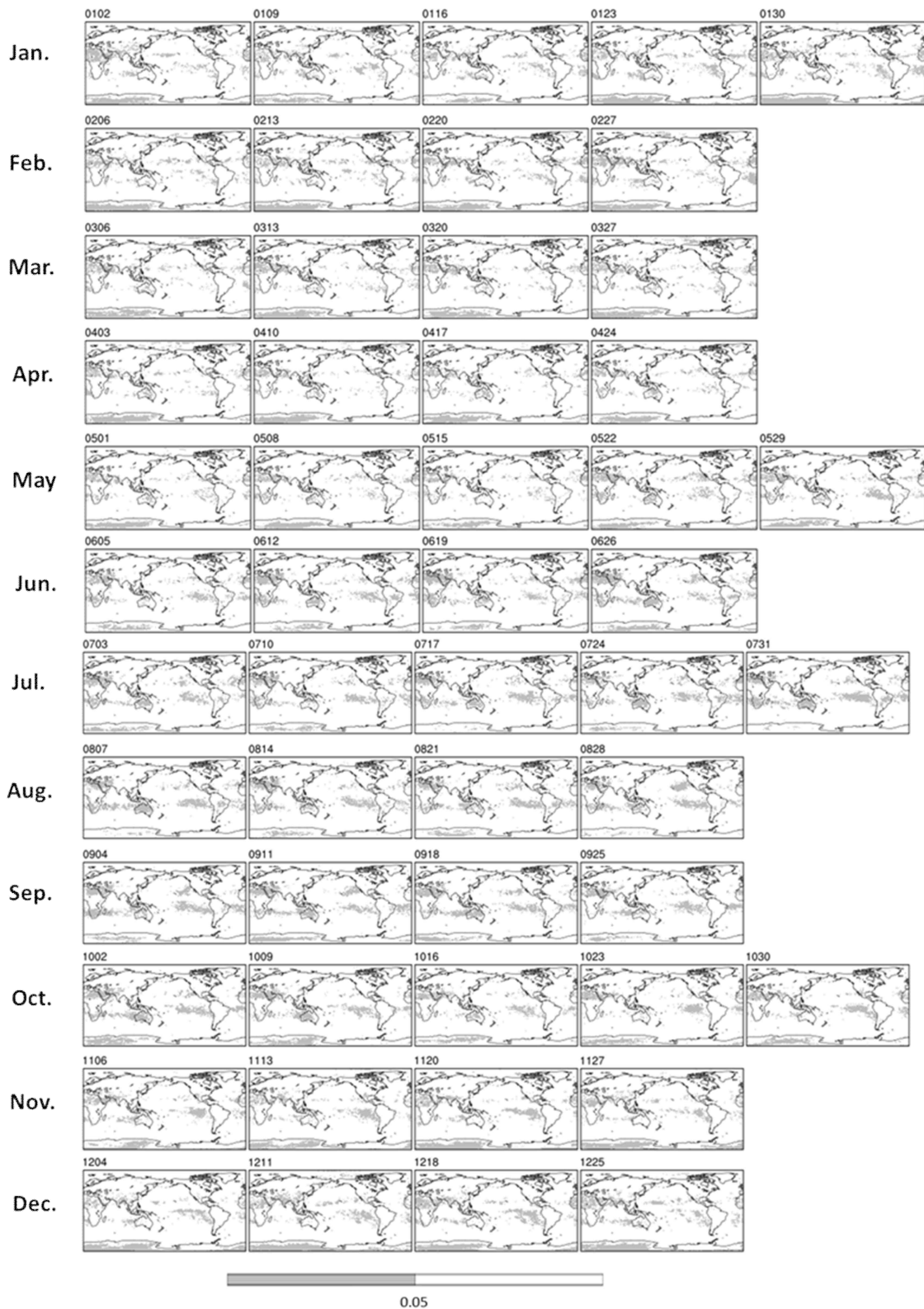


Figure 3.137. Kolmogorov-Smirnov test of observed weekly mean PREC for the period 2003-2015 with 5% significance level.

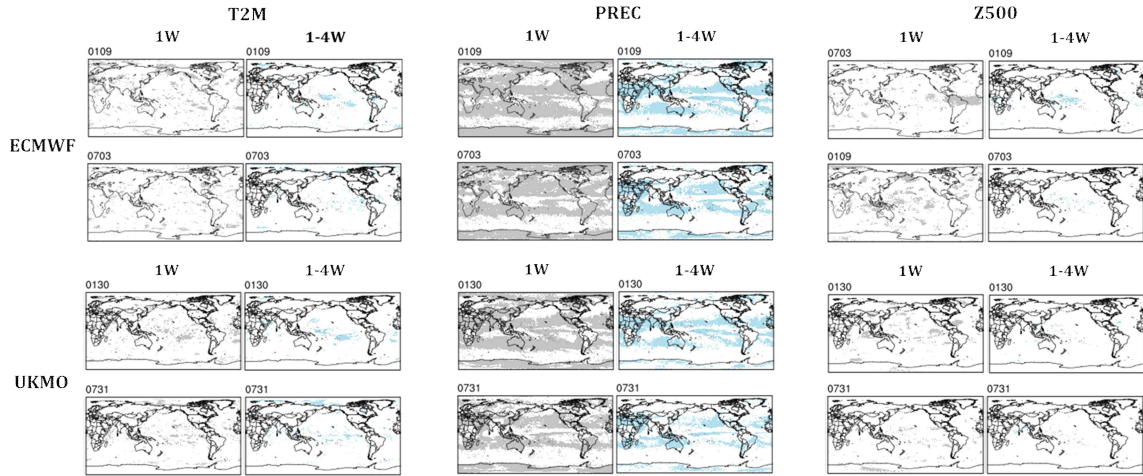


Figure 3.138. Kolmogorov-Smirnov test of T2M, PREC, and Z500 at 1 and 4 weeks from ECMWF and UKMO for the period 2003-2015 with 5% significance level.

### 3.7.4 동아시아 지역 이상기후 예측을 위한 기반 연구

동아시아 지역 월별 한랭, 온난 기온 이상기후의 시간적 분포를 살펴보기 위해 1979-2023년 월별 이상기후 일수를 계산하여 Figure 3.139의 시계열을 그렸다. 기준은 앞서 기술했듯이 각 격자별로 기온이 10, 90 퍼센타일을 넘는 일로 정의하였으며, 기후기간은 1991-2010이다. 한랭 이상기후 일수(Number of Cold Extreme Days)는 점점 줄어들고, 90 퍼센타일 위의 온난 이상기후 일수(Number of Warm Extreme Days)는 점점 증가하며 동아시아의 온난화 현상을 잘 보여준다. 한편, 최근 온난 이상기후 일수는 한 달 평균 7-8일까지도 증가하지만 역설적으로 2-3일에 머무르는 달도 있어 분포의 간극이 크다는 것을 알 수 있다.

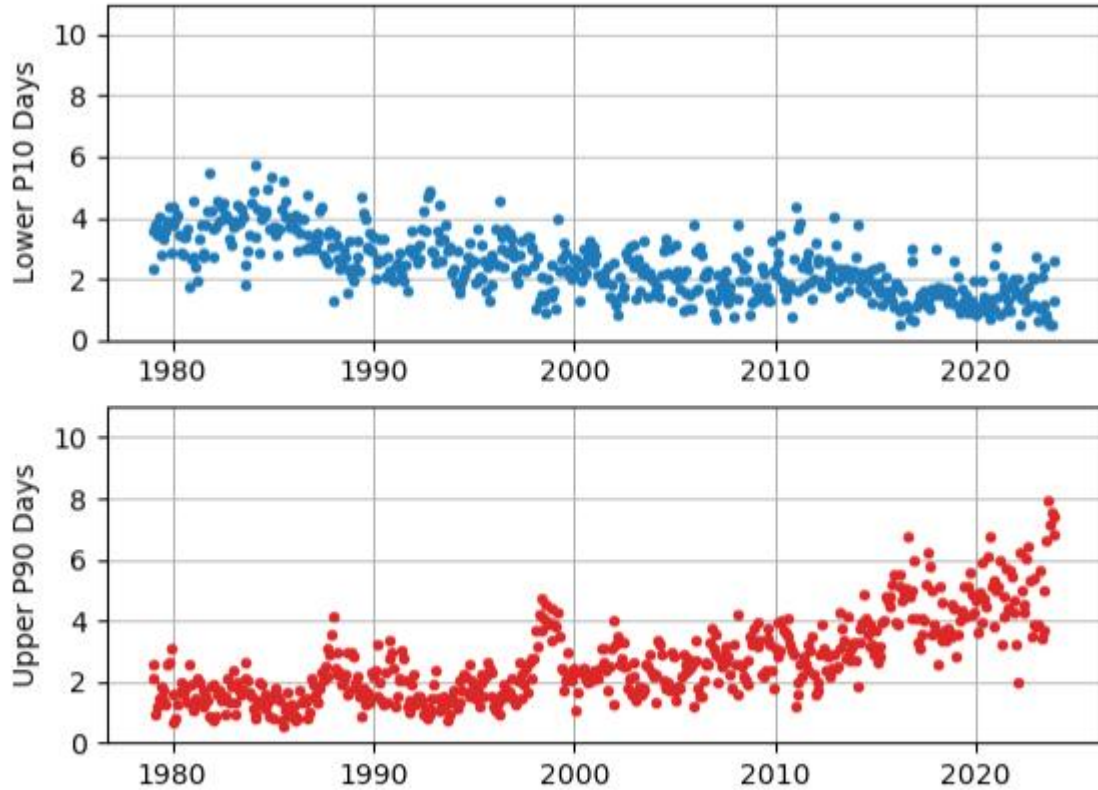


Figure 3.139. Time series of monthly number of cold (upper) and warm (lower) extreme days since 1979, averaged in East Asia [ $70^{\circ}$  E- $155^{\circ}$  E,  $10^{\circ}$  N- $65^{\circ}$  N]. Lower than 10 percentile and upper than 90 percentile 2-m temperature are defined as cold and warm extreme days, consecutively.

기후기간(1991-2010)과 실시간 예측기간(2010-2023) 월별 한랭 이상기후 공간분포를 살펴보기 위해 Figures 3.140, 3.141을 그렸다. 기후기간에 한랭 이상기후는 평균적으로 2-4일로, 월별로 큰 변동은 없으며 공간적으로도 큰 특징은 없다. 실시간 예측기간에는 0-4일까지 다양하게 나타나고 비교적 10월과 12월 일부 지역에서는 5-6일 정도로 크게 나타나기도 하지만, 대체적으로 기후기간에 비해서는 줄어드는 편이다.

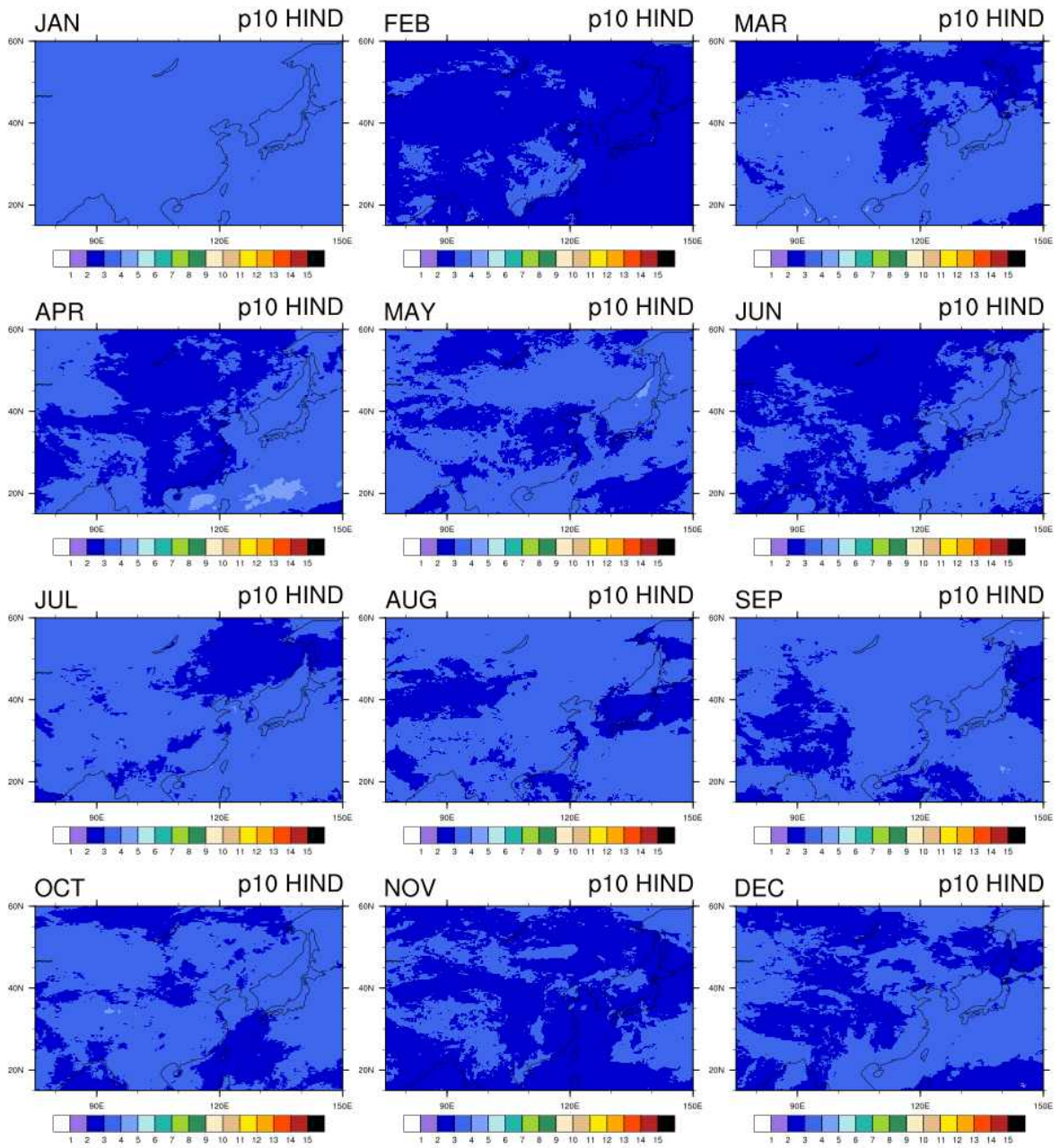


Figure 3.140. Monthly number of cold extreme days in hindcast period [1991-2010] over East Asia.

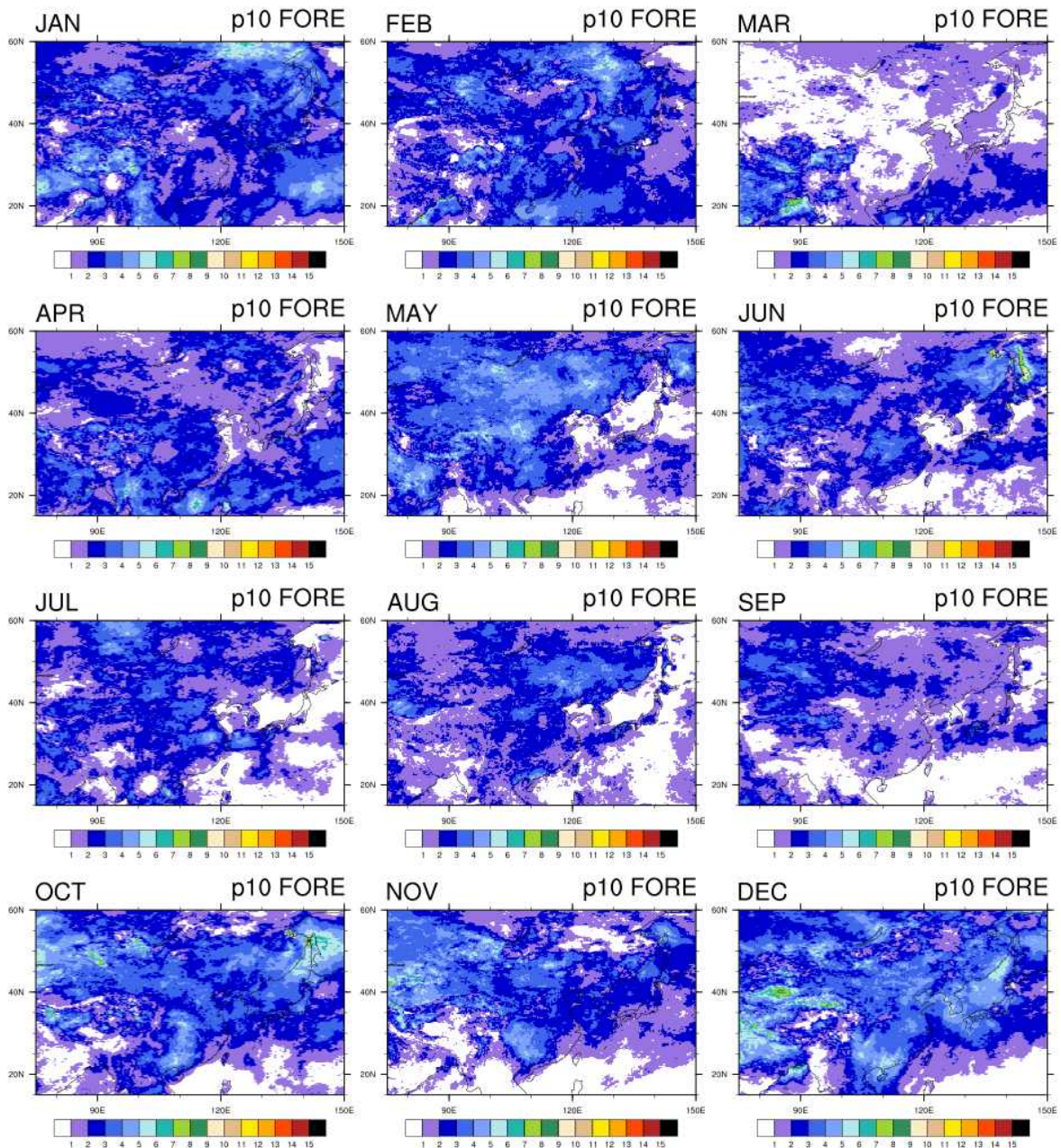


Figure 3.141. Monthly number of cold extreme days in the real-time forecast period [2013-2023] over East Asia.

기후기간(1991-2010)과 실시간 예측기간(2010-2023) 월별 온난 이상기후 공간분포를 살펴보기 위해 Figures 3.142, 3.143을 그렸다. 기후기간에는 한랭 이상기후와 마찬가지로 이상기후 일수는 2~3일 정도의 분포를 보이지만, 예측기간에는 많은 지역에서 이상기후 일수가 증가하는 것을 보인다. 이는 최근 증가하는 온난한 기후현상을 반영한 것이다. 3월에는 동아시아 북부 넓은 지역에서 이상기후 일수가 7~10일 정도로 나타나며, 그 외에 티벳 지역에서 특히 여름-가을 시기 이상기후 일수가 11일 이상 나타나 고온 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다.

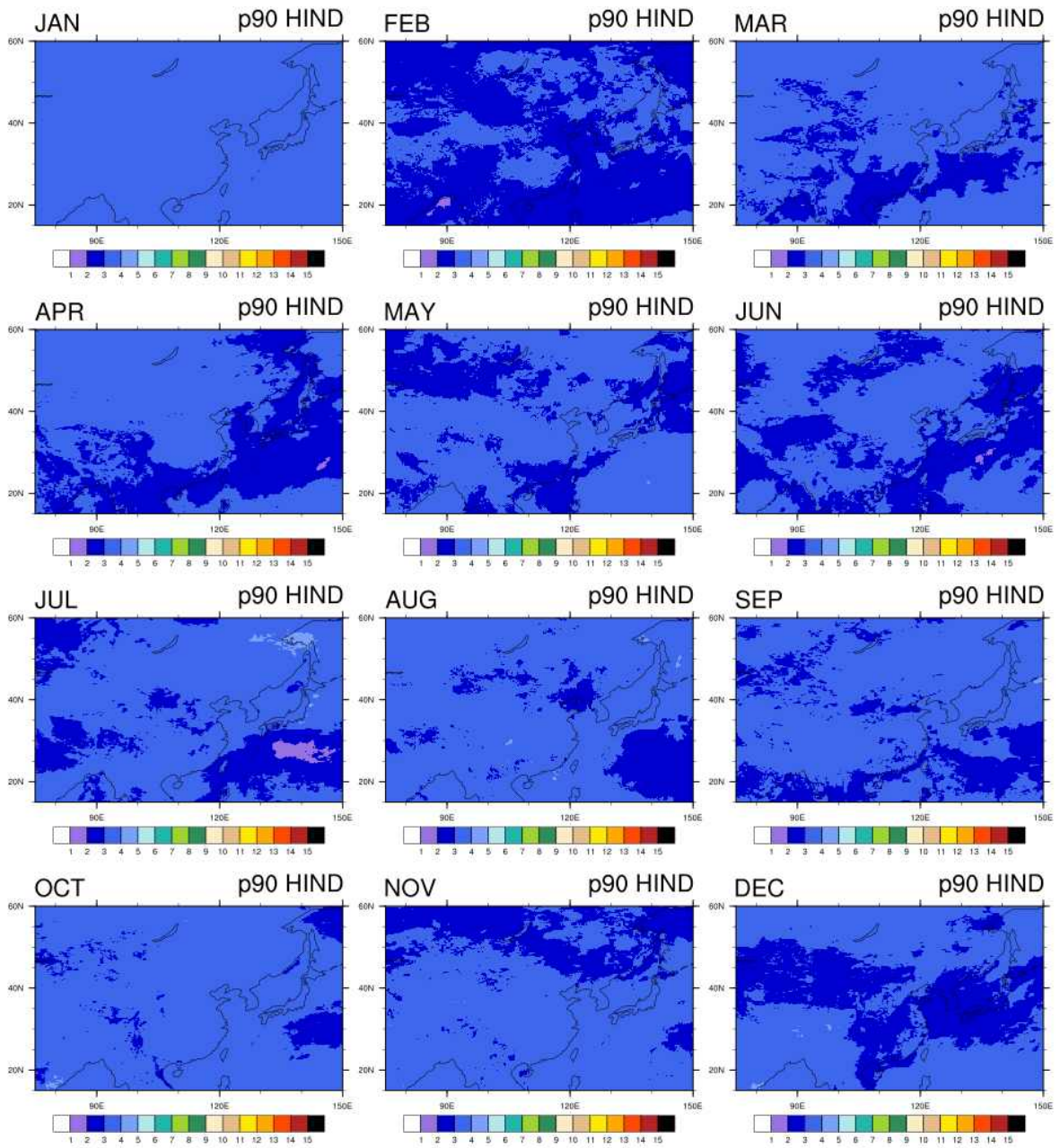


Figure 3.142. Monthly number of warm extreme days in hindcast period [1991–2010] over East Asia.

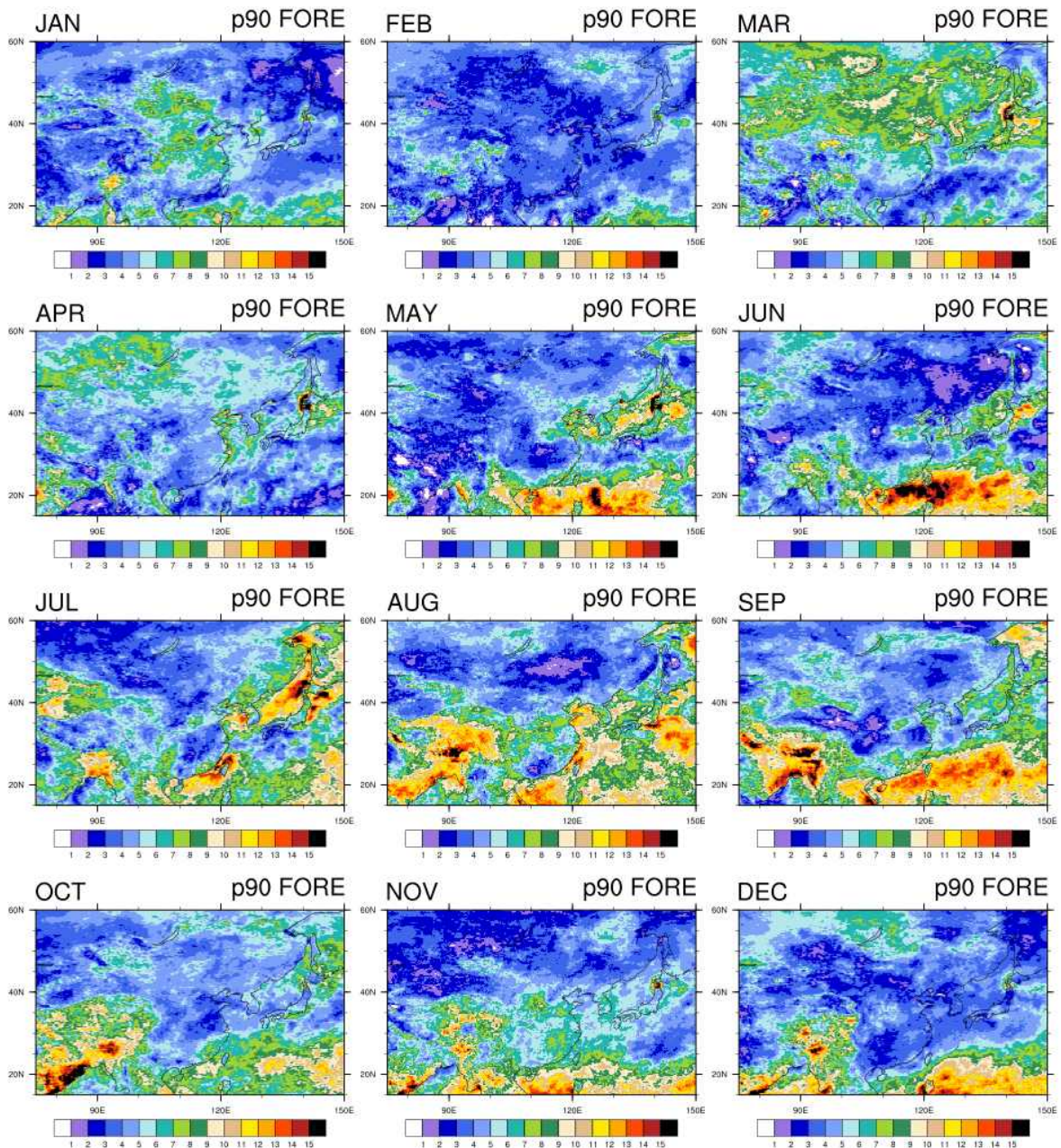


Figure 3.143. Monthly number of warm extreme days in the real-time forecast period [2013-2023] over East Asia.

한랭 이상기후 일수의 기후기간과 예측기간의 차이를 더 잘 살펴보기 위해 두 시기, 월별 한랭 이상기후 일수의 차이를 Figure 3.144에 나타냈다. 한랭 이상기후 일수는 예측기간에 대부분 지역에서 감소했지만 가을, 겨울, 그리고 5월에 동아시아 일부 지역에서는 오히려 2~3일 정도 증가한 것을 볼 수 있다.

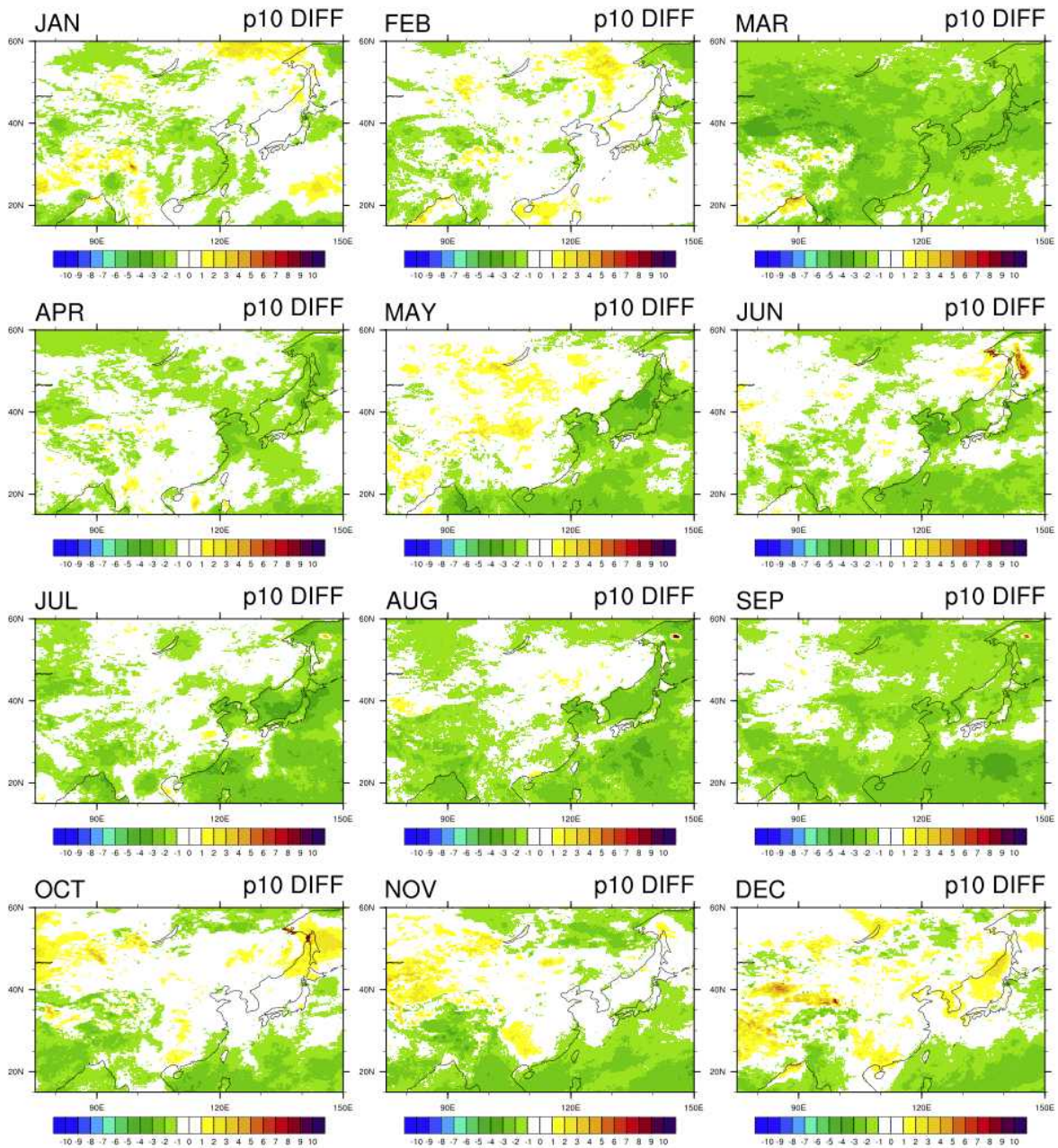


Figure 3.144. Differences of monthly number of cold extreme days between real-time forecast and hindcast period.

마찬가지로 온난 이상기후 일수의 기후기간과 예측기간의 차이를 더 잘 살펴보기 위해 두 시기, 월별 온난 이상기후 일수의 차이를 Figure 3.145에 나타냈다. 온난 이상기후 일수는 예측기간에 대부분 지역에서 증가하였고 5-12월, 북서태평양에서 10일 이상 크게 증가하였다. 그리고 특이하게 3월 동아시아 북부 육지에서 많은 증가가 보이고, 여름-겨울 티벳 지역에서 10일 이상 크게 증가하였다. 반면 2월에는 오히려 온난 이상기후일수의 증가가 크게 보이지 않는다.

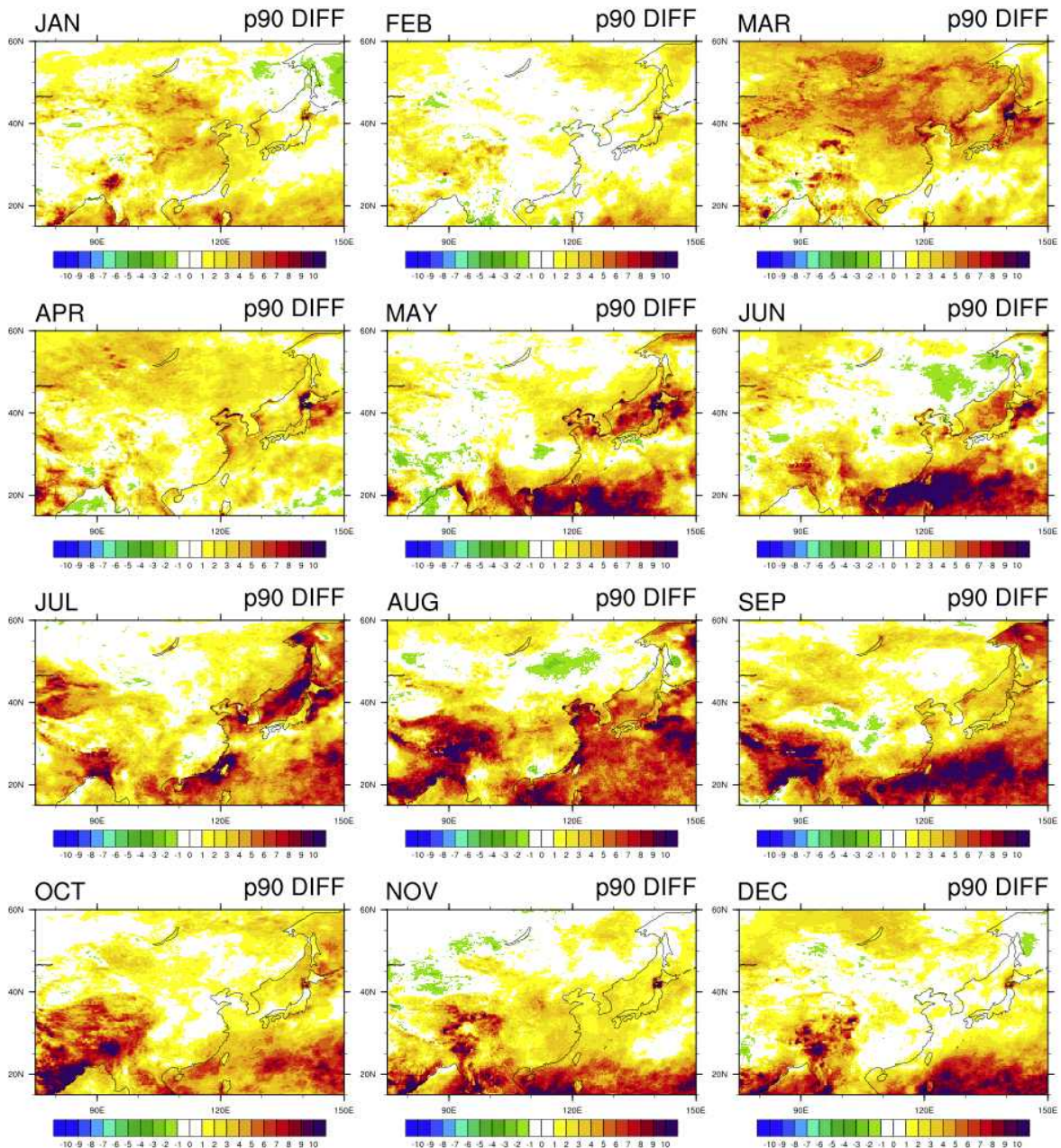


Figure 3.145. Differences of monthly number of cold extreme days between real-time forecast and hindcast period

계절내 이상기후 일수를 계절예측 시스템을 기반으로 예측할 수 있으려면 계절예측과의 상관관계가 있어야 한다. 이에 MME 계절예측 T850, U850, V850 변수와 한랭, 온난 이상기후 일수와의 격자별 상관관계를 계산하여 공간적 분포를 살펴보았다(Figures 3.146, 3.147). 가급적 긴 기간의 자료를 이용하기 위해 기온 자료 중 T850을 선택하였다. 계절예측은 월별 예측을 시작하고 자료가 존재하는 2010년부터 사용하였고, 월별 상관관계를 1년 평균한 것이다.

한랭 이상기후 일수와 계절예측 T850, U850의 상관관계는 특히 적도 태평양 지역에서 음의 상관관계가 높게 나타나는데 이는 ENSO의 영향으로 보인다. V850은 큰 상관관계는 나타나지 않는다. 그리고 상관관계는 육지보다는 해양에서 크게 나타난다.

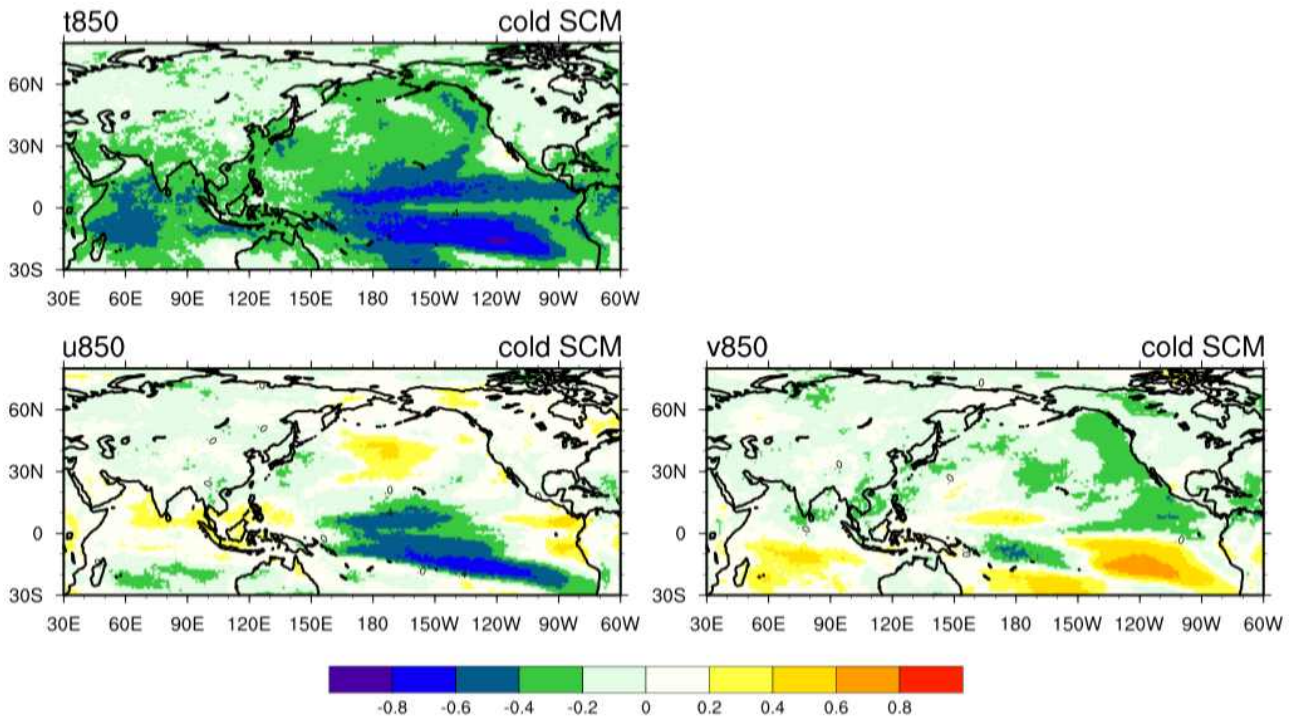


Figure 3.146. Correlation coefficients between number of extreme cold days and SCM forecast anomalies of T850, U850, and V850, during 2010-2023.

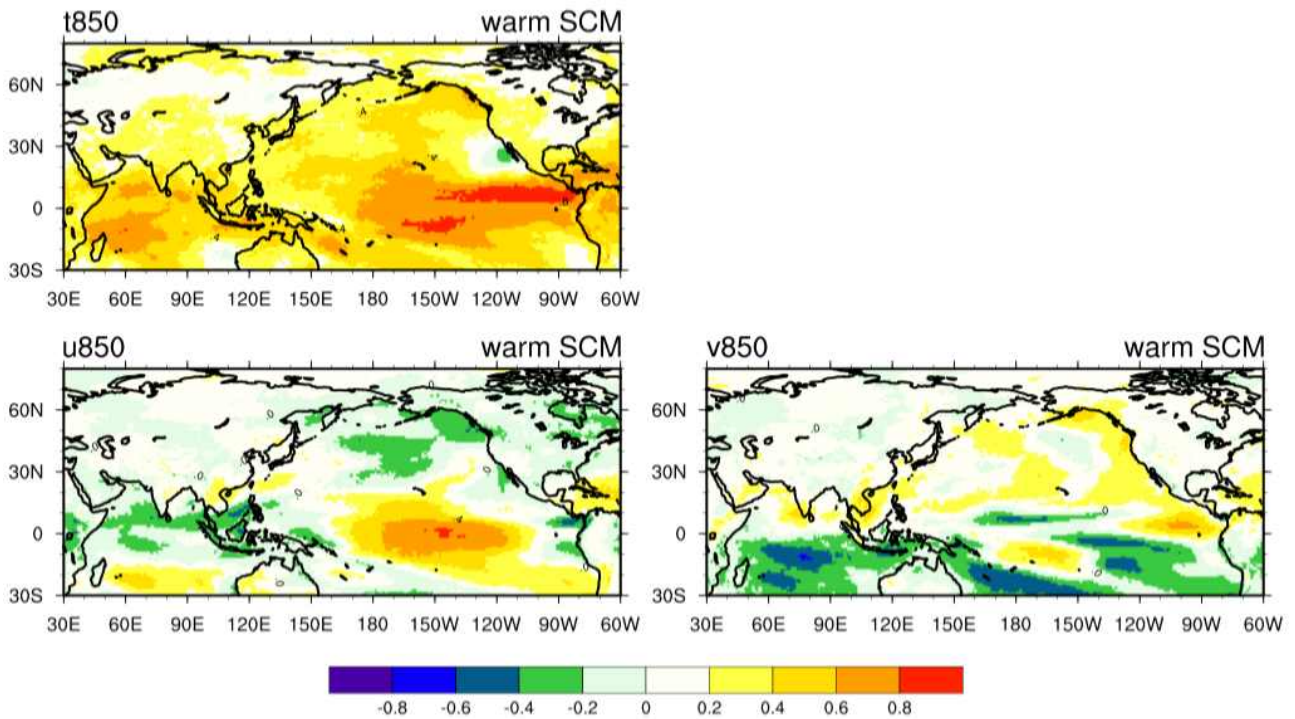


Figure 3.147. Correlation coefficients between number of extreme warm days and SCM forecast anomalies of T850, U850, and V850, during 2010-2023.

한편 월별 동아시아 패턴을 보면 일부 지역, 시기, 꽤 유의미한 상관관계가 나타나는 것을 볼 수 있다(Figures 3.148, 3.149, 3.150, 3.151). 동아시아 지역 한랭 이상기후 일수와 T850의 월별 상관관계가 가장 높은 시기는 3월로, 동아시아 넓은 지역에서 음의 상관관계가 높은 것을 볼 수 있다. 즉, 기온이 낮게 예측될 때, 한랭 이상기후 일수 또한 증가하는 경향이 있다. 반면, 1월, 7월, 9월, 11월 등의 일부지역에서는 오히려 기온이 높게 예측될 때 한랭 이상기후 일수가 증가하는 경향이 있어 관련 역학을 살펴보아야 할 것으로 보인다.

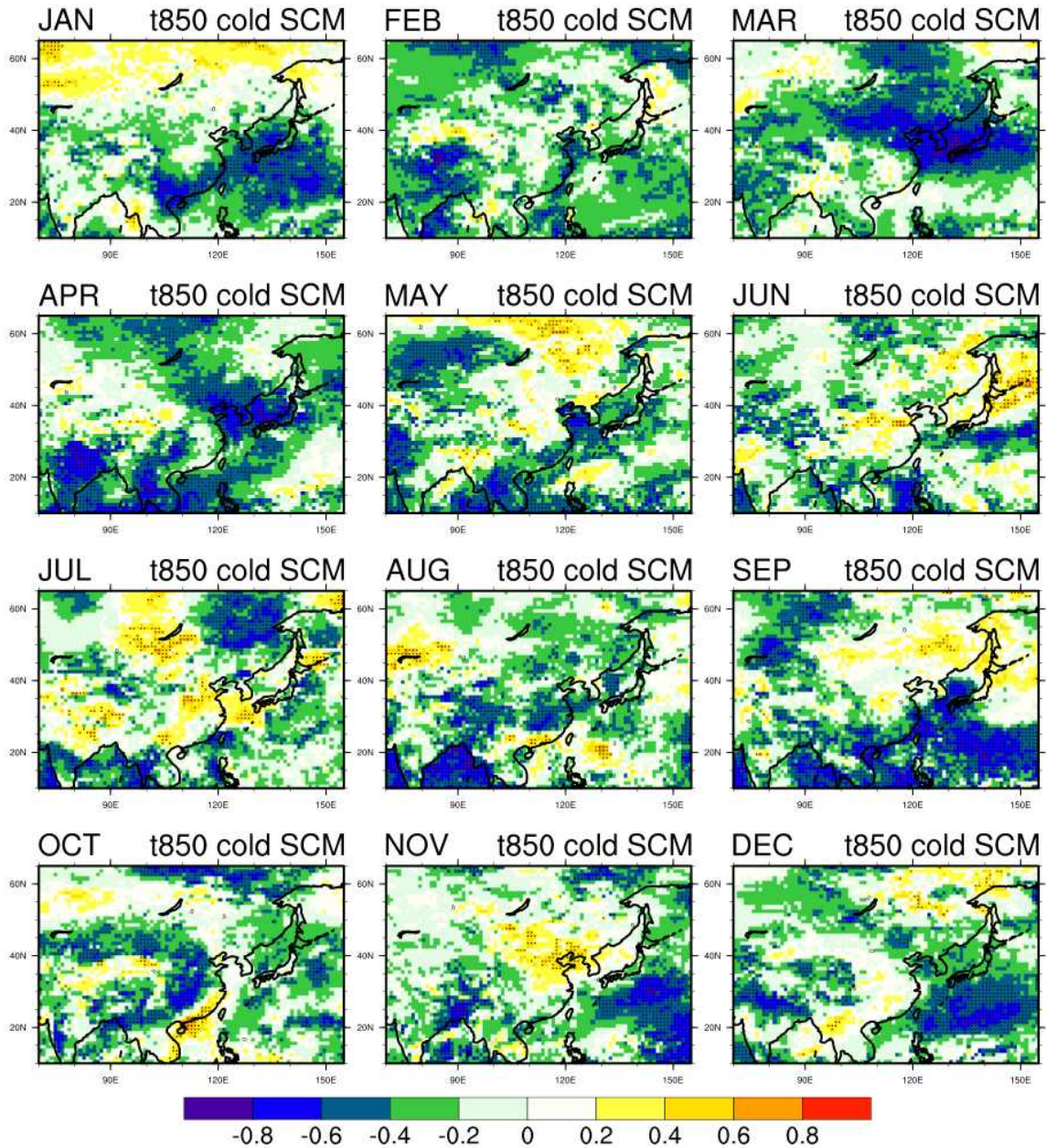


Figure 3.148. Monthly correlation coefficients between number of extreme cold days and SCM forecast anomalies of T850 in East Asia during 2010-2023.

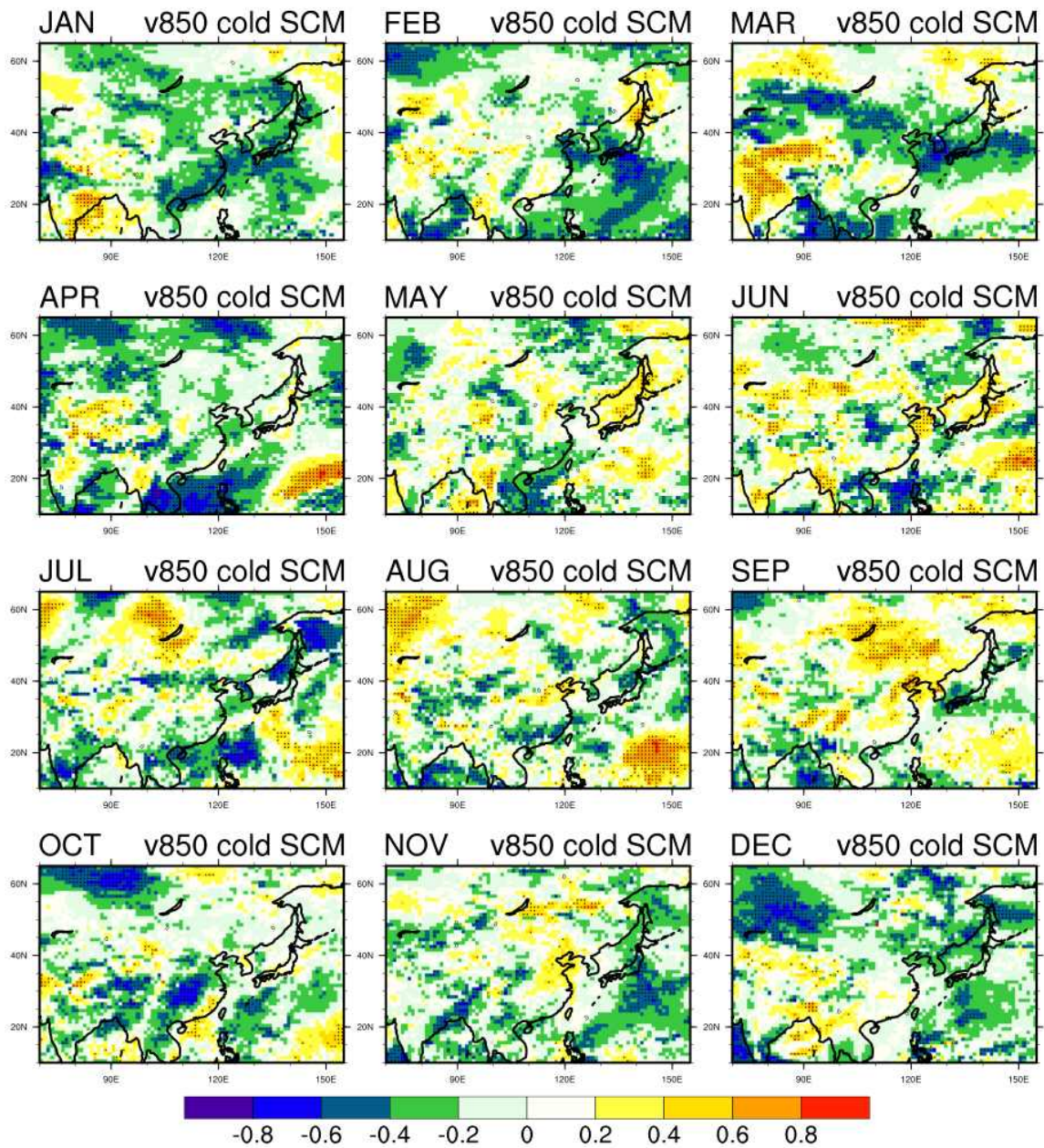


Figure 3.149. Monthly correlation coefficients between number of extreme cold days and SCM forecast anomalies of V850 in East Asia during 2010–2023.

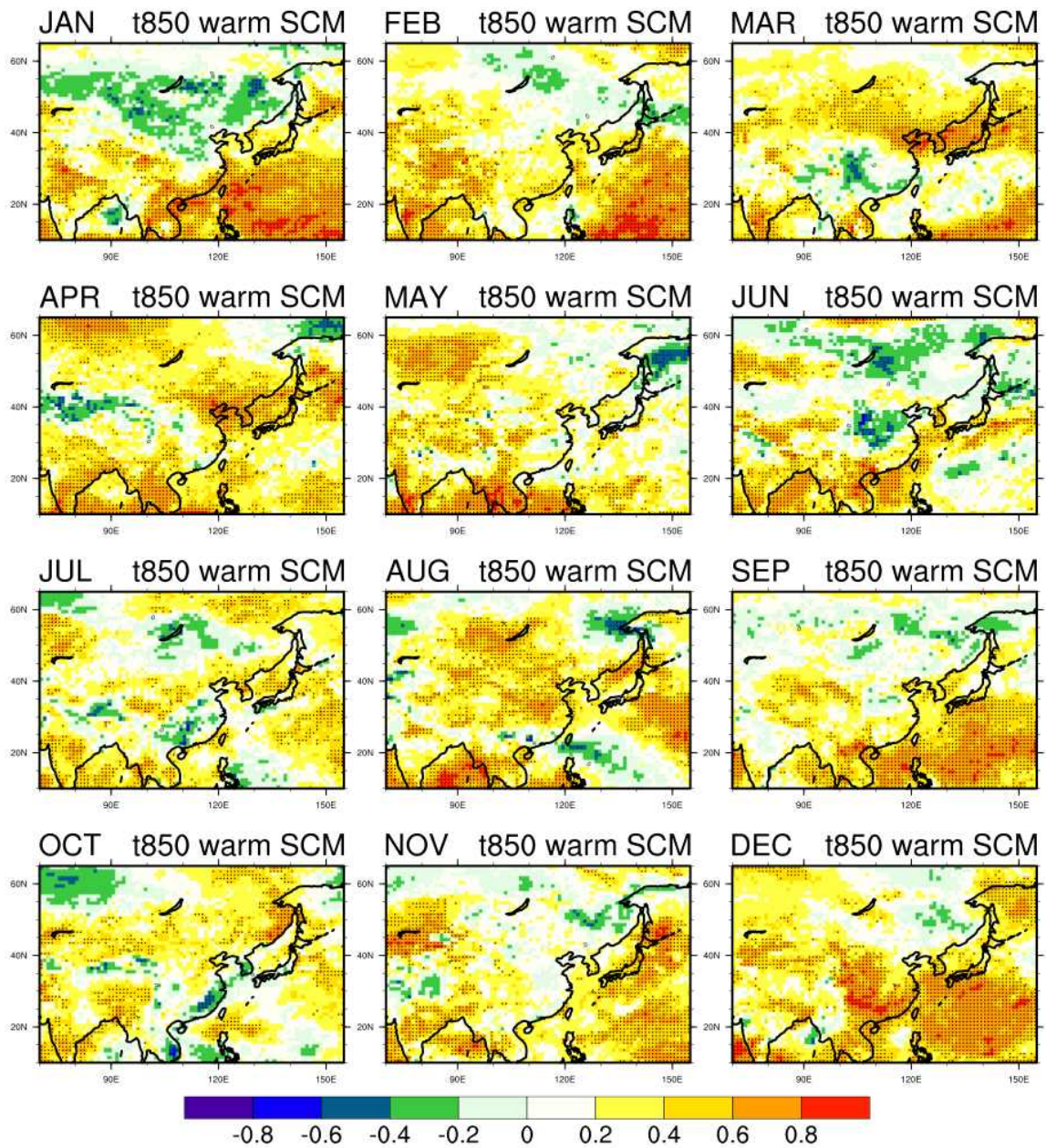


Figure 3.150. Monthly correlation coefficients between number of extreme warm days and SCM forecast anomalies of T850 in East Asia during 2010-2023.

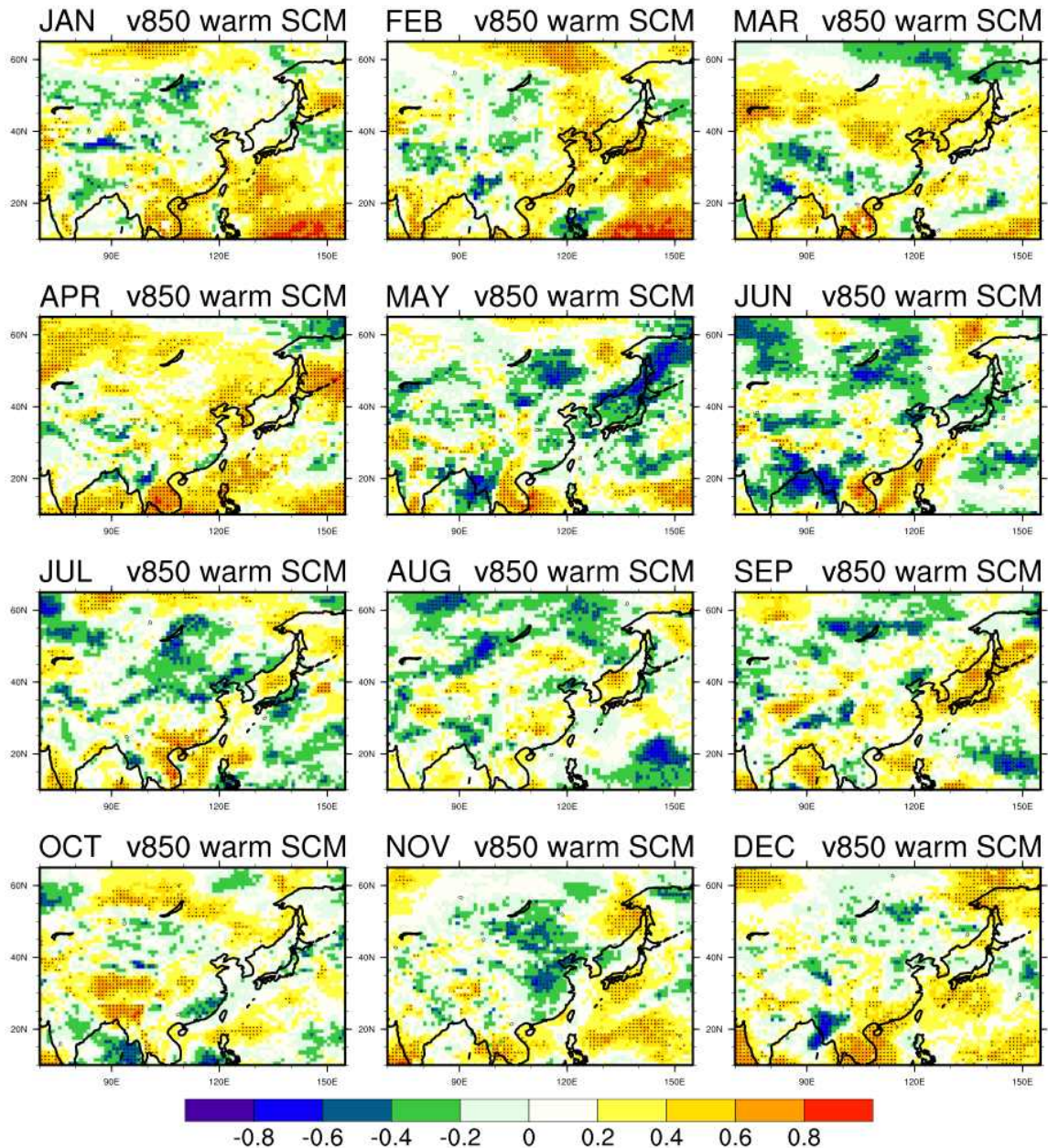


Figure 3.151. Monthly correlation coefficients between number of extreme warm days and SCM forecast anomalies of V850 in East Asia during 2010-2023.

동아시아 지역 온난 이상기후 일수와 T850의 월별 상관관계 패턴은 당연하게도 양의 높은 상관관계를 보인다. 3월, 4월, 8월, 12월 육지에서 유의미한 양의 상관관계가 넓은 지역에서 나타나며, 반면 12월은 특이하게도 육지 일부 지역에서 음의 상관관계가 나타난다. 유의미하진 않지만, 온도가 낮게 예측이 될 때 오히려 온난 이상기후 일수가 높게 나타나는 것이라 이의 역학적 이유를 살펴봐야 할 것으로 보인다.

온난 이상기후 일수와 V850은 3, 4월 중국과 한국에서 양의 상관관계가 뚜렷하게 나타나긴 하지만 T850 처럼 상관관계가 강하진 않다. 하지만, 11월의 경우, 중국 동부지역 T850과 온

난 이상기후 일수가 뚜렷한 상관관계를 보이진 않지만, V850과는 음의 상관관계가 유의미하게 나타나는 등, T850 만으로는 예측하지 못하는 지역을 어느 정도 보충해 줄 수 있을 것으로 기대한다.

따라서 계절예측 T850, V850, U850 변수와 온난, 한랭 이상기후 일수와의 예측기간 상관관계를 이용해 월별 이상기후 일수를 예측하는 통계 모델을 구성할 수 있을 것으로 기대한다.

한편, 이상기후 일수가 많았던 시기 계절내예측 모델의 기온 예측패턴을 살펴보기 위해 관측과 예측의 주별 평균 패턴을 비교하였다. 온난 이상기후가 강하게 나타난 2022년 8월(Figure 3.152), 동아시아 지역 평균 이상기후 일수는 6.73일로, 특히 중국 서부 일부 지역에서 온난 이상기후 일수가 29일 이상 크게 나타났다.

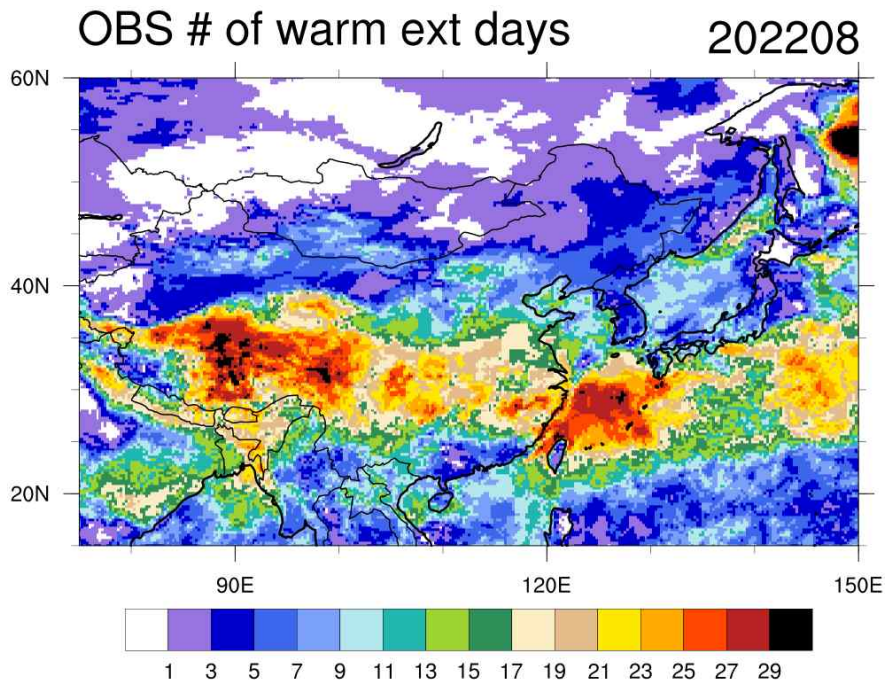


Figure 3.152. Number of warm extreme days in August, 2022 from observation

같은 시기, 기온의 한달 평균 관측과 모델 예측은 매우 유사하게 보이며(Figure 3.153), 마찬가지로 주별 평균을 하였을 때의 기온 패턴 또한 유사하여 계절내예측 모델의 이상기후 예측력이 준수한 것을 확인하였다(Figures 3.154, 3.155).

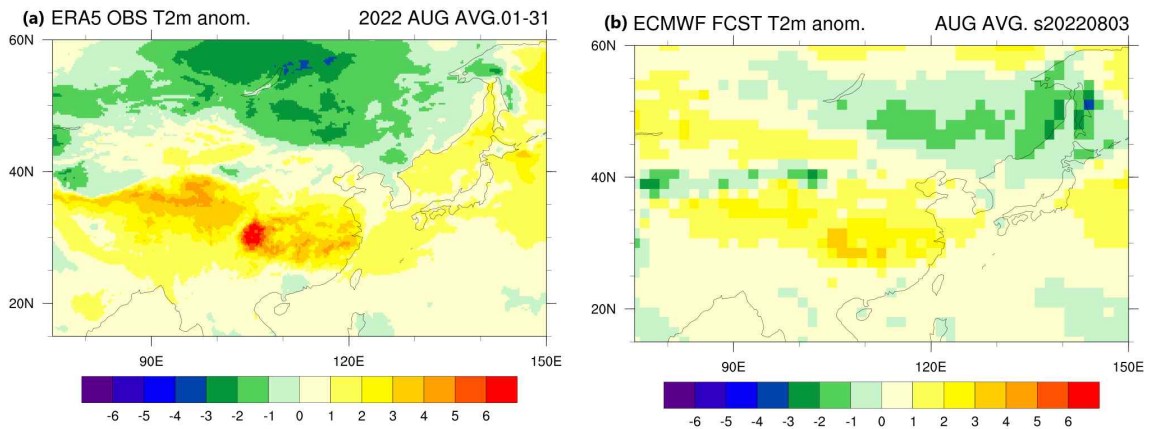


Figure 3.153. Monthly mean T2m anomaly from (a) observation and (b) ECMWF forecasts start from 3, AUG, 2022.

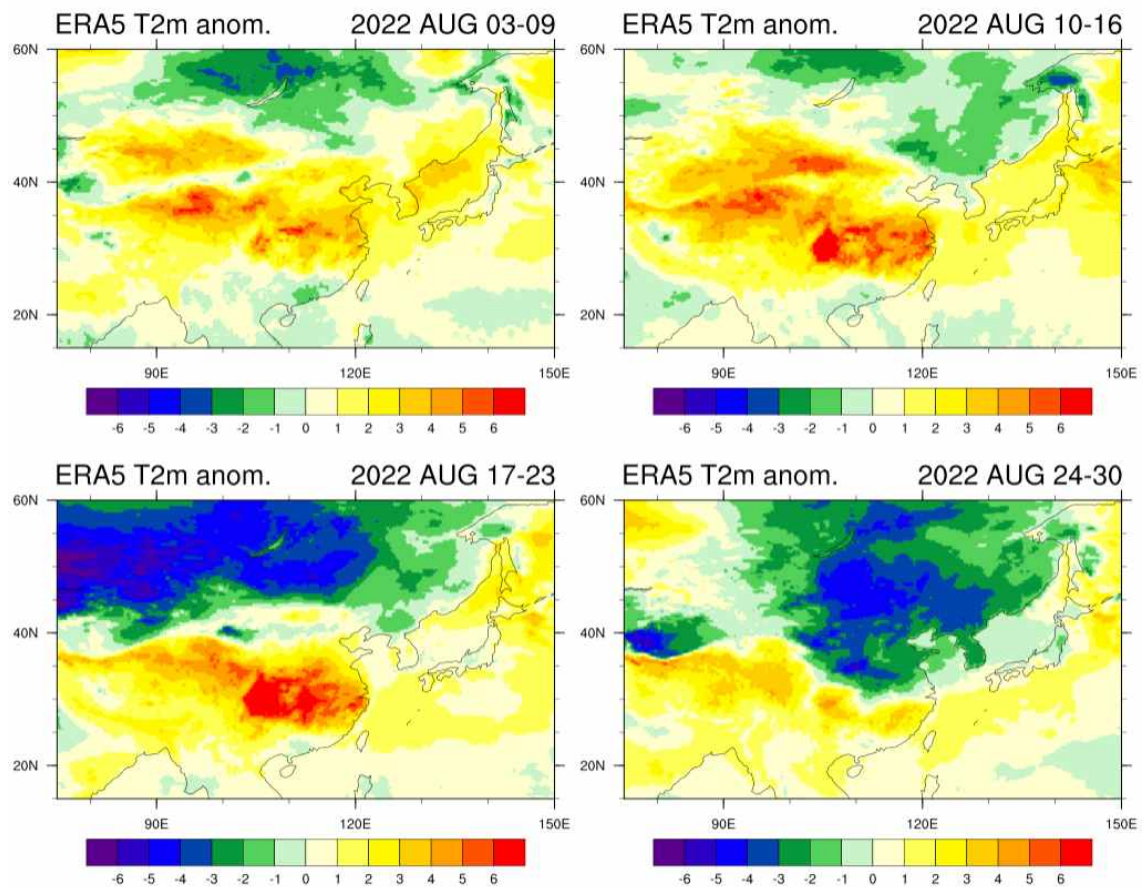


Figure 3.154. Weekly means of T2m anomaly from observation in August 2022.

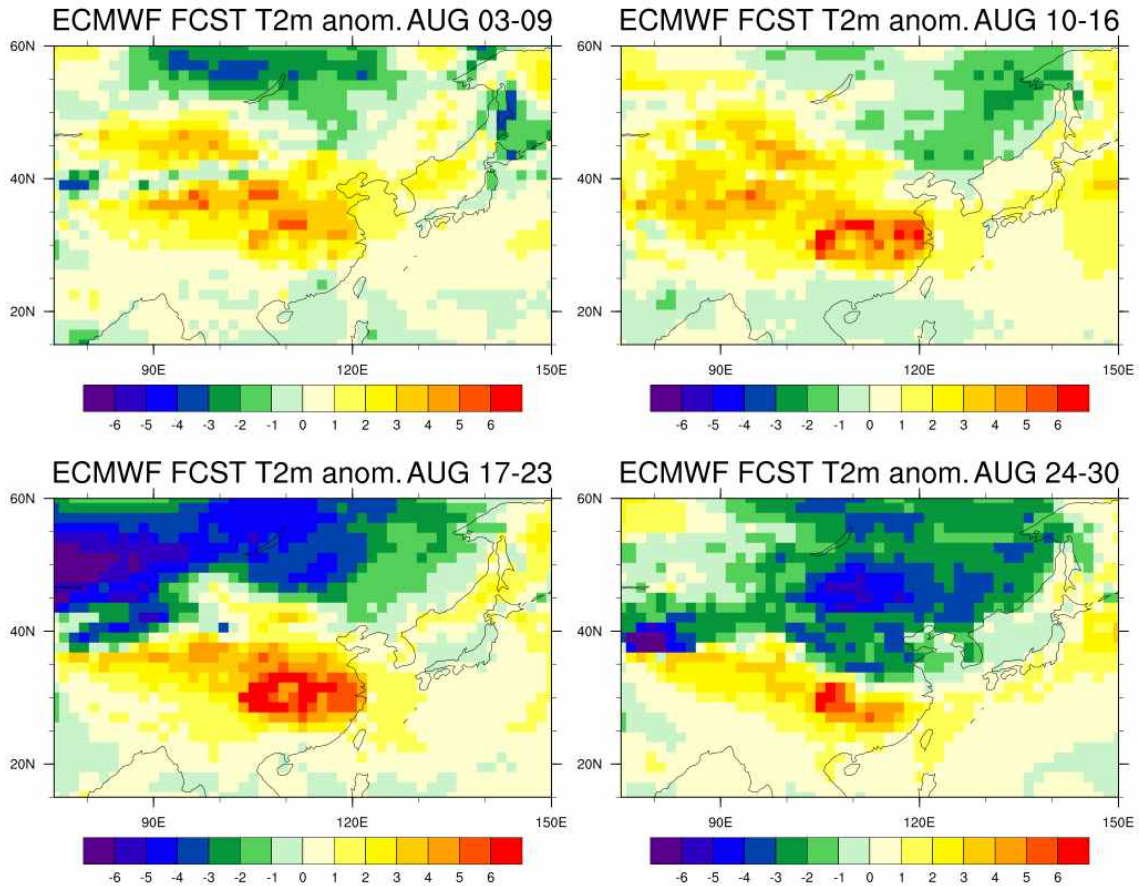


Figure 3.155. Weekly means of T2m anomaly from ECMWF. 3, 10, 17, 24, August, 2022 are start day of forecasts

한랭 이상기후 일수는 점차 감소하였지만 2010년 이후 다소 증가하다 다시 감소하는 양상을 보인다. 최근 기온 패턴을 살펴보기 위해 2000년대 이후, 한랭 이상기후 일수가 많았던 시기인 2010년 1월의 기온 패턴을 살펴보았다(Figure 3.156). 이 시기 동아시아 지역 평균하여 4.38일의 이상기후 일수가 산출되었고 중국 서북부와 몽골 서부 지역에서 한랭 이상기후 일수가 약 25일 이상 관측되었다.

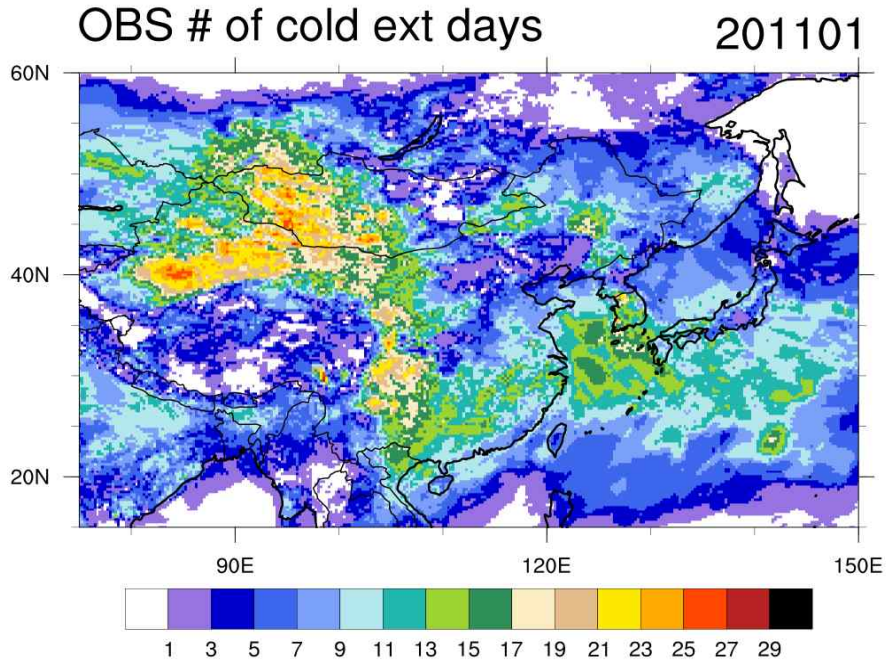


Figure 3.156. Number of cold extreme days in January, 2011 from observation

마찬가지로 같은 시기, 기온의 한달 평균 관측과 모델 예측은 매우 유사하게 보이며 (Figure 3.157), 마찬가지로 주별 평균을 하였을 때의 기온 패턴 또한 유사하여 계절내예측 모델의 이상기후 예측력이 준수한 것을 확인하였다(Figures 3.158, 3.159, 3.160).

따라서 온난, 한랭 이상기후 일수가 많은 시기에 계절내 예측모델의 예측력이 상당히 우수한 것을 알 수 있다. 다만, 두 가지 사례에 대해 분석하였기에 다른 시기에도 예측력이 우수한 지 확인, 통계 분석이 필요하고, WMO 계절내 예측모델 뿐 아니라 APCC 계절내 예측모델에서도 유사한 결과가 나오는지 분석이 필요할 것으로 사료된다.

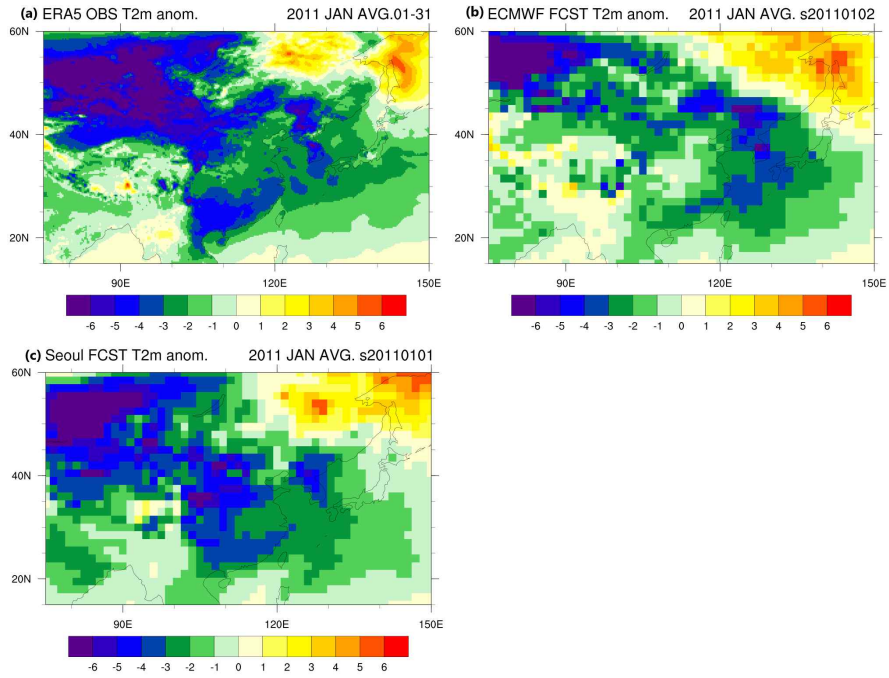


Figure 3.157. Monthly mean T2m anomaly from (a) observation and (b) ECMWF forecasts start from 2, January, 2011, and (c) Seoul forecasts start from 1, January, 2011.

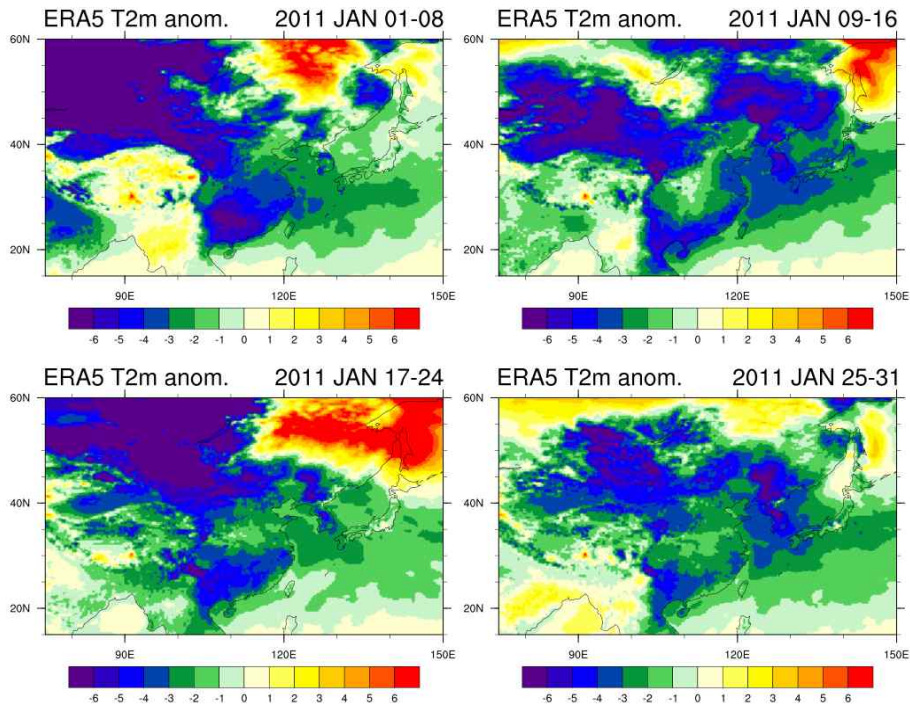


Figure 3.158. Weekly means of T2m anomaly from observation in January, 2011.

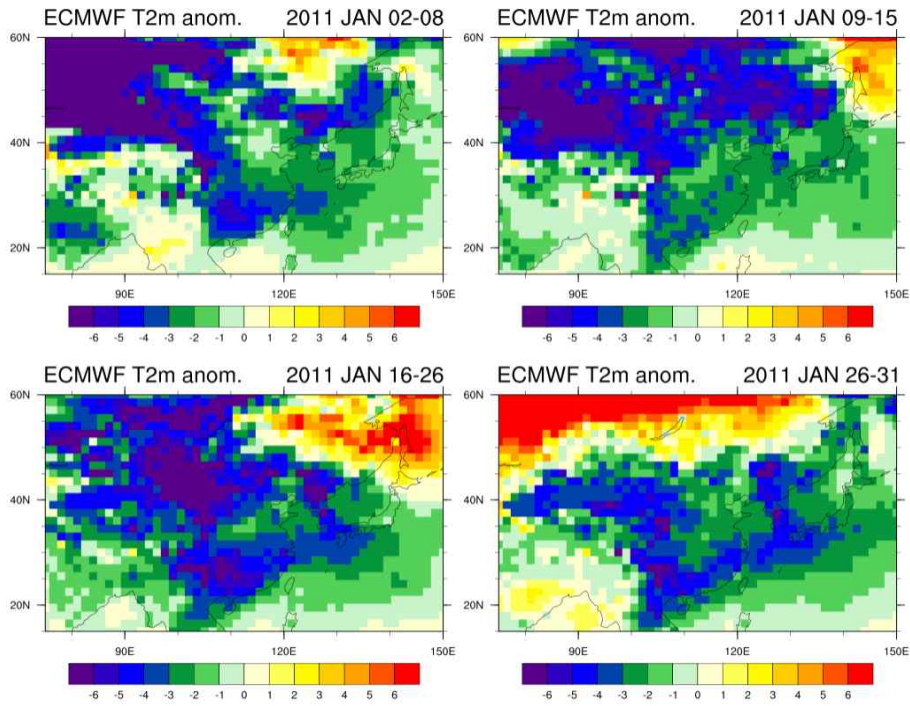


Figure 3.159. Weekly means of T2m anomaly from ECMWF. 2, 9, 16, 26, January, 2011 are start day of forecasts

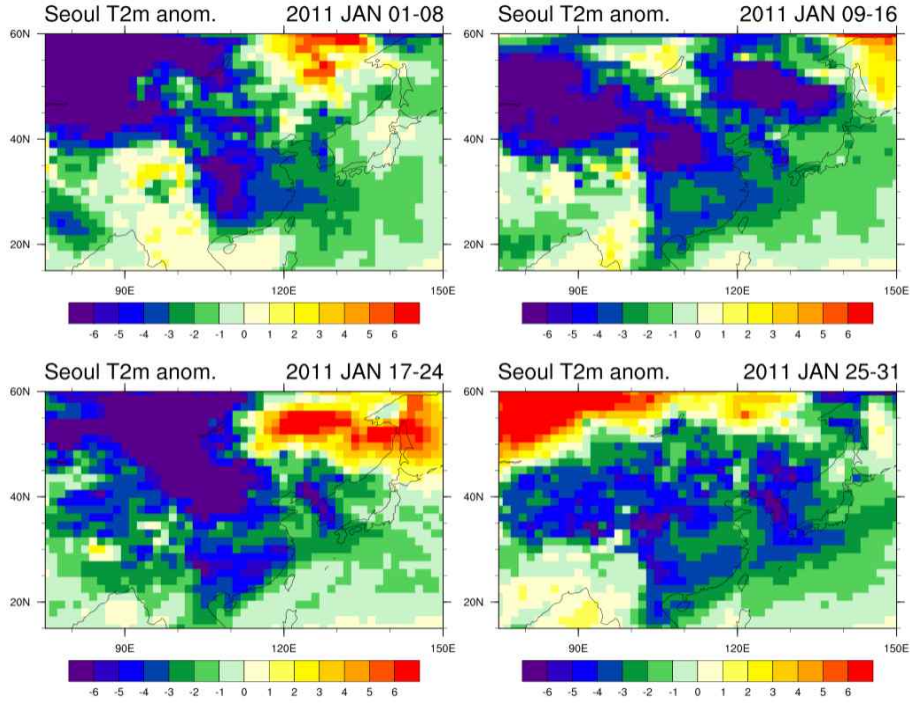


Figure 3.160. Weekly means of T2m anomaly from ECMWF. 1, 9, 17, 25, January, 2011 are start day of forecasts

### 3.8. 기후분야 국제협력 및 정책지원

#### 3.8.1. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 운영 실무 및 개선 지원

##### 3.8.1.1. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 계절 예측 시스템 운영

세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 계절예측 현업은 앞서 언급한 바와 같이 ‘one-stop shop’ 서비스를 위해 각 GPC에서 생산하는 장기에보 자료를 수집하고·MME 기법을 개발 및 서비스를 제공하는 것을 궁극적인 목표로 한달에 걸쳐 수행된다. 매달 기상청 기후예측과에 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 운영에 관한 보고서를 제출하여 기상청 기후예측과와 현업 측면의 이슈에 대해 공유하고 있다. 2022년부터 GPC Pretoria가 현지 시스템의 네트워크 문제로 계절예측 자료를 제공하지 않았으며, 2023년에도 10월에만 자료를 제공해 왔었으나, 2024년에는 3월부터 꾸준히 계절예측 자료를 제공하고 있다. GPC Exeter의 경우, 2024년 6월 신규 자료 수집 서버 도입으로 인한 서버 접근 문제가 발생하여 다른 월에 비해 자료수집일이 늦었다. 2024년 1년 동안 각 GPC의 계절예측 자료 제공일은 Table 3.27과 같다. 대부분의 GPC는 15일 전에 계절예측자료를 제공해주고 있으며, 월별 평균 자료 제공일자는 14일~15일이었다. 자료가 수집, 표준화가 완료되면 다중모델 앙상블 계절예측 시스템이 운영되고, 기상청과 APCC의 계절전망을 위한 기초 자료로 활용된다. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 다중모델 앙상블 예측 시스템 운영을 포함한 일정은 Figure 3.161에 나타낸 것과 같이 매달 각 GPC로 부터의 자료 수집, 다중모델앙상블 기후예측, 검증, 관측자료 수집, 기상청과 WMO 전문가 그룹에게 자료가 제공되는 일정과 GSCU 보고서 초안 작성 지원 이후 최종본은 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 누리집 업데이트 등 모두 포함된다.

Table 3.27. Date of data collection from GPCs.

GPC	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov
Beijing	12	18	11	10	22	17	10	9	5	10	8
CMCC	8	8	8	12	8	13	8	7	8	8	8
CPTEC	9	11	8	11	10	14	13	9	11	14	12
ECMWF	8	12	12	11	9	9	8	12	9	7	11
EXETER	11	11	11	11	11	30	10	11	11	11	11
Melbourne	5	6	8	8	8	5	8	12	5	7	6
Montreal	5	6	8	8	8	5	8	12	6	7	6
Moscow	11	9	14	11	11	14	11	9	13	10	12
Offenbach	4	5	4	4	5	4	12	4	9	4	4
Pretoria	-	-	15	16	15		17	15	17	15	16
Seoul		15	14	15	15	15	15	15	18	14	12
Tokyo	10	13	12	9	9	12	11	13	10	8	12
Toulouse	12	13	12	12	13	13	12	13	11	12	13
Washington	12	13	14	11	13	11	11	12	11	12	11

3월				
월	화	수	목	금
<b>4</b> WMO 월 운영보고서 작성 WMO 개인정보처리시스템 접근기록 점검보고서 작성	<b>5</b> WMO 월 운영보고서 작성 WMO 개인정보처리시스템 접근기록 점검보고서 작성 (대외문서 기안/발송)	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b> GPC Melbourne, Montreal ECMWF, Offenbach ①②개별모델표준화, ③개별확률  ④SCM, ⑤기후지수, ⑥PMME (1차)
<b>11</b> GPC CMCC, CPTEC, Moscow ①②개별모델표준화, ③개별확률  ⑩ERA5 편차장	<b>12</b> GPC Exeter, Seoul, Toulouse ①②개별모델표준화, ③개별확률 ⑩ GPC Seoul자료 생성	<b>13</b> GPC Tokyo, Washington, (Beijing) ①②개별모델표준화, ③개별확률  ④SCM, ⑤기후지수, ⑥PMME (2차)	<b>14</b> ⑬기상청/APCC지원자료 생산 및 메일 발송(★)	<b>15</b> ⑦ Consistency and all map 생성
<b>18</b> GPC Pune ①②개별모델표준화  ⑬ Interim GSCU자료 생산 및 메일 발송 (★)	<b>19</b> (필요시) ④SCM, ⑤기후지수, ⑥PMME (3차)  ⑧ DMME-GA, MRG, SLR 생산 ⑨ 검증 (Fcst, Hcst, 기후지수)	<b>20</b> ⑭ News 알림 공지	<b>21</b>	<b>22</b>
<b>25</b> ⑬ Interim GSCU 최종본 홈페이지 업로드	<b>26</b> ⑮ WMOLC 유지관리 월 정기점검	<b>27</b>	[비고] - 개략적인 일정으로, GPC 계절 예측 자료 수집 일정에 따라 변경가능 -(★)로 표시된 일정 준수 - ⑮ WMOLC 유지관리 월 정기점검 (업체와 일정 조율 후 진행)	

Figure 3.161. Monthly Schedule for WMOLC

세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에 참여하는 개별 GPC와 PMME의 실시간 확률 예측 성능을 살펴보았다 (Figure 3.162, Figure 3.163). 각 카테고리별 ROC Score의 시계열 분석에 사용된 예측기간은 2017년 JFM부터 2024년 SON이다. Figure 3.162과 Figure 3.163에서 붉은 실선은 MME를 나타내며, 각 점들은 개별 GPC를 의미한다. 파란색으로 표시된 점은 ECWMF의 예측 성능을 나타낸다. Table 3.28과 3.29는 전구영역과 동아시아 영역에 대한 연도별 ROC Score의 예측성능 (AN, NN, BN카테고리의 평균)을 나타내며, 전구에 비해 동아시아 영역의 예측 성능이 낮게 나타난다.

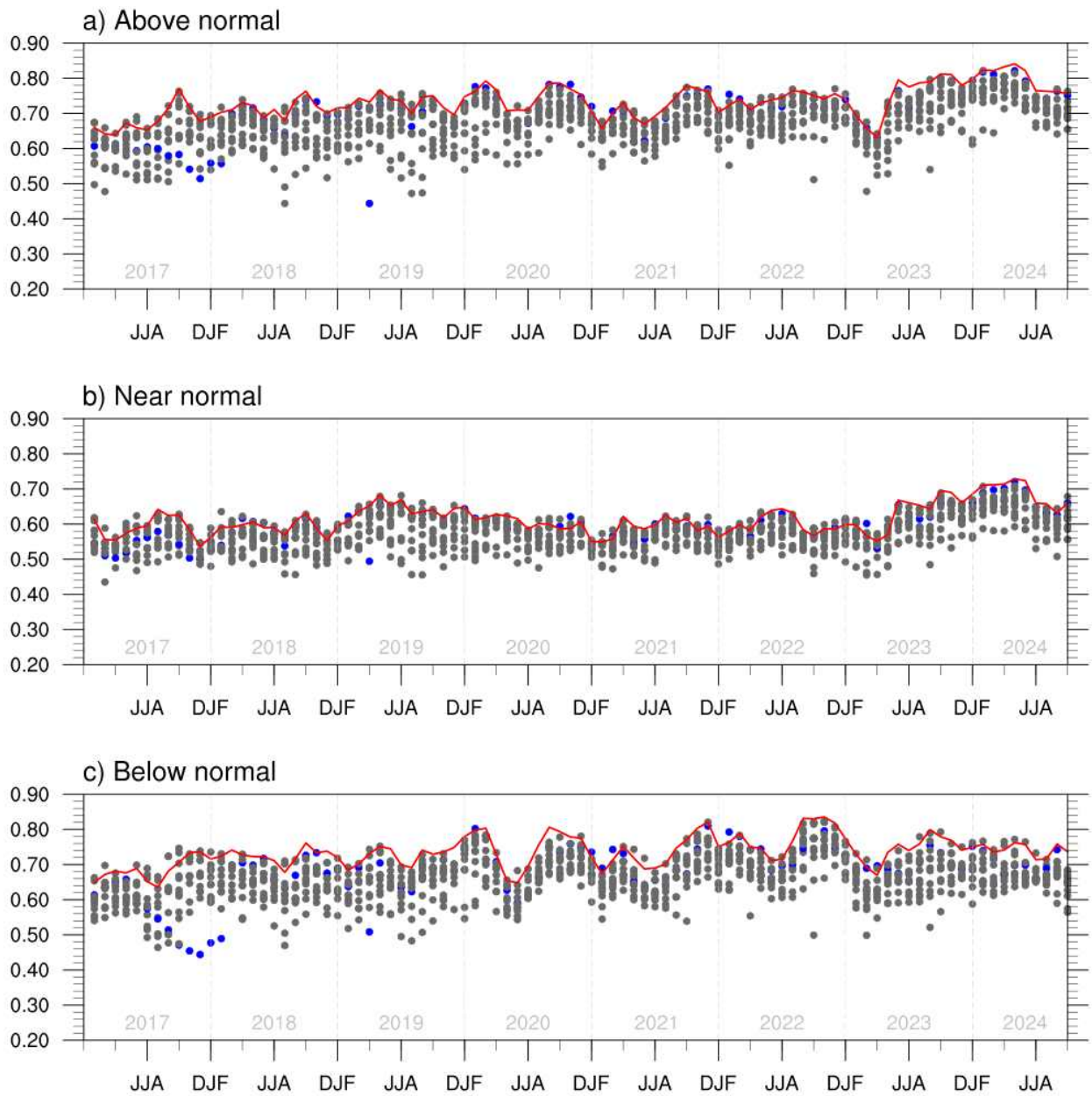


Figure 3.162. Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of 2m temperature for three terciles, i.e., a) the above normal, b) near normal and below normal for the period JFM2017-SO2024. ROC score for PMME prediction is indicated by red line. The grey dots indicate the ROC score of the WMO LC-LRFMME individual GPCs and the blue dot indicates ECMWF.

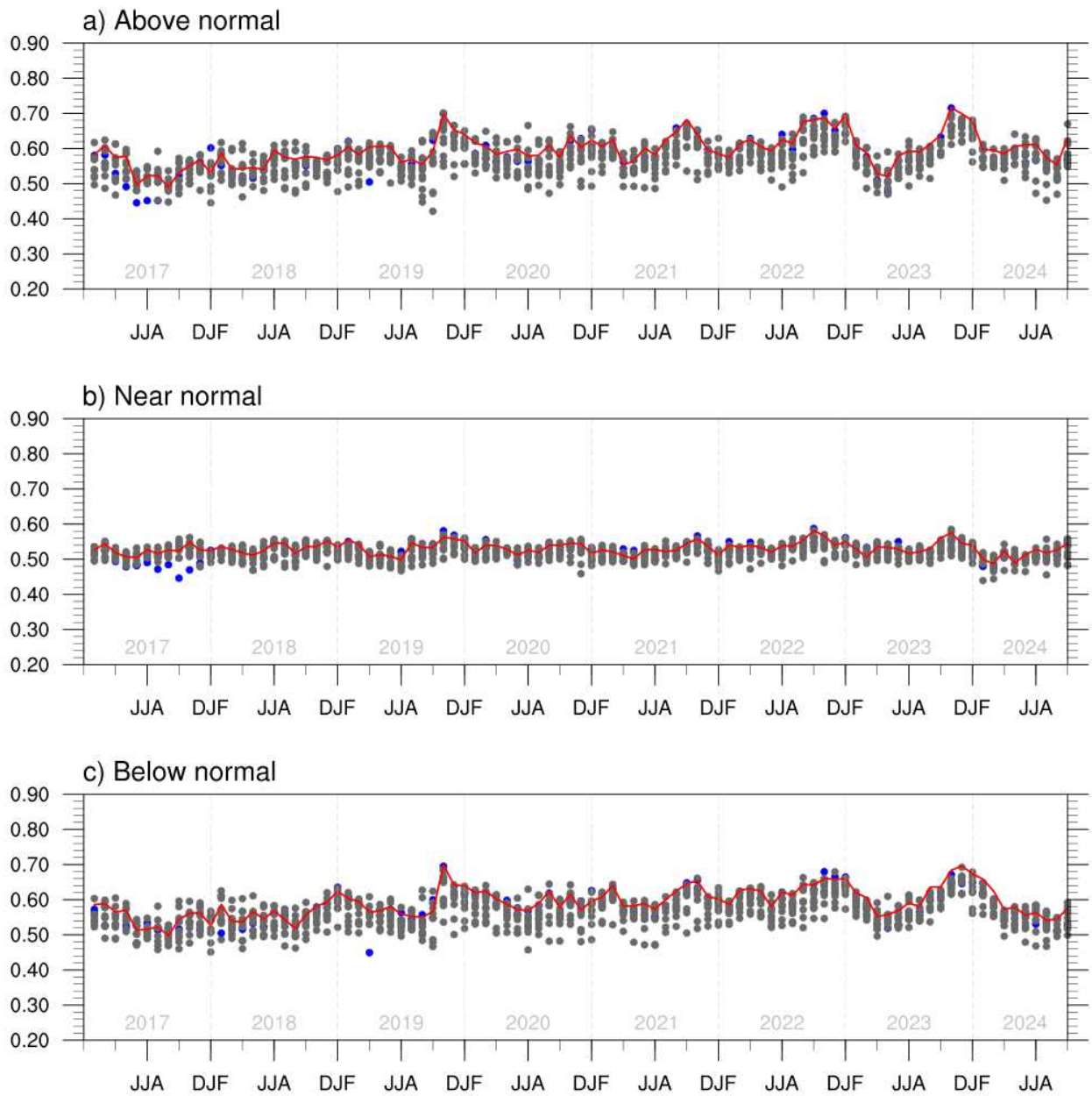


Figure 3.163. Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of precipitation for three terciles, i.e., a) the above normal, b) near normal and below normal for the period JFM2017–SON2024. ROC score for PMME prediction is indicated by red line. The grey dots indicate the ROC score of the WMO LC-LRFMME individual GPCs and the blue dot indicates ECMWF.

Table 3.28. Yearly Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of 2m temperature and precipitation.

No.	GPC	2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024	
		T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC
1	Beijing	0.58	0.52	0.58	0.51	0.62	0.53	0.65	0.54	0.64	0.53	0.63	0.56	0.63	0.56	0.65	0.55	0.69	0.53
2	CMCC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.66	0.58	0.65	0.58	0.68	0.56
2	CPTEC	0.56	0.52	0.55	0.51	0.57	0.50	0.56	0.51	0.60	0.52	0.60	0.53	0.64	0.57	0.59	0.54	0.65	0.50
3	ECMWF	0.65	0.57	0.56	0.52	0.65	0.54	0.66	0.57	0.68	0.57	0.66	0.58	0.69	0.60	0.69	0.57	0.72	0.54
4	Exeter	0.68	0.58	0.63	0.54	0.65	0.55	0.67	0.56	0.66	0.56	0.66	0.57	0.69	0.59	0.67	0.57	0.69	0.55
5	Melbourne	0.62	0.56	0.57	0.52	0.60	0.53	0.61	0.55	0.64	0.56	0.64	0.57	0.65	0.57	0.65	0.56	0.67	0.54
6	Montreal	0.64	0.57	0.61	0.53	0.64	0.55	0.66	0.57	0.65	0.57	0.63	0.57	0.68	0.59	0.69	0.57	0.70	0.56
7	Moscow	0.60	0.53	0.58	0.50	0.57	0.51	0.60	0.52	0.61	0.51	0.60	0.51	0.66	0.54	0.62	0.56	0.67	0.54
8	Offenbach	—	—	0.64	0.53	0.64	0.54	0.67	0.56	0.64	0.55	0.63	0.57	0.66	0.58	0.64	0.56	0.69	0.54
9	Pretoria	0.55	0.54	0.53	0.50	0.55	0.52	0.55	0.53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	Seoul	0.68	0.58	0.63	0.54	0.64	0.55	0.66	0.56	0.65	0.56	0.65	0.56	0.67	0.58	0.67	0.57	0.58	0.56
11	Tokyo	0.69	0.59	0.66	0.55	0.66	0.56	0.69	0.59	0.69	0.58	0.68	0.58	0.69	0.60	0.67	0.58	0.71	0.55
12	Toulouse	—	—	—	—	—	—	0.68	0.56	0.65	0.56	0.64	0.56	0.64	0.58	0.62	0.56	0.68	0.54
13	Washington	0.65	0.58	0.62	0.53	0.63	0.56	0.64	0.57	0.64	0.58	0.61	0.57	0.66	0.59	0.64	0.58	0.65	0.55
	MME	0.69	0.59	0.65	0.54	0.68	0.55	0.70	0.58	0.70	0.58	0.68	0.58	0.71	0.60	0.71	0.59	0.74	0.56

- ※ Montreal : 2014JJA~2016DJF의 경우, Montreal3과 Montreal4의 ROC 평균값
- ※ CMCC: 2021OND이후자료
- ※ Offenbach:2017SON이후자료
- ※ Pretoria:2015AMJ이후자료
- ※ Observation:PREC/CAMS-OPI,T2M/NCEP-R1
- ※ 2016OND이전은개별hindcast사용
- ※ 2016OND예측부터공통hindcast기간(1993~2009)사용
- ※ 전체기간위도별가중치적용
- ※ ROC값은AN, NN, BN의평균값을의미

Table 3.29. Yearly Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over East Asia of probabilistic real-time forecast of 2m temperature and precipitation.

No.	GPC	2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024	
		T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC	T2M	PREC
1	Beijing	0.50	0.50	0.54	0.50	0.56	0.56	0.59	0.56	0.62	0.53	0.58	0.51	0.52	0.52	0.57	0.55	0.61	0.58
2	CMCC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.54	0.54	0.53	0.54	0.60	0.61
2	CPTEC	0.50	0.49	0.54	0.51	0.51	0.51	0.47	0.50	0.58	0.54	0.55	0.50	0.54	0.55	0.49	0.49	0.63	0.53
3	ECMWF	0.52	0.57	0.60	0.51	0.58	0.56	0.59	0.57	0.66	0.60	0.60	0.50	0.56	0.53	0.54	0.53	0.63	0.58
4	Exeter	0.54	0.56	0.58	0.49	0.62	0.58	0.60	0.56	0.63	0.57	0.58	0.51	0.55	0.53	0.59	0.56	0.61	0.57
5	Melbourne	0.55	0.54	0.53	0.50	0.58	0.53	0.58	0.54	0.59	0.55	0.53	0.52	0.54	0.52	0.56	0.54	0.62	0.58
6	Montreal	0.49	0.57	0.54	0.50	0.59	0.57	0.57	0.55	0.59	0.58	0.58	0.54	0.54	0.52	0.60	0.55	0.64	0.57
7	Moscow	0.51	0.52	0.56	0.50	0.51	0.52	0.50	0.51	0.57	0.55	0.55	0.52	0.53	0.50	0.53	0.54	0.58	0.56
8	Offenbach	—	—	0.56	0.51	0.59	0.57	0.60	0.56	0.64	0.58	0.58	0.50	0.54	0.53	0.52	0.54	0.63	0.59
9	Pretoria	0.48	0.55	0.50	0.50	0.50	0.56	0.54	0.56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	Seoul	0.55	0.56	0.59	0.51	0.59	0.58	0.58	0.56	0.60	0.59	0.54	0.52	0.53	0.52	0.60	0.56	0.57	0.60
11	Tokyo	0.55	0.59	0.61	0.53	0.62	0.57	0.58	0.58	0.66	0.58	0.61	0.52	0.55	0.51	0.54	0.54	0.62	0.58
12	Toulouse	—	—	—	—	—	—	0.62	0.57	0.64	0.56	0.60	0.51	0.54	0.51	0.53	0.55	0.62	0.59
13	Washington	0.56	0.56	0.58	0.50	0.59	0.58	0.61	0.57	0.63	0.61	0.52	0.53	0.57	0.54	0.60	0.55	0.63	0.59
	MME	0.54	0.57	0.59	0.51	0.61	0.58	0.60	0.58	0.67	0.61	0.60	0.55	0.56	0.53	0.58	0.57	0.64	0.61

- ※ Montreal : 2014JJA~2016DJF의 경우, Montreal3과 Montreal4의 ROC 평균값
- ※ CMCC: 2021OND이후자료
- ※ Offenbach:2017SON이후자료
- ※ Pretoria:2015AMJ이후자료
- ※ Observation:PREC/CAMS-OPI,T2M/NCEP-R1
- ※ 2016OND이전은개별hindcast사용
- ※ 2016OND예측부터공통hindcast기간(1993~2009)사용
- ※ 전체기간위도별가중치적용
- ※ ROC값은AN, NN, BN의평균값을의미

### 3.8.1.2. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 GPC 계절예측 시스템 개선

세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에 참여하고 있는 GPC는 계절예측의 정확도 향상을 위해 지속적으로 계절예측 시스템 개선하고 있다. 개선된 계절예측 시스템은 다른 GPC들과의 예측성 비교분석을 통해 적합성 판단과정이 필요하며, 각 GPC의 계절예측시스템 개선으로 인한 개별 계절예측 시스템의 예측 성능 향상은 다중모델 앙상블을 기반으로 하는 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 예측성향 향상을 기대할 수 있다. 2022년부터 2024년의 기간동안 GPC Tokyo, Seoul, Moscow, Montreal 등의 계절예측 시스템의 개선이 이루어졌다(Table 3.30). GPC Tokyo는 2022년 2월부터 CPS2에서 CPS3로 개선되었으며, GPC Seoul은 3월부터 GS5에서 GS6GC3.2로 시스템을 업그레이드 하였다. 또한 GPC Moswco는 11월부터 계절예측모델이 변경되어 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에 반영되었다. 그리고 GPC Seoul은 11월부터 앙상블 개수를 변경하였다. 2023년에는 GPC 계절예측 시스템은 업데이트가 진행되지 않았으며, 2024년에는 GPC Montreal, CMCC, Offenbach의 계절예측 시스템 개선이 이루어졌다. GPC Montreal은 2024년 7월부터 CanSIPsv2.2에서 CanSIPsv3.0으로 개선되었으며, GPC CMCC는 2024년 11월부터 SPS4.0을 이용한 실시간 계절예측을 생산하여 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에 자료를 제공할 것으로 알려졌으나 현재 (2024년 12월 1일)를 기준으로 SPS4.0의 전체 기간(1993JFM~2022DJF) hindcast 자료만 제공했을 뿐 실시간 예측자료는 기존 시스템(SPS3.5)을 이용하여 생산·제공하고 있다. GPC Offenbach 또한 2025년 3월 계절예측 자료부터 GCFS2.2 시스템의 결과를 생산·제공할 것으로 알려졌다. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 참여 GPC의 계절예측 시스템 개선 계획이 세워지면 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 선제적으로 hindcast 계절예측 자료를 수집하여 기존 시스템과의 예측성 비교분석을 수행하고 있다. 2022년 개선된 GPC 계절예측 시스템의 상세 정보와 기존 시스템과의 예측성 비교 분석 결과는 2022년 연구보고서를 참고할 수 있다. 이 보고서에서는 2024년 시스템 개선이 이루어진 GPC Montreal와 실시간 계절에는 적용되지 않았으나, hindcast 자료 수집이 완료된 GPC CMCC, Offenbach의 시스템 개선 세부 사항과 이와 관련하여 수행된 내용을 서술하고자 한다. 또한 2023년 초 인도 기상청의 계절예측 시스템이 GPC로 승인되어 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 15번째 참여기관이 되었다. 2023년 기상청에서 발주한 『WMO 장기예보 선도센터 시스템 기능강화 (II)』 용역과제를 통해 계절예측 자료의 표준화와 그래픽 생성을 위한 시스템이 개발되었으나, GPC Pune의 과거 재현기간동안의 예측성을 다른 GPC와 비교를 수행한바 없다. 따라서 이와 관련된 내용 또한 본 절에서 서술하고자 한다.

Table 3.30. List of upgraded GPC's seasonal forecast system for WMO LC-LRFMME in 2022~2024.

Issued Month	GPC	Content
2022MAM	Tokyo	CPS2→CPS3
2022AMJ	Seoul	GS5→GS6GC3.2
2022DJF	Moscow	
2024MAM	Pune	New Participation
2024ASO	Montreal	CanSIPsv2.1→CanSIPsv3.0
2024(T BD)	CMCC	SPS-3.5→SPS4.0
2025MAM	Offenbach	GCFS2.1→GCFS2.2

### 3.8.1.2.1. GPC Montreal

GPC Montreal 계절예측 모델은 CanSIPsv2.1에서 CanSIPsv3.0으로 변경되었으며, 2024년 7월 (2024ASO)부터 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에 적용되었다. 개선된 CanSIPsv3.0 계절 예측 시스템의 hindcast 기간은 1981~2010년에서 1991~2020년까지 확장되어 최근의 기후변동성을 반영하고자 하였다. 또한 CanSIPsv2.1의 해양 초기 조건은 NCEP의 GODAS 3D를 사용하였으나, CanSIPsv3.0은 CMC의 GIPOS 3D 자료를 사용한다. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에 제공되었던 GPC Montreal의 계절예측 모델의 hindcast 앙상블 개수는 CanCM3에서 생산된 10개의 앙상블과 CanCM4에서 생산된 10개의 앙상블을 합쳐 총 20개의 앙상블 자료를 제공하였으나, CanSIPsv3.0의 경우 GEM5.2+NEMO에서 생산된 20개 앙상블 자료와 CanESM5에서 생산된 20개의 앙상블, 총 40개의 앙상블 자료를 생산한다. Forecast 앙상블 또한 총 20개에서 40개의 앙상블로 초기조건의 불확실성을 더욱 고려할 수 있게 되었다. 개선된 계절예측 모델의 상세한 정보는 Table 3.31에서 확인 할 수 있다. 또한 개선된 계절예측모델과 이전 버전의 모델의 hindcast 기간에 대한 ACC와 ROCS예측력 비교를 수행하여, 계절예측모델의 개선에 따른 실질적인 예측력 상승 정도 파악과 더불어 MME 참여 모델로서의 적합성을 판단하였다. Figure 3.164는 hincast 기간에 대한 GPC Montreal의 CanSIPsv2.1와 CanSIPsv3.0에서 예측된 NINO3.4와 관측의 ONI이며, 그 상관계수는 0.91로 차이가 없다. 대부분의 계절예측모델에서 나타나는 ENSO의 발달과 쇠퇴를 관측에 비해 빠르게 예측하는 특징이 CanSIPsv2.1와 CanSIPsv3.0에서도 동일하게 나타났다. GPC Montreal의 경우 GEM5.2+NEMO에서 생산된 20개 앙상블 자료와 CanESM5에서 생산된 20개의 앙상블, 총 40개의 앙상블 자료를 모두 사용하고 있는데 이러한 모델별 예측 특성을 뚜렷하게 나타났다.

Figure 3.165는 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에 참여하는 14개 GPC와 CanSIPsv3.0의 hindcast 기간동안의 기온 및 강수에 대한 전지구 평균 ACC와 CanSIPsv3.0과 CanSIPsv2.1의 ACC 차이를 나타낸다. CanSIPsv3.0과 CanSIPsv2.1은 타 GPC에 비해 전 계절에 걸쳐 전반적으로 우수한 ACC 예측력을 보이고 있는 것을 확인했다. 또한 CanSIPsv3.0은

CanSIPsv2.1에 비해 크지는 않으나 (평균적으로 5%) 전 계절에 걸친 예측력 상승을 확인하였다. FMA 예측에서는 CanSIPsv3.0은 약 30% 정도의 예측력을 상승을 보였다. 타 계절에 비해 해당 계절에 큰 예측력 상승을 보이는 것에 대해 추가 분석이 필요할 것으로 보인다.

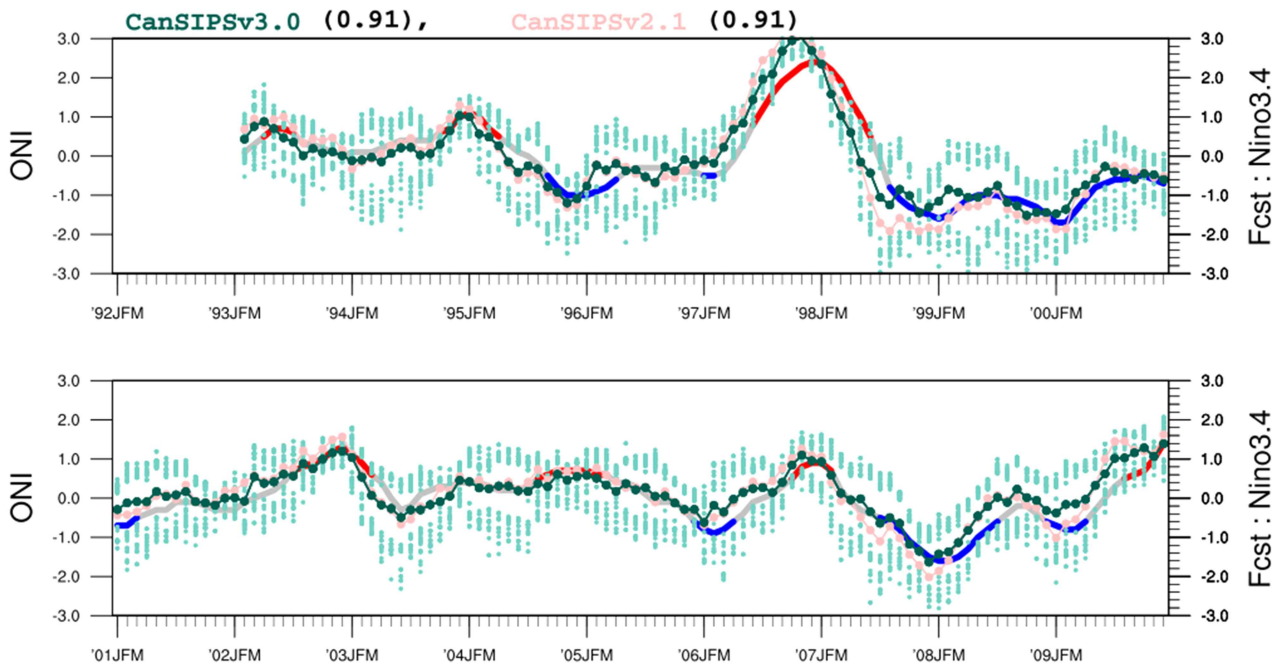


Figure 3.164. NINO3.4 forecast from CanSIPsv2.1 and CanSIPsv3.0 for the periods of 1993-2009.

Table 3.31. Model description of long-range forecast system from GPC Montreal.

	December 1st, 2011	June 11st, 2024
Is it a coupled forecast system?	Yes	
Is it a Tier-2 forecast system?	No	
Atmospheric model resolution	CanAM5: T63L49 (0.1hPa), GEM5.2: ~ 1 x 1 deg Yin-Yang grid (L85) (0.1hPa)	
Ocean model (if applicable)	CanNEMO3.4: - 1 x 1 deg/ORCA1 (L45), NEMO3.6: - 1 x 1 deg/ORCA1 (L50)	
Source of atmospheric initial conditions	CMC Global analysis is assimilated	
Source of ocean initial conditions	CMC SST and sea-ice analysis at the surface and NCEP GODAS 3D ocean below the surface	CMC SST and sea-ice analysis at the surface and CMC GIOPS 3D ocean below the surface
If Tier-2, what is the source of SST predictions?	NA	
Hindcast period	1981-2010	1991-2020
Ensemble size for the hindcasts	10 CanCM3 members + 10 CanCM4 members	40 members: 20 members from GEM5.2-NEMO + 20 members from CanESM5
How is the hindcast ensemble configured?	For each month of the hindcast, a 12-month forecast is produced. There is no lagged initial conditions, all the 20 members start on the first of the month.	Hindcast is made with each individual model with 20 members of 12-month integration initialized at the beginning of each month and five days beforehand
Ensemble size for the forecast	20 members, 10 for each model	40 members, 20 for each model
How is the forecast ensemble configured?	Every month, a 12-month forecast is produced. There is no lagged initial conditions, all the 20 members start on the first of the month.	Forecast is made with each individual model with 20 members of 12-month integration initialized on the last day of the previous month (ensemble members 1-10) and four days beforehand (ensemble members 11-20).
Length of forecasts	12 months	
Data format	GRIB2	
What is the latest date predicted anomalies for the next month/season become available?	The forecasts will be available every first day of the month.	
How are the forecast anomalies constructed?	By subtracting the ensemble forecast mean from the hindcast mean.	
URL where forecast(maps) are displayed	<a href="http://www.weatheroffice.gc.ca/saisons/index_e.html">http://www.weatheroffice.gc.ca/saisons/index_e.html</a>	<a href="https://climate-scenarios.canada.ca/?page=seasonal-forecasts">https://climate-scenarios.canada.ca/?page=seasonal-forecasts</a> for forecast maps and <a href="https://eccc-msc.github.io/open-data/msc-data/nwp_cansips/readme_cansips-datamart_en/">https://eccc-msc.github.io/open-data/msc-data/nwp_cansips/readme_cansips-datamart_en/</a> for forecast/hindcast data

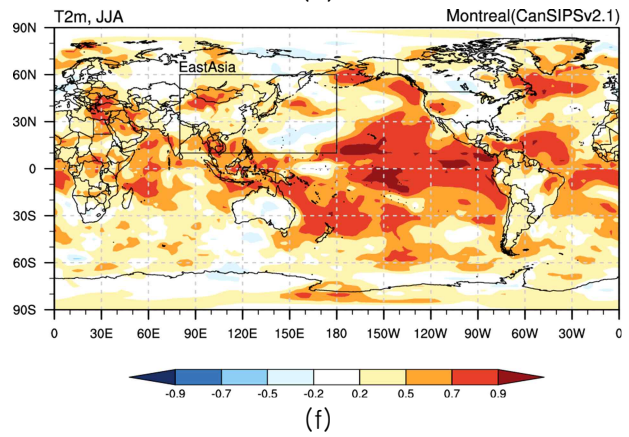
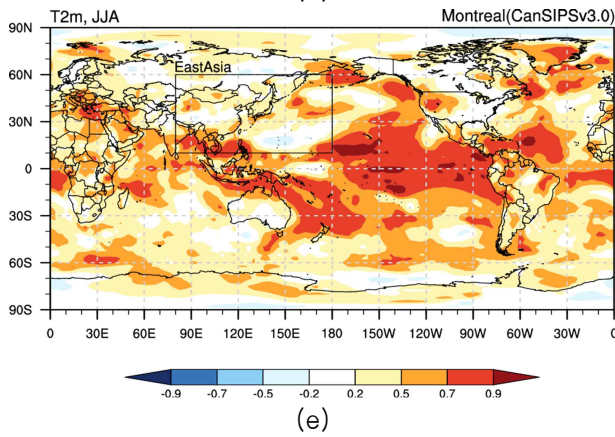
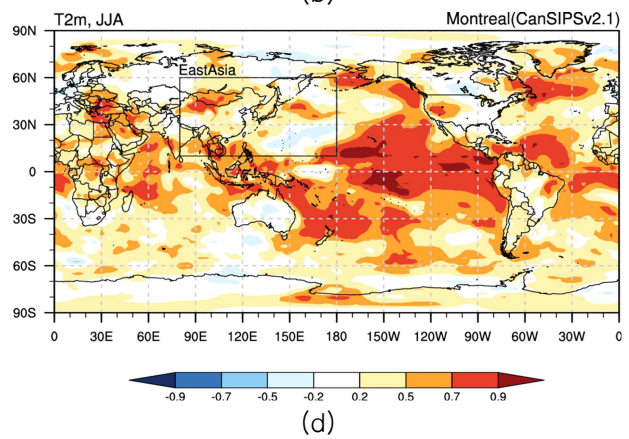
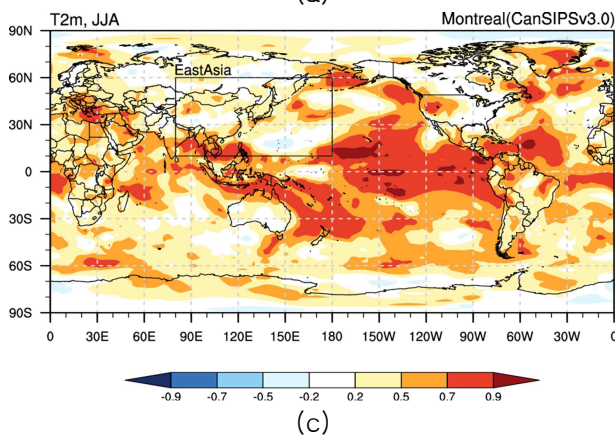
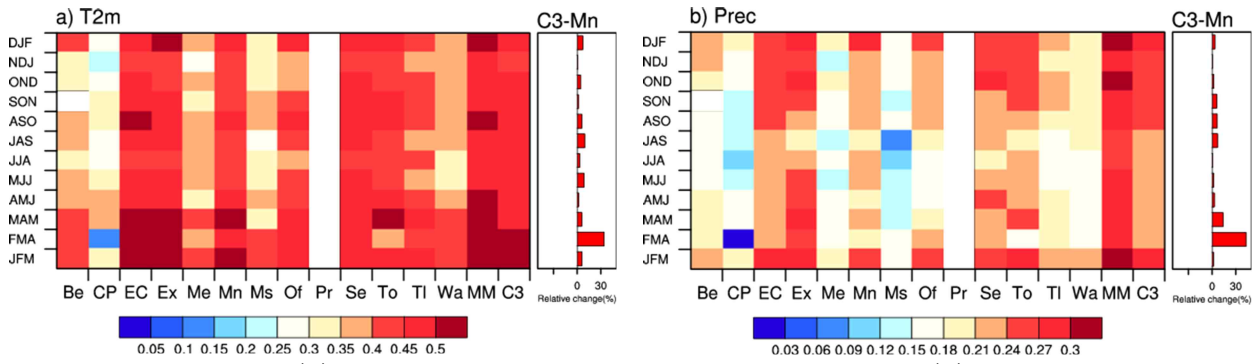


Figure 3.165. Global average of temporal correlation coefficient of (a) 2m temperature and (b) precipitation between CanSIPsv2.1 and CanSIPsv3.0 from GPC Montreal and difference of Montreal between CanSIPsv2.1 and CanSIPsv3.0. Spatial distribution of ACC of (c, e) 2m temperature and (d, f) precipitation for GPC Montreal's seasonal forecast system in JJA season for the periods 1993–2009.

### 3.8.1.2.2. GPC CMCC

GPC CMCC은 2024년 11월 SPS3.5에서 SPS4.0으로 계절 예측 모델이 개선될 예정이었으나, 현재 (2024년 12월 1일)를 기준으로 SPS4.0의 전체 기간(1993JFM~2022DJF) hindcast 자료만 제공했을 뿐 실시간 예측자료는 기존 시스템(SPS3.5)을 이용하여 생산·제공하고 있다. 그러나 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 GPC의 시스템 개선에 선제적으로 자료 수집 및 표준화 프로그램 수정 등을 수행하여 적시에 다중모델 앙상블 자료를 제공할 수 있도록 하고 있다. 이와 관련하여 SPS4.0은 최근 기후변동성을 포함하기 위해 hindcast기간을 1993~2016에서 2022년까지로 확장하였다(Table 3.32). 그러나 앞서 언급한 것과 같이 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 각 GPC의 공통기간을 사용하기 때문에 hindcast 모든 기간에 대한 자료를 사용할 수 없는 한계가 있다. 그러나 SPS4.0으로 시스템이 업데이트되면서 계절예측 제공일이 매달 10일에서 8일로 당겨져서 운영될 예정이다. 그렇게 되면 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 자료 수집시기도 빨라져 혹시 발생할 수 있는 문제를 대응할 수 있는 시간을 확보할 수 있어, 적시에 다중모델앙상블 예측자료를 제공할 수 있다. 또한 hindcast 앙상블 수가 40개에서 30개로 변경되었다.

Figure 3.166은 GPC CMCC의 계절예측 시스템 개선에 따른 자료가 수집된 NDJ 기간의 Hindcast 예측 성능을 비교한 결과이다. 신규 계절예측 모델 기온의 NDJ 기간의 전구 ACC는 기존 모델과 큰 차이가 없는 것으로 보였으며, 강수의 경우 ACC 상승이 뚜렷하게 나타났다. 이는 비교적 예측력이 낮은 MME의 강수량 예측력 상승에 기여할 수 있을 것으로 보인다. 개선된 GPC CMCC 계절예측 모델의 ACC 공간 분포는 Figure 3.166에 나타난 것과 같이, 기존 모델 및 타 계절예측모델과 유사한 패턴을 보인다. .

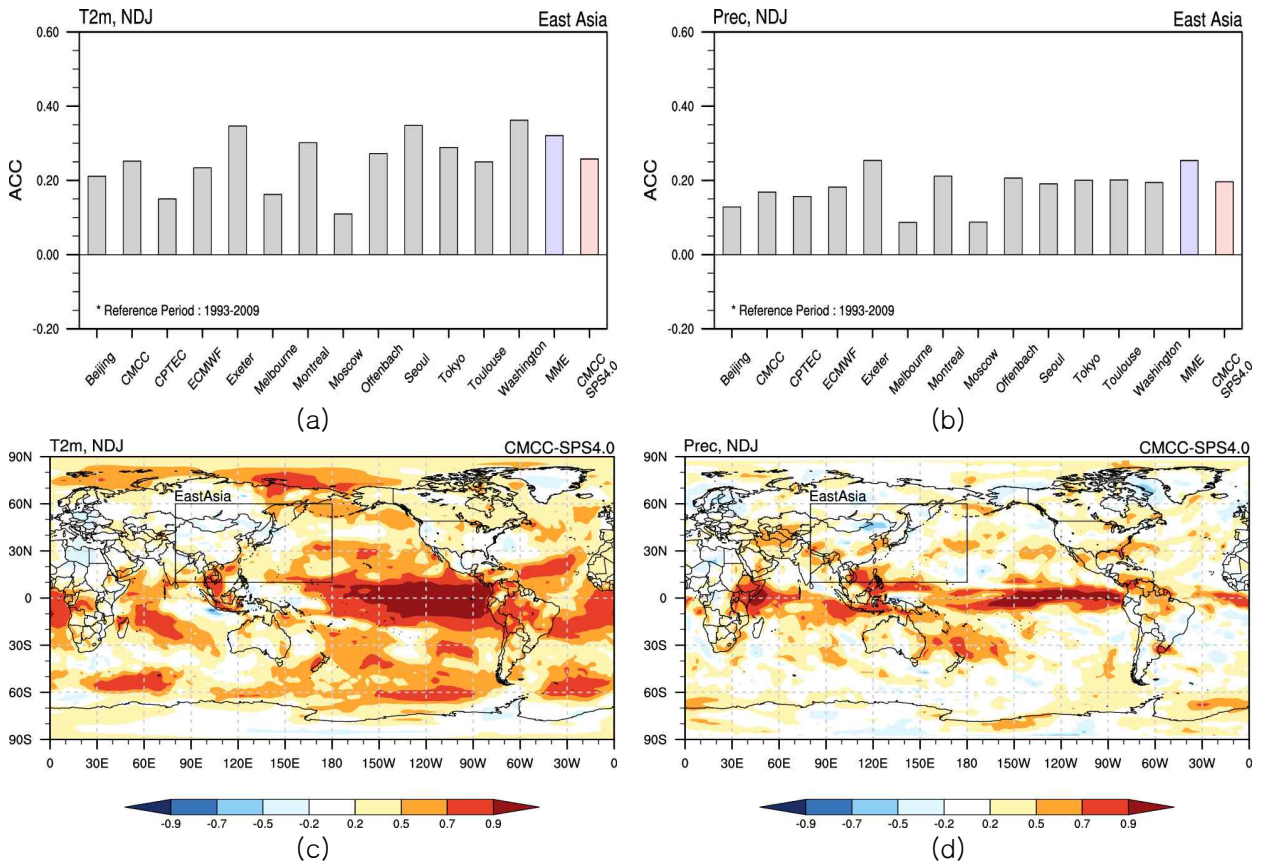


Figure 3.166. ACC aggregated over globe and spatial distribution of ACC of (a, c) 2m temperature and (b, d) precipitation for GPC CMCC's seasonal forecast system in NDJ season for the periods 1993-2009.

Table 3.32. Model description of long-range forecast system from GPC CMCC.

	October 2020 (SPS3.5)	2024 (SPS4.0)
Is it a coupled forecast system?	Yes	
Is it a Tier-2 forecast system?	No	
Atmospheric model resolution	~0.5 degrees	
Ocean model (if applicable)	~0.25 degrees	
Source of atmospheric initial conditions	EDA ECMWF	
Source of ocean initial conditions	C-GLORS Global Ocean Intermittent 3D-VAR	
If Tier-2, what is the source of SST predictions?	N/A	
Hindcast period	1993-2016	1993-2022
Ensemble size for the hindcasts	40 members	30 members
How is the hindcast ensemble configured?	Chosen at random among 120 combinations of 10 atmosphere ICs (time lagging at 12h interval), 3 land ICs (forced during previous month by ECMWF and NCEP analyses and mean of the two) and 4 ocean ICs (perturbing ocean observations)	The 10 atmospheric perturbed ICs, the 3 land perturbed ICs and the 9 ocean perturbed ICs are combined to yield 270 possible perturbed ICs among which the 30 ICs to produce the hindcast ensemble are chosen at random.
Ensemble size for the forecast	50 members	
How is the forecast ensemble configured?	The 10 atmospheric perturbed ICs, the 3 land perturbed ICs and the 9 ocean perturbed ICs are combined to yield 270 possible perturbed ICs among which the 50 ICs to produce the forecast ensemble are chosen at random.	
Length of forecasts	6 months	
Data format	NetCDF	
What is the latest date predicted anomalies for the next month/season become available?	10 <sup>th</sup> of the month	8 <sup>th</sup> of each month
How are the forecast anomalies constructed?	Departures from model climate estimated from hindcast dataset	
URL where forecast(maps) are displayed	<a href="https://sps.cmcc.it/">https://sps.cmcc.it/</a>	

### 3.8.1.2.3. GPC Pune

GPC Pune는 2023년에 세계기상기구로부터 GPC로 지정되면서 2024년부터 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 참여 GPC로 실시간 계절예측 자료를 제공하고 있다. GPC Pune의 계절예측 시스템은 해양-대기 결합 모델로 해양 모델은 GFDL-MOM4를 대기모델은 GFS T382 Spectral Resolution 64 levels의 해상도를 가지며, hindcast 기간은 2003년에서 2017년으로 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 시스템의 공통 hindcast 기간인 1993년~2009년에 포함되지 않아 다중모델 앙상블 예측시스템에는 참여할 수 없다. 다만 /Seasonal/Forecast/Individual Forecast 메뉴에 한정하여 정보를 제공하며, 기존 타 GPC에서 제공하고 있던 Rectangular, Timeseries, Stereographic에 대한 계절예측 그래프를 제공한다. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 신규 GPC가 도입되거나, GPC의 계절예측 모델이 개선되어 변경될 때는 MME 또는 기존 시스템과 예측력을 비교 검증하고 있다. 2023년에는 GPC Pune의 자료 표준화 규칙을 설정하고 표준화 프로그램을 작성하였기 때문에 2024년 기존 시스템과의 예측 비교를 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 GPC Pune의 hindcast 기간이 2003-2017으로 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 시스템의 공통 Hindcast기간과 차이가 있기 때문에 기존 예측자료와의 비교가 어렵다. 따라서 GPC Pune의 hindcast 기간의 자료를 모두 포함하는 GPC Tokyo도 해당기간에 검증을 추가 수행하여 비교하였다. Figure 3.167은 개별 GPC(GPC Beijing, ECMWF, Exeter, Melbourne, Montreal, Seoul, Tokyo, Washington)의 hindcast 기간과 forecast 기간의 NINO3.4 예측의 RMSE와 TCC를 나타낸다. 선행 연구 Barnston et al., 2019와 같이 대부분의 계절예측모델은 Hindcast에 비해 Forecast의 예측력이 감소한 것으로 나타났다. GPC Pune의 TCC는 0.94, RMSE는 0.46으로 TCC는 타 GPC와 유사하나 RMSE는 타 GPC에 비해 크게 나타났다. NINO3.4 시계열(Figure 3.168)을 통해 살펴보면, NINO3.4 예측은 관측 시계열의 변동성을 전체적으로 잘 모의하는 것으로 보이나, 크기에 있어서는 차이가 크게 나타났다. 특히 2010/11의 Severe 라니냐와 2015/16의 Severe 엘니뇨 발생시의 강도를 과대모의하는 것으로 확인되었다. 2003-2017 hindcast 기간에 대한 GPC Tokyo의 검증결과, TCC는 0.97, RMSE는 0.21로 NINO3.4 예측성능 우수하게 나타났으며, 공통 hindcast 기간과 비교했을 때 예측성능의 향상을 보였다. 이를 통해 예측 성능 검증에 있어서 hindcast 기간 설정이 중요함을 알 수 있다.

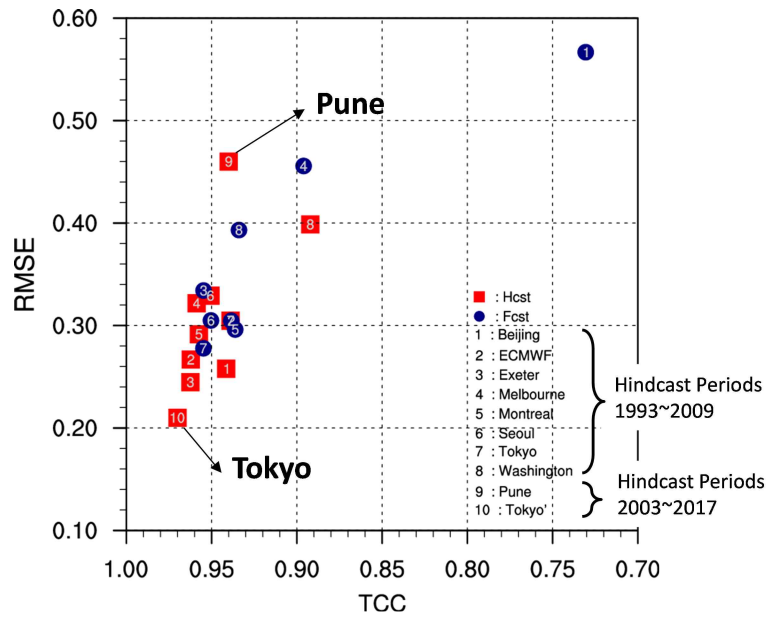


Figure 3.167. Anomaly correlation coefficient (ACC) and Root Mean Square Error (RMSE) skill score for Niño-3.4 SST (regional average over 5° S-5° N, 170-120° W) during the forecast (2013-2021) and hindcast (1993-2009, 2003-2017) periods.

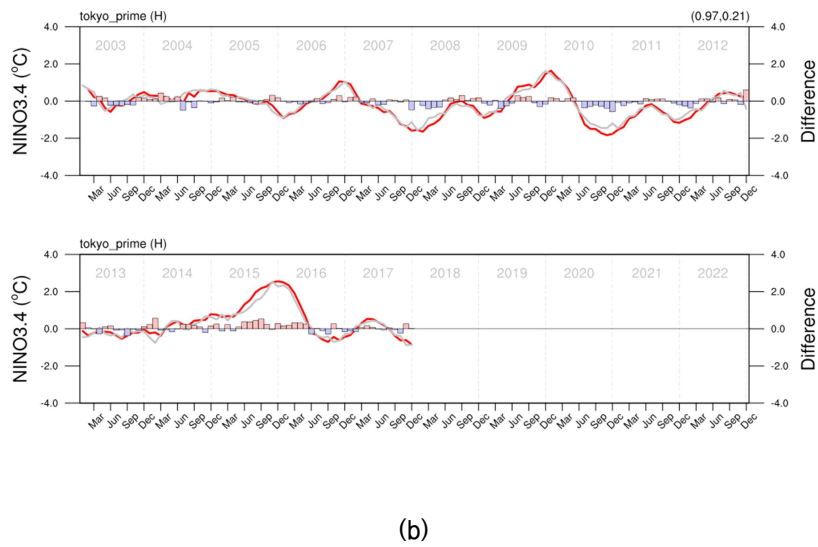
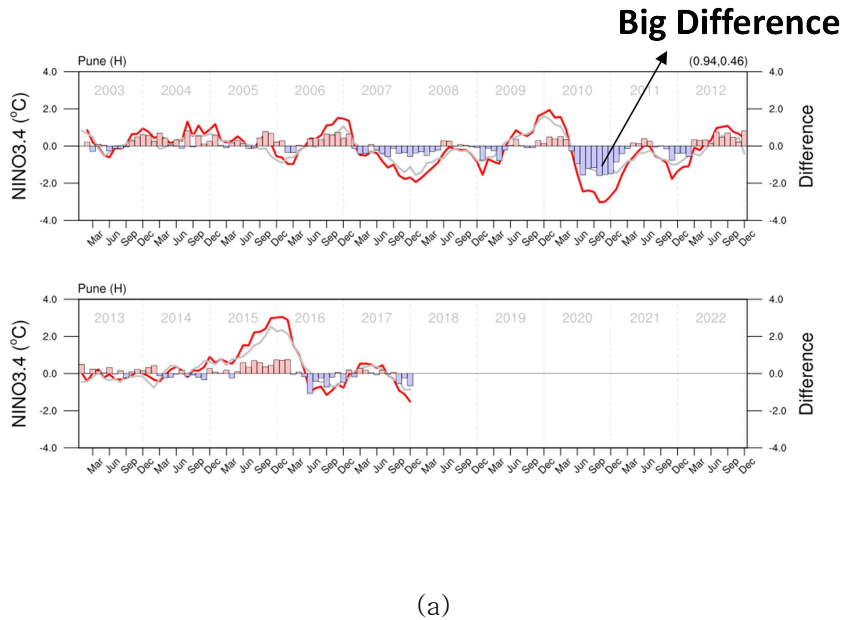


Figure 3.168. Time series of the Niño-3.4 SST. Forecast and observation are highlighted with red and gray lines, respectively. The difference between forecast and observation is indicated by bar. Panels (a) shows GPC Pune and (b) shows GPC Tokyo.

### 3.8.1.3. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 계절예측 운영 시스템 개선

세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 GPC의 계절예측 시스템의 업데이트로 기후예측 다중모델앙상블 시스템을 개선하고 있다. 각 GPC의 계절예측 시스템의 업데이트 뿐만 아니라 발생하는 오류와 시스템의 효율적인 관리 운영을 위해 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 시스템을 수정 또는 개선하고 있다(Table 3.33). 이번 절에서는 이러한 개선사항을 간략하게 기술하고자 한다.

2023년에는 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 예측 시스템과 GPC Seoul 그래픽 표출 시스템에서는 해수면 관측 자료로 NOAA에서 제공하고 있는 OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) V2의 저해상도(2.5도 해상도)를 수집하여 기후지수 예측 시스템과 해수면 온도 검증에 위한 자료로 활용해 왔다. 그러나 3월부터 NOAA OISST 저해상도 자료에 대한 서비스가 중단되면서 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 예측 시스템의 수정이 진행되었다. 잘못된 정보의 표출은 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 계절예측 정보에 대한 신뢰도를 떨어뜨는 문제로 발전할 수 있기에 비효율적 자료 저장에 대한 개선, 자료 표준화 후 Raw 자료 미사용, 메타정보활용, 유지보수의 위한 가독성 향상을 고려하여 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터와 GPC Seoul 기후지수 표출 시스템을 수정·개선하였다. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 기후예측자료 활용성 증대를 목적으로 다중모델 앙상블 예측이 완료되는 시점에 WMO 계절예측 전문가 그룹에게 interim GSCU와 개별 GPC 예측자료를 PowerPoint의 형식으로 생산하여 이메일로 발송하고 있다. 대국민 서비스를 하고 있는 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 특성상 계절예측시스템의 현업, 홈페이지 서버 등은 외부 네트워크 망을 사용하고 있고, 외부 네트워크 망에서는 정보 보안을 위해 편집 기능을 포함하는 Microsoft의 MS Office 프로그램을 설치·사용할 수 없다. 이러한 이유로 시스템 운영자는 현업서버에서 자료를 외부네트워크망의 PC에 다운로드하고 이 자료를 내부 PC로 전송한 후 Powerpoint 매크로 프로그램을 이용하여 전문가 그룹에 전송할 자료를 생산하는 번거로움을 해소하여, 현업 시스템 운영자의 편의성 증대를 위해 운영시스템 내에 Powerpoint 자료 생성 python library를 설치하여 현업운영 서버 내에서 자료를 생성할 수 있도록 python 프로그램을 개발하였다.

세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 선도센터 홈페이지 뿐만 아니라 GPC Seoul의 홈페이지도 함께 운영 관리하고 있다. 기존 GPC Seoul에서 서비스되고 있던 그래픽에는 KMA의 로고가 포함되어 있었으나, 정부는 모든 행정기관의 로고를 하나로 통일하여 사용할 것을 권고 하고 있다. 따라서 GPC Seoul 홈페이지에서 제공하는 deterministic, Probabilistic Forecast, 기후지수(17종), Seaice 모든 그래픽 생성 프로그램을 수정하여, 2022년 1월 (2022FMA)에서 2024년 4월 (2024MJJ예측) 예측 그래프를 재생산을 수행하였다(Figure 3.169). 2024년에는 GPC 서울 기후지수 생산 프로그램 오류를 수정하고, ERA5(NetCDF) 파일 내 Date Coordinate 변경에 따라 Anomaly생성 및 자료 표출 오류 확인하여 프로그램 수정이 이루어졌다.

Table 3. 33. List of upgraded WMO LC-LRFMME' s seasonal forecast system in 2022~2024.

Year	Contents
2022	-
2023	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 관측 해수면 온도 자료 서비스 중단에 따른 시스템 개선</li> <li>• WMO 계절예측 전문가 자료 제공을 위한 시스템 개선</li> <li>• 관측자료 표출 시스템 개선</li> </ul>
2024	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GPC 서울 기후지수 생산 프로그램 오류 수정</li> <li>• GPC 서울 홈페이지 내 그래픽 로고 변경</li> <li>• ERA5(NetCDF) 파일 내 Date Coordinate 변경에 따라 Anomaly생성 및 자료 표출 오류 확인 및 프로그램 수정</li> </ul>

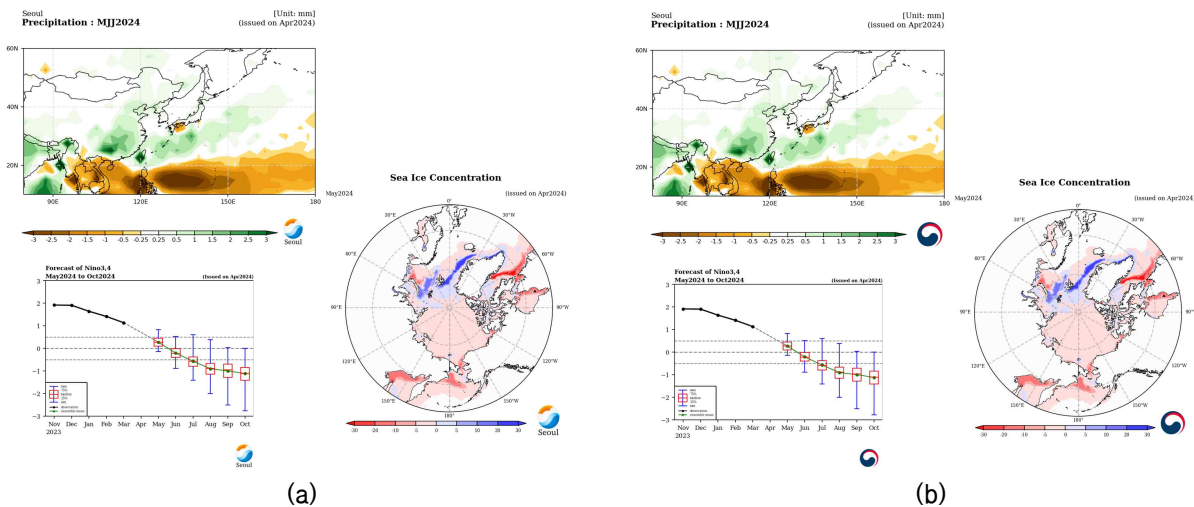


Figure 3.169. Change of logo for seasonal forecast graphic in GPC Seoul.

### 3.8.1.4. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 기후예측자료 활용성 증대를 위한 국내·외 협력 업무

#### 3.8.1.4.1. 지역기후포럼 (Regional Climate Outlook Forum)

세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 기후예측자료 활용성 증대시키고 국제 협력을 통해 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 국제적 입지를 강화시키기 위해 노력하고 있다. 그중 하나가 WMO 주관으로 지역별 기상청과 전문가들이 합의된 기후 전망을 제시하고, 이와 관련된 다양한 응용 분야 (농업, 식량안보, 수자원, 공중보건 등)의 전문가와 의견을 교환하기 위해 마련되는 다양한 지역기후포럼 (Regional Climate Outlook Forum, RCOF)에 참석하는 것이다. 2012년부터 매년 다양한 지역기후포럼에 아태기후센터와 기상청의 기후예측과에서 참석하여 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 MME 예측결과를 지역 전문가들과 공유하고 있다. 2019년부터 시작된 COVID-19의 전 세계적인 유행으로 인해 2022~2023년 지역기후포럼은 온라인 회의로 진행되었으며, 2024년 제28차 SASCOF는 COVID-19 확

산 이후 처음으로 대면회의로 진행되었다. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 2022년부터 24년까지 총 10개의 지역기후포럼에 MME 기후 예측정보를 제공하였다(Table 3.34). 2024년 상반기에는 남아시아 지역의 여름철 기후전망을 위해 인도 푸네에서 개최된 SASCOF-28(28th South Asian Climate Outlook Forum)에 참석하여 세계기상기구 기후예측 다중 모델앙상블 선도센터 MME 예측정보와 그동안 진행된 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 개선사항을 발표하였다(Figure 3.171, Figure3.172). SASCOF는 세계기상기구가 공식적으로 후원하는 지역기후포럼 중 하나로 Asian southwest와 northeast 몬순 기후의 영향을 받는 지역의 기후전망을 위한 회의로 2010년부터 매년 개최되고 있으며 그동안 SASCOF의 발전 과정은 Figure 3.170과 같다. 지역기후포럼과 함께 개최되는 기후서비스 사용자 포럼은 수자원, 농업, 재난재해, 보건 부문에서의 기후 정보 활용 현황을 공유하고 향후 사용자 맞춤형 기후 정보 관점의 구체적인 요구 사항을 파악하기 위해 마련된 자리이다. 제28차 SASCOF와 하반기에 개최된 제29차 SASCOF는 인도기상청 (IMD, Indian Meteorological Department), 세계기상기구 (WMO, World Meteorological Organization)와 Regional Integrated Multi-hazard Early-warning System(RIMES)이 공동으로 개최되었으며, 남아시아지역 9개국 (Afghanistan, Bangladesh, Bhutan, India, Maldives, Myanmar, Nepal, Pakistan, Sri Lanka)의 기상청 관계자 뿐만 아니라 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터, International Research Institute for Climate and Society(IRI), Japan Meteorological Agency(JMA), WMO Regional Climate Centre(RCC) Pune, Indian Institute of Tropical Meteorology(IITM) 등 약 50명이 참석하여 Southwest 몬순에 영향을 미치는 기후인자 (El Nino-Southern Oscillation(ENSO), Indian Ocean Dipole(IOD), 북반구 눈덮임)와 Southwest 몬순 시기 또는 Northeast 몬순 시기의 기후전망에 대한 의견을 공유하였다. Southwest 몬순 전망을 위해서는 JJAS(June-September)의 예측정보가 필요하다. 다수의 타 기관의 경우 3개월 예측정보를 생산·제공하고 있어 활용에 한계가 있으나 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 계절예측 정보는 사용자가 누리집(www.wmolc.org)에서 선행시간 또는 예측기간을 선정하여 예측정보를 확인할 수 있어 타 기관에 비해 사용자 편의성이 뛰어나 활용성이 큰 것으로 보인다. 제28차 SASCOF에 직접 참석하여 세계기상기구 기후예측 다중 모델앙상블 선도센터 계절예측 정보를 공유하고 개선 방향을 논의하는 과정에서 기존 SouthAsia 영역의 그래프는 다소 큰 영역인데 반해 SASCOF 영역의 그래프는 각국의 예측정보가 뚜렷이 나타나 활용도가 클 것으로 보인다. 그러나 미얀마의 경우, SASCOF 지역의 그래프 상에서 국경이 모두 포함되지 않는 문제가 있음에 따라 경도를 조절에 대한 미얀마 기후예측 담당자의 요청을 반영하여 이후 도메인 영역을 변경 적용하였다. 다수의 국가에서 국가 장기예보 생산과정에서의 활용성을 더욱 높일 수 있을 것으로 기대되며, 실제 Figure 3.173에 나타난 각국의 발표자료 예시와 같이, 파키스탄, 몰디브, 미얀마 등 다수의 국가에서 국가 장기예보 생산과정에서 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 계절예측 정보를 참고자료로 활용하고 있음을 확인하였다. 또한 각국의 기후예측 담당자들은 타 기관에 비해 다소 짧고, 최근 기후변동성을 포함하지 못하는 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 공통 hindcast 기간과 저해상도 예측자료에 대한 문의가 있었다. 이후 세계기상기구 계절예측 전문가 그룹에서 이에 대한 논의가 필요할 것으로 보인다. 그리고 Equal Chance에 대한 정보 부족에 대한 것이 언급되었다. 기후보 제공자와 기후 과학자의 입장에서는 기후값과 유사한 분포로 해석되나, 기후예측 사용자의 경우, 기후값에 대한 정보 부족으로 활용과 해석에 한계가 있기 때문에 정보를 제공하는 입장에서도 이에 대한 고민이 필요할 것으로 보인다.

Table 3.34. The list of RCOF that WMO LC was participated in during the periods 2022~2024.

RCOF	Place	Date
22nd South Asian Climate Outlook Forum(SASCOF-22)	Online	26, April, 2022
23rd South Asian Climate Outlook Forum(SASCOF-23)	Online	26, September, 2022
19th ASEAN Climate Outlook Forum (ASEANCOF-19)	Online	21, November, 2022
25th South Asian Climate Outlook Forum(SASCOF-25)	Online	27, April, 2023
26th South Asian Climate Outlook Forum(SASCOF-26)	Online	26-27, September, 2023
11th East Asia winter Climate Outlook Forum(EASCOF-11)	Tokyo/Japan	6-8, November, 2023
21st ASEAN Climate Outlook Forum (ASEANCOF-21)	Online	21, November, 2023
28th South Asian Climate Outlook Forum(SASCOF-28)	Pune/India	29, April-1, May, 2024
29th South Asian Climate Outlook Forum(SASCOF-29)	Online	25-26, September, 2024
23rd ASEAN Climate Outlook Forum (ASEANCOF-23)	Online	27, November, 2024

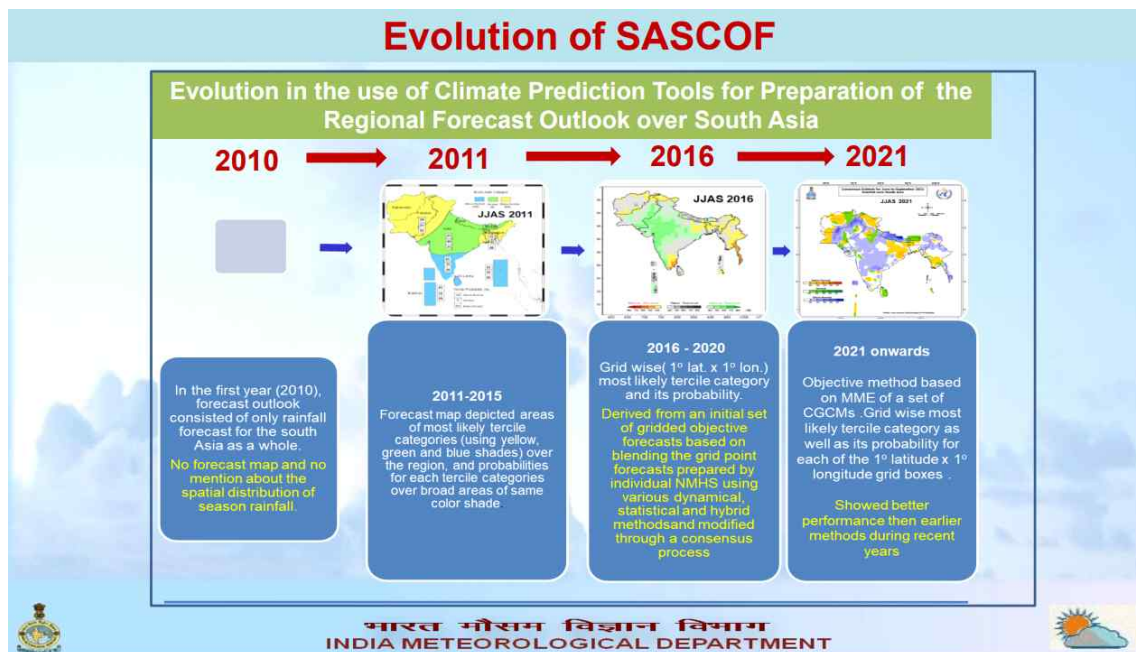


Figure 3.170. Evolution of SASCOF.



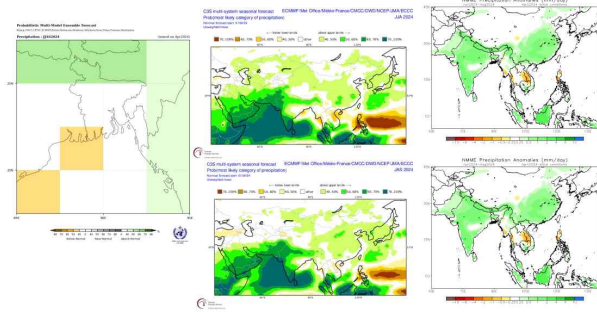
Figure 3.171. Group photos of SASCOF-28.



Figure 3.172. Activity in SASCOF-28.

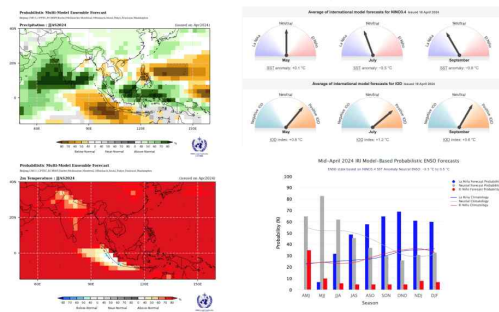
하반기에는 ASEANCOF-23 온라인 회의에 참석하여 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에서 생산된 MME 계절 예측정보를 발표하고 지역의 각국 기상청 참석자와 세계 유수의 계절 예측 생산 기관의 참석자와 지역의 기후전망에 대한 의견을 공유하고 계절예측 정보 활용 사례를 공유하고 의견을 교환하였다. ASEANCOF는 아세안 지역의 기후전망을 위한 회의로 2013년부터 매년 개최되고 있다. 이번 지역기후포럼에는 동남아시아 9개국(Brunei Darussalam, Cambodia, Lao PDR, Myanmar, Malaysia, Singapore, Philippines, Thailand, Viet Nam) 기상청 관계자가 참석하였으며, 이외에도 Bureau of Meteorology(BOM), Japan Meteorological Agency(JMA), European Centre of Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF), UK Met Office(UKMO), WMO 등 약 40명이 참석하여 Northeast 몬순에 영향을 미치는 기후인자 (El Nino-Southern Oscillation(ENSO), Indian Ocean Dipole(IOD))와 Northeast 몬순 시기의 기후전망에 대한 의견을 공유하였다. 회의 참가 영상과 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에서 발표한 기후전망 자료의 예시를 Figure 3.174에 나타내었다.

11. Additional Supporting Information (Precipitation) 2024

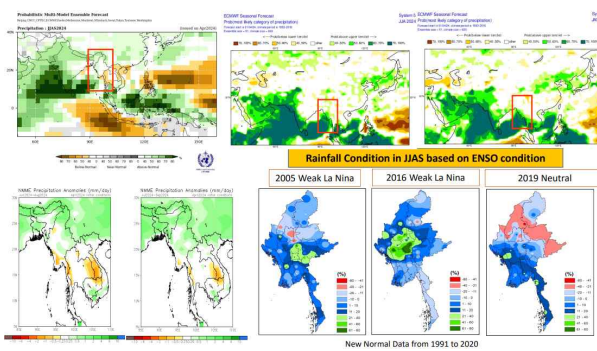


(a)

11. Additional Supporting Information

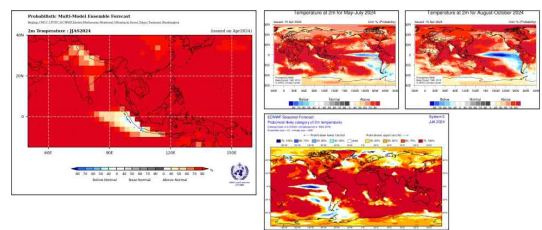


(b)



(c)

8. National Temperature Outlook JJAS 2024



Maximum and Minimum Temperatures are likely to be above normal over the Maldives during JJAS 2024.

Enhanced SCOS input for JJAS 2024:

(d)

Figure 3.173. Examples of the use of seasonal climate information from WMOLC-LRFMME (I).

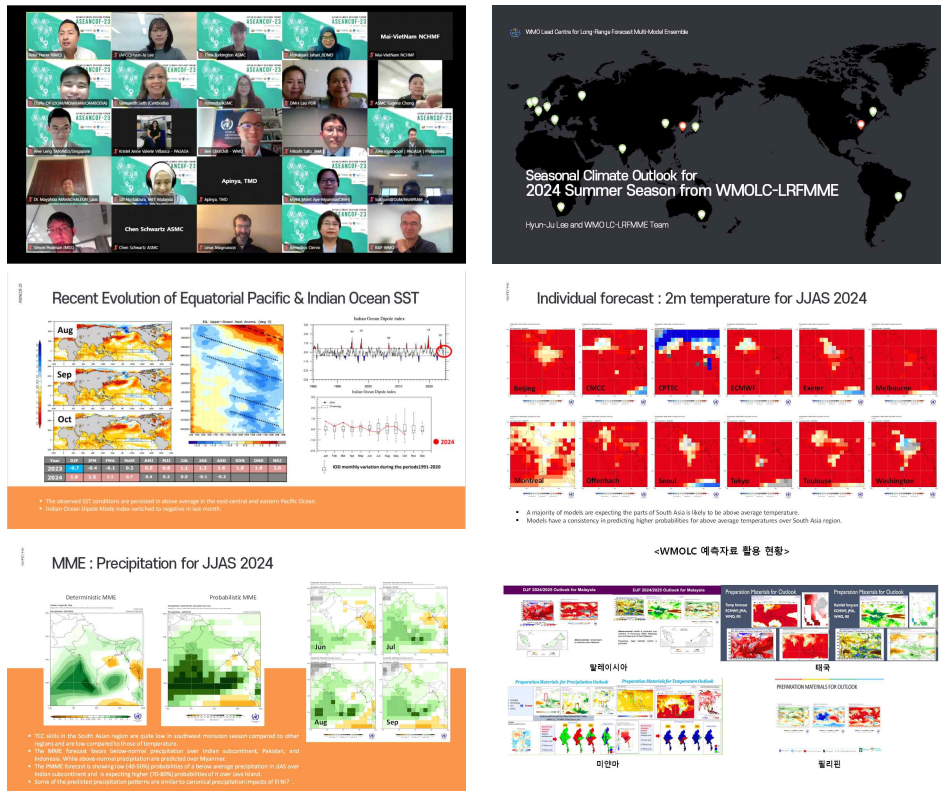


Figure 3.174. Group photos of ASEANCOF-23 and examples of the use of seasonal climate information from WMOLC-LRFMME.

### 3.8.1.5. WMO 장기예보 선도센터 예측 시스템 개선 용역 사업 지원

#### 3.8.1.5.1. 목적 및 기대효과

앞서 언급한 것과 같이, 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 2009년 4월 한국 기상청과 미국 기상청 (GPC Washington)의 공동 운영 형태로 지정되면서 2023년 현재 전 세계 15개 GPC가 생산하는 장기 예측자료를 수집·표준화하고, 표준화된 GPC 자료 및 다중모델앙상블 (Multi-Model Ensemble, MME) 예측자료를 WMO 회원국에 제공하는 역할을 수행해 오고 있다. 현재 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 홈페이지 및 운영 시스템은 자료처리 기술, 웹 시스템 기술, 데이터베이스 기술을 종합적으로 적용하여 운영하고 있다. 사용자 맞춤형 예측정보 제공 서비스 구현, 기후 모델의 추가 등에 따른 서비스 확대, 최신 기술 적용 및 관리 방안의 개선을 통해 전 세계 WMO 회원국에 장기예보 자료를 제공하는 기본 업무를 보다 안정적으로 수행할 필요성 요구됨에 따라 2017년부터 WMO 장기예보선도센터 시스템 개선을 위한 용역과제를 기상청에서 발주하고 있다. APCC는 WMO장기예보선도센터 시스템 개선 용역의 실무적인 기술적 지원을 수행하고 있다.

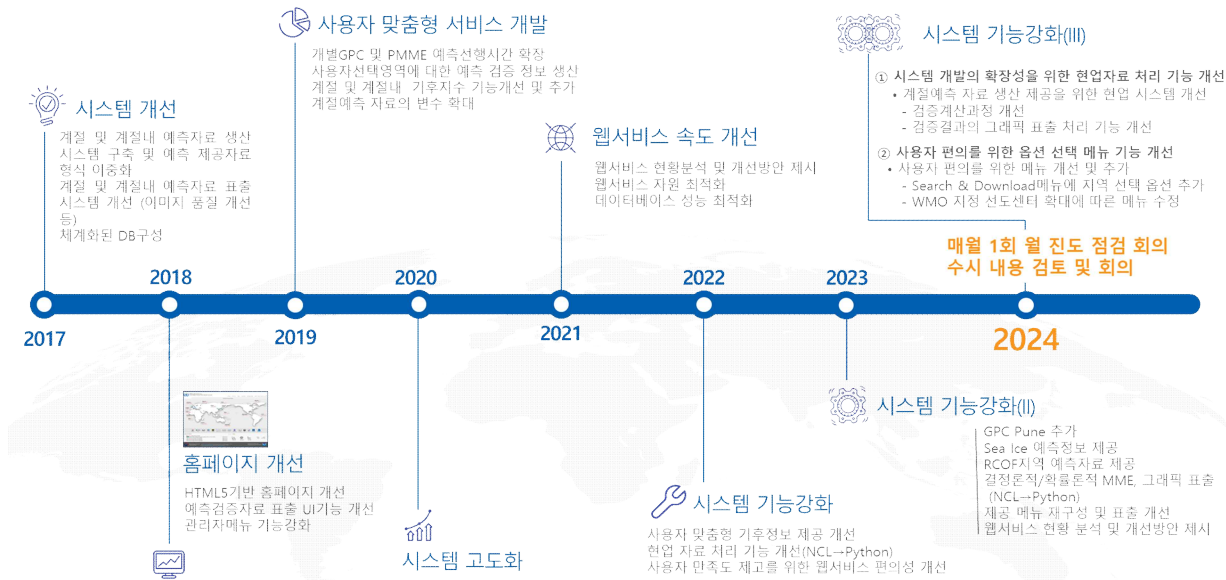


Figure 3.175. Progress of improvement in WMOLC-LRFMME.

2022년~2024년 3년 동안 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 계절예측 시스템의 운영자 측면과 홈페이지의 사용자 편의성 측면을 모두 개선하고자 과제 내용을 선정하였다(Figure 3.175).

2022년에는 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 결정론적, 확률론적 다중모델 앙상블 계절예측정보 표출시스템은 Rectangular 형태의 Map projection에 대해서만 계절예측 정보를 제공하고 있으며, 다중모델 앙상블 계절예측에 참여하는 개별 GPC의 계절예측정보는 Stereographic과 Rectangular 두 Map projection으로 표출되었다. 보다 다양한 Map projection에 대해 계절 예측 정보를 표출하여 사용자 친화적인 웹서비스를 제공하기 위해 타 기관(ECMWF, NCEP)에서 제공하는 Map Projection을 참고하여 최종적으로 Lambert Conformal Conic, Polar Stereographic 방식의 Map projection 표출을 제안하였다. 이를 바탕으로 결정론적 다중모델 앙상블 예측 내 모든 메뉴 (SCM, RMR, SVD, GA)에 대해서 Lambert Conformal Conic, Polar Stereographic를 추가하여 사용자가 다양한 Map projection에서 원하는 Map projection을 선택하여 계절예측 정보를 표출할 수 있도록 하였다(Figure 3.176). 또한 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 시스템은 기본적으로 기후분야에서 많이 사용하고 NCL(NCAR Command Language)과 Shell를 사용하여 개발되었다. 그러나 NCAR에서 개발된 NCL의 경우 2019년 NCL Version 6.6.2를 마지막으로 더 이상의 업데이트가 진행되지 않고 있으며, NCAR에서도 기후 자료의 분석과 표출을 위한 개발 언어로 Python을 채택하고 있다. Python은 스크립트 언어로 컴파일 과정없이 인터프리터에 의해 실행 결과를 바로 확인하고 수정하면서 코드를 작성할 수 있는 장점을 가지며, 쉽고 간결한 문법 덕분에 빠르게 개발이 가능하면 더 적은 코드로 많은 작업을 수행할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 다른 언어나 라이브러리에 쉽게 접근해 연동이 가능하여 높은 확정성과 이식성을 가지는 특징이 있다. 따라서 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 계절예측 시스템도 Python개발언어로 시스템을 변경하여 향후 개발의 용이성과 확장성을 확보하려 하였다. 그 일환으로 2022년에는 14개 GPC의 기후예측자료 표준화를 위한 전처리 프로그램을 Python으로 변경하였다.

2023년에는 “WMO 장기예보 선도센터 시스템 기능강화 (II)” 용역 사업이 4월부터 11월 까지 약 7개월 동안 진행되었으며, 용역사업의 범위는 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 시스템 개선, 계절예측 자료 생산/제공을 위한 현업시스템 개선, 제공 메뉴 재구성 및 표출 개선, 웹서비스 현황 분석 및 개선방안 제시로 크게 4개로 구분되어 진행되었다. 특히 2023년 용역과제를 통해서는 지역기후포럼 지역에 대한 자료를 생산하고 표출시스템을 개선하였다. 앞서 설명한 바와 같이 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 중요한 역할 중의 하나는 WMO 주관으로 지역별 기상청과 전문가들이 합의된 기후 전망생산하기 위한 자리인 지역기후포럼에 참석하여 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 다중모델 앙상블 예측결과를 지역 전문가들과 공유하고 이와 관련된 다양한 응용 분야의 전문가와 의견을 교환하여 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터의 다중모델 앙상블 예측 결과의 활용성 강화를 위해 노력하는 것이다. 이미 많은 국가에서 국가별 또는 지역별 계절전망을 위해서 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 다중모델 앙상블 예측결과를 중요한 참고자료로 활용하고 있고, 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 누리집 그래픽 메뉴를 통해 전지구 9개 지역과 임의영역에 대해 사용자가 원하는 영역에 대한 그래프를 직접 생산하여 계절 전망에 활용할 수 있도록 하고 있으나, 지역기후포럼의 많은 참여자들의 요구사항을 받아들여 WMO에서 지정해 놓은 지역기후포럼 영역의 그래프도 전구 9개 지역의 그래프와 같이 그래픽 자료를 사전에 생산해 놓음으로써 사용자가 임의영역 그래프 생산으로 인해 시간이 많이 소요되는 것을 줄이고 사용자의 편의성 증대를 향상 시키기 위해 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 누리집 메뉴에 지역기후포럼을 추가하였다. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 누리집을 통해 제공되는 지역기후 포럼은 RA(Regional Association)I~VI까지 총 22개 영역(GHACOF, PRESASS, FOCRAII, SASCOF, MedCOF 등)으로 구성된다.

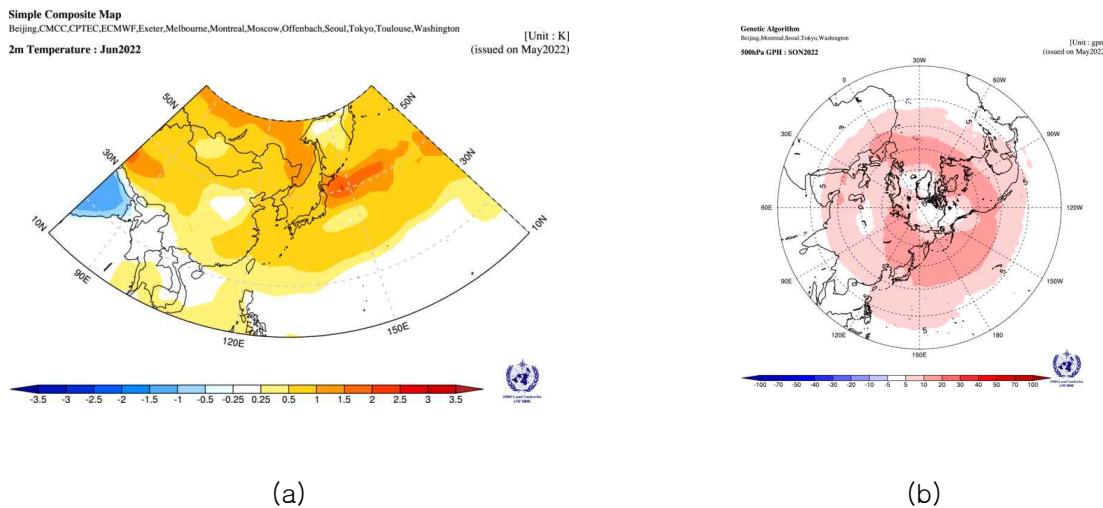


Figure 3.176. Samples of (a) Lambert Conformal projection and (b) Stereographic projection.

또한 북극 해빙은 기후변화로 인해 중요한 예측인자로 인식되고 있으며 겨울철 계절기후 전망을 위한 중요한 참고자료가 된다. 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에서는 북극 해빙 예측 중요성을 인식하여 해빙예측 정보를 누리집을 통해 제공하기 위해 GPC의 해빙 자료 생산 여부를 조사하였으나, 모든 GPC의 계절예측모델은 Sea ice extent를 예측결과를 생산하고 있지 않다. GPC Seoul, Exeter, ECMWF, Toulouse의 sea ice fraction 정보를 수집하고 표준화를 거친 후 Figure 3.177과 같이 누리집을 통해 제공할 수 있게 시스템을 구축하였다. sea ice fraction이 0.15 이상인 지역만 표출하도록 하였다. 보다 자세한 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 용역과제의 내용은 2022/23년 연구 보고서 또는 용역 결과 보고서에서 확인 가능하다.

**Select Parameters**

<input type="radio"/> Precipitation	<input type="radio"/> 500hPa GPH	<input type="radio"/> Mean Sea Level Pressure
<input type="radio"/> 2m Temperature	<input type="radio"/> 850hPa Temperature	<input type="radio"/> Sea Surface Temperature
<input type="radio"/> 850hPa Wind	<input checked="" type="radio"/> Sea ice extent	

**Plot**

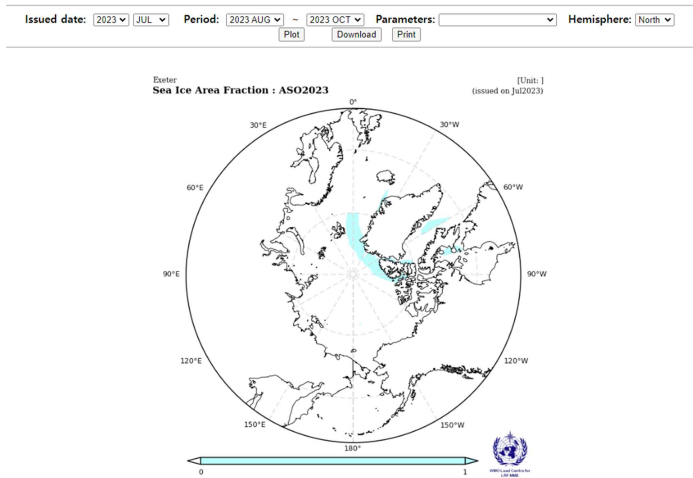


Figure 3.177. Sea ice extent on WMOLC website.

지난 몇 년 동안 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 계절예측 시스템의 기본 프로그램인 NCL을 추후 시스템 개발의 확장성을 위해 Python으로 개별 GPC 계절 예측 모델의 표준화, SCM 및 확률예측 계산 과정 및 그래픽 생산 과정을 변경하였다. 2024년에는 계절예측 자료의 검증 계산과정 및 검증결과의 그래픽 표출 처리 프로그램을 Python으로 변환하였다. 이외의 용역 사업 범위는 아래와 같다.

- 전산장비 구매 및 교체에 따른 안정적 자료 이관
- 시스템 개발의 확장성을 위한 현업자료 처리 기능 개선

- 사용자 편의를 위한 옵션 선택 메뉴 기능 개선
- 안정적인 자료 수집·처리 및 기능개발 등을 위한 체계 개선

특히, 2024년 진행된 검증 계산과정 Python으로 변환하는 부분은 기존 프로그램의 반복문을 중첩하여 요소별로 비교하여 처리하는 기능을 배열 마스킹을 사용하여 반복문을 최소화하여 기존 2시간 가량 소요되던 계산과정이 5분 정도로 계산 소요 시간이 크게 개선되었다. 또한 홈페이지 사용자 설문을 수행하여 향후 사용자의 의견이나 요구사항을 반영하여 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 예측 시스템 개선 방향을 설정하고 한다(Figure3.178).

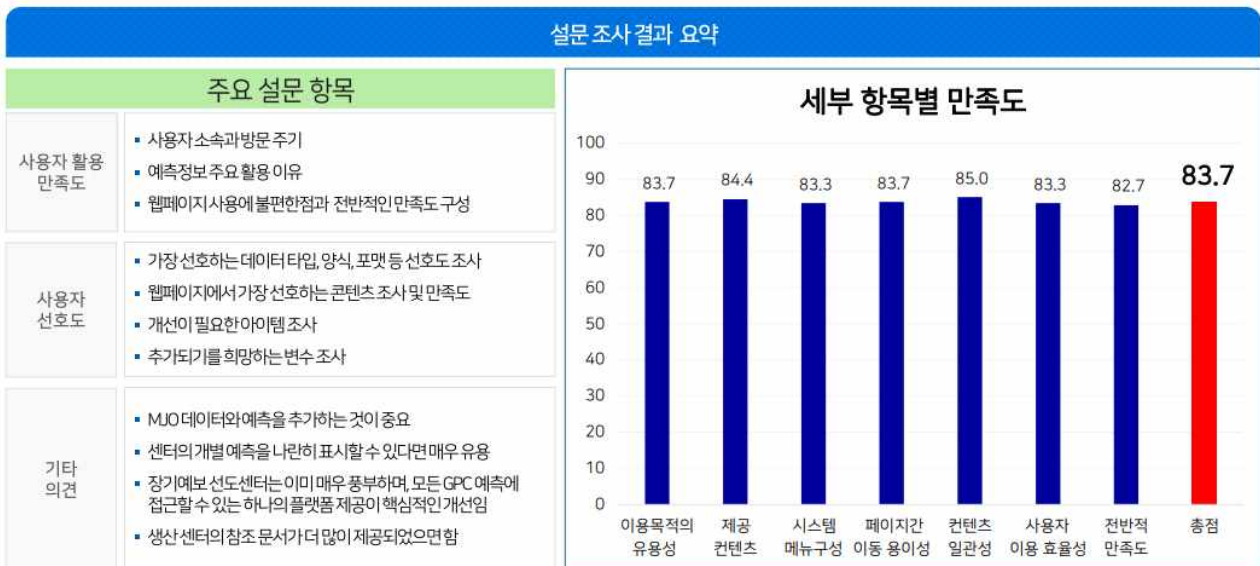


Figure 3.178. The results of the surveys to improve WMOLC-LRFMME website.

세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 예측 시스템 기능강화 용역 사업 수행으로 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 시스템 개선에 따라 전세계 회원국 사용자에게 안정적으로 품질 높은 서비스를 제공할 수 있을 것으로 보이며, 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 기후예측 자료 활용도 또한 증대시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터에 자료를 제공하는 GPC와의 국제적 협업 체계를 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.8.2. WMO S2S 국제조정사무소(ICO) 운영

세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)는 사회경제적 파급효과는 크지만 예측성이 취약한 계절내~계절(Subseasonal-to-Seasonal, S2S) 규모 예측능력 향상을 위해 세계기후연구프로그램 및 세계기상연구프로그램 공동으로 국제 연구 프로젝트인 S2S 프로젝트를 출범시켰다. 이에 우리나라 기상청/국립기상과학원은 S2S 예측 연구 분야의 국제 기여를 강화위해 WMO와 양해각서를 체결하고 2013년 11월부터 국립기상과학원에 WMO S2S 국제조정사무소(ICO)를 유치·운영하였다. 그 후 기상청, 국립기상과학원 및 APEC기후센터는 2020년 제2차 기후협력회의를 통해 WMO S2S ICO의 운영을 APEC기후센터로 이관하기로 결정하고 WMO와의 양해각서를 개정(' 20.12.7)함으로써 APEC기후센터가 2021년 1월부터 WMO S2S ICO를 공식적으로 운영하게 되었다.

2023년도에는 WMO S2S 프로젝트가 공식 종료( 1단계 ' 13~' 18 및 2단계 ' 19~' 23)됨에 따라 국제조정사무소의 업무도 동시에 종료하게 되었다. 이에 S2S 프로젝트 운영진은 S2S 프로젝트 및 관련 연구 성과 공유와 함께 향후 연구개발 방향을 논의하기 위해 S2S Summit(2023년 7월 3일-7일, 레딩, 영국)을 개최하였다. APCC에서는 본 회의에 참석하여 지난 10년 간 국제조정사무소의 역할 및 성과에 대한 포스터 발표, ICO 업무 종료 및 이관 관련 WMO와 업무협의, Summit 기간 중 행사 운영지원 등을 수행하였다. 또한 당해년도에는 의장단/운영위원회/WMO 회의 주관 또는 참석(4회), 뉴스레터 발간(3회), 홈페이지 콘텐츠 관리, 메일링리스트 및 온라인 소통그룹 관리 등을 통해 S2S 프로젝트 추진을 위한 정보교류, 네트워크 관리 및 홍보 활동 등을 수행함으로써 S2S 국제 연구활동의 허브로서 우리나라의 인지도를 제고하였다.

### 3.8.3. IPCC 등 기후분야 국제회의 참석 및 정부대표단 활동

#### 3.8.3.1. IPCC 지원

IPCC 제6차 평가보고서(AR6)의 종합보고서(AR6)의 요약보고서(SPM, Summary for Policy Maker)와 상세보고서(LR, Longer Report)에 대한 의제 분석 및 대응 지원, SPM 분석 및 우리나라 검토 의견 반영을 위한 발언문 작성, SPM 승인을 위한 회원국 토의 내용 및 SPM 수정 관련 전문 작성, SPM 번역본 작성 및 보도자료 작성 지원 등을 수행하였으며 그 내용은 아래와 같다.

#### <발언요지(국문)>

- (B.3.2, 세 번째 문장) 2-3도 수준의 지속적 온난화에서는 **그린랜드와 서남극**의 빙상이 수천년간 거의 완전히 비가역적으로 소실될 것이다.

At sustained warming levels between 2°C and 3°C, the Greenland and West Antarctic ice sheets will be lost almost completely and irreversibly over multiple millennia, causing several metres of sea level rise (limited evidence).

- WG1 보고서, WG1 SPM (B5) 등을 참조할 때 “두 지역 **모두**에 대해 **수천년의 시간 규모**에서” 거의 완전한 비가역적 소실이 명확하게 제시된 것인지 확인이 어려움
- 해수면 상승 등과 연관된 본 문장의 함의를 고려할 때, 저자들에게 본 문장의 과학적 근거를 재확인 해줄 것을 요청 (괄호 안의 “limited evidence” 가 IPCC 공식 용어인지 확인

포함)

<발언요지(영문)>

- Mr. Chair, thank you for giving me the floor.

My intervention for this sentence is about its robustness. I have referred WG1 SPM and its underlying reports because I think these reports are the baseline for the statement we are dealing with now. However, I could not figure out from the underlying reports that “**both** Greenland and West Antarctic ice sheets are vulnerable on **millennium time-scale**” .

I think this statement has huge implication. Therefore, I would like to kindly ask authors to clarify once again the scientific accuracy of this sentence. In addition, I would like to ask authors to confirm that the words “limited evidence” shown in bracket is IPCC official language.

And for your reference, I fully respect the authors expertise, therefore I will entirely support the authors response with respect to my intervention.

Thank you.

<발언요지(영문)>

- (B.7.3, 두 번째 문장의 맨 뒤) **very large scales**의 예시 설명 요청

Transitioning towards net zero CO2 emissions faster and reducing non-CO2 emissions such as methane more rapidly would limit peak warming levels and reduce the requirement for net negative CO2 emissions, thereby reducing feasibility concerns, and social and environmental risks associated with CDR deployment at **very large scales**. {3.3.3, 3.3.4, 3.4.1, Table 3.1}

- **large scales** (상세보고서, WG3 SPM, SYR SPM), **very large scales** (SYR SPM) 등이 사용되고 있음.

- 다른 자료들을 참조하면 “scale” 은 “양” 을 의미

※ 용례 1: Institute of Science, Technology and Policy, ETH Zurich

- Consequently, **carbon dioxide removal (CDR) at the scale of 10 Gt a year** will be required by 2050, in addition to extensive decarbonization.

※ 용례 2: **Large-Scale Carbon Dioxide Removal to Meet the 1.5° C Limit: Key Governance Gaps, Challenges and Priority Responses**

- **Scale of CDR** needed to meet Paris Agreement goals?

For Paris Agreement-consistent pathways, annual rates of BECCS deployment range from 0–1 GtCO<sub>2</sub> per year in 2030, 0–8 GtCO<sub>2</sub> per year in 2050, and 0–16 GtCO<sub>2</sub> per year in 2100; annual rates of agriculture, forestry and land-use related CDR deployment range from 0–5 GtCO<sub>2</sub> per year in 2030, 1–11 GtCO<sub>2</sub> per year in 2050 and 1–5 GtCO<sub>2</sub> per year in 2100 (IPCC, 2018).

(BECCS: bioenergy with carbon dioxide capture and storage)

- citation 에서의 용례

Longer Report p51, sec 3.3.3, line 28–29

removal and storage potential ranges from lower potential (<1 Gt CO<sub>2</sub>/yr, e.g., blue carbon management) to higher potential (>3 Gt CO<sub>2</sub>/yr, e.g., agroforestry);

Longer Report p52, sec 3.3.4, line 4–9

The larger the overshoot, the more net negative CO<sub>2</sub> emissions needed to return to a given warming level (high confidence). Reducing global temperature by **removing CO<sub>2</sub>** would require net negative emissions of 220 GtCO<sub>2</sub> (best estimate, with a likely **range 160–370 GtCO<sub>2</sub>**) for every tenth of a degree (medium confidence). Modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot reach median values of **cumulative net-negative emissions of 220 GtCO<sub>2</sub>** by 2100, pathways that return warming to 1.5°C (>50%) after high overshoot reach median values of **360 GtCO<sub>2</sub>** (high confidence).

- B.7.3의 두 번째 문장 작성에 활용된 것으로 판단되는 Longer Report 내용

Longer Report p52, sec 3.3.4, line 9–12

More rapid reduction in CO<sub>2</sub> and non-CO<sub>2</sub> emissions, particularly methane, limits peak warming levels and reduces the requirement for net negative CO<sub>2</sub> emissions and CDR, thereby reducing feasibility concerns, and social and environmental risks (high confidence). {WGI SPM D.1.1; WGIII SPM B.6.4, WGIII SPM C.2, WGIII SPM C.2.2, WGIII Table13 SPM.2}

#### <발언요지(영문)>

○ Mr. Chair, thank you for giving me the floor.

My intervention for this sentence is about the scale of CDR. According to the Longer Report, CDR deployment is associated with “large scales”. However, in this sentence, CDR deployment at “VERY large scales” is suggested.

Therefore, I would like to kindly ask author’s explanation on these different languages associated with the scale of CDR.

Thank you.

〈B. 장기 기후변화, 리스크 및 대응〉

○ (B.3 불가피한, 비가역적 또는 급격한 변화의 가능성과 위험)

- 티핑 포인트와 연관된 비가역적 변화에 대한 가능성과 이로 인해 초래되는 위험, 발생 가능성은 낮으나 매우 큰 위험을 초래할 수 있는 현상들의 장기 전망을 일부 모호한 표현으로 기술하여 몇몇 회원국으로부터 신뢰성에 대한 의문 제기, 보다 정량적인 기술 요청 등이 있었으나 전반적으로 큰 이견 없이 승인됨.

○ (H.S) 회원국의 다양한 의견을 반영하여 B.3의 세 단락을 보다 잘 대표할 수 있도록 첫 문장을 수정하고, 이와 일관되게 두 번째 문장을 일부 수정한 후 승인됨.

- 첫 문장에 대해 룩셈부르크, 노르웨이, 덴마크는 “mitigation action”에 “immediate”를 덧붙여 즉각적 대응의 중요성을 강조해야 한다고 주장. 러시아, 에쿠아도르, 베네수엘라는 “mitigation” 뒤에 “adaptation” 또한 기술되어야 한다고 주장하였고, 이에 대해 저자는 B.3에 adaptation 관련 내용이 없기 때문에 헤드라인에 이 단어를 넣는 것이 부적절하다고 설명. 인도는 “changes”를 “impacts”으로 바꾸기를, 에쿠아도르는 “changes of system components”로 보다 구체적으로 표현해야 한다고 주장하였는데, 이에 대해 저자는 B.3에는 기후시스템 뿐만 아니라 생물 다양성 등도 다루어지기 때문에 원안대로 표현하는 것이 더 적절하다고 설명

- 저자는 회원국의 다양한 의견을 반영하여 B.3 단락을 보다 잘 대표할 수 있도록 첫 문장을 “Some future changes are unavoidable and/or irreversible but can be limited by deep, rapid and sustained greenhouse gas emissions reduction”으로 수정하여 승인됨.

- 독일은 첫 번째 문장의 수정과 일관성을 유지하기 위해 두 번째 문장의 “abrupt” 뒤에 “and irreversible”을 추가할 것을 주장하였고, 저자가 “abrupt and/or irreversible”로 수정하여 승인됨

○ (B.3.1) 장기 전망에서 도출된 불가피한 해수면 상승을 기술함. 일부 회원국이 광범위한 시간 규모에서의 해수면 상승 전망, 낮은 신뢰도에 근거한 해수면 상승 전망 등에 의문을 제기하였으나 전체적으로 큰 이견 없이 승인됨.

- 인도는 두 번째 문장의 “long-term”이 정량화되지 않은 언어라고 수정을 요청하였으나, 저자는 해수면 상승의 본질이 장기 변동성에 있다고 대응함

- 인도는 세 번째 문장의 SSP 시나리오에 따른 2050, 2100년까지의 해수면 상승 전망이 B.1.1처럼 전 지구 온난화에 따라 제시되기를 희망하였으나, 저자는 해수면 상승은 심해 온난화 및 빙상 용해에 따른 느린 반응이기 때문에 온도 상승보다 시나리오에 따른 2050, 2100년 전망값을 제시하는 것이 더 타당하다고 대응하였고, 덴마크 등의 찬성으로 승인됨

- 낮은 신뢰도로 향후 2000년 후의 전망을 제시한 네 번째 문장의 승인과 관련하여 러시아, 인도, 남아공, 에쿠아도르 등은 2,000년 후의 전망을 언급하는 것이 비과학적이며

긴급하지 않아 정책결정자들에게 불필요한 정보라고 주장하였으나 엔티가바부다, 바하마, 그레나다 등 섬나라 국가들은 정책과 직결될 수 있는 중요한 정보이기 때문에 포함되어야 한다고 지지하였고, 미국, 노르웨이 등의 국가가 이에 동조함. 저자는 고기후 자료에 의거한 전망이므로 증거가 제한될 수 밖에 없는 특성이 있다고 설명하였고, 이에 룩셈부르크는 해수면 상승이 반응이 느린 장기 변화이기 때문에 신뢰 수준이 낮을 수 밖에 없는 상황을 수용해야 한다고 부연하고, 의장이 비가역적인 장기 변화를 기술하는 이 단락의 특성에 부합하는 과학적인 문장이라고 설명하여 승인됨

○ **(B.3.2)** 기후시스템의 급격한 변화/비가역적 변화 전망 및 이로 인한 영향과 위험에 대해 기술함. 일부 회원국은 구체적인 온난화 수치의 제시 없이 멸종, 종다양성의 비가역적 손실이 제시되었으며, 그린란드와 서남극의 해수면 상승 전망치가 모호한 점을 지적하였으나 저자와 의장의 적절한 대응으로 원안대로 승인됨.

- 캐나다는 첫 문장의 “when” 이 특정 시기를 암시하니 “if” 로 바꾸는 것이 더 적합하다고 제안하였으나 저자는 “when” 이 명확한 시기를 의미하지 않는다고 부연 설명하였고, 사우디아라비아는 이 문장이 이전 보고서에 없는 내용이라고 문제 제기하였으나 저자는 이 문장이 WG1 TS와 WG2 SPM을 통합한 기술이라고 설명하여 원안대로 승인됨

- 덴마크, 독일, 룩셈부르크 등은 두 번째 문장에 “warming level increases” 를 1.5도 온난화 등으로 정량적으로 명시하여 보다 정책과 직결될 수 있도록 수정하기를 주장하였으나, 저자는 온난화가 심화될수록 비례하여 비가역적 손실이 증가하는 표현을 선호한다고 설명하여 원안대로 승인됨.

- 세 번째 문장에 대해 일부 국가는 “limited evidence” 라는 표현이 SPM에 적절하지 않다고 주장하였으나, 저자는 이 표현이 보고서에서 일관성 있게 사용되었으며 고기후에서 기록된 온난화에 따른 비가역적 변화에 의한 영향을 다루는 B.3에 가장 적절하다고 설명. 러시아는 “sustained warming levels between 2°C and 3°C” 이 언제 발생할지 연도를 명시해야 정책결정자들이 활용할 수 있을것이라고 주장하였으나, 저자는 온난화 이후 오랜 시간 후에 반응하는 빙상 역학의 특성에 근거하여 현재 표현이 가장 적절하다고 설명. 탄자니아는 “several” 이라는 표현이 모호하여 정책결정자들을 설득하기 힘들다고 주장하였으나, 저자는 고기후 증거에 기반하여 2.5~4° C 온난화일 때 5~25m 상승할 것으로 전망되기 때문에 “several” 이라는 표현이 적절하다고 부연 설명함으로써 원안대로 승인됨

○ **(B.3.3)** 발생 가능성은 낮으나 매우 큰 위험을 초래할 수 있는 현상의 장기 전망을 기술함. 일부 문장에 대한 저자와 의장의 부연 설명 후 원안대로 승인됨.

- 일본은 두 번째 문장에서 WG1 SPM에 있는 “5m by 2150” 내용을 삽입할 것을 제안하였고, 저자도 무리가 없다고 수용하였으나 의장이 원안대로 승인함. 일부 국가는 영문 수정을 주장하였으나 저자와 의장은 원안의 승인을 요청하여 승인됨.

- 세 번째 문장에 대해 AMOC이 붕괴되지 않을 것이라는 것이 어떤 함의가 있는 것인지에 대한 문제제기가 있었고, 저자는 온난화가 심화됨에 따라 AMOC이 약화되지만 2100

년 까지 붕괴되지는 않을 것이라는 과학적 사실을 기술하고 있다고 설명함

○ **(B.7 오버슈트: 온난화 수준을 넘어선 후에 다시 내려옴)**

- 1.5°C 온난화 수준을 넘어서는 오버슈트가 발생하면 점진적 회복을 위해 전 세계적인 net-negative CO2 배출량 달성, 유지가 중요함이 제시되었으며, 이로 인해 오버슈트가 없는 경로에 비해 이산화탄소 제거 문제가 커질 수 있음이 강조됨. 또한 오버슈트는 인간과 자연 시스템에 부정적, 비가역적 위험을 미칠 수 있음이 제시됨.

○ **(B.7.1) 오버슈트 없이 2100년까지 승온을 1.5°C로 제한하는 경로의 희소성과 net-negative CO2 배출량을 달성하고 유지할 경우 승온을 점차 줄일 수 있음을 기술함.**

- 회원국은 첫째 문장을 이견없이 승인하였으나, 둘째 문장에 대해서는 global emissions 라는 의미를 명확히 하기 위한 수정(net-negative CO2 emissions globally → net-negative global CO2 emissions), CDR의 역기능 명시, CDR의 co-benefit 명시 등과 같은 의견을 제시함

- 저자는 CDR의 역기능은 B.7.3에 co-benefit는 B.6.4에 기술되었음을 설명한 후 global emissions를 강조하는 수정안을 제시하고 회원국은 이를 승인함

- 세 번째 문장에 대해 일부 회원국은 오버슈트가 기온이 다시 내려오는 개념을 포함하는 지 질의하였으며, 독일, 덴마크 등은 오버슈트가 유발하는 역효과를 조금 더 구체적으로 제시할 것을 제안

- 저자는 오버슈트 return 개념을 포함하는 것임을 설명한 후 피드백 과정을 부연 설명하는 수정안을 제시하고 회원국은 이를 승인함

○ **(B.7.2) 오버슈트가 기후 영향 요인에 영향을 주고 이로 인해 자연과 인간에 대한 위험이 증가하며, 1.5°C를 넘어가는 오버슈트가 지역적으로 비가역적 부정적 영향을 초래할 수 있음을 기술함.**

- 일부 회원국은 간단한 수정안을 제시하였으며, 노르웨이는 polar mountain and coastal ecosystem에 영향을 주는 요인을 명시할 것을 요청

- 저자는 노르웨이의 의견을 반영한 수정안을 제시하고 회원국은 이를 승인

○ **(B.7.3) 오버슈트가 클수록 더 많은 net-negative CO2 배출량이 필요하고, 신속한 넷 제로 CO2 배출량 전환과 함께 메탄과 같은 non-CO2 배출량을 줄이면 긍정적인 효과가 있음을 기술함.**

- 회원국은 첫째 문장을 원안대로 승인함.

**<C. 단기 대응>**

○ **(C.3 시스템 간의 감축과 적응 옵션)** 심도있는 탄소 배출 감소를 달성하고 모두를 위한 생존 가능하고 지속 가능한 미래를 확보하기 위해 모든 부문과 시스템에 걸친 신속하

고 광범위한 전환의 필요하며, 이러한 시스템 전환에는 광범위한 완화 및 적응 옵션의 상당한 확장이 포함됨을 제시함. 완화 및 적응을 위한 실현 가능하고 효과적이며 저렴한 옵션이 이미 사용 가능성이 기술됨.

- 완화 및 적응 옵션에는 에너지 발전 및 사용 관련 탄소 저배출 기술의 배치, 탄소 배출 감소 및 기후 회복력을 위한 도시 시스템 구축, 산림과 생태계 보존 및 복원, 지속 가능 농업 강화 등이 포함됨.

○ **(C.3.1) 전례가 없는 규모의 배출감소와 기후변화 적응 관련 시스템 변화** (인프라 설계 및 접근을 통한 수요 감소 및 변화, 사회 문화 및 행동 변화, 기술 효율성 및 채택 증가, 사회 보호 또는 기타 서비스, 생태계 보호 및 복원)를 기술함.

- 회원국의 제안에 따라 첫째 문장은 의미가 보다 간명하게 전달되는 간단한 수정 (associated with → required to achieve)을 거친 후 승인됨.
- 두 번째 문장에 대해 칠레, 덴마크, 독일 등은 zero-emission technology를 포함해 줄 것을 요청하였으며 사우디아라비아 등은 이에 반대하였으나 저자는 underlying reports를 검토하고 이를 반영하여 수정안을 제시함.
- 세 번째 문장의 내용을 부연하기 위해 low-cost option을 포함해야 한다는 많은 서유럽 국가의 요청에 따라 저자는 C.3의 headline statement 중 관련 내용을 추가하고 회원국이 추가 문장을 승인함.
- 사우디아라비아는 세 번째 문장에 시스템 전환에 중요한 형평성을 포함할 것을 요청하여 저자는 관련 내용이 C.5에서 충분히 기술되었다고 대응하였으나 사우디아라비아가 재차 해당 내용을 포함해 줄 것을 요청.

○ **(C.3.2 에너지 시스템) 넷 제로 CO2를 위한 에너지 시스템** (저탄소 배출 에너지, 재생 에너지 확대) 전환을 기술함.

- 많은 서유럽 국가들이 에너지 시스템 전환에 신재생에너지가 매우 중요하나 첫 문장에 이러한 내용이 명확히 드러나지 않으므로 풍력, 태양 에너지 같이 저렴한(low-cost) 신재생 에너지를 포함해 줄 것을 요청.
- 저자는 이를 받아들여 “저렴한 신재생에너지(풍력, 태양 에너지), 에너지 효율성 개선, 메탄 감소가 방출량을 줄이는데 큰 기여를 한다” 는 내용을 첫 문장 뒤에 추가하는 수정안을 제시함.
- 회원국은 추가 문장을 제외한 나머지 문장을 원안으로 승인함.
- 사우디아라비아, 이란 등은 추가 문장에 대해 부정적 의견을 피력하였으나 많은 서유럽 국가들은 추가 문장을 지지함. 이에 사우디아라비아는 추가 문장 뒤에 SPM3에서 승인된 문구인 배출량 감소에 CDR이 중요하며 국가별 상황에 따라 다르다는 내용도 포함할 것을 요청.
- 저자는 B.6에서 CDR을 충분히 다루어 다시 포함할 필요가 없다고 대응하였으나, 사우디아라비아는 low-cost 관련 내용도 다른 섹션에서 기술된 점을 언급하며 해당 내용의 추가를 반대함.

- **(C.3.3 산업)** 산업시설 전반(생산 프로세스, 배출 방지기술, 자재 효율성 등)과 운송 부문에서 온실가스 배출 감소 시스템을 기술함.
  - 회원국은 첫 번째 문장을 이견 없이 승인함
  - 바이오 연료, 수소 연료, 합성 연료 등을 운송 부문에 활용하면 탄소 배출량을 줄일 수 있다는 내용의 두 번째 문장 관련하여 독일, 스페인, 멕시코 등은 SPM3에도 기술된 저탄소 운송 수단인 전기차를 포함할 것을 요청함.
  - 저자는 subsection title을 Industry and Transport로 변경하고 SPM3의 전기차 관련 내용을 추가한 수정안을 제시함. 이 수정안에는 전기차 운영에 지속적인 투자가 필요하고 scale of deployment가 증가한다는 내용도 포함됨.
  - 사우디아라비아는 전기차 관련 내용을 포함하기 위해 추가된 문장의 분량이 상당하여 원안이 크게 변경되는 점을 언급하고 수정안에 승인에 반대함.
  
- **(C.3.4 도시, 거주지, 인프라)** 배출 감소 및 기후 회복력을 촉진하는 도시 시스템 (기후 변화 영향 고려한 도시계획, 저소득 지역사회 지원, 탄소 흡수 저장을 위한 green/natural/blue 인프라, 기후변화 관련 극한 기후 대응위한 gray 인프라)을 기술함.
  - 두 번째 문장에 대해 벨기에, 네덜란드 등은 에너지와 건축 자재 감소, 재생에너지 관련 기술이 부족함과 sufficiency를 명시적으로 포함할 것을, 일본은 reusable building material의 추가, 탄자니아는 climate services 포함 등을 요청함.
  - 저자는 회원국의 이러한 요청을 모두 반영하는 효과적인 수정안을 제시하고 회원국이 이를 승인함.
  - 넷째 문장에 대해 EU 등은 green/blue 및 grey infrastructure의 복합적 활용이 주는 효과에 의문을 제기하였으며, 일부 국가는 용어의 의미를 질문함.
  - 저자는 green/blue 및 grey infrastructure의 복합적 활용으로 flooding의 위험을 효과적으로 줄일 수 있음을 언급하며 해당 내용을 포함하는 수정안을 제시하고 회원국이 이를 승인함.
  
- **(C.3.5 육지, 해양, 식량, 물)** 지역 전반에 걸쳐 단기적으로 확대 가능한 적응 및 완화 혜택 제공하는 농업, 임업, 및 기타 토지 사용 옵션을 기술함.
  - 회원국은 첫 번째 문장을 이견 없이 승인함.
  - 회원국은 두 번째 문장에 대해 reduced conversion of ecosystem의 포함(네덜란드), small holder에 미치는 trades-off 포함(인도), small holder를 위한 food security 포함(일본), mitigation potential 관련 내용 보완(EU) 등을 요청.
  
- **(C.3.6)** 전지구 규모의 생물 다양성 및 생태계 서비스 복원력의 유지를 통한 기후변화 영향 완화 및 적응 기여를 기술함.
  - 마지막 문장에서 캐나다, 오스트리아 등은 indigenous people 관련 내용을 포함할 것을 요청하고 저자는 해당 내용을 문장으로 추가한 수정안 제시하여 승인됨.
  
- **(C.3.7 보건과 영양)** 인간건강의 혜택 가능한 식품, 기반시설, 사회 보호 및 물정책 관

런 통합 완화 적응 옵션을 기술함.

- 일본은 마지막 문장에서 healthy diet가 mitigation 중요한 점을 언급하며 보완을 요청하였으나 저자는 SPM3를 신중하게 요약하여 작성한 것임을 설명한 후 승인됨.
- (C.3.8 사회, 생계, 경제) 인간 시스템의 취약성과 노출 감소가 가능한 보험, 재정, 조기 경보 시스템을 포함하는 정책 혼합 및 위험 인식 강화 및 행동 변화 가속화 가능하게 하는 기후 문해력 등의 교육을 기술하였으며, 회원국은 이견 없이 승인함

### 3.8.3.2. UNFCCC 지원

유엔기후변화협약 부속기구 제60차 총회(UNFCCC SB 60)에 정부대표단(자문단)으로 참가하여 기상청 주관 의제인 “연구 및 체계적 관측(Research and Systematic Observation, RSO)” 협상 동향 분석 및 대응, 전문 작성 지원 등을 수행하였으며 그 내용은 아래와 같다.

#### 1. 개막식(6.3.(월))

##### 가. 협상그룹별 발언

- AGN(케냐): 기후변화에 따라 심각한 피해가 발생하고 있으므로 NCQG의 목표를 파리협약(1.5도 기온 상승 제한)을 이행할 수 있는 수준으로 확대(scale-up)해야 함을 제안함. 또한 적응, 재생에너지, 손실과 피해 등에 활용할 수 있는 기금 조성 및 지원이 필요함을 강조함.
- 54개국 14억 인구를 대변함을 강조하면서 발언 시작. 기후변화에 따라 전례없는 기후 및 극심한 가뭄과 폭우가 반복되어 주산업인 농업에 심각한 피해 발생하는 등에 따라 연간 GDP가 감소하고 있음.
- 기후변화 대응을 위한 장기적인 투자와 기금이 조성되어야 하며 이를 위해 NCQG의 목표를 파리협약(1.5도 기온 상승 제한)을 이행할 수 있는 수준으로 scale-up해야 함을 제안함.
- 적응, 재생에너지, 손실과 피해 등의 분야에서 실질적인 성과를 내기 위한 기금의 조성 및 활용의 필요성을 강조함
- 특히 손실과 피해와 관련해서는 산티아고 네트워크를 활용하는 것이 효과적임을 제안함

#### 2. 연구 및 체계적 관측(RSO)

##### 가. 1차 Informal Consultation SBSTA 4(6.4.(화), 11:00-12:00 / Addis Abeba)

- (주요 내용) Research Dialogue 주제\* 선정 절차의 투명성과 공개 지연, RSO 결정문 초안(place-holder draft)의 사전 작성과 관련한 당사국 간의 논쟁으로 회의가 공전됨.
- \* Development of new NDCs: transitioning to low-emission and resilient development
- Acting on the outcome of the global stocktake and aligning with 1.5°C pathways

- Synergies and trade-offs with sustainable development
- (EU, 미국, 벨기에, 영국, 호주, 바베이도스 등) Research Dialogue의 주제는 적절하며, RSO 결정문 초안(place-holder draft)의 사전 작성을 제안하거나 동의
- (인도, 중국, 사우디아라비아, 쿠웨이트 등) 사전 제출한 여러 주제 후보 중에서 소수의 주제만 선정된 과정이 투명하지 않음을 강조. 주제 공개가 지연되어 사전 검토 시간이 충분하지 않은 바, RSO 결정문 초안을 사전에 작성하는 것은 부적절함을 언급. 브라질은 emission metrics를 주제로 제출했으나 제외되었음을 언급

나. 2차 Informal Consultation SBSTA 4(6.5.(수), 17:00-18:00 / Addis Abeba)

- (주요 내용) 결론문 초안(draft conclusion)을 검토하였으나 연구 대화에 대한 우호적인 문구의 추가 여부를 두고 당사국 간 이견으로 회의가 공전됨.
  - (칠레, 미국, 노르웨이, 케냐, EU, 영국, 시에라리온, 벨리즈, 보스와나 등) 연구 대화가 유용한 바, 우호적 문구의 추가를 제안
  - (브라질, 벨리즈 등) 기후변화 대응에 대한 GCOS\*의 역할 및 재정 확대를 강조하는 내용으로 수정 제안
    - \* Global Climate Observing System
  - (보스와나) IPCC의 중요성을 기술하는 문구의 추가를 제안
  - (사우디아라비아, 쿠웨이트, 중국 등) 연구 대화에서 선정한 주제는 정치적 논의가 필요한 내용과 과학이 혼재되어 있음을 다시 언급하고, 이에 따라 연구 대화에 대한 우호적인 문구의 추가를 반대. 연구 대화에 대한 우호적인 문구를 추가할 경우 연구 대화의 주제 선정 과정이 투명하지 않았음을 나타내는 문구도 반드시 추가할 것을 제안
  - (사우디아라비아) 결론문 초안에 대한 당사국들의 이견을 고려하여 비공식 노트(Informal Note) 수준에서 검토할 것을 강력히 주장
  - (공동 진행자) 당사국의 검토 의견을 반영하여 결론문 초안을 수정하고 3차 회의에서 비공식 노트 수준에서 재검토

다. 3차 Informal Consultation SBSTA 4(6.7.(금), 10:00-11:00 / Addis Abeba)

- (주요 내용) 결론문 초안을 도출하기 위해 공동 진행자가 작성한 7개 단락\*의 비공식 노트를 검토함. 당사국들은 다양한 검토 의견을 제시함. 일부 당사국은 RD 16 및 연구 수요를 언급한 단락에 대해 상당한 이견을 보임. 공동 진행자는 이견을 좁히기 위해 이견 당사국 간 Inf-Inf 회의를 제안함.
  - \* 문맥, SB 60 개회식 성명 언급, IPCC AR7 언급, RD 16과 연구 수요 언급, SBSTA 연구 수요 언급, 연구 수요를 다루기 위한 후속 활동, RSO 하의 후속 활동
- (첫째 단락: 문맥 기술) 특별한 검토 의견이나 이견 없음
- (둘째 단락: 4개 구성요소로 SB 60 개회식 성명 언급)

- 당사국은 GCOS, IPCC, WMO의 개최식 성명에 대해 언급한 구성요소와 NDC에 대한 NMHS\*의 기여를 기술한 구성요소를 대체로 긍정적으로 평가

\* National Meteorological and Hydrological Services

- (인도, 브라질, 벨리즈, 케냐 등) GCOS에 대한 한정적 재정 지원을 우려한 구성요소와 지속적 재정 지원을 강조한 구성요소의 병합 제안
- (스위스, 러시아, 시에라리온 등) 4개 구성요소의 원문 지지

○ (셋째 단락: 2개 구성요소로 IPCC AR7 언급)

- 당사국은 AR7을 환영하는 구성요소와 결정문\*에 근거하여 IPCC에 임무를 요청하는 구성요소를 대체로 긍정적으로 평가

\* decision 20/CMA.5 paragraph 6

- (러시아, 캐나다, 필리핀, 세인트키츠네비스, EU, 스위스, 영국, 케냐 등) 원문 유지 또는 2개 구성요소 병합 모두 무방
- (사우디아라비아, 쿠웨이트 등) 첫째 구성요소 지지하나 둘째 구성요소 삭제 주장
- (미국) 둘째 구성요소는 기존 결정문에 근거한 것이므로 유지 주장

○ (넷째 단락: 5개 구성요소로 RD 16과 연구 수요 언급)

- 주제선정 절차에 대한 우려 및 당사국이 주도하는 절차를 강조한 구성요소, 당사국과 옵저버 그룹에서 제출한 12개 주제를 RD 16에서 충분히 고려하지 않아 RD 17에서 고려할 것이라는 구성요소에 대해 상당한 이견

- (중국, 사우디아라비아, 쿠웨이트 등) 주제선정 절차를 부정적으로 평가한 구성요소, RD 16의 미반영 주제를 RD 17에서 고려한다는 구성요소 원문 지지

- (미국, 스위스, 영국, 호주, 그레나다 등) 제출된 주제는 RD 16 주제발표에서 대부분 언급되었음을 강조하며, 해당 구성요소를 보다 긍정적으로 수정할 것을 제안

- (사우디아라비아, 중국, 쿠웨이트, 인도 등) 선정된 주제\*로 RD 16을 준비한 의장과 사무국에 SBSTA의 사의를 표명한 구성요소와 RD의 준비에 대한 사의 또는 주목을 표명한 2개 구성요소를 모두 삭제할 것을 주장

\* Development of new NDCs: transitioning to low-emission and resilient development

- Acting on the outcome of the global stocktake and aligning with 1.5°C pathways

- Synergies and trade-offs with sustainable development

- (스위스, 시에라리온, 영국, 케냐, 호주, 미국, 그레나다 등) SBSTA가 의장과 사무국에 사의를 표명한 구성요소의 유지를 적극 주장

- (세인트키츠네비스, 브라질, 시에라리온 등) RD 준비에 대한 사의 또는 주목을 표명한 3개 구성요소를 1개로 병합하는 의견 제시

○ (다섯째 단락: 2개 구성요소로 SBSTA 연구 수요 언급)

- Emission metrics를 포함한 구성요소와 NDC 용어를 사용한 구성 요소에 대해 당사국 간 이견

- (미국, 스위스 등) SBSTA 연구 수요를 언급한 다섯째 단락과 연구 수요를 다루기 위

한 후속 활동을 기술한 여섯째 단락의 병합 제시

- (여섯째 단락: 3개 구성요소로 연구 수요를 다루기 위한 후속 활동 언급)
  - 당사국은 SBSTA가 과학계에 포용성과 지역 규모 연구 강화를 포함한 기후관련 연구를 촉구한 구성 요소를 대체로 지지하나, 야심찬 NDC 상향 등의 용어 사용에 대해서 이견
  - 사우디아라비아는 연구 수요에 대한 과학계 반응을 SBSTA 62에서 보고하기 위한 방법을 SBSTA 의장이 제시할 것을 요청하는 구성요소 반대

○ (향후 일정)

- 이견 당사국 간 Inf-Inf 회의 / 6.7.(금), 16:00-18:00 / H102
- 4차 Informal Consultation SBSTA 4 / 6.8.(토), 11:00-12:00 / AH Upper Conference Room)

라. 4차 Informal Consultation SBSTA 4(6.8.(토), 11:00-12:00 / AH Upper Conference Room)

- (비공식 노트 수정본 보고) 1차 Inf-Inf 회의에서 4-6 단락을 연계하여 일괄 수정하는 것을 전제로 넷째 단락까지 수정된 비공식 노트 수정본을 보고함.

- (둘째 단락 주요 수정 내용) GCOS에 대한 한정적 재정 지원을 우려한 구성요소와 지속적 재정 지원을 강조한 구성요소 삭제, NMHS의 기능 및 NDC에 대한 NMHS의 기여를 기술한 구성요소를 NMHS의 기능만 기술
- (셋째 단락 주요 수정 내용) 결정문에 근거하여 IPCC에 임무를 요청하는 구성요소 괄호 처리
- (넷째 단락 주요 수정 내용) 선정된 주제로 RD 16을 준비한 의장과 사무국에 SBSTA의 사의를 표명한 구성요소를 모두 삭제하고, RD 16의 link만 주석으로 추가하고 주제선정 절차 등에 대한 부정적 평가를 상당히 완화하여 하나의 구성요소로 재작성

- (다섯째 단락 검토) 당사국은 SBSTA의 일반적 연구 수요, 최신 연구 결과에 기반하여 NDC 및 1.5°C 기온 상승 제한과 연계한 연구 수요를 각각 언급한 구성요소를 검토함

- (미국, 스위스 등) 두 개의 구성요소를 병합하면서 NDC와 1.5°C 기온 상승 제한을 유지할 것을 주장
- (브라질, 러시아 등) 두 개의 구성요소 병합에 동의하나 NDC와 1.5°C 기온 상승 제한은 삭제 주장
- (사우디아라비아, 중국 등) 두 개의 구성요소 병합에 반대하며, NDC와 1.5°C 기온 상승 제한은 반드시 삭제 주장. 기온 상승 제한의 경우 파리 협정에서 언급된 것처럼 1.5°C와 2°C 기온 상승 제한을 모두 언급하는 대안 제시

○ (향후 일정)

- 이견 당사국 간 2차 Inf-Inf Consultation SBSTA 4 / 6.8.(토), 15:00-17:00 / Tokio
- 5차 Informal Consultation SBSTA 4 / 6.10.(월), 12:00-13:00 / Addis Abeba)

마. 5차 Informal Consultation SBSTA 4(6.10.(월), 12:00-13:00 / Addis Abeba)

- (주요 내용) 2차 Inf-Inf 회의에서 검토하지 않은 여섯째 단락을 집중 논의하였으나 당사국 간 의견 수렴이 이루어지지 않아 공동 진행자는 이견 당사국 간 3차 Inf-Inf 회의를 제안함.
  - (볼리비아, 중국 등) 다섯째 단락 검토가 여섯째 단락 검토에 선행되어야 함을 반복 주장하고, 1.5°C 기온 상승 제한과 NDC가 포함된 구성요소에 반대
  - (캐나다, 미국, EU, 네팔 등) 여섯 번째 단락의 검토를 지지하며, 3개 구성요소를 간단하게 수정하거나 대체적으로 유지할 것을 제안
- (향후 일정) 2차 Inf-Inf 회의에서 다섯째 단락에 대해 취합된 의견, 5차 Inf 회의에서 여섯째 단락에 대해 취합된 의견, 금일 15시까지 서면 제출된 추가 의견을 토대로 이견 당사국 간 3차 Inf-Inf에서 의견을 수렴하여 명일 6차 Inf 회의에서 협의.
  - 이견 당사국 간 3차 Inf-Inf Consultation SBSTA 4 / 6.10.(월), 15:00-18:00 / 미정
  - 6차 Informal Consultation SBSTA 4 / 6.11.(화), 10:00-11:00 / Santiago de Chile

바. 6차 Informal Consultation SBSTA 4(6.11.(화), 10:00-11:00 / Santiago de Chilea)

- (비공식 노트 2차 수정본 공유) 3차 Inf-Inf 회의에서 수정한 비공식 노트 2차 수정본을 공유함.
  - (둘째 단락의 주요 2차 수정 내용) SBSTA는 GCOS, IPCC, WCRP의 개회식 성명을 “감사” 하며 주목하는 것으로 기술, GCOS를 포함하여 체계적 관측과 자료 가용성이 연구에 중요하므로 연속성과 지속가능성을 보장하는 방향으로 기술, GCOS에 대한 한 정적 재정 지원을 우려한 구성요소 복구
  - (셋째 단락의 주요 2차 수정 내용) 결정문에 근거하여 IPCC에 임무를 요청하는 구성요소 복구
  - (넷째 단락의 주요 2차 수정 내용) 주제 선정 절차 등의 개선과 RD 16을 주목하는 내용을 별도의 구성요소로 기술, SBSTA는 RD 16을 환영하고 의장과 사무국은 결정문\*을 상기하여 RD 16 준비에 당사국이 제출한 주제를 고려할 것을 권장하는 구성요소 추가
    - \* decisions 9/CP.11과 16/CP.17
  - (다섯째 단락의 주요 2차 수정 내용) 지금까지 논의한 연구 수요를 △ 시나리오, △ 적응/손실과 피해, △ 지역 레벨, △ 배출량 매트릭스/가스, △ 자원, △ 원인규명의 소주제로 분류하여 제시
  - (여섯째 단락의 주요 2차 수정 내용) SBSTA가 당사국과 과학계에 포용성과 지역 규모 연구 역량 강화를 포함한 기후 연구수요를 충족하고 연구격차를 해소하는 행동에 나설 것을 권장하면서 개도국을 위한 이행 지원과 IPCC의 지속적 노력을 권장하는 내용을 포함 또는 포함하지 않은 2개 구성요소 제안. SBSTA 의장의 후속 조치를 △ 연구

수요에 대한 과학계 반응을 당사국에 어떻게 알릴지에 대한 제안서를 SBSTA 62에서 제시하고, △ 차기 RD 개발에 기존 RD에서 도출된 연구 수요를 어떻게 감안할 것인지에 대한 당사국과의 소통 방법을 고려하는 것으로 변경. 또한 사무국에서 당사국이 기존에 RD에 제출했던 주제와 기존 RD 주제 및 발표에 대해 분석할 것을 추가

○ (주요 내용) 비공식 노트 2차 수정본을 토대로 3-6 단락을 다시 논의하였으나 당사국 간 이견으로 회의가 공전됨.

- (주요 쟁점 1: 셋째 단락) 결정문에 근거하여 IPCC에 임무를 요청하는 구성요소에 대해 미국, 캐나다, EU 등은 지지하나 사우디아라비아, 중국 등은 반대
- (주요 쟁점 2: 넷째 단락) SBSTA는 RD 16을 환영하고 의장과 사무국은 결정문을 상기 하여 RD 16 준비에 당사국이 제출한 주제를 고려할 것을 권장하는 구성 요소에 대해 미국, 캐나다, EU 등은 지지하나 사우디아라비아 등은 반대
- (주요 쟁점 3: 다섯째 단락) 연구 수요 중 시나리오 소주제에서 1.5°C 기온 상승 제한과 NDC를 포함하여 기술하는 것에 대해 미국, EU 등은 지지하나 사우디아라비아, 중국 등은 반대
- (주요 쟁점 4: 다섯째 단락) 연구 수요 중 배출량 매트릭스/가스 소주제에서 메탄 이외의 Non-CO2 온실 가스를 기술한 구성요소에 대해 미국 지지, 사우디아라비아, 중국은 삭제 주장
- (주요 쟁점 5: 다섯째 단락) 연구 수요 중 재원 소주제를 포함하는 것에 대해 칠레 지지, 사우디아라비아 반대
- (주요 쟁점 6: 여섯째 단락) 의장의 후속 조치를 기술한 구성 요소에 대해 사우디아라비아, 중국 등은 전체 삭제 주장

○ 관찰 및 평가

- 연구 대화의 주제 선정 배경과 자료 공유 지연 등에 대한 문제 제기, 연구 수요에 1.5°C 기온 상승 제한과 NDC의 포함 여부, 메탄 이외의 Non-CO2 온실 가스 포함 여부, 재원 포함 여부 등에 대한 이견, IPCC에 임무를 요청하는 구성요소의 포함 여부에 대한 이견 등으로 RSO 의제의 결론문 초안에 RD/IPCC 언급, 연구 수요 언급 등을 장담할 수 없는 상황으로 관찰됨.

○ (향후 일정)

- 7차 Informal Consultation SBSTA 4 / 6.12.(수), 12:00-13:00 / Santiago de Chile)

사. 7차 Informal Consultation SBSTA 4(6.12.(수), 12:00-13:00 / Santiago de Chilea)

○ (결론문 초안 수정본 공유) 연구 대화 및 IPCC 언급, 연구 수요 언급 등에 대한 당사국 간 이견이 커, 공동 진행자는 해당 내용을 제외하고 대체적으로 의견이 수렴된 내용 위주로 결론문 초안을 수정하여 공유함.

- (첫째 문장) RSO 의제의 중요성에 주목하는 원본의 첫째 문장과 동일
- (둘째 문장) 원본의 둘째 문장을 GCOS, IPCC, WMO의 개회식 성명을 “주목” 하는

것에서 “감사하며 주목” 하는 것으로 수정

- (셋째 문장) GCOS를 포함하여 체계적 관측과 자료 가용성이 연구에 중요하므로 연속성과 지속가능성 보장의 필요성을 강조하는 내용 추가
  - (넷째 문장) 실행가능하고 신뢰할 수 있는 정보를 적시에 제공하는 NMHS 기능에 감사하는 내용 추가
  - (다섯째 문장) AR7의 시작을 환영하는 원본의 셋째 문장과 동일
  - (여섯째 문장) 당사국에 ‘25년 6월에 SBSTA 62에서 진행할 RD 17 주제를 포털\*을 통해 ‘25년 3월 14일까지 제출할 것을 요청하는 원본의 다섯째 문장과 동일
- \* <https://www4.unfccc.int/sites/submissionsstaging/Pages/Home.aspx>
- (기타 1) 당사국과 과학계에 포용성과 지역 규모 연구 역량 강화를 포함한 기후 연구 수요를 충족하고 연구격차를 해소하는 행동에 나설 것을 권장하는 원본 문장 삭제
  - (기타 2) △ RD 16, △ 연구 수요, △ 후속 활동을 다섯째 문장 뒤에 임시 편집용 (placeholder) 주제로 제시

○ (주요 내용) 결론문 초안 수정본을 토대로 4-6 문장을 중점 논의하였으나 당사국 간 의견 수렴이 이루어지지 않아 공동 진행자는 이견 당사국 간 4차 Inf-Inf 회의를 제안함.

- (러시아, 시에라리온, 영국, EU, 미국, 캐나다 등) 초안 수정본의 내용 지지, 임시 편집용 주제 3개에 대해 논의 희망
- (칠레, EU, 케냐, 세인트키츠네비스, 브라질 등) 일부 연구 수요 제안
- (사우디아라비아, 쿠웨이트, 중국, 인도 등) 다섯째와 여섯째 문장에 반대하며, 특히 의견 수렴이 이루어지지 않은 임시 편집용 주제를 결론문 초안에 포함하여 논의할 수 없음을 주장. 또한 사우디아라비아는 둘째 문장을 “감사하며 주목” 하는 것으로 수정하는 것에 반대
- 공동 진행자는 임시 편집용 주제 관련 이견 당사국 간 4차 Inf-Inf 회의 제안
- (사우디아라비아, 쿠웨이트, 중국 등) Inf-Inf 회의에서 임시 편집용 주제의 내용에 합의하면 Informal 회의에 보고하고, 합의하지 못하는 경우 관련 내용의 삭제를 제안

○ (향후 일정)

- 4차 Inf-Inf Consultation SBSTA 4 / 6.12.(수), 13:00-14:00 / Geneva
- 8차 Informal Consultation SBSTA 4 / 6.12.(수), 17:00-18:00 / Addis Abeba)

아. 8차 Informal Consultation SBSTA 4(6.12.(수), 17:00-18:00 / Addis Abeba)

○ (주요 내용) 4차 Inf-Inf 회의에서 유의미한 의견 수렴이 이루어지지 않은 바, 결론문 초안 수정본의 보완 없이 검토를 속개함. 당사국은 기존 입장을 완강히 고수하며 의견을 개진함에 따라 RSO 의제의 결론문 초안을 합의하지 못함. 공동 진행자는 당사국이 개진한 의견을 모두 반영한 합의되지 않은 결론문 초안을 SBSTA 의장에게 보고할 것임을 언급하고 회의를 종료함.

- (EU, 영국, 미국, 호주, 세인트키츠네비스 등) IPCC에 임무를 요청하는 Decision

## 20/CMA.5의 문구\* 추가 제안

\* 6. Invites the Intergovernmental Panel on Climate Change to continue providing relevant information to Parties on the scientific, technical and socioeconomic aspects of climate change and to take into account, in determining its future products and assessment cycles, work under the Convention and the Paris Agreement

- (사우디아라비아, 쿠웨이트, 중국, 인도 등) △ IPCC의 독립성과 정치적 중립성을 인정하는 문구 추가, △ 당사국 주도의 프로세스, 투명성, 포괄성 등 연구 대화 개선 필요 문구 추가 제안
- (세인트키츠네비스) △ RD 지속을 환영하고, RD 16을 감사하며 주목하는 문구 추가, △ 연구 및 연구 역량 강화 수요를 인정하는 문구 추가, △ 당사국과 과학계에 포용성과 지역 규모 연구 역량 강화를 포함한 기후 연구수요를 충족하고 연구격차를 해소하는 행동에 나설 것을 권장하는 문구 추가 제안

### ○ 관찰 및 평가

- 당사국이 비공식 노트 도출에서 합의하지 못한 의견을 결론문 초안 도출에도 반복하여 개진함에 따라 RSO 의제의 결론문 초안 합의가 끝내 불발

## 3. 연구 대화

### 가. Research Dialogue (SBSTA 4)(6.4.(화), 14:00-16:00 / Plenary)

○ (개회) SBSTA 의장이 주제 선정 이유를 설명하고 당사국의 양해를 구함.

- 당사국과 옵저버 그룹에서 제출한 12개 주제 후보 중 기존 Research Dialogue 주제와 중복을 피하고 다른 프로그램과의 연계성을 고려하여 선정. 내년에는 다수의 주제를 다룰 예정

○ (주제 발표) IPCC의 기여 방향 및 이와 연계된 주요 연구 분야, SIDS(세인트키츠네비스) 입장의 연구 수요를 제시함.

- (기여 방향) 목표상향형 NDC(ambitious NDC)를 위한 특히 지역 규모의 연구 성과 분석, 개도국의 연구 및 역량 강화 수요 분석을 기초로 설정하고 Emission pathways/overshoot, Acceleration of effort, Adaptation and resilience, Synergies and trade-offs를 핵심 주제로 제시
- (주요 연구 분야) 1.5°C 기온 상승 제한 경로 이탈하고 있음을 강조하면서 기온 상승이 1.5°C-2°C에 있을 경우의 잠재적 영향 설명하고 새로운 기후 연구 분야 제시 (Social sciences and humanities, Law, Finance and economy, Communication, Art, Integration of social and natural sciences, Storylines and narratives of the future)
- (연구 수요) 감축 분야는 1.5°C 기온 상승 제한과 연계를 위한 새로운 1.5°C 기온 상승 제한 시나리오, 적응 분야는 지역적 적응을 위한 보다 정량적인 지역 정보, 그 밖

에 손실과 피해에 대한 개선된 정량적 관측 및 기후변화 전망, 지속가능 개발과 연계된 공정 전환과 synergy에 대한 연구, 지역적 이행을 위한 재원을 포함한 지원 수요 등 제시

○ (국가별 발언)

- (사우디아라비아) 제시된 연구 분야는 정치적 논의가 필요한 내용(GST, NDC 등)과 과학이 혼재하여 IPCC의 기여로 적절하지 않음. 개도국 현황을 고려한 연구 분야 고려 필요
- (칠레, 사우디아라비아, 인도, 브라질, 중국 등) Equity, SDGs, 감축과 SDGs 사이의 trade-off 등의 연구 분야 포함 요청
- (네팔) 고산 지역 생태계의 연구 분야 포함 요청
- (독일, 바베이도스, 영국, 미국, 독일, 일본, 룩셈부르크, 아일랜드 등) IPCC는 GST를 위해 가능한 최고의 과학(best available science)을 제공하고 있음을 언급하며 IPCC가 제시한 연구 분야에 대체로 동의
- (미국, 영국, 룩셈부르크, 시에라리온 등) global mitigation pathways 뿐 아니라 regional mitigation pathways 필요
- (일본 등) 1.5°C 기온 상승 제한과 연계된 연구 분야 고려 필요
- (영국) 1.5°C 기온 상승 제한과 연계된 health, well-being의 연구 분야 포함 필요
- (시에라리온) 비가역적인 손실과 피해와 관련된 연구 분야 포함 필요
- (그레나다, 바베이도스 등) 1.5°C 기온 상승 제한과 연계된 시나리오 정보 필요

○ (의장단 대응)

- IPCC와 GST의 연계는 요구받은 것이며, 당사국들이 제시한 연구 수요는 AR7 스코핑 회의( '24년 12월, 말레이시아)에서 적극적으로 고려할 것임을 언급. 또한 emissions metrics는 IPCC 결정 사항이 아니라 UNFCCC 결정 사항임을 언급
- synergy and trade-off 관련하여 1.5°C 특별보고서에 synergy 효과가 더 우세하다고 기술되었음을 언급.

4. IPCC 사이드 이벤트

가. Scientific foundations of AR7 products & plans for enhancing engagement with IPCC focal points(6.6.(목), 10:15-11:30 / Bonn)

○ (AR7 주기의 비전과 계획)

- AR7 주기의 주제는 포용성(Inclusivity), 학제간 연구(Interdisciplinarity), 정책 적합성(Policy relevance)이며, UNFCCC의 요청\*에 부응
  - \* GST를 위한 적절한 정보의 적시 제공, '1994 Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptation' 개정
- 주요 산출물은 평가보고서\*와 종합보고서, 특별보고서\*\*, 1994 Technical Guidelines

개정본, 방법론보고서 2종\*\*\*

\* WGI: The Physical Science Basis

WGII: Impacts, Adaptation and Vulnerability

WGIII: Mitigation of Climate Change

\*\* Special Report on Climate Change and Cities

\*\*\* △ Methodology Report on Carbon Dioxide Removal Technologies, Carbon Capture Utilization and Storage, △ Methodology Report on Short-lived Climate Forcer

○ (기후변화와 도시 특별보고서)

- 스코핑 미팅('24년 4월)에서 도출된 개요를 제61차 IPCC 총회('24년 7월)에서 승인 추진
- 그 후 저자 추천 및 선정, 초안/수정안/최종안 및 SPM 등의 작성 및 검토를 거쳐 '27년 초 발간 예정

○ (IPCC Focal Point의 참여 강화를 위한 주요 정보)

- AR7 주기는 견고하고, 포괄적이며, 정확하고, 포용적으로 추진하며, 다양한 문헌과 지식 사용
- 보고서는 10 단계\* 과정을 거쳐 발간
  - \* 스코핑 (Scoping) → 개요 승인(Approval of Outline) → 저자 추천(Nomination of Authors) → 저자 선정(Selection of Authors) → 1차 초안 전문가 검토(Expert Review First Order Draft) → 2차 초안 정부 및 전문가 검토(Government and Expert Review Second Order Draft) → 최종안과 SPM(Final Draft Report and SPM) → SPM 최종안 정부 검토(Government Review of Final Draft SPM) → 보고서 승인 및 채택(Approval and Acceptance of Report) → 보고서 발간(Publication of Report)
- '24년 Focal Point 일정은 사이드 이벤트(SB60, 6월) → 브리핑(IPCC-61, 7월) → 웨비나(8월) → 기타 활동(COP29, 11월)

○ (1994 Technical Guidelines 개정)

- 구체적인 일정은 아직 수립되지 않았으나, '94년 당시 반영할 수 없었던 부분\* 보완
  - \* △ 기후모델과 시나리오의 진전, △ 낮은 빈도의 변형적 적응, △ 기존 대응 부족, △ 전 세계적으로 적용할 수 있는 적응 지표 부족, △ 성공적 적응에 동반된 오적응, △ 관찰과 평가, △ 잔여 영향, 위험, 손실과 피해 등의 적합성 증가

○ (탄소 제거 기술 및 탄소 포집/활용/저장 방법론보고서)

- 전문가 회의를 개최('24.7.1.-3., Vienna, Austria)하여 △ 기존 IPCC 가이드라인의 공백, 갱신 및 보완 사항, △ 방법론을 구체적으로 명시할 수 있는 역량, △ 방법론 개발을 위해 우선적으로 다루어야 할 이슈나 분야, 지식 공백 등을 파악하고 '24년 말로 예정된 스코핑 회의에 전달 예정
- 보고서는 통상적인 10 단계 과정을 거쳐 발간

○ (단기체류 기후변화 유발물질 방법론보고서)

- 스코핑 회의('24년 2월)에서 도출된 보고서 제목, 형식, 개요 등을 제61차 IPCC 총회에  
서 승인 추진
- 제61차 총회 이후 저자 및 검토 저자 추천 요청 예정

## 4. 요약 및 결론

6단계(2022~2024) 사업에서는 크게 다음의 다섯 가지 주제로 분류하여 1) APCC 기후예측 시스템의 운영 및 예측정보 제공, 2) APCC 기후예측시스템 개선, 3) 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현, 4) MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축, 5) 기후분야 국제협력 및 정책지원에 대한 과제를 수행하였고 각 주제별 주요내용을 정리하면 다음과 같다.

### 4.1. APCC 기후예측시스템의 운영 및 예측정보 제공

APCC는 11개국 15개 기상·기후 예측기관의 협조를 바탕으로 각 기관별 기후모델 예측자료를 안정적으로 수집하여 AFS 예측 시스템을 통해 저/고해상도의 결정론적 및 확률론적 MME 계절예측 정보를 안정적이고 체계적으로 생산하였다. 본 계절예측 정보는 2022-2024년 기간 APCC 누리집 및 자료서비스 플랫폼을 통해 매일 15일경 총 36회 제공되었으며, MME 계절예측 정보의 예측 수준을 진단하고 평가하기 위해 예측 정확도를 분석한 결과, 2013년 대비 2024년의 MME 예측 정확도(hindcast ACC)는 전구 기온 16.33%, 전구 강수 22.02% 향상되었다.

2022년에 구축된 동아시아 지역 확률계절예측시스템의 안정적 운영을 통해 2022-2024년 기간 동안 총 36회의 동아시아 맞춤형 확률 예측 정보를 생산 및 제공하였으며, 해당 기간 기후인자별 동아시아 강수와의 관련성을 잘 재현하는 모델들을 선별한 결과, APCC, BoM, CMCC, JMA, UKMO의 모델이 공통적으로 선별 빈도가 높았으며, 해당 모델들이 MME에 참여함에 따라 동아시아 확률 예측 정보에 긍정적 영향을 미칠 것으로 기대한다.

BSISO 계절내예측시스템은 통상적으로 매년 5월부터 10월까지 운영이 되지만 2023년의 경우 BSISO의 입력자료가 되는 NOAA OLR의 자료 제공 중단 문제로 부득이하게 9월 중순 현업을 조기 종료 하였다. 2024년 OLR 입력자료를 CPC blended 로 변경 완료하여 5월부터 10월까지 안정적으로 현업을 운영 및 완료하였다.

인도네시아를 대상으로 운영중이던 산불예측시스템의 말레이시아 지역확장에 따라 홈페이지를 개편하여 말레이시아와 인도네시아의 산불예측 정보를 함께 서비스 중이다. 인도네시아는 매년 4월에서 7월까지, 말레이시아는 10월에서 1월까지 각 4개월 동안 월 1회 매일 20일경에 APCC의 FHEWS 홈페이지를 통해 정보가 제공된다.

### 4.2. APCC 기후예측시스템 개선

APCC MME 예측정보의 활용성을 증대를 위해 내·외부적 노력을 통해 2022년 4월부터 예측정보 제공 시기를 기존 매일 20일에서 5일 앞당겨 매일 15일에 예측정보를 발표하기 시작하였다. 또한 MME 계절예측시스템 참여 모델 개선 및 변경에 따른 후속 조치를 통해 MME 예측성 향상 및 참여모델 다양성 향상을 도모하였다.

기후전망 개선을 위해 타 기관 기후전망 조사 및 구독자 만족도 조사 결과를 종합하여 그림 및 설명을 병치하고 확률별 텍스트 색상 지정을 통해 가독성을 높였으며, 2023년 11월부터 새로운 디자인의 기후전망 배포를 시작하였다. 홈페이지와 기후전망을 통해 매일 제공되는

ENSO 경보는 2022년 4월부터 그 기준을 변경하여 제공하고 있으며 ENSO 경보를 발표하는 월(issued month)의 관측 해수면 온도를 최대한 반영하기 위해 매월 2회(15일 및 익월 1일) 발표하고 있다.

2021년 고해상도 MME 예측시스템 구축을 시작으로 2022년 9월 고해상도 MME 예측정보가 정식으로 서비스됨에 따라 2023년 고해상도 MME 검증시스템을 단계적으로 구축하여 ERA-5, MERRA2, CPC 강수 등의 고해상도 관측자료를 활용한 고해상도 검증 정보를 매월 생산함에 따라 12회의 고해상도 검증시스템의 시험운영을 안정적으로 완료하였다. 시험운영 결과는 별도의 검증 일지를 통해 정리하였으며, 고해상도 검증 정보와 저해상도 검증 정보를 상호 비교한 결과 고해상도 MME forecast의 경우 격자가 상세해짐에 따라 기온과 강수의 예측 정확도가 더 높아진 것을 확인할 수 있었고, 강수의 경우 MERRA2와 CPC보다 ERA-5 재분석자료를 활용한 검증 정보가 더 높은 예측 정확도 수치를 보임에 따라 향후 고해상도 검증 정보의 현업 운영 추진 방안을 수립할 때 참고자료로 활용될 예정이다.

APCC MME hindcast 기간은 1991-2010년의 20년으로써 WMO에서 권고하는 최소 기후평년 기간(24년)을 만족하지 못하고, 2010년 이후의 최근 기후 특성을 반영하지 못한다는 지적에 제기됨에 따라 2023년, MME 참여모델의 hindcast 기간 현황 분석을 통해 두 가지 지적을 만족시키면서 참여모델의 결측 처리를 최소화할 수 있는 두 기간(1991-2014년, 1993-2016년)에 대하여 기존 MME를 기준으로 4가지 민감도 분석을 수행하였으며, 그 결과 1993-2016년 hindcast 기간 확장 방안이 효용성 및 현업 효율성이 비교적 높게 나타나 해당 방안을 MME에 적용하기 위해 기존 운영 중인 MME 예측 시스템(Automated Forecast System, AFS)을 활용하여 프로세스의 개선 및 변경을 수행하였다. 개선된 AFS 시스템을 활용하여 1993-2016년 hindcast 기간의 MME 예측자료를 시험 생산하였으며, 시험 생산된 예측자료를 분석한 결과 예측값 자체의 오차(RMSE)에서 효용성이 나타났다. 본 결과를 바탕으로 hindcast 기간 확장 시기 등 현업 적용 계획 수립을 수행하고자 한다. 이와 관련하여 APCC MME 참여모델 중의 하나인 APCC SCoPS 기후모델의 hindcast 기간을 1982~2013년에서 1982~2016년까지 연장하여 생산을 완료하였다.

BSISO 계절내예측시스템은 2022년 그래픽 일원화를 통해 콘텐츠 가시성을 높이고, 통합시스템 및 저장 공간 체계 개선으로 현업 운영의 효율성을 높였다. 2023년에는 1개월 한반도 예측에 활용하는 등 계절내 예보에서의 BSISO의 실질적인 활용성을 높이고자 기상청 및 APCC 내부의 수요를 반영하여 한반도를 포함한 영역 확대, BSISO 영향장 제공 기간 확대, 예측 조기 제공을 수행하였다. 그리고 2024년에는 추가로 BSISO 예측 위상도 조기 제공을 위해 계산 시간이 매우 오래 걸리는 위상도 그래픽 코드를 재정비하여 그래픽 계산 시간을 대폭 감소하였다.

산불예측시스템의 입력자료개선은 개별모델과 관측자료를 대상으로 이루어졌으며, 개별모델은 기존 APCC에서 제공중이던 2.5° 에서 1.0° 로 고해상도 개별모델을 활용할 수 있도록 적용하였다. 관측자료는 Aphrodite를 CHIRPS로 변경 적용하여 2007년까지 수집되었던 강수 관측자료를 최근까지 활용할 수 있도록 변경하였고 이에따라 산불위험등급이 개선되었다. 말레이시아를 대상으로 강수패턴분석을 통한 건기 정의 및 지역자료 생산을 통해 산불예측시스템을 추가개발하여 홈페이지를 통해 서비스를 제공하도록 하였다.

실시간 예측기간 동아시아 MME 기온 예측은 대부분 평년 이상을 예측하고 있으나 실제 관측 자료를 보면 한파가 나타나기도 하는 등 동아시아의 기온 변동성이 크게 나타난다. 이에 기온 예측에 대한 선형추세 후보정을 하고, 보정 프로그램을 현업에서 원활하게 활용하기 위해 자동화 프로그램을 구축하였다. 보정을 통해 기온예측의 장기 경향성이 관측과 유사하게 나타났으며, 월별 ACC 스킵 또한 대체로 향상되었다. 따라서 동아시아 MME 기온 예측에서 나타나는 과도한 온난화 문제를 해결하여 예측력을 향상시킬 수 있을 것이라 기대한다.

### 4.3. 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현

MME 계절예측 정보 등 APCC에서 제공 중인 기후정보를 보다 이해하기 쉽고 편리하게 활용할 수 있도록 동적 기후정보 웹 콘텐츠 구현하여 정적 웹 콘텐츠와 함께 신규 홈페이지를 통해 2024년 2월부터 서비스를 제공하고 있다. 또한 2024년 10월부터 기후평년기간(1981~2010, 1991~2020)에 따른 기후평년값을 동적 콘텐츠로 추가하여 제공하고 있다. 이러한 사용자 편의성 기반의 기후정보 제공을 통해 APCC MME 계절예측 및 관련 기후정보의 활용성이 높아질 것으로 기대한다.

### 4.4. MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축

APCC 이음새없는 예측시스템개발을 위한 기반구축을 위해 S2S MME 예측시스템 및 센터 내 연구에 대한 현황 조사를 바탕으로 종합적인 리뷰를 통해 활용 가능성을 파악하고, APCC S2S 예측에 대한 중/장기 계획을 수립하였다. 계절내예측자료 자체수집을 위해 제5차 APCC 자료제공회의를 통해 S2S 개별모델 예측자료 확보 가능성을 타진하여, 일부 모델에 대해서는 실시간 예측정보 수집 및 APCC 계절예측 MME 시스템과 일관성을 고려한 범용적이고 효율적인 운영 시스템(Pilot System)을 개발하였다. 이와 더불어, S2S 프로젝트 계절내예측자료를 사용하여 계절내예측 기반연구를 수행하였으며, 계절내예측 MME 현업운영을 위한 다양한 민감도 실험 및 MME 효율성 평가를 통해 계절내예측에서의 MME 활용성 등을 확인하였다. 또한, 계절내예측자료의 활용성 증대를 위해 다양한 시간규모에서의 예측력 비교평가를 통해 3-4주 평균, 1-4주 평균 예측자료에 대한 유효성 및 활용성 가능성을 확인하였다. 마지막으로, APCC 자체 모델(SCoPS)의 계절내예측 시범 생산 및 S2S 프로젝트 모델과의 상대적인 예측력 평가를 통해 SCoPS 모델의 계절내예측 활용 가능성 및 개선 방향을 수립하였다. 이러한 노력을 바탕으로 7 단계에서는 SCoPS 모델 개선을 포함하여 계절내예측 MME 현업운영을 위한 핵심 기술 개발 및 계절내-계절 예측정보 통합 활용 기반을 구축하고자 한다 (Figure 4.1).

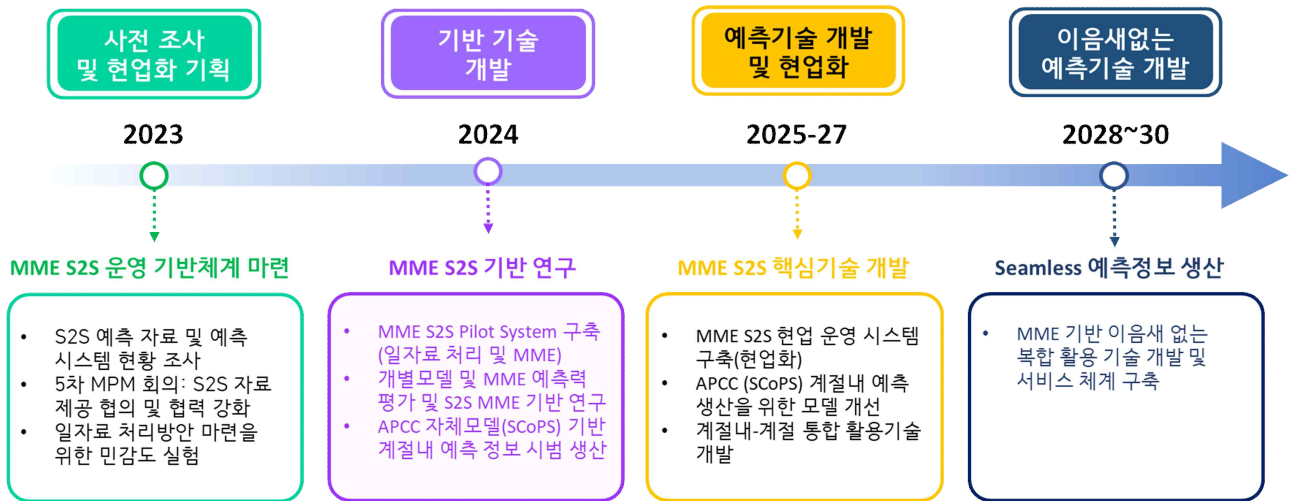


Figure 4.1. Long-term implement system for APCC seamless prediction.

## 4.5. 기후분야 국제협력 및 정책지원

WMO 기후예측 다중모델앙상블 선도센터는 2024년 현재 전 세계 15개 Global Producing Center (GPC)에서 생산되는 장기예보 자료를 수집하여 표준화하며, DMME와 PMME 기법을 적용하여 얻은 MME 계절예측 결과와 검증 결과를 홈페이지를 통해 디지털 및 그래픽 형태의 자료로 WMO 회원국 및 일반 사용자에게 지속적이고 안정적으로 제공하고 있다. 그리고 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 개선 용역과제를 2017년부터 수행하여, 더욱 안정적인 시스템 운영과 사용자 맞춤형 고품질의 예측정보를 서비스하기 위해 노력하였다. 2024년에는 보다 안정적인 서비스와 자료관리를 위해 세계기상기구 기후예측 다중모델앙상블 선도센터 전산장비를 교체하였으며, 시스템 개발의 확장성을 위해 현업자료 처리 기능 개선, 사용자 편의성을 위한 옵션 선택 메뉴 기능 개선이 이루어졌다. 또한 국제적 협업 체계를 강화하기 위해 WMO에서 주관하는 다양한 지역 기후 포럼에 맞춤형 MME 예측정보를 제공하고 있으며, 특히 올해 참석한 지역 기후 포럼에서는 WMO 장기예보선도센터의 계절예측자료가 각 국가의 기후 전망 생산 과정의 중요한 참고 자료로 활용됨을 확인 하였다. 이와 같은 WMO 장기예보 선도센터의 국내·외 활동과 안정적인 시스템 개선 노력을 통해 WMO 장기예보 선도센터의 기후예측 자료 활용도가 향상될 것으로 기대되며, WMO 장기예보 선도센터의 국제 사회에서의 역할과 입지를 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

2023년 WMO S2S 프로젝트가 공식 종료( 1단계 ' 13~' 18 및 2단계 ' 19~' 23)됨에 따라 국제조정사무소의 업무도 동시에 종료하게 되었다. 이에 S2S 프로젝트 운영진은 S2S 프로젝트 및 관련 연구 성과 공유와 함께 향후 연구개발 방향을 논의하기 위해 S2S Summit(2023년 7월 3일-7일, 레딩, 영국)을 개최하였다. 또한 의장단/운영위원회/WMO 회의 주관 또는 참석(4회), 뉴스레터 발간(3회), 홈페이지 콘텐츠 관리, 메일링리스트 및 온라인 소통그룹 관리 등을 통해 S2S 프로젝트 추진을 위한 정보교류, 네트워크 관리 및 홍보 활동 등을 수행함으로써 S2S 국제 연구활동의 허브로서 우리나라의 인지도를 제고하였다.

IPCC 제6차 평가보고서(AR6)의 종합보고서와 관련하여 SPM 및 LR의 의제 분석 및 대응 지원, SPM 분석 및 우리나라 검토 의견 반영을 위한 발언문 작성, SPM 승인을 위한 회원국 토의 내용 및 SPM 수정 관련 전문 작성, SPM 번역본 작성 및 보도자료 작성 지원 등을 수행하였다. 또한 유엔기후변화협약 부속기구 제60차 총회(UNFCCC SB 60)에 정부대표단(자문단)으로 참가하여 기상청 주관 의제인 “연구 및 체계적 관측(Research and Systematic Observation, RSO)” 협상 동향 분석 및 대응, 전문 작성 지원 등을 수행하였다.

## 사사

연구에 사용된 다중모델 앙상블 자료는 APCC MME Producing Centres (PCs)에 의해 생산된 hindcast/forecast 자료를 바탕으로 APCC가 수집, 재가공하였으며 자료를 생산/제공해주신 아시아·태평양경제협력체 기후센터(APCC, APEC Climate Center)에 감사드립니다.

## References

- 김가영, 김해정, 오지현, 유태우, 이윤영, 정여민, 정유란, 정유림, 함수련, 윤순조, 2019: 다중모델 기반 계절내 예측 활용 가이드라인 개발, APEC기후센터 연구보고서, APEC기후센터.
- 김가은, 김옥연, 윤순조, 이성규, 이진영, 이현주, 정유림, 2021: 현업 장기예보 정확도 향상을 위한 장기예보 지원체계 정립, APEC기후센터 연구보고서, APEC기후센터.
- 김유진, 김형진, 민영미, 송봉근, 이현주, 임아영, 임창묵, 정다은, 정임국, 최재원, 2023: APCC 기후정보 활용성 강화를 위한 고해상도 MME 계절내-계절예측시스템 기반구축 및 웹 콘텐츠 다양화, APEC 기후센터 연구보고서 2023.
- 김유진, 김형진, 송봉근, 이현주, 임아영, 임창묵, 정다은, 정임국, 최재원, 2022: APCC 기후정보 활용성 강화를 위한 고해상도 MME 계절내-계절예측시스템 기반구축 및 웹 콘텐츠 다양화. APEC 기후센터 연구보고서 2022.
- 김유진, 임아영, 임창묵, 정다은, 최재원, 민영미, 양유빈, 2021: APCC 기후예측시스템 운영 및 개선, APEC 기후센터 연구보고서 2021.
- 문자연, 이윤영, 오지현, 김가영, 2018: 아태지역 15-60일 MME 예측 기술 개발 및 검증 기술 개발, APEC기후센터 연구보고서, APEC기후센터.
- 이우섭, 윤순조, 김가영, 김미아, 신지현, 이현록, 2017: WMO 장기예보 선도센터 운영(7차년도), APEC기후센터 연구보고서, APEC기후센터.
- Ahn, J. B., J. Lee, and S. Jo, 2018: Evaluation of PNU CGCM ensemble forecast system for boreal winter temperature over South Korea, *Atmosphere*, **28**(4), 509-520.
- Anderson, J. L., 2001: An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Monthly weather review*, 129(12), 2884-2903.
- APCC, 2018: APCC In-House 모형(SCoPS)의 운영 및 개선, APEC기후센터 연구보고서, 2018-05.
- Batté, L., L. Dorel, C. Ardilouze, and J. F. Guérémy, 2021: Documentation of the METEO-FRANCE seasonal forecasting system 8. C3S\_D330\_3.3.1., <https://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/system8-technical.pdf>.
- Dirmeyer, P. A., Gao, X., Zhao, M., Guo, Z., Oki, T., & Hanasaki, N., 2006: GSWP-2: Multimodel analysis and implications for our perception of the land surface. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(10), 1381-1398.
- Dirmeyer, P. A., Halder, S., & Bombardi, R., 2018: On the harvest of predictability from land states in a global forecast model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(23),

13-111.

- Diro, G. T., W. J. Merryfield, H. Lin, W.-S. Lee, R. Muncaster, V. V. Kharin, R. Parent, N. Swart, C. Seinen, D. Akingunola, V. Leung, M. Mansour, M. Chouak, X. Deng, G. Smith, and F. Lemay, 2024: The Canadian Seasonal to Interannual Prediction System version 3.0 (CanSIPsv3.0), Canadian Meteorological and Environmental Prediction Centre technical note, Environment and Climate Change Canada, [https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product\\_guide/docs/tech\\_notes/technot\\_cansips-30\\_0\\_20240611\\_e.pdf](https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoe/product_guide/docs/tech_notes/technot_cansips-30_0_20240611_e.pdf).
- Doblas-Reyes, F. J., M. Deque, and J. P. Piedelievre, 2000: Multi-model spread and probabilistic seasonal forecasts in PROVOST, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **126**(567), 2069–2087.
- Fadeev, R. Y., M. A. Tolstykh, and E. M. Volodin, 2019: Climate version of the SL-AV atmospheric model: development and preliminary results, *Russian Meteorology and Hydrology*, **44**, 13–22.
- Gualdi, S., A. Borrelli, A. Cantelli, G. Davoil, M. D. Mar Chavesmontero, S. Masina, A. Navarra, A. Sanna, and S. Tibaldi, 2020: The new CMCC operational seasonal prediction system, CMCC Technical Note (RP0288), <https://doi.org/10.25424/CMCC/SPS3.5>.
- Hagemann, S., Arpe, K., & Roeckner, E., 2006: Evaluation of the hydrological cycle in the ECHAM5 model. *Journal of climate*, 19(16), 3810–3827.
- Ham, S. Y., Im, A. Y., Kang, S., Jeong, H., and Y. Jeong, 2019 Correction to: A newly developed APCC SCoPS and its prediction of East Asia seasonal climate variability. *Clim. Dyn.*, 53, 3703–3704. <https://doi.org/10.1007/s00382-019004894-y>.
- Ham, S., A. Lim, S. Kang, H. Jeong, and Y. Jeong, 2019: A newly developed APCC SCoPS and its prediction of East Asia seasonal climate variability. *Climate Dynamics*, **52**(11), 6391–6410.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146, 1999–2049, <https://doi.org/10.14191/Atmos.2017.27.3.261>.
- Hirahara, S., Y. Kubo, T. Yoshida, T. Komori, J. Chiba, T. Takakura, T. Kanehama, R. Sekiguchi, K. Ochi, H. Sugimoto, Y. Adachi, I. Ishikawa, and Y. Fujii, 2023: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System Version 3 (JMA/MRI-CPS3), *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **101**(2), 149–169.
- Hunke, E. C., Lipscomb, W. H., Turner, A. K., Jeffery, N., & Elliott, S., 2010: CICE: the Los Alamos sea ice model documentation and software user's manual version 4.1. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 1–115.

- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1631-1643, <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>.
- Keune, J., Gasper, F., Goergen, K., Hense, A., Shrestha, P., Sulis, M., & Kollet, S., 2016: Studying the influence of groundwater representations on land surface-atmosphere feedbacks during the European heat wave in 2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(22), 13-301.
- Kim, H., J. Lee, Y. K. Hyun, and S. O. Hwang, 2021: The KMA Global Seasonal forecasting system (GloSea6)-Part 1: operational system and improvements, *Atmosphere*, **31**(3) 341-359.
- Koster, R. D., Dirmeyer, P. A., Guo, Z., Bonan, G., Chan, E., Cox, P., ... & Yamada, T., 2004: Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 305(5687), 1138-1140.
- Koster, R. D., Mahanama, S. P. P., Yamada, T. J., Balsamo, G., Berg, A. A., Boisserie, M., ... & Wood, E. F., 2011: The second phase of the global land-atmosphere coupling experiment: soil moisture contributions to subseasonal forecast skill. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5), 805-822.
- Lin, H., W. J. Merryfield, R. Muncaster, G. C. Smith, M. Markovic, F. Dupont, F. Roy, J.-F. Lemieux, A. Dirkson, V. V. Kharin, W.-S. Lee, M. Charron, and A. Erfani, 2020: The Canadian seasonal to interannual prediction system version 2 (CanSIPsv2), *Weather and Forecasting*, **35**(4), 1317-1343.
- Meleshko V. P., V. A. Matyugin, P. V. Sporyshev, T. V. Pavlova, V. A. Govokova, I. M. Shkolnik, and A. V. Baidin, 2014: MGO atmospheric general circulation model (version MGO-03 T63L25), *MGO Proc.* **571**, 5-87. (in Russian).
- Min, Y.-M., V.-N. Kryjov, and C.-K. Park, 2009: A probabilistic multimodel ensemble approach to seasonal prediction, *Weather and Forecasting*, 24(3), 812-828.
- Molod, A., E. Hackert, Y. Vikhliayev, B. Zhao, D. Barahona, G. Vernieres, A. Borovikov, R. M. Kovach, J. Marshak, S. Schubert, Z. Li, Y.-K. Kim, L. C. Andrews, R. Cullather, R. Koster, D. Achuthavarier, J. Carton, L. Coy, J. L. M. Freire, K. M. Longo, K. Nakada, and S. Pawson, 2020: GEOS-S2S version 2: The GMAO high-resolution coupled model and assimilation system for seasonal prediction, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **125**(5), e2019JD031767.
- Orth, R., & Seneviratne, S. I., 2014: Using soil moisture forecasts for sub-seasonal summer temperature predictions in Europe. *Climate dynamics*, 43, 3403-3418.

- Paek, H., J.-Y. Yu, J.-W. Hwu, M.-M. Lu, and T. Gao, 2015: A source of AGCM bias in simulating the western Pacific subtropical high: Different sensitivities to the two types of ENSO, *Monthly Weather Review*, **143**(6), 2348–2362.
- Palmer, T. N., A. Alessandri, and U. Andersen, P. Cantelaube, M. Davey, P. Délecluse, M. Déqué, E. Diez, F. J. Doblas-Reyes, H. Feddersen, R. Graham, S. Gualdi, J.-F. Guérémy, R. Hagedorn, M. Hoshen, N. Keenlyside, M. Latif, A. Lazar, E. Maisonave, V. Marletto, Ap. P. Morse, B. Orfila, P. Rogel, J.-M. Terres, and M. C. Thomson, 2004: Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER), *Bulletin of the American Meteorological Society*, **85**(6), 853–872.
- Peng, P., A. Kumar, H. van den Dool, and A. G. Barnston, 2002: An analysis of multi-model ensemble predictions for seasonal climate anomalies, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **107**(D23), ACL-18.
- Reynolds, R. W., and Coauthors, 2002: An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, **15**(13), 1609–1625.
- Richter, J. H., Glanville, A. A., King, T., Kumar, S., Yeager, S. G., Davis, N. A., ... & Oleson, K., 2024: Quantifying sources of subseasonal prediction skill in CESM2. *npj Climate and Atmospheric Science*, **7**(1), 59.
- Rodriguez-Fernandez, N., De Rosnay, P., Albergel, C., Richaume, P., Aires, F., Prigent, C., & Kerr, Y., 2019: SMOS neural network soil moisture data assimilation in a land surface model and atmospheric impact. *Remote Sensing*, **11**(11), 1334.
- Roeckner, E., Bauml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., ... & Tompkins, A., 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description.
- Saha, S., S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, D. Behringer, Y.-T. Hou, H.-y. Chuang, M. Iredell, M. Ek, J. Meng, R. Yang, M. P. Mendez, H. van den Dool, Q. Zhang, W. Wang, M. Chen, and E. Becker, 2014: The NCEP climate forecast system version 2, *Journal of climate*, **27**(6), 2185–2208.
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., ... & Teuling, A. J., 2010: Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, **99**(3–4), 125–161.
- Smith, R. D., Dukowicz, J. K., & Malone, R. C., 1992: Parallel ocean general circulation modeling. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **60**(1–4), 38–61.
- Wang, B., J.-Y. Lee, I.-S. Kang, J. Shukla, C.-K. Park, A. Kumar, J. Schemm, S. Cocke, J.-S. Kug, J.-J. Luo, T. Zhou, B. Wang, X. Fu, W.-T. Yun, O. Alves, E. K. Jin, J. Kinter, B.

- Kirtman, T. Krishnamurti, N. C. Lau, W. Lau, P. Pegion, T. Rosati, S. Schubert, W. Stern, M. Suarez, and T. Yamagata, 2009: Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/CliPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980–2004), *Climate Dynamics*, **33**, 93–117.
- Wang, B., Xiouhua, J., Wu, S., Xiang, B., Fu, X., Alessandri, A., Wu, T., 2015: Development of APCC Seamless Prediction System 프로젝트의 예측시스템 매뉴얼, APEC기후센터 내부 보고서(영문).
- Wedd, R., O. Alves, C. de Burgh-Day, C. Down, M. Griffiths, H. H. Hendon, D. Hudson, S. Li, E.-P. Lim, A. G. Marshall, L. Shi. P. Smith, G. Smith, C. M. Spillman, G. Wang, M. C. Wheeler, H. Yan, Y. Yin, G. Young, M. Zhao, Y. Xiao, and X. Zhou, 2022: ACCESS-S2: the upgraded Bureau of Meteorology multi-week to seasonal prediction system, *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, **72**(3), 218–242.
- Williams, K. D., D. Copsey, E. W. Blockley, A. Bodas-Salcedo, D. Calvert, R. Comer, P. Davis, T. Graham, H. T. Hewitt, R. Hill, P. Hyder, S. Ineson, T. C. Johns, A. B. Keen, R. W. Lee, A. Megann, S. F. Milton, J. G. L. Rae, M. J. Roberts, A. A. Scaife, R. Schiemann, D. Storkey, L. Thorpe, I. G. Watterson, D. N. Walters, A. West, R. A. Wood, T. Woollings, and P. K. Xavier, 2018: The Met Office global coupled model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) configurations, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **10**(2), 357–380.
- Wu, T., L. Song, W. Li, Z. Wang, H. Zhang, X. Xin, Y. Zhang, L. Zhang, J. Li, F. Wu, Y. Liu, F. Zhang, X. Shi, M. Chu, J. Zhang, Y. Fang, F. Wang, Y. Lu, X. Liu, M. Wei, Q. Liu, W. Zhou, M. Dong, Q. Zhao, J. Ji, L. Laurnt, and M. Zhou, 2014: An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies, *Journal of Meteorological Research*, **28**, 34–56.
- Xiang, B., Wang, B., Ding, Q., Jin, F. F., Fu, X., & Kim, H. J., 2012: Reduction of the thermocline feedback associated with mean SST bias in ENSO simulation. *Climate Dynamics*, **39**, 1413–1430.
- Xu, L., & Dirmeyer, P., 2011: Snow-atmosphere coupling strength in a global atmospheric model. *Geophysical Research Letters*, **38**(13).
- Yin, X., A. Gruber, and P. Arkin, 2004: Comparison of the GPCP and CCMAP Merged Gauge-Satellite Monthly Precipitation Products for the Period 1979–2001. *J. Hydromet.*, **5**, 1207–1222.
- Zeng, Z., Wang, D., Yang, L., Wu, J., Ziegler, A. D., Liu, M., ... & Wood, E. F., 2021: Deforestation-induced warming over tropical mountain regions regulated by elevation. *Nature Geoscience*, **14**(1), 23–29.