

**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, 이현주,
임아영, 임창묵, 정다은, 정임국, 최재원
기후사업본부 예측운영과**

2023.12.

APEC기후센터

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.

Key Improvements in the APCC climate forecasts include: APCC climate outlook renewal, development of higher resolution MME seasonal forecast verification system, changes to BSISO (Boreal Summer Intraseasonal Oscillation) forecasts, regional expansion of FHEWS (Fire and Haze Early Warning System), and development of seasonal climate digital data production system for dynamic web services.

- Starting from November 2023, APCC is disseminating its redesigned seasonal climate outlook which was developed based on the results from APCC climate outlook subscribers' survey. The new version has much higher readability and visibility compared to the previous one.
- APCC has developed higher resolution observation pre-processing and climate verification system to evaluate the forecast skills of high-resolution MME seasonal forecasts provided since September 2022.
- The region of APCC FHEWS (Fire and Haze Early Warning System) was expanded to Malaysia and its extended forecasts are available from 2023.
- APCC provided BSISO impact anomaly up to four weeks and expand its area to 50 degrees of north, including the Korean Peninsula and expect that this information will help users who need medium-range forecast in the Asian monsoon region.
- APCC is planning to provide the dynamic web services for climate forecasts, climate monitoring, and climate indices through the renewed APCC website from early 2024.

The globe is getting warmer and the real-time seasonal forecast of 2-m temperature in the long-term is influenced by the global warming since 2013. In the global scale, temperature warming in the seasonal forecast model forecasts are not much different from those of real world; but the regional scale, the differences make it difficult to use the temperature forecast without post processing. Especially, East Asia area often undergoes cold waves in the real world, while the climate model produces above normal temperature forecasts in the most time. Thus suitable post processing is necessary to use the climate

model forecasts positively in various sectors. The long-term trend of models and real observation temperature are analyzed and proper correction of long-term trend of temperature can lead some improvement of forecast skill in this study. Also this study will pave the way to use the temperature climate forecast in the real-time operation of APCC MME.

Although demand for and international interest in sub-seasonal to seasonal (S2S) forecast are rapidly increasing worldwide, the development and predictability of S2S prediction is still insufficient compared to other time scales (e.g., weather and season). APCC is one of worldwide organizations that has produced and provided seasonal forecast and is seeking to expand its scope to S2S forecasts. As a preparatory step for this, a system was established and basic research was conducted to develop the APCC S2S MME prediction system. First, usability was identified through a comprehensive review based on a survey of the current status of international S2S MME prediction systems and research. Through various sensitivity experiments to prepare daily data processing methods for individual models, standards suitable for APCC S2S MME operation were developed. In addition, the possibility of MME usability (MME efficiency) was diagnosed at a S2S time scale, and the possibility of securing S2S data was explored through the 5th APCC MME Model Providers' Meeting. Based on these results, we plan to utilize them in the future operation of the APCC S2S prediction system and development of technologies.

APCC has been operating the WMO (World Meteorological Organization) Lead Center for Long Range Forecast MME (WMO LC-LRFMME) with KMA (Korea Meteorological Administration) since 2011 to provide climate forecast services. The WMO LC-LRFMME collects forecast data from 14 Global Producing Center (GPC) and standardizes forecast and hindcast data and displaying the MME results including deterministic and probabilistic method through the website on a monthly basis. Also the WMO LC-LRFMME provided the seasonal forecast information to Regional Climate Outlook Forums (RCOF), Global Seasonal Climate Updates (GSCU) and KMA to a consensus on the state of the global and regional climate outlook. In 2023, the WMO LC-LRFMME's seasonal forecast system improvements have been performed to provide customized seasonal prediction information and improve system management.

APCC is also operating the WMO S2S (Subseasonal-to-Seasonal Prediction Project) ICO (International Coordination Office) to establish an international collaboration in the field of climate prediction and continuously communicating with a group of experts in the climate field by attending international conferences such as IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) and regional climate forums.

국문 요약

APEC 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.

기후예측에 있어 주요 개선 사항으로는 기후전망 개선, 고해상도 MME 계절예측 검증시스템 구축, BSISO (Boreal Summer Intraseasonal Oscillation) 계절내예측시스템 개선, 동남아시아 산불예측시스템 개선 및 말레이시아 지역확장, 동적 웹 서비스를 위한 계절예측 디지털 자료 생산 시스템 구축입니다.

- 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.
- 동남아시아 산불예측시스템의 지역을 말레이시아로 확장하여 2023년부터 정보를 제공하고 있습니다.
- BSISO 예측정보의 활용성 증대를 위해 영향장 제공 범위를 한반도가 포함되는 10S~50N, 40E~160E로 영역 확장하고 제공 기간을 기존 3주에서 4주로 확대하였습니다.
- 신규 홈페이지에서 기후예측, 기후감시, 기후지수 등의 정보를 동적 웹 콘텐츠로 제공 예정입니다(2024년 초).

전구적으로 기후 온난화가 진행되면서 2013년 이후 기온의 장기적 계절예측정보에도 이러한 현상이 반영되고 있습니다. 전구적으로는 계절예측모델의 기온 온난화 현상이 실제와 크게 다르지 않지만 지역규모에서는 괴리가 있어, 이를 지역에서 반영하기에 애로사항이 있습니다. 특히 동아시아 지역은 계절예측이 대부분 평년 이상으로 예보되고 있지만 실제로는 한파를 겪기도 하는 등 계절예측모델의 기온 예측을 활용하는데 후보정이 필요한 실정입니다. 이에 따라 모델과 관측의 장기적 경향을 분석하였고, 이를 보정하여 장기적 관점에서 예측력을 향상할 수 있는 현업활용의 기반을 마련하였습니다.

계절내예측정보에 대한 수요 및 국제적 관심은 급증하고 있으나, 계절내예측기술의 발전 및 예측력은 다른 시간 규모에 비해 여전히 부족한 실정입니다. APCC는 세계수준의 계절예측정보를 생산·제공해온 전문기관으로 계절내예측으로 그 영역을 확장하고자 하며 이를 위한 준비단계로 APCC MME 계절내예측시스템 운영을 위한 체계구축 및 기반 연구를 수행하였습니다. 우선 국내의 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 타진하였습니다. 이러한 결과를 바탕으로 추후 APCC MME 계절내예측시스템 운영 및 핵심기술 개발 등에 활용하고자 합니다.

APCC는 2011년부터 기상청과 함께 WMO (World Meteorological Organization) 장기예보 선도센터를 운영하여 WMO 회원국의 요구에 부합하는 고품질 기후예측 서비스를 제공하고 있습니다. WMO 장기예보 선도센터는 전 세계 14개 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, 2023년에는 WGPC Pune 참여를 준비하였으며, 지역기후포럼 지역에 대한 예측 정보와 해빙자료 등을 사용자 맞춤 계절예측 정보를 제공하기 위해 시스템 개선이 이루어졌습니다. 또한 현업운영자의 효율적이며 안정적인 시스템 관리를 위해 현업시스템 개선이 수행되었습니다.

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	iii
목차	v
표 차례	viii
그림 차례	x
1. 서론	1
2. 방법 및 자료	3
2.1. MME 계절예측시스템 운영 및 개선	3
2.1.1. MME 계절예측시스템 운영	3
2.1.2. 기후감시시스템 운영	8
2.1.3. 동아시아 지역 확률계절예측시스템 운영	8
2.1.4. 기후전망 개선	9
2.1.5. 고해상도 관측자료 전처리시스템 및 계절예측 검증시스템 구축	9
2.1.6. MME hindcast 기간 확장을 위한 기반 분석	12
2.2. BSISO 계절내예측시스템 운영 및 개선	15
2.2.1. BSISO 계절내예측시스템 운영	15
2.2.2. BSISO 계절내예측시스템 개선	16
2.3. APCC 자체예측모델(SCoPS) 운영 및 예측정보 제공	17
2.3.1. SCoPS 계절예측정보 제공(매월, 3/6개월) 및 현안 대응	17
2.3.2. 기상청 슈퍼컴 5호기를 활용한 SCoPS 계절예측 운영체계 구축	17
2.4. 산불예측시스템 개선 및 말레이시아 지역확장	19
2.4.1. 산불예측시스템 개선	19
2.4.2. 말레이시아 지역확장	19
2.5. 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현	20
2.5.1. 신규 홈페이지용 동적 기후정보 웹 콘텐츠 디지털 자료 생산 시스템 구축	20
2.5.2. 신규 홈페이지용 정적/동적 기후정보 웹 콘텐츠 생산 및 적용 테스트	20
2.6. MME 계절예측 특성 고려한 기온 계절예측 보정 및 현업활용 기반 마련	21
2.6.1. 보정 방법	21
2.6.2. 관측 자료와 예측력 비교	22

2.7. 고해상도 MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축	23
2.7.1. 계절내예측 모델 및 관측자료	23
2.7.2. 계절내예측 검증 지수 및 지역	25
2.7.3. SCoPS 계절내예측자료 생산을 위한 기반체계 마련	26
2.8. 기후분야 국제협력 및 정책지원	27
2.8.1 WMO 장기예보 선도센터 운영	27
2.8.2. WMO S2S 국제조정사무소(ICO) 운영	30
2.8.3. 아태지역 기후예측 기술지원 및 협력	30
2.8.4. IPCC 등 기후분야 국제회의 참석 및 정부대표단 활동	31
3. 결과	32
3.1. MME 계절내예측시스템 운영 및 개선	32
3.1.1. 저해상도/고해상도 MME 계절내예측시스템 운영	32
3.1.2. 기후감시시스템 운영	45
3.1.3. 동아시아 지역 확률계절내예측시스템 운영	49
3.1.4. 기후전망 개선	53
3.1.5. 고해상도 관측자료 전처리 시스템 및 고해상도 기후예측 검증시스템 구축	60
3.1.6. MME hindcast 기간 확장을 위한 기반 분석	67
3.2. BSISO 계절내예측시스템 운영 및 개선	80
3.2.1. BSISO 계절내예측시스템 운영	80
3.2.2. BSISO 계절내예측시스템 개선	85
3.3. APCC 자체예측모델(SCoPS) 운영 및 예측정보 제공	87
3.3.1. SCoPS 계절내예측정보 제공(매월, 3/6개월) 및 현안 대응	87
3.3.2. 기상청 슈퍼컴 5호기를 활용한 SCoPS 계절내예측 운영체계 구축	87
3.4. 산불예측시스템 개선 및 말레이시아 지역확장	104
3.4.1. 산불예측시스템 개선	104
3.4.2. 말레이시아 지역확장을 통한 산불예측시스템 개선	111
3.4.3. 산불예측시스템 운영	122
3.5. 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현	128
3.5.1. 신규 홈페이지용 동적 기후정보 웹 콘텐츠 디지털 자료 생산 시스템 구축	128
3.5.2. 신규 홈페이지용 정적/동적 기후정보 웹 콘텐츠 생산 및 적용 테스트	132
3.6. MME 계절내예측 특성 고려한 기온 계절내예측 보정 및 현업활용 기반 마련	135
3.6.1. MME 기온의 계절내예측 경향과 실제 기후변화 고려한 기온 예측 보정 방법 개발	135

3.6.2. 현업에 활용할 수 있는 기반 마련	163
3.7. 고해상도 MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축	164
3.7.1. 제5차 모델제공기관회의(MPM) 개최 및 협력체계 구축	164
3.7.2. MME 계절내예측 운영 기반체계 구축	165
3.7.3. SCoPS 계절내예측자료 생산을 위한 기반체계 마련	189
3.8. 기후분야 국제협력 및 정책지원	193
3.8.1. WMO 장기예보 선도센터 운영 실무 및 개선 지원	193
3.8.2. WMO S2S 국제조정사무소(ICO) 운영	223
3.8.3. 아태지역 기후예측 기술지원 및 협력	223
3.8.4. IPCC 등 기후분야 국제회의 참석 및 정부대표단 활동	226
4. 요약 및 결론	234
사사	238
References	239

표 차례

Table 2.1. Description of participating models in APCC MME.	3
Table 2.2. Methods of APCC MME.	4
Table 2.3. Defining the SST indices.	5
Table 2.4. Information for NCEP/DOE Reanalysis 2.	7
Table 2.5. Information for CAMS_OPl.	7
Table 2.6. Information for OISSTv2 (NOAA).	7
Table 2.7. Information for ERA-5 (ECMWF).	10
Table 2.8. Information for MERRA2 (GMAO)	10
Table 2.9. The domain for the verification region.	11
Table 2.10. Lists of verification methods for APCC high-resolution MME forecast and hindcast. ...	12
Table 2.11. Experimental design for extension of APCC MME hindcast period.	14
Table 2.12. Participant model description of APCC BSISO forecast system.	16
Table 2.13. Configuration of APCC HPC and KMA supercomputer.	18
Table 2.14. Hindcast periods of individual models of 2022 Decemter.	22
Table 2.15. Description of subseasonal to seasonal forecast models used in the study.	24
Table 2.16. Definition of geographic domain of 8 regions verified in this study.	26
Table 2.17. Characteristics of seasonal forecast model from GPCs.	29
Table 2.18. Reanalysis data used for verification of real-time forecast.	30
Table 2.19. Reanalysis data used for verification of hindcast.	30
Table 3.1. Lists of participating in APCC MME for 2023JFMAMJ-2023DJFMAM.	33
Table 3.2. Lists of selected models for customized probabilistic MME over East Asia by two criteria.	52
Table 3.3. Content of climate outlook of APCC, IRI, TCC, and CariCOF.	55
Table 3.4. Lists of high resolution observation data pre-process system.	60
Table 3.5. Lists of python module codes in the high resolution verification system.	62
Table 3.6. Lists of main program (python) codes in the high resolution verification system. ...	63
Table 3.7. Lists of fortran codes in the high resolution verification system.	64
Table 3.8. Forecast period for participant models.	85
Table 3.9. Configuration of APCC HPC and KMA supercomputer.	87

Table 3.10. Summary of computational resource for running hindcast full-set.	89
Table 3.11. Definition of sensitivity experiments for estimating climatology.	176
Table 3.12. Ensemble method of SCoPS seasonal and sub-seasonal forecast.	189
Table 3.13. Hindcast and forecast period of SCoPS seasonal and sub-seasonal forecast.	192
Table 3.14. Date of data collection from GPCs.	194
Table 3.15. Yearly Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of 2m temperature and precipitation.	197
Table 3.16. Yearly Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over East Asia of probabilistic real-time forecast of 2m temperature and precipitation.	198
Table 3.17. The list of RCOF in 2023.	209
Table 3.18. Model description of long-range forecast system from GPC Pune.	216
Table 3.19. Area information of Regional Climate Outlook Forum.	217
Table 3.20. Results for investigation whether each GPC produces “sea ice extent (SIE)” variableSea ice extent (SIE) variable	220

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 2.3. The domain for the WIOD and EIOD index.	6
Figure 2.4. The domain for the ENSO-Modoki index.	6
Figure 2.5. Process for calculation part of East Asian customized probabilistic forecast system. ...	8
Figure 2.6. The domain map for the verification region.	11
Figure 2.7. Changes of APCC MME hindcast period during 2016-2022.	13
Figure 2.8. Distribution for hindcast period of individual models (bright green) and APCC MME (dark green).	13
Figure 2.9. APCC BSISO operating system.	15
Figure 2.10. APCC in-house model (SCoPS) operating system.	17
Figure 2.11. NCEP hindcasts are initialized at 0, 6, 12, and 18Z. These four starting times are combined to make a 4-member ensemble.	24
Figure 2.12. Forecast procedures at WMO LC-LRFMME.	27
Figure 3.1. The operation log of the APCC MME prediction system.	32
Figure 3.2. Examples of outliers near the coastal line in the CWA (CWB) model' s forecast. (top) surface temperature, (bottom) 2-m temperature.	34
Figure 3.3. ENSO Alert status history for January 2018-November 2023.	35
Figure 3.4. ENSO Alert information for each institution (NIWA, APCC, BoM, and NOAA) provided by PMC.	36
Figure 3.5. Changes of APCC MME hindcast prediction skill (ACC) during 2013 to 2022 for 2-m temperature (red) and precipitation (blue).	37
Figure 3.6. Changes of regional (Australia, East Asia, North America, North Eurasia, South America, and South Asia) APCC MME hindcast prediction skill (ACC) during 2016 to 2022 for 2-m temperature (a) and precipitation (b).	37
Figure 3.7. Changes of APCC MME (Black dot and line) and individual models (Color dot) real-time forecast prediction skill (ACC) during 2008 to 2022 for temperature at 850hPa (a) and precipitation (b).	38
Figure 3.8. Distribution of Proportion correct for APCC probabilistic MME forecast during	

2016-2022: (a) 2-m temperature and (b) precipitation.	39
Figure 3.9. Changes of 3 years moving averaged ROC score for APCC probabilistic MME forecast: (a) 2-m temperature and (b) precipitation.	40
Figure 3.10. Changes of ROC score for APCC probabilistic MME forecast during 2013 to 2022: (a) 2-m temperature and (b) precipitation.	41
Figure 3.11. Extended hindcast data of Meteo-France are being provided in CLIK (CLimate Information TookKit) website: cliks.apcc21.org/dataset/model.	42
Figure 3.12. An example of PNU-RDA forecast maps displayed in APCC website: apcc21.org/ser/outlook.do?lang=ko.	43
Figure 3.13. PNU-RDA forecast/hindcast are being provided in CLIK website.	44
Figure 3.14. A new diagram of APCC MME participation agencies. As of June 2023, PNU-RDA started providing their forecast/hindcast data with APCC.	44
Figure 3.15. Weekly, monthly, and seasonal current climate conditions: apcc21.org/ser/high.do?lang=ko.	45
Figure 3.16. Climate index monitoring for the past 10 years: apcc21.org/ser/indic.do?lang=ko.	46
Figure 3.17. Global climate drought: apcc21.org/ser/global.do?lang=ko.	46
Figure 3.18. NOAA Daily (non-interpolated) Outgoing Longwave Radiation (OLR) page. The data provision was terminated as of 17 September 2023.	47
Figure 3.19. Weekly and monthly OLR anomaly patterns from NOAA daily non-interpolated data (left) and CPC blended data (right).	48
Figure 3.20. An example of OLR anomaly maps displayed in APCC website: apcc21.org/ser/high.do?lang=ko.	49
Figure 3.21. Regression between the first two PCs of ENSO and precipitation anomaly over East Asia in (a) JFM to (l) DJF.	50
Figure 3.22. Regression between area-averaged tropical Western Pacific precipitation anomaly and precipitation anomaly over East Asia in (a) JFM to (l) DJF.	51
Figure 3.23. Previous version of APCC Climate Outlook.	53
Figure 3.24. Climate outlooks of other organizations: IRI (International Research Institute), TCC (Tokyo Climate Center), and CariCOF (Caribbean Climate Outlook Forum).	54
Figure 3.25. Questionnaire on APCC Climate Outlook.	56
Figure 3.26. Results of questionnaire on APCC Climate Outlook subscribers' affiliation and field.	57

Figure 3.27. Results of questionnaire on the frequently used content of APCC climate outlook.	57
Figure 3.28. Results of questionnaire on purpose of use of APCC Climate Outlook.	58
Figure 3.29. Results of 5-scale questionnaire on APCC Climate Outlook subscribers' satisfaction.	58
Figure 3.30. New version of APCC Climate Outlook.	59
Figure 3.31. Structure of high resolution verification system.	61
Figure 3.32. Structure of directories for high resolution verification system.	62
Figure 3.33. Regional ACC calculated by each respective observations for 2022DJF precipitation (a-c) and 2-m temperature (d-f) forecasts.	65
Figure 3.34. ROC curve and score calculated by each respective observations for 2022DJF precipitation (a-c) and 2-m temperature (d-f) forecasts.	66
Figure 3.35. Results of t-test on differences in long-term mean between 1991-2010 and 1991-2014.	67
Figure 3.36. Results of t-test on differences in long-term mean between 1991-2010 and 1993-2016.	68
Figure 3.37. Results of KS-test on differences in the distribution of Nino3.4 indices between 1991-2010 and 1991-2014.	69
Figure 3.38. Results of KS-test on differences in the distribution of Nino3.4 indices between 1991-2010 and 1993-2016.	70
Figure 3.39. Seasonal distribution (a) of ACC for 2-m temperature (top) and precipitation (bottom) in each experiment and the ratio of ACC difference (b) from CTR.	71
Figure 3.40. 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.	72
Figure 3.41. Trends of predicted temperature for each experiment during hindcast period and observed temperature during 1991-2020.	73
Figure 3.42. TCCs for time variability of temperature in each experiment.	74
Figure 3.43. Results of t-test on differences between CTR and SCM1~SCM4 forecasts during 2022JFM~DJF.	75
Figure 3.44. Bias for the 2022MAM, JJA, SON, and DJF temperature forecasts in each experiment and anomaly of observed temperature.	76
Figure 3.45. SCM2 minus CTR (left) and SCM4 minus CTR (right) for 2022MAM, JJA, SON, and DJF temperature forecasts.	77

Figure 3.46. Seasonal distribution (a) of ROC score for 2-m temperature (top) and precipitation (bottom) in each experiment and the ratio of ROC score difference (b) from CTR.	78
Figure 3.47. Difference in ROC Score between CTR and GAUS1~GAUS4 for temperature.	79
Figure 3.48. Difference in ROC Score between CTR and GAUS1~GAUS4 for precipitation.	79
Figure 3.49. Example of BSISO composite map displayed on the website.	81
Figure 3.50. Contents of BSISO monitoring.	82
Figure 3.51. Contents of BSISO forecast.	83
Figure 3.52. Contents of BSISO verification.	84
Figure 3.53. Example of BSISO impact anomaly field before and after improvement for area.	85
Figure 3.54. Example of BSISO 4-week forecast impact anomaly.	86
Figure 3.55. SCoPS Run-time with the number of CPUs and machine.	88
Figure 3.56. Run status of SCoPS hindcast.	89
Figure 3.57. Difference of Temporal Correlation Coefficients (TCC) of geopotential height of 500hPa, sea level pressure (SLP), 2m temperature (T2M), and precipitation (PREC) for MAM.	94
Figure 3.58. Same as Figure 3.57, but for JJA.	94
Figure 3.59. Same as Figure 3.57, but for SON.	95
Figure 3.60. Same as Figure 3.57, but for DJF.	95
Figure 3.61. RMSE (left) and TCC (right) difference of NINO3.4 between APCC and KMA5 for MAMJJA.	96
Figure 3.62. Same as Figure 3.61, but for JJASON.	96
Figure 3.63. Same as Figure 3.61, but for SONDJF.	97
Figure 3.64. Same as Figure 3.61, but for DJFMAM.	97
Figure 3.65. T-test verification between APCC and KMA5 of Z500, SLP, T2M, and PREC for MAM.	98
Figure 3.66. Same as Figure 3.65, but for JJA.	98
Figure 3.67. Same as Figure 3.65, but for SON.	99
Figure 3.68. Same as Figure 3.65, but for DJF.	99
Figure 3.69. Pattern Correlation Coefficients (PCC) and relative difference (DF) of T2M, PREC, SLP, and Z500 between APCC and KMA5 with region for MAM.	100
Figure 3.70. Same as Figure 3.69, but for JJA.	100

Figure 3.71. Same as Figure 3.69, but for SON.	101
Figure 3.72. Same as Figure 3.69, but for DJF.	101
Figure 3.73. Pattern Correlation Coefficients (PCC) and relative difference (DF) of T2M, PREC, SLP, and Z500 (open marker: KMA5, closed marker: APCC) between those model hindcast (gray bar: KMA5, red bar: APCC) and reanalysis with region for MAM.	102
Figure 3.74. Same as Figure 3.73, but for JJA.	102
Figure 3.75. Same as Figure 3.73, but for SON.	102
Figure 3.76. Same as Figure 3.73, but for DJF.	103
Figure 3.77. List of data collected for comparative analysis of precipitation	105
Figure 3.78. Detailed specification information for each precipitation data	106
Figure 3.79. Example of regional extracted data	107
Figure 3.80. Monthly precipitation comparison results by region I	108
Figure 3.81. Monthly precipitation comparison results by region II	108
Figure 3.82. Results of comparing individual model resolution differences	109
Figure 3.83. Risk grade calculation comparison results	110
Figure 3.84. Reproduction results for Malaysia	111
Figure 3.85. Average results for Malaysia from CHIRPS and GFED	112
Figure 3.86. Average results for Malaysia from individual models	112
Figure 3.87. Monthly climatology pattern of precipitation	113
Figure 3.88. Monthly anomaly climatology pattern of precipitation	114
Figure 3.89. EOF results of Malaysia	114
Figure 3.90. Monthly precipitation pattern from EOF	115
Figure 3.91. Climatology of CHIRPS for Malaysia	116
Figure 3.92. Climatology of GFED for Malaysia	117
Figure 3.93. FHEWS operation system flow chart	118
Figure 3.94. FHEWS Indonesia operation results I (Target: 2023 Feb–Apr)	119
Figure 3.95. FHEWS Indonesia operation results II (Target: 2023 Feb–Apr)	119
Figure 3.96. Forecasting of precipitation in NorthMalayPeninsula	120
Figure 3.97. Forecasting of precipitation in SouthMalayPeninsula	120
Figure 3.98. Forecasting of precipitation in Sabah	121
Figure 3.99. Forecasting of precipitation in Sarawak	121

Figure 3.100. Homepage improvement results	122
Figure 3.101. Homepage results for Indonesia and Malaysia	123
Figure 3.102. FHEWS Indonesia operation results (April, May 2023)	124
Figure 3.103. FHEWS Indonesia operation results (June, July 2023)	124
Figure 3.104. Forecasting of precipitation in Barat	125
Figure 3.105. Forecasting of precipitation in Tengah	125
Figure 3.106. Forecasting of precipitation in Selatan	126
Figure 3.107. Forecasting of precipitation in Timur	126
Figure 3.108. Malaysia FHEWS result (Issued: 2023-10)	127
Figure 3.109. Explanation of input data for climate outlook summary.	132
Figure 3.110. Example of climate forecast web contents in current homepage.	133
Figure 3.111. Example of climate forecast web contents in new homepage.	134
Figure 3.112. Global mean temperature at 2-meter anomaly time series of individual model hindcast (colored little x), real-time forecast (colored large star); and NCEP observation (black solid line). Colored symbols present all individual model forecast 1980-2022. Model forecast anomalies are deviation from each hindcast period of issued time and observation anomalies are deviation from climatology 1991-2010.	135
Figure 3.113. Same time series as in Figure 3.112. but spatially averaged for East Asia [10° N-65° N, 70° E-155° E].	136
Figure 3.114. Time series of normalized anomalies of 2-m temperature from observation (orange, 1980-2021) and a individual model hindcast (black, APCC SCOPS, 1982-2013), and forecast of 2021 MAY (black asterisk) for one grid point (30° N, 90° E) in East Asia. Linear trend of model hindcast (black) from 1991-2013 (the longest period of individual model from 1991) is upward right but for observation (orange) is downward right. The linear trend for the longer period observation (red, 1991-2020) is more downward right. Modified linear trend of model and forecast are colored as purple.	137
Figure 3.115. Time series of observation and a individual model hindcast (black, APCC SCOPS) with one-month-lead forecast at 2021 MAY (black asterisk) for multi-grids [40° N-120° E, 50° N-120° E, 55° N-130° E, 35° N-130° E, 40° N-140° E, 50° N-140° E] in East Asia. Similar with Figure 3.114.	138

Figure 3.116. (a) Corrected forecast and (b) original forecast 2-m anomalies at 2021 May (dot: over 0.43σ) by linear trend correction method. (c) added spatial pattern for correction (). APCC SCOPS 1-month-lead forecast is used.139

Figure 3.117. NCEP observation anomalies of 2-m temperature at May, 2021 (climate:1991-2010).139

Figure 3.118. Same as Figure 3.116. but for SCM MME at 2021 May (dot: over 0.43σ). 140

Figure 3.119. Monthly Added spatial patterns for SCM MME averaged 2013-2022. 12-month averaged patterns corresponds to Figure 3.118c.141

Figure 3.120. Monthly time series from 2013 to 2022 spatially averaged added values in East Asia as in Figure 3.119. Red x are individual models and black solid line is SCM MME.142

Figure 3.121. Monthly anomaly pattern correlation coefficient (PCC) of original air temperature forecast (black x) and corrected forecast (red x). Most PCCs are improved after the correction. Purple circles are presented the area averaged temperature anomalies and it shows PCC values are proportional to the temperature anomalies roughly.143

Figure 3.122. Monthly differences of anomaly pattern correlation coefficient between corrected and original temperature forecast as in Figure 3.121. Mostly positive (red) differences are calculated and it means the linear trend correction of temperature is suitable to improve the forecast skill. March, April, May, Jun, July, August, October, and November months are benefited to the correction.144

Figure 3.123. 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).145

Figure 3.124. Same as Figure 3.123 but for July-December.146

Figure 3.125. Monthly ROC skill and differences of original air temperature forecast (black circled x) and corrected forecast (red asterisk). Most ROCs are improved after the correction.147

Figure 3.126. Time series of 2-m temperature anomalies of observation (orange line, 1991-2021), model hindcast (black line, 1982-2013, APCC SCOPS), and forecast (black filled dot) for 2021 May (30°N , 90°E). Corrected forecast by empirical cumulative distribution function (ECDF) method is purple filled dot.148

Figure 3.127. Empirical cumulative distribution of hindcast (model, black line) observation (orange line), target forecast (black dot) and corrected forecast (purple dot) for Figure 3.125.148

Figure 3.128. Same as Figure 3.126 but for normalized anomalies of 2-m temperature.149

Figure 3.129. Same as Figure 3.16 but for normalized anomalies of 2-m temperature. ECDF for Figure 3.127.149

Figure 3.130. (a) Corrected forecast and (b) original forecast 2-m anomalies at 2021 May (dot: over 0.43σ) by empirical quantile mapping method. (c) added spatial pattern for correction (). APCC SCOPS 1-month-lead forecast is used.150

Figure 3.131. Same as Figure 3.130 but for SCM MME.150

Figure 3.132. Monthly Added spatial patterns for SCM DMME averaged 2013-2022. 12-month averaged patterns correspond to Figure 3.118c. Note that the color scales are different from those of Figures 3.130-131.151

Figure 3.133. Monthly anomaly pattern correlation coefficient (PCC) of original air temperature forecast (black x) and corrected forecast (red star). Cyan circles are presented the area averaged temperature anomalies.152

Figure 3.134. Monthly differences of anomaly pattern correlation coefficient between corrected and original temperature forecast as in Figure 3.133.153

Figure 3.135. Time series of 2-m temperature of observation (orange line, 1991-2021), model hindcast (black line, 1982-2013, APCC SCOPS), and forecast (black filled dot) for 2021 May (30°N , 90°E). Corrected forecast by empirical cumulative distribution function (ECDF) method is purple filled dot.154

Figure 3.136. Empirical cumulative distribution of hindcast (model, black line) observation (orange line), target forecast (black dot) and corrected forecast (purple dot) for Figure 3.135.154

Figure 3.137. (a) Original forecast and (b) corrected forecast 2-m temperature of APCC SCOPS at 2021 May by empirical quantile mapping method as in Figure 3.135. (c) Added spatial pattern for the correction ($c=b-a$). APCC SCOPS 1-month-lead forecast is used. (d) Original forecast 2-m temperature anomaly, (e) corrected forecast anomaly, and (f) added values for the correction anomaly forecast ($f=e-d$). (g) Normalized original forecast anomaly, (h) corrected normalized anomaly and (i) added spatial pattern for the normalized forecast ($i=h-g$). (j) Observation

anomaly of 2021 May (climate period is 1982–2013).	156
Figure 3.138. (a) Original forecast and (b) corrected forecast 2-m temperature of SCM DMME at 2021 May by empirical quantile mapping method as in Figure 3.135. (c) Added spatial pattern for the correction (c=b-a) of SCM DMME. (d) Original normalized anomaly forecast of SCM DMME, (e) corrected normalized anomaly forecast, and (f) added spatial pattern for the correction (f=e-d). (g) Observation anomaly of 2021 May (climate period is 1991–2010). Black dots represent 0.43 sigma.	157
Figure 3.139. Monthly added spatial patterns for SCM DMME averaged 2013–2022 to correct 2-m temperature anomaly forecast by empirical CDF of original values. 12-month averaged patterns corresponds to Figure 3.138c.	158
Figure 3.140. Monthly normalized added spatial patterns for SCM DMME averaged 2013–2022 to correct 2-m temperature anomaly forecast by quantile mapping of empirical CDF of original values. 12-month averaged patterns corresponds to Figure 3.138f.	159
Figure 3.141. Monthly time series from 2013 to 2022 spatially averaged added values in East Asia as in Figure 3.139. Red x are individual models and black solid line is SCM DMME.	160
Figure 3.142. Monthly anomaly pattern correlation coefficient (PCC) of original air temperature forecast (black x) and corrected forecast (red star) by empirical CDF quantile mapping of original temperature as in Figure 3.138. Green circles are presented the area averaged temperature anomalies.	161
Figure 3.143. Monthly differences of PCC between corrected and original temperature forecast as in Figure 3.142.	162
Figure 3.144. The 5rd APCC Multi-Model Ensemble Model Providers’ Meeting(Aug. 29– Sep. 1, 2023, Busan).	164
Figure 3.145. Subseasonal to seasonal datasets from S2S and SubX project.	166
Figure 3.146. Contributing centers in S2S and SubX projects; S2S data provider (black circle), Archiving data centre (blue circle), WMO Lead Center for long-range forecast MME (WMO LC-LRFMME) and subseasonal to seasonal forecast MME (WMO LC-SSFMMME).	166
Figure 3.147. Examples of S2S MJO forecasts in S2S Museum (left) and Climate Hazards Center (right).	167

Figure 3.148. S2S MME prediction systems from WMO LC-SSF MME, IRI, and NOAA/CPC. ..	167
Figure 3.149. MME subseasonal forecast procedures in pilot system.	169
Figure 3.150. Observations and 1~4 weeks subseasonal (deterministic and probabilistic) MME forecasts during 4~25 July 2022.	170
Figure 3.151. Temporal evolution of biases in long-term mean (LTM) and long-term standard-deviation(KTS) of temperature at 2m (T2M) over globe, Tropics, and E. Asia increasing lead days from 1 to 32 for 6 models. Bias is defined as a mean value of differences relative to the observed LTM and LTS over globe during all year around.	171
Figure 3.152. Same as Fig. 3.151, except for PREC and Z500 over globe.	172
Figure 3.153. Bias in long-term mean (climatology) of temperature at 2m at 1 and 32 leads for 6 models.	172
Figure 3.154. Same as Fig. 3.153, except for precipitation.	173
Figure 3.155. Same as Fig. 3.153, except for geopotential height at 500hPa.	173
Figure 3.156. Temporal evolution of PCC and RMSE of long-term pattern for three variables with increasing lead days from 1 to 32 over globe, tropics and East Asia domains for 6 models during all year round.	174
Figure 3.157. 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 temperature at 2m(T2M), precipitation(PREC) and geopotential height at 500hPa(Z500) over 8 regions.	177
Figure 3.158. 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 temperature at 2m(T2M), precipitation(PREC) and geopotential height at 500hPa(Z500) over 8 regions.	177
Figure 3.159. Diagram for individual models when Thursday is the MME forecast day.	179
Figure 3.160. Same as Fig. 3.159, except for Monday.	179
Figure 3.161. 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.	181
Figure 3.162. Same as Fig. 3.161, except for PREC.	181

Figure 3.163. Same as Fig. 3.161, except for Z500.182

Figure 3.164. ACC of individual models and MME T2M prediction over 8 regions for 4 lead weeks at target day on Thursday and Monday.182

Figure 3.165. ACC of individual models and MME T2M prediction over globe for 4 lead weeks depending on MME target forecast day from Thursday to Wednesday.183

Figure 3.166. MME forecast day at which prediction skill for MME becomes higher than that for ECMWF for each variable and region for 4 lead weeks.183

Figure 3.167. Bias in long-term mean (climatology) of T2M, PREC and Z500 at 1 and 4 lead weeks for multi-model ensemble.185

Figure 3.168. ACC of weekly mean T2M, PREC, and Z500 over globe for 6 individual models and multi-model ensemble.186

Figure 3.169. ACC of weekly mean T2M over globe for 6 individual models and multi-model ensemble.186

Figure 3.170. Same as Fig. 3.169, except for PREC.187

Figure 3.171. Same as Fig. 3.169, except for Z500.187

Figure 3.172. ACC of weekly mean T2M, PREC, and Z500 prediction for ECMWF (blue line), average of 6 individual models (Mean, black line), and MME (red line) over globe. MME efficiency related to ECMWF (blue bar) and Mean (grey bar) for 8 lead weeks is displayed with histogram.188

Figure 3.173. MME efficiency related to mean skill of T2M, PREC, and Z500 prediction from 6 individual models for 4 lead weeks over 8 regions.188

Figure 3.174. Plan to model description summary of SCoPS seasonal and sub-seasonal system.190

Figure 3.175. Example of SCoPS seasonal (upper) and sub-seasonal (bottom) forecast run script.190

Figure 3.176. Schedule of SCoPS sub-seasonal real-time forecasting system.191

Figure 3.177. Flow chart of producing the SCoPS ocean initial data.192

Figure 3.178. Nino3.4 index (line) and difference(shading) between forecast using ARGO and hindcast using WOD as ocean initial condition for the period of 2014.193

Figure 3.179. Schedule of WMOLC-LRFMME.194

Figure 3.180. 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–SO2023. 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.195

Figure 3.181. 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–SON2023. 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.196

Figure 3.182. 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) periods.199

Figure 3.183. 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)–(f) shows GPC Beijing, ECMWF, Exeter, Melbourne, Montreal, and Seoul.200

Figure 3.184. Sames as Figure 3.183, but panels (a)–(b) shows GPC Tokyo and Washington. ...201

Figure 3.185. List of standardized data.203

Figure 3.186. The python script to plot the climate index.203

Figure 3.187. The revised python script to plot the climate index.203

Figure 3.188. The verification results for NDJ 2022 using high resolution and low resolution OISST.204

Figure 3.189. Example of interim GSCU.205

Figure 3.190. Example of powerpoint for WMO expert team.205

Figure 3.191. Python Script to produce the interim GSCU file.206

Figure 3.192. Problem with observational plot.207

Figure 3.193. Results of data before and after applying merge option.207

Figure 3.194. Evolution of SASCOF.209

Figure 3.195. Examples of the use of seasonal climate information from WMOLC-LRFMME (I). ...210

Figure 3.196. (a) Official photo from the ASEANCOF-21 and (b), (c), (d), and (e) are examples of presentation that were delivered on ASEANCOF-21.211

Figure 3.197. Examples of the use of seasonal climate information from WMOLC-LRFMME (II).	212
Figure 3.198. The number of monthly visitors of WMO LC-LRFMME website in 2023.	213
Figure 3.199. Samples of seasonal forecast for GPC Pune.	215
Figure 3.200. Samples of providing seasonal forecast for Regional Climate Outlook Forum region.	218
Figure 3.201. Wind at 850 hPa on WMOLC website.	219
Figure 3.202. Sea ice extent on WMOLC website.	220
Figure 3.203. Improvements of WMOLC website in 2023.	222

1. 서론

APEC 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 매월 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 3차년도(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). 2021년에는 예측정보 제공시기를 20일에서 15일로 보다 앞당기고 고해상도 MME 계절예측시스템을 구축하여 2022년 9월부터 현업운영 중에 있어 지속적인 MME 예측정보의 활용성 및 경쟁력 강화에 노력하고 있다. 또한 세계 우수 현업기관과의 차별성 및 경쟁력 확보를 위해 기상·기후간 이음새 없는(Seamless) 예측기술 개발로 그 영역을 확대하기 위해 2023년부터 계절내예측 관련 시스템 구축 및 연구를 수행하였다.

2023년에는 크게 다음의 다음의 여섯 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 기온 계절예측 보정, 5) MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축, 6) 기후분야 국제협력 및 정책지원에 대한 과제를 수행하였다.

그 중의 기후예측시스템 개선에서는 기후전망 개선, 고해상도 MME 검증시스템 구축, MME hindcast 기간 확장을 위한 분석, BSISO (Boreal Summer Intra-Seasonal Oscillation) 계절내예측시스템 개선, APCC 자체예측모델(SCoPS) 운영체계 개선, 동남아시아 산불예측시스템 개선 및 말레이시아 지역확장 과제가 수행되었다. 이와 함께 신규 홈페이지 구축과 관련하여 APCC MME 계절예측 정보를 보다 이해하기 쉽고 편리하게 활용할 수 있도록 동적 기후정보 웹 콘텐츠를 제공하고자 콘텐츠별 디지털 자료 생산 시스템을 구축하여 APCC MME 계절예측 정보의 활용성을 증진시키고자 하였다.

MME 기온 계절예측 보정 과제에서는 지구 온난화의 영향으로 전지구적으로 대체로 평년 이상의 기온을 예보하고 있어 온난화가 계절예측에서도 잘 드러나지만 실제 기온 분포는 지역별, 시기별로 상이한데 다수의 기후예측모델은 많은 지역에서 일관되게 온난한 기온을 예측하고 있어 이에 대한 보정 기법을 개발하고 향후 현업 활용을 위한 기반을 마련하고자 하였다. 특히 동아시아 지역은 지면-대기 상호작용이 주요하고, 중층 중위도 순환장이 기후예측에 있어 중요한 역할을 하지만 기후모델에서는 이러한 물리과정의 모수화가 다소 어려워 계절 예측성이 상대적으로 낮은 지역으로 실제보다는 온난화가 과하게 나타나고 있다. 이에 우선적으로 동아시아 지역의 기온 경향을 보정하는 기법을 개발하고 적용하여 예측성을 평가하였다.

MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축 과제에서는 계절내예측을 위한 준비 단계로, 국내외 계절내예측자료 및 예측시스템에 대한 현황 파악을 시작으로 APCC MME 계절내예측 시스템 기반체계 구축 및 현업 운영을 위한 기반 연구를 수행하였다. 이로부터 향후

APCC 이음새 없는 예측시스템 운영을 위한 계절내예측에 적합한 핵심 예측기술을 개발하고, 계절내 규모에서 주요한 영향 인자 특성 및 예측성 평가 등에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

APCC는 2011년부터 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 운영함과 동시에 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. MME 계절예측시스템 운영

APCC는 고품질의 계절예측 정보를 생산·제공하기 위해 11개국 15개의 기상·기후 관련 현업 및 연구기관의 협조를 통하여 각 기관에서 운영 중인 전 지구 예측 모델 하에서 생산된 계절 규모의 예측 자료를 수집하고 있으며, 해당 자료들을 활용하여 MME 기법을 기반으로 다양한 예측 정보를 생산·제공하고 있다. 2023년 기준 APCC에서 수집하는 각각의 기관별 예측 자료는 Table 2.1과 같다.

Table 2.1. Description of participating models in APCC MME.

기관 (국가)	모델명	모델해상도	앙상블 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)*	TCWB1Tv1.1	T119L40	30/30	1991-2020	Paek <i>et al.</i> (2015)
ECCC (캐나다)	CanSIPsv2.1	T63L35	20/20	1980-2020	Lin <i>et al.</i> (2020)
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)
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)
MGO (러시아)***	MGOAM-2	T42L14	10/6	1979-2004	Meleshko <i>et al.</i> (2014)

* 2022년 10월 CWB(Central Weather Bureau)에서 CWB(Central Weather Administration)으로 변경됨

** 2022년 6월 PNU(Pusan National University)에서 PNU/RDA(Rural Development Administration)으로 변경됨

*** MGO는 hindcast 기간 불일치 등의 이유로 APCC MME에 참여하지 않으나, 개별 예측정보를 제공함

위와 같은 15개 기관 예측 자료의 수집 방식은 참여기관에서 운영·관리하는 ftp 서버에 업로드한 예측 자료를 내려받는 방식과 참여기관에서 APCC ftp 서버에 예측 자료를 업로드하는 방식으로 나뉘며, 수집된 원시 예측 자료는 각기 다양한 형식과 파일 속성에 따라 자료 처리의 편의성 및 일관성을 확보하기 위해 각 예측 자료(기관)별 전처리 체계(pre-processing)를 거쳐 고해상도($1^{\circ} \times 1^{\circ}$) 및 저해상도($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$)의 표준화된 자료로 산출된다. 각 기관별 예측 자료를 수집하는 일정은 Figure 2.1과 같다.

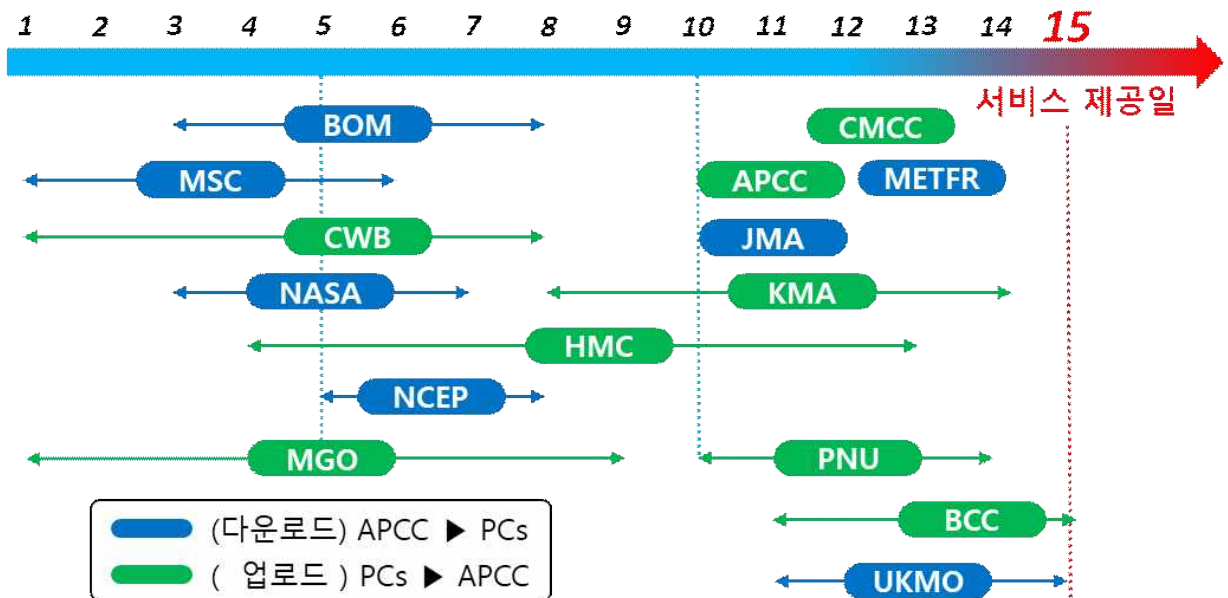


Figure 2.1. Schedule of prediction data collection by participating model in APCC MME.

전처리 체계를 통해 표준화된 각 기관별 예측 자료를 활용하여 결정론적(deterministic)과 확률론적(probabilistic) MME 기법을 적용한 예측 정보를 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)

위와 같은 기법을 적용하여 생산된 MME 계절예측 자료는 다양한 콘텐츠를 통해 제공되고 있으며, 대표적으로 해수면 온도(sea surface temperature, SST) 기반의 예측 지수 정보를 들 수 있다. Table 2.3에서 정의하는 해수면 온도 해양 지수를 더불어 엘니뇨-라니냐 영향 지역인 인도·태평양 지역의 해수면 온도 편차(anomaly)장, 해수면 온도의 Hovmoller diagram (경도-시

간 cross section), Nino3.4 지수 기반의 엘니뇨 남방 진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 발생 확률 정보 및 경보 정보 등을 산출한다. 여기서, 해수면 온도 지수를 정의하는 영역은 Figure 2.2~2.4와 같다.

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)

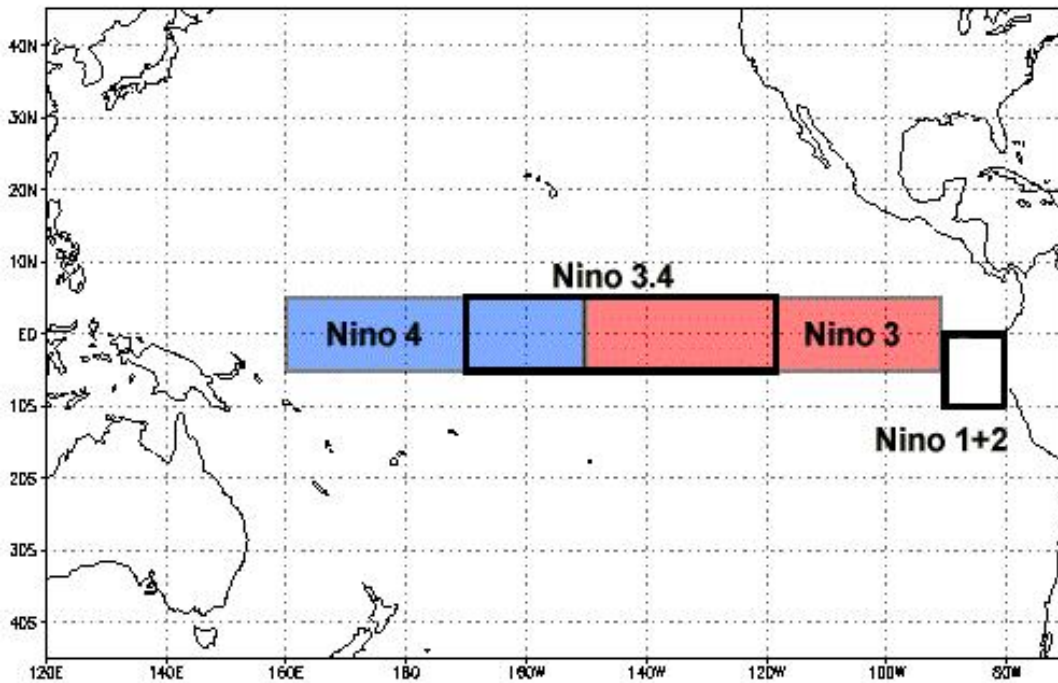


Figure 2.2. The domain for the Nino indices (Nino 1+2, Nino 3, Nino 3.4, and Nino 4).

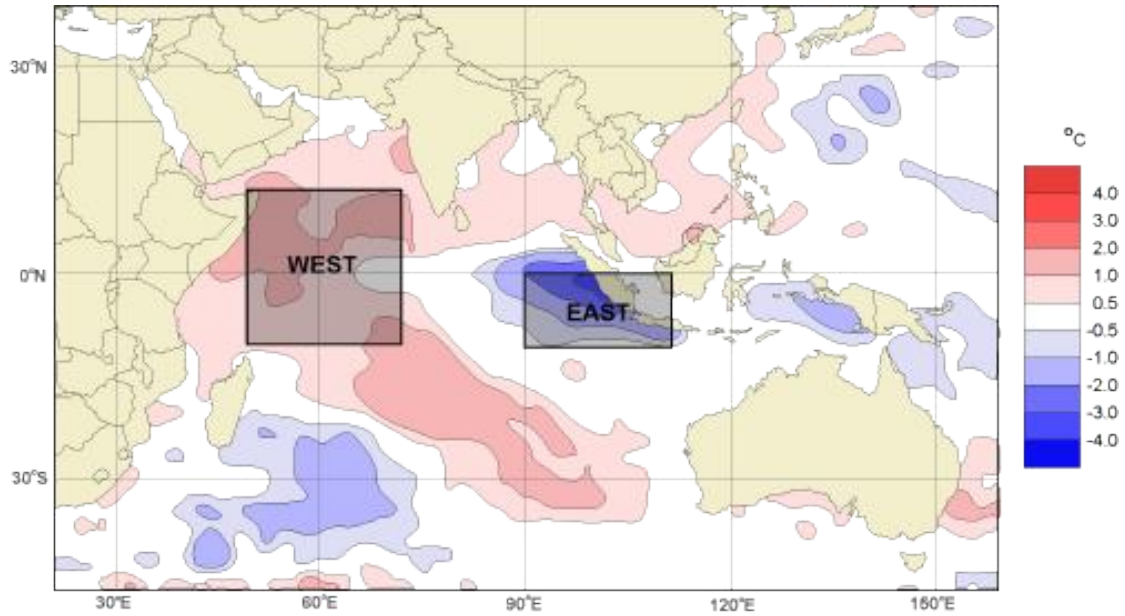


Figure 2.3. The domain for the WIOD and EIOD index.

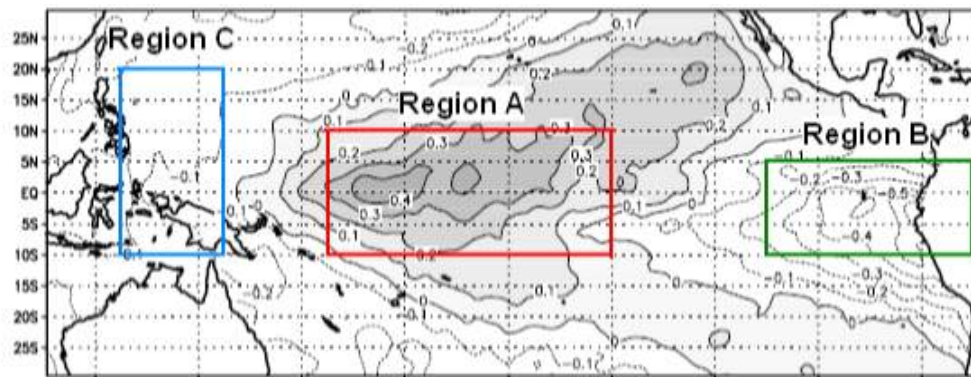


Figure 2.4. The domain for the ENSO-Modoki index.

APCC는 계절예측 정보뿐만 아니라 예측 정확도를 정량적이고 객관적으로 제시하기 위한 다양한 검증 정보 또한 함께 제공하고 있으며, 검증에 사용되는 관측 자료는 Table 2.4~2.6과 같다. 해당 검증 정보는 MME 계절예측 자료가 생산된 이후 검증시스템(Climate Verification System, CVS)을 통해 매월 15~20일 경 생산되며, 생산된 검증 정보는 홈페이지를 통해 제공하고 있으나, MME 참여기관의 정보 공개 정책에 따라 APCC 홈페이지 사용자 로그인을 한 이후에 해당 정보를 확인할 수 있다. 또한, APCC는 계절예측 정보의 신뢰도 향상과 활용성 증진을 위하여 해당 검증시스템을 활용하여 별도의 예측력 평가를 수행하고 있으며, 상세한 검증 기법을 비롯한 검증 영역 등은 고해상도 기후예측 검증시스템을 소개하는 2.1.5절에서 후술하고자 한다.

Table 2.4. Information for NCEP/DOE Reanalysis 2.

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

Table 2.5. Information for CAMS_OPI.

내 용	
출처	ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/data-req/cams_opi_v0208
변수	강수(comb)
기간	1979. 1 ~ 현재 (매월 업데이트)
형식	2.5 × 2.5 degree
참조	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/global_precip/html/wpage.cams_opi.html

Table 2.6. Information for OISSTv2 (NOAA).

내 용	
출처	ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/noaa.oisst.v2
변수	해수면온도(sst)
기간	1981. 12. ~ 현재 (매월 업데이트)
형식	0.25 × 0.25 degree (1440 × 720 longitude/latitude)
참조	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html

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 혹은 CPC 상향장파복사 자료, CPC 강수량 자료, OISST(Optimal Interpolation Sea Surface Temperature) 자료를 사용하여 편차 정보를 제공하고 있다. 기후 지수는 해양·대기·몬순에 대해 제공하고 있으며 Niño3.4 등 태평양 해수면 온도 관련 지수 뿐만 아니라 TNA, TSA, DMI 등 대서양 및 인도양 해수면 온도 관련 지수도 감시하고 있다. 전지구 가뭄 지수 현황은 CAMS OPI(Climate Anomaly Monitoring System and OLR Precipitation Index) 자료를 사용하여 지난 1, 3, 6, 12개월 기간에 대한 표준강수지수(SPI, Standardized Precipitation Index)에 기반하여 제공하고 있다.

2.1.3. 동아시아 지역 확률계절예측시스템 운영

동아시아 지역 확률계절예측시스템은 WMO에서의 지역 규모 계절예측 및 해석이 이루어져야 한다는 권고를 수용하여 2022년에 개발·구축된 시스템이며, 동아시아 지역맞춤형 계절예측 기법을 적용하여 동아시아 지역에 대한 보다 효용성 높은 계절예측 정보를 산출함으로써 실질적인 활용성을 높이고 있다.

본 시스템은 계산 체계와 가시화 체계로 구성되어 있다. 계산 체계는 물리기반 확률예측 정보 다중모델앙상블 예측시스템으로써 동아시아 계절예측에 영향을 줄 수 있는 주요 기후인자로 ENSO와 서태평양 강수변동을 선정하여 선정된 인자들로 하여금 동아시아 기후 영향(climate impact)에 대한 기후예측 모델의 재현성을 평가한 후, 우수한 재현성을 보이는 기후예측 모델을 선별하여 확률론적 다중모델앙상블 예측 정보(기온 및 강수)를 산출하는 방식이다. 기후인자로 ENSO가 선정되는 경우 ENSO EOF 모드의 기후영향 재현성을 각 모델별로 평가하여 모델간 재현성 분포(spread)의 중간값을 기준으로 우수 모델을 선별하고, 기후인자로 서태평양 강수가 선정되는 경우 강수 기후영향의 모델별 재현성을 평가하여 위와 마찬가지로 분포의 중간값을 기준으로 우수 모델을 선별하게 된다. 계산 체계의 산출 과정은 Figure 2.5와 같다.

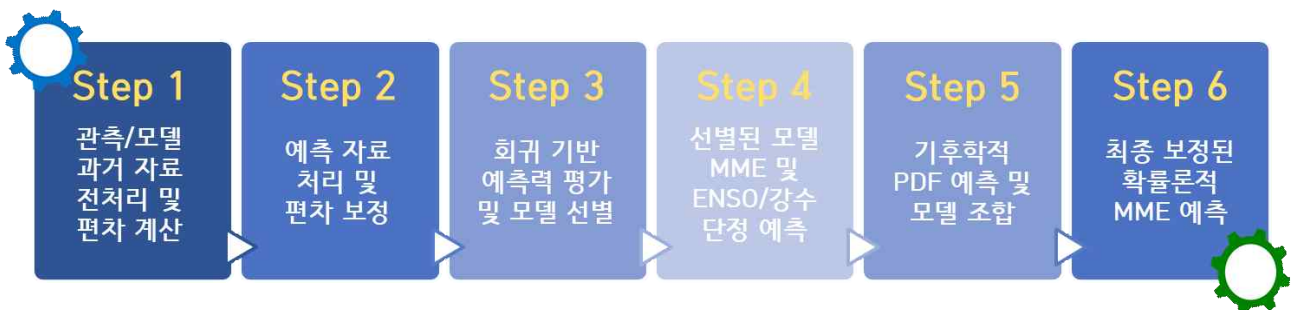


Figure 2.5. Process for calculation part of East Asian customized probabilistic forecast system.

계산 체계하에 동아시아 지역맞춤형 확률계절예측 자료를 산출하기 위해 APCC MME에 참여하는 모델 예측 자료(Table 2.1)를 입력자료로 처방하고 있으며, 여기서 HMC(러시아) 모델

의 경우 해양모델이 접합되지 않은 모델로써 생산되는 해수면 온도 자료가 관측된 해수면 온도를 예측 기간만큼 지속시킨 자료임에 따라 해당 모델은 제외하였고, MGO(러시아) 모델의 경우도 유사한 이유로 제외하였다. 또한, 모델의 재현성을 평가하기 위해 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) 예측력을 분석하였다.

가시화 체계는 동아시아 지역맞춤형 확률계절예측 정보 가시화 시스템으로써 선정된 기후인자와 모델 예측과의 관련성에 대한 시각 정보를 비롯하여 최종적인 동아시아 지역맞춤형 확률계절예측 가시화 자료를 생산하고 있으며, APCC 홈페이지를 통해 제공되는 정보이다.

2.1.4. 기후전망 개선

2013년부터 게시 및 배포를 시작한 APCC 기후전망은 향후 6개월 동안의 전지구 기온 및 강수에 대한 예측뿐만 아니라 해수면온도와 ENSO 예측 정보를 포함하고 있다. 기후전망 디자인은 2020년 한 차례 개선된 바 있으나 타 기관에서 생산하는 기후전망과 비교하여 가독성 및 가시성 향상을 위해 디자인 측면에서의 개선의 여지를 살펴보고 이와 더불어 기후전망 구독자의 현재 기후전망 만족도 및 새로운 디자인에 대한 선호도를 조사하여 기후전망을 개선하고자 한다.

2.1.5. 고해상도 관측자료 전처리시스템 및 계절예측 검증시스템 구축

APCC는 계절예측정보의 신뢰도와 활용성을 높이기 위해 사용자 대상의 수요조사를 실시한 결과, 대다수의 사용자가 고해상도 계절예측정보를 선호함에 따라 APCC MME 참여기관의 협조를 통해 2021년 고해상도($1^{\circ} \times 1^{\circ}$) 계절예측시스템을 구축한 바 있으며, 이후로 시험 운영을 시행해 오면서 2022년 9월부터 APCC 홈페이지를 통해 고해상도 계절예측정보를 처음으로 제공하기 시작하였다. 이에 따라 고해상도 계절예측정보의 신뢰도를 객관적으로 평가하기 위해 기존 저해상도 계절예측정보($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$)의 검증시스템을 확장하여 고해상도 계절예측 검증시스템을 구축하였으며, 저해상도와 고해상도의 검증시스템을 병행 운영하면서 고해상도의 검증 정보를 장기간 축적하여 대표성을 가질 만큼의 충분한 자료를 확보할 수 있도록 내부 시험 운영을 시행하고자 한다.

본 시스템을 통해 검증에 사용되는 예측 자료는 Table 2.1의 APCC MME 참여모델 고해상도 예측 자료와 결정론적 MME(SCM) 및 확률론적 MME(GAUS) 고해상도 예측 자료이다. 정량적인 검증 평가를 수행하기 위한 관측 자료는 ERA-5(2m 기온, 850hPa 기온, 500hPa 지위고도), MERRA2(강수), NOAA OISST(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature; 해수면 온도) version 2로 각 자료에 대한 상세 내용은 Table 2.7~2.8과 같다(NOAA OISSTv2는 Table 2.6).

Table 2.7. Information for ERA-5 (ECMWF).

내 용	
출처	https://cds.climate.copernicus.eu
변수	2m 기온(air), 850hPa 기온(air), 500hPa 지위고도(hgt)
기간	1979. 1. ~ 현재 (매월 업데이트)
형식	0.25 × 0.25 (degree) (1440 × 721 longitude/latitude), 37 levels
참조	- https://doi.org/10.5065/D63B5XW1 - 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.

Table 2.8. Information for MERRA2 (GMAO)

내 용	
출처	https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/datasets?page=1&keywords=MERRA-2
변수	강수
기간	1980. 1. ~ 현재 (매월 업데이트)
형식	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)

계절예측에 대한 검증은 영역별로 수행하게 되며, WMO/CBS와 CORDEX(Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) 영역을 참고하여 최종적으로 12개 지역을 선정하였으며(Table 2.9), 기존 저해상도 검증시스템과 동일하다. 해당 영역은 실시간 예측(forecast)과 과거 재현(hindcast) 모두 동일하게 적용하였으며, Figure 2.6을 통해 구체적인 영역을 확인할 수 있다.

Table 2.9. 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

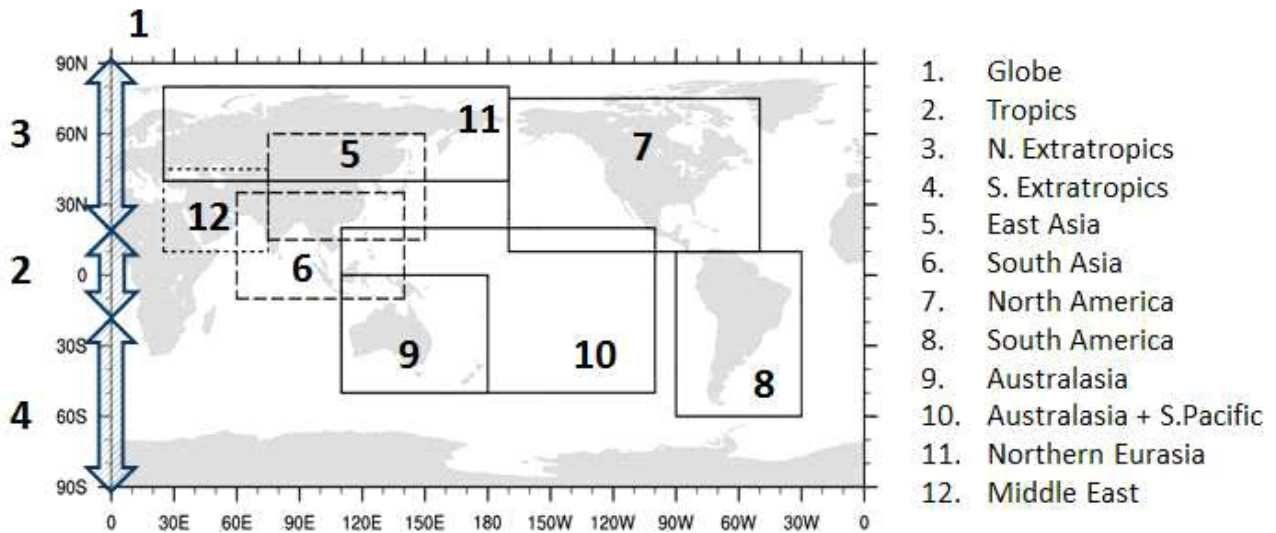


Figure 2.6. The domain map for the verification region.

APCC 계절예측 정보를 검증하기 위한 기법은 결정론적 예측과 확률론적 예측에 따라 적합한 검증 기법을 사용하였으며, WMO/CBS의 권고사항을 우선적으로 고려하였다. 또한, 대체로 기후예측 기관에서 널리 사용하는 기법(Anomaly Correlation Coefficient; ACC, Brier Skill Score; BSS, Heidke Skill Score; HSS, Ranked Probability Skill Score; RPSS)을 추가적으로 적용하여 Table 2.10에 정리하였다.

Table 2.10. Lists of verification methods for APCC high-resolution 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	예측과 관측과의 지수값 비교

2.1.6. MME hindcast 기간 확장을 위한 기반 분석

APCC MME 계절예측 정보는 과거 기후재현(hindcast) 기간(기후평년 기간)에 따른 평균값(기후평년값)을 기준으로 결정론적 예측의 경우 편차값(anomaly), 확률론적 예측의 경우 3분위(평년 이하/비슷/이상) 확률예측값 형태로 제공하고 있으며, hindcast 기간 선정에 따라 기후평년값이 변하므로 예측값에도 영향을 미치게 된다. APCC는 이러한 MME 계절예측 정보를 생산하기 위해 MME에 참여하는 모델의 공통 hindcast 기간을 MME의 hindcast 기간으로 활용하여 왔으며, 참여모델의 구성에 따라 MME hindcast 기간은 소소하게 변화하여 왔다. 하지만 MME에 참여하는 모델이 개발·개선됨에 따라 과거 모델들과 hindcast 기간이 현저히 불일치한 경우가 나타나면서 해당 모델이 MME에 참여할 경우, 기존 MME hindcast 기간 선정 방식으로는 그 기간이 대폭 짧아지기 때문에 해당 모델은 MME에 제외하였고, 이후 점차 제외되는 모델 수가 늘어나자 MME 예측력에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예견되어 각종 민감도 분석 등을 통해 MME hindcast 기간을 1991-2010년으로 고정하는 방식으로 변경(2019년)하였다. 해당 기간과 불일치한 모델인 경우, 불일치한 해에 대해 결측값으로 처리하여 강제적으로 MME에 참여할 수 있게 하였다. 예를 들어, CMCC(이탈리아) 모델의 hindcast 기간은 1993-2016년으로써 MME hindcast 기간(1991-2010년) 대비 불일치한 1991년과 1992년에 대해 결측값으로 채워 MME에 참여할 수 있도록 하였다. 이러한 과정을 통해 2016-2022년 동안의 MME hindcast 기간은 Figure 2.7과 같이 변화하였다. 여기서 매해 1월의 경우 모델들의 초기/입력장 및 예측 기간의 특성상 hindcast 시작해와 종료해가 1년씩 이동하는 특징이 있다.

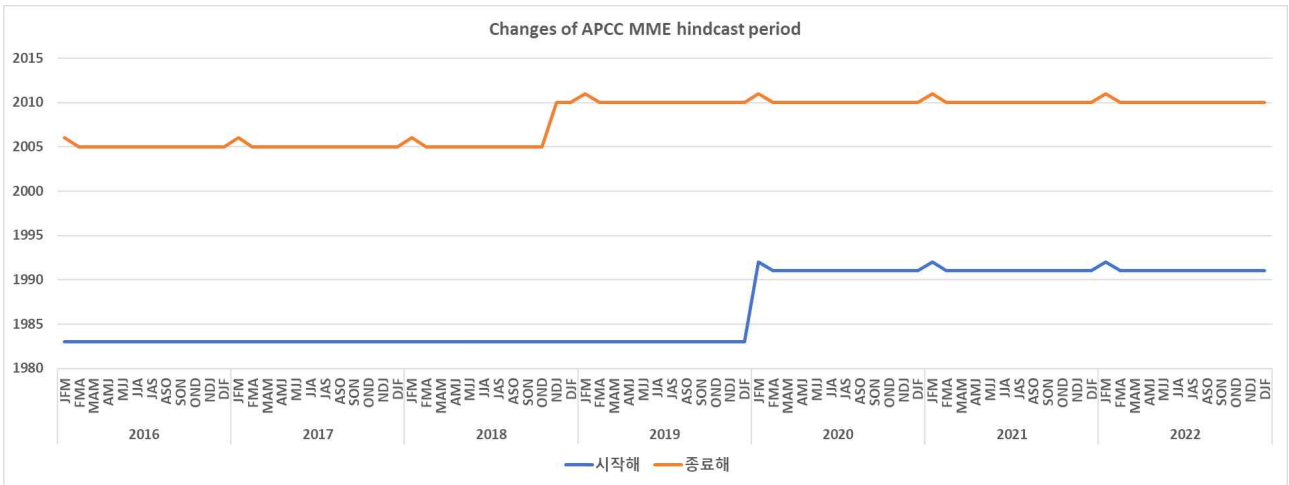


Figure 2.7. Changes of APCC MME hindcast period during 2016–2022.

위와 같은 MME hindcast 기간(1991–2010년) 변경 이후 기후를 대표할 수 있는 기간으로써 해당 기간(20년)이 다소 짧다는 지적이 제기되었다. 실제로 WMO에서는 제안하는 기후평년 기간은 30년으로써 최소 80%인 24년을 사용할 것을 권고하고 있다. 또한, 변경된 MME hindcast 기간은 2010년 이후의 최신 기후를 반영하지 못하고 있다는 지적도 있었다. 이에 본 연구에서는 이러한 지적사항을 보완하기 위하여 다양한 민감도 및 효용성 분석을 통해 APCC MME hindcast 기간의 확장 방안을 제시하고자 한다. MME hindcast 기간 확장에는 다음과 같은 전제 조건을 준수하고자 하였다. 첫째, WMO에서 권고하는 최소 기후평년 기간인 24년을 만족하여야 한다. 둘째, 기존 MME hindcast 기간보다 최근에 가까운 기간으로 설정하여야 한다. 셋째, MME의 참여모델들의 hindcast 결측해를 최소로 하여야 한다. 해당 조건들을 만족하는 방안을 마련하기 위해 우선 MME 참여모델들의 hindcast 기간의 분포 현황을 분석하였다(Figure 2.8).

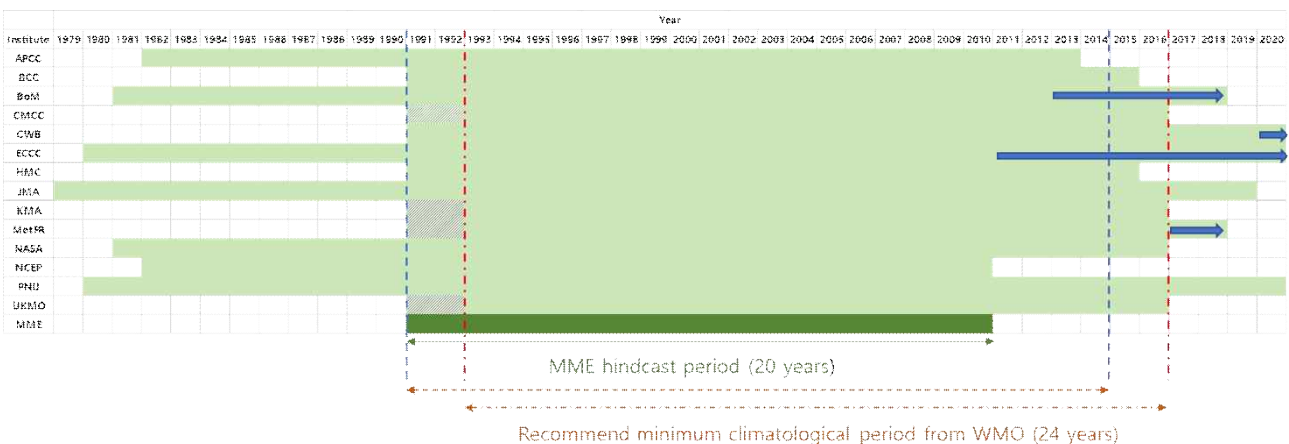


Figure 2.8. Distribution for hindcast period of individual models (bright green) and APCC MME (dark green).

여기서 개별모델의 hindcast 기간은 연두색(bright green)으로 나타내었으며, 모델마다 각기 다른 hindcast 기간 분포가 나타나지만 1993–2010년(18년)의 공통 기간이 발생한다. 기존 MME hindcast는 최소 20년 기간을 확보하기 위해 hindcast 기간이 1993년부터 시작하는 모델 4종

(CMCC, KMA, MetFR, UKMO)에 대해 1991년과 1992년을 결측값으로 처리하여 MME에 처방하는 등 1991-2020년(초록색; dark green)으로 설정하였다. APCC는 hindcast 기간을 확장하기 위해 참여기관에 모델의 hindcast 기간 확대 협조를 요청하였으며, 이 중 BoM, CWB, ECCC, MetFR는 hindcast을 확대(보라색 화살표)하여 제공해주었다. 이러한 현황 분석을 통해 모델 hindcast의 결측해를 최소로 할 수 있는 두 가지 기간을 선정하였고, 일부 모델의 결측해 처리 방안에 따라 아래와 같은 실험 설계를 하였다(Table 2.11).

Table 2.11. 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

확장하고자 하는 기간을 1991-2014년과 1993-2016년으로 나누어 각각 MME1~2, MME3~4로 정의하였고, 해당 기간내 모델의 hindcast 결측해가 있는 경우 전체를 결측값(missing value)으로 처리한 방안을 MME1과 MME3, NCEP hindcast의 결측 기간(2011~2016년)을 과거 forecast 자료로 갈음하고 나머지 모델은 동일하게 결측값으로 처리하는 방안을 MME2와 MME4로 정의하였다. 해당 실험은 Table 2.1에서와 같이 실제 APCC MME에 참여하는 모든 모델의 예측 자료를 사용하였으며, 결정론적 MME(SCM) 및 확률론적 MME(GAUS) 기법을 적용하여 예측력을 평가하고자 하였다. 평가에 사용된 관측자료는 Table 2.4~2.6과 같으며, 여기서 사용된 예측력 평가는 SCM의 경우 ACC(anomaly correlation coefficient)와 RMSE(Root Mean Square Error), GAUS의 경우 ROC(Relative Operating Characteristics) score를 사용하였다.

2.2. BSISO 계절내예측시스템 운영 및 개선

2.2.1. BSISO 계절내예측시스템 운영

BSISO 계절내예측시스템은 NOAA 일별 OLR 자료와 NCEP 850hPa 수평 바람장을 이용하여 북반부 여름철 5~10월 동안 매일 감시, 예측, 검증 BSISO 자료가 생산되고 실시간으로 제공되고 있다. Figure 2.9는 APCC BSISO 운영 체계 및 현업 일정을 모식화 한 그림이다. 먼저 재분석 자료 및 예측자료를 수집하고 1차 자료 품질확인을 거쳐 감시 및 예측시스템이 구동된다. 그리고 매일 현업 모니터링을 통해 일지를 작성하여 현업 이슈를 기록한다. 재분석자료의 자료 수집은 제공기관으로부터 공식 자료 업데이트에 지연이 있기 때문에 감시 기준 날짜는 현재 날짜 기준 평균 3일의 지연이 있으며 감시 날짜를 기준일로 하여 예측 및 검증자료가 생산된다.

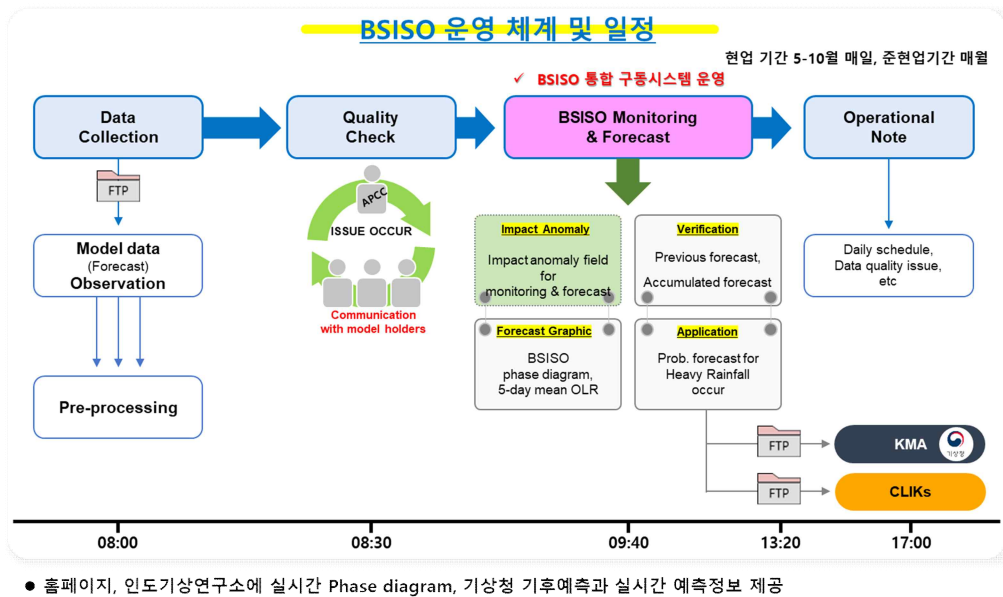


Figure 2.9. APCC BSISO operating system.

현재 BSISO 현업시스템의 예측 참여모델은 Table 2.12와 같다. 각 기관별로 NCEP에서 2개, 호주 기상청 1개, ECMWF 1개, 대만 기상청 1개 모델이 참여하여 총 5개의 참여모델로 APCC BSISO 개별 모델 예측을 수행하고 있다. ECMWF의 경우 올해 앙상블이 101개로 확대되고 자료 제공 주기도 매주 월, 목요일에서 매일 제공으로 변경되었다. 그리고 대만 기상청의 경우 기관명 약자가 CWB (Central Weather Bureau)에서 CWA (Central Weather Administration) 로 변경되었다.

Table 2.12. 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 예보에서의 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 참여모델은 내부적으로 예측 자료 수집 즉시 예측 자료 생산 체계를 마련하였고, 이를 예측 지수를 조기 생산하여 1개월 예보에 활용하고 있다.

2.3. APCC 자체예측모델(SCoPS) 운영 및 예측정보 제공

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

Figure 2.10은 APCC 자체 계절예측 모델인 SCoPS의 운영 체계 및 현업 일정을 모식화 한 그림이다. SCoPS는 매월 7일경 초기 입력자료인 CFSR 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.

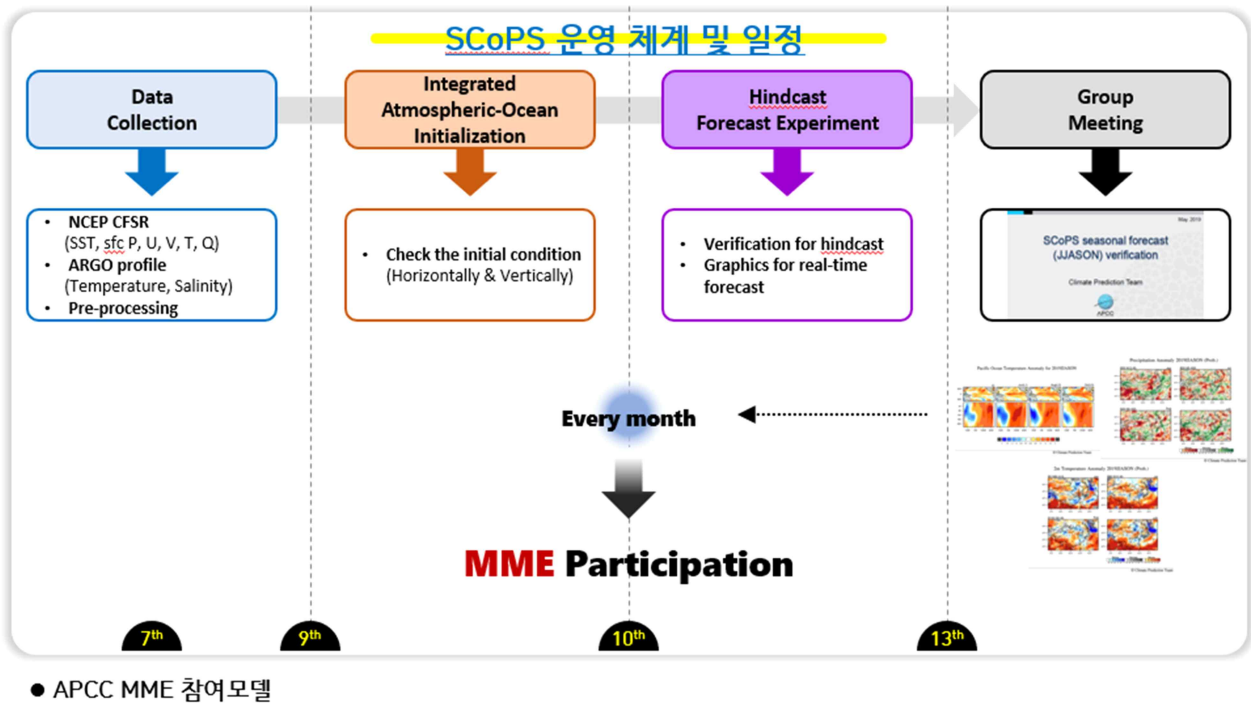


Figure 2.10. APCC in-house model (SCoPS) operating system.

2.3.2. 기상청 슈퍼컴 5호기를 활용한 SCoPS 계절예측 운영체계 구축

APCC는 HPC의 노후화 및 현업 안정성을 위해 그 대체 계산자원으로써 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 환경 설정은 Table 2.13과 같다. APCC HPC에 구축한 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 2.13. 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

2.4. 산불예측시스템 개선 및 말레이시아 지역확장

2.4.1. 산불예측시스템 개선

동남아시아의 산불로 인한 연무는 심각한 환경문제 중 하나이며, APCC(APEC Climate Center)는 아시아 최대섬인 보르네오섬의 4개 지역(Barat, Selatan, Tengah, Timur)의 화재 및 연무의 조기경보시스템(FHEWS, Fire and Haze Early Warning System)을 APN(Asia-Pacific Network) 국제연구 프로젝트를 통해 개발하였다. 인도네시아의 FHEWS는 보르네오섬의 건기에 해당하는 8~10월의 가뭄상태를 예측하는 것을 목표로 APCC의 개별모델을 가장 잘 활용할 수 있는 6개월 리드를 활용할 수 있는 4월을 시작으로 7월까지 예측정보를 제공하고 있다. 2022년에는 GFED(Global Fire Emission Database)가 GFED3.1에서 GFED4.1로 업데이트됨에 따라, GFED를 고해상도 자료인 GFED4.1을 활용할 수 있도록 개선하였다. 본 연구에서는 기존에 산불예측시스템의 강수 입력자료로 활용한 Aphrodite의 관측자료가 2007년을 기준으로 업데이트를 하지 않기 때문에 최신자료를 수집할 수 있는 관측자료로 변경 적용하고자 하였다. 다양한 강수 재분석자료를 비교분석하여 CHIRPS를 최종 선정하였으며, 이를 산불예측시스템에 적용 활용하였다. APCC의 MME(Multi Model Ensemble)을 위해 활용하는 개별모델의 해상도가 기존 2.5°에서 1°로 변경됨에 따라 산불예측시스템에서 활용하는 개별모델의 해상도를 기존 저해상도인 2.5°에서 고해상도인 1°로 변경 적용하여 예측정보를 제공하였다.

2.4.2. 말레이시아 지역확장

말레이시아의 지역확장 요청에 따라 인도네시아 주변의 말레이시아 지역 확장을 위한 시범 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 FHEWS를 말레이시아 지역까지 확장하여 APCC의 홈페이지를 서비스를 제공하기 위한 연구를 진행하였다. 우선, 말레이시아의 실질적인 건기가 인도네시아와 유사한지 건기의 패턴을 파악하여 서비스를 하고자하는 대상 월을 정의하였다. 두 번째로 인도네시아만을 대상으로 구동되면 산불예측 서비스의 전체적인 개선을 통해 말레이시아도 함께 현업으로 구동할 수 있도록 재설계되어 개발되었으며, 홈페이지 또한 개선을 통해 인도네시아와 말레이시아의 화재 및 연무의 조기경보시스템 정보를 제공할 수 있도록 하였다. 말레이시아의 건기 패턴 분석결과 대부분의 말레이시아의 지역에서는 2~4월에 강수량이 낮고 Emission이 높아 건기로 판단하였으며, 해당기간을 대상으로 APCC의 리드타임을 활용한 정보 제공을 10월부터 차년도 1월까지 매월 20일에 월 1회 정보를 APCC 홈페이지를 통해 제공한다. 보다 양질의 APCC 화재·연무 조기경보 예측 서비스 제공을 위해 노력하고 있으며 해당 정보를 통해 국제네트워크 강화에 힘쓰고자 하였다.

2.5. 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현

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

현재 APCC MME 계절예측 정보는 홈페이지를 통해 정적 그래픽 자료로써 제공되고 있으나, 보다 효율적이고 편의성 및 활용성이 강화된 동적 기후정보를 제공하고자 한다. 이러한 기능이 구현되려면 동적 기후정보 웹 콘텐츠 환경이 구현되는 신규 홈페이지를 개발 및 구축과 동시에 동적 기후정보 웹 콘텐츠를 생산하기 위한 체계 구축이 필요하다. 이에 본 연구에서는 동적 기후정보 웹 콘텐츠별 구현 및 표출하기 위한 디지털 자료 생산 체계를 구축하였다. 주요 동적 기후정보 웹 콘텐츠는 MME 기법별 예측장, 참여모델별 예측장, 기후전망 요약맵, 기후감시 지수, 기후 감시 anomaly 평균장이다. 여기서 기후감시 지수와 anomaly 평균장은 기존의 관측자료를 그대로 사용하게 되며, 나머지 MME 기법별 예측장, 참여모델별 예측장, 기후전망 요약맵을 위한 디지털 자료를 재생산 하였다.

먼저 MME 기법별 예측장은 결정론적 MME인 SCM(단정예측)과 확률론적 MME인 GAUS(확률예측)의 3/6개월 실시간 예측(real-time forecast)에 대하여 전 지구 규모의 공간 분포를 표출하며, 각 격자마다 MME 기법별 예측값을 비롯하여 hindcast 기간의 시계열 정보를 표출하게 된다. 따라서 본 동적 기후정보 웹 콘텐츠를 구현하려면 Table 2.2와 같은 MME forecast 및 hindcast 자료가 필요하다. 여기서 기존 정적 기후정보 생산 체계는 AFS 시스템 등에서 산출되는 디지털 자료를 이미 활용하고 있기 때문에 기존 시스템에서 산출되는 예측 자료를 활용하여 자료의 분배 및 취합 과정을 수행하는 체계만을 별도로 구축하고자 하였다.

다음은 참여모델별 예측장에 대한 동적 기후정보 콘텐츠이다. 본 콘텐츠는 MME 참여모델에 대한 3/6개월 실시간 단정예측(편차값; anomaly) 및 확률예측 정보를 전 지구 규모의 공간 분포를 표출하며, MME 기법 예측장과 마찬가지로 각 격자마다 단정예측 및 확률예측값을 비롯하여 hindcast 기간의 시계열 정보를 함께 표출하게 된다. 이를 위해서 Table 2.1과 같은 MME 참여모델별 anomaly 기반의 단정예측과 3분위 확률예측의 forecast 및 hindcast 자료가 필요하며, 기존 정적 기후정보는 단정예측과 확률예측값을 별도로 생산하거나 입력자료로 사용하지 않고 그래픽 자료 생산 프로세스 내 해당 연산 과정이 이루어지는 실정에 따라 단정예측의 경우 모델별 anomaly 자료를 산출하는 시스템을, 확률예측의 경우 모델별 확률 자료를 산출하는 시스템을 구축하고자 하였다.

또한 기후전망 요약맵을 위한 14개 지역별 단정예측 평균값 및 확률예측 평균값과 14개 지역별 hindcast 검증결과를 계산하는 시스템을 함께 구축하였다. 단정예측의 경우 ACC (Anomaly Correlation Coefficient)와 확률예측의 경우 ROC (Relative Operating Characteristic) score를 사용하게 된다.

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 표출 기능을 테스트 하였다.

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

2.6.1. 보정 방법

본 연구에서는 크게 ① 선형추세 보정, 그리고 ② 분위사상기법을 이용하여 기온 계절예측의 장기경향을 보정하고 결과를 비교하여 현업활용방안을 마련하였다. 두 방법 모두 격자 기반으로 적용하여 현업에서의 적용이 용이하도록 하였다. 보정에 앞서 기온의 장기경향을 분석하기 위해 모델, 관측의 기온 자료를 기반으로 선형추세를 분석하였다(김유진 등, 2022). 대상 지역은 동아시아[15° N-60° N, 75° E-150° E]이다.

① 선형추세 방법은 앞서 모델과 관측 기온의 장기적 경향 분석을 토대로 하여 모델의 선형추세를 관측의 선형추세와 비교하여 이를 보정한다. 이는 분석한 내용을 직관적으로 해석하여 모델의 선형추세를 관측의 것으로 대체하여 기온의 온난화를 보정하기에 이해하기에도 쉽고 현업에 적용하는 것도 용이할 것이라 판단된다. 여기서 기온 자료는 관측과 모델의 통계적 특성이 다르므로, 평균을 제거하고 표준편차를 나누어 표준화한 아노말리를 사용한다.

두 번째 방법인 ② 분위사상기법은 앞선 선행연구에서 지역규모모델이나 기후시나리오 모델에서 극한 기후나 평균, 표준편차의 편이를 보정하는 방법으로 많이 쓰이는 것이다(Wood et al., 2004; 송찬영 등, 2021). 분위사상기법은 크게 모수화와 비모수화 방법으로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 모델의 훈련기간인 hindcast 기간이 짧아 모수화하기에는 무리가 있다고 판단되어 비모수화 방법인 경험적 누적분포함수 (empirical cumulative distribution function, ECDF)를 이용하여 매핑을 하였다(Gudmundsson et al., 2012; 송찬영 등, 2021). 본 연구에서는 계절예측의 특징을 가진 표준화된 아노말리, 그리고 분위사상기법에서 보편적으로 쓰이는 원(原) 값, 두 가지를 이용하여 보정하였다.

기온 보정의 훈련기간은 각 발행 시기 개별모델의 hindcast 기간을 가능한 많이 활용할 수 있도록 하였고, 타겟인 보정 기간은 2013년부터 2022년 현재까지이다. 가장 최근인 2022년 12월을 예로 든다면(Table 2.1), 보정의 타겟은 2022년 12월이고, 2022년 MME의 hindcast 기간은 1991-2010년인데 개별모델은 이보다는 길기 때문에 뒷단은 최대한 길게, 시작점은 91년부터 사용하여 최대한 길게 선정하였다. 1991년 이전은 기후 변동성이 최근과 다를 수 있다고 판단하여 사용하지 않았다.

Table 2.14. Hindcast periods of individual models of 2022 Decemter.

individual model	Hindcast period
APCC SCOPS	1982-2013
BCC CSML1.1M	1991-2015
BOM ACCESS-S2	1981-2018
CMCC SPS3.5	1991-2016
CWB TCWB1Tv1.1	1991-2020
ECCC CANSIPsv2.1	1980-2020
JMA MRI-CPS3	1991-2020
KMA GLOSEA6GC3.2	1991-2016
METFR SYS8	1991-2016
NASA GEOS-S2S-2.1	1981-2016
NCEP CFSv2	1982-2010
PNU CGCMv2.0	1980-2021
UKMO GLOSEA6	1991-2016

2.6.2. 관측 자료와 예측력 비교

관측자료는 APCC의 계절예측 검증자료인 NCEP2 reanalysis data(Kanamitsu et al., 2002)를 사용하였다. 단정예측 MME(Deterministic MME, DMME)는 Anomaly Pattern Correlation Coefficient (PCC)를, 확률예측 MME(Probabilistic MME, PMME)는 ROC (Relative Operating Characteristics) score skill을 이용하여 검증하였다.

2.7. 고해상도 MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축

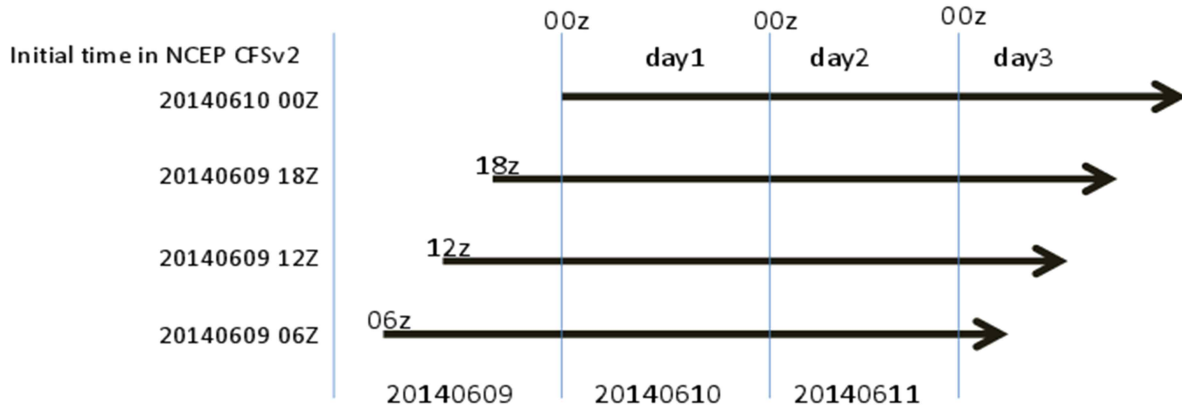
2.7.1. 계절내예측 모델 및 관측자료

본 연구에서 사용된 계절내 예측자료는 본 연구가 시작된 2023년 1월 기준으로 WMO 장기예보 선도센터의 MME 계절내예측시스템 시범운영에 활용 중인 모델을 사용하였다. 또한 본 연구에서는 MME를 위한 공통 과거재현기간을 확장하기 위해 SubX로부터 2010-2016년 NCEP 6시간 원시자료를 추가 수집하였다. 이때 NCEP은 하루에 4개(06/12/18/00z) 자료를 활용하여 S2S와 동일한 일자료를 생성했다(Figure 2.11). WMO 장기예보 선도센터의 자료는 현재 ECMWF S2S data portal (Vitart et al., 2007)로부터 수신된 자료들이며, 각 모델들은 저마다의 예측 스케줄과 전산자원에 따라 모델의 특성이 매우 상이하다(Table 2.15). ECMWF, ECCC, NCEP은 예측(forecast)날짜와 동일한 날짜에 과거재현자료(Hindcast 또는 Reforecast)를 제공하고 있고, 나머지 3개 모델(UKMO, KMA, JMA)은 매일 예측자료를 생산하고 있으며, 과거재현자료는 고정된 날에 생산하고 있다. 즉, UKMO와 KMA은 한 달에 4회 고정된 날짜(1, 9, 17, 25 일)에 제공하고 있으며 JMA는 매월 15일과 마지막 날에 과거재현자료를 생산하고 있다. 또한 본 연구에서는 기후값 민감도 실험을 위해 ECMWF의 월요일 예측자료 및 과거재현자료를 추가 분석하였다.

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 2022년에 생산되어 제공된 6개 모델(ECMWF, ECCC, NCEP, UKMO, KMA, JMA)의 공통 과거재현기간 15년(2002~2010년; hindcast@v2022) 자료를 활용하였다. 또한, 모델의 예측성 등을 검증하기 위한 관측자료로 강수는 GPCP (Global Precipitation Climatology Project), 그 외 변수에 대해서는 Era5 (ECMWF Reanalysis v5; Hersbach et al. 2020)를 사용하였으며, 이때 자료의 시간 및 공간 해상도는 모델자료와 동일하게 변환하여 사용하였다. 또한, 본 연구에서는 MME 계절내예측 방법으로 결정론적 예측을 수행하였으며, 개별 참여모델의 예측값에서 공통 과거재현기간(15년)의 기후값을 뺀 편차값을 단순 평균하는 방법을 사용하였다.

The forecast days in archives for S2S

e.g. the archive for initial date June 10, 2014 ==20140610



*** The forecast time steps for the forecast target days (day1, day2, day3...) from the above 4 initial times are archived as the same as that started at 00z 20140610. For example, day1 is step 0-24.**

Figure 2.11. NCEP hindcasts are initialized at 0, 6, 12, and 18Z. These four starting times are combined to make a 4-member ensemble.

Table 2.15. Description of subseasonal to seasonal forecast models used in the study.

CPC Name	Center	Forecast Frequency	Forecast Time range	Forecast Ens. Size	Hindcast Frequency	Hindcast Ens. Size	Hindcast period
ECMWF	ECMWF	2/week (Mon, Thu)	0-46	51	2/week (Mon, Thu)	11	2002-2016
Exeter	UKMO	Daily	0-60	4	4/month (1, 9, 17, 25)	7	1993-2016
Montreal	ECCC	Weekly (Mon, Thu)	0-32	21	weekly (Thu)	4	2001-2020
Seoul	KMA	Daily	0-60	4	4/month (1, 9, 17, 25)	3	1993-2016
Tokyo	JMA	Weekly (Wed)	0-33	50	2/month (15, last day)	13	1991-2010
Washington	NCEP	Daily	0-44	16	1/week (Thu)	4	1999-2010

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 Correlation Coefficient), 제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE) 지수를 적용하였고, 계절내 예측의 전반적인 성능 평가를 위해 8개 지역으로 나누어 분석하였다(Table 2.16).

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 PCC/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 제곱근오차

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

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

Table 2.16. 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. SCoPS 계절내예측자료 생산을 위한 기반체계 마련

SCoPS 계절예측 모델에서 앙상블, 예측 기간, 제공 주기, hindcast 기간 등을 타 기관 계절내예측모델과 비교하여 현업 실현 가능한 범위내에서 계절내 예측모델로써 활용 가능성이 있는지 조사하였다. 그리고 설계한 계절내 예측시스템을 실제 현업 스크립트에 적용하고 구동해 봄으로써 MME 생산 일정 내에 SCoPS 계절내자료 생산 및 제공이 가능한 지 테스트를 하였다.

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 WMO 장기예보 다중모델앙상블 선도센터(LC-LRFMME, WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble)로 지정되었다.

WMO 장기예보 선도센터는 각 GPC에서 생산하는 장기예보 자료를 수집하고, MME 기법을 개발하여 서비스하고, 각 GPC의 예측자료와 MME 예측자료를 일관된 형태로 제공하는 ‘one-stop shop’ 이 되는 것을 궁극적인 목표로 하여 운영되고 있다 (Graham et al., 2011). 매달 ‘one-stop shop’ 으로서의 WMO 장기예보 선도센터 역할을 수행하기 위해 각 GPC들로부터 기후예측자료를 수집하고 MME 예측자료를 생산하여 매월 15일경에 WMO 장기예보 선도센터 누리집(www.wmolc.org)를 통해 디지털 자료와 그림 형식의 다중모델앙상블 예측자료를 제공하고 있다. 또한 WMO 장기예보 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 사용자에 제공되고 있다. WMO 장기예보 선도센터에서 한달 동안 주기적으로 수행되는 계절예측 자료 수집에서부터 최종 계절예측정보를 회원국에게 제공하는 일련은 과정은 Figure 2.12와 같다.

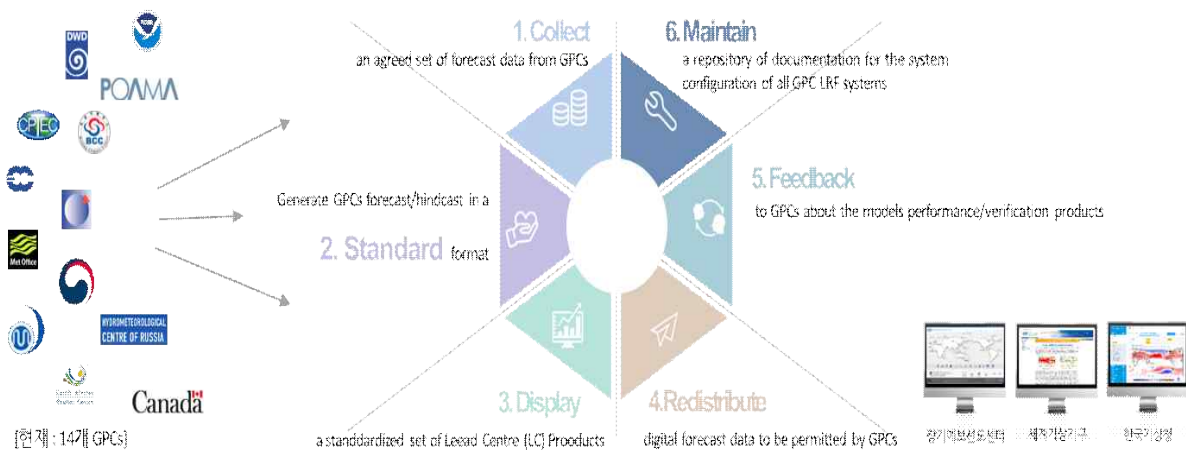


Figure 2.12. Forecast procedures at WMO LC-LRFMME.

WMO 장기예보 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 2.17). 15개 GPC의 forecast와 hindcast 자료에 대한 표준화를 완료한 후, 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 WMO 장기예보 선도센터 누리집에서 확인 할 수 있어, 본 보고서에는 실지 않는다. WMO 장기예보 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). 이 중 hindcast에 대한 검증은 공통기준기간인 1993-2009년에 대해 계산된다. 검증에 사용되는 재분석 관측 자료는 forecast와 hindcast에 따라 다르며, Table 2.18과 2.19에 자세히 나타내었다. WMO 장기예보 선도센터 자료의 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 WMO 장기예보 선도센터에서는 WMO 회원국의 요구에 부합하는 고품질 서비스를 안정적으로 제공하는 역할과 함께 계절예측정보의 활용성 증대를 위한 국내·외 협력 업무를 수행하고 있다. 따라서 본 과제에서는 2023년 APCC가 수행한 WMO 장기예보 선도센터 운영의 결과인 개별모델의 검증결과를 토대로 전반적인 내용과 MME 시스템의 개선 사항, 그리고 계절예측정보의 활용성 증대를 위한 국내·외 협력업무 수행 결과를 정리하였다.

Table 2.17. Characteristics of seasonal forecast model from GPCs.

<2023년 11월 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		SEASS	GloSea6-GC3.2	ACCESS-S2	CanSIPSv2.1	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)	2.5°X2.5° (T126L42)	1.0°X1.0° (Tco319L91)	1.0°X1.0° (N216L85)	N216L85 (N216L85)	2.5°X2.5° (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	UV200 UV500 UV850 h200 h850 t200 t500 olr		U850 V850 U850 V850	U850 U500 U200 V850 V500 V200 H850 H200	U850 V850 U200 V200	U850 V850 U200 V200	U850 V850 U200 V200	U850 V850 U200 V200	U850 V850 U200 V200	-	U850 V850 U200 U300 icfr	U850 V850 U200 V200	U850 V850 U200 V200
Forecast														
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	20	41	50	40	82	50	51	40
Hindcast														
Hindcast Period	1991-2015	1993-2016	1981-2010	1993-2016	1993-2016	1981-2018	1980-2020	1991-2015	1993-2019	1982-2009	1993-2016	1991-2020	1993-2018	1982-2010
Ensemble size	24	40	10	25	28	3	20	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 2.18. 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 2.19. 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. 아태지역 기후예측 기술지원 및 협력

APCC가 생산하여 제공하는 다양한 기후정보와 서비스의 활용성을 확대하고, 서비스의 잠재적 신규사용자를 확보하기 위하여 기후정보 생산 및 활용 사용자 워크숍을 개최하였다. 또한 2015년부터 태평양도서국 지역에서 다양한 프로젝트를 수행하며 PICASO(Pacific Island Countries Advanced Seasonal Outlook) 시스템 개발 및 CLIK-P(Climate Information ToolKit for the Pacific) 보급을 통해 태평양도서국 맞춤형 기후정보서비스를 지원하고 있으며, 농업기후정보를 제공하는 OSCAR(Tailored System of Climate Services for Agriculture) 시스템을 개발하여 공식 이양하였다. 태평양도서국 내 연구사업 추진 뿐 아니라 지속적인 지역 기후 서비스 방향

성 및 현황 파악 등의 네트워크 활동의 증가에 따른 체계적 업무 추진 및 관리가 필요하며, APCC의 전문성에 부합하는 활동을 추진하기 위하여 태평양 네트워크 TF를 구성하여 2022년부터 운영하고 있다.

2.8.4. 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 실무 그룹별 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. APCC에서는 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 11개국 15개의 MME 참여기관의 협조를 바탕으로 각 모델의 예측 자료를 수집하고 가공하여 APCC MME 계절예측시스템(Automated Forecast System, AFS)을 통해 결정론적 및 확률론적 MME 기법을 적용한 고품질 계절예측 정보를 매일 생산하며, 2023년 기준 총 12회의 계절예측 정보를 홈페이지 및 자료서비스 플랫폼(CLIKs)을 통해 제공(매일 15일경)하였다. MME 계절예측 정보의 안정적이고 원활한 생산 및 제공을 위해 모델별 자료 수집일, 변경 및 특이사항, 작업 수행일, MME 참여모델 목록 등을 정리한 별도의 현업일지(Figure 3.1)를 매일 작성하여 비치하고 있으며, MME 계절예측 정보 제공일 이전에 관련 현황 및 이슈 등을 점검하는 과정을 거친 뒤 최종적으로 제공하는 체계로 운영되었다.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
					2023JFMAMJ	2023FMAMJJ	2023MAMJJA	2023AMJJAS	2023MJJASO	2023JJASON	2023JASOND	2023ASONDJ	2023SONDJF	2023ONDJFM	2023NDJFMA	2023DJFMAM	
1	TASK	MODEL	DATE	DATE	DATE	DATE	DATE	DATE	DATE	DATE	DATE	DATE	DATE	DATE	DATE	DATE	
2	CMS	가을 감시(SPI)	12/12	1/13	2/13	3/7	4/6	5/9	6/13	7/11	8/9	9/11	10/11	11/7			
3		기본 분석장(1,3mon)	12/12	1/13	2/13	3/7	4/5	5/9	6/5	7/11	8/9	9/11	10/11	11/7			
4		기후지수 산출	12/12	1/13	2/13	3/7	4/5	5/9	6/6	7/11	8/9	9/11	10/11	11/7			
5		기본 분석장(1주차)	12/5(11/24-11/30)	1/2(12/22-12/28)	2/7(1/26-2/1)	3/6(2/23-3/1)	4/3(3/23-3/29)	5/2(4/20-4/26)	6/5(5/25-5/31)	7/3(6/22-6/28)	8/7(7/27-8/2)	9/4(8/24-30)	10/4(9/21-27)	11/6(10/26-11/1)			
6		기본 분석장(2주차)	12/12(12/1-12/7)	1/9(12/29-1/4)	2/13(2/2-2/8)	3/13(3/2-3/8)	4/10(3/30-4/5)	5/8(4/27-5/3)	6/13(6/1-6/7)	7/10(6/29-7/5)	8/14(8/3-9)	9/11(8/31-9/6)	10/10(9/28-10/4)	11/13(11/2-8)			
7		기본 분석장(3주차)	12/19(12/8-12/14)	1/16(1/5-1/11)	2/20(2/9-2/15)	3/20(3/9-3/15)	4/17(4/6-4/12)	5/15(5/4-5/10)	6/19(6/8-6/14)	7/17(7/6-7/12)	8/21(8/10-16)	9/18(9/7-13)	10/16(10/5-11)	11/20(11/9-15)			
8		기본 분석장(4주차)	2/26(12/15-12/22)	1/25(1/12-1/18)	2/27(2/16-2/22)	3/27(3/16-22)	4/26(4/13-4/19)	5/23(5/11-5/17)	6/28(6/15-6/21)	7/24(7/13-7/19)	8/28(8/17-23)	9/25(9/14-20)	10/23(10/12-18)	11/27(11/16-22)			
9		기본 분석장(5주차)		1/30(1/19-1/25)					5/30(5/18-5/24)		7/31(7/20-7/26)						
10																	
11		PRE-PROCESSING	APCC SCoPS 1982-2013	12/12	1/12	2/13	3/10	4/11	5/12	6/12	7/11	8/11	9/11	10/13	11/10		
12	BCC BCC_CSM1.1m 1991-2015		12/15	1/13	2/13	3/15	4/17										
13	BoM ACCESS-S2 1981-2016		12/2	1/3	2/3	3/3	4/2	5/2	6/2	7/2	8/2	9/2	10/2	11/2			
14	CMCC CMCC_SPS3.5 1993-2016		12/13	1/12	2/12	3/12	4/13	5/12	6/12	7/12	8/14	9/13	10/14	11/13			
15	CWA TCWATv1.1 1991-2020		12/4	1/3	2/3	3/2	4/1	5/2	6/1	7/3	8/1	9/1	10/1	11/1			
16	ECCC CanSIPsv2.1 1980-2020		11/30	12/31	1/31	2/28	3/31	4/30	5/31	6/30	7/31	8/31	9/30	10/31	11/31		
17	HMC SL-AV 1991-2015		12/22	1/14	2/11	3/14	4/14	5/12	6/14	7/14	8/12	9/15	10/12	11/14			
18	JMA MRI-CPS3 1979-2019		12/11	1/11	2/11	3/11	4/11	5/11	6/11	7/11	8/11	9/11	10/11	11/11			
19	KMA GloSea6GC3.2 1993-2016		12/6	1/10	2/7	3/14	4/11	5/11	6/7	7/11	8/8	9/13	10/10	11/7			
20	METFR SY88 1993-2018		12/13	1/13	2/13	3/13	4/13	5/13	6/13	7/13	8/10	9/10	10/10	11/10			
21	NASA GEOS-S2S-2.1 1981-2016		12/5	1/4	2/14	3/6	4/4	5/1	6/9	7/6	8/5	9/6	10/6	11/6			
22	NCEP CFSv2 1982-2010		12/5	1/13	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6	7/6	8/6	9/6	10/6	11/6			
23	Phu-Phu CGCMv2.0 1980-present		12/9	1/12	2/10	3/24	4/11	5/17	6/13	7/10	8/11	9/8	10/11	11/12			
24	UKMO GloSea6 1993-2016		12/11	1/11	2/11	3/11	4/11	5/11	6/11	7/11	8/11	9/11	10/11	11/11			
25	AMSTEX SINTEX-F 1983-2015			1/12			4/14	5/12	6/14	7/10	8/22	9/13					
26	JMGO MGOAM-2 1979-2004		12/1	1/9	2/3	3/6	4/3	5/17	6/5	7/3	8/4	9/4	10/2	11/7			
27	MME		KMA	12/14	1/14	2/14	3/14	4/14	5/14	6/14	7/17	8/14	9/15	10/16	11/15		
28			APCC	12/14			3/14	4/14	5/14	6/14	7/17	8/14	9/15	10/16	11/15		
29	ENSO 경보	Middle	12/14	BCC, HMC MME 불일 중 12종 참여			3/14	4/14	5/14	6/14	7/17	8/14	9/15	10/16	11/15		
30		Last	12/30			3/14	4/28	5/31	6/30	7/31	8/31	9/27	10/31	11/30			
31	VERI	HCST	12/14			3/14	4/14	5/16	6/14	7/20	8/21	9/20	10/20	11/20			
32		RT FCST	12/14	1/15	2/14	3/14	4/14	5/16	6/14	7/20	8/21	9/20	10/20	11/20			
33	OUTLOOK		12/14	1/15	2/14	3/14	4/14	5/14	6/14	7/14	8/14	9/14	10/14	11/14			

Figure 3.1. The operation log of the APCC MME prediction system.

사용자 수요 만족을 위해 2021년에 개발된 고해상도 MME 계절예측시스템은 저해상도(2.5° × 2.5°)와 고해상도(1.0° × 1.0°) 두 가지 해상도의 예측 자료를 병행하여 생산하고 있으며, 저해상도 예측 자료의 경우 과거부터 현재까지 지속적으로 제공해오는 검증 정보를 생산하는데 활용되고, 대부분의 계절예측 정보는 고해상도의 예측 자료를 기반으로 한다. 이러한 과정으로 생산된 2023년 MME 계절예측 정보에 참여한 기관 및 모델 현황은 다음과 같다 (Table 3.1).

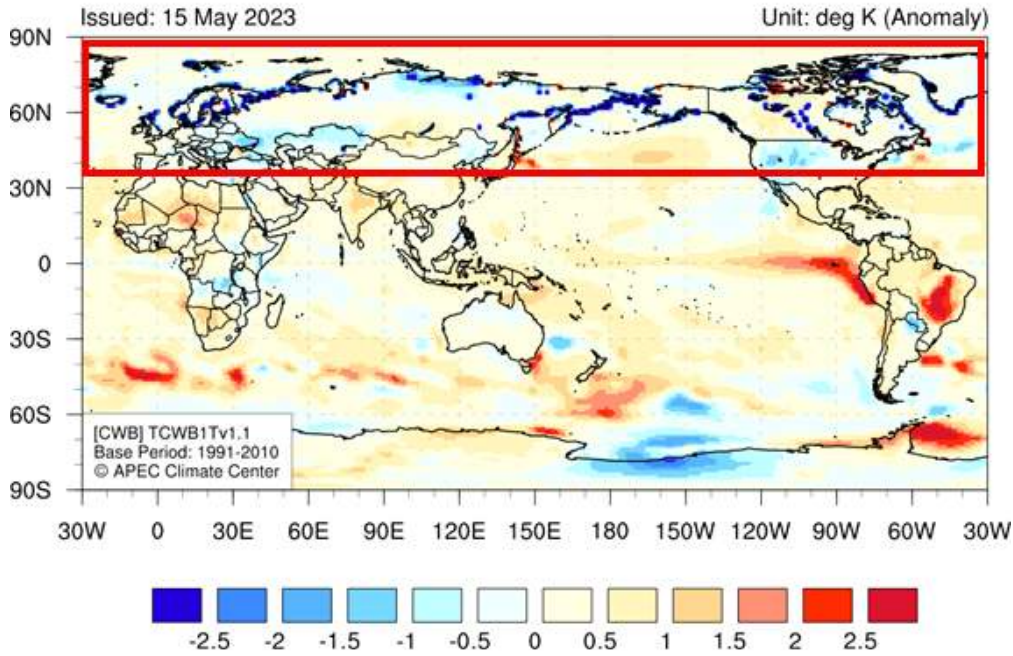
Table 3.1. Lists of participating in APCC MME for 2023JFMAMJ-2023DJFMAM.

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, UKMO	11	6.15
2023ASONDJ	APCC, BoM, CMCC, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	12	7.17
2023SONDJF	APCC, BoM, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	11	8.16
2023ONDJFM	APCC, BoM, CMCC, ECCC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	11	9.15
2023NDJFMA	APCC, BoM, CMCC, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU, UKMO	12	10.16
2023DJFMAM	APCC, BoM, CMCC, ECCC, HMC, JMA, KMA, MetFR, NASA, NCEP, PNU	11	11.15

여기서 예측 계절별 불참한 기관(모델)은 자료 제공(수집) 지연 및 자료 이상 등의 사유로 불참 및 제외되었으며, 최대한 많은 기관(모델)이 참여할 수 있도록 상시적으로 예측 자료에 대한 모니터링을 통해 상호간 피드백을 매년 강화하고 있다.

대만기상청(CWA)의 경우 2023JJASON 예측 계절부터 자료에 이상이 확인됨에 따라 MME 참여모델에서 제외하였다. CWA 예측 편차장을 분석한 결과, Figure 3.2에서와 같이 북위 30도 이상의 영역의 해안선 부근에서 이상치(outlier)가 나타나는 것을 확인하였으며, 해안선 부근에서 forecast 자료와 hindcast 자료의 값의 크기 차이가 큰 것으로 나타났다. 이는 2m 기온 및 지표 기온 변수에서만 나타나는 현상이며, 특히 5월~11월 예측 기간에서 두드러지게 나타나는 것을 확인하였다. 해당 문제에 대한 구체적 원인을 파악하기 위해 CWA와 공동 분석을 수행하였으며, 그 결과 대기모델과 해양모델의 접합 과정에서의 발생한 문제인 것으로 나타났다. CWA는 해당 문제를 해결하기 위한 기술적 방안을 모색하고 있으며, APCC는 비록 2m 기온 및 지표 기온 변수에 한정된 문제이지만 전체 자료에 대한 신뢰성이 저하될 수 있기에 해당 문제가 해결되기 전까지 MME 참여모델에서 제외하도록 하고, 단일 모델 예측정보는 계속해서 제공하는 것으로 하였다.

Surface Temperature for June 2023



Temperature at 2m for June 2023

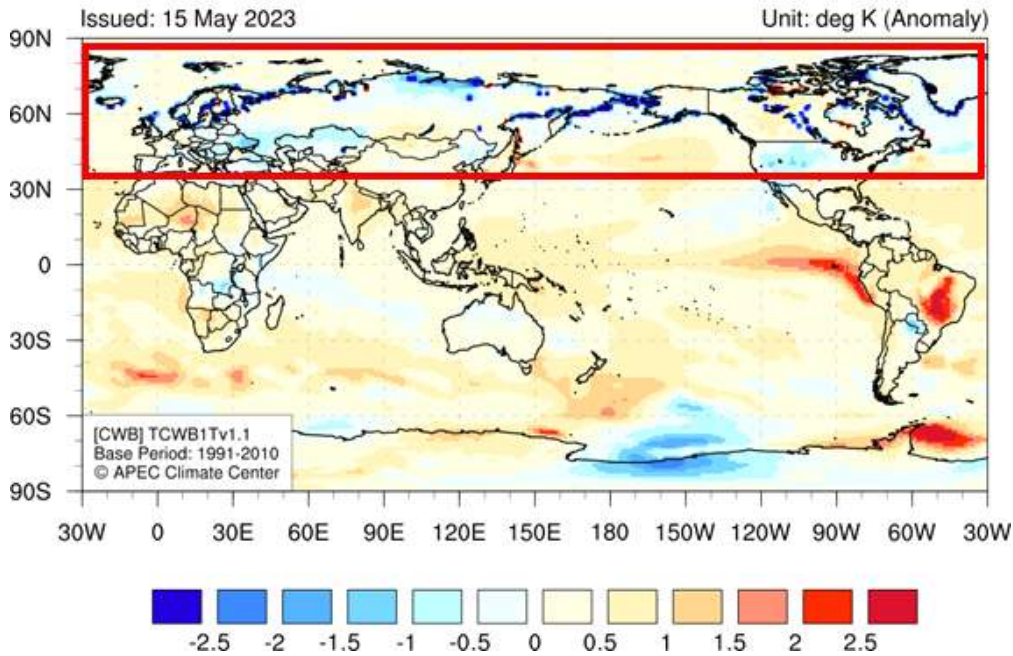
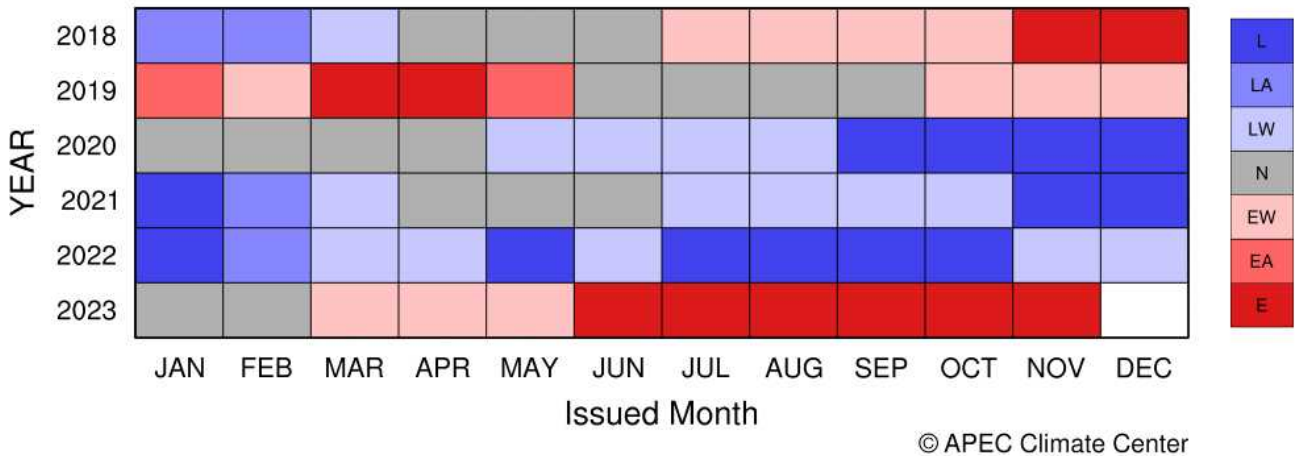


Figure 3.2. Examples of outliers near the coastal line in the CWA (CWB) model's forecast. (top) surface temperature, (bottom) 2-m temperature.

또한, 대만기상청은 2022년 10월부터 기관의 승격으로 기관명이 CWB(Cental Weather Bureau)에서 지금의 CWA(Central Weather Administration)로 변경됨에 따라 예측정보의 제공 수단인 홈페이지 및 자료서비스 플랫폼(CLIKs)에 해당 변경 사항을 적용함으로써 기존 정보와 혼동 없이 제공하도록 하였다.

2022년부터 ENSO 경보 정보의 개선을 통해 개선된 경보 정의와 더불어 실시간 해수면 온도 정보의 반영을 위해 매월 2회(15일, 월 말) 제공하고 있으며, 2023년에도 동일하게 운영하여 총 24회의 ENSO 경보 정보를 제공하였다. 특히 2023년의 경우 비교적 강한 엘니뇨가 발달한 해로써 ENSO 경보 정보의 중요성은 더욱 크다고 할 수 있다. APCC 홈페이지를 통해 제공된 2023년의 ENSO 경보 정보는 Figure 3.3과 같다.

APCC ENSO Alert History



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 2018~November 2023.

APCC에서 제공하는 ENSO 경보 정보뿐만 아니라 타 기관(BoM, NIWA, NOAA)에서도 유사한 경보 정보를 제공하고 있다. Figure 3.4는 PMC(The Pacific Meteorological Council)에서 제공하는 4개 기관이 발표하는 ENSO 경보 정보를 비교한 그림이다(www.pacificmet.net/enso-tracker). 관측된 Nino3.4 지수를 살펴보면 2022년 11월부터 2023년 3월까지 음의 값(라니냐)이 점차 회복되어 중립상태가 되며, 2023년 4월부터 양의 값(엘니뇨)으로 점차 커지면서 2023년 11월에는 지수값이 +1.5가 넘는 엘니뇨 상태로 발달한 것으로 나타났다. APCC를 제외한 나머지 기관에서는 라니냐가 쇠퇴하여 중립이 되는 2022년 11월~2022년 3월까지 라니냐 단계를 경고하였지만 APCC는 라니냐 주의(watch)에서 중립(Neutral)을 내다보면서 비교적 관측과 유사한 경보 정보를 제공하였다. 또한, NIWA와 BoM은 2023년 4월 이후 발달하는 엘니뇨에 대해 주의(Watch)-경계(Alert)-엘니뇨 단계 순으로 엘니뇨를 다소 보수적으로 전망한 데에 비해 APCC와 NOAA는 2023년 5월까지 엘니뇨 주의(Watch)에서 그 이후 곧바로 엘니뇨 단계를 경고하면서 관측과 유사하게 전망하였음을 알 수 있다. 이처럼 APCC에서 제공하는 ENSO 경보 정보는 타 기관과 비교적 신속하고 정확하게 엘니뇨/라니냐의 발달/쇠퇴 정보를 제공함에 따라 예측 기관으로써 경쟁력이 강화되고 있음을 시사하고 있다.

Pacific Regional Climate Centre ENSO tracker

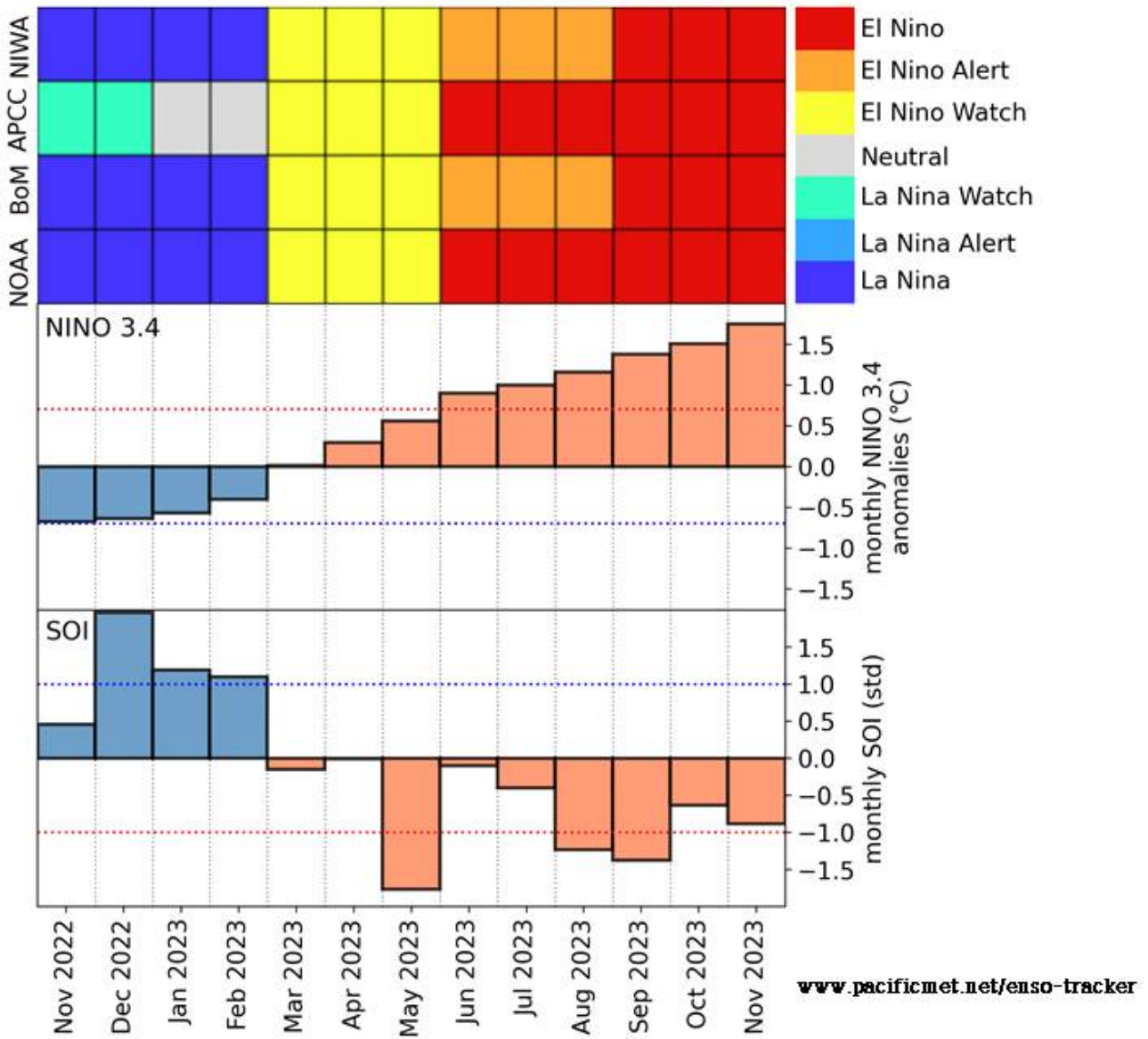


Figure 3.4. ENSO Alert information for each institution (NIWA, APCC, BoM, and NOAA) provided by PMC.

APCC는 MME 계절예측 정보의 신뢰성을 높이고 활용성을 강화하기 위해 매년 MME 계절예측 정보의 예측 수준을 진단하고 개선점을 모색하고 있다. 예측 수준 진단에는 당해연도 결정론적 및 확률론적 MME의 예측자료와 이를 평가할 수 있는 관측자료가 수집되는 다음 해 3월에 실시하고 있으며, 2023년 3월에 2022년의 MME 계절예측 정보의 예측력을 평가 및 분석하였다. 먼저 결정론적 MME의 최근 10년 동안 hindcast 예측력(ACC)을 기온과 강수에 대해 살펴보았다(Figure 3.5). APCC MME의 hindcast 예측력은 과거부터 꾸준히 향상되어음을 확인할 수 있으며, 2013년 대비 전구 기온 13.93%, 전구 강수 21.06%가 향상하였다.

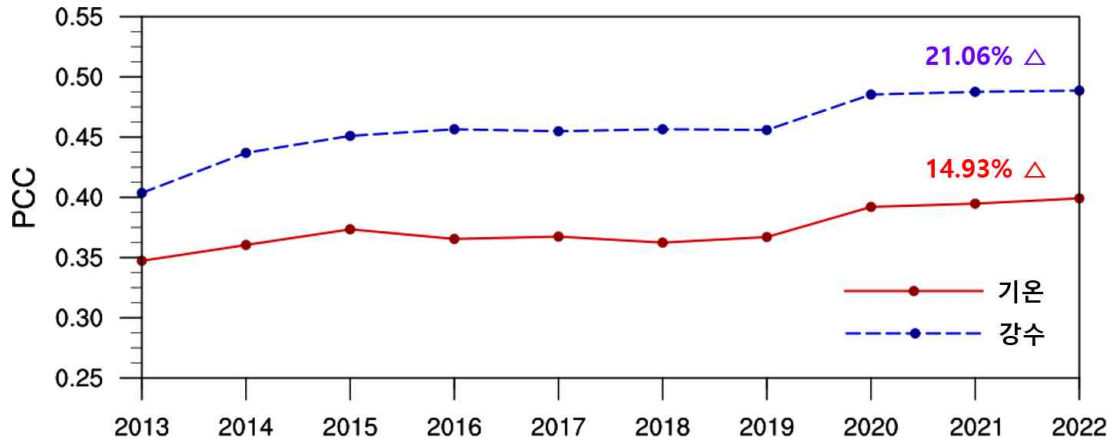
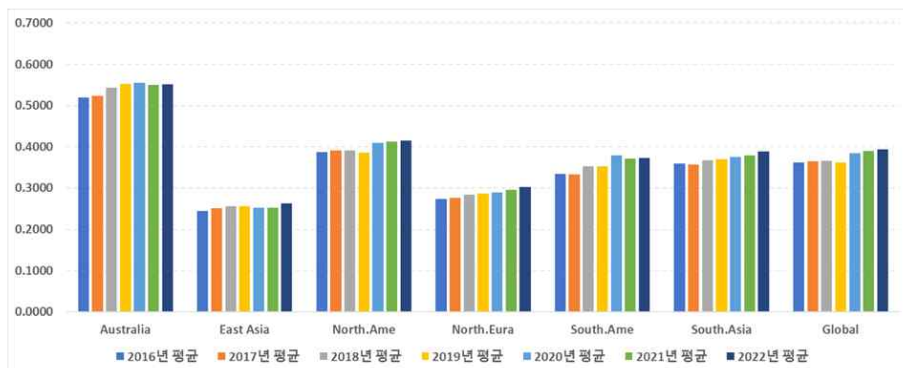


Figure 3.5. Changes of APCC MME hindcast prediction skill (ACC) during 2013 to 2022 for 2-m temperature (red) and precipitation (blue).

전구뿐만 아니라 지역별 예측력도 함께 평가하였다. 다소 hindcast 기간의 차이가 발생한 기간을 제외하여 최근 7년(2016년~2022년)에 대해 6개 지역(남아메리카, 북아메리카, 북유라시아, 동아시아, 남아시아, 호주)의 예측력을 분석한 결과, 기온의 경우 동아시아 지역을 제외한 나머지 지역에 대해 예측력이 향상되어 왔으며, 강수의 경우 호주, 동아시아, 남아시아 지역의 예측력이 향상되어 있음을 확인할 수 있었다(Figure 3.6).

(a) T2m



(b) PREC

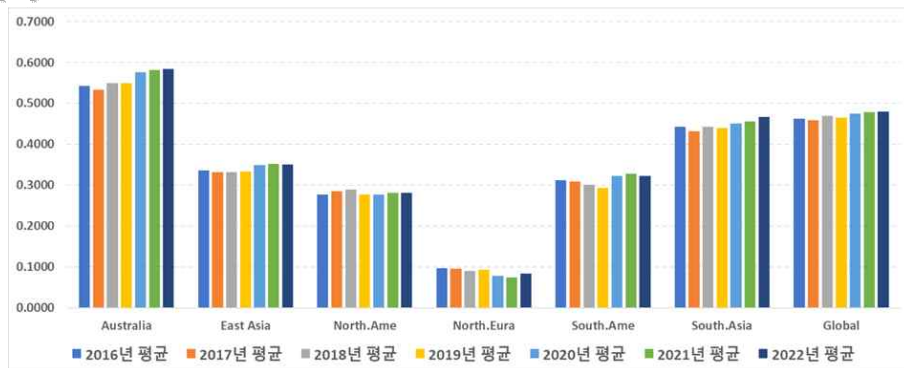


Figure 3.6. Changes of regional (Australia, East Asia, North America, North Eurasia, South America, and South Asia) APCC MME hindcast prediction skill (ACC) during 2016 to 2022 for 2-m temperature (a) and precipitation (b).

실시간 예측(real-time forecast)에 대해서도 결정론적 MME와 참여모델의 예측력(ACC)을 함께 평가하였다. Figure 3.7은 2008년부터 2022년까지 850hPa 기온과 강수의 MME 및 참여모델별 forecast에 대한 예측력을 나타낸 그림으로써 검정색 점과 실선은 MME, 색상 점은 MME 참여모델의 예측력을 의미한다. 기온 및 강수 모두 MME의 예측력이 참여모델에 비해 대체로 높게 나타나며, 전체 기간 평균 예측력은 기온 0.46, 강수 0.37로 나타났다. 이러한 예측력은 ENSO의 발생 강도와 밀접한 연관이 나타나는데 Nino3.4 지수(하늘색 실선)의 시계열과 MME 예측력의 시계열의 유사성(Time Correlation Coefficient, TCC)을 살펴보면, 기온의 경우 TCC가 0.225, 강수의 경우 TCC가 0.604로써 95% 유의수준 하에 통계적으로 유의한 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 기온보다 강수의 예측력이 Nino3.4 지수와 시간 상관성이 더 높은 것으로 나타났다. 즉, ENSO 강도가 높을 때 기온과 강수의 예측력이 높은 경향을 보인다.

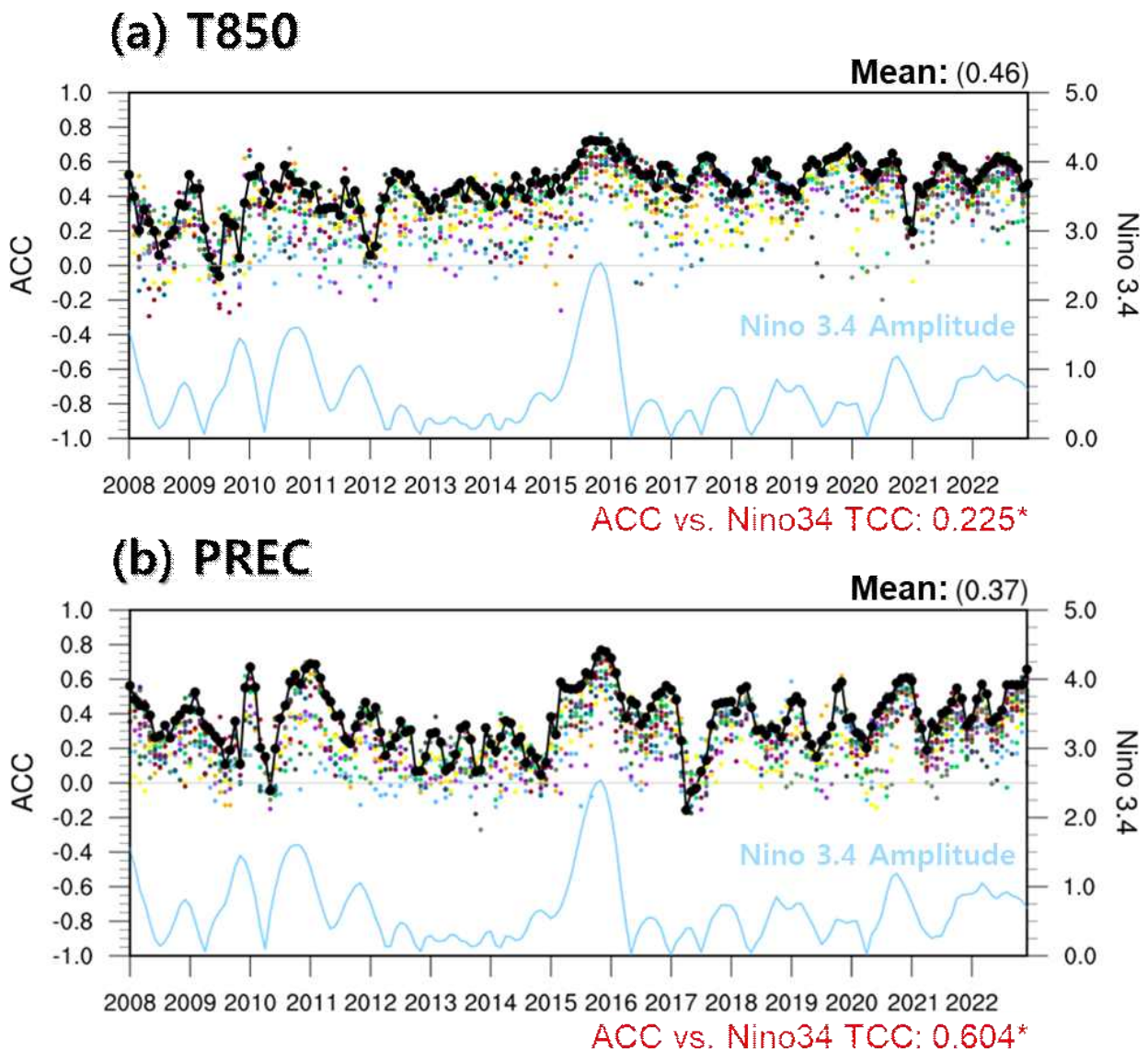


Figure 3.7. Changes of APCC MME (Black dot and line) and individual models (Color dot) real-time forecast prediction skill (ACC) during 2008 to 2022 for temperature at 850hPa (a) and precipitation (b).

마찬가지로 확률론적 MME에 대해서도 예측력을 평가하였다. 우선 최근 7년(2016~2022년)에 대한 확률론적 MME forecast의 proportion correct skill을 분석하였다(Figure 3.8). 그 결과, 기온이 강수보다 높은 skill을 보이며, 이는 모델들의 온난 예측 경향과 더불어 실제 관측에서 나타나는 온난화 경향에서 기인하는 효과인 것으로 사료된다. 강수의 경우 강수가 집중되는 열대 태평양 지역에서 높은 skill이 나타나는 특징이 있으며, 대체로 강수가 적은 극지역에서 최저값이 나타난다.

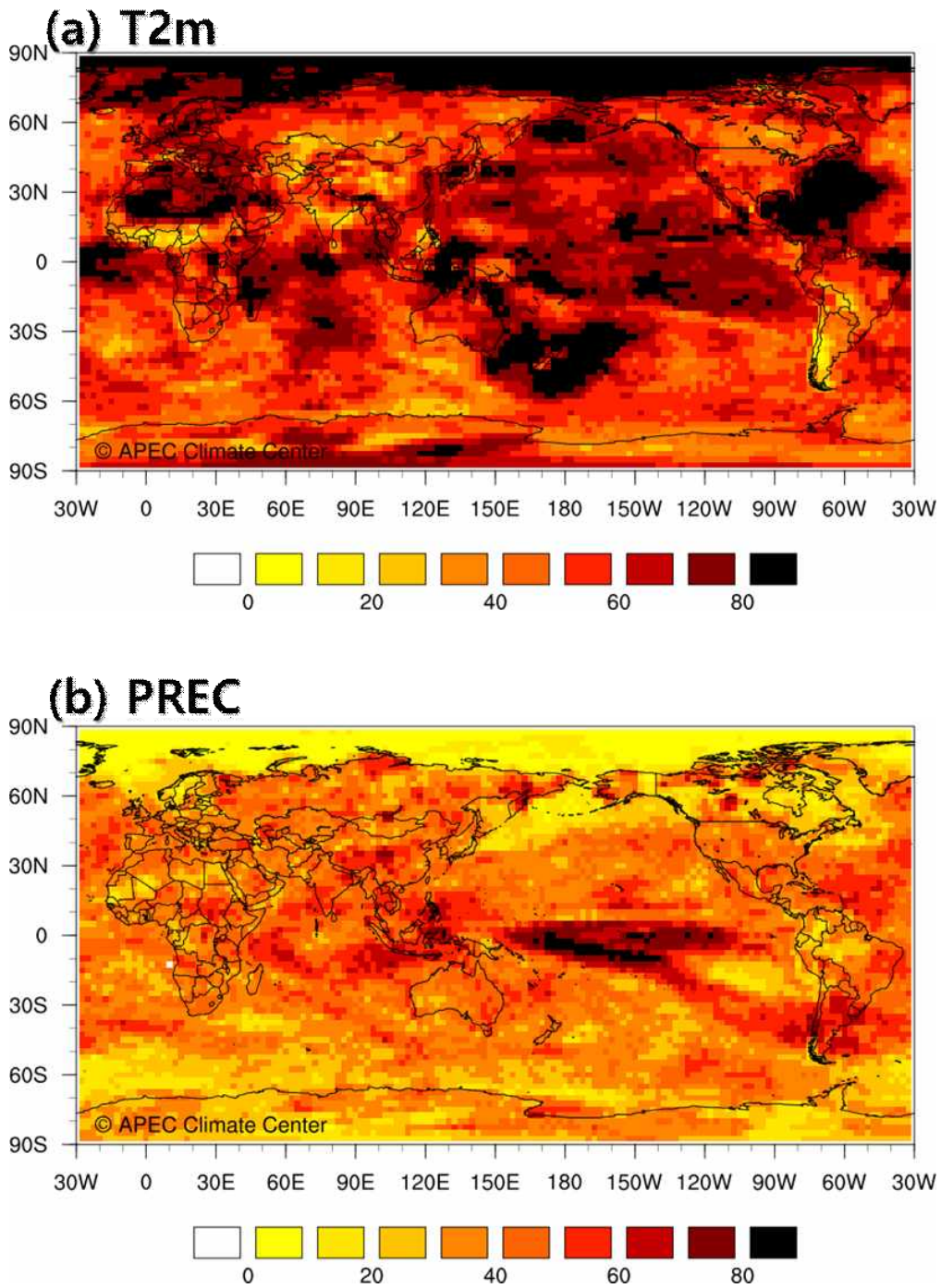


Figure 3.8. Distribution of Proportion correct for APCC probabilistic MME forecast during 2016-2022: (a) 2-m temperature and (b) precipitation.

이를 3분위 확률별로 3년 이동 평균된 ROC score를 통한 예측력의 향상 정도를 살펴본 결과(Figure 3.9), 기온 및 강수 모두 평년 비슷(near normal)에 대한 예측을 제외한 평년 이상(above normal) 및 평년 이하(below normal)에 대한 예측에서 향상 정도가 뚜렷하게 나타났다.

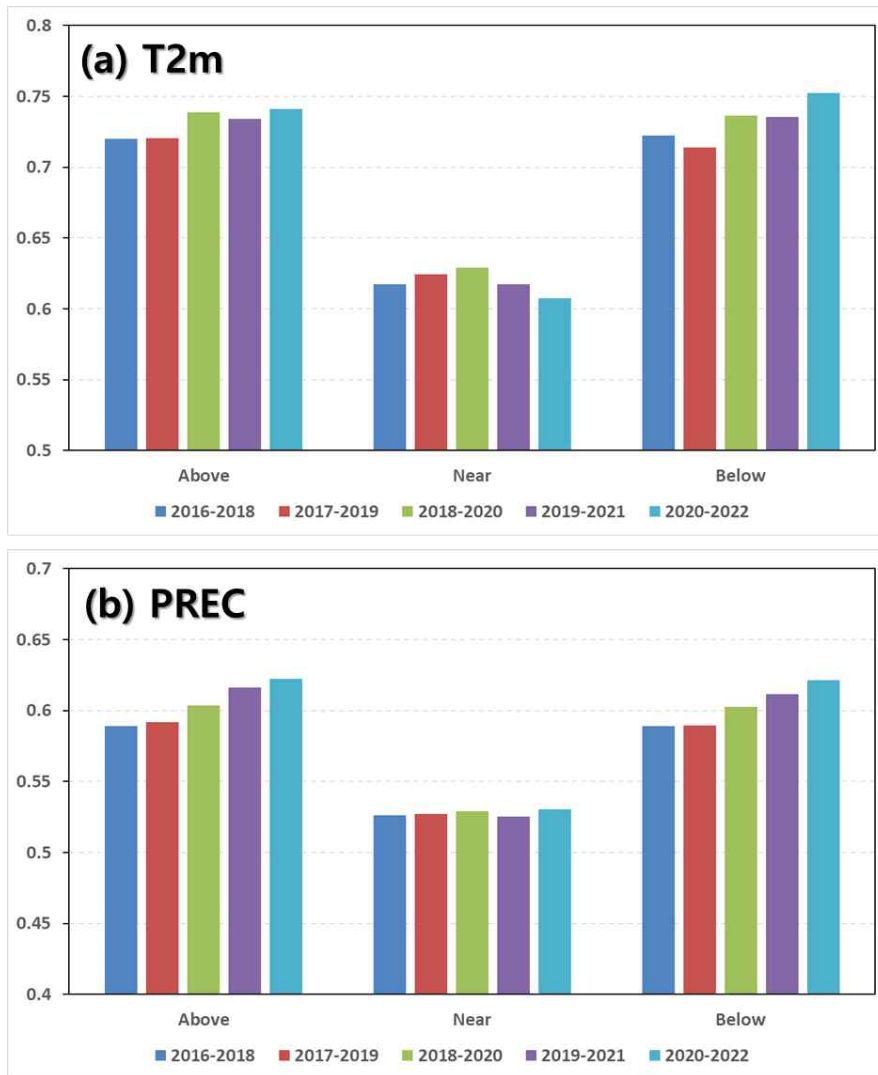


Figure 3.9. Changes of 3 years moving averaged ROC score for APCC probabilistic MME forecast: (a) 2-m temperature and (b) precipitation.

APCC 확률론적 MME의 예측력을 보다 객관적으로 평가하기 위해 WMO의 확률론적 MME와 비교 분석을 수행하였다. Figure 3.10은 최근 10년(2013~2022년)에 대해 APCC 및 WMO 확률론적 MME의 forecast 예측력(ROC score)을 평가한 그림으로써 두 기관 모두 기온 및 강수의 예측력이 유사한 수준이며, 변동성도 유사한 것으로 나타났다. 다만, 10년 기간에 대한 전체 기간 평균 예측력은 APCC가 0.685로 WMO의 0.678보다 근소한 차이로 높게 나타났다. 이는 APCC의 확률 예측 수준이 공신력 있는 WMO의 확률 예측 수준과 유사한 수준으로써 기관간의 경쟁력이 결코 낮은 수준이 아님을 시사한다. 반면, 앞서 결정론적 MME에서 나타났던 ENSO 강도와 예측력 변화의 연관성은 확률론적 MME에서는 찾아보기 어려운 특징이 있었다.

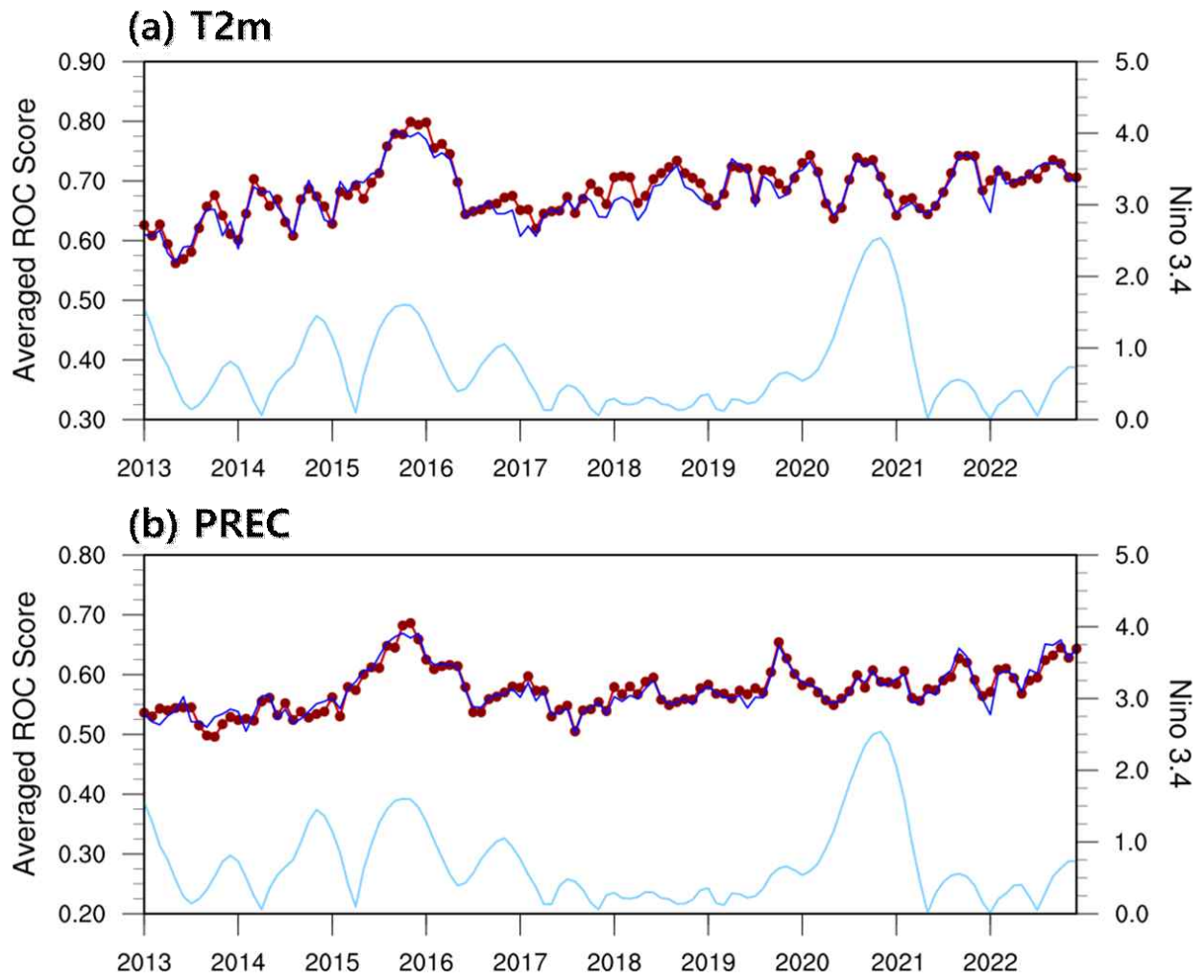


Figure 3.10. Changes of ROC score for APCC probabilistic MME forecast during 2013 to 2022: (a) 2-m temperature and (b) precipitation.

2021년 1월부터 APCC MME 예측에 참여한 프랑스 기상청의 기후예측모델(현재 Sys8)의 과거예측자료(hindcast) 기간이 2년 연장되었다. 기존에는 1993년에서 2016까지 총 24년이었으나 2017년 및 2018년 자료가 생산 완료되어 총 26년(1993년에서 2018년)으로 연장되었다. 연장된 Meteo-France의 과거예측자료는 Figure 3.11과 같이 APCC의 기후예측자료서비스인 CLIK(CLimate Information tookKit)을 통해 매일 제공되고 있다.

MME Individual Model Download

Acknowledgement
When you use the APCC MME and/or individual model data in any documents or publications, please acknowledge us by including the following text. "The authors acknowledge the APCC MME Producing Centers for making their hindcast/forecast data available for analysis, the APEC Climate Center for collecting and archiving the data, as well as for producing APCC MME predictions."

MME model data is updated around the 15th of every month and may change depending on operational situation.

Type
 FORECAST HINDCAST

Year
 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023

Institute
 APCC BCC BOM CMCC CMA ECC HMC KMA METR MGO NCEP PNU RDA UKMO

Model
 SYS8

Variable
 prec slp sat t200 t2m t500 t850 u200 u500 u850 v200 v500 v850 z200 z500 z850

Date
* If you want to get data of each year or season at once, select year or month heads.

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1993	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1994	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1995	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1996	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1997	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1998	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1999	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2001	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2002	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2003	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2004	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2005	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2006	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2007	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2008	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2009	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2010	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2011	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2012	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2013	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2014	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2015	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2016	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2017	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2018	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Request Select to request as download job.
Create script Select to download script using wget.

Figure 3.11. Extended hindcast data of Meteo-France are being provided in CLIK (CLimate Information TookKit) website: cliks.apcc21.org/dataset/model.

부산대학교에서 운영해온 전지구 접합대순환 모형 PNU CGCM이 2023년 6월부터 국립농업과학원과 부산대학교 간의 ‘장기 농업기후 예측시스템 이관·활용을 위한 합의각서’에 근거하여 PNU/RDA CGCM으로 변경되었다. 변경 후에도 국립농업과학원은 APCC의 MME에 지속적으로 참여할 것을 합의하였다. 이에 2023년 6월부터 Figure 3.12 및 3.13과 같이 APCC 홈페이지 및 CLIK을 통해 변경된 기관명으로 이미지 자료 및 NetCDF 포맷의 자료가 제공되고 있으며 APCC MME 참여 기관 모식도도 변경되었다(Figure 3.14).

▣ 개별모델 예측

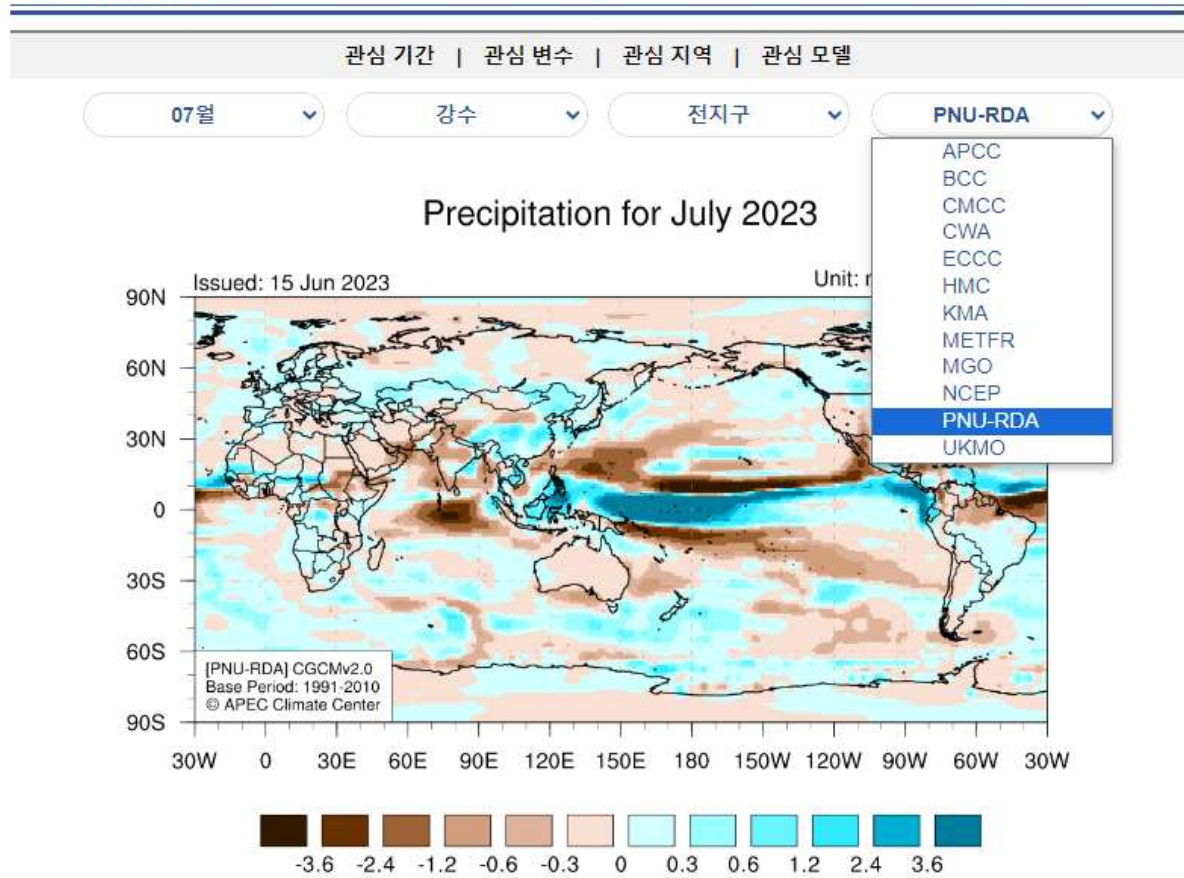


Figure 3.12. An example of PNU-RDA forecast maps displayed in APCC website: apcc21.org/ser/outlook.do?lang=ko.

Overview **Download**

MME Individual Model Download

Acknowledgement
 When you use the APCC MME and/or individual model data in any documents or publications, please acknowledge us by including the following text: "The authors acknowledge the APCC MME Producing Centers for making their hindcast/forecast data available for analysis, the APEC Climate Center for collecting and archiving the data, as well as for producing APCC MME predictions."

MME model data is updated around the 15th of every month and may change depending on operational situation.

Type
 FORECAST HINDCAST

Institute
 APCC BCC BOM CMCC CWA ECCO HMC KMA METFR MGO MSC NCEP PNU PNU-RDA UKMO

Model
 CGCMv2.0

Variable
 olr prec slp sst t2m t850 u200 u850 v200 v850 z500

Date
 * If you want to get data of each year or season at once, select year or month heads.
 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12
 2023

Request Select to request as download job.
Create script Select to download script using wget.

Figure 3.13. PNU-RDA forecast/hindcast are being provided in CLIK website.



Figure 3.14. A new diagram of APCC MME participation agencies. As of June 2023, PNU-RDA started providing their forecast/hindcast data with APCC.

3.1.2. 기후감시시스템 운영

3.1.2.1. 기후감시시스템 운영

Figure 3.15와 같이 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(Figure 3.16). 감시 기간은 최근 10년이며 각 지수별 계산 방법 또한 홈페이지에서 확인할 수 있다. 전지구 가뭄 지수 현황 또한 매월 중순 업데이트되고 있다(Figure 3.17).

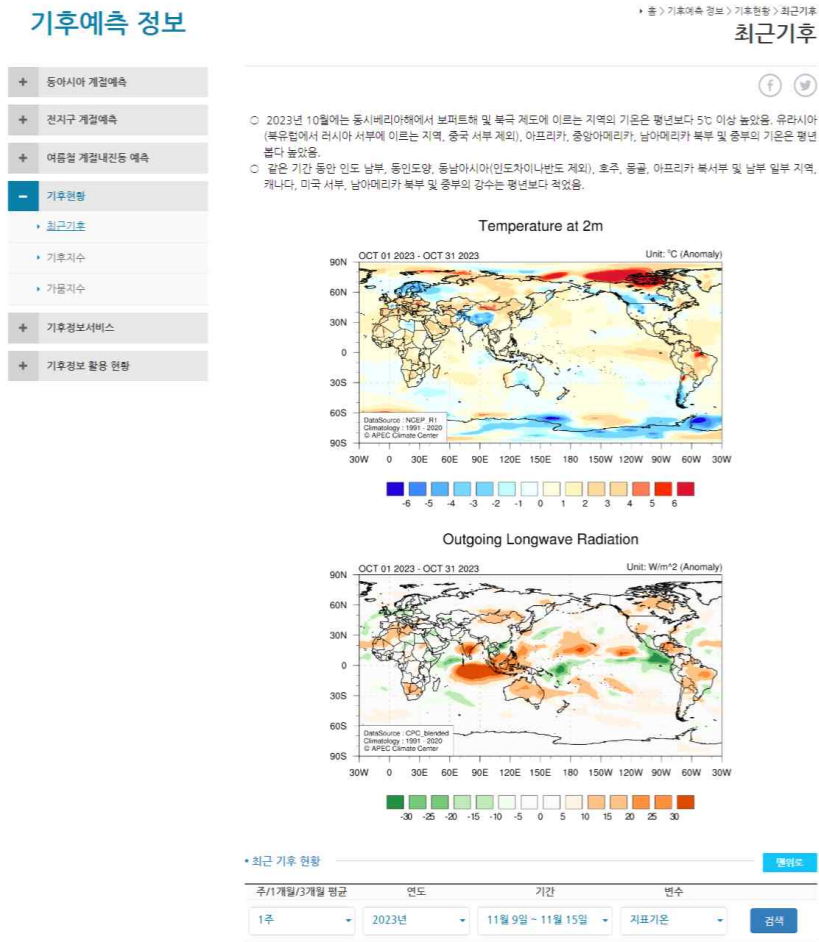


Figure 3.15. Weekly, monthly, and seasonal current climate conditions: apcc21.org/ser/high.do?lang=ko.

기후예측 정보

기후예측 정보 > 기후현황 > 기후지수

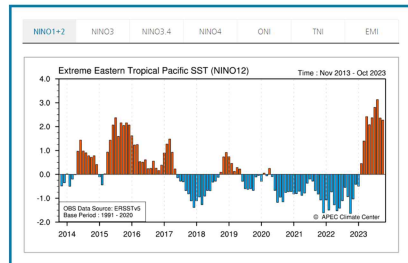
- + 동아시아 계절예측
- + 전지구 계절예측
- + 여름철 계절내년동 예측
- 기후현황
 - 최근기후
 - 기후지수
 - 가뭄지수
- + 기후정보서비스
- + 기후정보 활용 현황

기후지수 감시정보는 매월 15일 경에 업데이트됩니다.

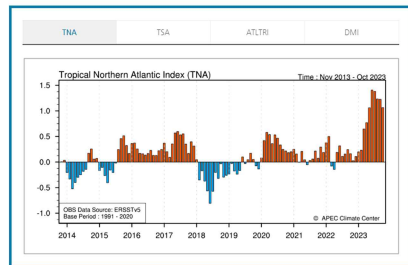
APCC는 주요 기후변동상을 설명할 수 있는 월별 기후지수 감시정보를 제공하고 있습니다.
[이 자료를 클릭하면 기후 지수 및 지표에 대한 설명을 다운로드 할 수 있습니다.](#)

태평양해수면온도지수 인도양대서양해수면온도지수 대기 지수 몬순 지수

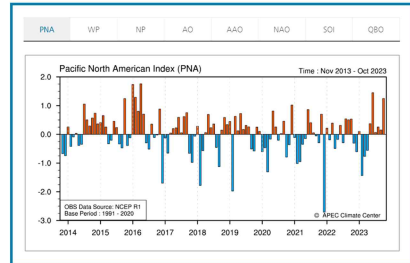
태평양 해수면온도 지수
 NINO1+2 : Tropical Pacific SST (0°-10°S, 90°W-80°W) NINO3 : Tropical Pacific SST (5°N-5°S, 150°W-90°W)
 NINO3.4 : Tropical Pacific SST (5°N-5°S, 170°W-120°W) NINO4 : Tropical Pacific SST (5°N-5°S, 160°E-150°W)
 ONI : Oceanic Niño Index TNI : Trans-Niño Index
 EMI : El Niño Modoki Index



인도양-대서양 해수면온도 지수
 TNA : Tropical Northern Atlantic Index TSA : Tropical Southern Atlantic Index
 ATLTRI : Atlantic Triple SST EOF DMI : Dipole Mode Index



대기 지수
 PNA : Pacific North American Index WP : Western Pacific Index
 NP : North Pacific pattern AO : Arctic Oscillation
 AAO : Antarctic Oscillation NAO : North Atlantic Oscillation
 SOI : Southern Oscillation Index QBO : Quasi-Biennial Oscillation



몬순 지수
 WYI : Webster-Yang Index AUSMI : Australian Monsoon Index
 SAMI : South Asian Monsoon Index IMI : Indian Monsoon Index
 WNPAMI : Western North Pacific Monsoon Index

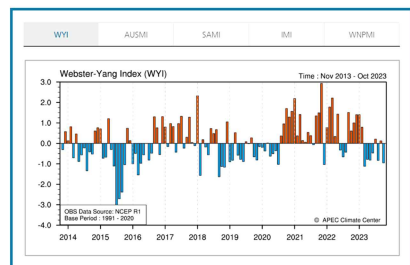


Figure 3.16. Climate index monitoring for the past 10 years: apcc21.org/ser/indic.do?lang=ko.

기후예측 정보

기후예측 정보 > 기후현황 > 가뭄지수

- + 동아시아 계절예측
- + 전지구 계절예측
- + 여름철 계절내년동 예측
- 기후현황
 - 최근기후
 - 기후지수
 - 가뭄지수
- + 기후정보서비스
- + 기후정보 활용 현황

관심 기간 선택

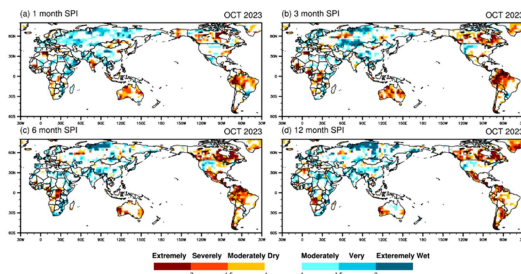
2023년 10월

전지구 가뭄지수 기후현황 : 2023년 10월

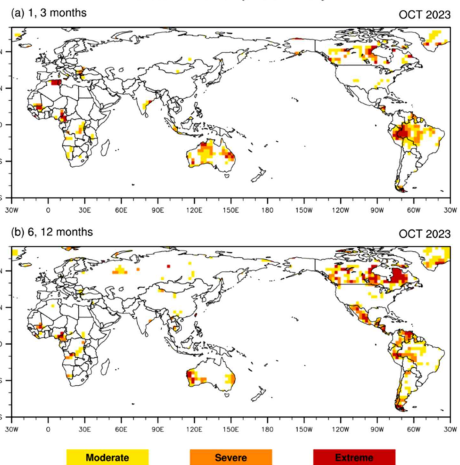
APCC 전지구 가뭄 감시시스템은 지난 1/3/6/12개월 기간에 대한 표준강수량지수(SPI, Standardized Precipitation Index, McKee et al. 1993) 기반의 가뭄현황 정보를 제공하고 있으며, 보다 자세한 내용은 Sohn et al.(2012a, 2012b)를 참고하시기 바랍니다.

SPI에 따른 가뭄단계는 아래와 같이 분류됩니다.

가뭄		습윤	
보통 지수	-1.48 < SPI < -1.00	보통 지수	1.00 < SPI < 1.48
심각 지수	-1.99 < SPI < -1.50	심각 지수	1.50 < SPI < 1.99
극심 지수	SPI < -2.00	극심 지수	2.00 < SPI



Global rainfall surplus summary



참고문헌

- Sohn, S.-J., C.-Y. Tam, K. Ashok, and J.-B. Ahn, 2012a: Quantifying the reliability of precipitation datasets for monitoring large-scale East Asian precipitation variations. Int. J. Clim., DOI: 10.1002/joc.2380 ([영문논문 바로가기](#))
- Sohn, S.-J., C.-Y. Tam, and J.-B. Ahn, 2012b: Development of a multimodel-based seasonal prediction system for extreme droughts and floods: a case study for South Korea. Int. J. Clim., DOI: 10.1002/joc.3464 ([영문논문 바로가기](#))

Figure 3.17. Global climate drought: apcc21.org/ser/global.do?lang=ko.

3.1.2.2. OLR 자료 출처 변경

APCC 기후감시시스템 운영에 사용되던 상향장파복사(Outgoing Longwave Radiation, OLR) 자료인 NOAA daily non-interpolated OLR 자료가 2023년 9월 17일을 마지막으로 제공이 중단되었다(Figure 3.18). 이 자료는 주/월/계절 상향장파복사 감시뿐만 아니라 기후전망에 사용되는 시간-경도 상향장파복사 감시에도 사용되고 있었다.

NOAA는 non-interpolated OLR 자료 대신 CPC blended 자료 사용을 권고하였으며 이에 따라 APCC는 CPC blended OLR 자료를 즉시 수집하고 이와 관련된 감시 프로그램을 모두 수정하였다. 또한 기존 자료는 2023년 9월 17일까지 제공되긴 하였으나 실질적으로 8월부터 자료가 불안정하였음을 확인하였다(Figure 3.19). CPC blended 자료를 사용한 편차장과 비교하여 중위도 지역에 노이즈가 크게 나타나고 특히 북극 및 남극에 큰 음의 편차가 나타난다. 이에 따라 8월이 포함된 모든 주/월/계절 OLR 감시 자료를 재생산하고 홈페이지를 통해 서비스를 시작하였다(Figure 3.20).

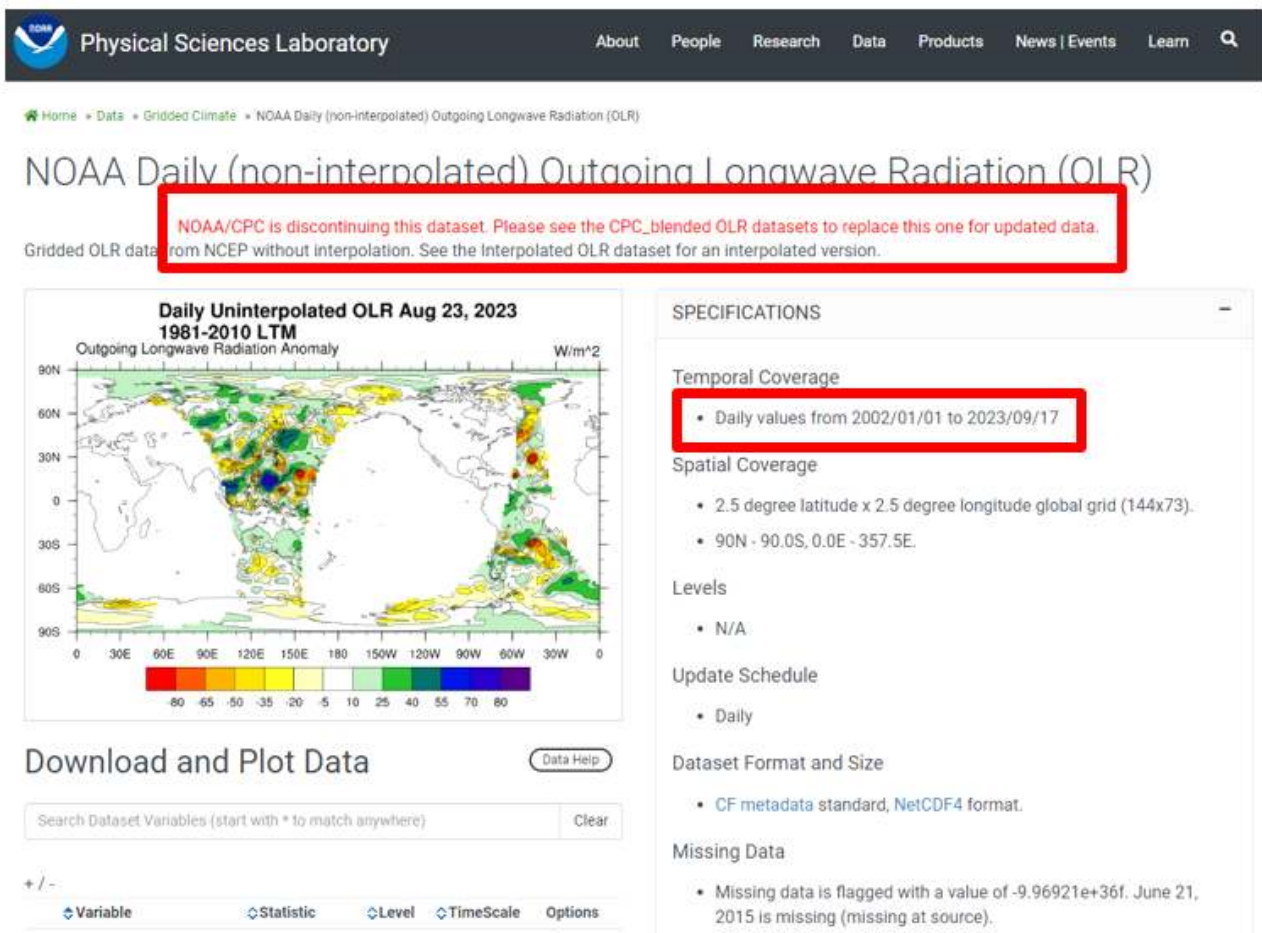


Figure 3.18. NOAA Daily (non-interpolated) Outgoing Longwave Radiation (OLR) page. The data provision was terminated as of 17 September 2023.

NOAA non-interpolated

CPC blended

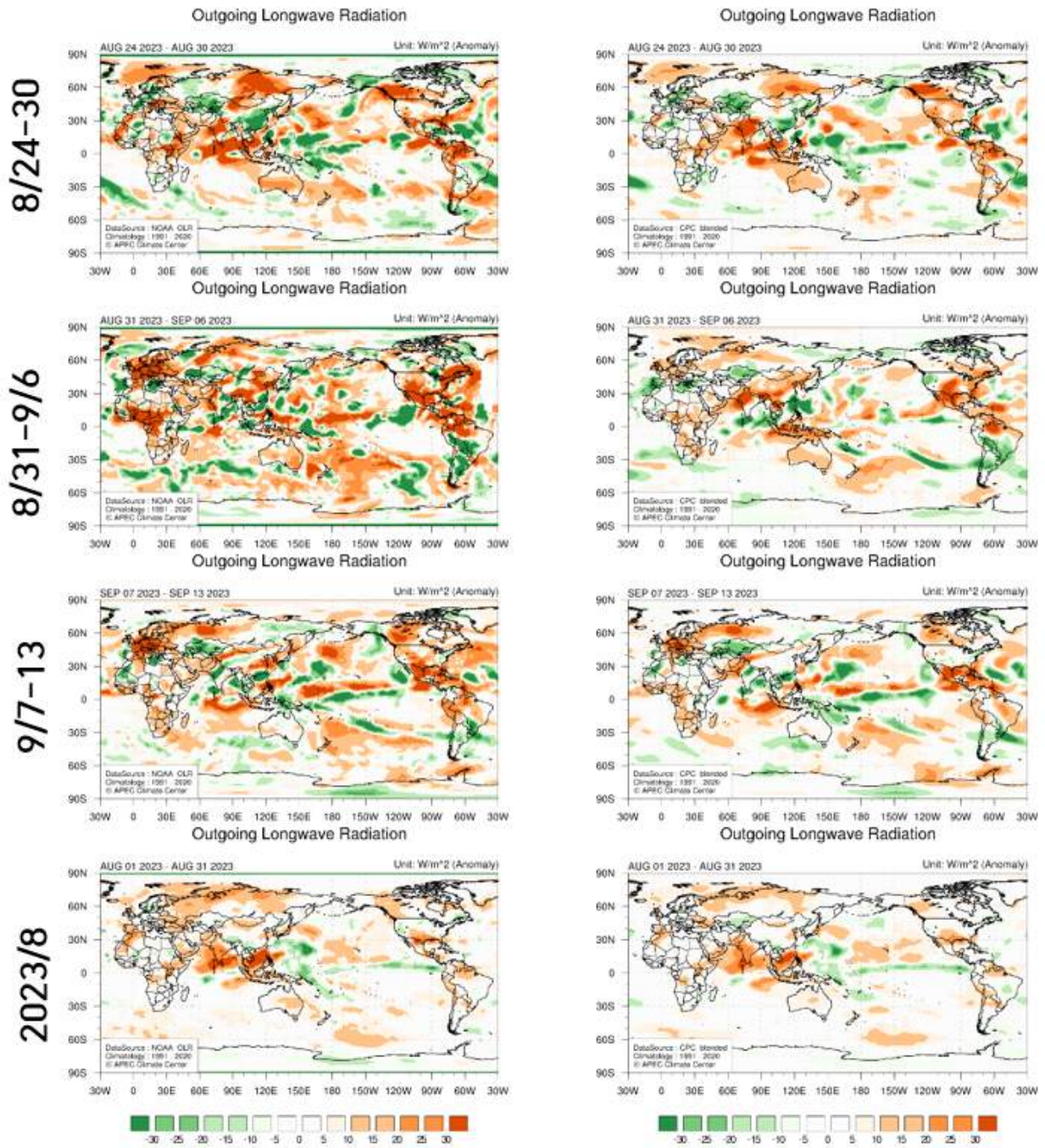


Figure 3.19. Weekly and monthly OLR anomaly patterns from NOAA daily non-interpolated data (left) and CPC blended data (right).

주/1개월/3개월 평균	연도	기간	변수
1주	2023년	11월 9일 ~ 11월 15일	상향장파복사

검색

Outgoing Longwave Radiation

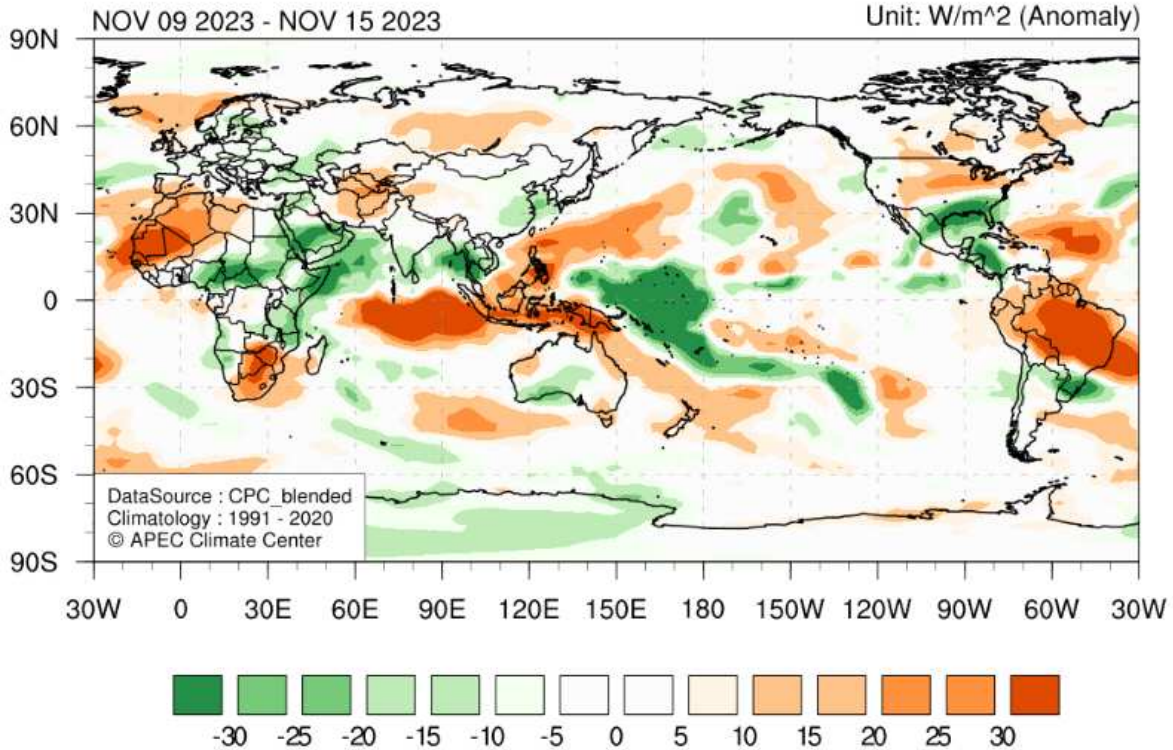


Figure 3.20. An example of OLR anomaly maps displayed in APCC website: apcc21.org/ser/high.do?lang=ko.

3.1.3. 동아시아 지역 확률계절예측시스템 운영

2022년에 구축된 동아시아 지역 확률계절예측시스템 하에서 2023년 총 12회의 동아시아 맞춤형 확률 예측 정보를 생산하였다. 매 계절마다 동아시아 지역의 대표 기후인자인 ENSO 및 서태평양 강수변동과 동아시아 강수의 관련성에 대한 높은 재현성을 보이는 모델들을 선별하여 확률론적 MME를 수행하는 방식으로써 사용된 각 계절별 모델 선별 기준은 다음과 같다 (Figure 3.21, 3.22). 여기서 ENSO를 기후인자로 하는 선별 기준은 Figure 3.21, 서태평양의 강수 변동을 기후인자로 하는 선별 기준은 Figure 3.22이다. 여기서 각 기후인자별로 모델과의 재현성을 평가하여 높은 재현성을 보이는 모델들의 교집합을 확률론적 MME를 수행하여 계절 예측 정보를 생산하고, 생산 과정 및 선별된 모델 목록을 정리하여 별도의 현업일지에 작성하고 비치하고 있다. 본 정보는 APCC 국문 홈페이지에서 제공되며 앞서 3.1.1절에서 소개한 MME 계절예측 정보와 동일하게 매월 15일 경에 제공하고 있다.

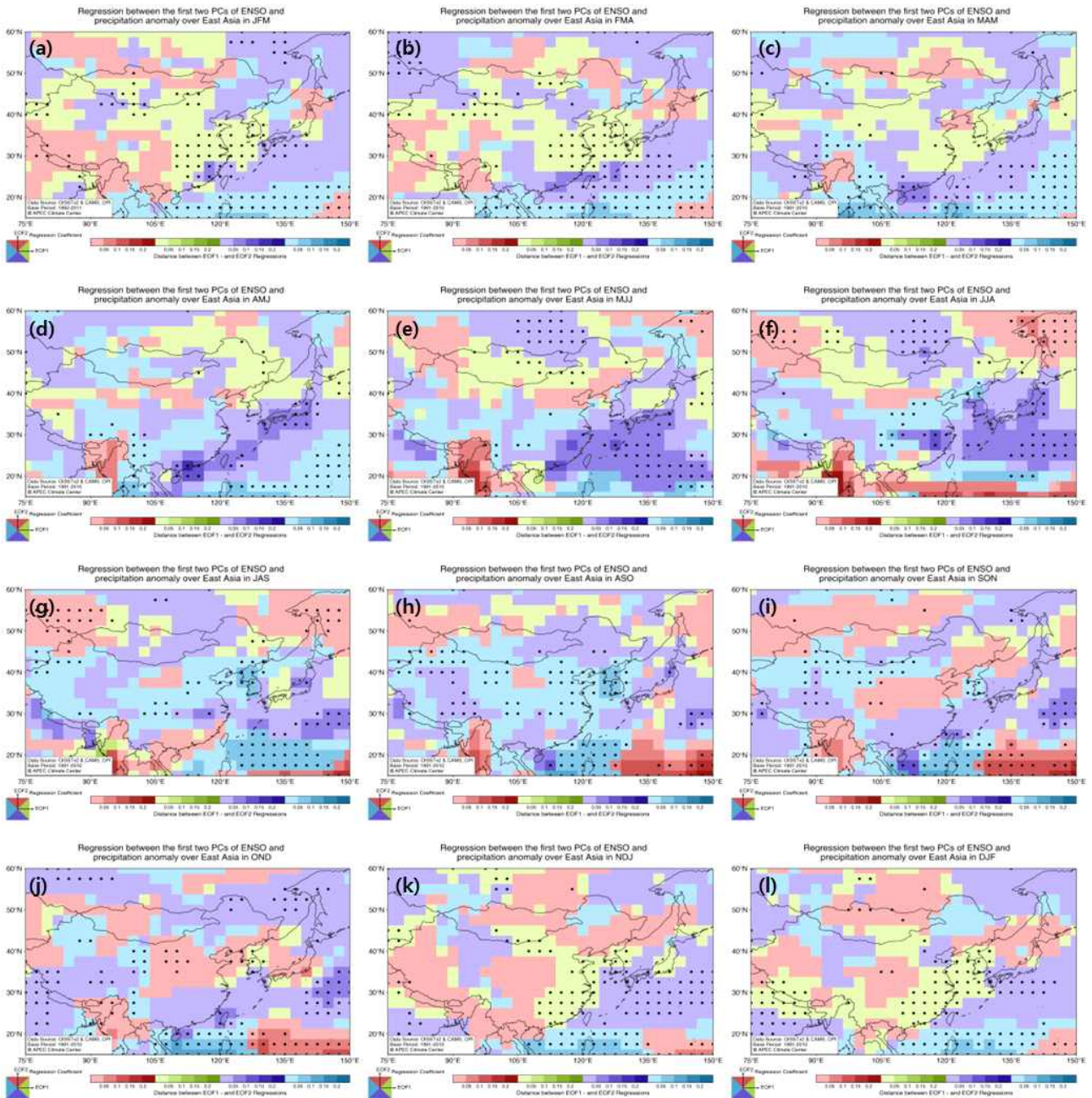


Figure 3.21. Regression between the first two PCs of ENSO and precipitation anomaly over East Asia in (a) JFM to (l) DJF.

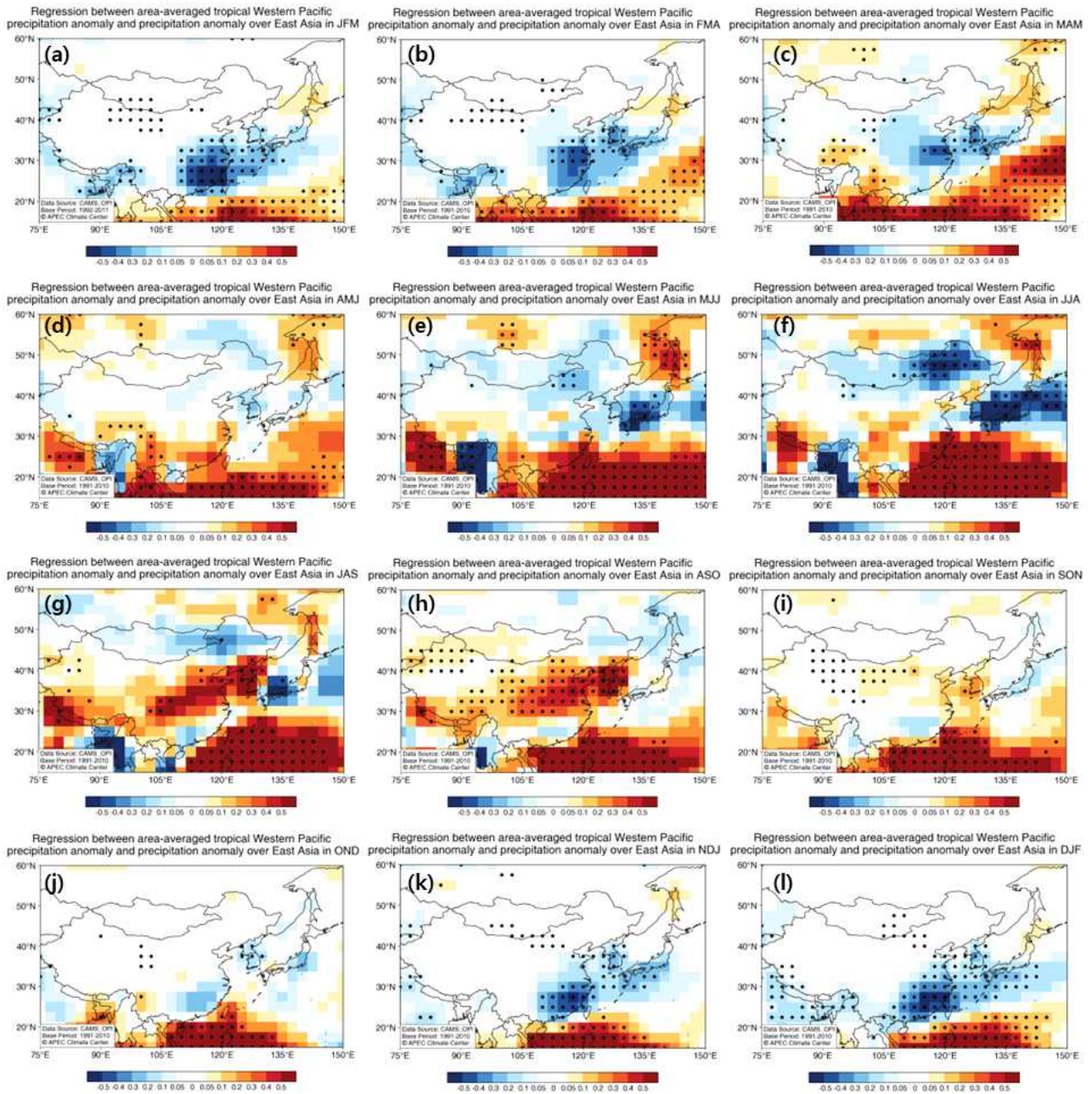


Figure 3.22. Regression between area-averaged tropical Western Pacific precipitation anomaly and precipitation anomaly over East Asia in (a) JFM to (l) DJF.

위와 같은 선별 기준으로 선별된 모델의 목록은 다음과 같다(Table 3.2). 계절별로 선별된 모델의 목록이 다르지만, 두 가지 선별 기준을 통합적으로 2023년 가장 많이 선별된 모델은 JMA, CMCC, KMA 순이며, MetFR, UKMO, APCC가 다음으로 많이 선별된 모델이다. 즉, JMA, CMCC, KMA, MetFR, UKMO, APCC 모델이 대체로 동아시아 지역 기후인자를 잘 예측하는 모델로써 MME에 할 경우 긍정적인 예측 수준을 보이는 것을 시사한다. 다만, 본 정보는 3개월 계절 평균에 대한 예측 정보임에 따라 월별 시간 규모의 예측 정보가 필요하다는 지적이 제기된 바 있다. 본 지적을 반영하고 개선하기 위해서 월별 시간 규모의 동아시아 기후인자를 재선별하고 모델의 재현성 등의 특성을 파악하는 연구가 먼저 수행되어야 할 것이다.

Table 3.2. Lists of selected models for customized probabilistic MME over East Asia 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, ECCC, NASA, UKMO	CMCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO
2023FMA	APCC, CMCC, JMA, KMA, NASA, UKMO	CMCC, JMA, KMA, NASA, UKMO
2023MAM	BCC, CMCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO	CMCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO
2023AMJ	APCC, CMCC, JMA, KMA, UKMO	APCC, CMCC, CWA
2023MJJ	APCC, CMCC, JMA, KMA, PNU, UKMO	APCC, CMCC, JMA, MetFR
2023JJA	APCC, CMCC, JMA, MetFR, NCEP	CMCC, JMA, MetFR
2023JAS	APCC, JMA, ECCC, NCEP, PNU	JMA, MetFR, ECCC, PNU
2023ASO	APCC, BoM, JMA, ECCC, NASA, NCEP, PNU	BoM, JMA, PNU
2023SON	APCC, BoM, JMA, KMA, ECCC, NCEP	APCC, JMA, KMA, UKMO
2023OND	BoM, CMCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO	BoM, CMCC, JMA, MetFR, PNU, UKMO
2023NDJ	BoM, CMCC, JMA, KMA, MetFR, UKMO	BoM, JMA, KMA, MetFR, UKMO
2023DJF	APCC, BoM, CMCC, ECCC, JMA, MetFR	APCC, BoM, JMA, KMA, PNU

3.1.4. 기후전망 개선

3.1.4.1. 기후전망 개선 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 기후 전망의 디자인은 2020년에 APCC 홈페이지 중 기후예측정보 페이지 재구성 과 함께 개선된 바 있다(Figure 3.23).

하지만 현재까지 약 9년간 유지되어 온 줄글 형식뿐만 아니라 색상 조합 및 그림 배치 등을 고려해 보았을 때 APCC의 기후전망은 디자인 측면에서 가독성을 개선할 만한 여지가 있다.

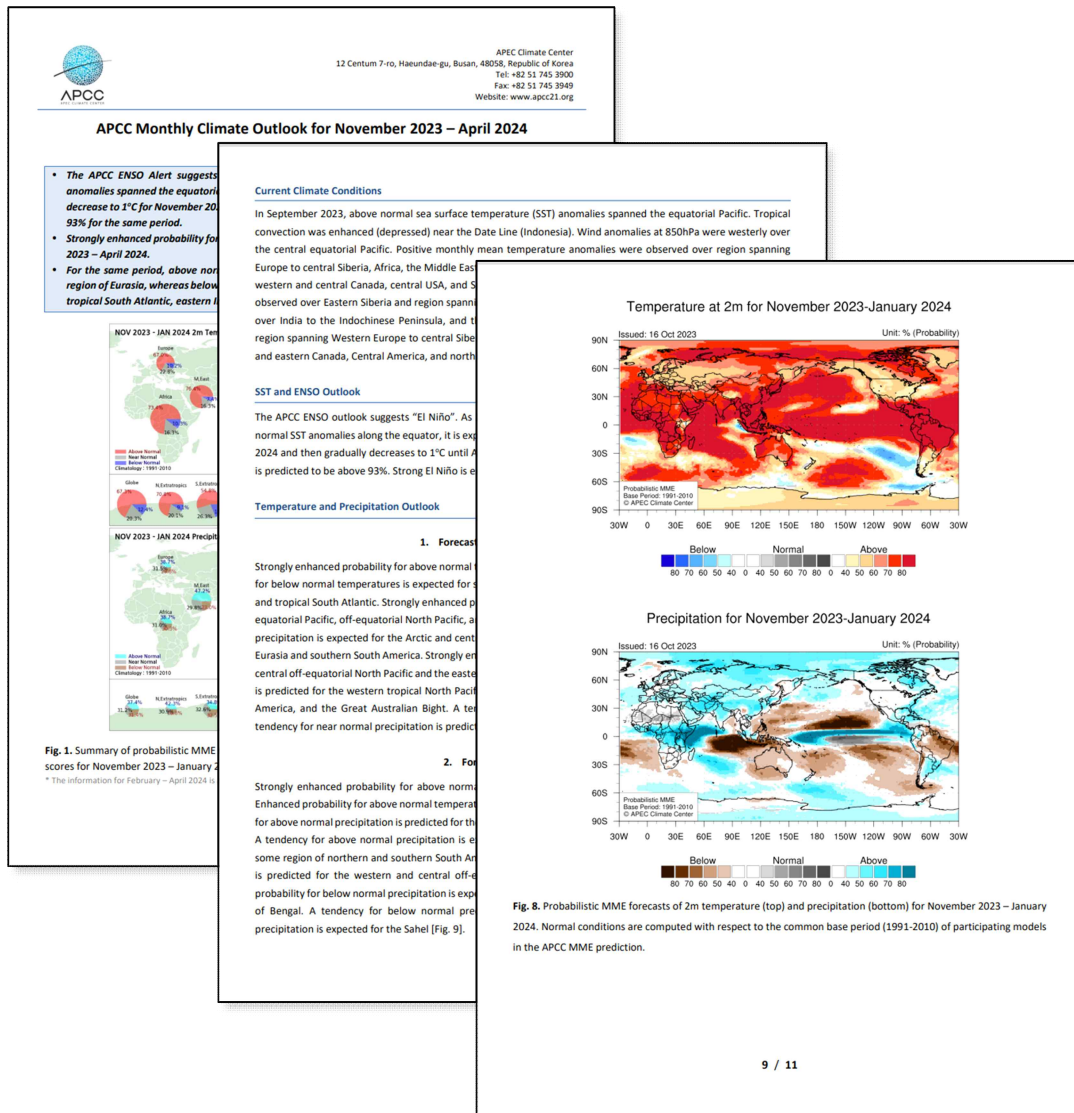


Figure 3.23. Previous version of APCC Climate Outlook.

3.1.4.2. 타 기관 기후전망 조사

전지구 혹은 지역별 기후전망을 이미지뿐만 아니라 자세한 설명과 함께 생산하는 기관 혹은 포럼은 APCC 및 IRI(International Research Institute for Climate and Society), TCC(Tokyo Climate Center), CariCOF(Caribbean Climate Outlook Forum) 등이 있다(Figure 3.24).

Table 3.3과 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 요약은 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.

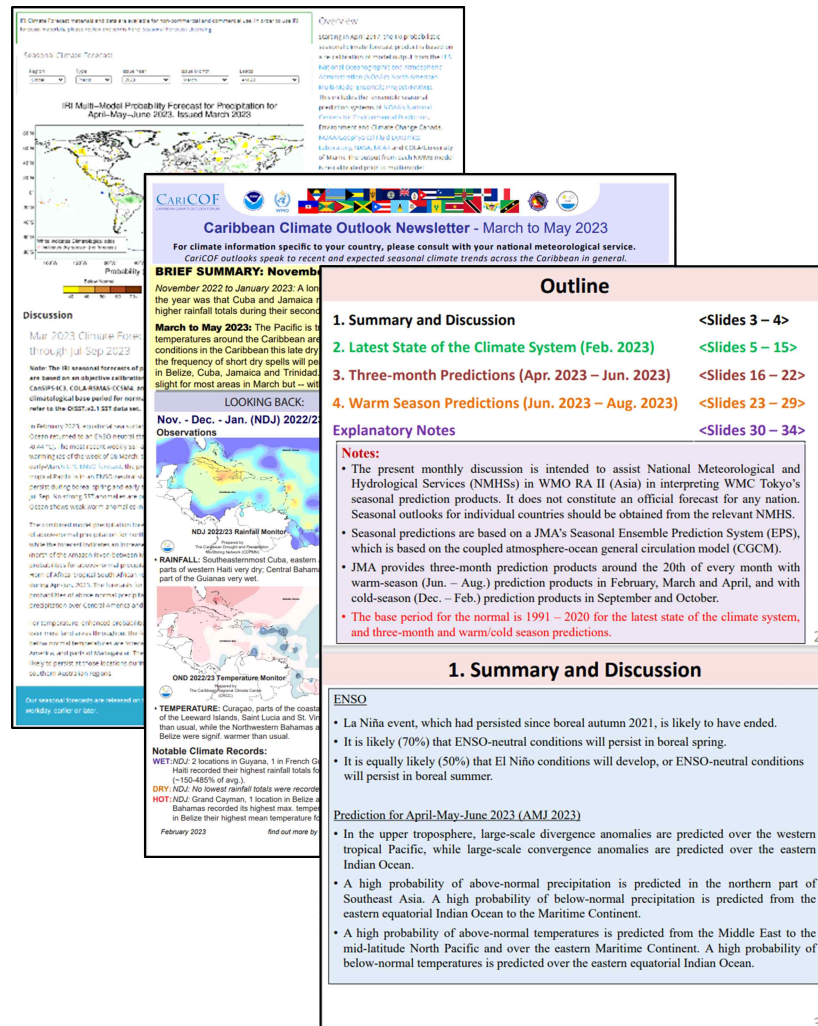


Figure 3.24. Climate outlooks of other organizations: IRI (International Research Institute), TCC (Tokyo Climate Center), and CariCOF (Caribbean Climate Outlook Forum).

Table 3.3. Content of climate outlook of APCC, IRI, TCC, and CariCOF.

Organization	Region	Summary	Monitoring			Forecast			Note
			ENSO	T ^a	P ^b	ENSO	T ^a	P ^b	
APCC	Globe	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
IRI	Globe		✓			✓	✓	✓	
TCC	East Asia	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Additional analysis
CaiCOF	Caribbean	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

a Temperature

b Precipitation

3.1.4.3. 기후전망 구독자 만족도 조사

매월 APCC의 전지구 기후전망 구독자에게 기후전망 콘텐츠에 대한 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 3.25). 2023년 10월에서 11월, 총 한 달여 동안 설문 웹페이지 공유 및 설문지 배포를 통해 조사하여 총 11인의 결과를 취합하였다.

응답자 중 40%는 정부 기관, 40%는 대학에 소속되어 있으며 90% 이상이 기후 및 날씨 분야에 종사하고 있다 (Figure 3.26). APCC 기후전망 콘텐츠 중 본인 업무에 가장 많이 활용하고 있는 것은 해수면온도 및 ENSO 전망이며 요약, 최근 기후 현황, 기온 및 강수 전망이 그 뒤를 이었다(Figure 3.27). 기후전망 콘텐츠를 기후 예측 현업을 위한 참고 자료와 교육 자료로 활용한다는 응답이 가장 많았다(Figure 3.28). 수문 및 농업 등 응용 분야 활용과 정책 결정을 위한 보조 자료로 활용하거나 언론 보도 자료로 활용한다는 응답도 있었다.

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 3.29). 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 밝혔으며 글머리 기호를 활용한 평년보다 높은(낮은)/많은(적은) 기온/강수 서술에 대한 요청도 있었다.

본 조사를 통해 응답자 중 대다수는 기후 및 기상 분야의 정부 기관 혹은 대학교 소속으로서 기후 예측 현업과 교육 자료로 APCC 기후전망 콘텐츠를 활용하고 있음을 확인하였고 이

해 난이도는 쉬운 편이나 콘텐츠 다양성에 대한 개선의 여지가 있음을 알 수 있었다. 기후전망의 새로운 디자인에 대해서는 모두 긍정적인 응답을 보였다.

Thank you for being a subscriber to APCC's Climate Outlook. As a part of our ongoing efforts to enhance our services, we are collecting information on how our users are utilizing APCC's Climate Outlook in their work and how they are satisfied with APCC's Climate Outlook. In this regard, we would greatly appreciate it if you could take some time to fill in the survey to provide us with your valuable insights.

1. What type of organization are you affiliated with? ()
1) Government branch 2) Public institution 3) University 4) Research center 5) Company
6) Non-governmental organization 7) International organization
8) Other associated organization (please provide details): _____

2. What field do you work in? ()
1) Climate/Weather 2) Water 3) Agriculture 4) Energy 5) Health 6) Other: _____

3. In which country do you currently reside?

1. Which of the below APCC forecast information have you used? Please refer to the attached file and select all that apply. ()

- 1) Summary
- 2) Current Climate Conditions
- 3) SST and ENSO Outlook
- 4) Temperature and Precipitation Outlook

2. How do you mainly utilize APCC's Climate Outlook? Please select all that apply. ()

- 1) Use as reference for operational climate forecasts
- 2) Use as reference for other fields (ex. Hydrology, agriculture, etc.)
- 3) Use as reference for policy decision making
- 4) Use as research or teaching materials
- 5) Quote in a press release or on your website
- 6) Other (please provide details): _____

3. Thinking about your experience in APCC's Climate Outlook, using a 5-point scale on which 1 means "Low" and 5 means "High," please rate the following.

1) Readability: Well-organized and easy to read				
Low				High
1	2	3	4	5

2) Comprehensibility: Easy, uncomplicated, and clear to understand				
Low				High
1	2	3	4	5

3) Diversity of content: Various topics ranging from monitoring to forecasting				
Low				High
1	2	3	4	5

4) Usability: Helpful and useful for one's work, research, etc.				
Low				High
1	2	3	4	5

4. APCC is trying to improve "Temperature and Precipitation Outlook" section of Climate Outlook in order to enhance its readability and visibility. An example is shown below. The current format is probability-based description without any highlights ("Current format" in page 3). On the other hand, the new one highlights regions with respect to the probability categories ("Probability-based description with highlights" in page 4). If you have any comments/suggestions on this new format, please describe them in detail.

Current format

Temperature and Precipitation Outlook

1. Forecast for July – September 2023

Strongly enhanced probability for above normal temperatures is predicted for most of the globe (excluding the eastern Indian Ocean, northern Australia, the eastern subtropical North Pacific, southwestern South Pacific, and the Antarctic). Strongly enhanced probability for above normal precipitation is expected for the equatorial Pacific. Enhanced probability for above normal precipitation is predicted for northwestern Africa and the subtropical North Atlantic. A tendency for above normal precipitation is expected for the Arctic and the Antarctic Ocean. Strongly enhanced probability for below normal precipitation is predicted for the central off-equatorial North Pacific, tropical Atlantic near South America, eastern Indian Ocean, and the Great Australian Bight. Enhanced probability for below normal precipitation is expected for the central off-equatorial South Pacific, Indonesia, southern Australia, the Tasman Sea, and northern South America. A tendency for near normal precipitation is predicted for the Middle East (Fig. 6).

2. Forecast for October – December 2023

Strongly enhanced probability for above normal temperatures is predicted for most of the globe (excluding the eastern Indian Ocean, eastern subtropical North Pacific, and the southeastern South Pacific). Strongly enhanced probability for above normal precipitation is expected for the equatorial Pacific and the region spanning the Horn of Africa to Maldives. Enhanced probability for above normal precipitation is predicted for the Arctic and central Africa. A tendency for above normal precipitation is expected for Russia, Central Asia, the Middle East, and the Antarctic Ocean. Enhanced probability for below normal precipitation is predicted for the central off-equatorial North Pacific, eastern Indian Ocean, and the Great Australian Bight. A tendency for below normal precipitation is expected for the subtropical South Pacific, Australia, and northern South America (Fig. 9).

Probability-based description with highlights

Temperature and Precipitation Outlook

1. Forecast for June – August 2023 (Fig. 8)

Temperature

- Strongly enhanced probability for above normal temperatures is predicted for the Pacific (excluding the subtropical North Pacific and southeastern South Pacific), Indian Ocean (including the eastern Indian Ocean), Asia, Africa, Greenland, the Atlantic, Canada, Central America, and northern South America. Enhanced probability for above normal temperatures is expected for most region of the Arctic, Russia, Europe, USA, southern South America, and southern Australia.
- Enhanced probability for below normal temperatures is predicted for the eastern subtropical North Pacific near Alaska and the southeastern South Pacific.

Precipitation

- Strongly enhanced probability for above normal precipitation is expected for the equatorial Pacific. Enhanced probability for above normal precipitation is predicted for northern and western Africa. A tendency for above normal precipitation is expected for the Atlantic Ocean.
- Strongly enhanced probability for below normal precipitation is predicted for the central off-equatorial Pacific, western and eastern Indian Ocean, and Indonesia. Enhanced probability for below normal precipitation is expected for southern Australia, the Great Australian Bight, and the Tasman Sea. A tendency for below normal precipitation is predicted for South Asia and some region of northern South America.

2. Forecast for September – November 2023 (Fig. 9)

Temperature

- Strongly enhanced probability for above normal temperatures is predicted for most region of the globe (excluding the subtropical South Pacific, southwestern South Pacific, eastern Indian Ocean, and southern South America).
- Enhanced probability for below normal temperatures is expected for the eastern Indian Ocean.

Precipitation

- Strongly enhanced probability for above normal precipitation is predicted for the equatorial Pacific and the region spanning the Horn of Africa to Maldives. A tendency for above normal precipitation is expected for northern Africa and central and eastern Russia.
- Strongly enhanced probability for below normal precipitation is predicted for the central off-equatorial North Pacific, western and eastern Indian Ocean, and Indonesia. Enhanced probability for below normal precipitation is expected for the Great Australian Bight and the Tasman Sea. A tendency for below normal precipitation is predicted for Australia and northern South America.

Note: Probabilities: MME forecast of APCC is described as below.

Temperature	Precipitation
Strongly enhanced probability for above normal temperatures/precipitation	Strongly enhanced probability for above normal temperatures/precipitation
Enhanced probability for above normal temperatures/precipitation	Enhanced probability for above normal temperatures/precipitation
A tendency for above normal temperatures/precipitation	A tendency for above normal temperatures/precipitation
Enhanced probability for below normal temperatures/precipitation	Enhanced probability for below normal temperatures/precipitation
A tendency for below normal temperatures/precipitation	A tendency for below normal temperatures/precipitation

Figure 3.25. Questionnaire on APCC Climate Outlook.

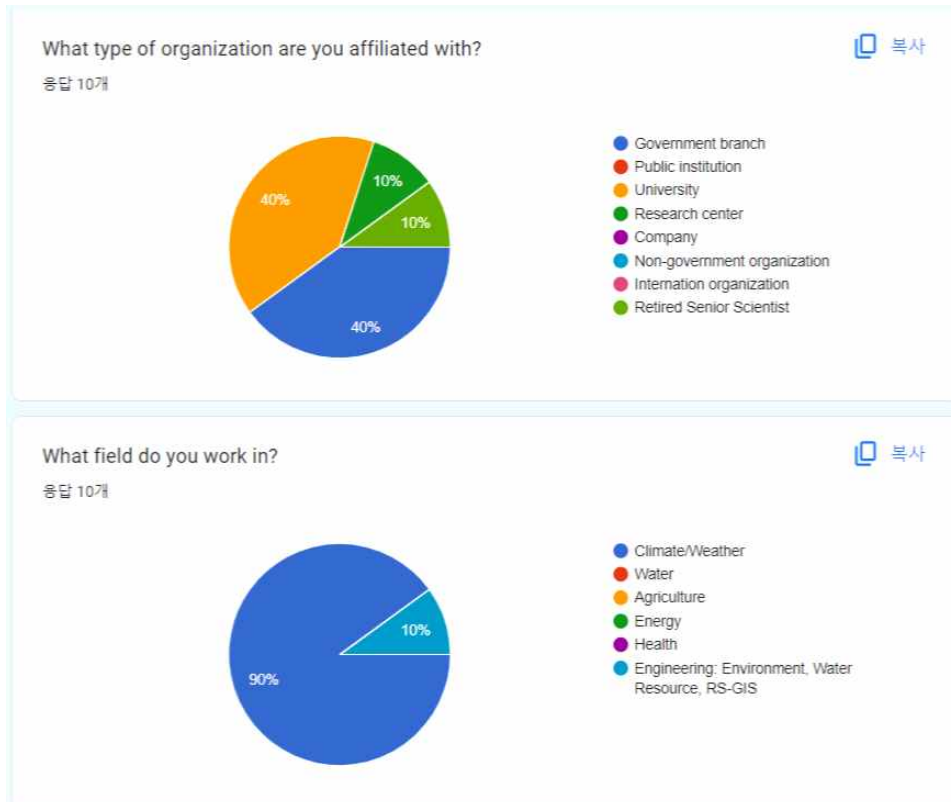


Figure 3.26. Results of questionnaire on APCC Climate Outlook subscribers' affiliation and field.

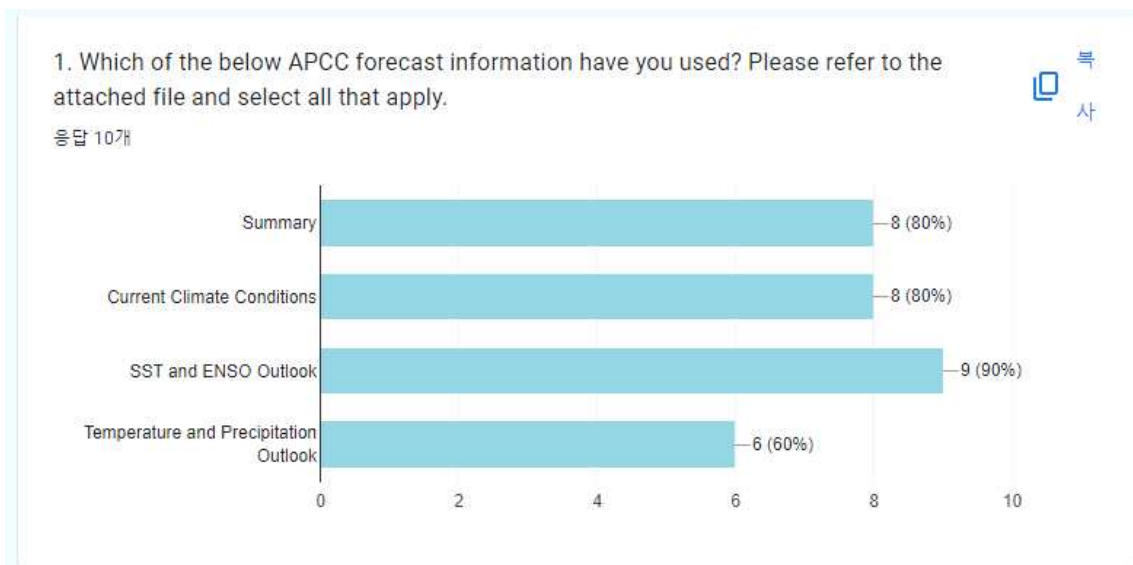


Figure 3.27. Results of questionnaire on the frequently used content of APCC climate outlook.

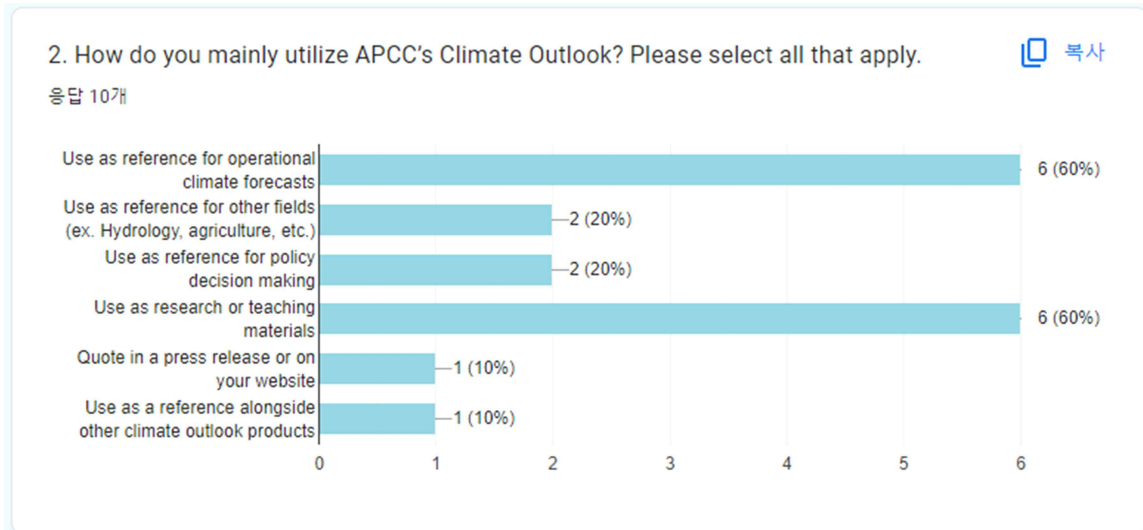


Figure 3.28. Results of questionnaire on purpose of use of APCC Climate Outlook.

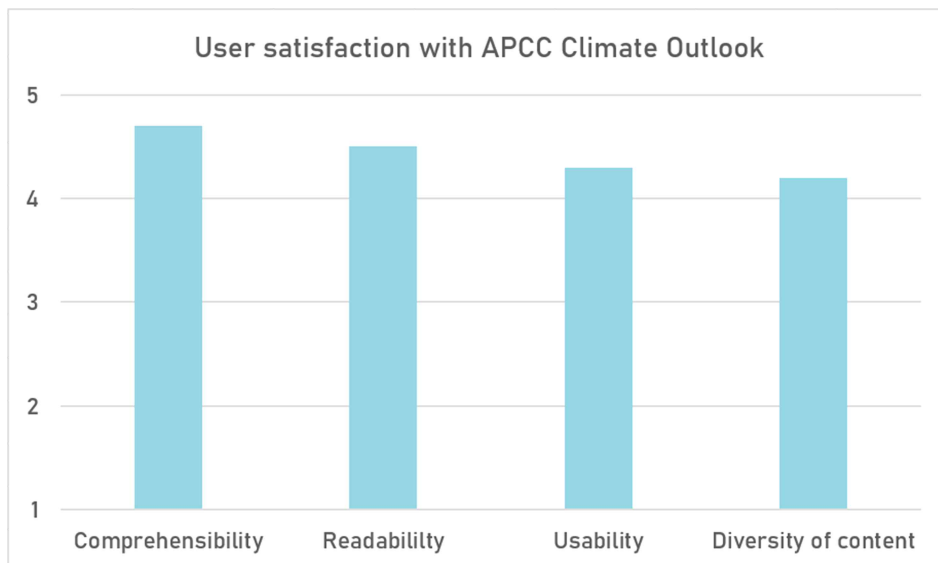


Figure 3.29. Results of 5-scale questionnaire on APCC Climate Outlook subscribers' satisfaction.

3.1.4.4. 개선된 기후전망 배포

타 기관 기후전망 디자인 및 구독자 만족도 조사 결과를 종합하여 2023년 11월부터 새로운 디자인의 기후전망 배포를 시작하였다(Figure 3.30). 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 높였

으며 단순한 줄글 형식에서 벗어나 글머리 기호 및 확률 카테고리과 강도를 색상으로 차별화하여 표현함으로써 가독성을 한 번 더 높였다.

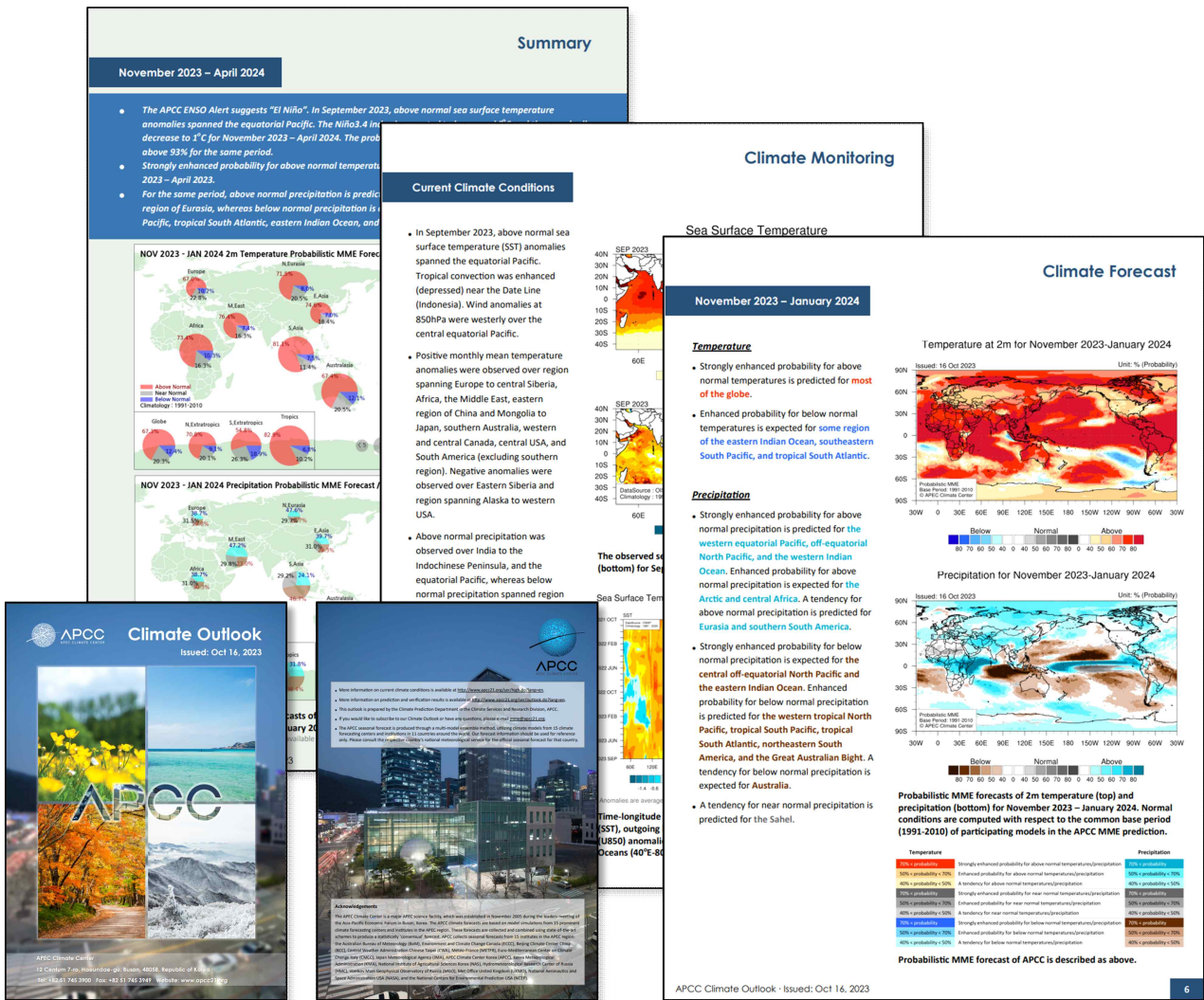


Figure 3.30. New version of APCC Climate Outlook.

3.1.5. 고해상도 관측자료 전처리 시스템 및 고해상도 기후예측 검증시스템 구축

고해상도 MME 계절예측 정보를 검증하기 위해선 고해상도의 관측자료가 필요하다. 하지만 현업에서 사용할 검증용 관측자료는 다음과 같은 조건이 필요하다. 첫째, 공간 해상도가 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 와 같거나 더 고해상도의 자료이어야 한다. 저해상도를 고해상도로 통계적 규모 축소 방법을 이용할 경우 축소 과정에서 오차가 발생하는 등 불확실성이 커질 수 있으므로 최소 예측자료와 동일한 해상도의 관측자료가 필요하다. 둘째, MME hindcast 기간을 아우르는 장기간의 관측자료이어야 한다. MME 계절예측 정보는 기후평년 대비 편차값 혹은 확률값을 기반으로 하므로 기후평년기간에 해당하는 hindcast 기간 이상의 기간을 보유한 관측자료여야 한다. 셋째, 월 단위 이하의 업데이트 주기이어야 한다. MME 계절예측 정보는 매월 1회 제공됨에 따라 관측자료 또한 매월 업데이트되어야 하며, 관측자료 내 관측 시간과 현재 시간의 차이는 적으면 적을수록 좋다. 위의 조건들을 만족하는 관측자료를 조사하고 선별하여 Table 2.6~2.8과 같은 관측자료를 고해상도 검증 자료로 사용하였다. 이러한 관측자료를 검증에 활용하기 앞서 표준화된 양식으로 처리하는 전처리 시스템을 먼저 구축하였다.

고해상도 관측자료 전처리 시스템은 python version 3 기반의 시스템이다. 본 시스템은 python을 사용하기 위해 numpy, netCDF4, xarray, pandas 패키지를 사용하였으며, 해상도의 조정을 위해 xesmf 패키지도 사용하였다. 관측자료 전처리 시스템은 관측자료별 독립된 프로그램으로 구성되어 있으며, 변수, 파일명, 경로, 관측 기간 등을 설정하는 yaml과 실질적으로 직접적인 연산과정을 맡고 있는 python 모듈부 있다. 고해상도 관측자료 전처리 시스템의 세부 코드들은 Table 3.4와 같다. 여기서 사용자 편의 프로그램을 통해 모든 관측자료를 일괄적으로 처리할 수 있도록 하였고, crontab을 활용하여 자동으로 프로그램이 수행될 수 있도록 구축하였다.

Table 3.4. Lists of high resolution observation data pre-process system.

구분	명칭	개별 프로그램 실행 코드
관측자료 처리 메인 프로그램	ERA5	ERA5.py, ERA5.yaml
	MERRA2	MERRA2.py, MERRA2.yaml
	OISSTv2	OISST.py, OISST.yaml
	CPC	CPC.py, CPC.yaml
사용자 편의 프로그램	crontab용	run4crontab.py
	사용자용	run4user.py
모듈 패키지	해상도 변경	esmf_regrid.py
	출력파일 설정	nc_out.py
기타	land-sea mask	lsmask_OISST_180x360.nc

또한 사용자가 해상도를 설정하는 설정부를 삽입하여 저해상도 및 고해상도를 자유롭게 변환이 가능하도록 하였으며, 본 시스템을 통해 관측자료의 전처리를 수행하면 해상도별 설정된 경로에 원하는 해상도의 관측자료별 netcdf 자료가 생산된다.

위에서 생산된 고해상도 관측자료를 바탕으로 고해상도 MME 계절예측 자료의 검증시스템 (고해상도 기후예측 검증시스템)을 구축하였다. 고해상도 기후예측 검증시스템은 관측자료 전처리 시스템과 마찬가지로 python이 주 프로그램이며, 기존 저해상도 검증 그래픽 자료와의 유기성을 위해 고해상도 검증 그래픽 자료는 NCL에서 산출하도록 하였다. 본 시스템은 예측 종류별(forecast/hindcast), 예측기간별(3개월/6개월), 검증기법별로 작성된 개별 프로그램으로 구성되며, 기후값 및 편차값 생산, 검증값 산출 등 연산에 필요한 프로그램은 python으로 작성되었고 자료 출력 및 각종 설정 등의 과정도 모듈화하여 함께 구성되었다. 이러한 개별 프로그램은 독립적으로 수행이 가능하며, 사용자 편의성을 고려하여 일괄적으로 처리하거나 crontab을 활용하여 자동으로 수행할 수 있도록 하였다. Figure 3.31은 고해상도 기후예측 검증시스템의 구성을 나타내는 그림이다.

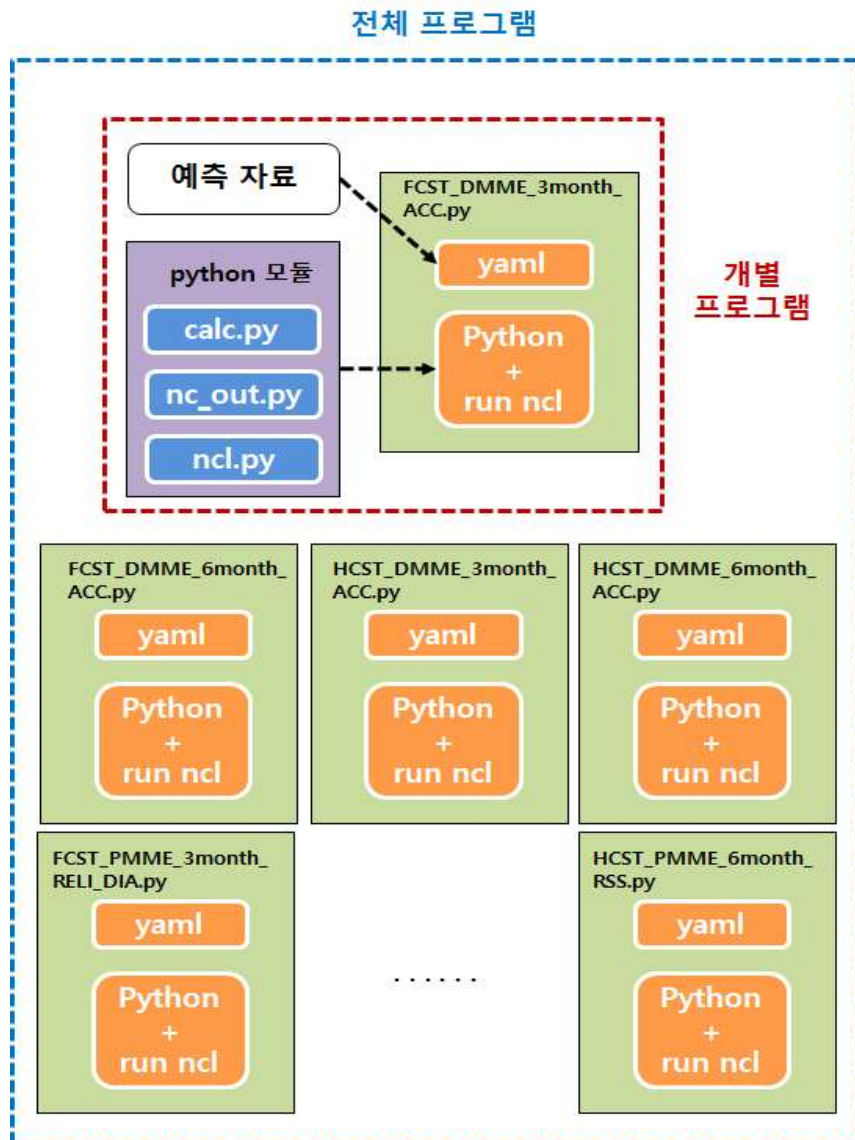


Figure 3.31. Structure of high resolution verification system.

이러한 고해상도 기후예측 검증시스템은 크게 4가지 디렉터리로 구성되어 있으며, 실질적인 작업과 메인 및 연산에 필요한 package 프로그램이 위치한 “RUN” 디렉터리와 검증 결과물이 생산되는 “DATA” 디렉터리, 각 결과물별 그래픽으로 표출할 수 있도록 NCL 스크립트가 생산되는 “NCL” 디렉터리, NCL 스크립트를 통해 최종 그래픽 자료가 산출되는 “FIG” 디렉터리가 있다(Figure 3.32).

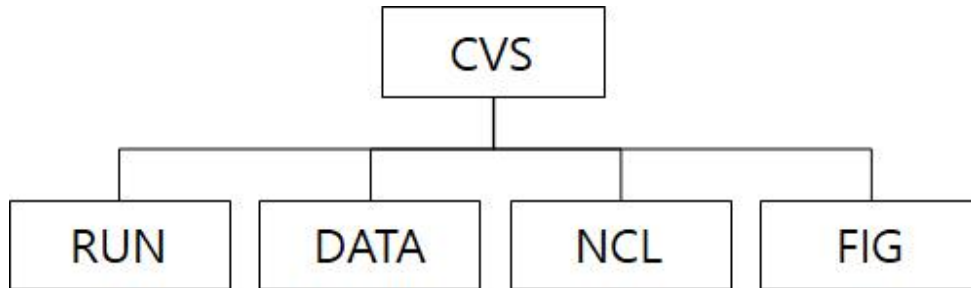


Figure 3.32. Structure of directories for high resolution verification system.

연산 과정을 담당하는 “RUN” 디렉터리에 구성된 모든 프로그램의 목록은 Table 3.5~3.7 과 같다. Table 3.5와 같이 검증 기법별 MME 예측 종류에 따라 개별적으로 프로그램을 분리하여 검증 기법 내 설정 변경 혹은 개선사항이 있는 경우 해당 프로그램만 수정할 수 있도록 하는 등 시스템의 안정성을 고려하였다.

Table 3.5. Lists of python module codes in the high resolution verification system.

구분	작업 내용	사용자 모듈 코드
모듈 패키지	관측/예측 기후값, 편차값 연산	calc_OBS_DMME.py, calc_OBS_PMME.py calc_DMME_MME_OUT.py, calc_PMME_MME_OUT.py calc_MME_IN.py, calc_regional_domain.py
	검증 계산	calc_determ_score.py
	결과물 출력	nc_out_DMME_FCST.py, nc_out_DMME_HCST.py nc_out_PMME_FCST.py, nc_out_PMME_HCST.py
	ncl 스크립트 제작 모듈	ncl_FCST_ACC.py, ncl_HCST_ACC.py, ncl_FCST_RMSE.py, ncl_HCST_RMSE.py, ncl_HCST_HSSS.py, ncl_FCST_RELI_DIA.py, ncl_HCST_RELI_DIA.py, ncl_FCST_ROC_Curve.py, ncl_HCST_ROC_Curve.py, ncl_HCST_ROC_Score.py, ncl_FCST_BSS.py, ncl_HCST_BSS.py, ncl_FCST_HSS.py, ncl_HCST_HSS.py, ncl_FCST_RPSS.py, ncl_HCST_RPSS.py, ncl_FCST_SST.py
기타	calc_regional_domain.py, read_MODEL_HIND_TIME.py, make_season_month_name.py, run_command.py	

Table 3.6. Lists of main program (python) codes in the high resolution verification system.

구분	작업 내용	개별 프로그램 코드
검증별/ 예측 종류별 메인 프로그램	Forecast/ DMME/ 3개월/	FCST_DMME_3month.yaml, FCST_DMME_3month_ACC_RMSE.py
	Forecast/ DMME/ 6개월/	FCST_DMME_6month.yaml, FCST_DMME_6month_ACC_RMSE.py
	Hindcast/ DMME/ 3개월/	HCST_DMME_3month.yaml, HCST_DMME_3month_ACC_RMSE.py, HCST_DMME_3month_MSSS.py
	Hindcast/ DMME/ 3개월/	HCST_DMME_6month.yaml, HCST_DMME_6month_ACC_RMSE.py, HCST_DMME_6month_MSSS.py
	Forecast/ PMME/ 3개월/	FCST_PMME_3month.yaml, FCST_PMME_3month_RELI.py, FCST_PMME_3month_ROC.py, FCST_PMME_3month_BSS.py, FCST_PMME_3month_HSS.py, FCST_PMME_3month_RPSS.py
	Forecast/ PMME/ 6개월/	FCST_PMME_6month.yaml, FCST_PMME_6month_RELI.py, FCST_PMME_6month_ROC.py, FCST_PMME_6month_BSS.py, FCST_PMME_6month_HSS.py, FCST_PMME_6month_RPSS.py
	Hindcast/ PMME/ 3개월/	HCST_PMME_3month.yaml, HCST_PMME_3month_RELI.py, HCST_PMME_3month_ROC.py, HCST_PMME_3month_BSS.py, HCST_PMME_3month_HSS.py, HCST_PMME_3month_RPSS.py
	Hindcast/ DMME/ 6개월/	HCST_PMME_6month.yaml, HCST_PMME_6month_RELI.py, HCST_PMME_6month_ROC.py, HCST_PMME_6month_BSS.py, HCST_PMME_6month_HSS.py, FCST_PMME_6month_RPSS.py
	해양 지수	FCST_DMME_6month.yaml, FCST_DMME_6month_SST.py
	crontab 용	run4crontab_FCST_DMME.py, run4crontab_HCST_DMME.py, run4crontab_FCST_PMME.py, run4crontab_HCST_PMME.py
	사용자 용	run4user_FCST_DMME.py, run4user_HCST_DMME.py, run4user_FCST_PMME.py, run4user_HCST_PMME.py

Table 3.7. Lists of fortran codes in the high resolution verification system.

구분	작업 내용	사용자 모듈 코드
포트란 모듈	Forecast 검증 연산	TERC_OBS_FCST.so, CATE_OBS_FCST.so, AGGR_ROC_FCST.so, RELI_DIA_FCST.so, RPSS_FCST.so, BSS_FCST.so, HSS_FCST.so
	Hindcast 검증 연산	TERC_OBS_HCST.so, CATE_OBS_HCST.so, AROC_MC_HCST.so, AGGR_ROC_HCST.so, RELI_DIA_HCST.so, RPSS_HCST.so, BSS_HCST.so, HSS_HCST.so

고해상도 계절예측 검증시스템은 Table 3.5와 같이 사용자가 전체 검증 기법에 대하여 한번의 설정을 통해 일괄적으로 처리할 수 있는 프로그램을 두어 작업 효율성과 편의성을 함께 증진시켰다. 여기서 Table 3.7에서와 같이 검증에 필요한 복잡하고 많은 양의 연산을 하기 위해 so 파일 형태의 fortran 코드를 python에서 활용할 수 있는 모듈로 구축하였으며, 이 과정에서 작업을 수행하는 서버 시스템의 환경에 따라 최초 1회 so 파일을 생성해주어야 한다.

Figure 3.33은 본 시스템을 통해 생산된 고해상도 검증 정보와 기존 저해상도 검증 정보의 비교 예시로서 기존 저해상도 강수/기온 예측 검증에 활용되는 저해상도 CAMS_OPI/NCEP로 산출된 ACC와 단순 보간(interpolation) 방법을 적용하여 고해상도로 규모 축소한 CAMS_OPI/NCEP로 산출된 ACC, MERRA2/ERA5 재분석자료를 사용하여 산출된 ACC를 비교한 그림이다. 기존 저해상도 예측자료에 대한 ACC와 단순 보간 방법을 적용하여 고해상도로 규모 축소한 관측자료로 산출한 ACC는 큰 차이가 없으나, 고해상도 재분석자료를 사용하였을 때는 지역별로 차이가 나타난다. 이는 CAMS_OPI와 MERRA2를 생산하는 자료의 성격 및 방식에 따른 차이이며, 특히 강수 재분석자료를 검증 자료로 활용할 경우 해석에 유의해야 한다. 확률론적 MME에 대해서도 기존 저해상도 검증 정보와 관측자료별 고해상도 검증 정보에 대해서 비교·분석하였다(Figure 3.34). 확률론적 MME에서도 기존 저해상도 계절예측에 대한 검증과 저해상도 관측자료에서 단순 보간 방법을 적용하여 고해상도 계절예측과 검증한 ACC는 큰 차이가 없으나, 고해상도 재분석자료를 사용한 검증 결과값은 차이가 다소 발생하는 것을 보였다. 하지만 본 결과는 단일 계절에 대한 검증 결과로서 사례 선정에 따라 결과가 다소 달라질 수 있기 때문에 장기간의 충분한 검증 자료가 축적이 된다면 보다 객관적인 비교 평가가 가능하리라 사료된다.

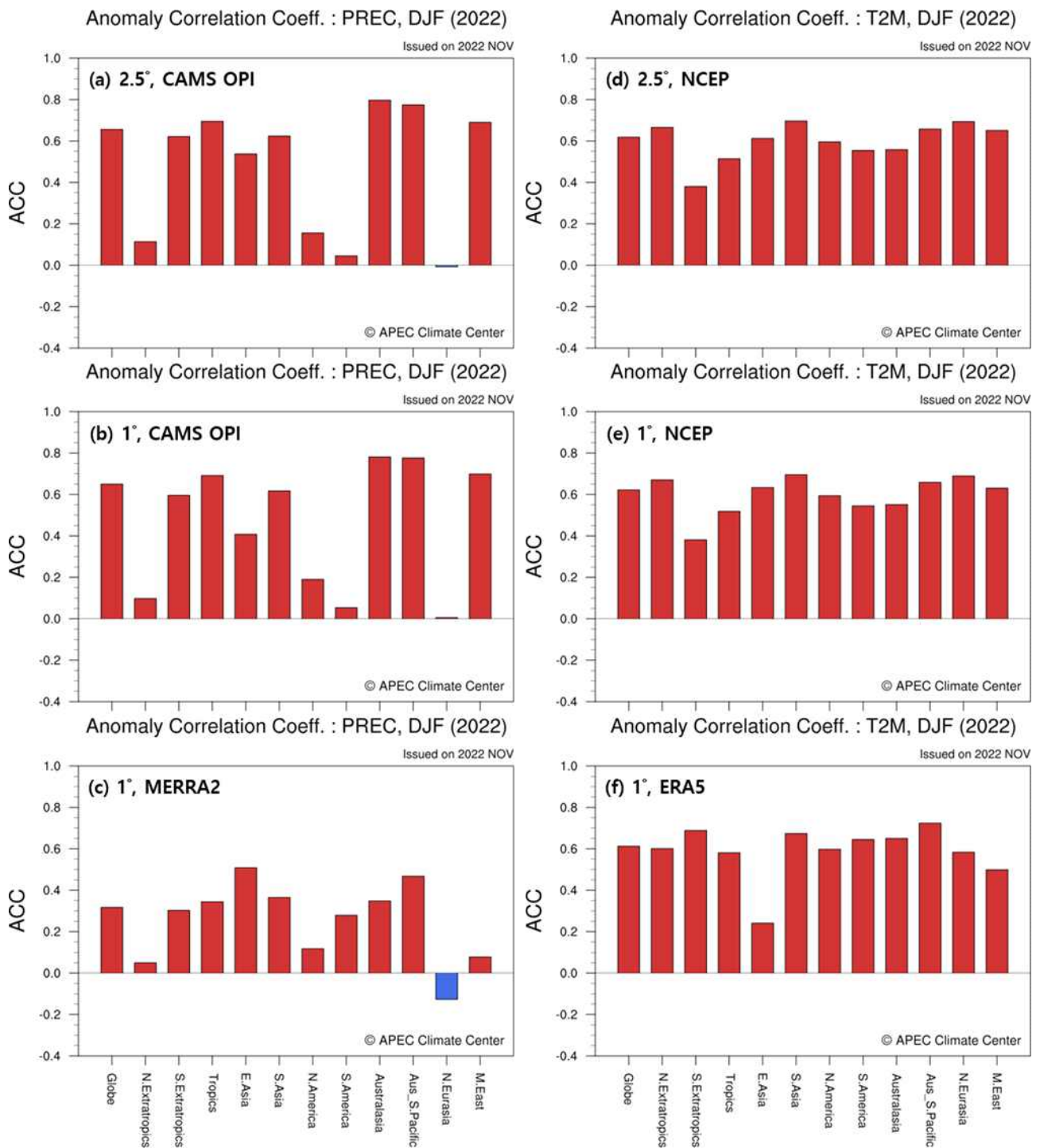


Figure 3.33. Regional ACC calculated by each respective observations for 2022DJF precipitation (a-c) and 2-m temperature (d-f) forecasts.

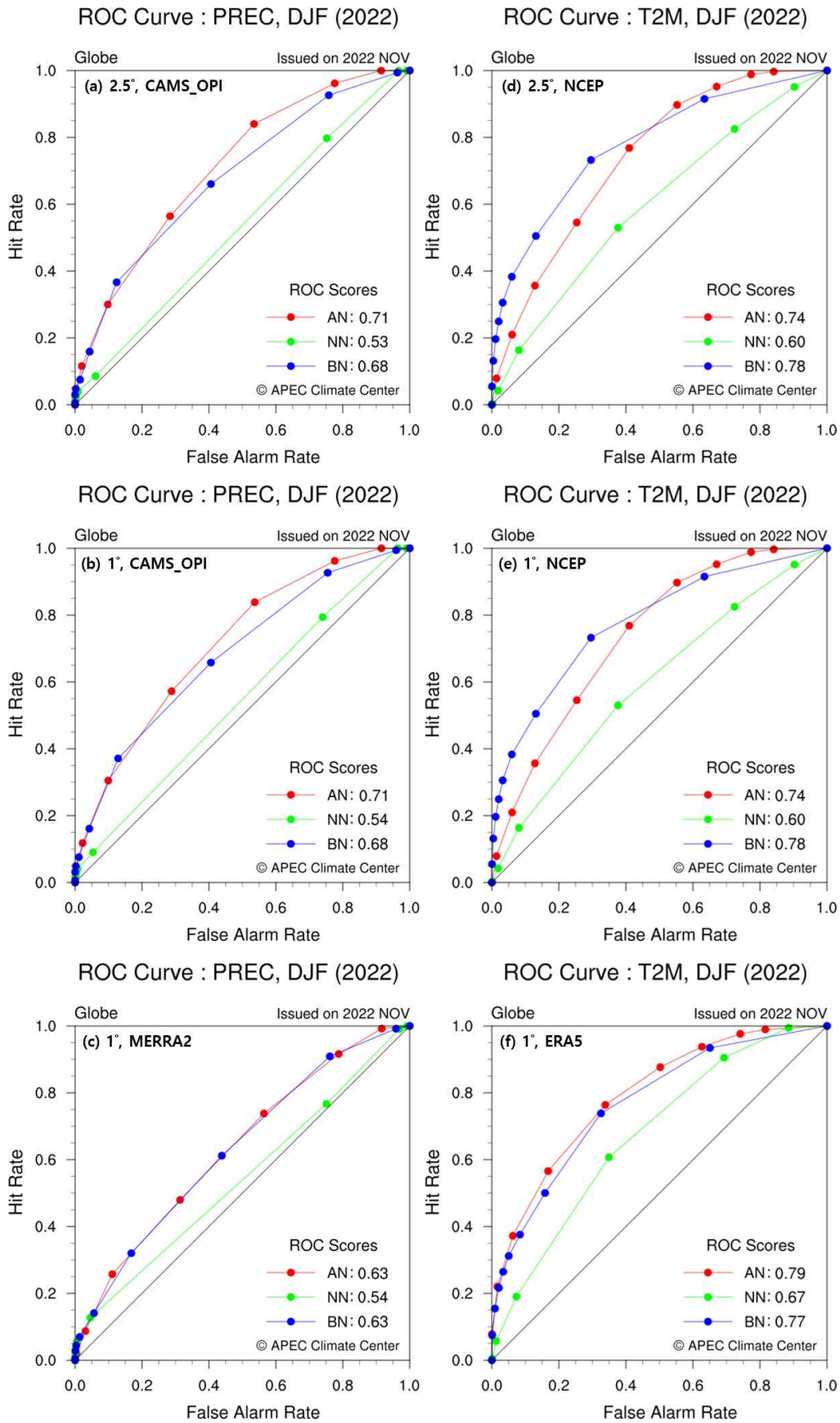


Figure 3.34. ROC curve and score calculated by each respective observations for 2022DJF precipitation (a-c) and 2-m temperature (d-f) forecasts.

위와 같이 구축된 고해상도 계절예측 검증시스템은 별도로 작성된 운영매뉴얼을 참고하여 수행할 수 있으며, 모든 검증 자료 산출까지 총 19시간 29분 가량 작업이 소요된다. 단, 생산하고자 하는 검증 기법과 선택된 계절의 특성에 따라 작업 소요 시간은 변동될 수 있다. 본 시스템의 구축과 동시에 내부 활용의 목적으로 검증 자료를 매월 시범 운영을 수행하고 있으며, 별도의 시범 운영 일지를 작성하여 작업 현황 및 생산 이력을 관리하고 있다. 2024년 3월, 2023DJF 기간에 해당하는 관측자료가 전부 수집될 시 2년치의 자료를 바탕으로 저해상도 및 고해상도의 계절예측에 대한 검증을 비교 분석할 예정이며, 충분한 양의 검증 자료가 축적된 후 고해상도 검증 정보의 제공 여부 및 제공 형태에 대해 계획을 수립할 예정이다.

3.1.6. MME hindcast 기간 확장을 위한 기반 분석

APCC MME hindcast 기간의 한계를 극복하고 WMO의 권고사항을 적용하기 위해 Table 2. 11에서와 같은 민감도 실험을 수행하였다. 민감도 실험에 앞서 관측자료를 기반으로 기존 hindcast 기간(1991-2010년)과 두 가지 hindcast 기간 확장 방안(1991-2014년, 1993-2016년)간 차이에 대한 통계적 유의성 분석을 선행하였다. Figure 3.35는 기존 hindcast 기간인 1991-2010년 기간과 첫 번째 확장 방안인 1991-2014년 기간간 관측된 기후평년값의 차이에 대한 t-test를 계절(MAM, JJA, SON, DJF)별, 변수(강수, 기온, 지위고도, 해수면 온도)별로 수행한 결과이다.

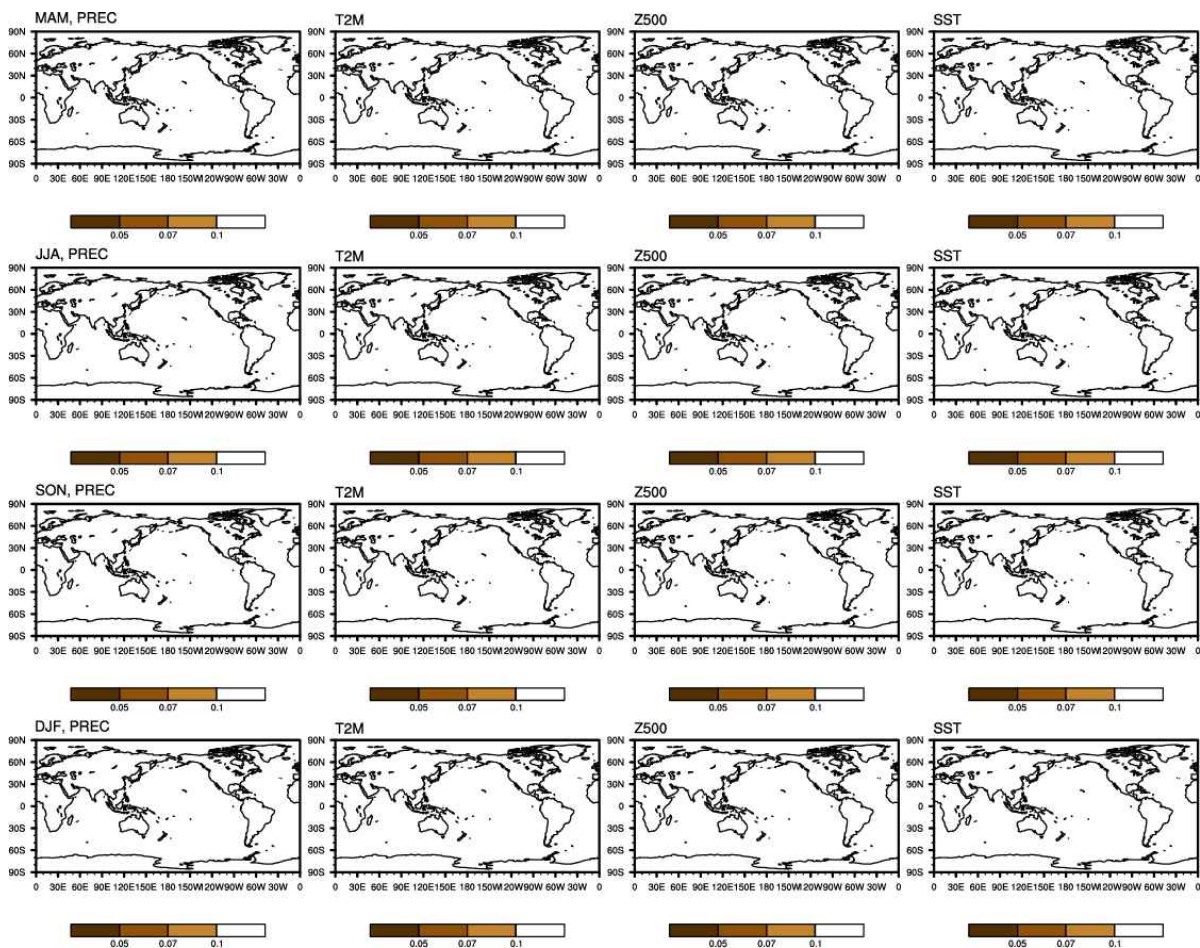


Figure 3.35. Results of t-test on differences in long-term mean between 1991-2010 and 1991-2014.

1991-2010년과 1991-2014년의 기후평년값의 차이는 통계적으로 유의하지 않은 수준으로써 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 1991-2014년 기간 내 1991-2010년의 기간이 포함됨에 따라 이 두 기간의 평균값이 서로 유사함을 의미한다. 위와 유사하게 기존 hindcast 기간인 1991-2010년 기간과 두 번째 확장 방안인 1993-2016년의 기간의 차이에 대한 통계적 유의성 분석을 수행하였다(Figure 3.36).

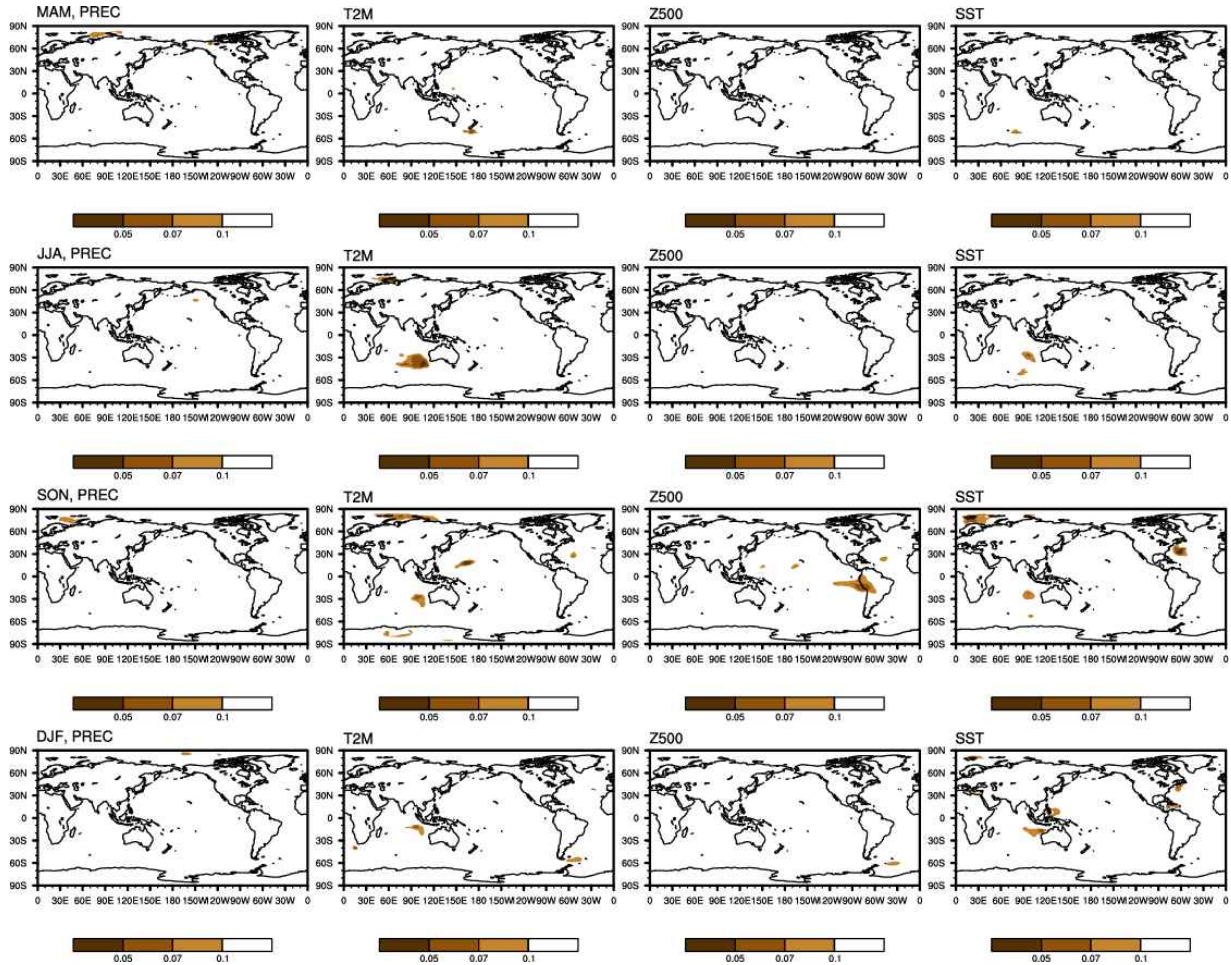


Figure 3.36. Results of t-test on differences in long-term mean between 1991-2010 and 1993-2016.

1991-2010년과 1993-2016년의 기후평년값의 차이는 1991-2014년 기간에 비해 통계적으로 유의한 차이가 일부 계절 및 지역에서 나타났다. 기온의 경우 봄철(JFM)을 제외한 남인도양 일부 지역에서 뚜렷한 차이가 나타났으며, 500hPa 지위고도에서는 가을철(SON) 남아메리카 일부 지역에서 유의한 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 2년 차이임에도 불구하고 1991-2010년과 1993-2016년 기간의 기후학적 특성이 국한된 지역이긴 하지만 일부 다르다는 것을 의미한다. 추가적으로 WMO에서 권고하는 신 기후평년기간인 1991-2020년(30년) 기간과 두 확장 방안의 기간과의 평균값 차이도 살펴본 결과, 정반대의 결과가 나타났다. 1991-2020년과 1993-2016년의 평균값 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났으며, 1991-2014년과의 평균값 차이는 매우 한정적으로 나타나긴 하지만 통계적 유의한 차이를 보였다. 정리하면, 첫 번째 방안인 1991-2014년의 기간은 기존 MME hindcast 기간과 기후학적 특성이 유사하지만,

최근 기후평년기간인 1991-2020년 기간과는 통계적으로 유의한 차이가 나타남에 따라 최근 기후 특성이 일부 지역에서 다르다는 것을 의미하고, 두 번째 방안인 1993-2016년의 기간은 기존 MME hindcast 기간과 기후학적 특성의 근소한 차이를 보이나, 최신 기후평년기간과는 유사한 특성을 보임을 의미한다.

예측에서 주요한 기후인자인 ENSO에 대해서도 통계적 유의성 분석을 수행하였다. 기존 hindcast 기간인 1991-2010년을 기준으로 두 가지 hindcast 기간과의 Nino3.4 지수의 분포에 대한 KS-test를 실시하였으며, P-value 분석을 통해 그 차이를 살펴보았다. 먼저 1991-2010년과 1991-2014년의 기간에서 Nino3.4 지수의 분포는 P-value가 거의 1에 가까울 정도로 유사한 분포를 보였으며(Figure 3.37), 1991-2010년과 1993-2016년 기간에서의 Nino3.4 지수 분포는 1991-2014년 기간에 비해 P-value가 다소 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다(Figure 3.38).

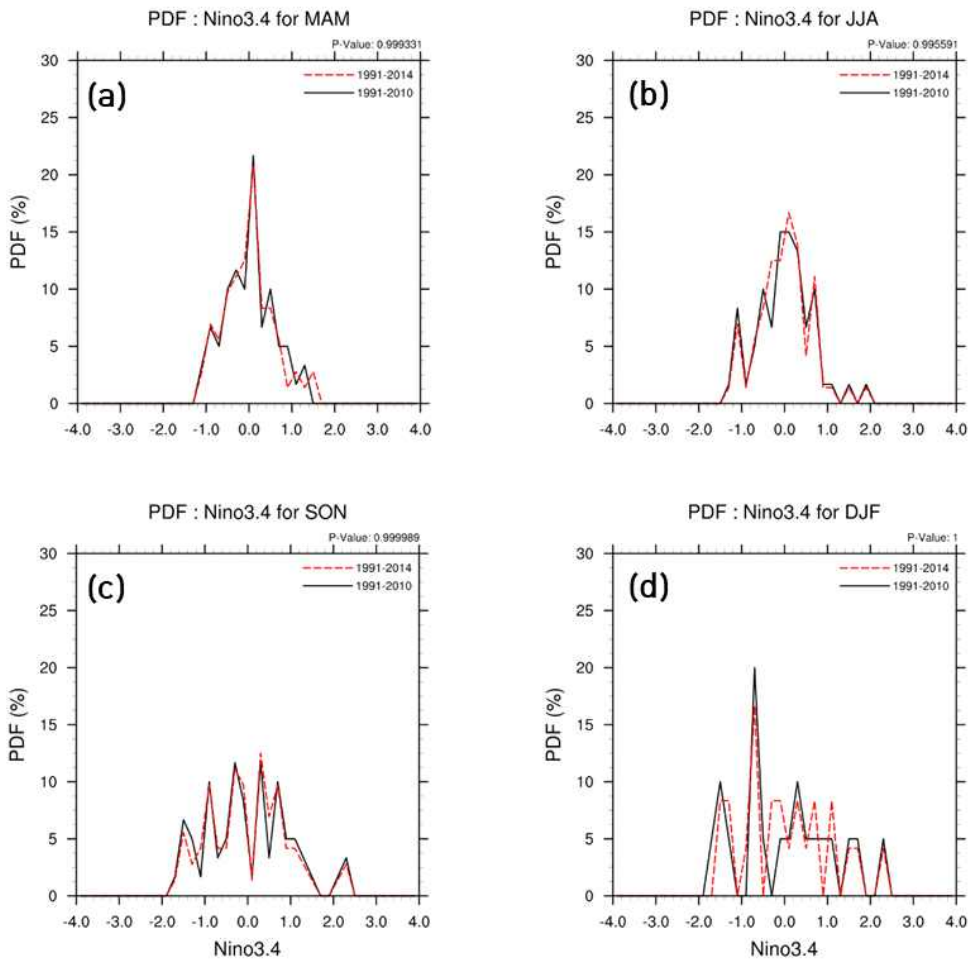


Figure 3.37. Results of KS-test on differences in the distribution of Nino3.4 indices between 1991-2010 and 1991-2014.

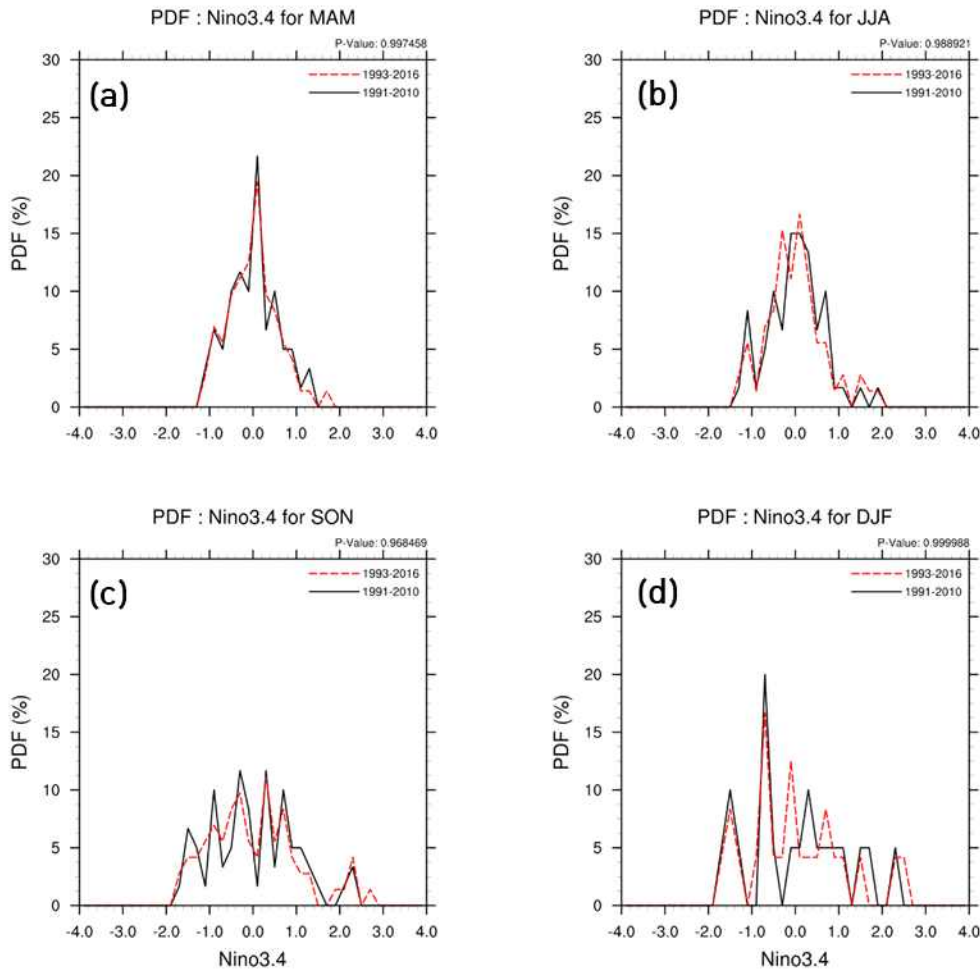


Figure 3.38. Results of KS-test on differences in the distribution of Nino3.4 indices between 1991-2010 and 1993-2016.

따라서 1991-2014년과 1993-2016년 기간간 평균값과 분포의 큰 차이는 없으나 기준 기간에 따라 일부에서 유의한 차이가 나타나면서 해당 특성이 나타나는 계절, 지역에 대해 해석에 유의할 필요가 있다.

Table 2.11에서 설계한 바와 같이 실험별 MME를 산출하고, 각각의 예측력에 대하여 분석을 수행하였다. Figure 3.39는 각 실험에 대한 hindcast 기온 및 강수의 ACC 계절 분포와 기준 실험(CTR, control)과의 차이 비율을 비교한 그림이다. 실험별 hindcast 기온 및 강수의 ACC는 근소한 차이이긴 하나, 기온의 경우 JFM, OND 계절을 제외한 나머지 계절에 대하여 1993-2016년의 기간을 사용한 SCM3, 4가 SCM1, 2에 비해 ACC가 높게 나타나며, CTR과도 특히 FMA~MJJ까지 계절에서 더 높은 ACC를 보였다. 반면 강수의 경우 AMJ~JAS를 제외한 계절에서 CTR에 비해 대체로 ACC가 낮게 나타나지만 SCM1, 2에 비해 SCM3, 4가 비교적 더 높은 ACC를 보였다. 이는 평가 예측해를 각자 hindcast 기간이 아닌 공통 기간인 1993-2010년으로 평가할 경우 실험별 예측력의 차이는 미미한 것으로 나타났다.

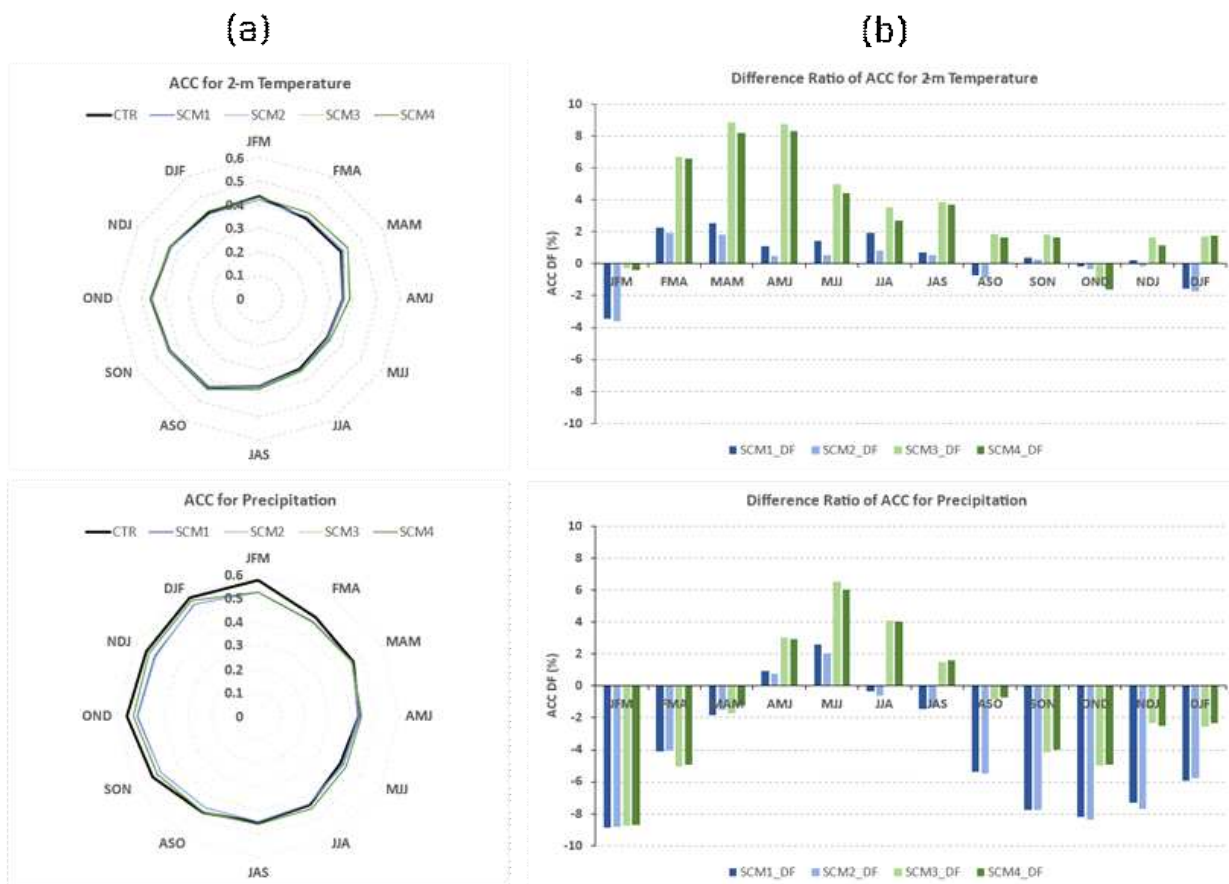


Figure 3.39. Seasonal distribution (a) of ACC for 2-m temperature (top) and precipitation (bottom) in each experiment and the ratio of ACC difference (b) from CTR.

다음은 RMSE에 대해서도 위와 유사하게 민감도 분석을 수행하였다(Figure 3.40). 그 결과, 마찬가지로 각 실험간의 큰 차이는 없었으나, 기온의 경우 MAM~MJJ의 예측 오차가 CTR에 비해 줄어들었으며, 강수의 경우 NDJ, DJF, JFM의 겨울철에서 예측 오차가 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 본 분석을 통해 각 실험별 예측력(ACC, RMSE)을 비교할 수 있었으며, 일부 계절을 제외한 대부분 계절의 예측력은 대체로 유사하거나 예측력의 긍정적 효과가 나타남을 확인하였다. 또한 예측력이 저하되는 원인은 평가 예측해를 동일하게 적용하지 아니하고 각자의 hindcast 기간 전체를 평가함으로써 확장된 기간인 SCM1~4는 24년에 대한 평가를 하고 기준이 되는 CTR은 20년의 해에 대해 평가를 하기에 평가의 형평성에 대한 원인으로 사료된다.

hindcast 기간에 따른 예측 경향성을 살펴보기 위해 각 실험별 hindcast 기간에 대한 기온의 선형 추세와 관측과의 선형 추세를 비교하여 계절별(MAM, JJA, SON, DJF)로 분석을 수행하였다(Figure 3.41). 관측의 경우 신 기후평년기간인 1991-2020년의 추세를 분석함으로써 최근 기후 경향을 반영할 수 있도록 분석하였으며, 각 실험은 실험별 hindcast 기간에 대하여 추세를 분석하였다. 봄(MAM)철의 경우 양 극지역에 뚜렷한 온난화 경향이 나타나지만 CTR을 비롯한 나머지 실험에서는 해당 경향을 예측하지 못하였다. 그러나 추세 분포에 대해 공간 상관계수(PCC, Pattern Correlation Coefficient)를 분석한 결과, SCM4가 0.1399로써 나머지 실험들에 비해 관측과 유사한 상관성을 보였다. 여름철(JJA)의 경우는 남극에서 나타나는 강한 온난화

경향을 모든 실험에서 이를 모의하지 못하였으며 오히려 한랭 경향으로 모의하였으며, 중국 및 인도 반도에서 나타나는 한랭 경향도 모델에서는 나타나지 않았다. 하지만 CTR과 SCM1, 2의 경우 동태평양에 대해 다소 한랭 경향으로 예측하는데 비해 SCM3, 4는 관측과 비교적 유사한 경향을 보인다. 가을(SON)과 겨울(DJF)은 북극의 온난화 경향이 뚜렷하게 나타나는데, 모든 실험에서도 북극의 온난화 경향을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 그러나 CTR과 SCM1, 2의 경우 동태평양 지역의 기온을 관측에 비해 다소 한랭 경향이 나타나는 반면, SCM3, 4의 경우 북태평양 지역의 온난화 경향을 잘 모의하는 것을 확인할 수 있다. PCC를 분석한 결과 SCM4의 경우 가을철 0.7052, 겨울철 0.8096으로 가장 높게 나타났으며, SCM2의 경우 각각 0.6345, 0.7516, CTR의 경우 각각 0.5216, 0.6404의 순으로 나타났다. 정리하면, 관측에서 나타나는 온난화 경향을 모델에서는 비교적 잘 모의하지 못하지만 가을과 겨울철의 1993-2016년의 기간을 사용한 실험군(SCM3, 4)이 최근 기온 경향을 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다.

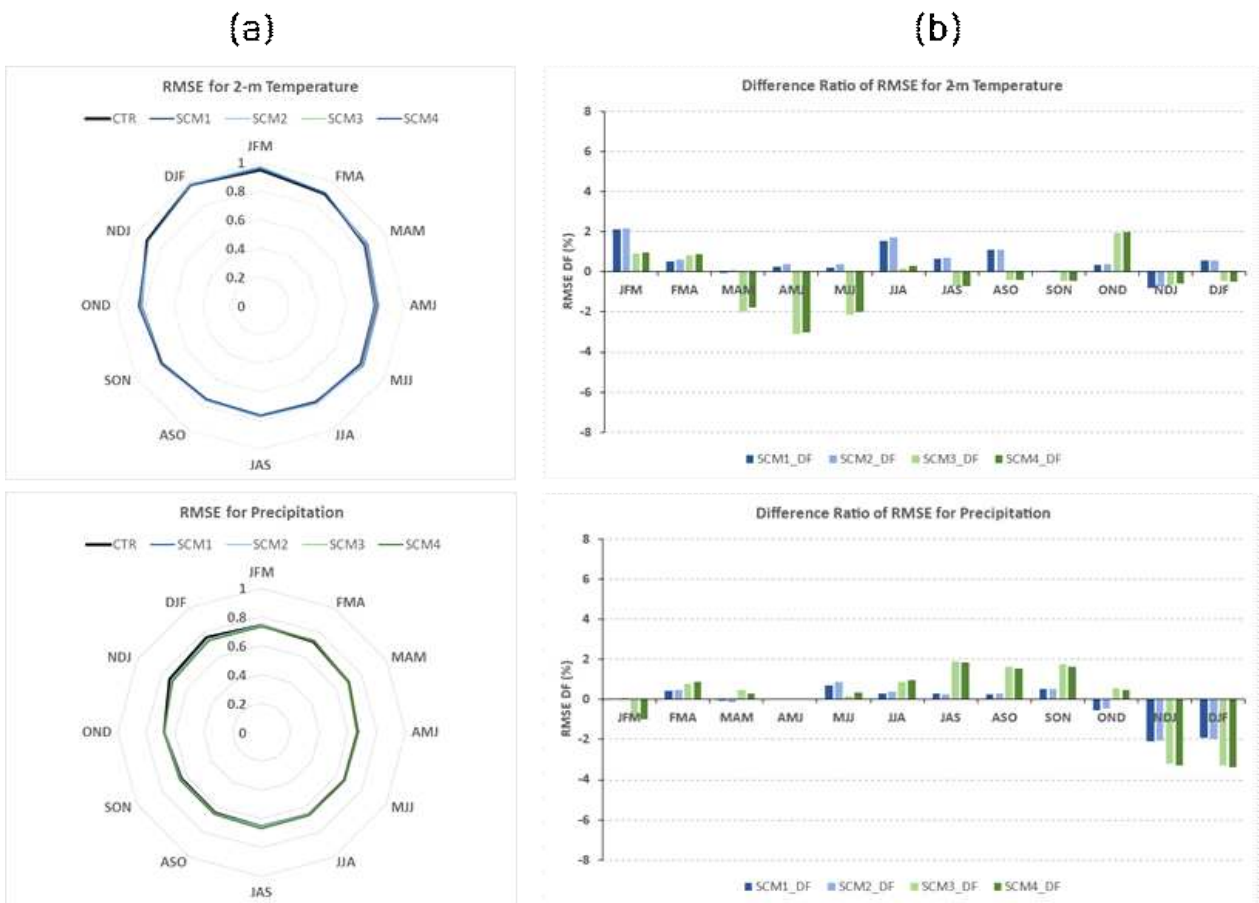


Figure 3.40. Seasonal distribution (a) of RMSE for 2-m temperature (top) and precipitation (bottom) in each experiment and the ratio of RMSE difference (b) from CTR.

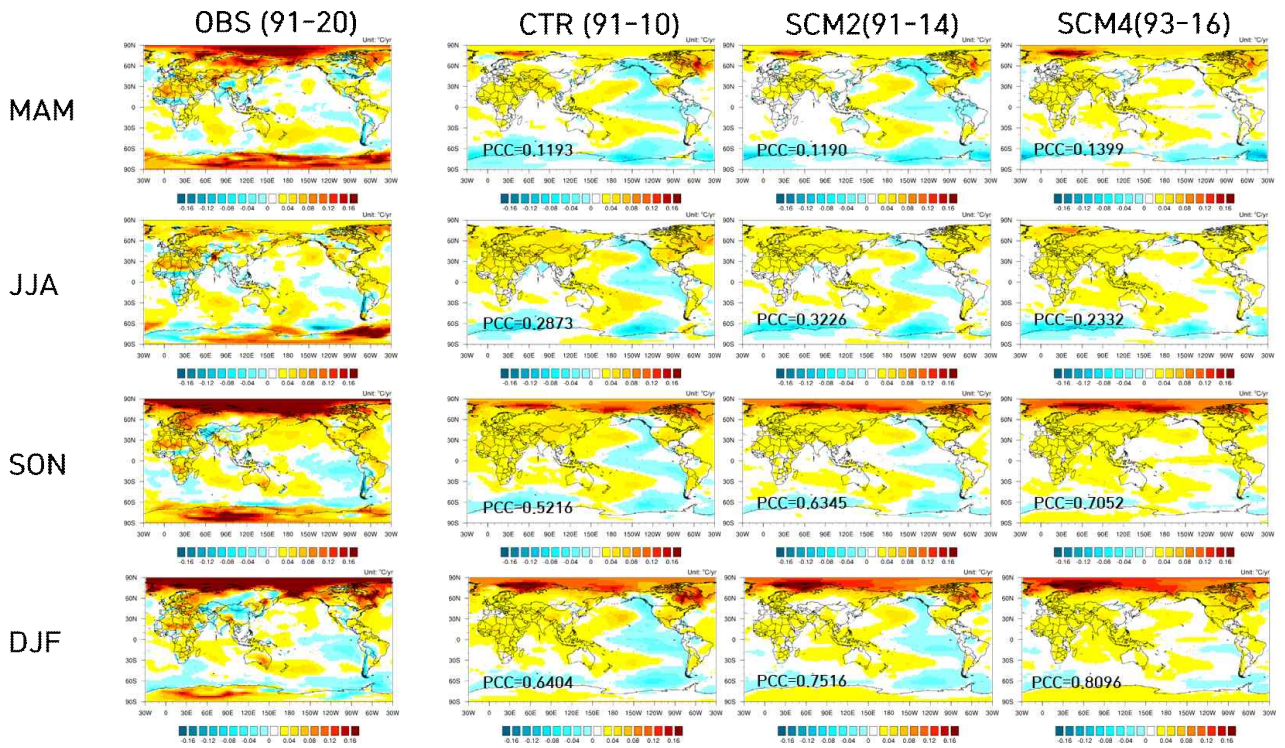


Figure 3.41. Trends of predicted temperature for each experiment during hindcast period and observed temperature during 1991-2020.

CTR 및 각 실험별 hindcast 기온에 대한 관측과의 시간 상관관계(TCC, Temporal Correlation Coefficient)를 계절별로 분석하였다(Figure 3.42). 대체로 CTR과 각 실험별 hindcast의 시간 변동은 유사하게 나타나고, TCC의 분포도 거의 유사하게 나타났다. TCC의 분포를 전 지구 평균하였을 때 근사하지만 SCM4가 CTR 및 SCM1, 2에 비해 높게 나타나는 경향을 보인다. 이는 SCM4가 타 실험들에 비해 비교적 시간 변동성을 관측과 유사하게 모의하는 것을 의미한다.

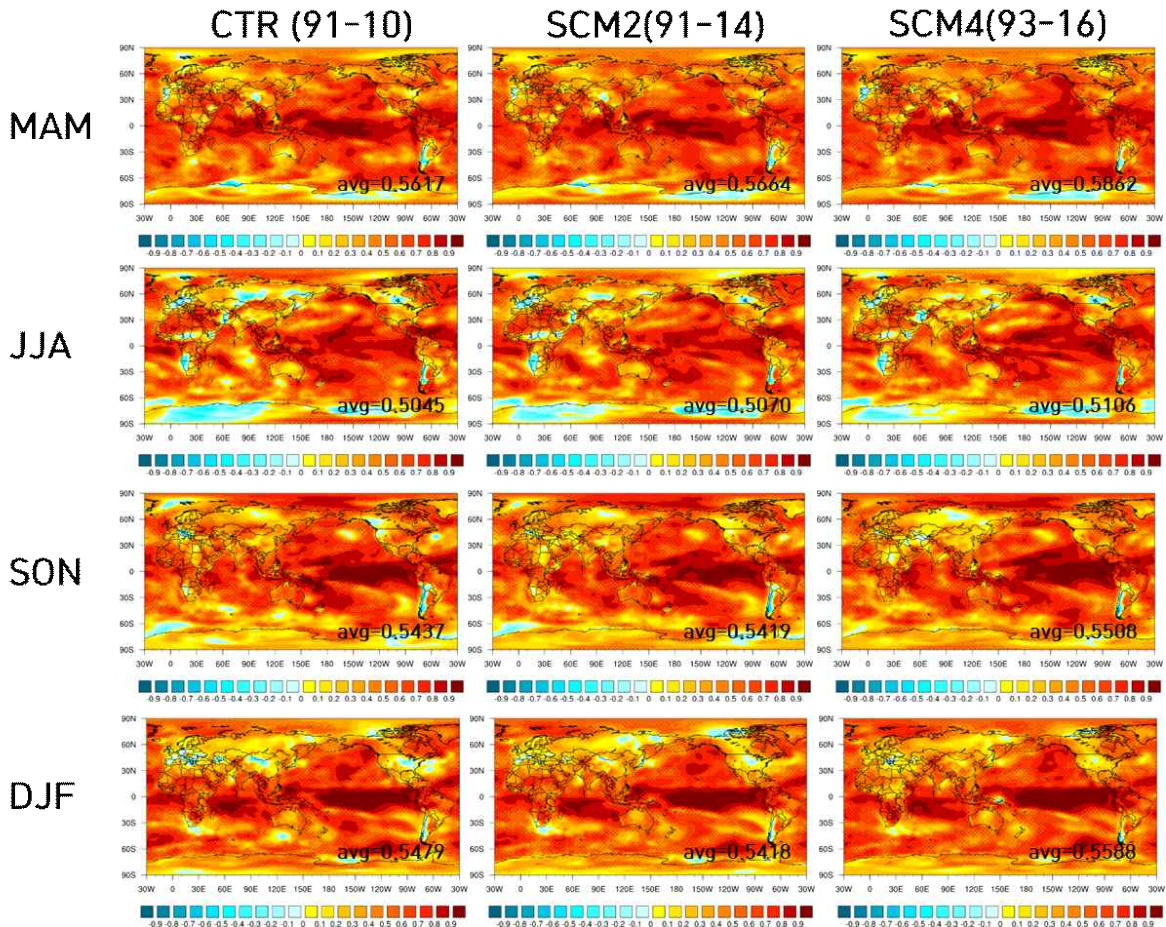


Figure 3.42. TCCs for time variability of temperature in each experiment.

지금까지 hidncast에 대한 각 실험별 예측력을 살펴보았다. 과거의 예측력 분석도 중요하지만 hindcast 기간이 변경됨에 따라 실시간 예측(real-time forecast)에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보는 것 또한 매우 중요하다. 먼저 각 실험별 2022JFM~DJF기간 동안의 forecast 평균 값에 대한 차이를 살펴보았다. Figure 3.43은 2022년 12개월 forecast에 대하여 강수, 기온, 해수면 온도에 대한 CTR 대비 SCM1~4의 차이를 통계적으로 분석한 결과이다.

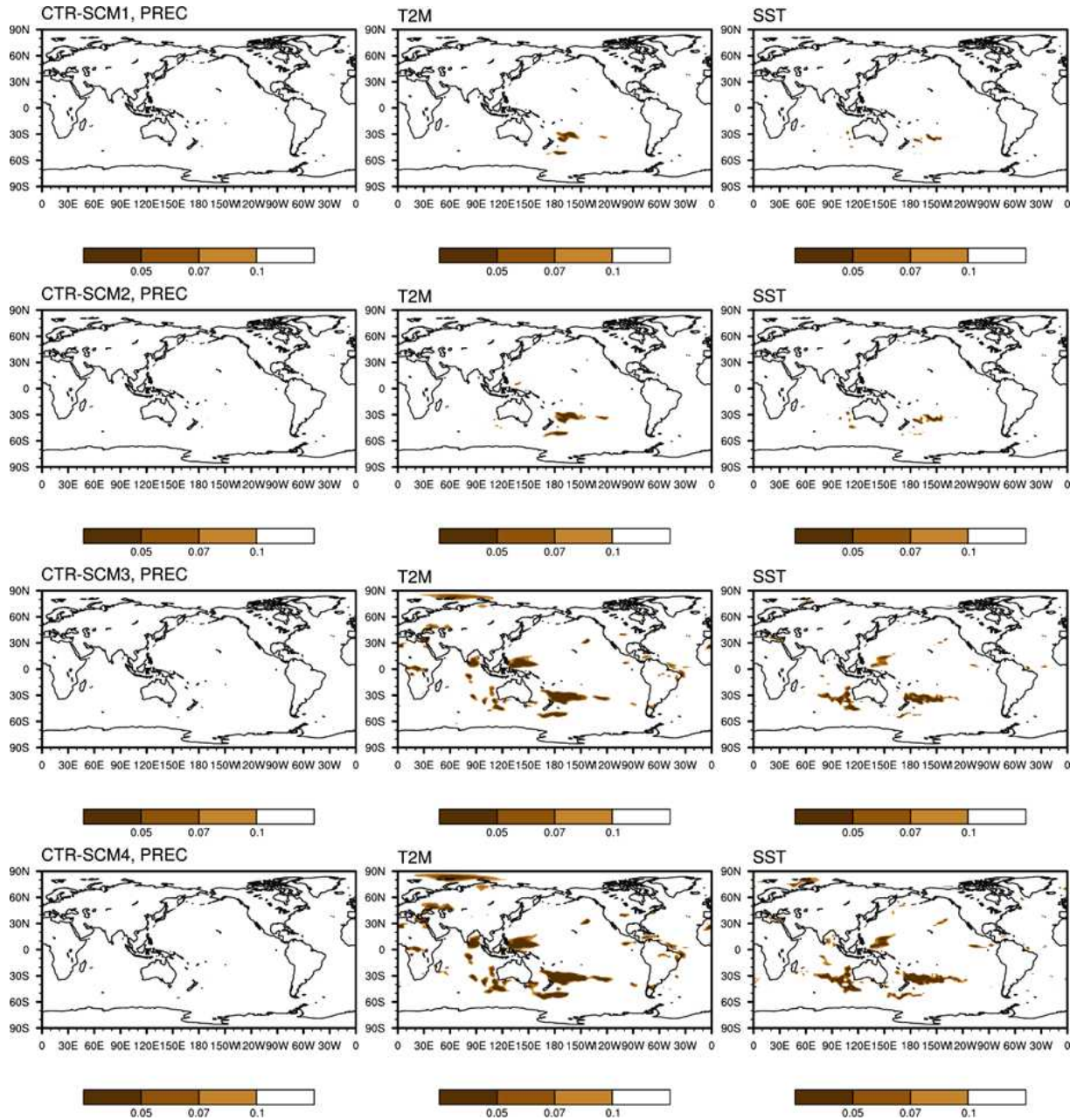


Figure 3.43. Results of t-test on differences between CTR and SCM1~SCM4 forecasts during 2022JFM~DJF.

강수의 경우 CTR을 비롯한 각 실험들간 차이가 크지 않은 것으로 나타났으며, 이는 강수의 forecast 예측 특성이 각 실험 간 유사함을 의미한다. 그러나 이와 달리 기온과 해수면 온도의 경우 북극해 및 남태평양, 서태평양을 비롯하여 인도양 일부 지역에 대해 통계적으로 유의한 차이가 있음을 확인할 수 있다. 특히 SCM3, 4가 SCM1, 2에 비해 뚜렷한 차이를 보이는 것이 특징이다. 이에 대한 차이를 보다 상세히 확인하기 위하여 각 실험별 forecast와 관측과의 차이를 비교함으로써 forecast와의 오차(bias) 분석을 수행하였다. Figure 3.44는 2022년 MAM, JJA, SON, DJF 계절에 대하여 각 실험별 forecast 기온 예측에 대한 관측과의 오차와 함께 관측의 편차장을 함께 제시한 그림이다.

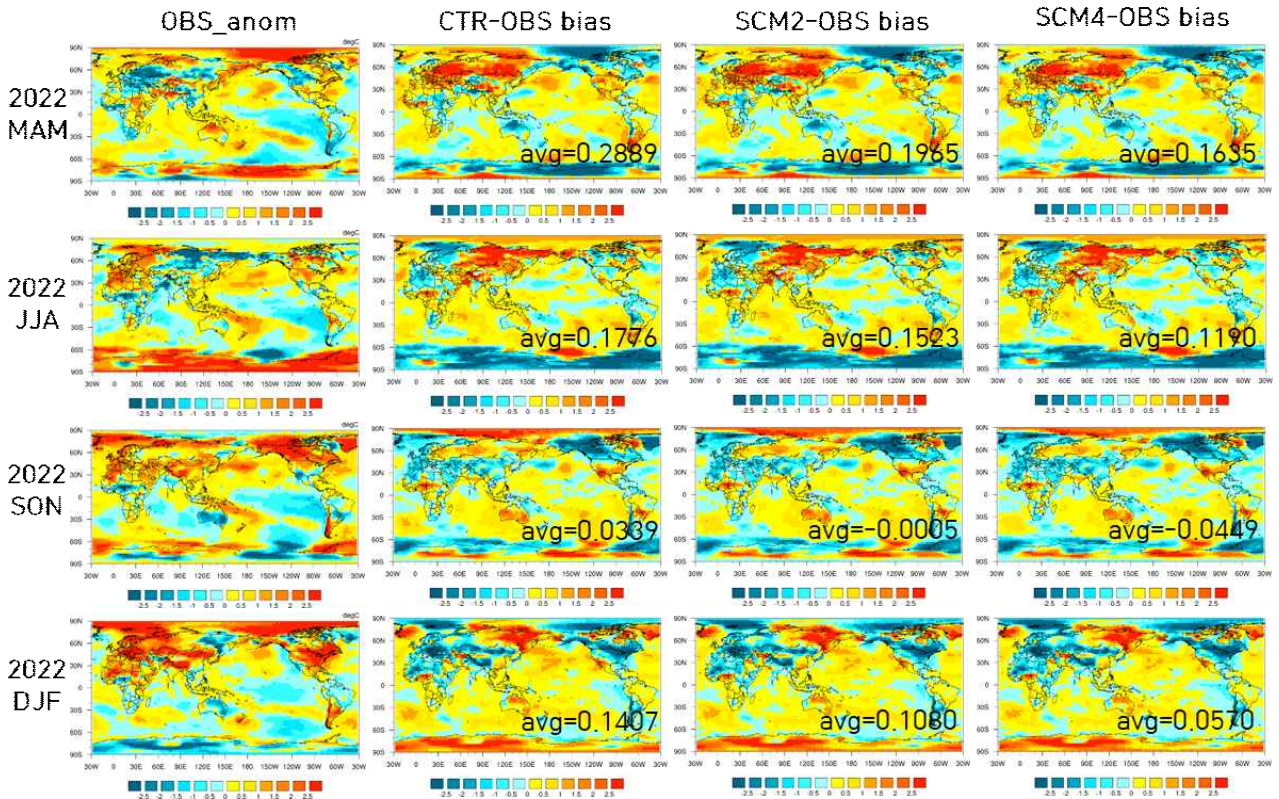


Figure 3.44. Bias for the 2022MAM, JJA, SON, and DJF temperature forecasts in each experiment and anomaly of observed temperature.

CTR을 비롯한 모든 실험들의 bias 분포는 유사하게 나타났다. 2022년 봄철의 경우 남극과 북극은 평년 대비 따듯했던 반면, 실험별 예측은 이보다 차갑게 예측을 하였으며, 유라시아 대륙 전반적으로 음의 편차가 있었음에도 모델은 warm bias가 크게 나타났다. 또한 관측된 동태평양은 전 계절에 걸쳐 음의 편차가 넓게 분포하고 있었으나 모델은 대체로 따듯하게 예측을 하였다. 또한, 가을과 겨울철의 북아메리카는 평년보다 따듯했던 것에 비해 모델들은 다소 차갑게 예측을 한 경향이 있다. 실험별로 나타난 bias들을 전지구 평균한 결과, SCM4가 CTR과 SCM2에 비해 bias가 다소 낮은 것을 확인할 수 있었으며, 단순 평균을 할 경우 bias가 상쇄될 수 있으므로 RMSE를 비교하였을 때도 SCM4가 타 실험에 비해 오차가 적은 것으로 나타났다. 이러한 효과를 직접적으로 확인하기 위해 Figure 3.44와 더불어 Figure 3.45와 같이 MAM, JJA, SON, DJF 계절에 대해 CTR과 SCM2 및 SCM4의 차이를 비교하였다. 그 결과, 봄철 남극에서 나타나는 CTR의 cold bias가 SCM2와 SCM4에서는 다소 줄어들었으며, 전반적으로 warm bias를 보였던 CTR에 비해 SCM2와 SCM4는 다소 그 강도가 작은 것으로 나타났다. 특히 SCM4에서 bias가 더 뚜렷하게 줄어든 것으로 확인된다. 이는 기존 hindcast 기간의 MME가 관측 대비 대체로 온난하게 예측한 반면, hindcast 기간을 확장함으로써 온난화 경향이 다소 줄어들고, 관측의 경향과 보다 유사해짐을 의미한다.

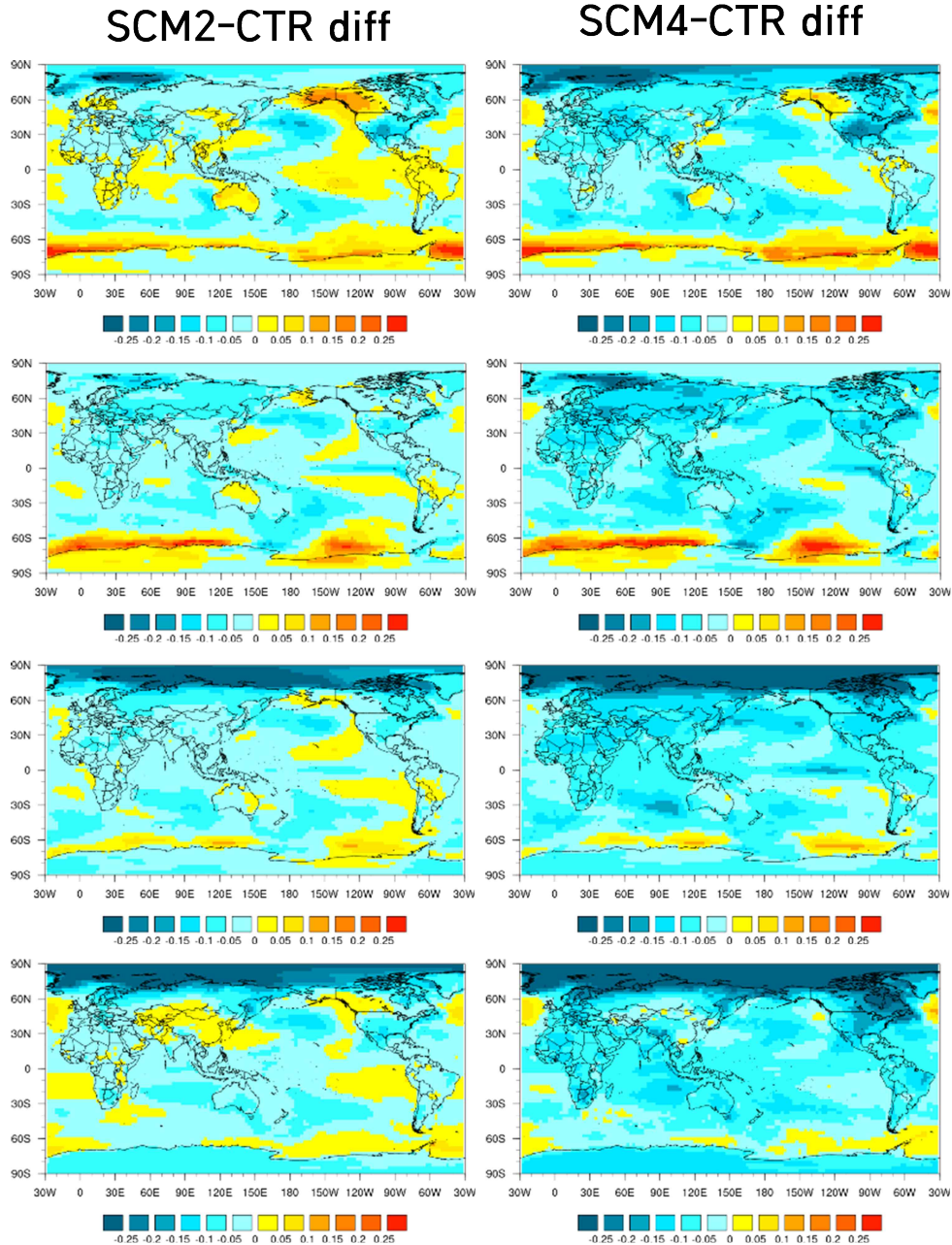


Figure 3.45. SCM2 minus CTR (left) and SCM4 minus CTR (right) for 2022MAM, JJA, SON, and DJF temperature forecasts.

확률론적 MME인 GAUS1~4에 대해서도 민감도 실험을 수행하였다. Figure 3.46은 실험별 hindcast 기온 및 강수의 ROC score 계절 분포와 CTR과의 차이 비율을 비교한 그림이다. Figure 3.39와 유사하게 기온의 경우 JFM 계절을 제외한 나머지 계절에 대하여 1993-2016년의 기간을 사용한 GAUS3, 4가 GAUS1, 2에 비해 ROC score가 높게 나타나며, CTR과도 특히 FMA~MJJ까지 계절에서 더 높은 ROC score를 보였다. 반면 강수의 경우 전반적으로 예측력이 하락하는데 그림에도 불구하고 GAUS1, 2에 비해 GAUS3, 4의 ROC score가 높게 나타나는 특징을 보인다. 하지만 이 경우에도 평가 예측해를 각자 hindcast 기간이 아닌 공통 기간인 1993-2010년으로 평가할 경우 각 실험별 예측력은 거의 비슷한 것으로 나타났다.

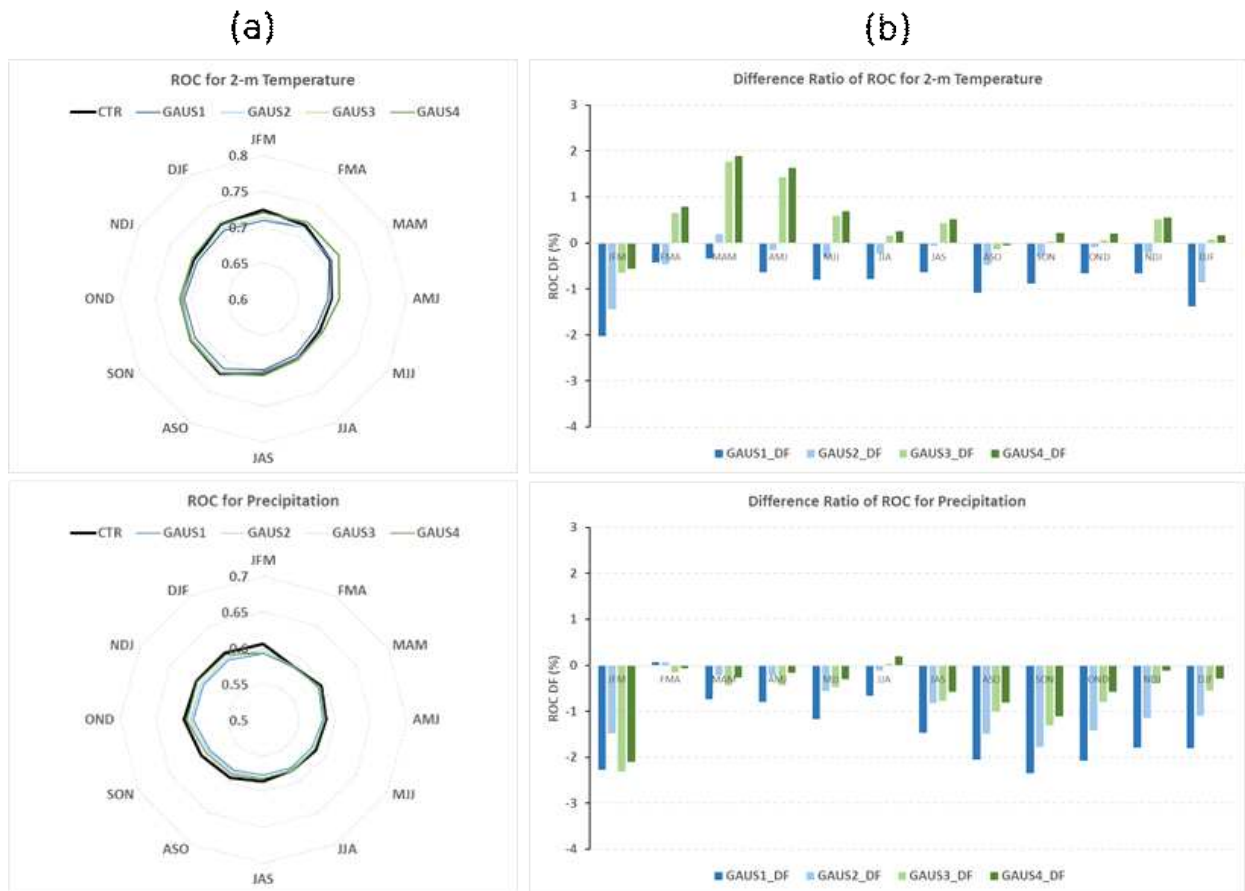


Figure 3.46. Seasonal distribution (a) of ROC score for 2-m temperature (top) and precipitation (bottom) in each experiment and the ratio of ROC score difference (b) from CTR.

Hindcast 전체 기간에 대해 CTR 대비 실험별 ROC score 분포의 차이를 3분위 예측별로 분리하여 분석하였다. Figure 3.47은 기온, Figure 3.48은 강수에 대한 CTR 대비 각 실험별 ROC score의 차이이다. 결론적으로 GAUS1, 2에 비해 GAUS3, 4의 ROC score의 차이가 다소 크게 나타나며 이를 전 지구 평균했을 때에도 GAUS3, 4가 근소하게 예측력이 높게 나타났다.

종합적으로 실험 설계를 통해 hindcast 기간과 결측 방안에 따라 CTR과 4가지 실험을 수행한 결과, 예측력에 크게 영향을 미칠만한 차이는 없었지만 1993-2016년의 기간을 사용한 실험에서 일부나마 통계적으로 유의한 차이를 보이는 경우가 나타났으며, 경향성 및 시간 변동성에 대한 분석 결과에서도 1993-2016년의 hindcast 기간을 선정한 실험군이 최근 기후 특성을 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다. 이에 따라 APCC MME hindcast 기한의 한계와 WMO의 권고사항을 준수하기 위해 1991-2014년, 1993-2016년의 기간이 가장 효율적인 방안으로써 다양한 민감도 분석을 통해 1993-2016년의 hindcast 기간을 선정하는 것이 APCC MME의 효율성 및 예측력에 긍정적 영향이 있을 것으로 사료 된다.

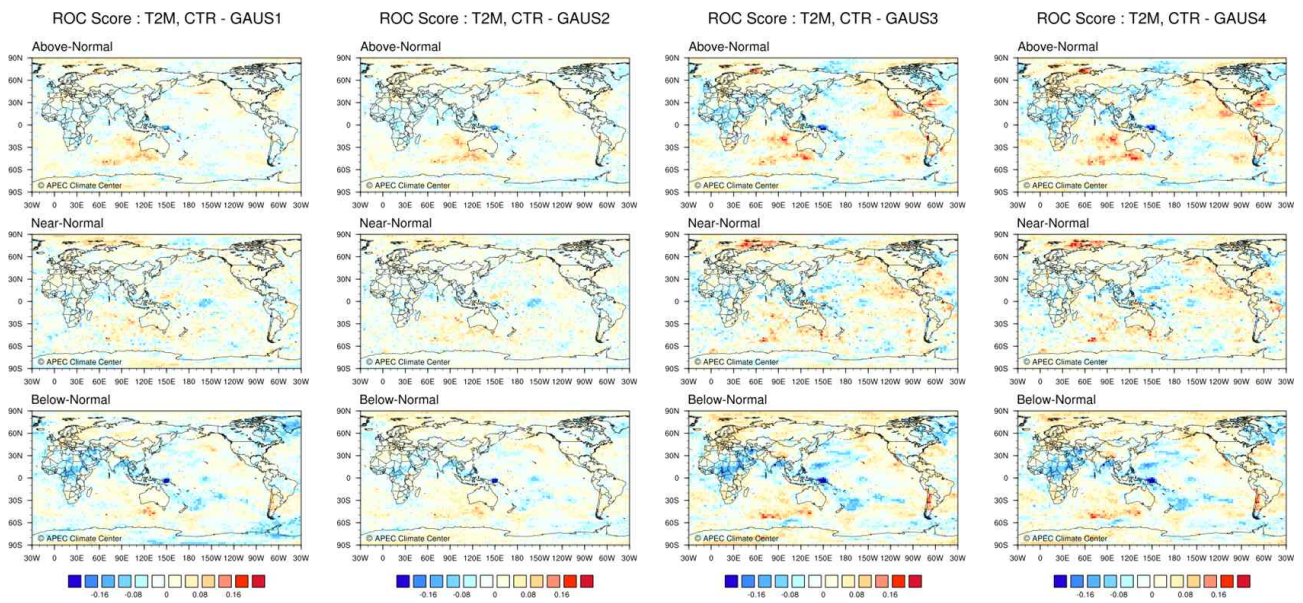


Figure 3.47. Difference in ROC Score between CTR and GAUS1~GAUS4 for temperature.

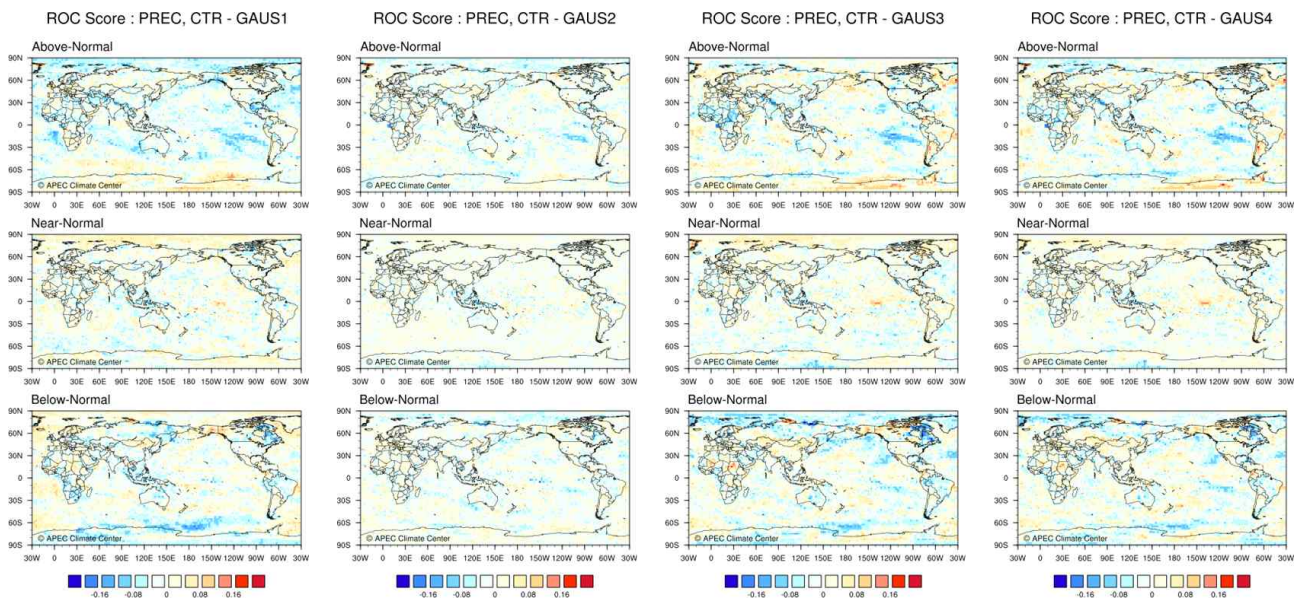


Figure 3.48. Difference in ROC Score between CTR and GAUS1~GAUS4 for precipitation.

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. 그러나 올해는 BSISO 지수의 입력자료가 되는 NOAA OLR 자료가 현업 기간 중 제공 중단됨에 따라 9월 17일자로 조기 종료하였다.

BSISO 현업서비스의 주요 내용은 감시, 예측, 검증 정보가 있으며 BSISO 모드별, 기간별 평균 특징을 살펴볼 수 있는 합성장을 제공하고 있다 (Figure 3.49~3.52). 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.

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)

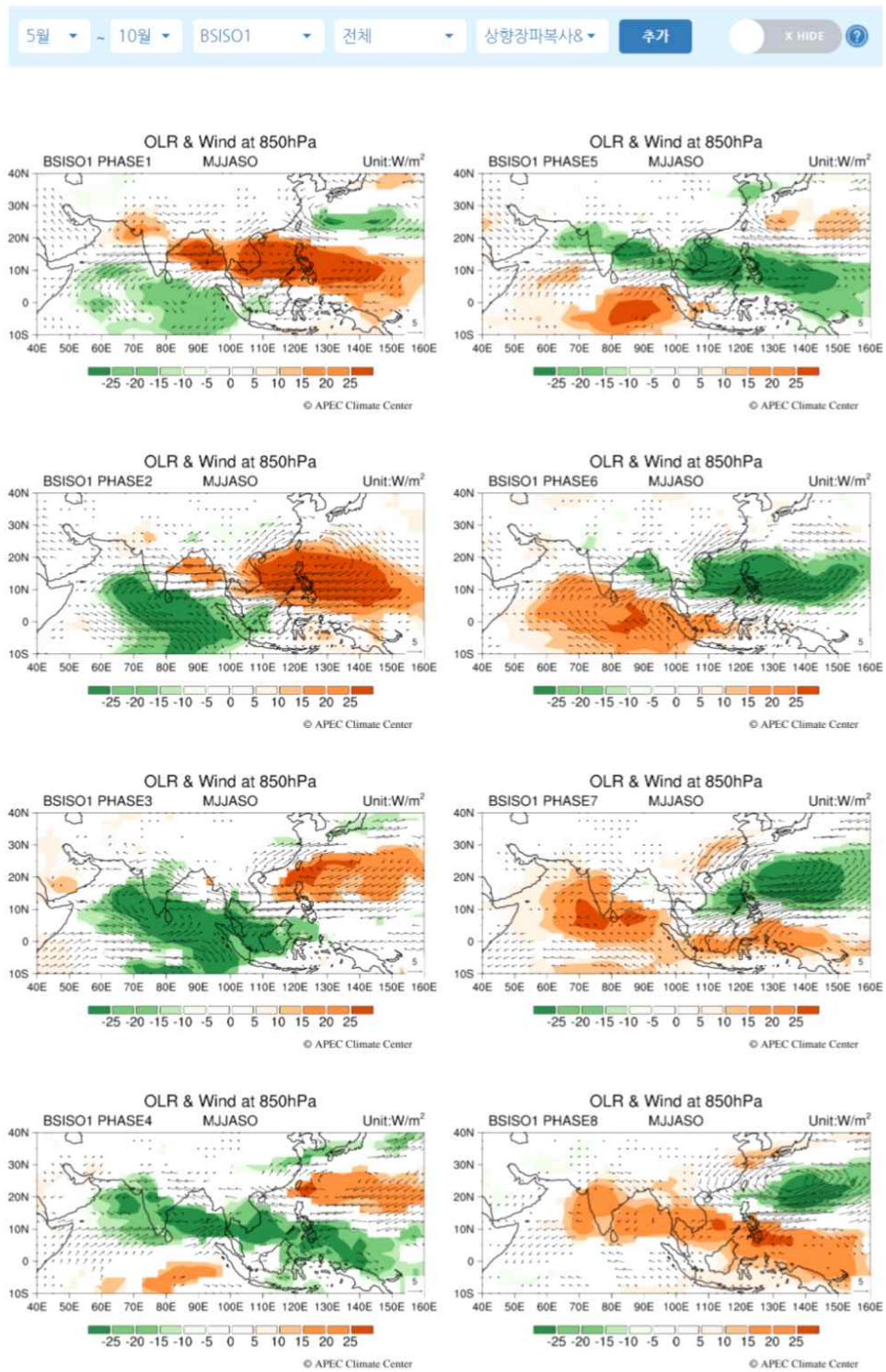
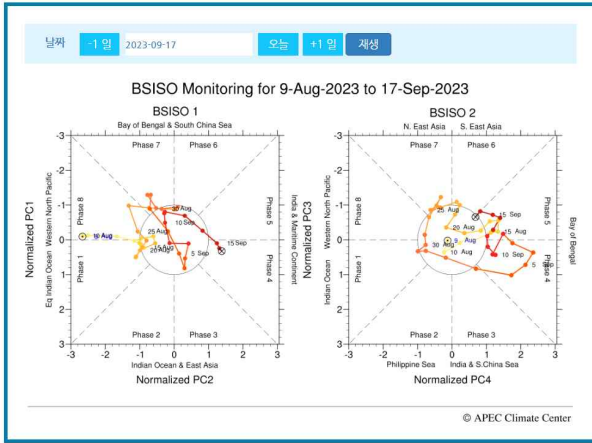


Figure 3.49. Example of BSISO composite map displayed on the website.

• BSISO 위상도

면위로

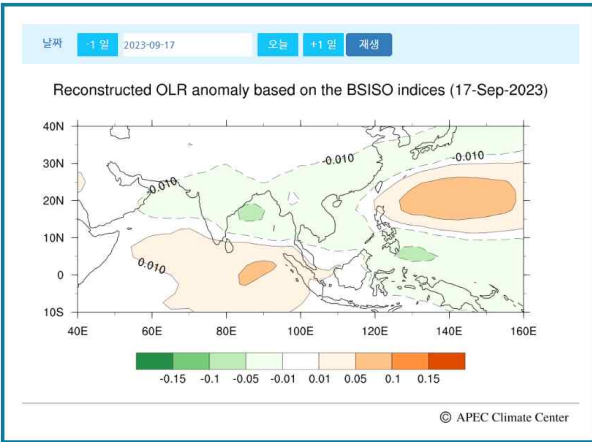
BSISO 1과 2 각 모드의 위치와 강도를 지수로 나타냄으로써 최근 40일 동안 BSISO의 진행과 발달을 연속적으로 보여줍니다. 8개로 구분된 위상은 BSISO의 위치를 나타내고, 지수가 위상도 중앙의 원 안에 위치하면 약한 BSISO, 원 밖에 위치하면 강한 BSISO로 간주합니다.



• 재구성(모드1-4)

면위로

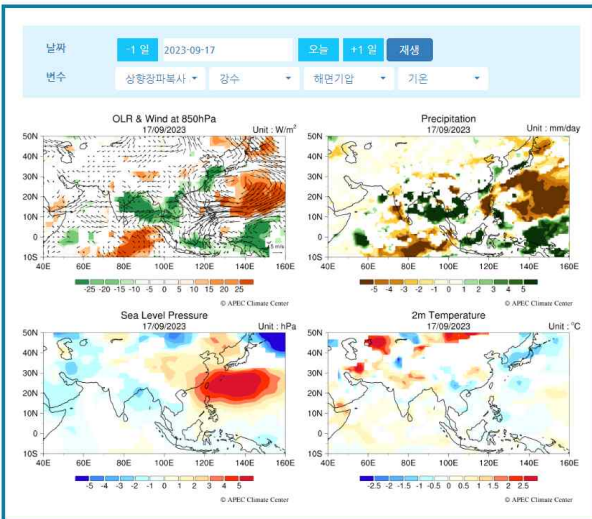
BSISO를 정의한 EOF 첫 번째 모드에서 네번째 모드에 기반하여 재구성된 실시간 관측의 OLR 편차장으로 현재 BSISO의 활동을 볼 수 있습니다.



• BSISO 영향 편차장

면위로

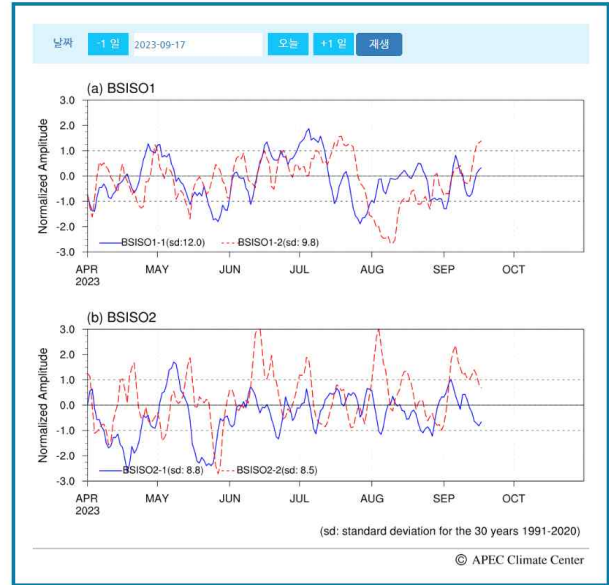
과거 BSISO 지수(1991~2020년)의 활성도에 기반하여 재구성된 현재의 BSISO 영향 편차장으로 현재 아시아 몬순지역에서 나타날 수 있는 기온, 강수, 바람 등 다양한 변수에 대한 BSISO의 영향을 볼 수 있습니다.



• 시계열

면위로

한 해 동안 시간의 흐름에 따라 연속적으로 관측된 BSISO 주요 모드의 변동을 다시화 한 것입니다.



• 재구성(모드1,2 & 3,4)

면위로

BSISO 1(EOF1 & EOF2)과 BSISO2(EOF3 & EOF4)에 기반하여 재구성된 실시간 관측의 OLR 편차장입니다.

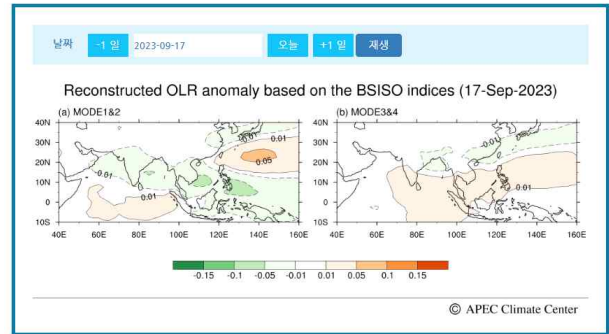
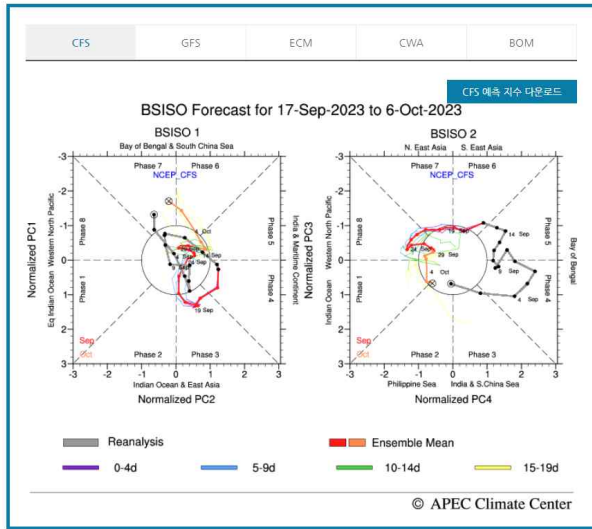


Figure 3.50. Contents of BSISO monitoring.

• BSISO 위상도

연일로

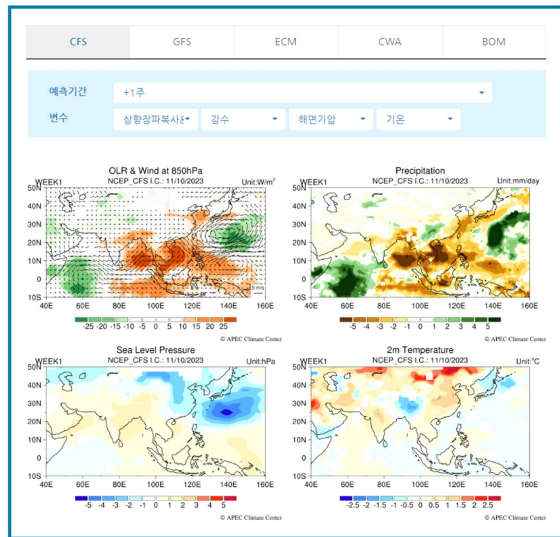
BSISO 1과 2 각 모드와 위상의 강도를 지수로 나타냄으로써 최근 15일 동안 관측된 BSISO와 향후 20일간 예측된 BSISO의 진행과 발달을 연속적으로 보여줍니다. 8개로 구분된 위상은 BSISO의 위치를 나타내고, 지수가 위상도 중앙의 한 안에 위치하면 약한 BSISO, 끝단에 위치하면 강한 BSISO로 간주합니다.



• BSISO 영향 편차장

연일로

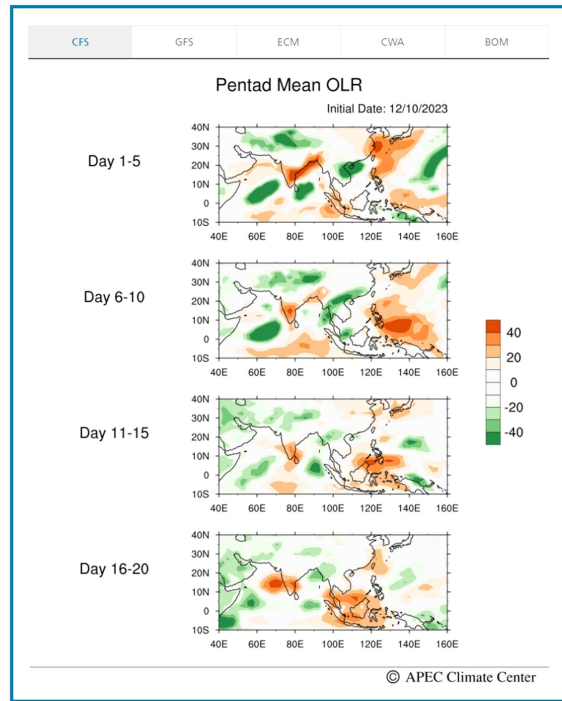
과거 BSISO 지수(1991~2020년)의 항성장에 기반하여 모델에서 예측된 향후 1~3주 뒤에 아시아 몬순 지역에서 나타날 수 있는 BSISO의 영향을 기온, 강수, 바람장 등 다양한 변수를 통해 전망할 수 있습니다.



• OLR 편차장

연일로

OLR이 평년 상태로부터 벗어난 정도를 보여주는 것으로 향후 20일 간의 변화를 5일씩 평균하여 나타냅니다.



• 극한강수 발생확률

연일로

향후 1주, 2주 뒤에 BSISO로 인해 나타날 수 있는 극한 강수의 발생 확률을 보여줍니다.

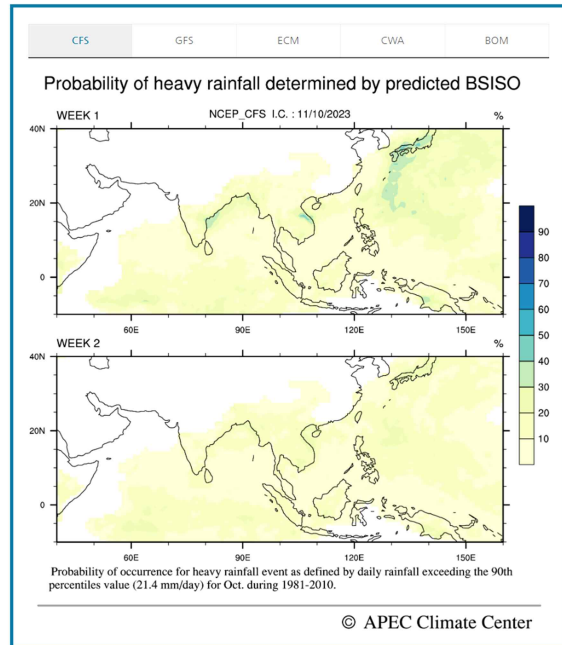


Figure 3.51. Contents of BSISO forecast.

관측된 BSISO 지수와 최근 20일 간 예측된 BSISO 지수의 관계를 오늘 날짜를 기준으로 검증한 결과입니다.
누적 예측성 검증: BSISO 예보가 시작된 시점부터 현재까지 누적 평균 된 예측성을 나타냅니다. 매년 현업 종료 후 업데이트됩니다.

검증기법에 대한 정보 다운로드 (pdf)

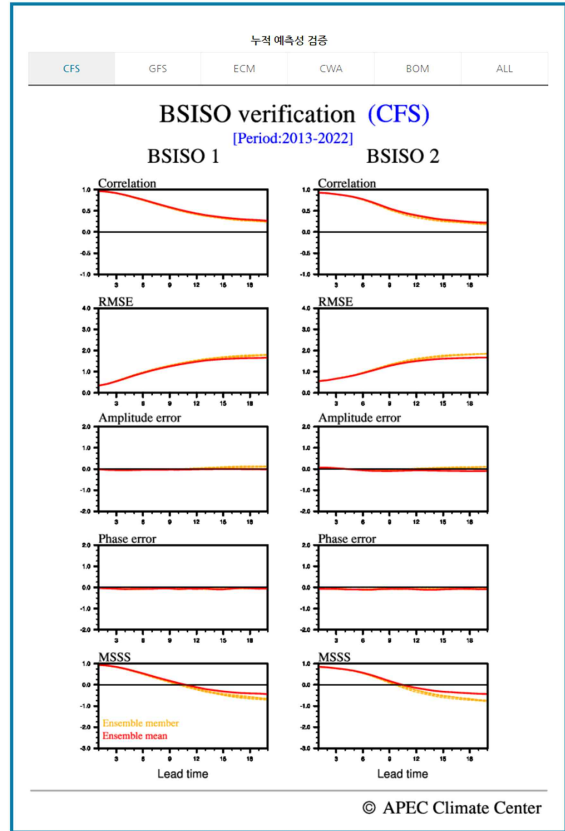
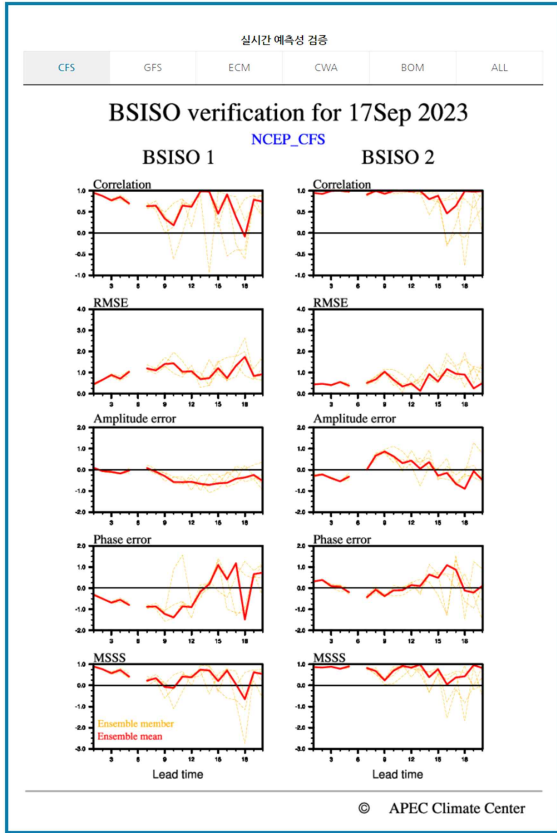


Figure 3.52. Contents of BSISO verification.

BSISO 정보는 인도 기상연구소에서 예측정보를 실시간 활용하여 홈페이지에 제공하고 있고 기상청 기후예측과에 매일 제공하고 있다. 또한 베트남 기상청에서도 BSISO 영향장을 활용하고 있다. 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 영향장 영역 확장

한반도에 미치는 BSISO의 영향을 보다 명확하게 나타내기 위해 영향장 계산 영역을 기존 10S~40N, 40E~160E에서 10S~50N, 40E~160E로 위도를 북쪽으로 10도 확장하였다(Figure 3.53). 이를 통해 감시 및 예측 BSISO 지수가 한반도에 미치는 영향을 보다 직관적으로 확인할 수 있게 되었다. 개선된 이미지는 2023년 5월부터 홈페이지 공식 제공되고 있다.

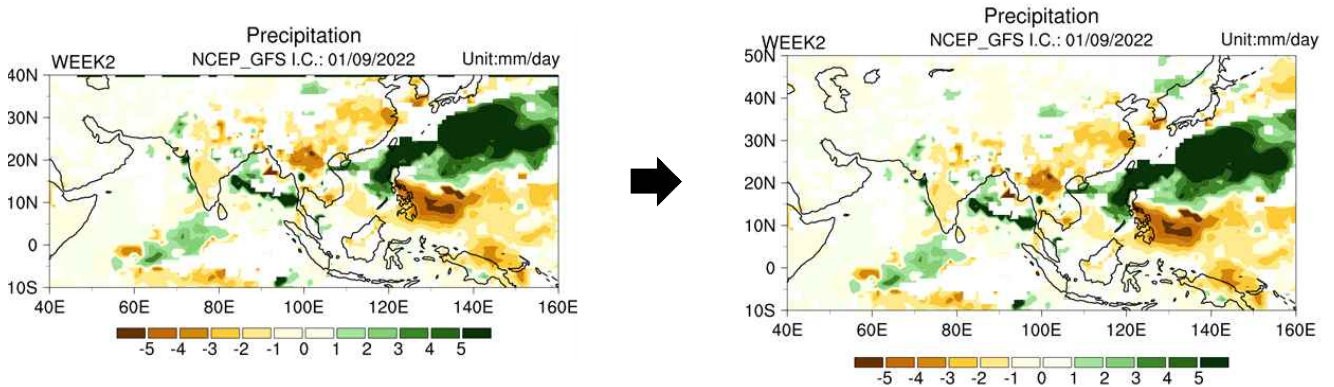


Figure 3.53. Example of BSISO impact anomaly field before and after improvement for area.

3.2.2.2. BSISO 영향장 예측기간 확장

기상청과 APCC(기후분석과)간 1개월 월간 예보토의에서 BSISO의 활용성을 높이기 위해 예측기간을 기존 3주에서 4주 이상으로 확대하였다. BSISO에 참여하는 개별모델의 예측 제공 일수는 Table 3.8 과 같다. 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(Figure 3.54).

Table 3.8. Forecast period for participant models.

참여 모델	예측 일수	
	기존	개선
CFS	20	40
GFS	16	16
ECM	20	32
BOM	20	30
CWB	20	40

과거 BSISO 지수(1991~2020년)의 합성장에 기반하여 모델에서 예측된 향후 1~3주 뒤에 아시아 몬순 지역에서 나타날 수 있는 BSISO의 영향을 기온, 강수, 바람장 등 다양한 변수를 통해 전망할 수 있습니다.

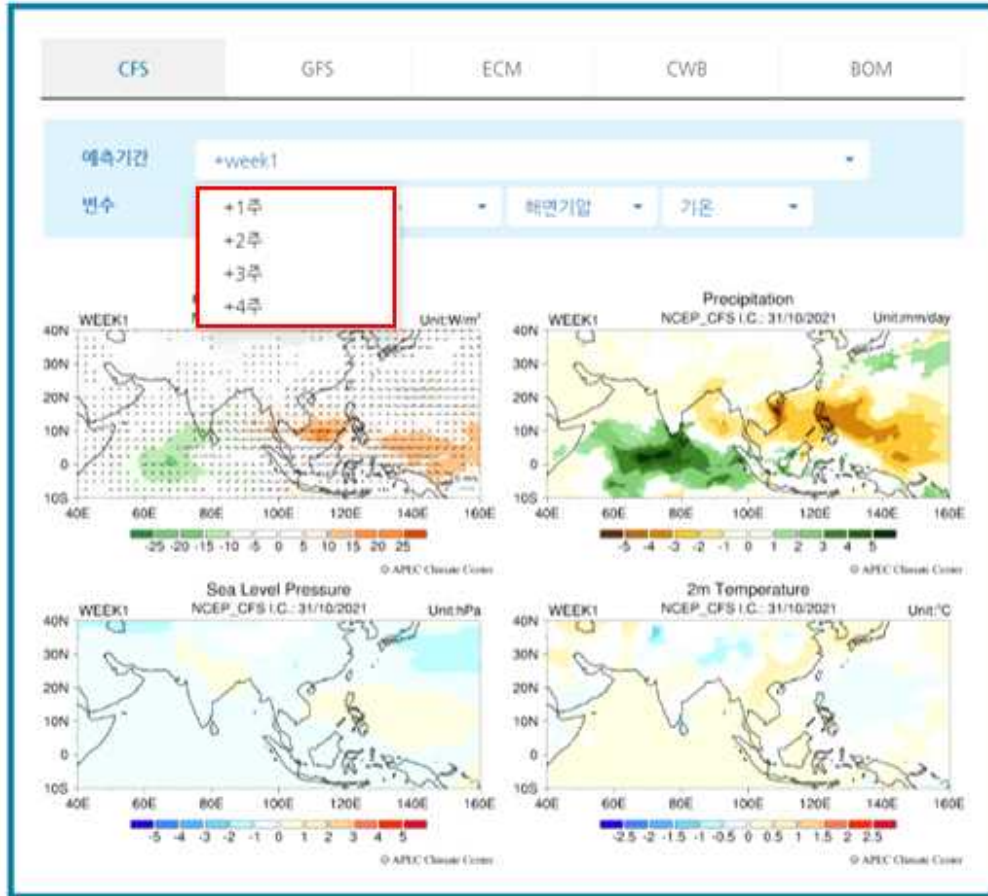


Figure 3.54. Example of BSISO 4-week forecast impact anomaly.

3.2.2.3. BSISO 영향장 예측지수 조기 제공

기상청-APCC(기후분석과) 1개월 월간 예보토의 일정을 위해 BSISO 예측지수를 조기 생산할 수 있게끔 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.

3.3. APCC 자체예측모델(SCoPS) 운영 및 예측정보 제공

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

SCoPS (Seamless Coupled Prediction system)는 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 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 3.9와 같고 주요 차이점으로는 기상청 슈퍼컴퓨터 4호기부터는 PGI 컴파일러가 도입되지 않아서 Intel 컴파일러로 대체하였다.

Table 3.9. 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

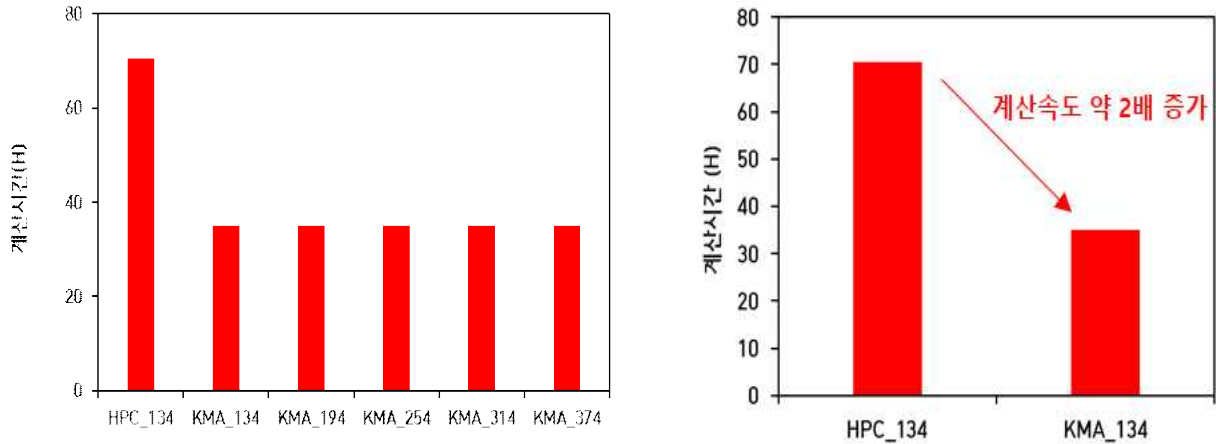


Figure 3.55. SCoPS Run-time with the number of CPUs and machine.

Hindcast 생산 실험에 앞서 최적화된 계산시간을 찾기 위해 CPU 수에 따른 계산 시간 민감도 실험을 진행하였다(Figure 3.55). SCoPS는 대기, 해양, 해빙 모델이 coupler에 의해 결합하여 구동되는데 이때 계산에 필요한 CPU는 구성 모델별로 대기 모델은 60개 배수로 유동적인 반면 해양 모델 12개, 해빙 모델 2개로 고정되어 있다. 이 기본 설정을 기준으로 대기모델의 CPU를 120~360개까지 순차적으로 증가시켜 총 CPU 개수를 134에서 최대 374개로 실험한 결과, 실험 기준값인 CPU가 134개일 때 APCC HPC에 비해 슈퍼컴퓨터 5호기에서 계산속도가 약 2배 증가하는 것을 확인하였다. 또한 134개 이상의 CPU를 사용했을 때 계산 시간의 변화가 없었는데 이는 대기 모델의 계산속도가 빨라져도 해양모델의 계산 속도에 한계가 있기 때문인 것으로 판단되었다. 즉, 3개의 구성 모델이 커플링되어 구동되기 때문에 일부 구성성분 모델의 계산속도가 증가하더라도 전체 결합 모델의 계산 속도 증가에는 한계가 있었다.

본 운영에서 초기 자료는 기존 APCC 운영시스템에서 생산된 자료와 동일하게 사용하였고, 이를 통해 시스템 및 포팅 환경설정에 따른 예측 결과 민감도를 확인하고자 하였다. 먼저 슈퍼컴퓨터 5호기에 SCoPS Hindcast를 생산하기 위해 APCC에서 기존에 생산한 초기장을 모두 이전하였다. 그리고 두루시스템에 구축된 SCoPS 운영시스템을 이용하여 SCoPS Hindcast 전 기간(1982~2013년)에 대해 6개월 과거 재현 자료를 순차적으로 생산하였다. 아래 Figure 3.56은 실시간 Hindcast 런 구동 현황을 관리한 테이블을 나타낸 것이다. 각 셀(양상별, 연도별, 월별)에 대한 job script(case)가 순차적으로 구동되었다. 1 case 당 계산 시간은 약 17시간 정도 소요되었으며 병렬 작업으로 인해 Hindcast 전 기간을 생산하는데 최종적으로 약 4.5개월 정도 소요되었다(Table 3.10). 이 때 초기장 자료 용량이 약 10TB를 차지하고 나머지 계정당 할당받은 여유 공간이 약 10TB이기 때문에 결과가 생산되고 이를 실시간으로 APCC 서버로 이전하는 작업이 병행되었다.

																								R: running	O: complete										
																								Issued month											
		JAN		FEB		MAR		APR		MAY		JUN		JUL		AUG		SEP		OCT		NOV		DEC											
		01-01	01-05	02-01	02-05	03-01	03-05	04-01	04-05	05-01	05-05	06-01	06-05	07-01	07-05	08-01	08-05	09-01	09-05	10-01	10-05	11-01	11-05	12-01	12-05										
1982					O		O																												
1983	O	O	O	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X	O	O	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O										
1984	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1985	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1986	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1987	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1988	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1989	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1990	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1991	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	e005	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1992	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1993	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	b03~e0	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1994	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1995	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	e005	O	O	O	O	O	O	O	O										
1996	O	O	O	O	O	e004	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1997	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1998	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
1999	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
2000	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
2001	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
2002	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
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										
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										
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										
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										
2007	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	e004	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										
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										
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										
2011	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	e001	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										
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										

Figure 3.56. Run status of SCoPS hindcast.

Table 3.10. Summary of computational resource for running hindcast full-set.

계산 자원	CPU (core)	수행 시간/2case (a)	연도 (b)	Issued month (c)	총 소요시간 (a)*(b)*(c)
	134	35 시간	32	12	14,700시간 (~613일)

슈퍼컴 5호기에서 구동하는 SCoPS 런 스크립트의 예시를 아래에 나타내었다. 상단부에서 런 수행 날짜 및 앙상블 날짜를 지정하고 각 기간에 맞는 해빙 초기장 연도(ice_init)를 설정하면 된다. 그리고 공통적으로 앙상블 멤버 구성 및 소스파일 등 각각 경로 및 환경 설정을 하고 구성 모델당 CPU 할당 개수, MPI 구동 설정을 마친 뒤 Hindcast 런을 순차적으로 구동하였다.

```
#!/bin/sh
#BSUB -J MAY_2022
#BSUB -n 134
#BSUB -q normal
#BSUB -W 168:00
BSUB 로 LSF 옵션 지정
(작업시간은 최대 7일까지 설정 가능)
```

```

#BSUB -o r2022_MAY
#BSUB -e e2022_MAY
set -o
set -x
#####
# to run 10-ensemble fcsts
# with this script
#-----
module load ed

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
#

for my_year in 2022
do
ice_init=2019
MONN=5
DY="1"
#
if [ $MONN -lt 10 ]
then
MON=0${MONN}
else
MON=$MONN
fi
for DY in ${DY}
do

CHUNK_LEN=0
total_day=0
CHUNK_LEN_ice=0
total_day_ice=0
tday=0
KK=0

.....

#LAST_CHUNK=7 # Chunk start at 6 (May 1st IC) fu++
# Name of the experiment

```

런 수행 날짜 및 앙상블 날짜 지정

```

ctl=EAK_ENS_HCST_${my_year}_${OUTDATE}
#####
#
## - Define paths
##
prismdir=/home/apcc/apcc06/EAKF/poem2_ice_fcst
datadir=/home/apcc/apcc06/EAKF
pop_data=${datadir}/data_3comp/pop/gx1v3
echam_data=${datadir}/data_3comp/echam5/T$RES/
cice_data=${datadir}/data_3comp/cice/gx1v3
oasis_data=${datadir}/data_3comp/OASIS/gx1v3_t159_3comp
#
#fu++ start on Aug 1st, 2004
restart_data=${HOME}/init/MAY/${INDATE}/${my_year}
#
bindir=${prismdir}/$arch/bin
nudgdir=${datadir}/data_3comp/nudg_atm_new
rundir=${datadir}/model_results/MAY/${ctl}
#####
###
#
#RESTARTFILES=
#RESTARTFILEARCIVE=hindcast_restart_jul20.tar
#####
###
#
## - Define names of executables
atm_exe=cplatm
oce_exe=cploce
ice_exe=cpllice

## - Define number of processes to run cplatm and cploce
nproc_atm=120
nproc_oce=12
nproc_ice=2

.....

## - Define MPIRUN, only used for arch=Linux
#
OUT_DATAPATH = "${rundir}/"
OUT_EXPNAME  = "${EXP}"
DT_START    = 1980,01,01,0,0,0
DT_STOP     = 2500,01,01,0,0,0
NO_DAYS     = $NDAY
PUTDATA     = 1,'days','last',0
PTRERUN     = SCHUNK_LEN,'days','last',0
PUTOCEAN    = 1,'days','last',0
GETOCEAN    = 1,'days','last',0
LAMIP=F,
LABORT=T,
LCOUPLE=T,

```

런 구동 폴더명

런 구동 소스 경로

런 구동 소스 경로

구성 모델당 CPU 할당 개수

```

LNUDGE=F,
  ldebugio=T,
  ldebugev=T,
  NPROCA=60 } NPROCA*NPROCB =대기 모델 CPU 할당 개수
  NPROCB=2 }
/
&PHYSCTL
  LCOVER=F
  LICE=F
/
$EXP
+127 ALAKE
+194 SLF
/
&NDGCTL
  LNUDGINI=${NUG_INI}
  DT_NUDG_START=1982,01,01,0,0,0
  DT_NUDG_STOP=2015,12,31,0,0,0
  NDG_FILE_STP="ndg_stp${YEAR}${MTH}"
  NDG_FILE_DIV="ndg_div${YEAR}${MTH}"
  NDG_FILE_VOR="ndg_vor${YEAR}${MTH}"
  NDG_FILE_SST="ndg_sst${YEAR}${MTH}"
  lnudgdbx=T,
  lnudgwobs=T,
/
EOF

echo
pwd
echo

#####
#####
###
### 3. Execute the model

cd $rundir
echo `Executing the model using ` $THIS_CHUNK

# cat <<EOF >$rundir/run_poem.$sarch
#!/bin/sh
/bin/echo " ExecutionHost : " `c
hostname # print name of current host
###=====
# run 20-ensembles
#
events="001 002 003 004 005" } 모델 구동 앙상블 멤버
#
for events in ${events}

.....

result_dir=/data/apcc/apcc06/model_results/MAY/${OUTDATE}/${YEAR}/e${events} }아웃풋 경로

```

```

if [ ! -d $result_dir ]
then
mkdir -p ${result_dir}
fi

#
#tar cvf templ.tar oceout85
#mpiexec --mca btl ^sm --app $rundir/appl-linux.conf \

mpirun -np 12 ./cploce : -np 120 ./cplatm : -np 2 ./cplice 2>
$rundir/err_${OUTDATE}_${events} 1> $rundir/out_${OUTDATE}_${events} } MPI 구동

#
#
.....

```

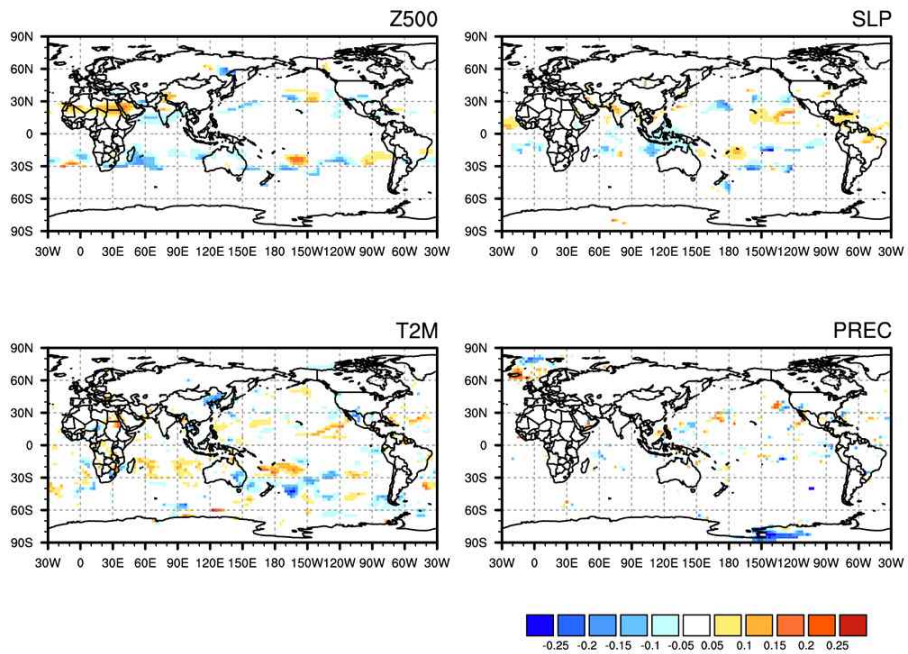
3.3.2.1. Hindcast 시간 상관 계수(TCC) 비교 검증

Hindcast 비교 분석에 사용된 자료 기간은 1991~2010년 (총 20년)으로 현재 APCC MME에서 사용하고 있는 hindcast 기간을 대상으로 주요 변수 및 주요 계절에 대한 통계 검증을 통한 비교를 실시하였다. 검증에 선정된 변수는 계절예측에서 활용도가 높은 Z500, SLP, T2M, PREC이다. 먼저, hindcast 기간 동안 주요 변수에 대한 시간상관계수(Temporal Correlation Coefficients; TCC)의 차이를 전구에 대해 비교하였다. Figure 3.57~3.60은 슈퍼컴퓨터 5호기에서 생산된 Hindcast TCC와 APCC에서 생산된 기존의 hindcast TCC의 차이를 나타낸 것이다.

$$TCC\ Difference(Diff.) = TCC_{KMA5} - TCC_{APCC} \quad [3.1]$$

계절별로 조금씩 차이는 있지만 공통적으로 대기 지표 변수인 기온과 강수에 비해 상하층 기압장(Z500, SLP)에서 두 자료간 TCC 차이가 더 크게 나타난다. 그리고 봄, 여름철보다는 가을, 겨울철 기압장에서 TCC 차이가 크게 나타는 것을 확인하였다. 그러나 모든 계절 및 기간에서 뚜렷한 공통적인 특징은 나타나지 않는 것으로 보아 생산 기기 및 컴파일러의 차이가 hindcast 전기간에 평균 기후장 예측 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

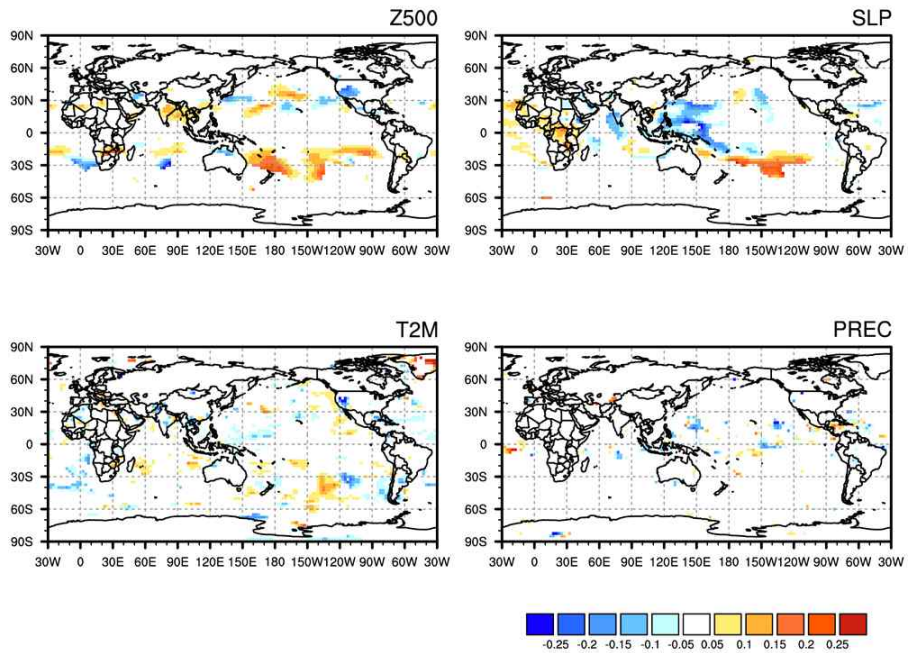
Hindcast Verification TCC Diff. (MAM)



© Climate Prediction Department

Figure 3.57. Difference of Temporal Correlation Coefficients (TCC) of geopotential height of 500hPa, sea level pressure (SLP), 2m temperature (T2M), and precipitation (PREC) for MAM.

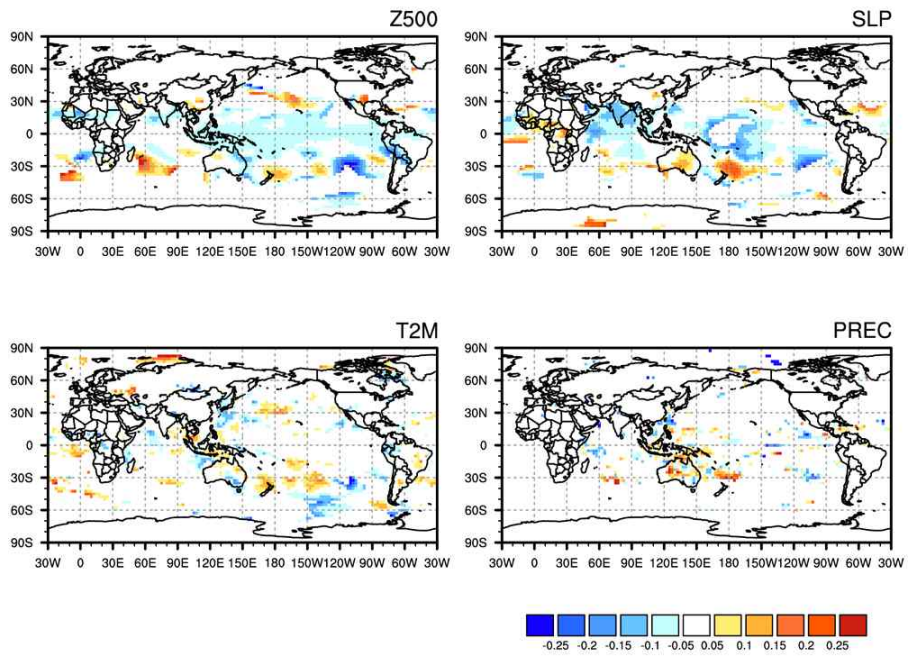
Hindcast Verification TCC Diff. (JJA)



© Climate Prediction Department

Figure 3.58. Same as Figure 3.57, but for JJA.

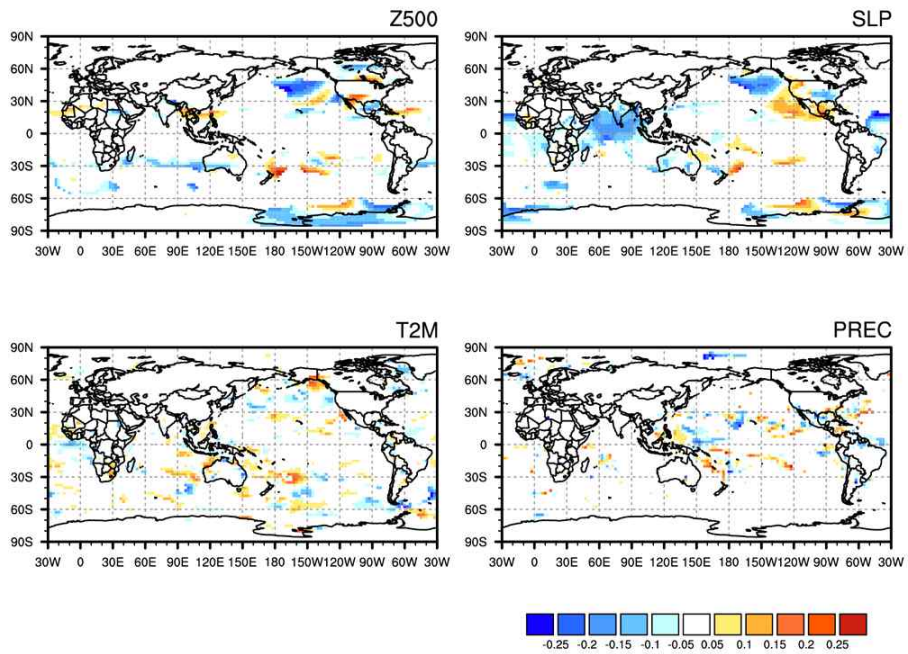
Hindcast Verification TCC Diff. (SON)



© Climate Prediction Department

Figure 3.59. Same as Figure 3.57, but for SON.

Hindcast Verification TCC Diff. (DJF)



© Climate Prediction Department

Figure 3.60. Same as Figure 3.57, but for DJF.

3.3.2.2. NINO3.4의 TCC 및 RMSE 차이

Figure 3.61~3.64는 NINO3.4 지수에 대한 6개월 예측자료의 RMSE와 TCC를 나타낸 것이다. 전 계절에서 가장 최신 관측값으로부터 유추된 persistence level 보다는 모델에서 예측된 NINO3.4의 지수의 성능이 훨씬 높게 나타난다. 그리고 두 기기에서 생산된 hindcast 자료는 선행 시간에 따른 예측 성능이 거의 동일하고 그 값의 차이가 미미하게 나타나고 계절과 관계없이 NINO3.4의 성능은 두 자료간 매우 유사하게 나타난다.

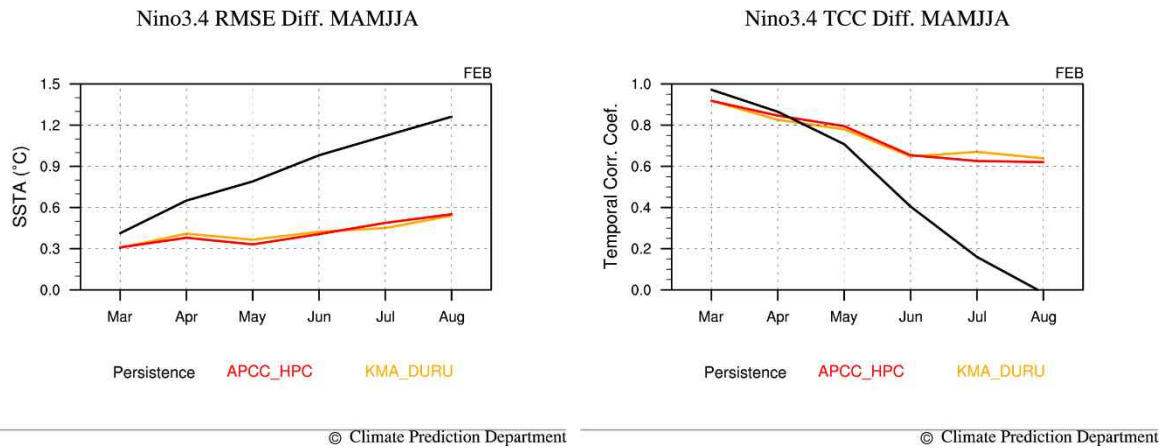


Figure 3.61. RMSE (left) and TCC (right) difference of NINO3.4 between APCC and KMA5 for MAMJJA.

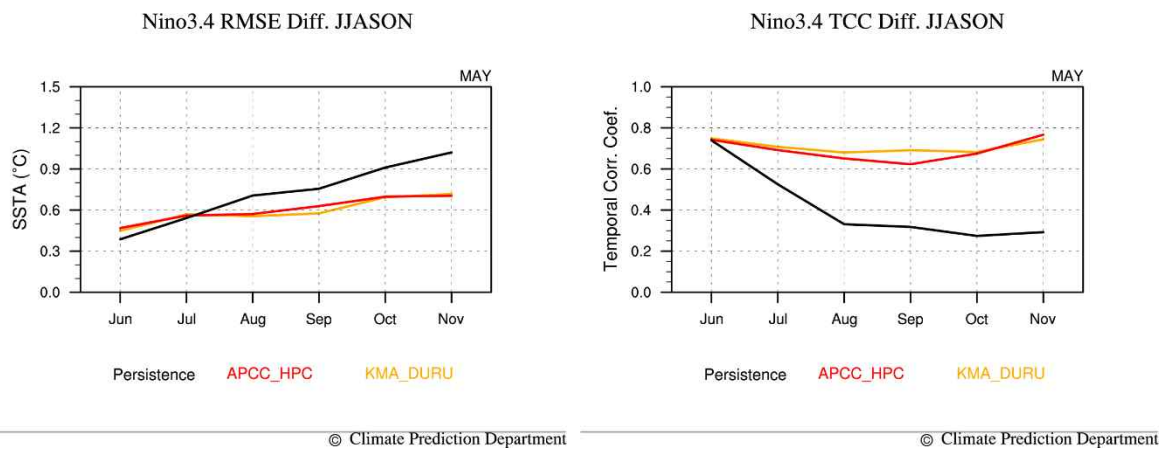


Figure 3.62. Same as Figure 3.61, but for JJASON.

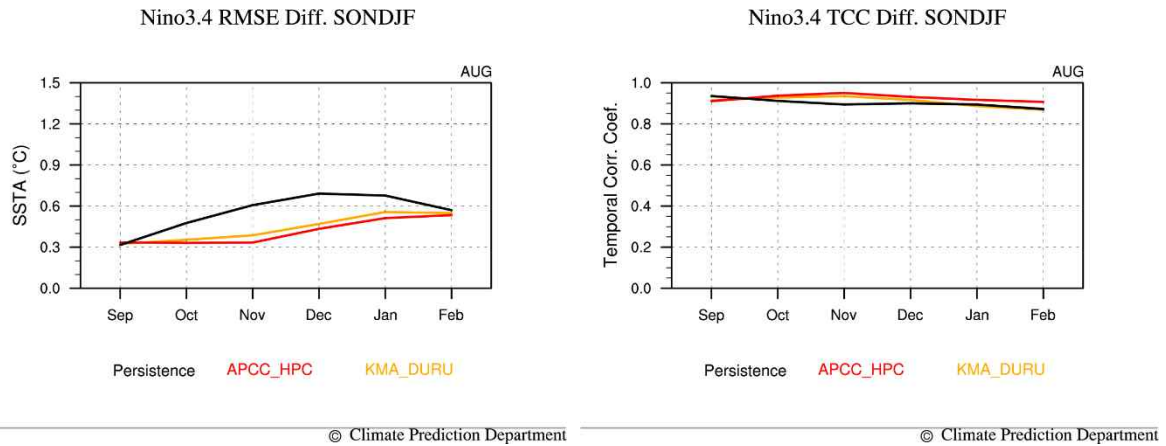


Figure 3.63. Same as Figure 3.61, but for SONDJF.

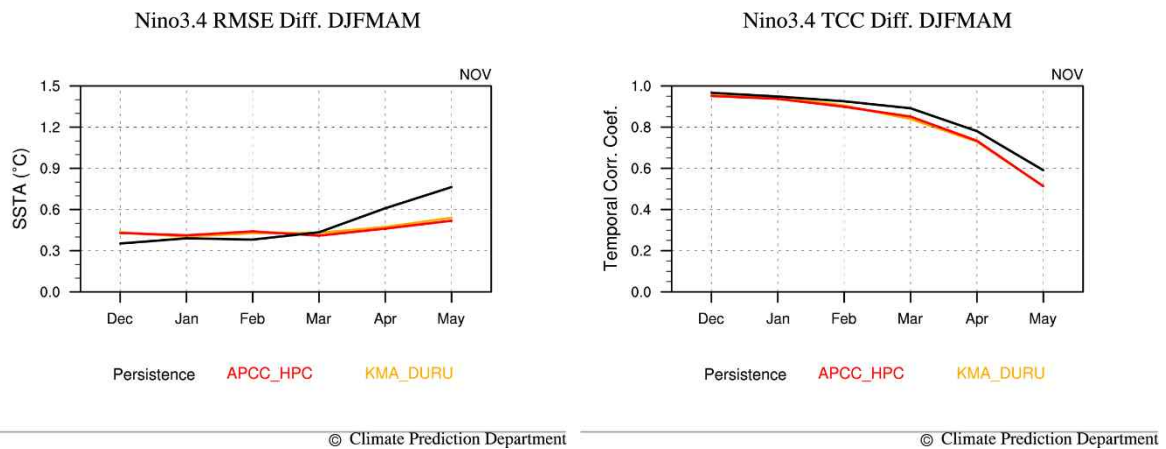


Figure 3.64. Same as Figure 3.61, but for DJFMAM.

3.3.2.3. Hindcast T-test 검증

두 기기에서 생산된 hindcast 자료가 통계적으로 얼마나 다른 차이를 가지고 있는지 살펴 보기 위해 T-test 검증을 수행하였다(Figure 3.65~3.68). 통계적으로 유의미한 범위의 평균장 차이를 보기 위해 90% 이상 차이를 나타내는 지역을 shading 으로 나타냈다. 계절별로 살펴 보았을 때, 봄, 여름, 가을철에는 전구에 두 자료간 평균값의 큰 차이는 나타나지 않았지만 겨울철에는 해면 및 상층 기압장에서는 극지역에서 유의미한 차이가 나타났다. 이를 통해 SCoPS의 겨울철 극지역의 순환장 예측에 있어서는 생산 기기 및 컴파일러에 대한 민감도가 상대적으로 크게 나타나는 것을 확인하였다.

T-test Verification: MAM

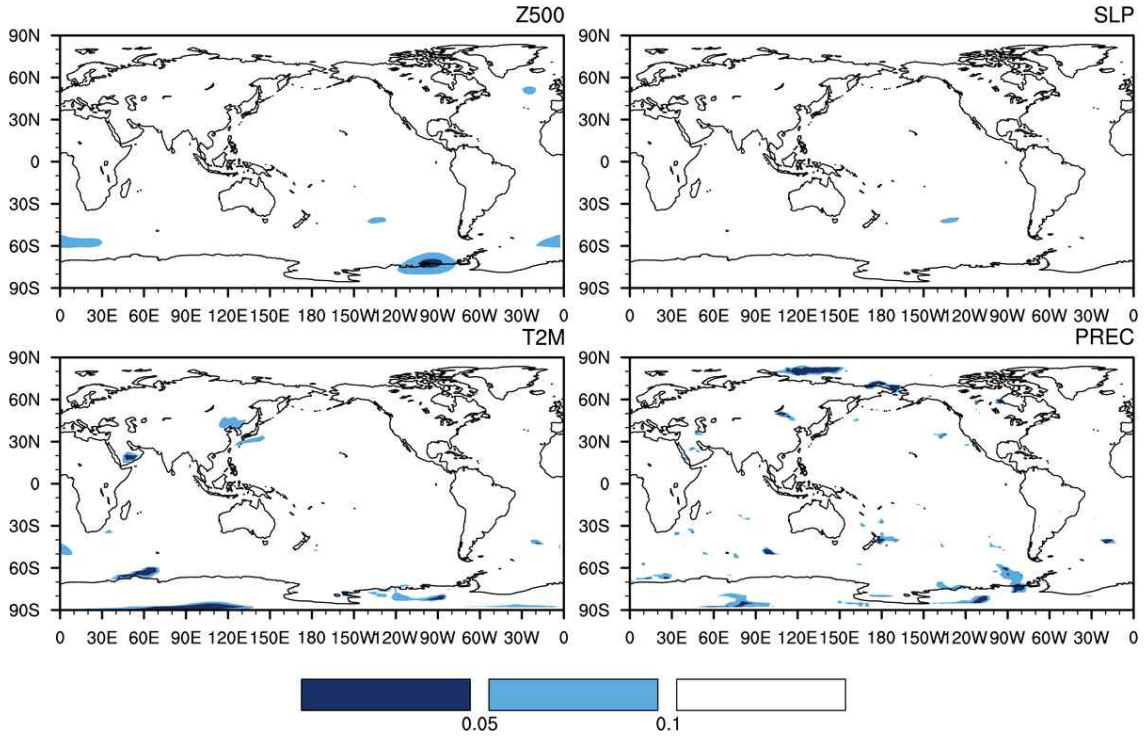


Figure 3.65. T-test verification between APCC and KMA5 of Z500, SLP, T2M, and PREC for MAM.

T-test Verification: JJA

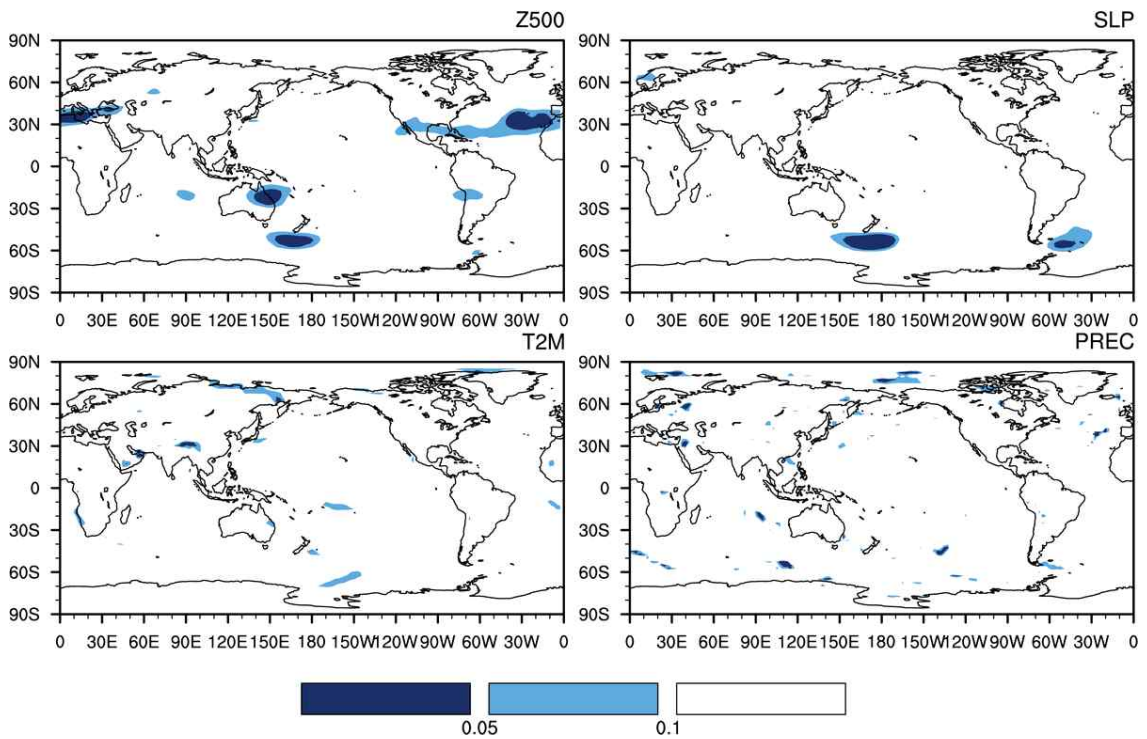


Figure 3.66. Same as Figure 3.65, but for JJA.

T-test Verification: SON

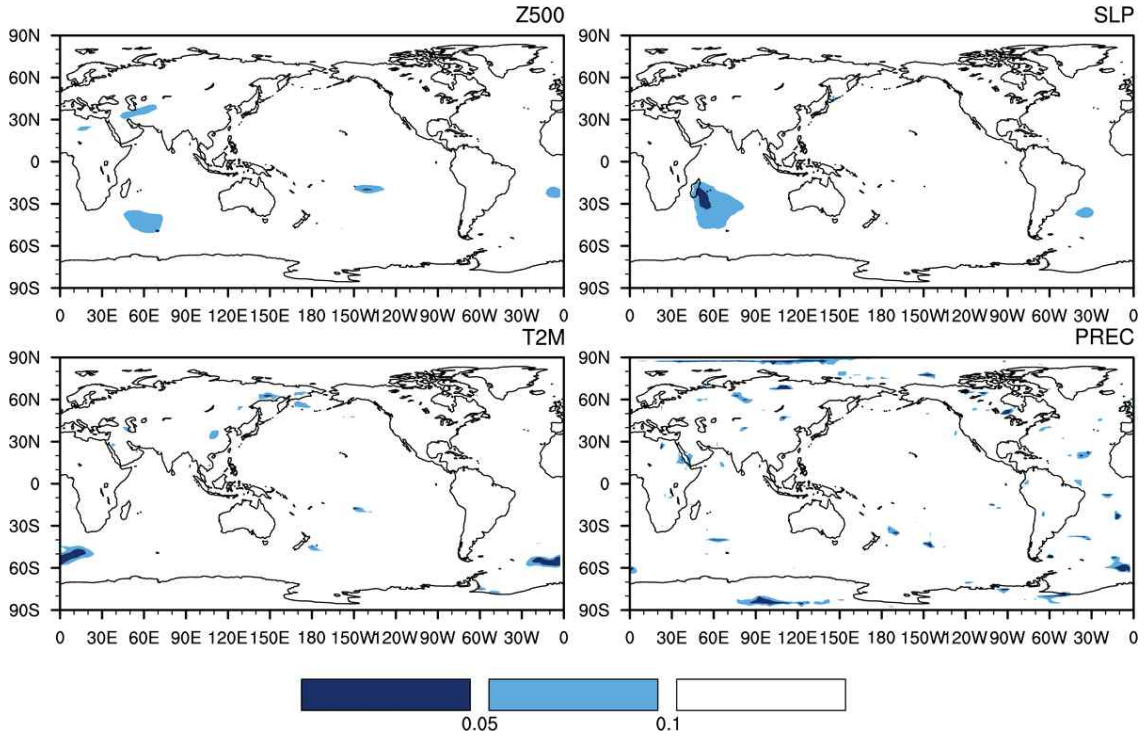


Figure 3.67. Same as Figure 3.65, but for SON.

T-test Verification: DJF

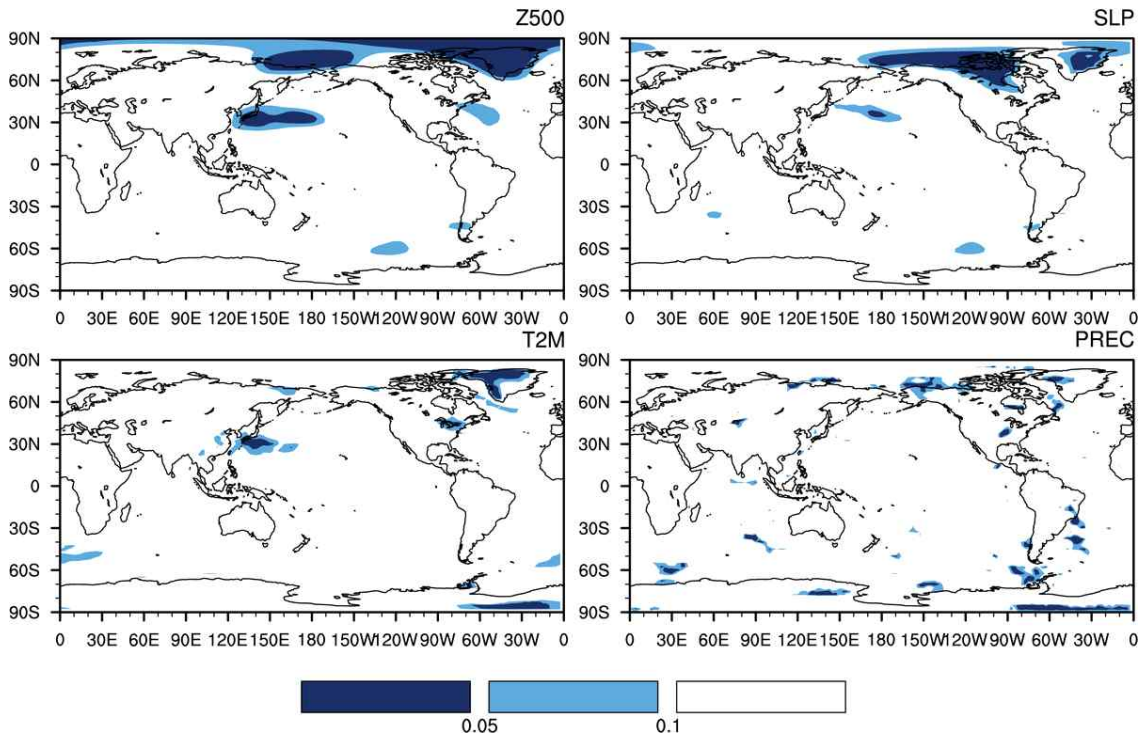


Figure 3.68. Same as Figure 3.65, but for DJF.

3.3.2.4. 공간 상관관계(PCC)와 Relative difference 분석

Figure 3.69~3.72는 1991~2010 년 20 년간 두 자료간 평균 공간상관계수와 상대적인 차이 (Relative Difference; DF)를 나타낸 것이다. 우선 공간 상관(PCC)의 경우 전 계절, 주요 변수에서 1에 가까운 값이 나타남으로써 평균 공간 분포는 두 자료가 거의 유사하다고 판단할 수 있다. 그러나 DF의 경우 각 계절별, 변수별로 일관된 결과가 나타나지는 않았다. T2M, SLP, Z500의 경우 모든 계절 및 지역에서 기존 결과 값과 차이가 약 0.1% 미만으로 상대적 차이가 크게 나타나지 않았고, 반면 강수의 경우 모델에서 평균 예측 성능이 높게 나타나는 열대지역 (TR)을 제외하면 예측성이 상대적으로 낮은 열대지역 외의 지역에서 기존 결과와의 값 차이가 10% 이상으로 크게 나타나는 것을 확인하였다. 이를 통해 평균 예측 성능이 일반적으로 낮고 불안정한 변수와 지역에서는 생산 기기와 컴파일러 차이에 따른 예측값이 정량적 민감도가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

$$DF = \frac{KMA5 \text{ (or } OBS) - APCC}{APCC} * 100 \quad [3.2]$$

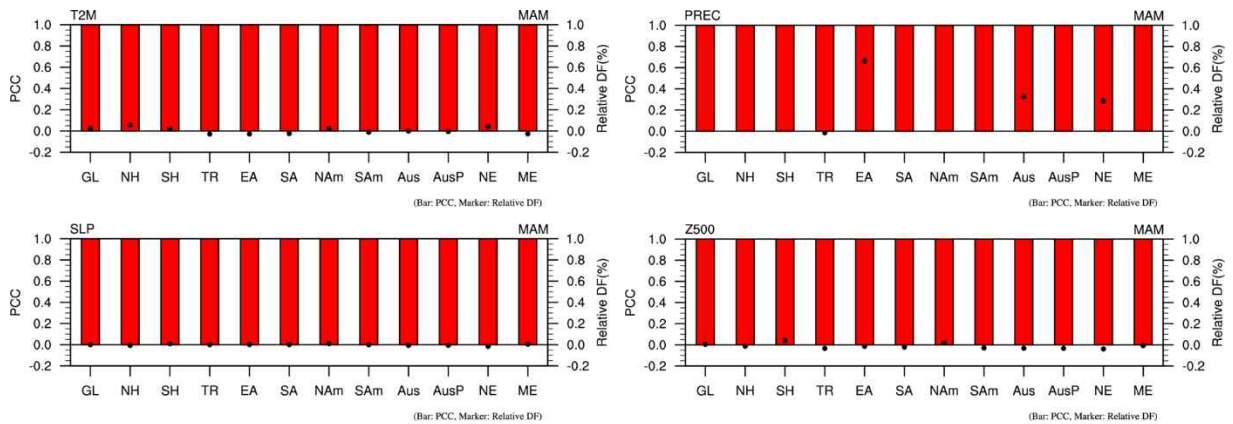


Figure 3.69. Pattern Correlation Coefficients (PCC) and relative difference (DF) of T2M, PREC, SLP, and Z500 between APCC and KMA5 with region for MAM.

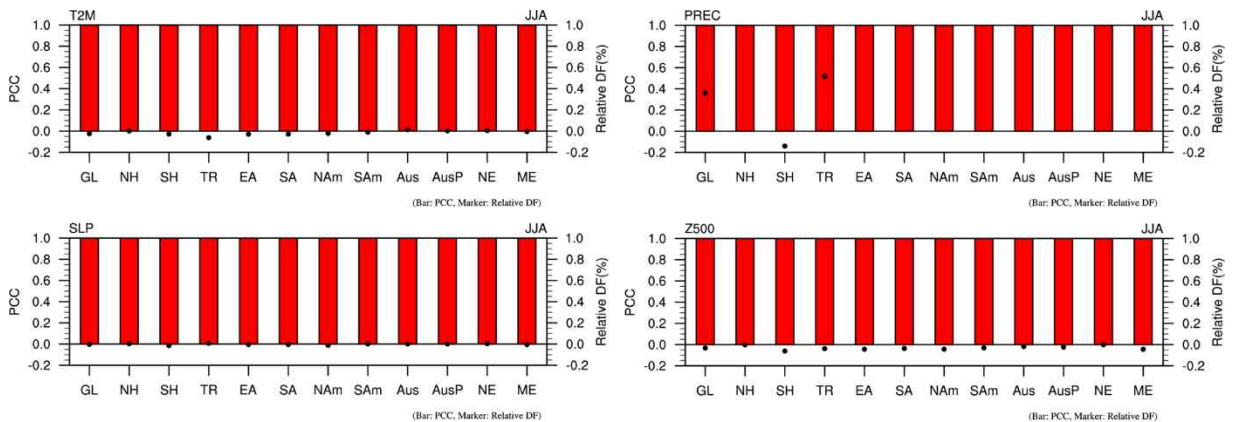


Figure 3.70. Same as Figure 3.69, but for JJA.

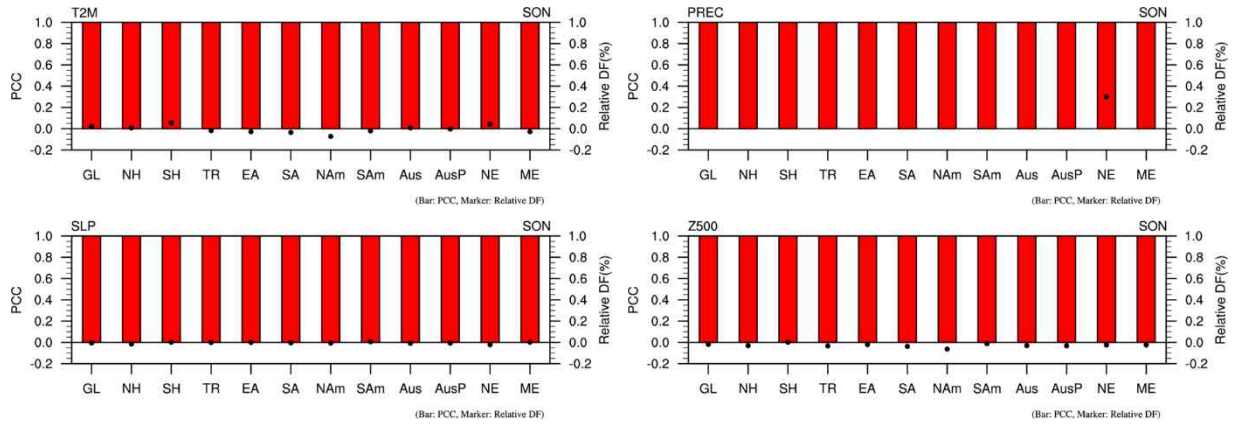


Figure 3.71. Same as Figure 3.69, but for SON.

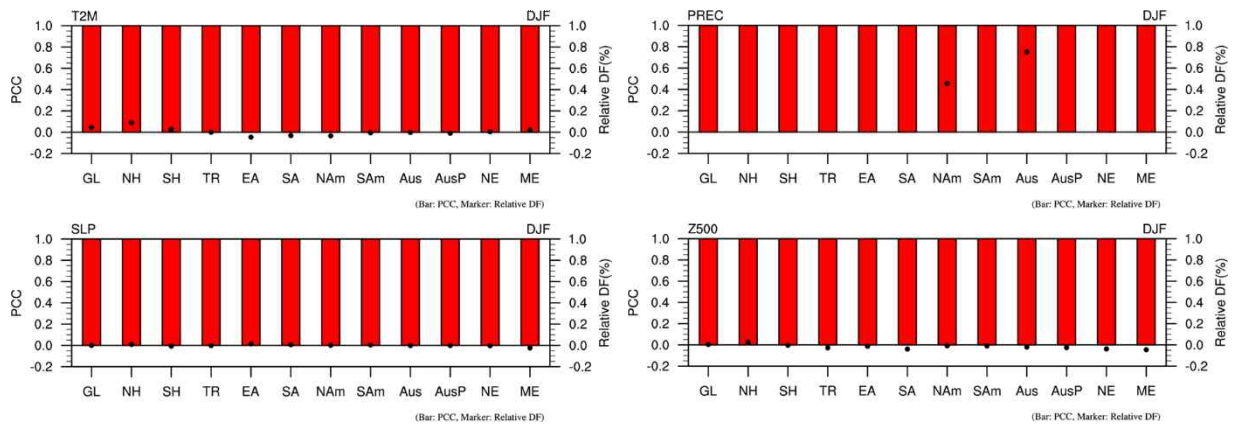


Figure 3.72. Same as Figure 3.69, but for DJF.

Figure 3.73~3.76은 1991~2010년 20년간 두 자료와 관측자료 간의 평균 공간상관계수와 상대적인 차이(Relative Difference; DF)를 나타낸 것이다. 두 자료와 관측간의 DF로 hindcast의 지역별 평균 예측성을 정량적으로 살펴볼 수 있고 두 자료의 예측성을 비교할 수 있다. 우선 순환장이나 기온에 비해 강수의 DF의 비율이 훨씬 높은 것을 확인할 수 있다. 전반적으로 모델에서 예측성이 낮은 강수가 hindcast에서도 타 변수에 비해 관측값과 차이가 많이 나는 것으로 확인하였다. 그러나 지역별로 두 자료의 정량적 예측성능의 차이는 거의 나지 않았다. 관측과의 PCC의 경우 두 자료 모두 모든 지역에서 1에 가까운 값을 나타내면서 두 자료가 관측과 매우 유사한 평균 패턴을 가지고 있음을 확인하였고 상대적으로 예측성이 낮은 강수 또한 지역 및 계절에 따라 상대적으로 낮게 나타나는 경우도 있지만 통계적으로 유의미한 정도는 아닌 것으로 확인된다.

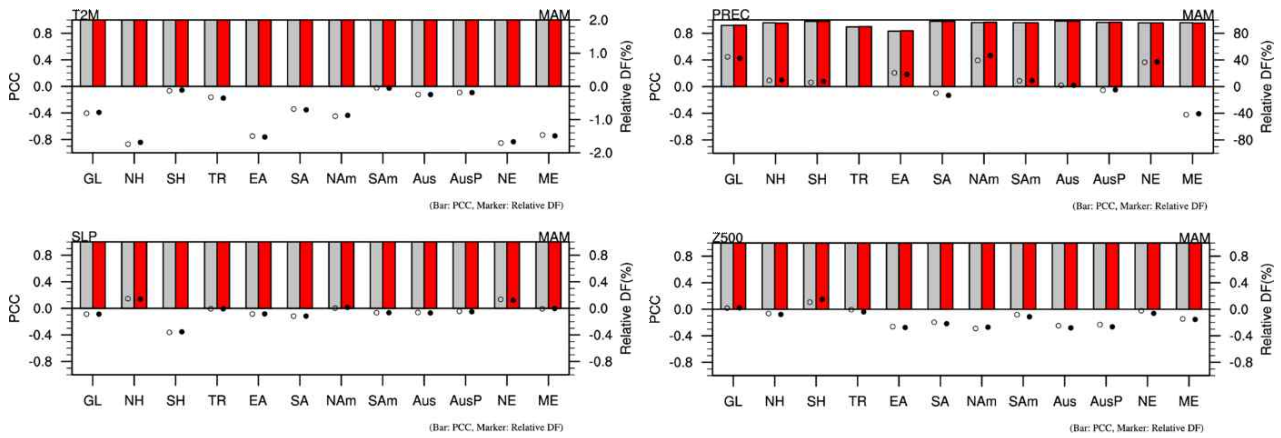


Figure 3.73. Pattern Correlation Coefficients (PCC) and relative difference (DF) of T2M, PREC, SLP, and Z500 (open marker: KMA5, closed marker: APCC) between those model hindcast (gray bar: KMA5, red bar: APCC) and reanalysis with region for MAM.

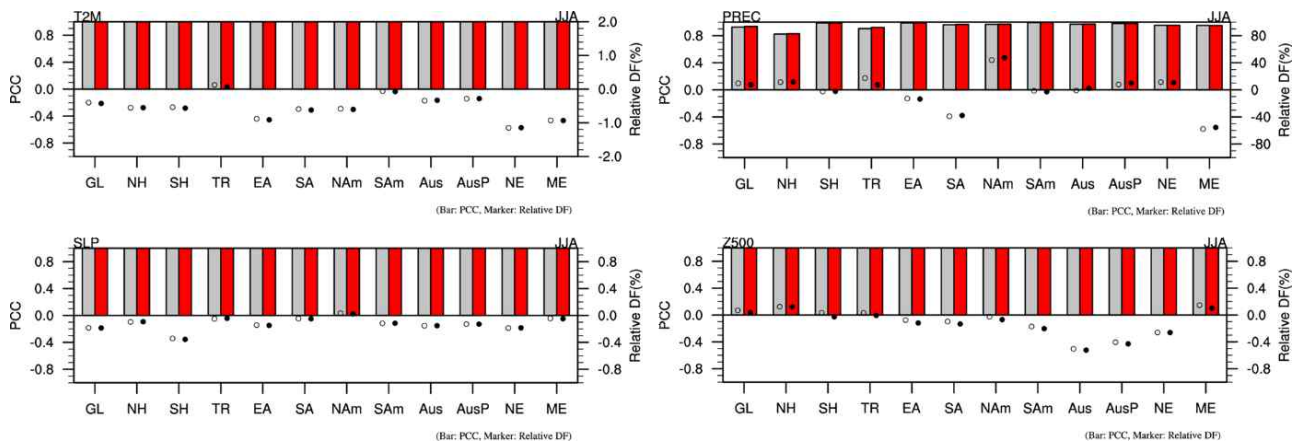


Figure 3.74. Same as Figure 3.73, but for JJA.

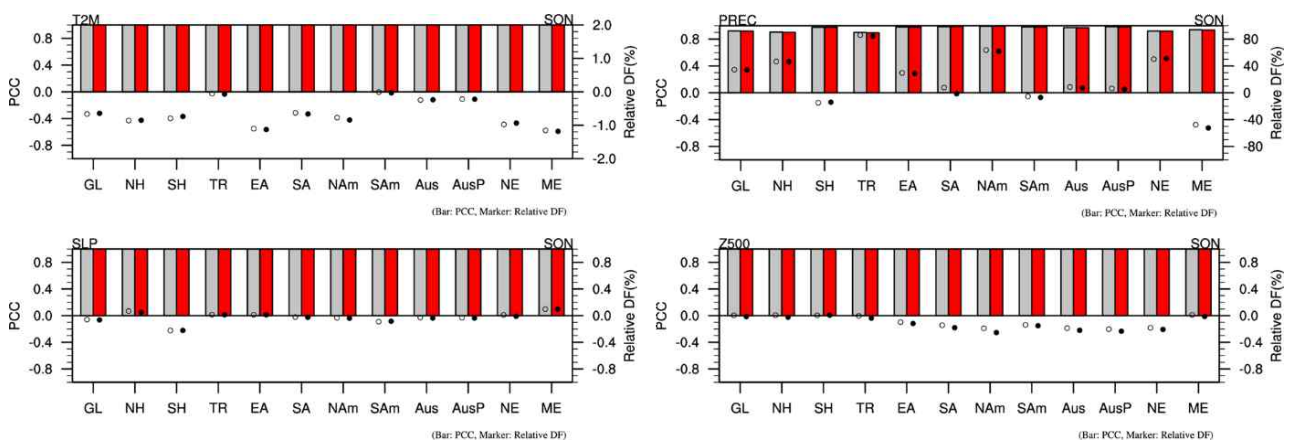


Figure 3.75. Same as Figure 3.73, but for SON.

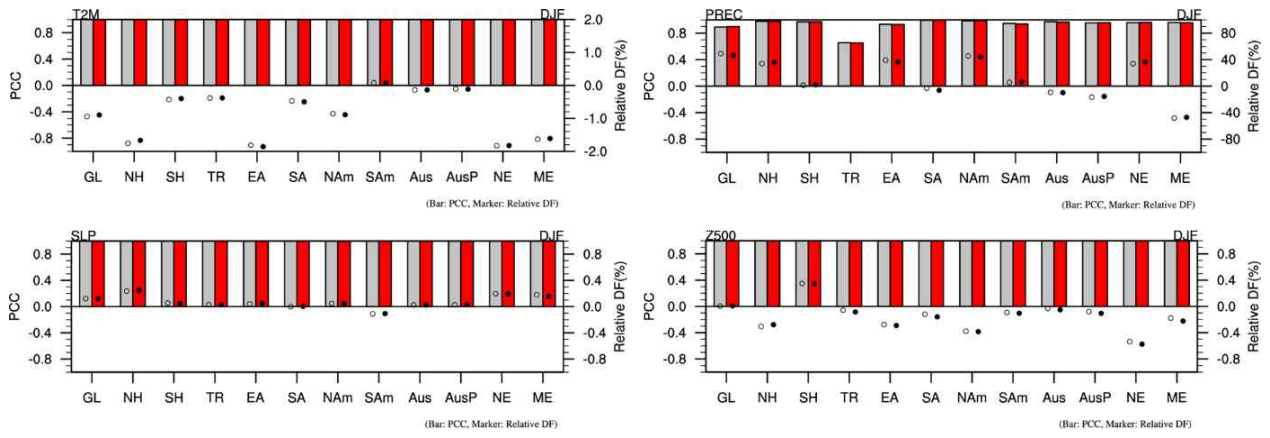


Figure 3.76. Same as Figure 3.73, but for DJF.

3.4. 산불예측시스템 개선 및 말레이시아 지역확장

3.4.1. 산불예측시스템 개선

3.4.1.1 산불예측시스템 강수 입력자료 개선

산불예측시스템에서는 강수자료를 활용하여 지역별 강수자료를 산출하여 이를 Emission과 비교하여 화재위험등급을 산정하고, 선정된 개별모델의 예측정보와 관측자료의 정보를 함께 제공하여 개별모델로부터 나오는 예측과 관측자료를 간접적으로 비교할 수 있는 정보를 함께 제공하고 있다. 하지만, 현재 활용중인 Aphrodite 자료를 활용할 경우 더 이상 업데이트가 없기 때문에, 2007년까지의 정보만을 활용하여 정보를 제공하여 현재 예측되고 있는 개별모델의 강수량 분포와 비교할 강수량 기준이 사라지게 된다. APCC의 Hindcast기간인 1991년부터 2010년을 중심으로 오차보정을 실시하는 현재의 시스템에서 오차보정에는 크게 문제가 발생하지 않지만, 사용자의 입장에서는 추가적으로 제공받을 수 있는 정보의 부재가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Aphrodite를 대체할 관측자료를 여러 재분석자료를 비교분석하여 선정하고, 산불예측시스템에 Aphrodite를 대체하여 활용하고 이를 제공하고자 한다.

3.4.1.2 강수 입력자료 수집 및 전처리

기존의 APCC의 산불예측시스템에서 활용되는 강수자료를 대체하기 위해서는 Aphrodite와 가장 유사한 성능을 보여주는 자료를 찾아주는게 우선되어야 한다. 따라서, 비교하고자 하는 강수자료를 수집하고 현재 인도네시아의 산불예측시스템에서 서비스중인 4개 지역을 대상으로 강수자료를 추출하는 작업을 우선하였다. 산불예측시스템에서는 월별 강수자료를 활용하는데, APCC에서 수집중인 기후자료의 목록은 다음 Figure 3.77과 같다. APCC의 수집 자료 중 본 연구에서 비교분석에 활용한 자료는 기준자료로 Aphrodite를 선정하였고, 비교자료로 GPCP(Global Precipitation Climatology Project), CPC(Climate Prediction Center) Global Precipitation, ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA5(ECMWF Reanalysis v5), CHIRPS(Climate Hazard group InfraRed Precipitation with Station data), MERRA2(Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications)를 하였으나, MERRA2의 경우 강수량의 절대 값 수치가 다른 자료와 많은 차이를 보여주고 있기 때문에 제외하였다. 또한 제외한 MERRA2를 대신하여 GPM(Global Precipitation Measurement)을 활용하여 비교하였다.

- 주기적, 자동 수집 기후자료 목록

Observation	Grid	ARGO, APHRODITE ¹ , CMAP, ERSST, GPCP, OISST, CPC Global Precipitation, NOAA OLR, CAMS OPI, CRU TS 4.03 ¹ , NOAA Sea Ice Concentration ² , NOAA Snow cover extent
	Reanalysis	CFSv2, ECMWF ERA-INTERIM ¹ , ECMWF ERA5, MERRA2, NCEP1, NCEP2
	Satellite	CHIRPS, PERSIANN ²
	Station	ASOS, GHCN
Prediction	Seasonal	APCC MME
	Sub-Seasonal	APCC BSISO, WMO S2S ²
Scenario	CMIP	CMIP5 ¹ , CMIP6 ² , KMA Standard ¹
	CORDEX	CORDEX EA ¹ , CORDEX SEA ¹
Index		Monitoring, NSIDC-Sealce

1 수집 완료, 수집 중단
2 비주기적, 수동 수집



Figure 3.77. List of data collected for comparative analysis of precipitation

강수량자료는 월별 강수량자료를 산출해서 활용해야 하는데, 자료마다 시간해상도와 사용단위의 차이가 존재하기 때문에 이를 보정하여 활용하여야 한다. Figure 3.78은 강수량자료들의 상세정보들 중 일부를 보여주고 있다. CHIRPS의 경우 일단위의 강수량자료를 제공하고 있어, 월별 총 강수량으로 변환하여 활용하였다. ERA는 시간단위 자료를 월별 합자료로 만들어주고, ‘m’ 단위의 강수량 값을 우리가 쉽게 이해할 수 있는 ‘mm’ 단위로 변환하였다. GPCP는 일단위의 강수량 표현값을 월단위로 제공하기 때문에 월 총 강수량으로 일수를 곱하여 변환하여 생산하였다. MERRA2는 단위변환을 mm/day로 한 다음 월 총 강수량 값으로 다시 환산하여 비교활용하였다. CPC Global Precipitation의 경우 일단위의 자료가 mm/day로 제공되기 때문에 월별로 총 강수량을 산출하여 이를 활용하였다. GPM은 30분의 시간해상도를 가지는데, 제공되는 자료는 mm/hr이기 때문에 이를 1시간의 시간 강수량 자료로 적용한 다음 한달의 누적 강수량을 산출하여 활용하였다.

Variable "precip"

In file "chirps-v2.0.1981.days_p25.nc"

```
float precip(time=365, latitude=400, longitude=1440);
:units = "mm/day";
:standard_name = "convective precipitation rate";
:long_name = "Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations";
:time_step = "day";
:missing_value = -9999.0f; // float
:_FillValue = -9999.0f; // float
:geostatial_lat_min = -50.0f; // float
:geostatial_lat_max = 50.0f; // float
:geostatial_lon_min = -180.0f; // float
:geostatial_lon_max = 180.0f; // float
:_ChunkSizes = 61U, 67U, 240U; // uint
```

CHIRPS / mm/day / daily

Variable "tp"

In file "tp_197908.nc"

```
short tp(time=744, latitude=721, longitude=1440);
:scale_factor = 1.0347758525076346E-6; // double
:add_offset = 0.033905465583265154; // double
:_FillValue = -32767S; // short
:missing_value = -32767S; // short
:units = "m";
:long_name = "Total precipitation";
```

ERA5 / m / hourly

Variable "precip"

In file "gpcp_v02r03_monthly_d197901.nc"

```
float precip(time=1, latitude=72, longitude=144);
:long_name = "NOAA Climate Data Record (CDR) of GPCP Monthly Satellite-Gauge Combined Precipitation";
:standard_name = "precipitation amount";
:units = "mm/day";
:coordinates = "time latitude longitude";
:valid_range = 0.0f, 100.0f; // float
:cell_methods = "area: mean time: mean";
:missing_value = -9999.0f; // float
```

GPCP / mm/day / monthly

Variable "TPRECMAX"

In file "MERRA2_100_statD_2d_slv_Nx.19800101.nc4"

```
float TPRECMAX(time=1, lat=361, lon=576);
:long_name = "total_precipitation";
:units = "kg m-2 s-1";
:_FillValue = 9.9999999E14f; // float
:missing_value = 9.9999999E14f; // float
:missing_value = 9.9999999E14f; // float
:standard_name = "total_precipitation";
:vmx = 9.9999999E14f; // float
:vmn = -9.9999999E14f; // float
:valid_range = -9.9999999E14f, 9.9999999E14f; // float
:_ChunkSizes = 1U, 361U, 576U; // uint
```

MERRA2 / kg m-2 s-1 / daily

Figure 3.78. Detailed specification information for each precipitation data

월 총강수량으로 재산출한 강수량 비교자료들을 활용하여 인도네시아의 4개 지역을 대상으로 월별 강수량을 산출하여 Aphrodite와 비교분석을 하고자 하였다. 수집된 자료들의 공간해상도가 다르기 때문에, 현재의 산불예측시스템에서 사용중인 지역별 강수량 자료로 변환하여 비교평가 하고자 하였다. 지역별로 정의된 shape file을 기준으로 각 격자자료들의 월별강수량을 지역별로 평균강수량을 산출하여 'csv' 형태로 저장하여 자료를 비교평가하는데 활용하였다. Figure 3.79는 수집된 자료 중 CHIRPS와 GPM의 결과에 대해 예제로 보여주고 있다. GPM의 경우 2000년 6월부터 GPM-IMRGE 자료를 제공하고 있기 때문에, 공정한 비교라고 할 수는 없지만 정확도가 높은 자료를 활용하여 평가하기 위해 비교평가를 위해 활용하였다. CHIRPS는 일 평균 강수량을 나타내고, GPM은 월 총 강수량을 나타내고 있다.

	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	yearmon	barat	selatan	tengah	timur	1	yearmon	barat	selatan	tengah	timur
2	Jan-91	12.81416	11.75677	10.85473	6.202879	2	2000-06-01	63.55119	74.35794	60.93589	65.66486
3	Feb-91	8.003197	11.33536	9.487244	6.177371	3	2000-07-01	47.04442	37.1439	44.21819	58.02299
4	Mar-91	11.26334	11.55542	14.32821	6.918832	4	2000-08-01	111.8654	119.7614	103.5197	121.4559
5	Apr-91	9.570441	8.7153	10.30853	9.026344	5	2000-09-01	238.2903	156.7994	185.4688	189.2451
6	May-91	12.59017	7.677867	10.23569	10.36439	6	2000-10-01	217.0607	293.8016	229.0854	269.6607
7	Jun-91	6.617299	2.144651	4.170268	4.395028	7	2000-11-01	227.7475	173.5987	195.1609	251.2115
8	Jul-91	3.347938	0.988346	2.204111	4.059961	8	2000-12-01	180.8952	211.7711	249.4317	213.017
9	Aug-91	3.102353	0.85906	1.996414	6.845989	9	2001-01-01	107.0872	89.11431	107.0687	165.8417
10	Sep-91	3.585896	1.79566	2.390248	4.541268	10	2001-02-01	93.0263	95.26521	98.19935	61.52188
11	Oct-91	6.919365	1.919708	4.577429	6.085341	11	2001-03-01	54.48144	68.89143	72.65917	54.39401
12	Nov-91	12.09191	7.722428	10.94439	9.58856	12	2001-04-01	57.55361	48.96161	36.94728	57.03448
13	Dec-91	16.57638	10.98245	14.18537	8.764681	13	2001-05-01	23.42487	36.87257	25.17544	55.95895
14	Jan-92	12.62744	8.046158	10.24984	3.903976	14	2001-06-01	66.7644	94.54293	80.7777	67.52158
15	Feb-92	12.59677	7.648364	10.96634	3.648666	15	2001-07-01	74.70732	105.4394	83.45425	60.74378
16	Mar-92	12.0054	8.530353	10.72658	5.427694	16	2001-08-01	117.032	107.9875	116.1629	153.2823
17	Apr-92	8.478613	6.630201	9.491776	5.154946	17	2001-09-01	130.1937	167.9967	111.3773	109.0263

CHIRPS

GPM

Figure 3.79. Example of regional extracted data

3.4.1.3 강수 입력자료 비교 분석

APN 프로젝트를 통해 Aphrodite의 성능에 대해 검증이 완료되었기 때문에, 본 연구에서는 성능이 검증된 자료인 Aphrodite를 기준으로 다른 강수자료들을 평가하고자 하였다. 강수량의 기존자료와 비교평가를 하기위해서 지역별로 추출된 여러 자료들을 그래프를 통해 우선 비교하였다. 본 연구에서는 명확한 비교를 위해 수치적인 비교는 CC(Correlation Coefficient)와 RMSE(Root Mean Square Error)를 활용하여 시간상관성이 높으면서 절대적 편차는 적은 대체 자료를 찾고자 하였다. Figure 3.80은 Aphrodite를 기준으로 CHIRPS, CPC Global Precipitation, ECMWF ERA5, GPCP, GPM의 월별 강수량을 지역별로 추출하여 비교한 결과이다. 전반적으로 Aphrodite를 기준으로 비교하였을 때, 재분석 자료들의 절대적인 강수량의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 수치적 평가의 결과는 Figure 3.81과 같다. 해당 결과를 살펴보면 GPM은 RMSE가 92.2269로 다른 자료들에 비해 가장 Aphrodite와 차이가 적게 나타났음을 알 수 있지만 상관관계수가 0.1845로 가장 상관성이 없는 자료라고 할 수 있겠다. CPC의 경우 전체적인 상관관계수는 0.4464이나 Selatan지역에서는 무상관 수준의 상관관계수를 보여주고 있으며, RMSE도 119.6169로 좋지 않은 수치를 보여주고 있다. ERA5는 전체 상관관계수가 0.5295로 높지 않은 수치를 보여주었으며, RMSE는 142.8541로 두 번째로 높은 값을 보여주었다. GPCP는 상관관계수가 0.7054로 가장 높은 상관성을 보여주었으나, RMSE가 145.4745로 가장 좋지 않은 수치를 보여주고 있다. CHIRPS는 두 번째로 높은 상관관계수인 0.6819를 보여주었으며, RMSE는 133.3888로 세 번째로 높은 수치를 보여주었다. 본 연구에서는 Hindcast의 기간의 강수자료를 활용하여 개별모델의 오차와 보정을 통해 절대값의 보정이 가능하나, 최대한 유사한 패턴을 보이는 자료를 찾고자 하였으므로, CHIRPS로 선정하여 최종 결과를 산출하였다. 또한 CHIRPS는 공간해상도가 0.25° 와 0.05° 로 매우 우수하기 때문에 추후 연구에 활용하기에 유용한 자료라 판단하였다.

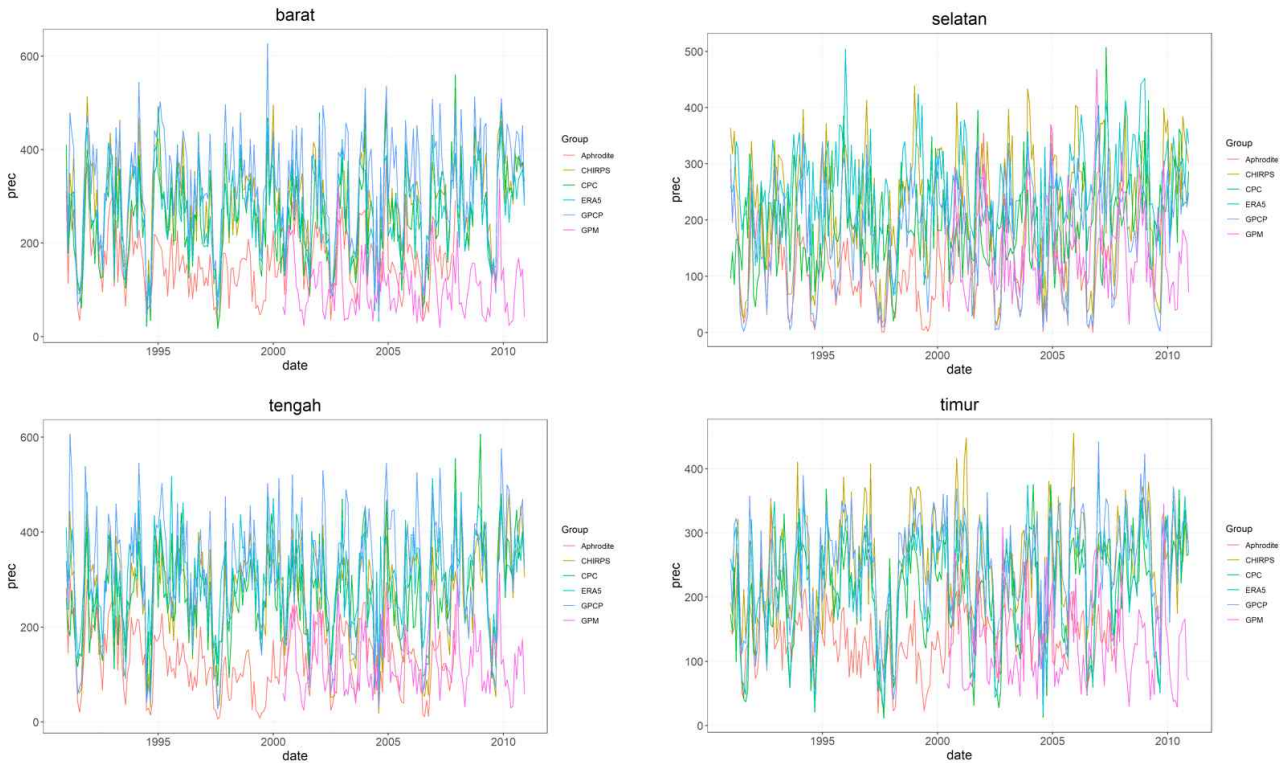


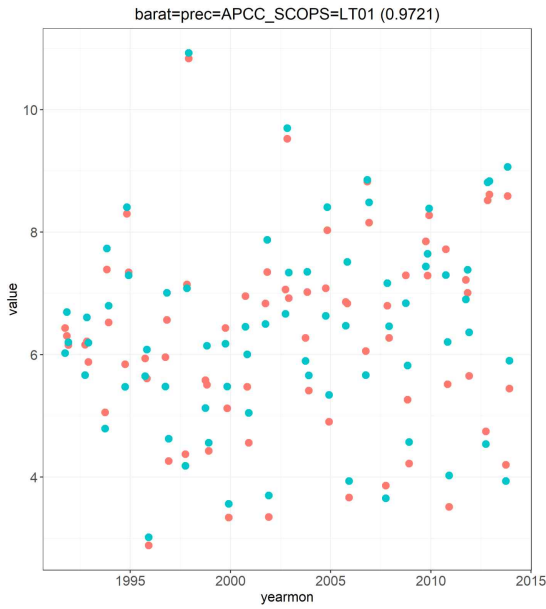
Figure 3.80. Monthly precipitation comparison results by region I

	GPM_Cor	CHIRPS_Cor	GPCP_Cor	MERRA2_Cor	CPC_Cor	ERA5_Cor	GPM_RMSE	CHIRPS_RMSE	GPCP_RMSE	MERRA2_RMSE	CPC_RMSE	ERA5_RMSE
barat	0.2829	0.7815	0.7344	0.6568	0.7331	0.7738	98.9530	131.3696	178.6837	127.7306	109.7705	116.3399
selatan	0.1674	0.7336	0.7674	0.7374	-0.0213	0.2134	109.8639	123.9218	79.9979	98.7973	125.9823	168.3988
tengah	0.2032	0.7133	0.7290	0.6767	0.5829	0.5754	82.2321	148.4548	195.9006	107.2818	146.9676	181.3322
timur	0.0845	0.4993	0.5907	0.5081	0.4910	0.5554	77.8584	129.8092	127.3158	105.8332	95.7471	105.3457
Mean	0.1845	0.6819	0.7054	0.6447	0.4464	0.5295	92.2269	133.3888	145.4745	109.9107	119.6169	142.8541

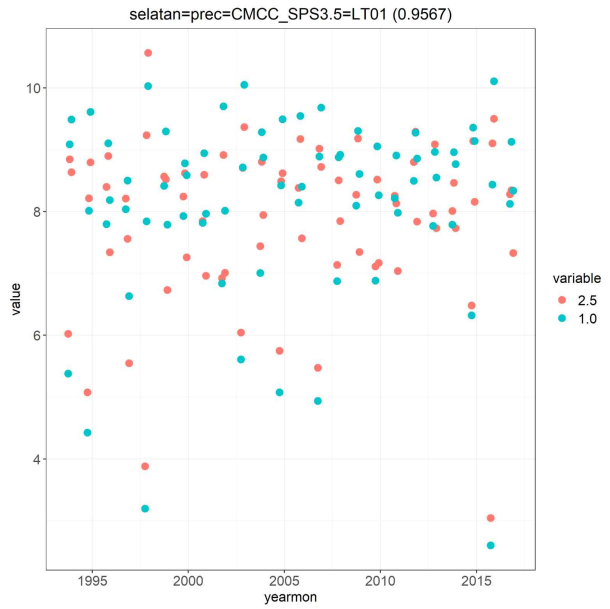
Figure 3.81. Monthly precipitation comparison results by region II

3.4.1.4 산불예측시스템 개별모델 변경

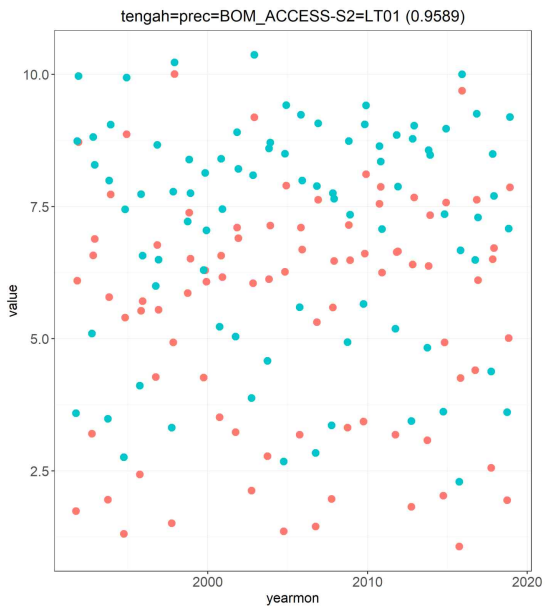
최근 APCC는 개별모델 및 MME의 해상도를 2.5° 에서 1.0° 로 고해상도 자료를 제공하고 있다. 산불예측시스템에서도 이를 활용하여 고해상도의 개별모델을 활용한 정보제공을 위해 산불예측시스템의 개별모델 입력자료 부분을 개선하였다. 이를 위해서는 기존의 2.5° 로 제공되는 개별모델의 정보를 활용하여 생산한 지역별 강수정보와 고해상도로 제공되는 1.0° 의 개별모델의 지역정보의 차이를 비교하여 변경 적용하기에 문제가 없는지 판단할 필요가 있겠다. 지역별 개별모델의 정보를 추출하여 모든 리드타임에 대해 비교를 하였다. Figure 3.82는 첫 번째 리드타임의 지역별 개별모델의 결과를 예제로 보여주고 있다. 상관계수는 기존의 저해상도의 개별모델과 고해상도로 바뀐 개별모델의 지역별 차이는 거의 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 산불예측시스템의 개별모델 정보를 저해상도에서 고해상도로 APCC의 모델제공을 따라 변경 적용하였다.



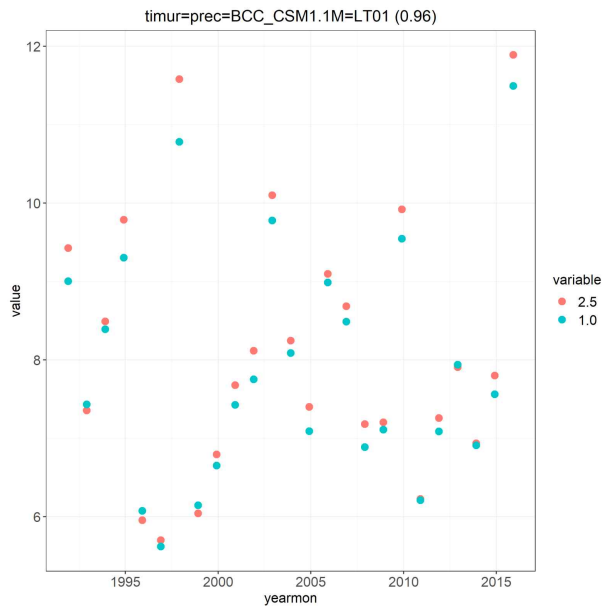
APCC SCOPS (Lead Time: 1, Barat)



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



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



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

Figure 3.82. Results of comparing individual model resolution differences

3.4.1.5 산불예측시스템 산불위험등급 개선

산불예측시스템의 예측정보를 위해서는 위험등급의 산정이 우선되어야 한다. 산불예측시스템의 위험등급의 산정은 강수량과 Emission의 관계를 단절회귀분석을 활용하여 임계치를 결정하는 방법을 사용한다. 단절회귀분석은 독립 변수를 구간으로 분할하고 별도의 선분을 각 구간에 맞추는 회귀분석 방법이다. 단절 회귀 분석은 여러 그룹으로 묶인 독립 변수가 해당 영역의 변수 간에 서로 다른 관계를 나타내는 경우 유용한데, 일직선으로 표현할 수 없는 지금과 같은 데이터의 임계치를 설정하기에 유용한 방법이다. Figure 3.83은 기존의 Aphrodite의 임계치와 새롭게 산정된 CHIRPS의 임계치를 보여준다. CHIRPS의 강수량이 Aphrodite보다 분산이 크기 때문에, 기존의 임계치에 비해 넓은 임계치의 분포를 보여주고 있다.

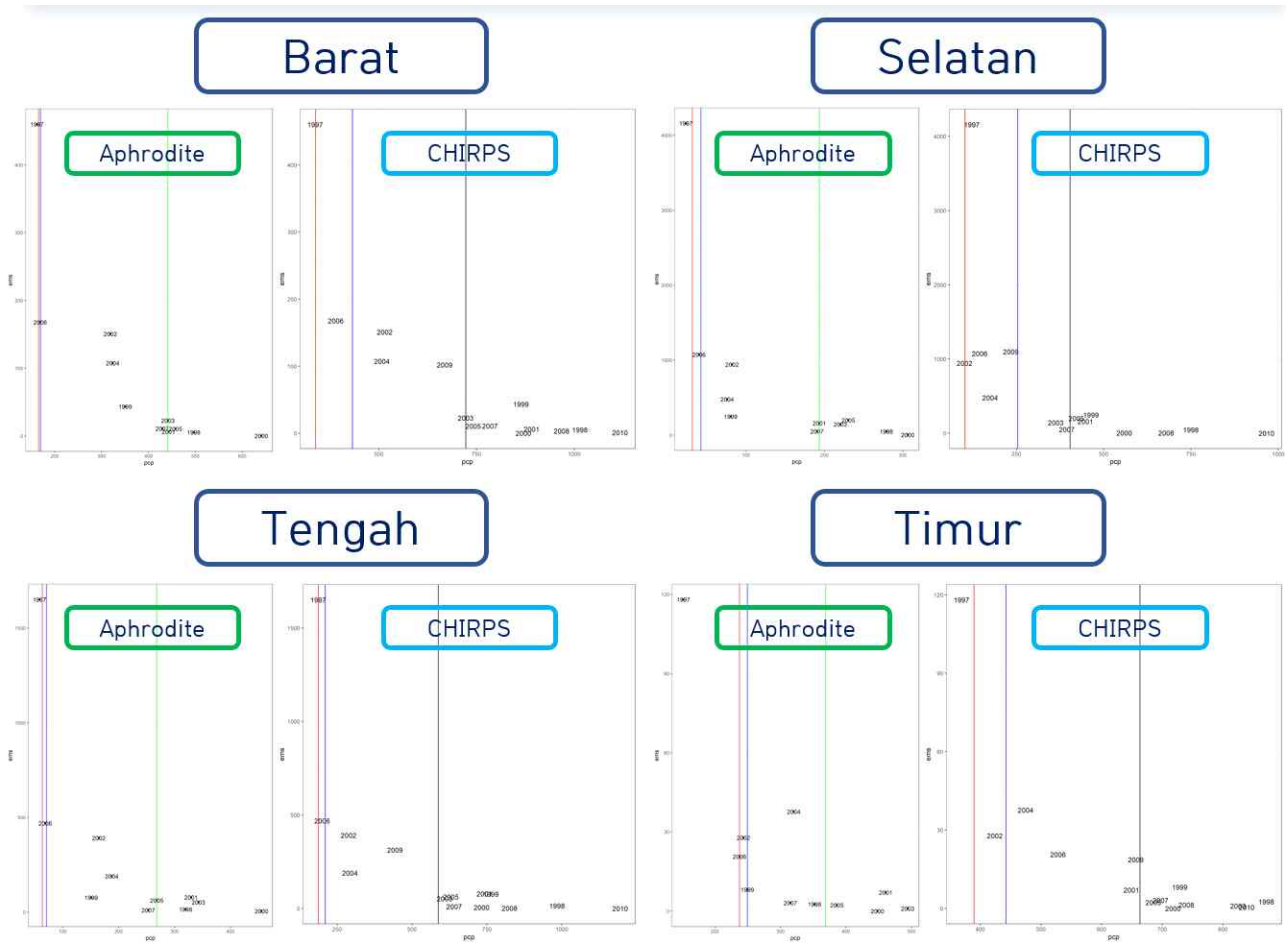
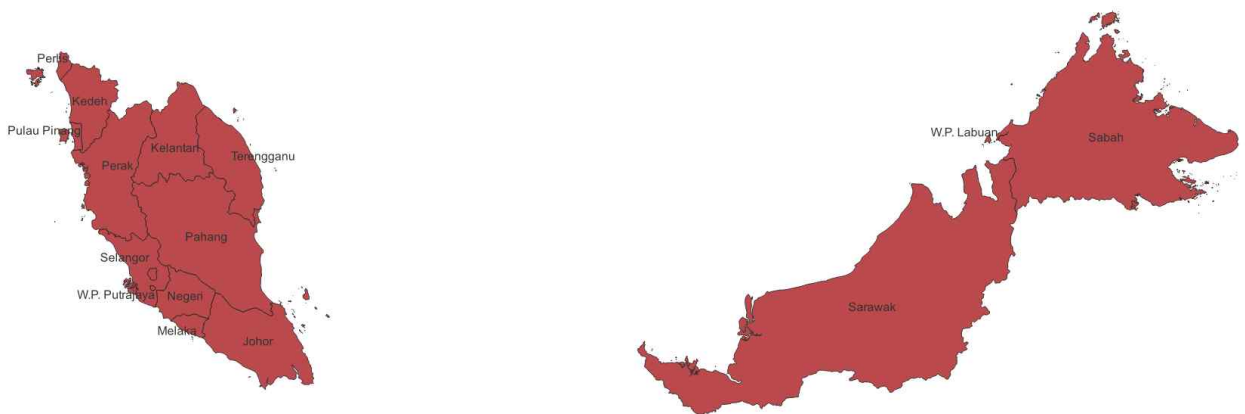


Figure 3.83. Risk grade calculation comparison results

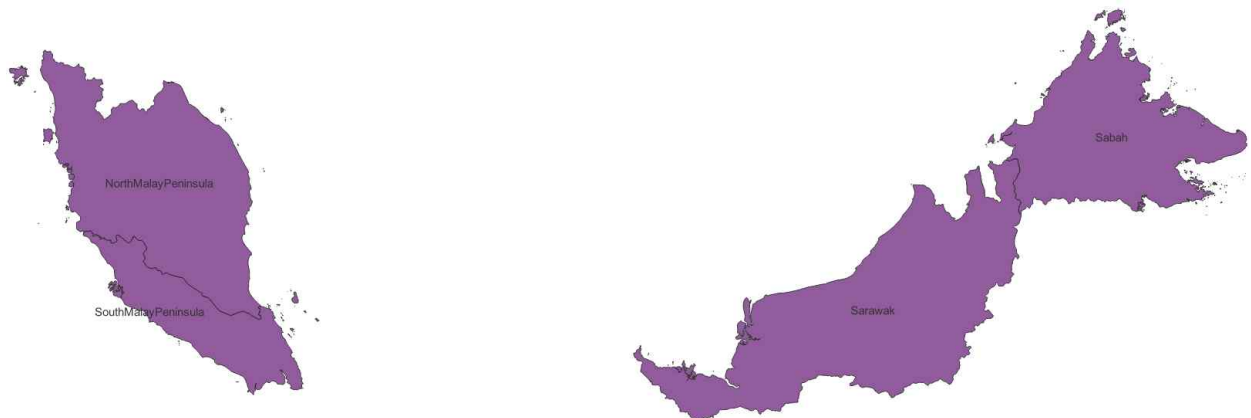
3.4.2. 말레이시아 지역확장을 통한 산불예측시스템 개선

3.4.2.1 말레이시아 지리정보 전처리

말레이시아의 지역자료를 생산하기 위해서는 shapefile을 활용하여 격자자료로부터 지역별 평균자료를 추출하는 방법을 활용한다. 말레이시아의 지역은 Figure 3.84의 (a)와 같으나, 개별 모델의 계절예측정보의 해상도가 1° 로 모든 지역을 다 세부정보를 생산할 수 없기 때문에 (b)로 전처리하여 활용하였다. 이는 인도네시아의 지역정보를 제공하는 정도의 위치정보와 유사하게 추출하였으며, 기존의 16개 지역을 4개로 병합하여 정보를 제공하였다. 재정리된 말레이시아의 지역자료를 정리한 지리정보를 통해서 관측자료 및 개별모델의 정보, GFED가 모두 추출되어 말레이시아의 조기경보 시스템을 만들기위한 자료를 전처리하여 생산할 수 있게 된다.



(a) Malaysia subnational administrative boundaries



(b) Malaysia merged boundaries

Figure 3.84. Reproduction results for Malaysia

3.4.2.2 말레이시아 입력자료 처리

말레이시아 지역의 지리정보를 전처리한 정보를 활용하여 격자자료로부터 지역별 평균정보를 산출하는 과정에 대해 설명하고자 한다. 지리정보를 4개 지역으로 정의한 shape file을 기준으로 격자로부터 해당지역의 평균자료를 추출하여 지역별 대표 자료를 추출한다. 산불예측시스템에서는 지역별로 추출한 정보를 ‘csv’ 형태로 정리하여 CHIRPS, GFED, 개별모델에서도 모두 저장하여 활용한다. Figure 3.85는 CHIRPS와 GFED를 말레이시아 4개의 지역을 대상으로

추출한 결과를 보여주고 있다. 오차보정은 CHIRPS와 개별모델의 Hindcast기간의 자료를 통해 두 자료의 오차를 산출하고, 해당 오차를 Forecast에 적용하여 오차보정하는 방식을 활용한다. 이는 개별모델 및 CHIRPS의 격자가 모두 상이할 수 있기 때문에, 지역별로 추출하여 오차보정하는 방식을 차용하여 적용하였다. Figure 3.86은 개별모델로부터 추출된 말레이시아 지역별 강수량자료와 오차보정후 정리된 결과를 각각 보여주고 있다.







































	A	B	C	D	E
1	yearmon	NorthMalayPeninsula	Sabah	Sarawak	SouthMalayPeninsula
2	Jan-91	9.700301397	5.823607791	11.01601668	6.701283089
3	Feb-91	3.059377996	5.160810119	8.525480291	4.721396854
4	Mar-91	4.65270309	1.950050559	7.514549878	4.911213104
5	Apr-91	5.015846923	6.250248901	11.32420846	6.936892329
6	May-91	9.603643992	8.569332199	10.67526301	8.752545625
7	Jun-91	4.298117042	6.622896684	6.62918755	2.657377784
8	Jul-91	5.310798934	5.705943694	4.409826865	2.772657652
9	Aug-91	5.155633621	8.784730156	7.383748148	4.268430405
10	Sep-91	8.44528469	7.157294154	8.432698939	5.177544036
11	Oct-91	7.436030259	6.616319496	7.94516305	5.069880313
12	Nov-91	12.5475217	9.939367142	11.35371184	10.37037117
13	Dec-91	16.68415592	8.777775113	12.81090347	17.10716422
14	Jan-92	4.084940688	1.500507259	7.260129015	3.693900577
15	Feb-92	4.637099745	1.827292461	6.665305035	4.941013209
16	Mar-92	2.698367711	2.953689321	11.25647244	5.015093491
17	Apr-92	4.149293408	1.736565544	7.396608096	5.684233486
18	May-92	7.358502108	6.218300752	11.39777834	7.667796896
19	Jun-92	5.129680204	5.555553562	7.168228244	4.431650464
20	Jul-92	5.890397652	5.71047874	6.731531813	6.990962477

CHIRPS

	A	B	C	D	E
1	yearmon	NorthMalayPeninsula	Sabah	Sarawak	SouthMalayPeninsula
2	Jan-97	1.426725536	0.249476001	0.163558114	0.758800504
3	Feb-97	0.332340893	0.154238597	0.041955649	0.316415886
4	Mar-97	1.592280177	1.515648406	1.668809904	1.550366642
5	Apr-97	1.258081974	1.235225488	0.309009426	0.774508598
6	May-97	1.467643572	1.414207377	1.3530451	0.681322645
7	Jun-97	3.957575974	6.585153558	1.859520529	0.822414183
8	Jul-97	2.203962169	0.840214288	3.129999695	2.099607333
9	Aug-97	2.478641556	4.955225185	18.4643366	5.450872043
10	Sep-97	2.667932409	2.745398558	3.162726296	2.445694798
11	Oct-97	1.133466589	2.082418188	2.33826919	2.248567175
12	Nov-97	0.699532334	1.205380277	0.905704513	1.662602785
13	Dec-97	0.242814514	0.349344334	0.41065489	0.576752016
14	Jan-98	4.487316859	2.256868001	1.864821572	2.536063218
15	Feb-98	7.932155664	11.23600218	4.957809527	8.395479442
16	Mar-98	18.74363717	96.3668774	9.444587491	16.58627277
17	Apr-98	16.0116762	54.33201177	9.772078435	14.07318397
18	May-98	2.184966201	5.138593508	0.845380762	0.730599296
19	Jun-98	0.487238344	0.637509355	0.587935025	0.29286612
20	Jul-98	0.83312301	0.952615063	0.768348711	1.162264218

GFED

Figure 3.85. Average results for Malaysia from CHIRPS and GFED

 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT01	 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT01=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT02	 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT02=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT03	 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT03=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT04	 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT04=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT05	 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT05=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT06	 NorthMalayPeninsula=prec=APCC_SCOPS=LT06=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT01	 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT01=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT02	 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT02=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT03	 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT03=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT04	 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT04=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT05	 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT05=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT06	 NorthMalayPeninsula=prec=BCC_CSM1.1M=LT06=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT01	 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT01=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT02	 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT02=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT03	 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT03=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT04	 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT04=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT05	 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT05=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT06	 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT06=BC
 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT07	 NorthMalayPeninsula=prec=BOM_ACCESS-S2=LT07=BC

Extracted individual models
Bias corrected individual models

Figure 3.86. Average results for Malaysia from individual models

3.4.2.3 말레이시아 강수 패턴 분석(EOF)

말레이시아 지역의 건기를 정의하기 위해 강수 패턴 분석을 위해 해당 지역의 장기 강수 자료를 추출하여 이를 활용하였다. Figure 3.87은 말레이시아 지역에 Climatology를 월별로 보여주고 있다. 해당 그림을 통해서 2월부터 8월까지의 강수량의 분포가 다른 9월부터 1월까지의 월별 강수량 패턴에 비해 강수량이 적게 나타난다는 것을 알 수 있다. Figure 3.88은 Anomaly를 통해 비교한다면 6월과 7월이 건기처럼 보여지기도 한다. 하지만 지역별로 차이가 충분히 나고 있다는 것을 알 수 있다. 예를들어 2월의 경우 말레이시아 본토의 강수량이 연중 최저로 보여지고 있다는 것을 알 수 있다. Figure 3.89는 Climatology anomaly를 활용하여 말레이시아 지역을 EOF분석한 결과를 보여준다. PC1의 경우 전체적인 말레이시아 지역의 강수량이 2월부터 9월까지 비교적 건기에 해당한다고 보여진다. PC2의 경우 2월의 말레이시아 본토가 강수량이 적게 나타나는 것을 알 수 있다. PC1부터 PC3까지 패턴을 비유희를 통해 월별로 강수패턴을 분석한 결과는 Figure 3.90과 같다. EOF를 월별로 비유희를 통해 분석한 결과 2월부터 7월까지 건기로 판단된다. 해당 지역의 건기를 명확하게 정의하기 위해 월별 강수량 패턴을 장기적으로 분석하여 명확한 말레이시아의 건기를 정의하고자 하였다. 해당 결과는 다음 장에서 정의하였다.

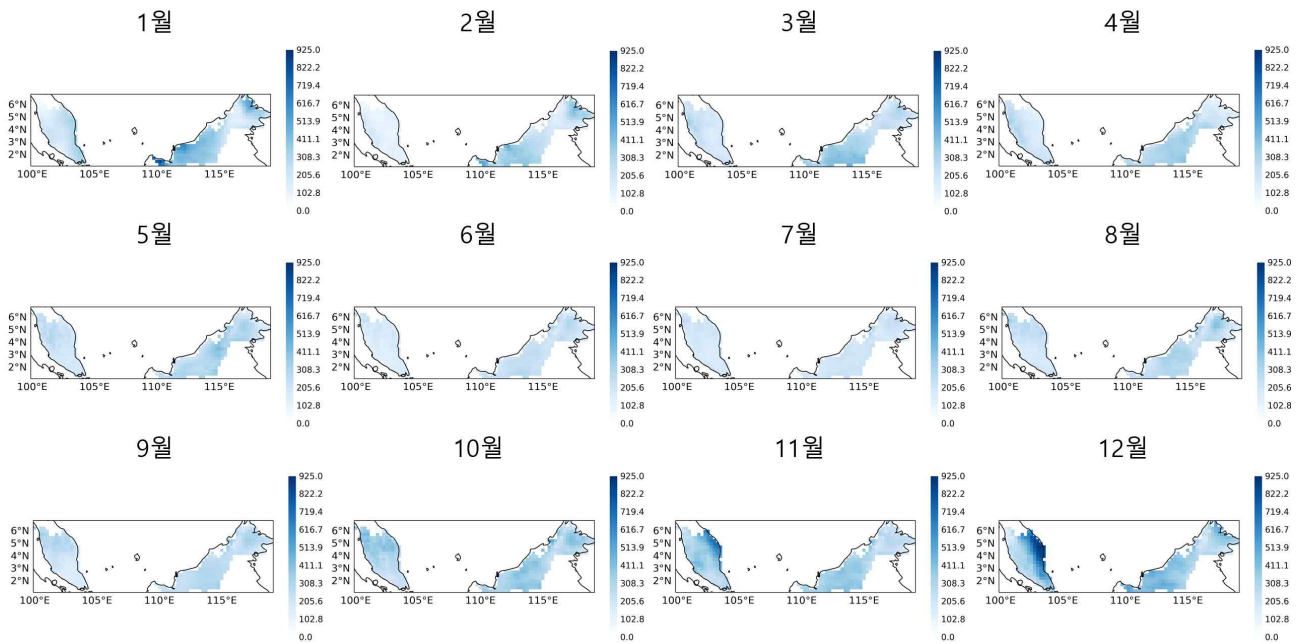


Figure 3.87. Monthly climatology pattern of precipitation

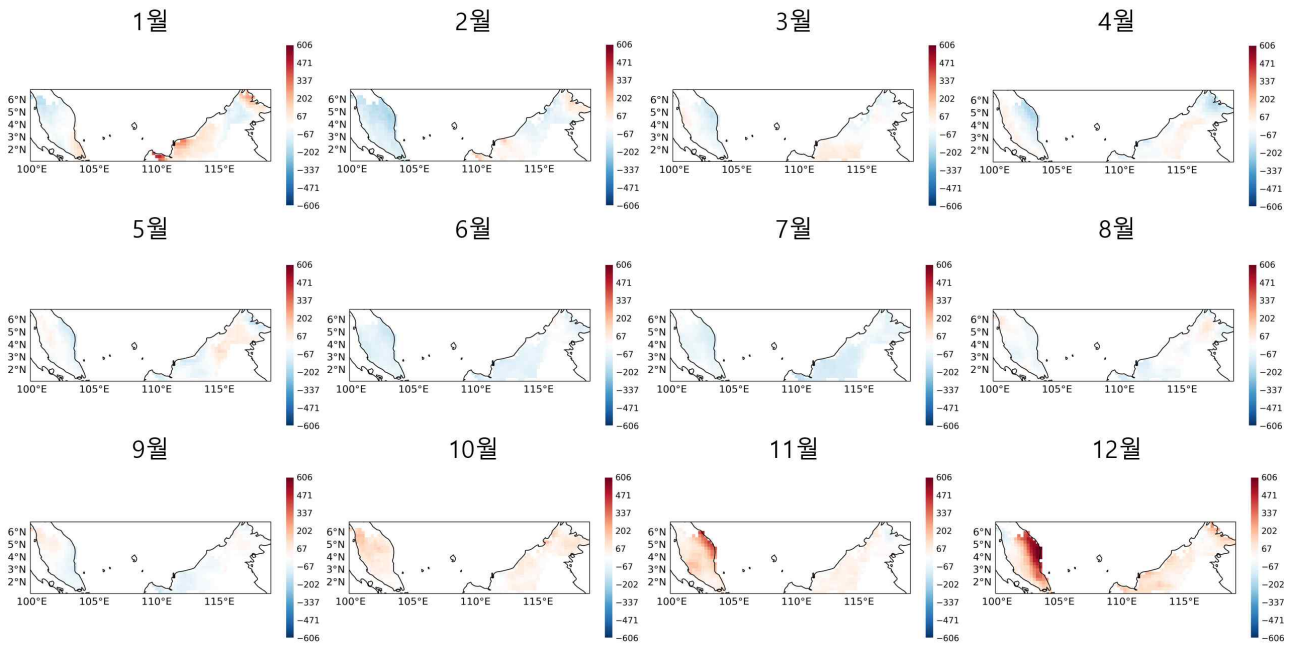


Figure 3.88. Monthly anomaly climatology pattern of precipitation

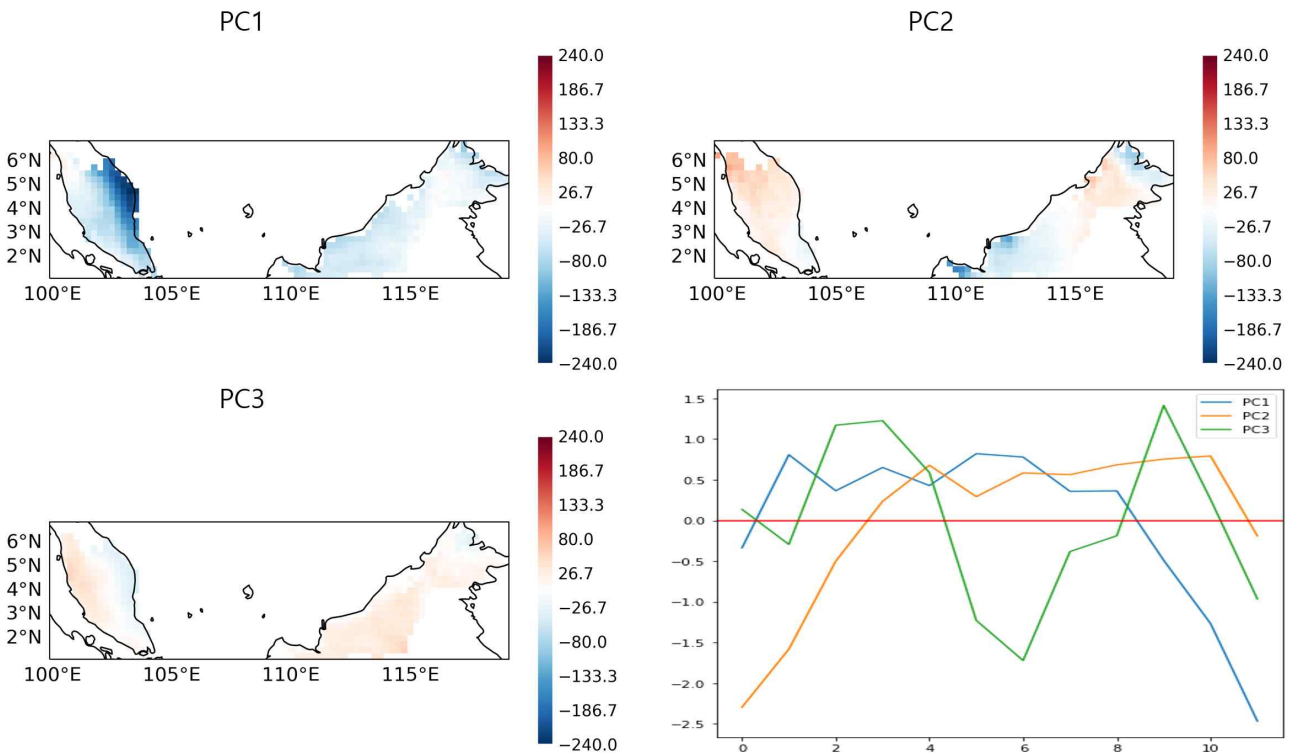


Figure 3.89. EOF results of Malaysia

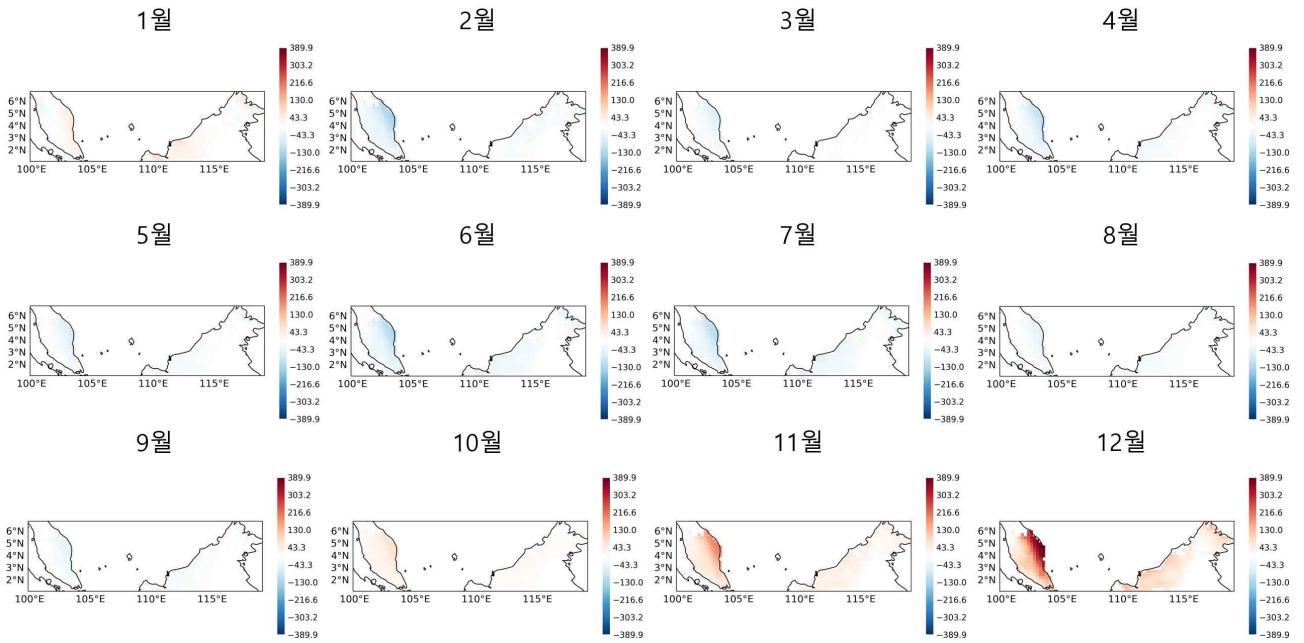


Figure 3.90. Monthly precipitation pattern from EOF

3.4.2.4 말레이시아 장기 강수 분석

말레이시아의 4개 지역의 건기를 파악하기 위해서는 장기적인 강수패턴을 분석할 필요가 있다고 판단하였다. Figure 3.91은 CHIRPS를 대상으로 한 월별 Climatology를 보여주고 있다. 네 지역에 대해 월별 강수 Climatology를 살펴보면, 2월에서 4월의 강수량이 대부분 낮게 관측되고 있다는 것을 알 수 있다. 강수화 함께 고려하는 변수인 Emission (Figure 3.92)의 경우에도 2월에서 4월의 Emission이 다른월에 비해 높은 것을 알 수 있다. 이를 통해 말레이시아의 대부분의 지역에서는 2월에서 4월의 강수량이 낮고, Emission이 높기 때문에 산불예측시스템의 건기로 지정하기에 적당한 기간으로 판단하였다.

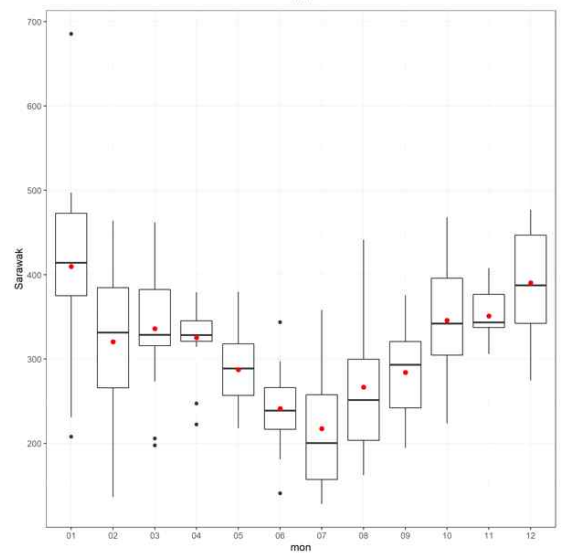
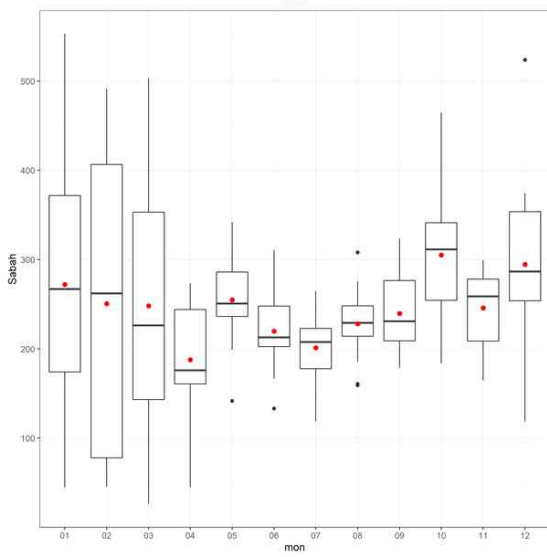
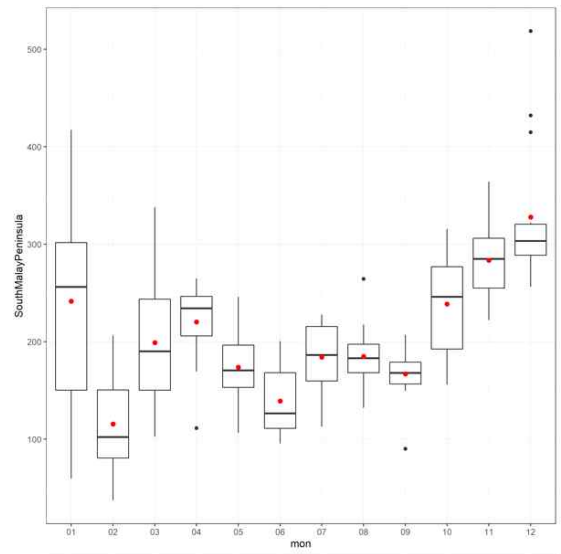
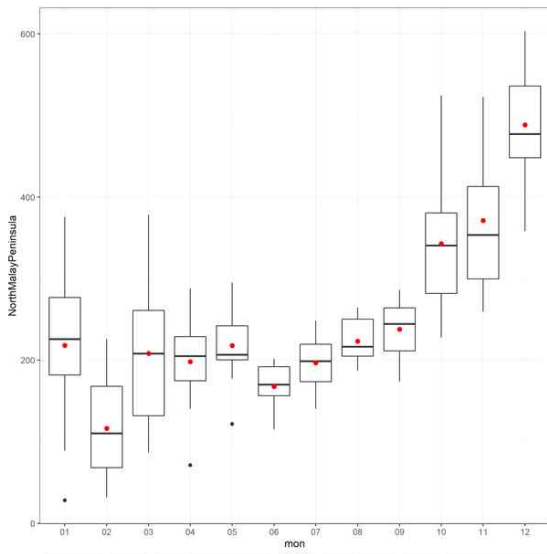


Figure 3.91. Climatology of CHIRPS for Malaysia

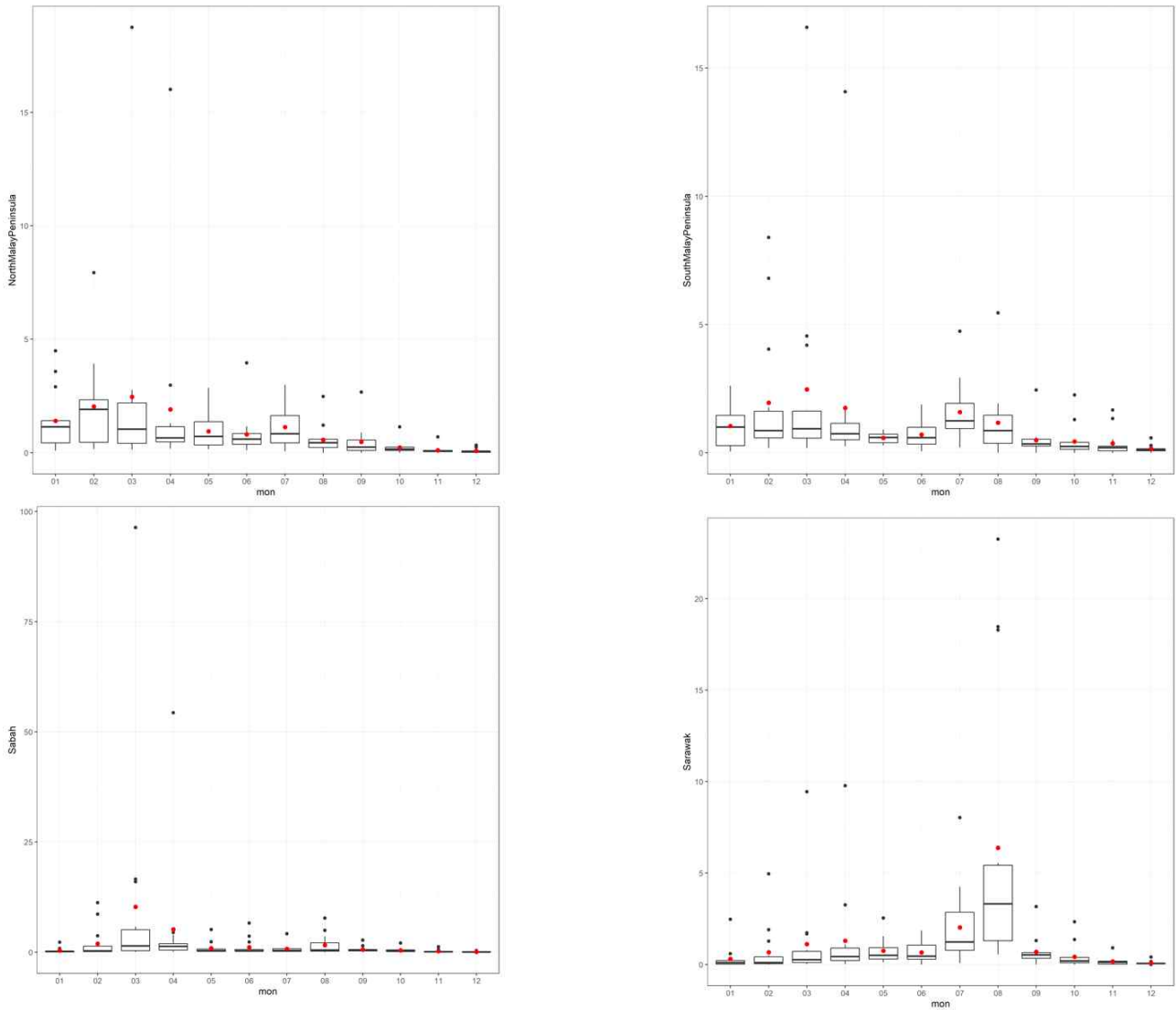


Figure 3.92. Climatology of GFED for Malaysia

3.4.2.5 말레이시아 산불예측시스템 프로그램 개발

산불예측시스템을 인도네시아와 말레이시아를 모두 현업서버에서 구동하기 위해서는 기존의 산불예측시스템을 개선할 필요가 있다. Figure 3.93은 산불예측시스템의 전체 흐름도를 보여주고 있다. 말레이시아 시스템의 적용을 하려면, 인도네시아의 시스템과 구분되어 작성될 필요가 있다. 해당시스템은 인도네시아의 산불예측시스템과 병렬로 구성되어 작성되었으나, 현업시스템의 편리한 구동을 위해서는 하나의 코드로 구동될 수 있도록 고려되었다. 산불예측시스템은 인도네시아의 경우 4월에서 7월까지 구동되고 말레이시아는 10월부터 차년도 1월까지 구동되기 때문에, 해당 월의 입력을 통해 인도네시아를 대상으로 하는 시스템과 말레이시아를 대상으로 하는 시스템을 구분하여 구동될 수 있도록 설계되었다.

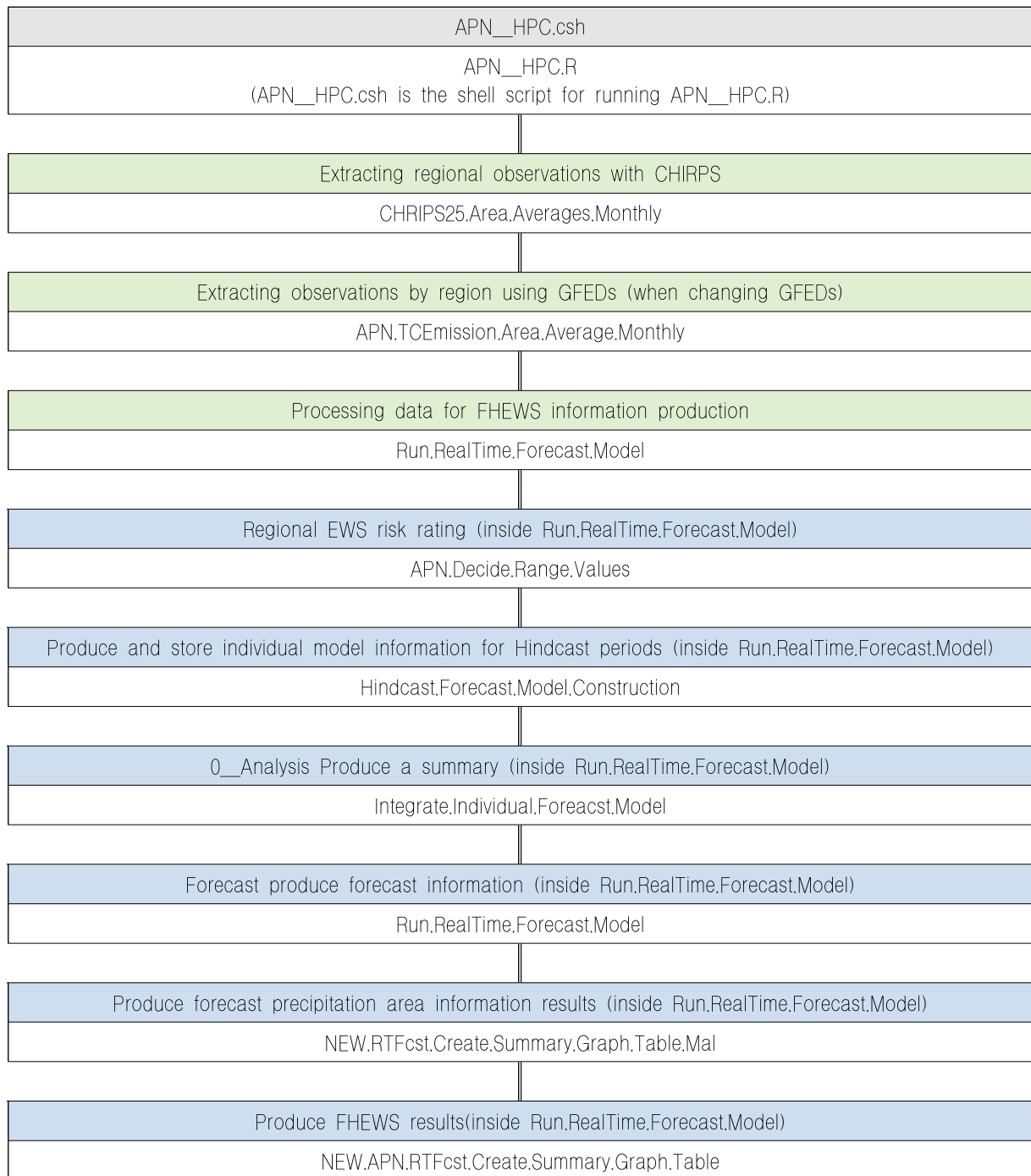
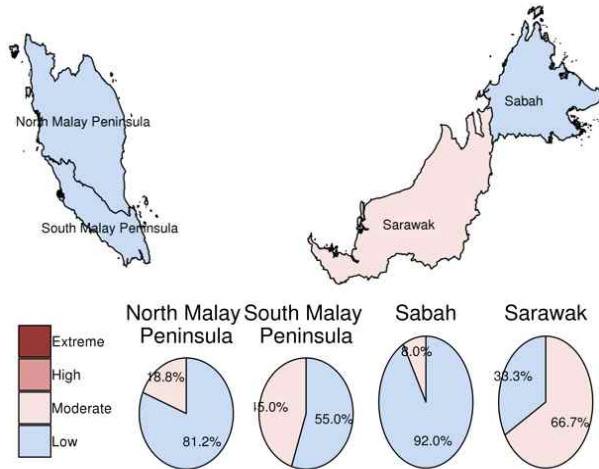


Figure 3.93. FHEWS operation system flow chart

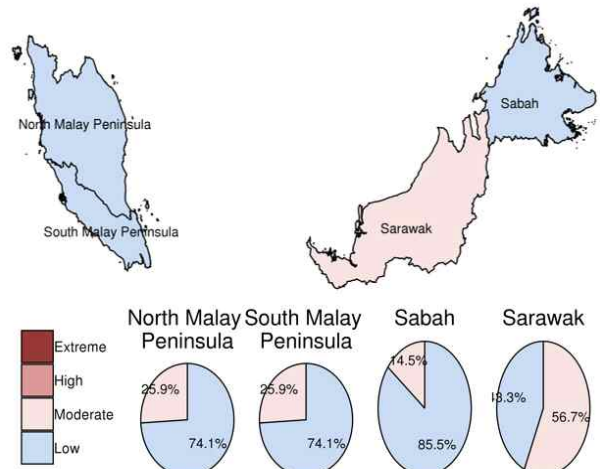
3.4.2.6 말레이시아 산불예측시스템 시범 운영 결과

말레이시아의 산불예측시스템의 시범운영은 2023년 2월부터 4월까지를 대상으로 생산한 결과를 2023년 10월 중순경부터 2024년 2월부터 4월을 대상으로 서비스를 하기위한 기간인 2023년 10월 20일 전까지 제공되었다. 해당 자료는 2022년 10월부터 2023년 1월까지 월 1회 생산한 결과를 홈페이지를 통해 생산하여 제공되었다. Figure 3.94부터 Figure 3.99는 말레이시아 지역의 시범운영을 위한 결과를 정리하여 보여주고 있다.

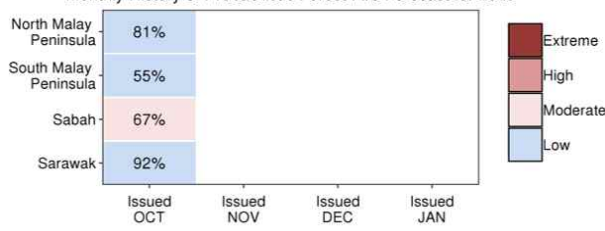
Probabilistic Forest Fire Forecast (issued : 2022-10) for 2023: FEB-MAY (%)



Probabilistic Forest Fire Forecast (issued : 2022-11) for 2023: FEB-MAY (%)

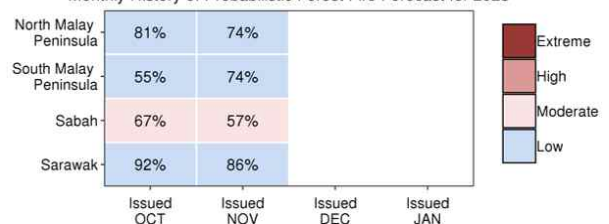


Monthly History of Probabilistic Forest Fire Forecast for 2023



Issued: 2022-10

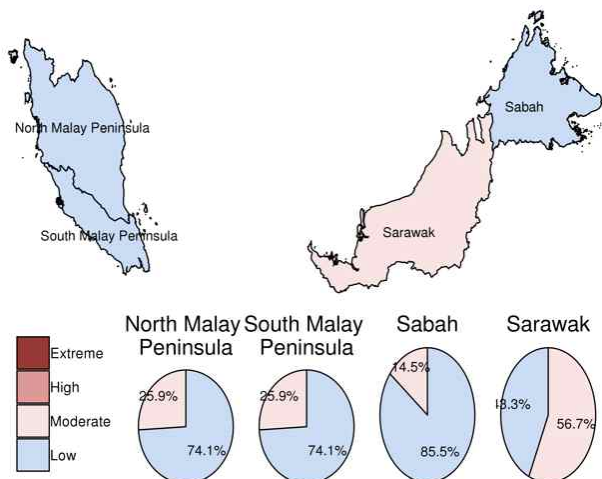
Monthly History of Probabilistic Forest Fire Forecast for 2023



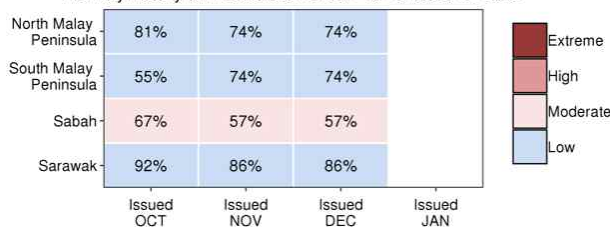
Issued: 2022-11

Figure 3.94. FHEWS Indonesia operation results I (Target: 2023 Feb-Apr)

Probabilistic Forest Fire Forecast (issued : 2022-12) for 2023: FEB-MAY (%)

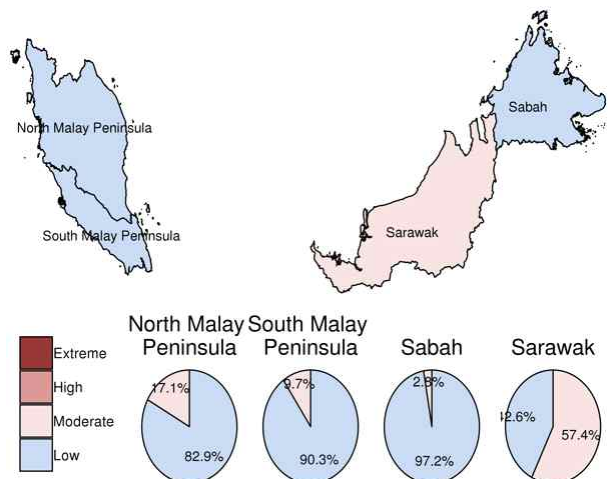


Monthly History of Probabilistic Forest Fire Forecast for 2023



Issued: 2022-12

Probabilistic Forest Fire Forecast (issued : 2023-01) for 2023: FEB-MAY (%)

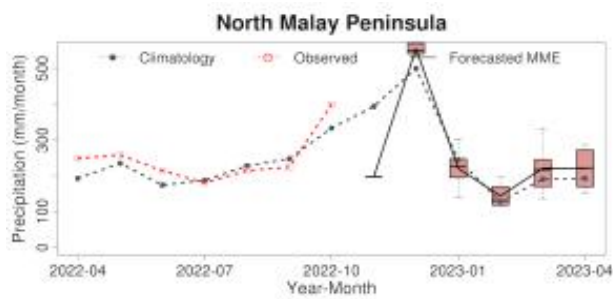


Monthly History of Probabilistic Forest Fire Forecast for 2023

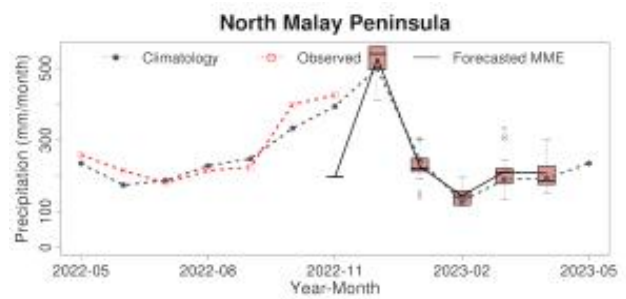


Issued: 2023-01

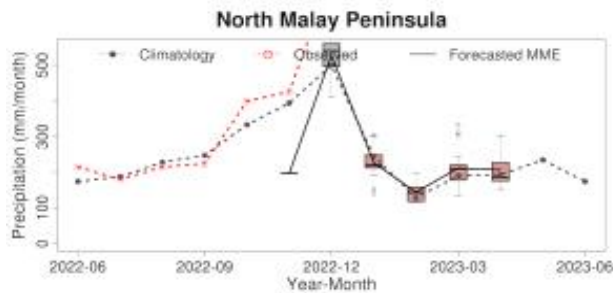
Figure 3.95. FHEWS Indonesia operation results II (Target: 2023 Feb-Apr)



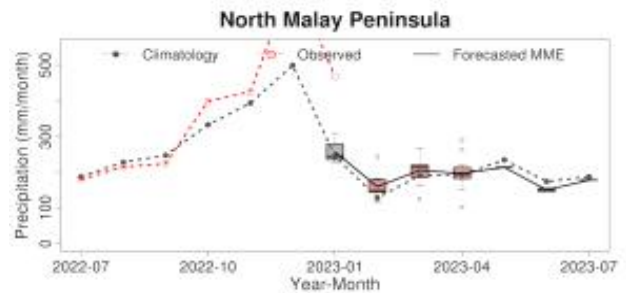
October 2022



November 2022

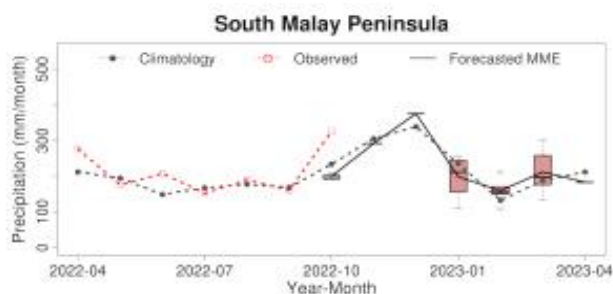


December 2022

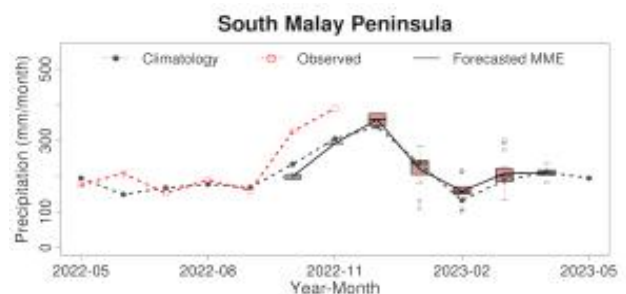


January 2023

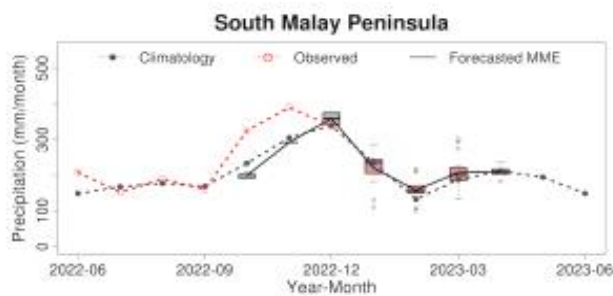
Figure 3.96. Forecasting of precipitation in NorthMalayPeninsula



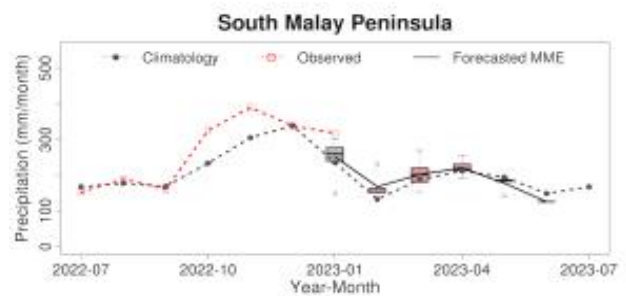
October 2022



November 2022



December 2022



January 2023

Figure 3.97. Forecasting of precipitation in SouthMalayPeninsula



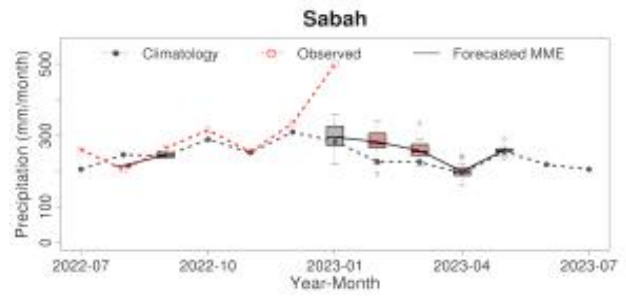
October 2022



November 2022

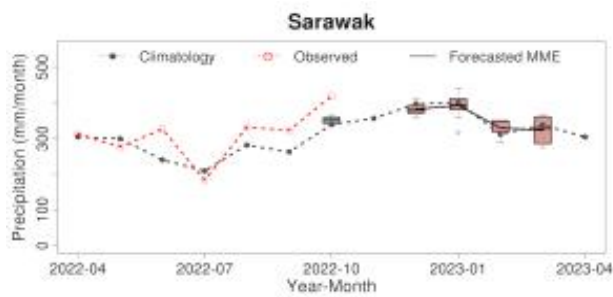


December 2022

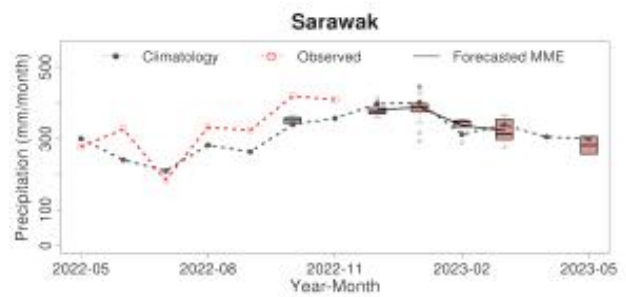


January 2023

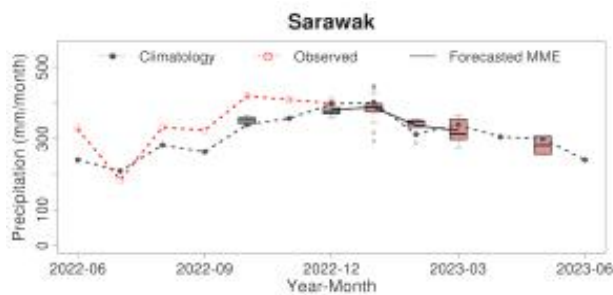
Figure 3.98. Forecasting of precipitation in Sabah



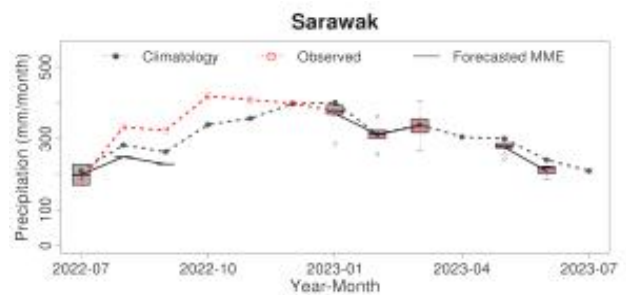
October 2022



November 2022



December 2022



January 2023

Figure 3.99. Forecasting of precipitation in Sarawak

3.4.3. 산불예측시스템 운영

3.4.3.1 산불예측시스템 홈페이지 개선

기존 산불예측시스템은 인도네시아를 대상으로 서비스하고 있었고, 다른 지역을 고려하고 홈페이지를 구성하고 있지 않았다. 따라서, 홈페이지의 탭이 하나로 이루어져서 ‘Applied Forecast’ 에 ‘APCC Fire and Haze EWS’ 로만 구성이 되어있었다. 지역별 정보제공을 위해서는 ‘Applied Forecast’ 의 하위 탭을 지역을 대상으로 구분할 수 있도록 설계하였다. 또한 공통적인 정보를 한눈에 확인하기 쉽도록 기본적인 정보를 설명하는 탭을 하나로 만들어서 보여질 수 있도록 하였다. 새롭게 설계된 홈페이지를 보면 ‘Applied Forecast’ 하위 항목으로 총 세 가지를 제공하고 있다. Figure 3.100은 기존의 하나의 탭으로 제공하고 있는 서비스에서 3개의 탭으로 구분되어 제공되는 결과를 보여주고 있다. 세부 내용을 보면 첫 번째로 ‘Introduction & Methodology’ 로 기본적인 자료제공 지역과 활용한 개별모델의 정보, 그리고 EWS를 위한 산출방법에 대해 설명하고 있다. 두 번째 ‘APCC Fire and Haze EWS (Indonesia)’ (Figure 3.101)는 기존의 제공중인 인도네시아 지역을 대상으로한 EWS관련 정보를 제공하고 있다. 세 번째 탭으로 ‘APCC Fire and Haze EWS (Malaysia)’ 로 새롭게 제공되는 말레이시아 지역의 정보를 제공하고 있다. Figure 3.101은 인도네시아와 말레이시아의 서비스 페이지를 보여주고 있다.

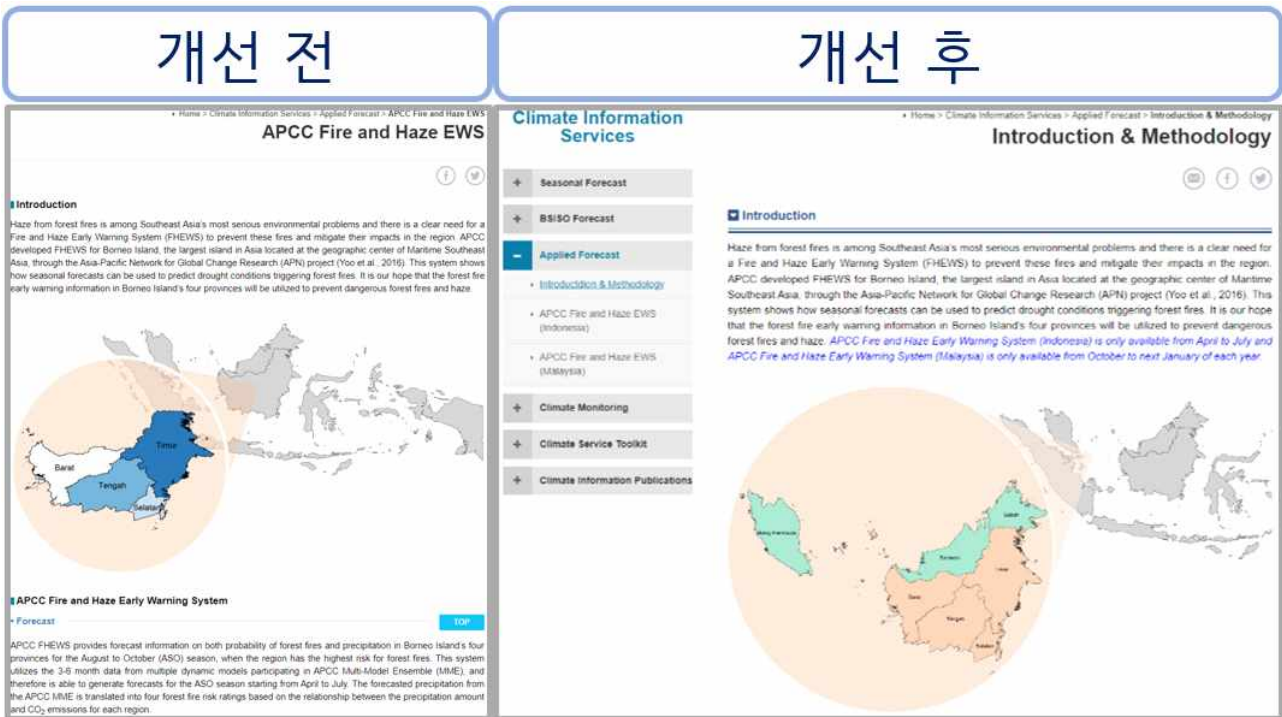


Figure 3.100. Homepage improvement results

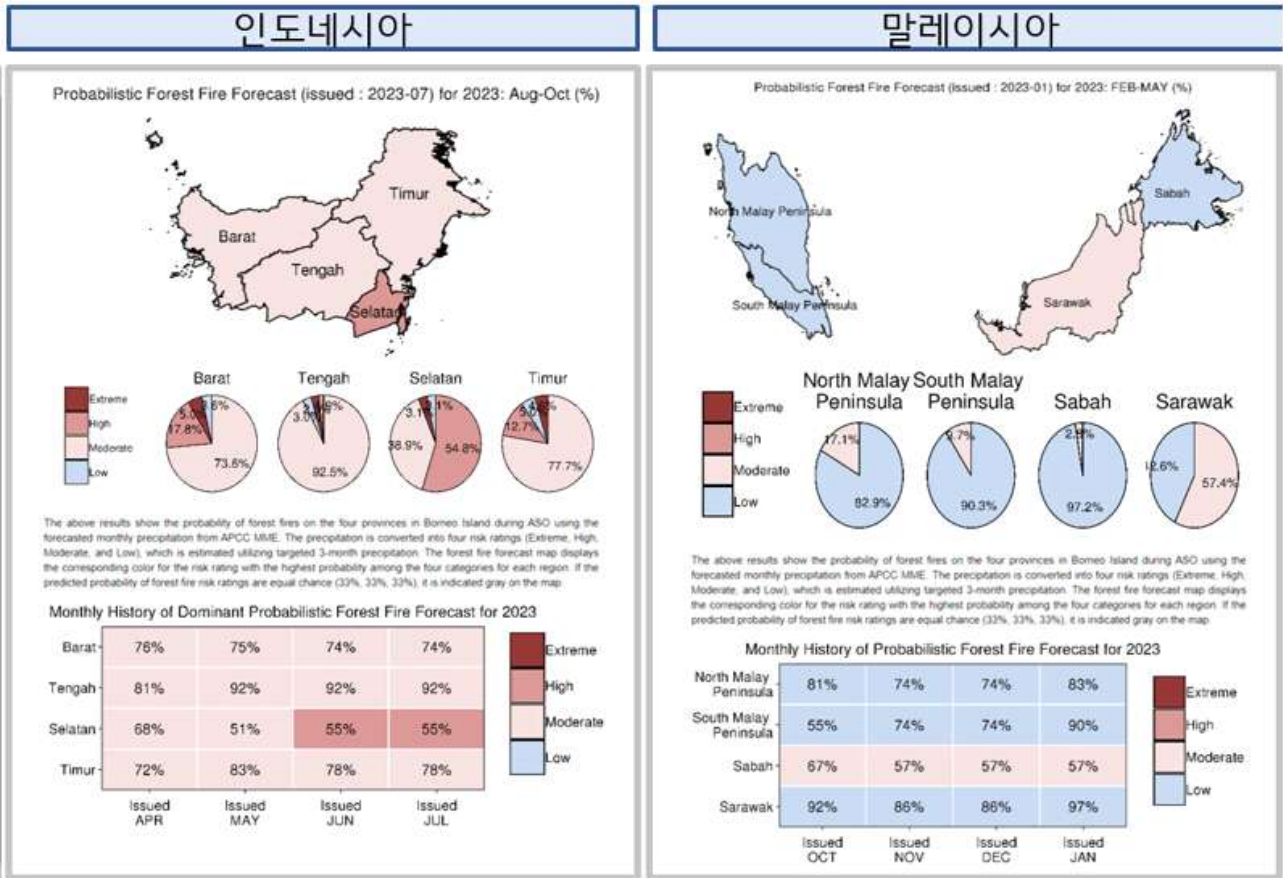
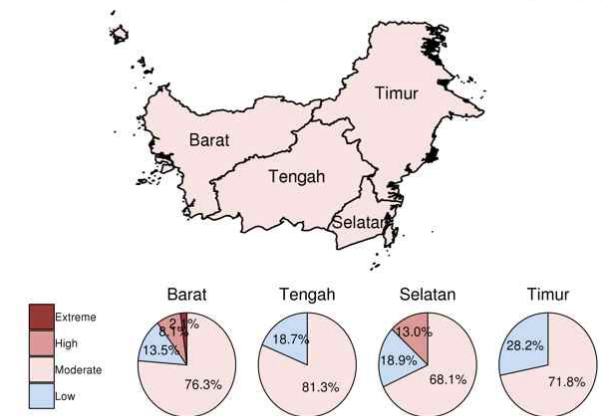


Figure 3.101. Homepage results for Indonesia and Malaysia

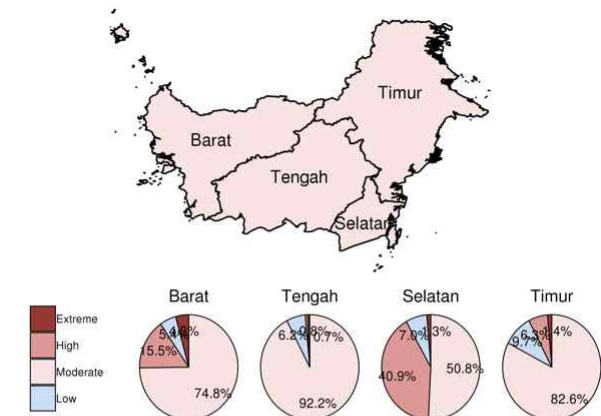
3.4.3.2 인도네시아 산불예측시스템 운영 결과

2023년 8월부터 10월을 대상으로 4월부터 제공한 APCC 산불예측서비스의 결과는 다음과 같다. 현재 엘니뇨의 영향으로 인도네시아의 강수량 예측이 매우 건조하게 나타나고 있으며, 이에 따라 인도네시아 지역의 산불예측 위험정보도 Moderate로 꾸준히 예측되고 있다. Selatan지역의 경우 6월과 7월의 경우 High로 높은 경보를 내고 있음을 알 수 있다. 이는 지역 별 강수량 예측분포를 보면, Selatan의 예측 강수량이 6월과 7월에 Climatology에 비해 매우 낮게 예측되어 High로 예보되는 것을 알 수 있다. Figure 3.102에서 Figure 2.107은 인도네시아 산불예측시스템의 현업운영 결과를 보여주고 있다.

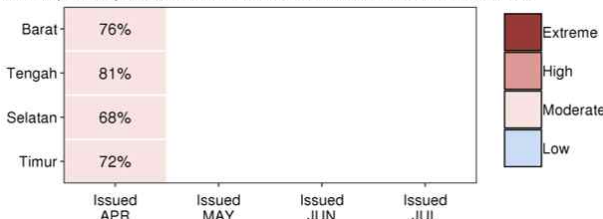
Probabilistic Forest Fire Forecast (issued : 2023-04) for 2023: Aug-Oct (%)



Probabilistic Forest Fire Forecast (issued : 2023-05) for 2023: Aug-Oct (%)

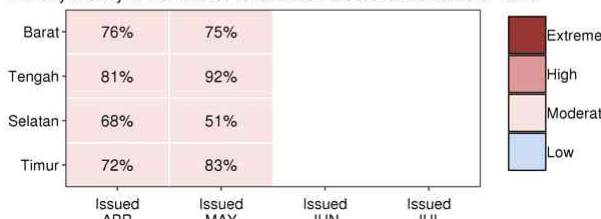


Monthly History of Dominant Probabilistic Forest Fire Forecast for 2023



Issued: 2023-04

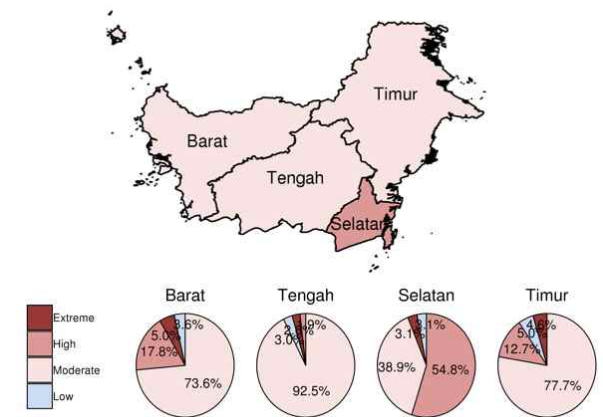
Monthly History of Dominant Probabilistic Forest Fire Forecast for 2023



Issued: 2023-05

Figure 3.102. FHEWS Indonesia operation results (April, May 2023)

Probabilistic Forest Fire Forecast (issued : 2023-06) for 2023: Aug-Oct (%)

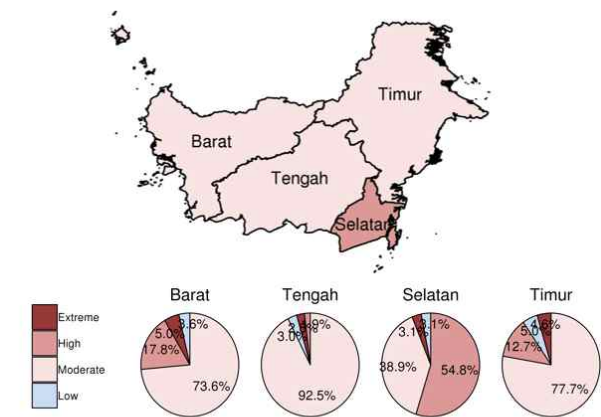


Monthly History of Dominant Probabilistic Forest Fire Forecast for 2023



Issued: 2023-06

Probabilistic Forest Fire Forecast (issued : 2023-07) for 2023: Aug-Oct (%)

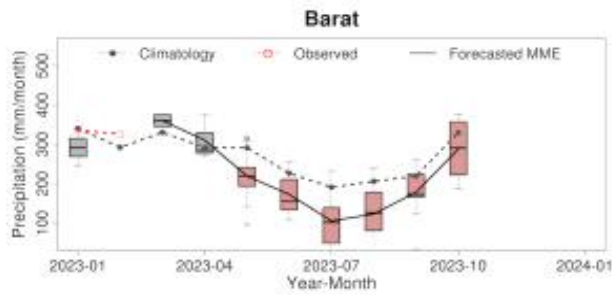


Monthly History of Dominant Probabilistic Forest Fire Forecast for 2023



Issued: 2023-07

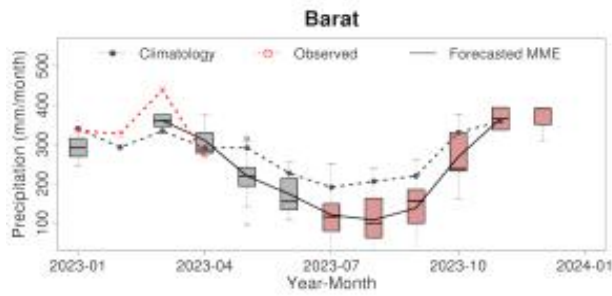
Figure 3.103. FHEWS Indonesia operation results (June, July 2023)



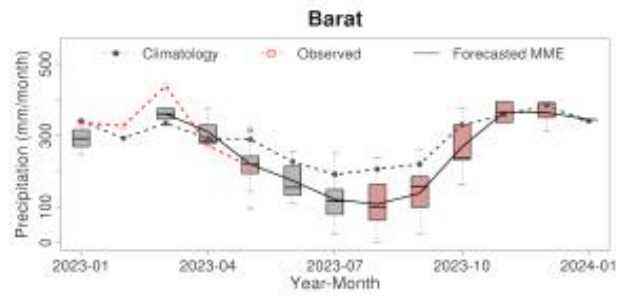
April 2023



May 2023

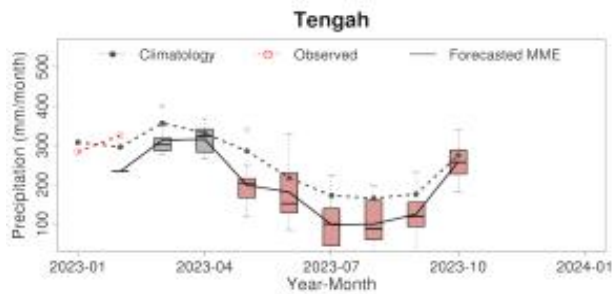


June 2023



July 2023

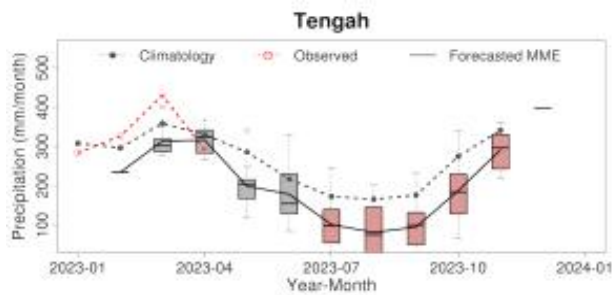
Figure 3.104. Forecasting of precipitation in Barat



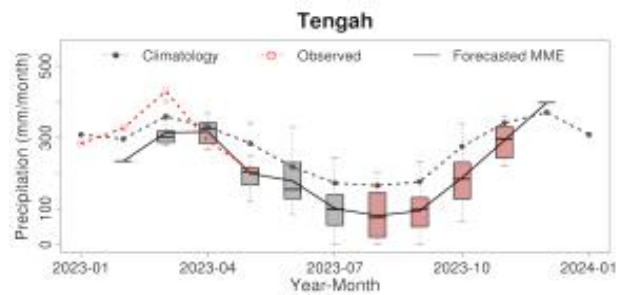
April 2023



May 2023

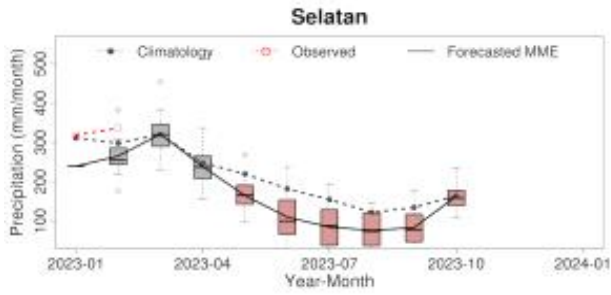


June 2023

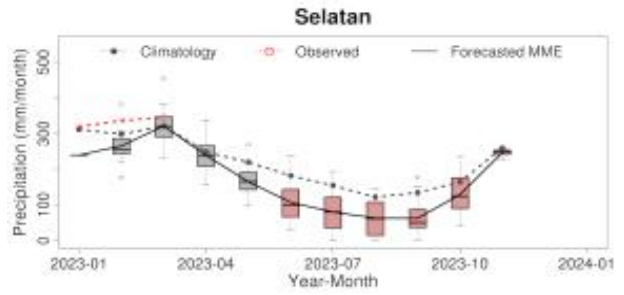


July 2023

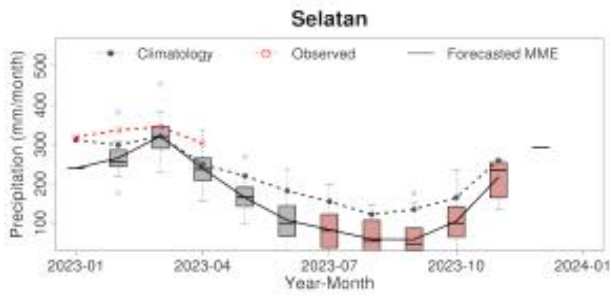
Figure 3.105. Forecasting of precipitation in Tengah



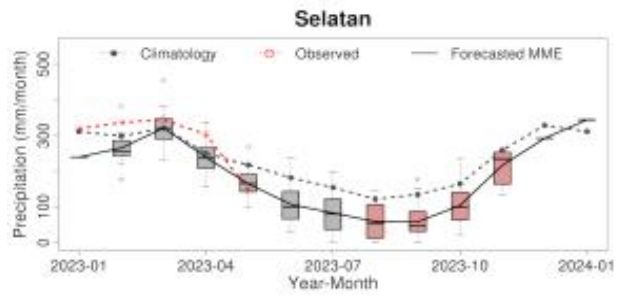
April 2023



May 2023

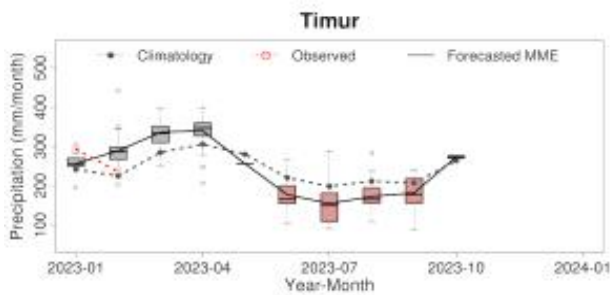


June 2023

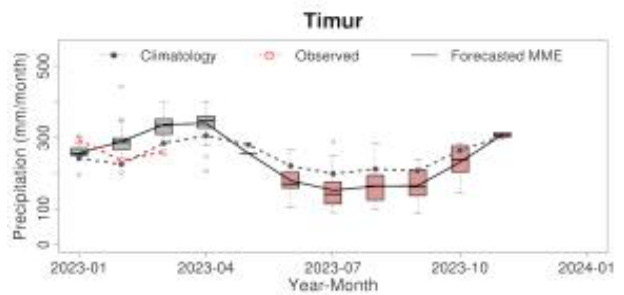


July 2023

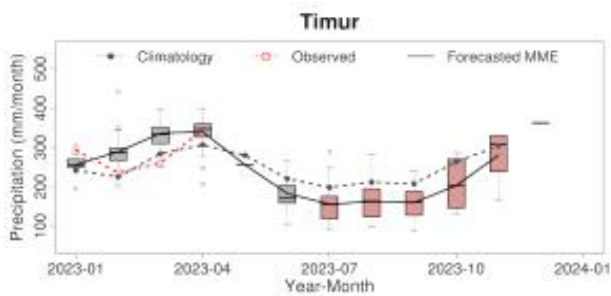
Figure 3.106. Forecasting of precipitation in Selatan



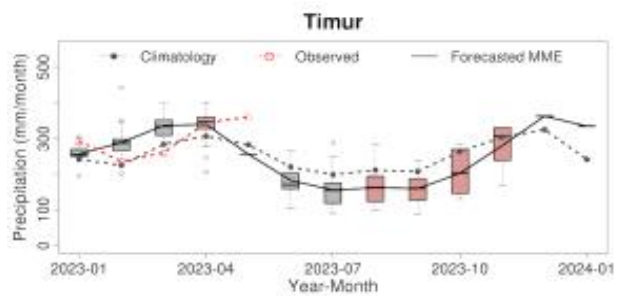
April 2023



May 2023



June 2023



July 2023

Figure 3.107. Forecasting of precipitation in Timur

3.4.3.2 말레이시아 산불예측시스템 운영 결과

말레이시아의 산불예측시스템을 통해 생산된 2023년의 10월 예측정보는 다음과 같다. 2월에서 4월동안 예측되는 강수량의 정보를 조합하여 누적 강수량을 산출하여 위험정보를 제공하는데, Sarawak의 경우 Climatology와 유사하게 예측이 되어 위험등급이 Low로 나타나는 것으로 보여진다. 다른 지역의 경우 Climatology보다 낮게 예측되는 월의 정보다 많기 때문에 누적 강우가 낮아지는 경우 발생하면서 Moderate로 예측되고 있음을 알 수 있다. Figure 3.108은 말레이시아의 2023년 10월 예측정보를 보여주고 있다.

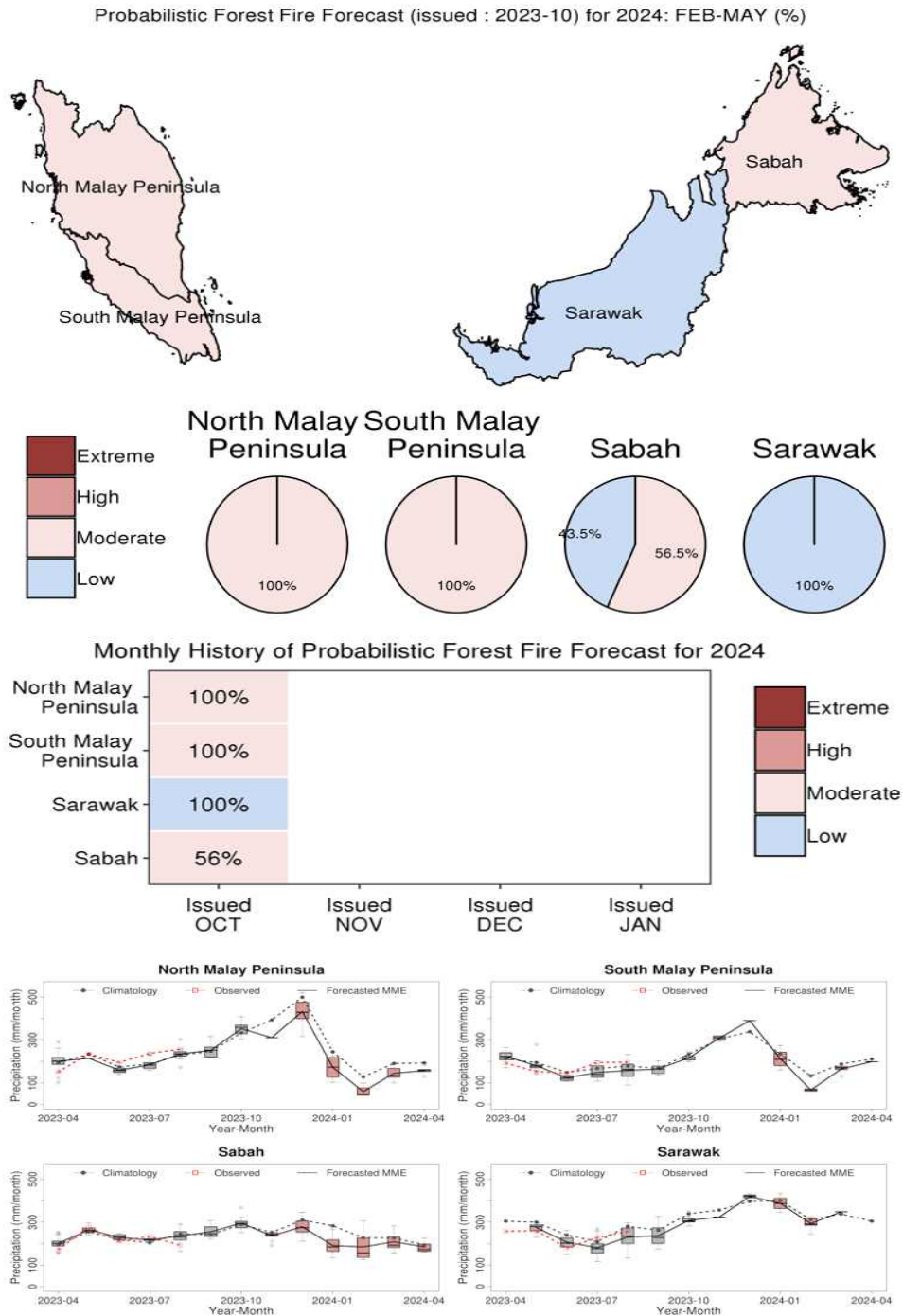


Figure 3.108. Malaysia FHEWS result (Issued: 2023-10)

3.5. 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현

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

APCC MME 계절예측 정보를 보다 이해하기 쉽고 편리하게 이용할 수 있도록 동적 기후정보 웹 콘텐츠를 제공하고자 하며, 이를 구현할 수 있는 신규 홈페이지 개발과 더불어 동적 기후정보 웹 콘텐츠를 생산하기 위한 체계 구축이 필요함에 따라 동적 기후정보 웹 콘텐츠별 디지털 자료 생산 체계를 구축하였다.

주요 동적 기후정보 웹 콘텐츠는 MME 기법별 예측장, 참여모델별 예측장, 기후전망 요약맵, 기후 감시 지수, 기후 감시 분석장이다. 여기서 기후감시 지수와 분석장은 기존의 관측자료를 그대로 사용하게 되며, 나머지 MME 기법별 예측장, 참여모델별 예측장, 기후전망 요약맵을 위한 디지털 자료를 재생산 하였다.

MME 기법별 예측장은 2.5.1 절에서 소개한 내용처럼 MME forecast 및 hindcast 자료가 필요하며, 이미 기존 AFS 및 정적 기후정보 생산 체계에서 해당 디지털 자료를 이미 생산 및 활용하고 있기에 기존 시스템에서 산출되는 예측 자료의 분배 및 취합 과정 등 재구축하는 체계를 구축하였다. 해당 체계는 쉘 스크립트 형식의 단순 프로그램으로 구성되어 있으며, 아래와 같이 재구축하고자 하는 시간(연, 월, 계절) 정보 및 변수, MME 기법을 입력하면 설정한 경로로 MME 예측자료를 동적 홈페이지 DB에서 읽어들이는 구조로 재배치하여 자료를 복사하고, hindcast 자료의 경우 연도별로 자료가 분리되어 있음에 따라 CDO(Climate Data Operator) 소프트웨어를 사용하여 한 파일로 시간순으로 합치는(merge) 과정을 포함하였다.

```
- 시스템 경로: ${AFS}/RUN/DYNAMIC_HOMEPAGE/MME/  
- 메인 프로그램: MME_merge.sh  
  
SYEAR=2023  
EYEAR=2023  
  
MONTH=( JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT )  
SEAS1=( JFM FMA MAM AMJ MJJ JJA JAS ASO SON OND )  
SEAS2=( AMJ MJJ JJA JAS ASO SON OND NDJ DJF JFM )  
  
VAR=( t2m prec sst t850 z500 slp )  
MODEL=( SCM GAUS )  
  
nd=0  
  
while [ $nd -le 1 ];do
```

(중략)

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

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

(생략)

본 프로그램을 실행하면 사용자가 지정한 경로에 설정한 예측 기간, 변수, MME 기법별 자료가 재구축되어 동적 홈페이지 DB 체계로 전달이 바로 가능하다.

참여모델별 예측장에 대한 동적 기후정보 콘텐츠는 2.5.1 절에서와 같이 MME 참여모델에 대한 3/6개월 실시간 단정예측(편차값; anomaly) 및 확률예측 정보를 전 지구 규모의 공간 분포와 함께 hindcast 기간의 시계열 정보를 표출하며, 이를 위해 참여모델별 anomaly 기반의 단정예측과 확률예측의 forecast 및 hindcast 자료가 필요하다. 또한 기존 정적 기후정보 생산 체계에서 별도의 디지털 자료를 생산하고 있지 않기 때문에 참여모델별 anomaly 단정예측 자료를 산출하는 시스템과 참여모델별 확률자료를 산출하는 시스템을 구축하였다. 먼저 개별모델 anomaly 단정예측 자료 산출 시스템은 메인 프로그램인 셸 스크립트와 소스 프로그램인 NCL 코드로 구성되어 있으며, NCL에서 anomaly를 연산하는 과정을 포함되어 있다. 아래와 같이 메인 프로그램을 통해 처리하고자 하는 모델, 예측 시간, 계절명, hindcast 시작해 및 종료해, 예측 lead-time 6개월 이상 여부를 입력하면 소스 프로그램인 NCL이 해당 정보를 받아 사용자가 설정한 경로에 각 모델별 forecast 및 hindcast anomaly 자료를 산출한다.

- 시스템 경로: \${AFS}/RUN/Manage_Model_Anomaly/
- 메인 프로그램: 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: model_anom.sh 내용>

```
MODEL=( APCC_SCOPS BCC_CSM1.1M BOM_ACCESS-S2 CMCC_SPS3.5 CWB_TCWB1Tv1.1  
ECCC_CANSIPsv2.1 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_MGOAM-2  
)  
MONTH=NOV  
FSEAS1=NDJ
```

FSEAS2=FMA

YEAR=2022

SYEAR=(1991 1991 1993 1993 1991 1991 1991 1991 1993 1993 1991 1991 1991 1993 1979)

EYEAR=(2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2010 2004)

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

(생략)

최종산출물 경로는 소스 프로그램인 NCL 파일에서 아래와 같은 경로를 수정하여 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 anomaly 예측 자료가 산출되며, 산출된 디렉터리 경로 구조는 동적 홈페이지 DB 체계로 전달이 바로 가능하다.

다음은 개별모델 확률예측 자료 산출 시스템이다. 본 시스템은 기존 정적 기후정보 생산 체계에서 개별모델 forecast 확률예측 디지털 자료를 생산하고 있으므로 해당 시스템을 이용하여 개별모델 hindcast 확률예측 디지털 자료 생산 체계를 구축하였다. 시스템 구성은 메인 프로그램인 python과 yaml로 구성되어 있으며, AFS 시스템 내 확률 예측프로그램과 유사한 모듈 프로그램을 package로 하여 처리 과정에서 활용된다. 또한, 확률값 연산을 위해 fortran 프로그램을 사용하며 이를 so 파일로 변환하여 모듈로써 활용된다. 프로그램 구성은 아래와 같다.

```

- 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_syear  : 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 3.109는 기후전망 요약맵의 동적 웹 콘텐츠에 사용되는 14개 지역별 자료에 대한 설명을 나타낸다.

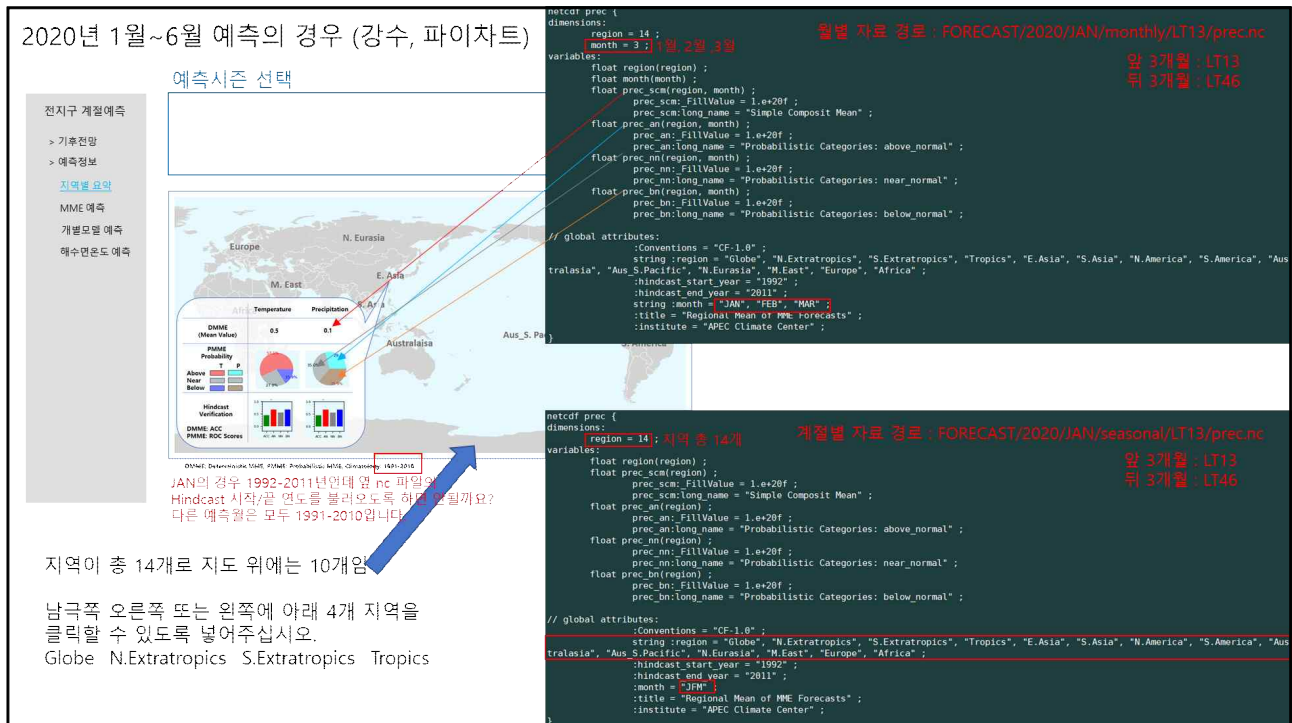


Figure 3.109. Explanation of input data for climate outlook summary.

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 3.110은 기존 홈페이지의 기후예측 정보 콘텐츠 예시를 나타내고 Figure 3.111은 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 사인드양에 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
 온 85% 이상일 것으로
 것으로 전망됨.
 20° 중앙 태평양, 열대

기후지수

온순 지수
150°W-90°W
160°E-150°W
엔위료
2013 - Oct 2023

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 사인드양에 이르는 지역의 강수는 평년보다 많을 확률이 매우 클 것으로 전망됨. 북극, 유라시아, 남아메리카 남부의 강수는 평년보다 많을 확률이 전망됨.

Figure 3.110. Example of climate forecast web contents in current homepage.

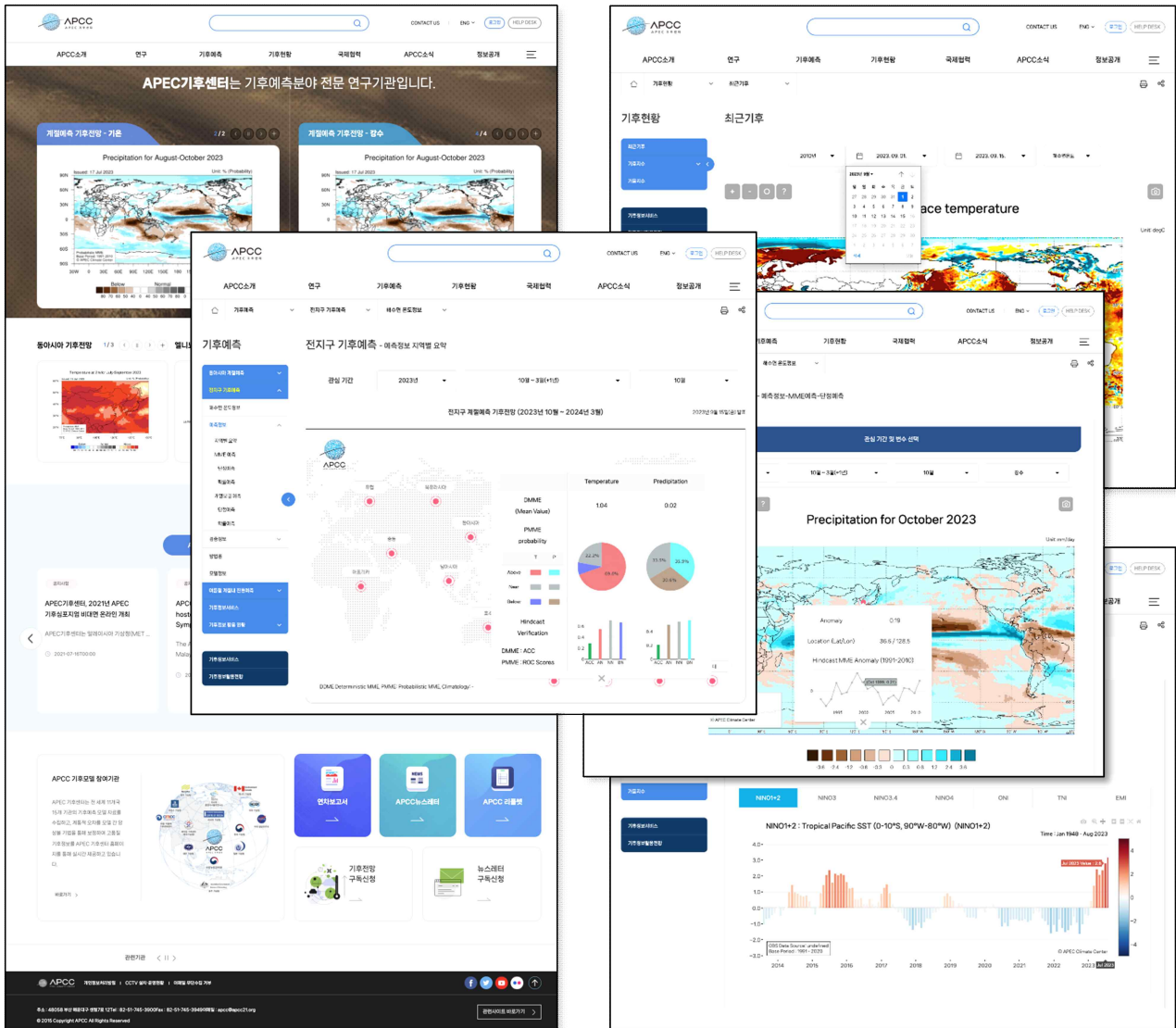


Figure 3.111. Example of climate forecast web contents in new homepage.

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

최근 전지구 온난화는 기온(2-m)의 지구 평균 시계열을 통해 확인할 수 있다(Figure 3.11 2). 관측, 모델 예측 모두 각각의 기후 평균값을 제거한 아노말리이고 최근 온난화를 보여주는 데 2000년대 들어서는 대부분 평균 이상의 값을 보여준다. 관측에서는 2015-2016 엘니뇨에 크게 기온이 높았고 이후 2021-2022 라니냐 시기에 기온이 상대적으로 낮아지긴 하였지만 여전히 그 이전 기후 시기(1991-2010)에 비해서는 온난하다. 모델 예측은 hindcast 시기는 상대적으로 관측의 변동성을 잘 모사하지만 real-time forecast 시기(2013 이후) 전체적으로 기온의 변동성은 모사하지 못하고 온난하게 예측하긴 하지만 전반적으로 전구 기준에서는 계절예측모델의 기온 예측은 실제의 경향을 준수하게 모사하는 것으로 판단된다.

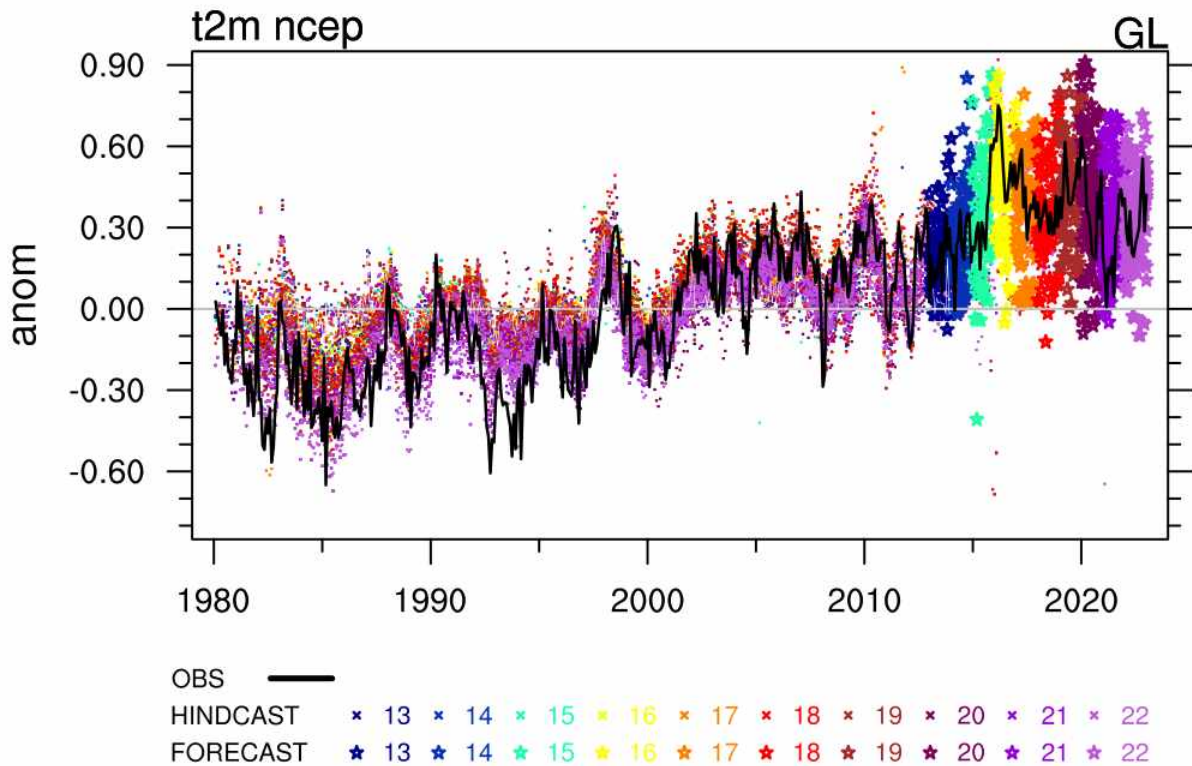


Figure 3.112. Global mean temperature at 2-meter anomaly time series of individual model hindcast (colored little x), real-time forecast (colored large star); and NCEP observation (black solid line). Colored symbols present all individual model forecast 1980-2022. Model forecast anomalies are deviation from each hindcast period of issued time and observation anomalies are deviation from climatology 1991-2010.

반면 동아시아 지역의 시계열(Figure 3.113)은 이와 다른 양상을 보인다. 관측 시계열은 2013년 이후 실시간예측 기간 평균이 0.24°C 로 기후기간에 비해 높긴 하지만 온난화가 전구에 비해 뚜렷하지 않으며 1980-2022 기간 표준편차가 0.64 로 변동성이 크다. 모델의 2013년 이후 실시간 예측 기간 평균은 0.39C 로 관측에 비해 온난화가 크고 대부분 개별 모델이 평년 이상의 기온을 예측한다. 하지만 모델 예측의 표준편차는 0.32 로, 실제에 비해 작다. 즉, 모델은 기온의 변동성은 작게 모의하는데, 실시간 예측기간에는 대부분 평년보다 온난하게 예측한다. 이는 계절예측모델이 전구에서는 기온을 예측하는데 합리적이지만 지역별로, 특히 동아시아 지역에서는 기온 예측에 후보정이 필요하다는 것을 의미한다.

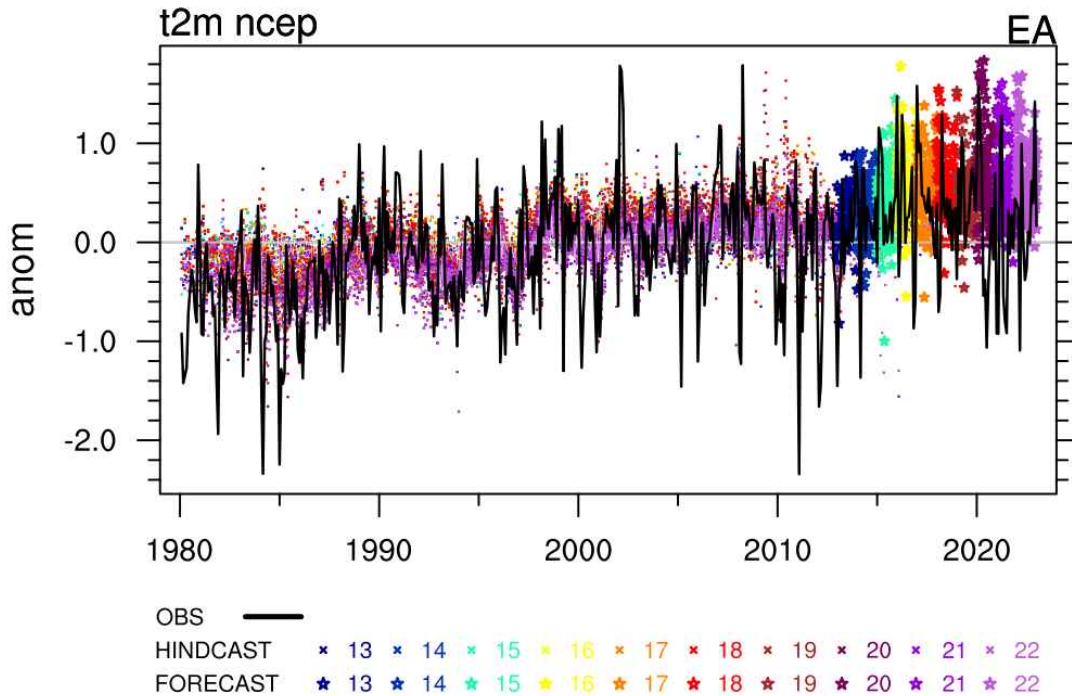


Figure 3.113. Same time series as in Figure 3.112. but spatially averaged for East Asia [10°N - 65°N , 70°E - 155°E].

본 연구에서는 동아시아 지역 기온 예측을 위해 선형추세 보정기법과 분위사상기법을 적용하였다. 선형추세 보정기법은 격자별로 hindcast와 관측자료의 선형추세를 계산하여 이를 보정하고, 이를 실시간예측에 적용하여 기온을 보정하는 방법이다. 한 예로, 2021년 5월 동아시아 한 격자(30N , 90E), 한 개별모델(APCC SCOPS)에 대해 시계열과 예측값, 보정된 예측값을 Figure 3.114에 표현하였다. 여기서 표현되는 시계열과 예측값은 모두 관측과 모델의 평균을 제거하고, 표준편차로 나누어 표준화된 아노말리인데, 이것은 모델과 관측자료의 평균과 표준편차가 차이가 커 이를 비교하기 위해서는 표준화하여 통계적 특성을 맞출 필요가 있기 때문이다.

Figure 3.114의 격자에서는 관측 자료에서 작지만 우하향 추세(주황색)가 보이는 반면 모델 hindcast에서는 (1991-2013) 우상향 추세(검은색)가 보인다. 이는 실제로는 이 지역에서 온난화가 나타나지 않았지만, 모델은 온난화 현상을 모의하는 것을 의미한다. 다중모델에서 hindcast 기간은 1991-2010이지만, 본 연구에서는 최대한 개별모델의 hindcast를 활용하기 위해 가지고 있는 hindcast 가장 긴 기간을 적용하였다. 모델 자료는 2013년까지 있지만, 좀 더 최근 기후 변동성을 고려하기 위해 관측 자료는 최대한 활용하여 2013-2020 기간의 선형추세(빨간색)를 적용하였다. 모델의 선형추세를 \hat{m} , 관측의 선형추세를 \hat{o} 로 하였을 때 보정되는 예측값은 원래의 예측값에서 모델의 선형추세를 제거하고 관측의 선형추세로 더하여 보정된 선형추세(α)를 시간에 곱하여 보정된 상수(c)를 더한 값이다(Eq. [3.3], [3.4]).

$$\alpha = -\hat{m} + \hat{o}, \quad \text{unit} = C/yr \quad [3.3]$$

$$F = F + [\alpha \times (\Delta \text{years})/2] \times \sigma_m = F + \alpha n \times \sigma_m = F + c \quad [3.4]$$

이러한 과정을 통해 실제보다 온난한 모델의 예측 경향이 음의 방향으로 보정이 된 것을 확인할 수 있다(보라색 asterisk). 여기서 계산한 값들은 표준화된 아노말리이기에, 실제 보정된 아노말리는 여기에 모델의 표준편차(σ_m)를 곱해주게 된다.

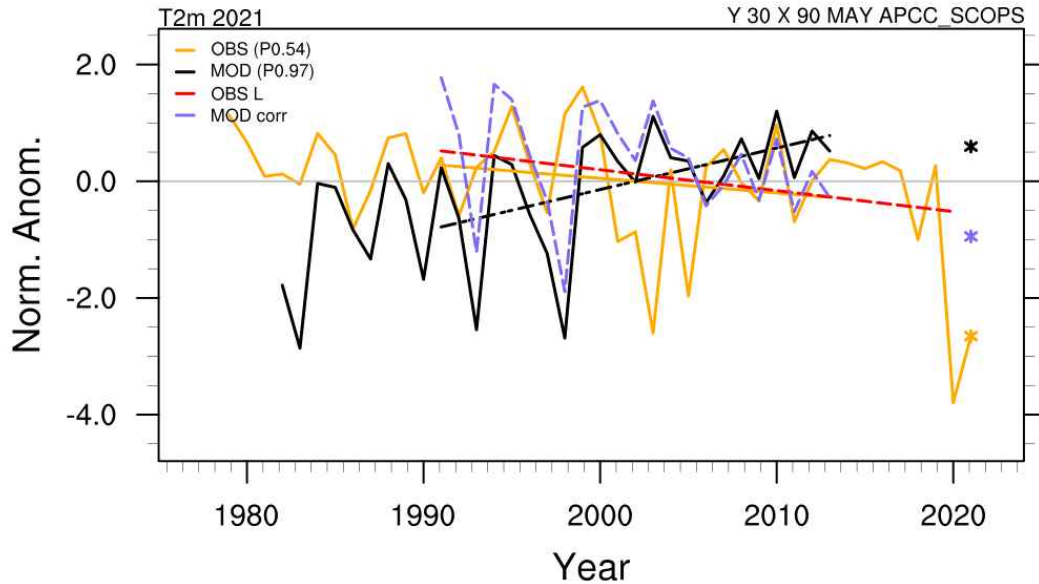


Figure 3.114. Time series of normalized anomalies of 2-m temperature from observation (orange, 1980-2021) and a individual model hindcast (black, APCC SCOPS, 1982-2013), and forecast of 2021 MAY (black asterisk) for one grid point (30° N, 90° E) in East Asia. Linear trend of model hindcast (black) from 1991-2013 (the longest period of individual model from 1991) is upward right but for observation (orange) is downward right. The linear trend for the longer period observation (red, 1991-2020) is more downward right. Modified linear trend of model and forecast are colored as purple.

동아시아 지역은 대체적으로 모델이 실제보다 온난한 추세를 나타내고 있으므로 여러 격자에서 이와 같은 선형추세 보정을 반복하여도(Figure 3.115) 마찬가지로 예측값은 음의 방향으로 보정이 된 것을 확인할 수 있다. 다만, Figure 3.115에서 보이는 격자에서는 관측에서도 약한 우상향의 추세(빨간색)가 보이지만, 이는 모델에서의 우상향의 추세(검은색)보다는 약하기에 보정된 예측값은 음의 방향으로 수정되었다.

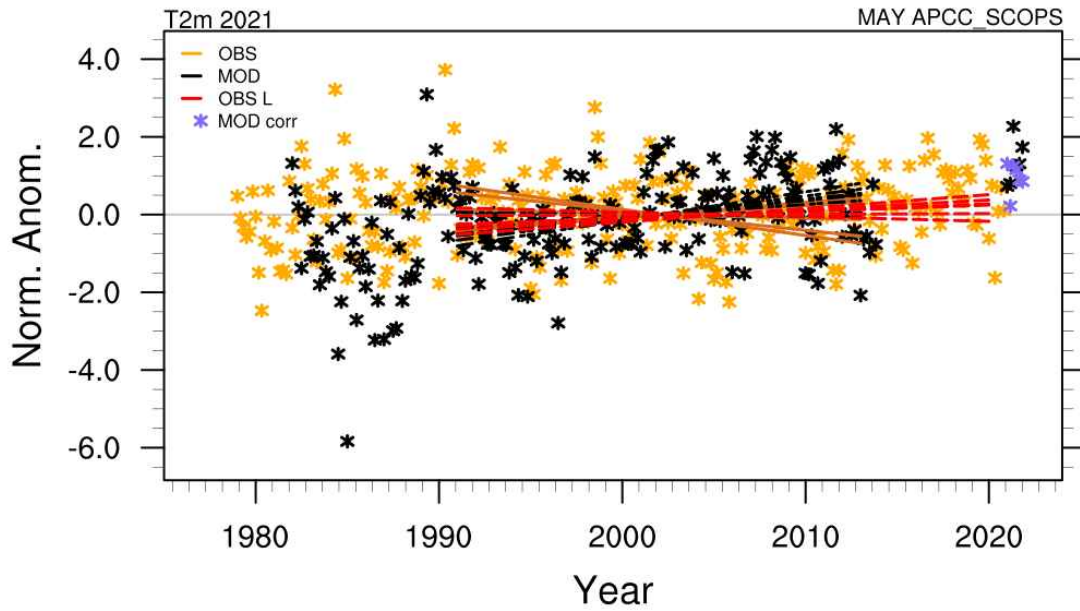


Figure 3.115. Time series of observation and a individual model hindcast (black, APCC SCOPS) with one-month-lead forecast at 2021 MAY (black asterisk) for multi-grids [40° N-120° E, 50° N-120° E, 55° N-130° E, 35° N-130° E, 40° N-140° E, 50° N-140° E] in East Asia. Similar with Figure 3.114.

Figure 3.116은 선형추세 보정을 이용하여 수정된 예측 아노말리를 동아시아 영역에서 보여준다. 보정된 예측값(a)는 원래의 예측값(b)에 대체로 음의 값이 더해진다(c). 따라서 2021년 5월을 예측한 모델의 과거 선형추세(hindcast)는 실제보다 온난하게 예측되었고, 이를 실제와 유사하게 맞춘 결과가 (a)라고 이해할 수 있다. 다만, 실제 동아시아 2021년 5월 관측 기온(Figure 3.117)은 상당히 추웠는데, 보정된 기온은 이보다는 온난하다.

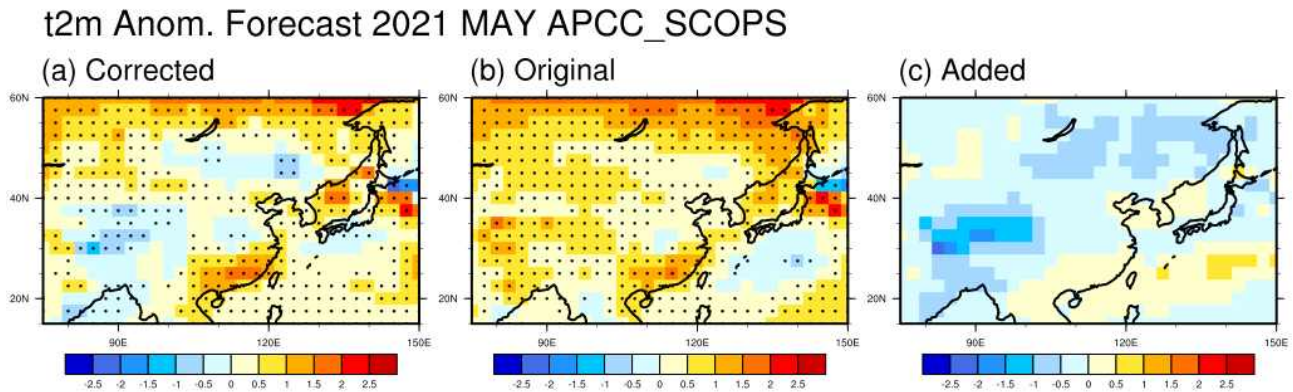


Figure 3.116. (a) Corrected forecast and (b) original forecast 2-m anomalies at 2021 May (dot: over $\pm 0.43\sigma$) by linear trend correction method. (c) added spatial pattern for correction ($a = b + c$). APCC SCOPS 1-month-lead forecast is used.

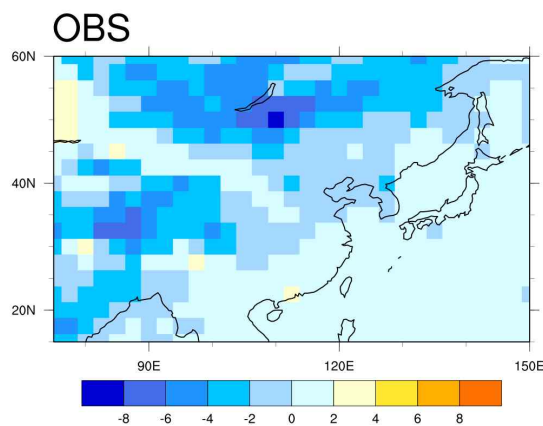


Figure 3.117. NCEP observation anomalies of 2-m temperature at May, 2021 (climate:1991-2010).

Figure 3.116이 하나의 모델, APCC SCOPS에 관한 것이었다면, Figure 3.118은 SCM MME에 관한 것이다. SCM에서도 원래의 예측 패턴은 온난한데, 이를 보정한 예측 패턴은 이보다는 음의 방향으로 수정된 것을 볼 수 있다. 다시 말해, 대다수의 모델이 온난화를 실제보다 강하게 예측하였고, 이를 음의 방향으로 수정한 것을 의미한다. 2021년 5월 관측(Figure 3.117)과 비교해보면, 원래의 예측 패턴은 관측에 비해 매우 온난하지만, 수정된 예측 패턴은 그나마 동아시아 $120^{\circ}E$ 이하 서부 육지 지역에서는 음의 아노말리를 예측하였다. 하지만 한반도를 포함한 동부 지역에서는 보정이 거의 되지 않았다.

t2m Anom. Forecast 2021 MAY scm

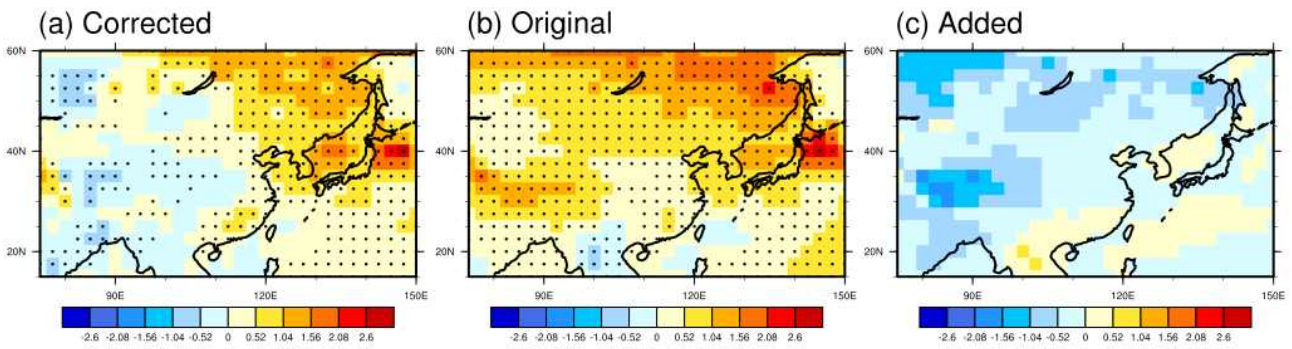


Figure 3.118. Same as Figure 3.116. but for SCM MME at 2021 May (dot: over $\pm 0.43\sigma$).

기온의 선형추세 보정은 실시간 예측 2013년부터 2022년까지 매월 수행하였고, 얼마나 보정되었는지 보일 수 있는 보정 상수 c (same as in Eq. [3.4] and Figure 3.118c)를 다음의 Figure 3.119에 월별로 나타내었는데 이는 10년 보정 상수를 평균한 패턴이다. 2021년 5월에도 대부분 동아시아 지역에서는 음의 보정 상수를 보였는데, 10년 평균에서도 5월 보정 상수는 음의 값을 보인다. 다른 달에도 대부분 음의 값을 보이는데, 다만, 3, 4월에는 북부 육지 일부 지역에서 양의 값을 보인다. 월별로 비교했을 때는 5월에 가장 크게 보정되었고, 3월은 남북간의 편차가 크지만 공간 평균적으로는 보정 정도가 미미하다.

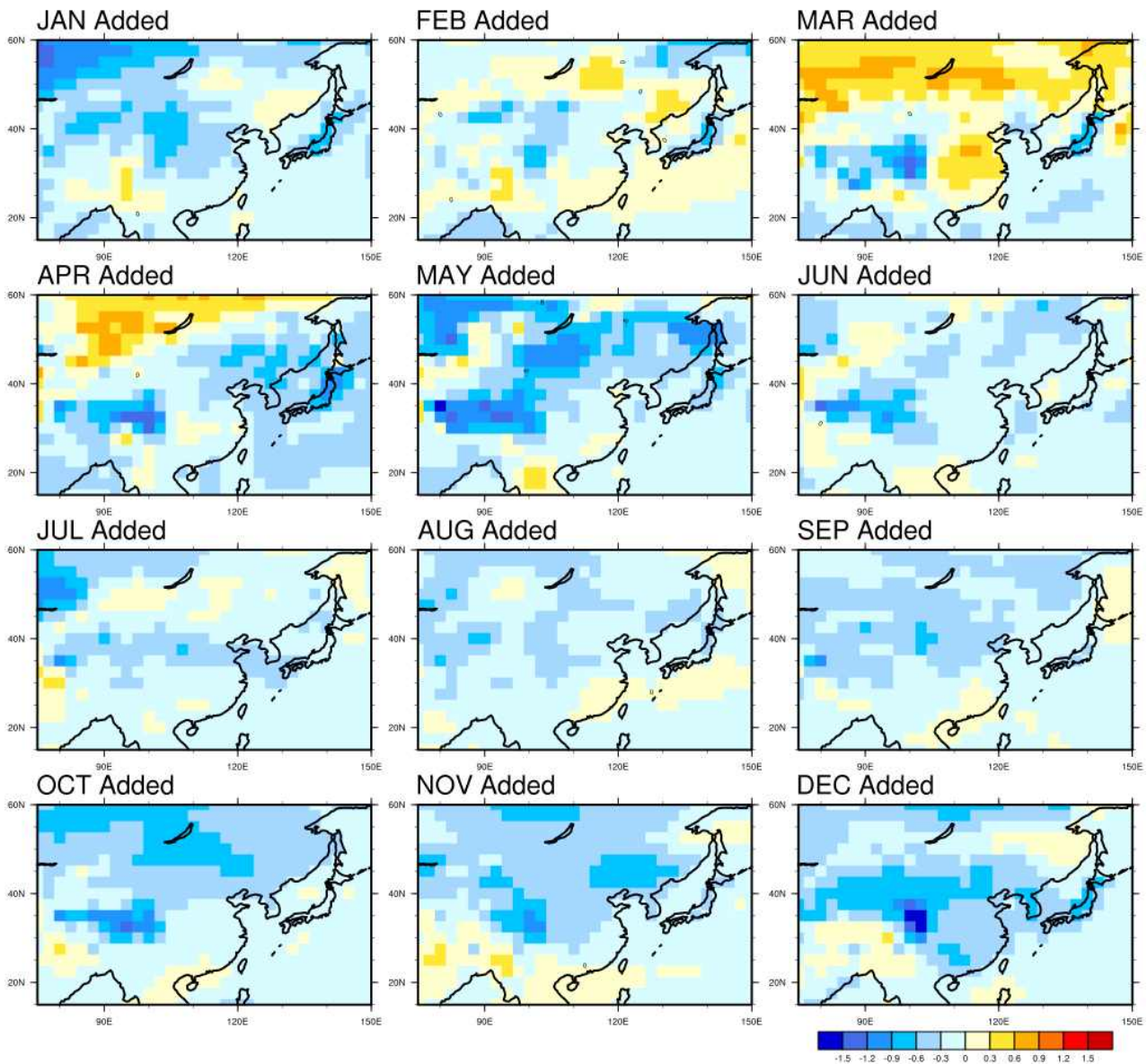


Figure 3.119. Monthly Added spatial patterns for SCM MME averaged 2013-2022. 12-month averaged patterns corresponds to Figure 3.118c.

공간적으로 평균한 보정 상수 c 를 Figure 3.120에 월별로 시계열로 나타내었다. 개별모델의 보정 값과, SCM MME의 보정 값을 함께 보인다. 마찬가지로 5월에 음의 방향으로 가장 크게 보정된 것을 볼 수 있고, 3월에는 개별모델의 편차가 크고, SCM MME는 공간 평균적으로는 보정 값이 작다. 다만, 공간 패턴에서는 남북간의 편차가 크다. 겨울철 12월, 1월을 제외하고는 최근이 될수록 보정값이 음의 방향으로 커지는 추세여서, 최근 기온 예측값에서 선형추세가 실제보다 과하게 온난하게 반영되었음을 유추할 수 있다. 이는 Figure 3.113의 기온 시계열에서도 확인할 수 있는데, 최근이 될수록 (2010년대 후반) 실제 기온이 크게 온난하지 않았지만 모델에서는 이를 반영하지 못하고 온난화를 과하게 예측하는 경향이 있다는 것이 같은 맥락이다. 덧붙여, 한반도는 대체적으로 음의 방향으로 보정이 되었다.

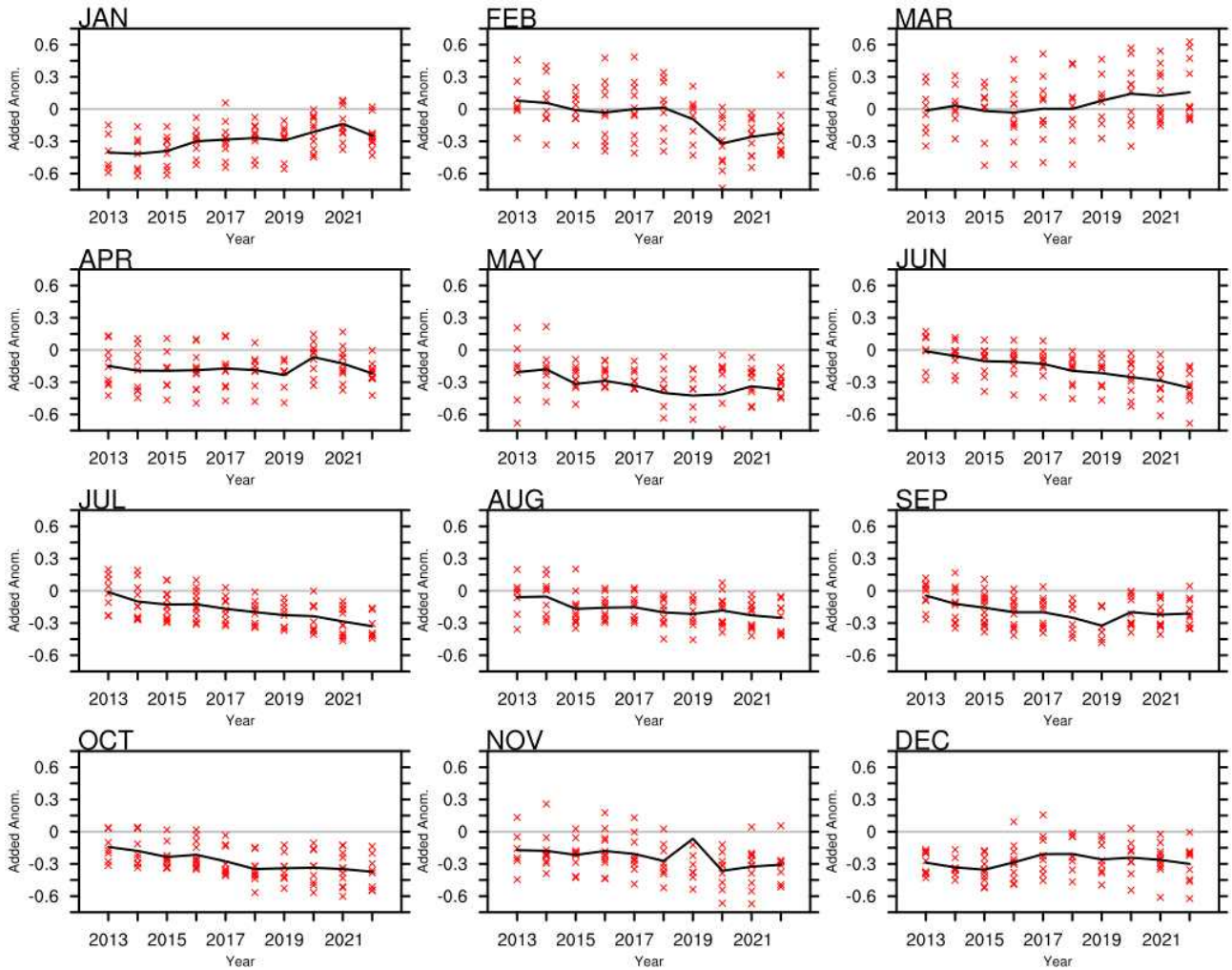


Figure 3.120. Monthly time series from 2013 to 2022 spatially averaged added values in East Asia as in Figure 3.119. Red x are individual models and black solid line is SCM MME.

기온 보정 전후의 예측력을 비교하기 위해 SCM MME의 anomaly pattern correlation coefficient (PCC)를 Figure 3.121에, 보정 전후 차이를 Figure 3.122에 나타내었다. 보정 후 대부분 PCC는 향상된 것을 확인 할 수 있다. 특히 4, 5, 6월은 10년 평균적으로도 0.12, 0.19, 0.14로 PCC 스킬이 향상되어 선형추세를 보정함으로써 얻는 이익이 큰 것을 확인하였다. 다만 겨울철 1월, 12월은 보정 후 PCC 스킬이 떨어지는 시기가 있어 이의 원인을 파악하고 보정 후 예측 패턴을 활용하는 데 주의를 기울여야 할 것이다.

Figure 3.121에는 관측 기온의 동아시아 영역 공간 평균값을 함께 나타내었는데, PCC 스킬이 높은 해는 기온의 평균값도 대체로 높은 것을 파악할 수 있다. 즉, 모델은 대체로 평년 이상의 기온을 예측하고 있으므로, 기온이 높은 해에는 이를 맞출 확률이 높고, 스킬도 높게 계산되는 것으로 이해할 수 있다.

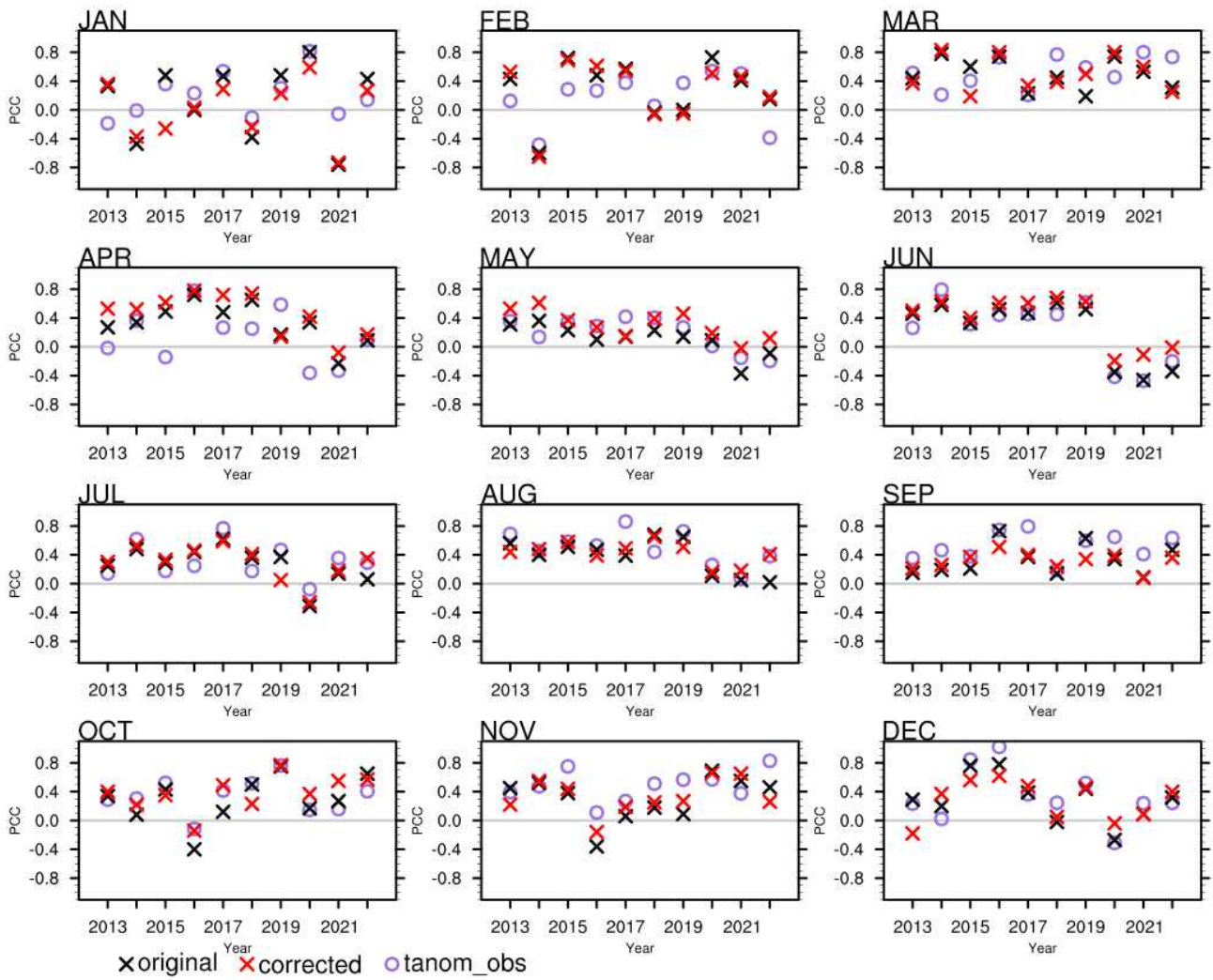


Figure 3.121. Monthly anomaly pattern correlation coefficient (PCC) of original air temperature forecast (black x) and corrected forecast (red x). Most PCCs are improved after the correction. Purple circles are presented the area averaged temperature anomalies and it shows PCC values are proportional to the temperature anomalies roughly.

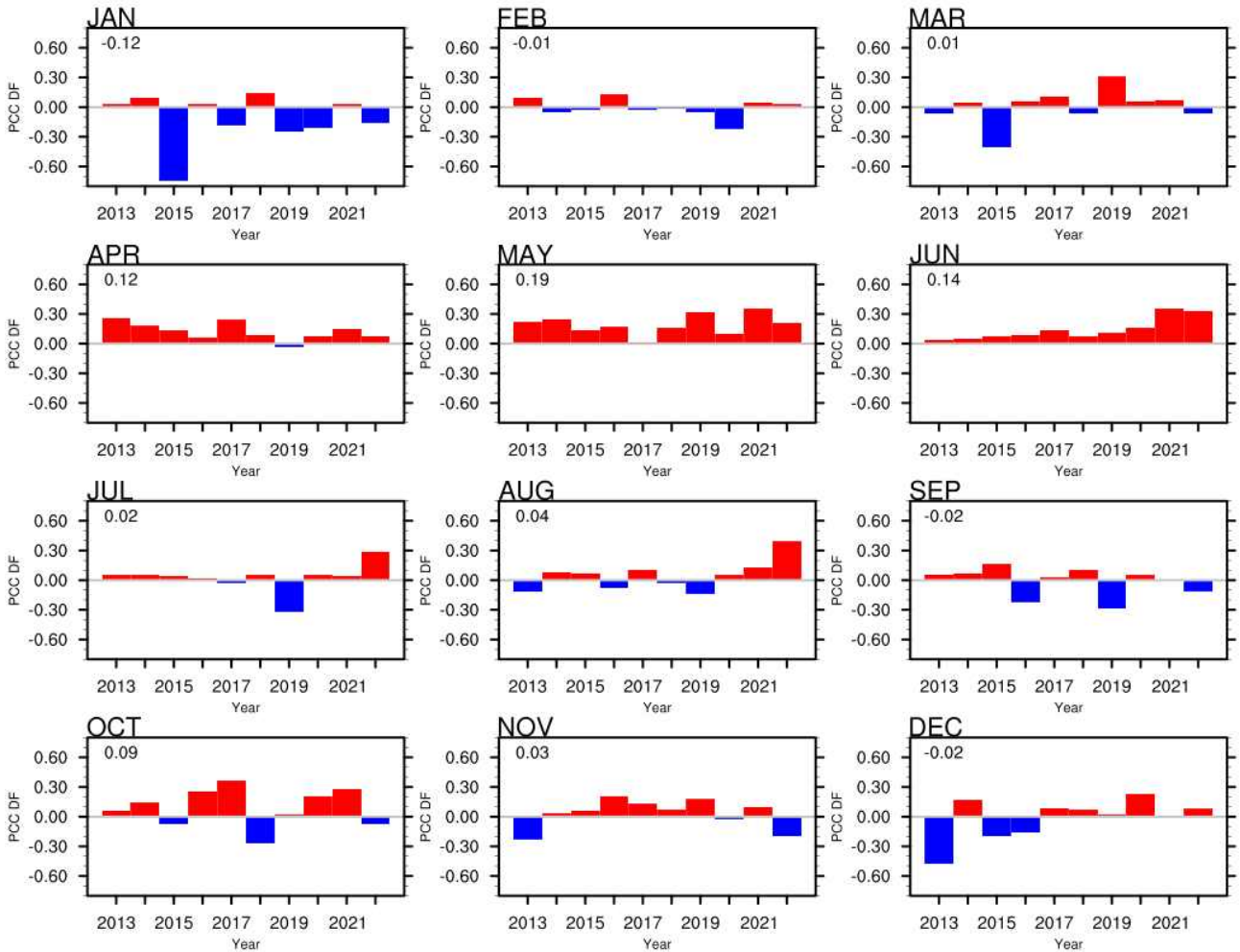


Figure 3.122. Monthly differences of anomaly pattern correlation coefficient between corrected and original temperature forecast as in Figure 3.121. Mostly positive (red) differences are calculated and it means the linear trend correction of temperature is suitable to improve the forecast skill. March, April, May, Jun, July, August, October, and November months are benefited to the correction.

Figure 3.123, 3.124는 월별로 보정 전후 10년간 평균한 기온 아노말리 예측 패턴, 그리고 관측의 기온 패턴을 비교하였다. 가운데 열은 모델의 기온 예측인데, 10년 평균적으로 온난하게 예측한 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 오른쪽 열은 실제 관측 패턴인데, 온난하지만은 않고, 육지에서는 한랭한 지역도 존재하여서, 동아시아는 실제로 온난화 양상이 지역별로 상이한 것을 보인다. 그리고, 선형추세 보정 기법을 적용하여 기온 예측을 보정한 것이 왼쪽 열인데, 지역별로 상이한 기온의 장기 변동성이 어느 정도 보정된 것을 확인하였다.

특히 예측 스킬이 많이 향상된 4, 5, 6월을 살펴보면, 모델 예측 패턴은 온난한 기온만 나타나는데, 실제 관측은 티벳 고원을 포함한 육지에서 상당히 한랭한 기온이 나타나고, 보정 후 이런 티벳 고원에서의 기온이 한랭하게 수정되어 패턴 예측 스킬이 향상된 것으로 판단된다. 공간 평균적으로는 보정 상수의 크기가 미미하지만, 북부는 보정 상수가 양이고 남부는 음으로

나타나 남북 간 격차가 컸던 3월은, 실제로 북부에서 온난한 기온이 크게 나타났는데 모델에서는 이를 강하게 온난하게 예측하진 않았다. 선형추세 보정 후에는 북부 기온은 강하게 온난하게, 티벳고원에서 기온을 한랭하게 수정하여 어느 정도 예측 스킬을 향상시킨 것으로 판단된다. 12월과 1월은 10년 평균적으로 예측 패턴을 살펴보았을 때는 보정 후 예측 스킬이 향상될 것으로 유추할 수 있지만 매년 기온과 이의 예측 스킬의 경년 변동성이 강하므로 실제로 평균 예측 스킬의 향상은 크지 않았다(평균 -0.02, -0.12). 따라서 매년 예측 패턴을 좀 더 면밀히 살펴볼 필요가 있다.

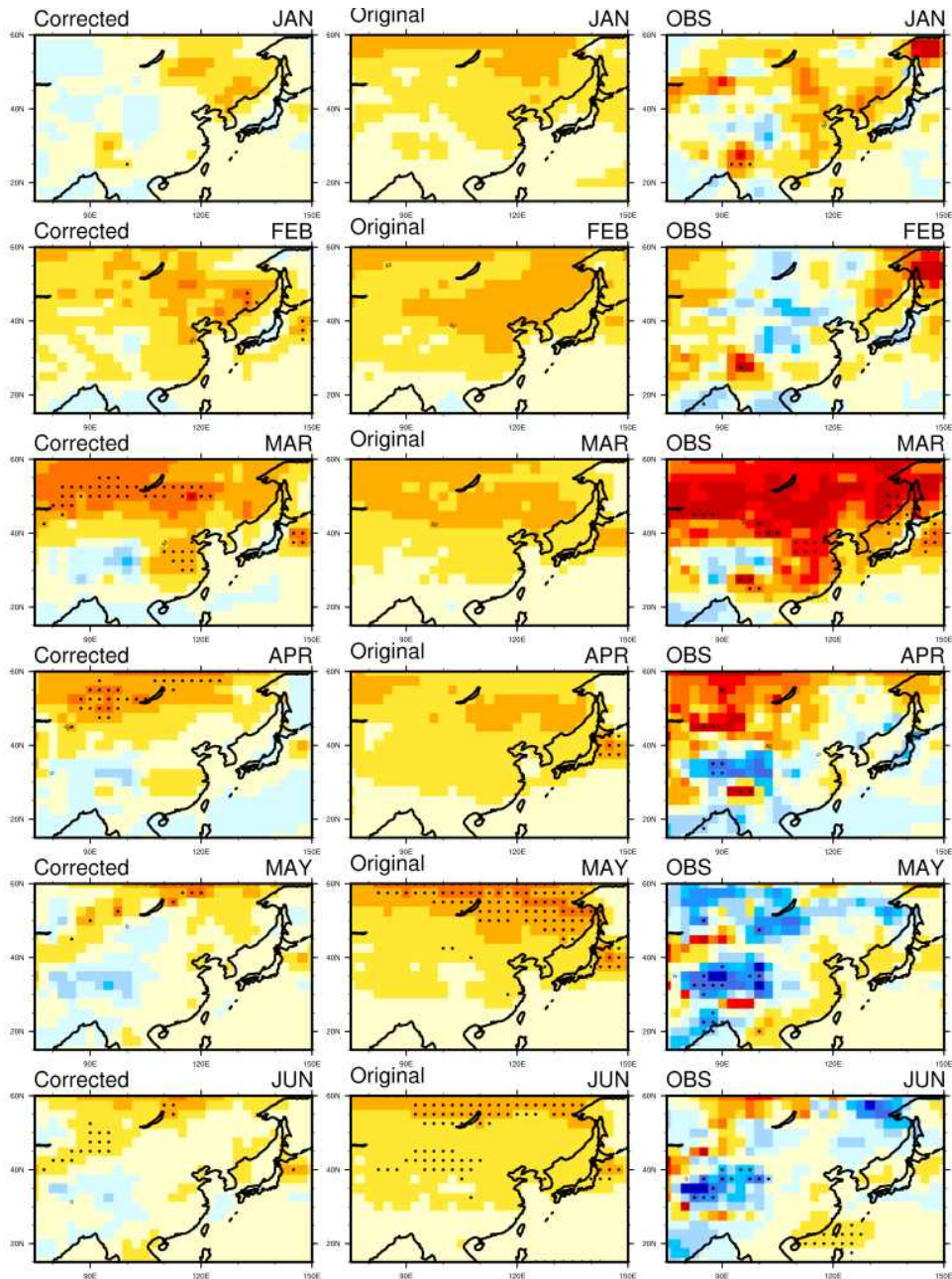


Figure 3.123. Monthly (January–Jun) spatial patterns of (left) corrected forecast, (middle) original forecast, and (right) observation of 2-m temperature anomalies averaged from 2013 to 2022 (dot: 10 percentile of both side).

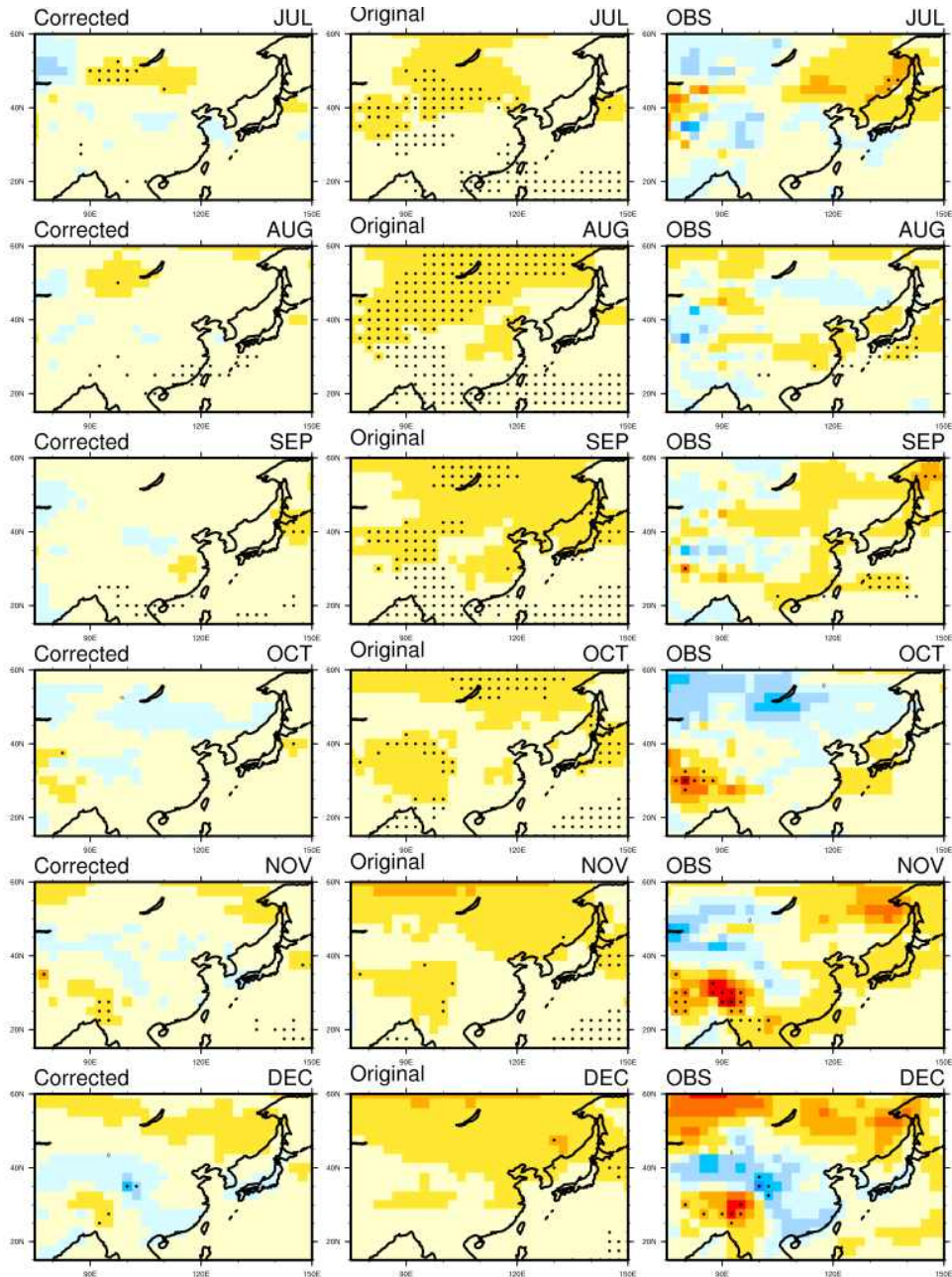


Figure 3.124. Same as Figure 3.123 but for July-December.

개별모델에서 선형추세를 보정하고, 이를 SCM으로 DMME하여 예측력을 살펴보았는데, 여기서는 이 개별모델들을 다중모델 확률예측(PMME)하여 ROC 스킬을 살펴보았다(Figure 3.125). PMME는 2022년 1년에 대해서 수행하였고, ROC는 확률예측 (Below normal, near normal, above normal)의 각 카테고리에서 Hit rate과 False alarm rate의 비율인 ROC curve 아래의 면적인 ROC skill score를 카테고리 평균한 값이다. 2022년 1년에 대해서는 대체로 보정 후 ROC 스코어가 증가하는 것을 보인다. 추후 2013년부터 2021년까지의 자료를 더 살펴볼 계획이다.

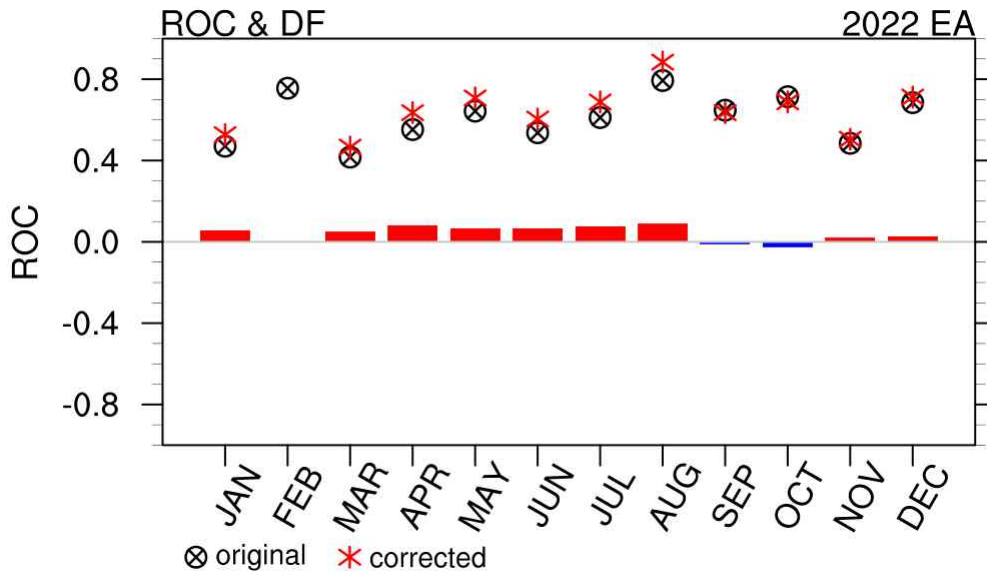


Figure 3.125. Monthly ROC skill and differences of original air temperature forecast (black circled x) and corrected forecast (red asterisk). Most ROCs are improved after the correction.

분위사상기법은 지역규모모델 상세화나 미래기후 시나리오에서 모델의 편이를 보정하기 위해 보편적으로 사용하는 방법이다. 계절예측모델에서 사용하는 것은 선택이 없어 본 연구에서 면밀히 살펴보았다. 본 연구에서는 비모수화 방법인 Empirical CDF를 이용하여 분위사상을 보정하였다. 먼저 기온의 아노말리를 분위사상기법을 이용해 보정하였다 (Figure 3.126, 3.127).

기온의 아노말리를 보정하는 것, 계절예측은 기후값을 제거한 후 아노말리를 예측하고, 다중모델 앙상블 또한 아노말리를 기반으로 하기에 계절예측의 본래 취지에 더 맞기 때문이다. Figure 3.126에 나타나는 시계열은 Figure 3.114와 같은데, 아노말리를 시계열로 나타내고, 여기에 기온 보정은 분위사상기법을 적용한 것이다. 분위사상은 ECDF (Figure 3.127)로 표현하였는데, 여기서도 모델의 예측과, 보정된 예측을 함께 표현하였다. 이 지점(30° N, 90° E)에서 과거의 기온을 표준화하지 않았을 때 모델과 관측의 변동성(표준편차) 차이가 꽤 있는 것을 볼 수 있다. 모델의 예측값은 83 퍼센타일에 위치하는데, 관측 자료에서 같은 분위로 움직여서 보정하기 위해서는 양의 방향으로 0.74만큼 양의 방향으로 이동하여야 했다. 즉, 본래의 값에 양의 값을 더하게 되는데, 이는 뒤에서도 보겠지만 관측의 변동성이 모델보다는 항상 크고, 최근에 실시간 예측은 거의 양의 아노말리이기 때문에 대부분의 격자에서 보정을 위해 양의 값을 더하게 된다.

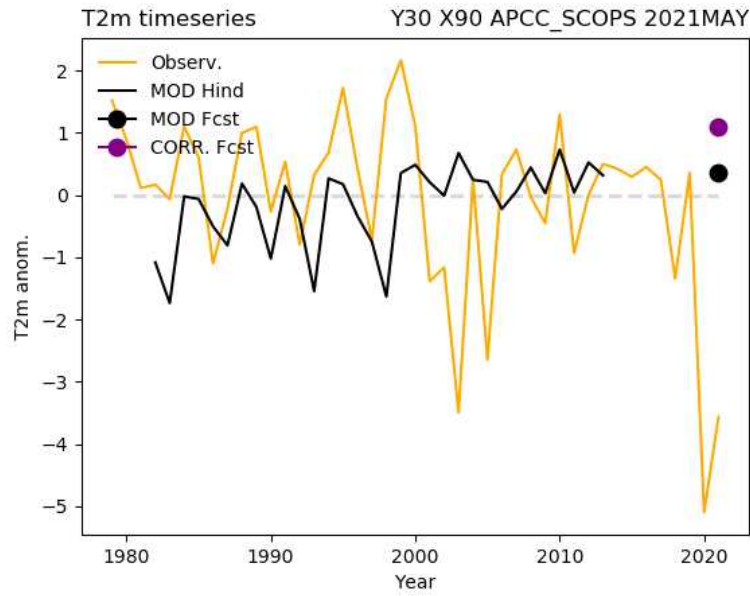


Figure 3.126. Time series of 2-m temperature anomalies of observation (orange line, 1991-2021), model hindcast (black line, 1982-2013, APCC SCOPS), and forecast (black filled dot) for 2021 May (30° N, 90° E). Corrected forecast by empirical cumulative distribution function (ECDF) method is purple filled dot.

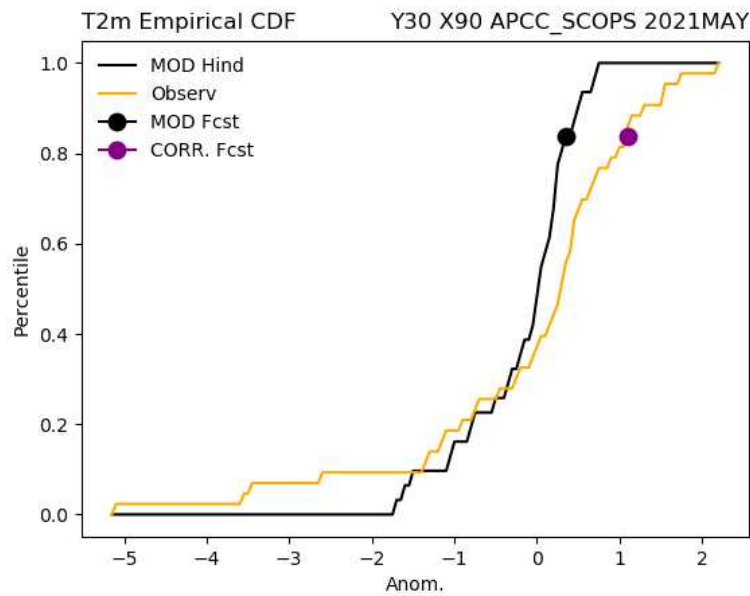


Figure 3.127. Empirical cumulative distribution of hindcast (model, black line) observation (orange line), target forecast (black dot) and corrected forecast (purple dot) for Figure 3.125.

이러한 관측과 모델의 변동성에 따른 특성을 고려하여 ECDF 분위사상기법을 이용하는데 표준화된 아노말리를 보정했다 (Figure 3.128, 3.129). 기온의 표준화된 아노말리이므로, 표준편차의 차이는 없다. 마찬가지로. 모델의 예측값은 84 퍼센타일에 위치해 있고, 이를 보정한 기온은 양의 방향으로 수정되었지만 보정된 정도는 미미하다. 이 보정된 기온은 표준화한 것이므로, 최종 기온예측은 여기에 표준편차를 곱한 실제 아노말리이다.

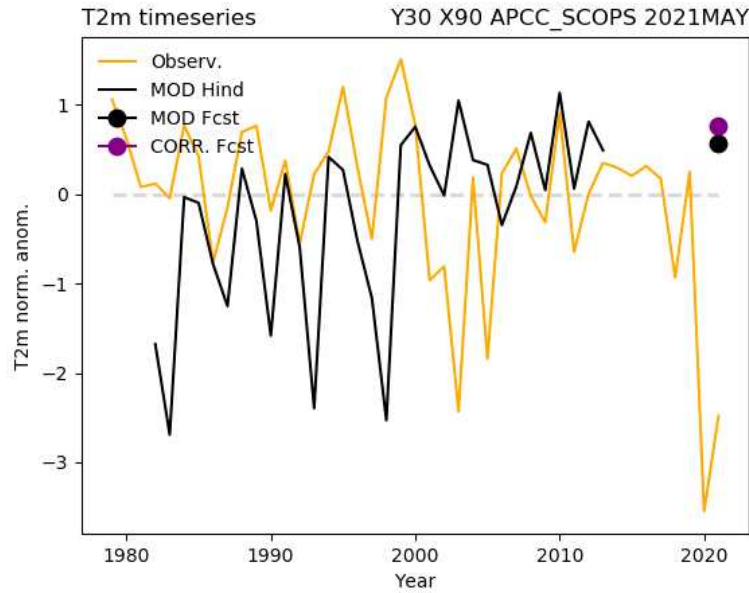


Figure 3.128. Same as Figure 3.126 but for normalized anomalies of 2-m temperature.

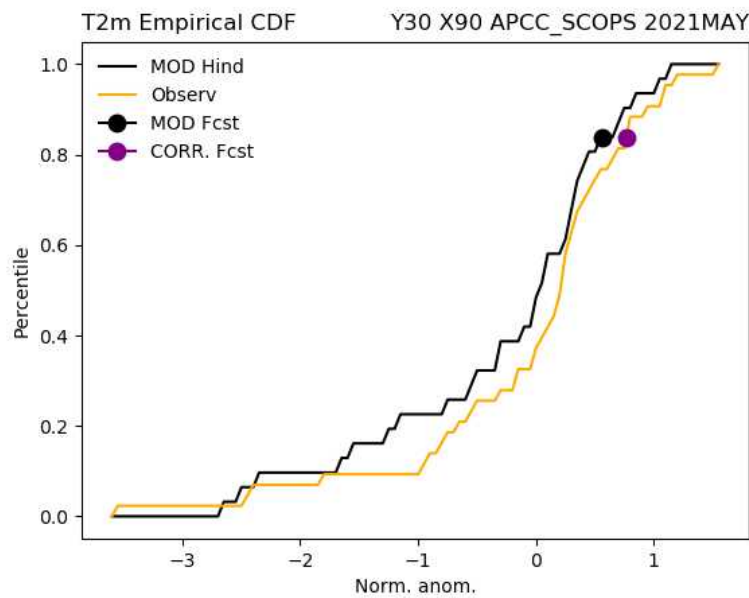


Figure 3.129. Same as Figure 3.16 but for normalized anomalies of 2-m temperature. ECDF for Figure 3.127.

한 격자에서 실시한 기온 예측의 보정을 공간적으로 파악하기 위해 Figure 3.130의 공간패턴으로 나타내었다. 기온예측은 원래 평년이상의 값이 많이 분포했는데, 수정후에도 패턴상에 차이는 있지만 보정된 값이 미미한 것을 확인할 수 있다. Figure 3.130을 통해 Figure 3.116의 선형추세 보정 기법과 비교하면, 보정이 매우 미미하다는 것을 확인하였다.

t2m Anom. Forecast 2021 MAY APCC_SCOPS

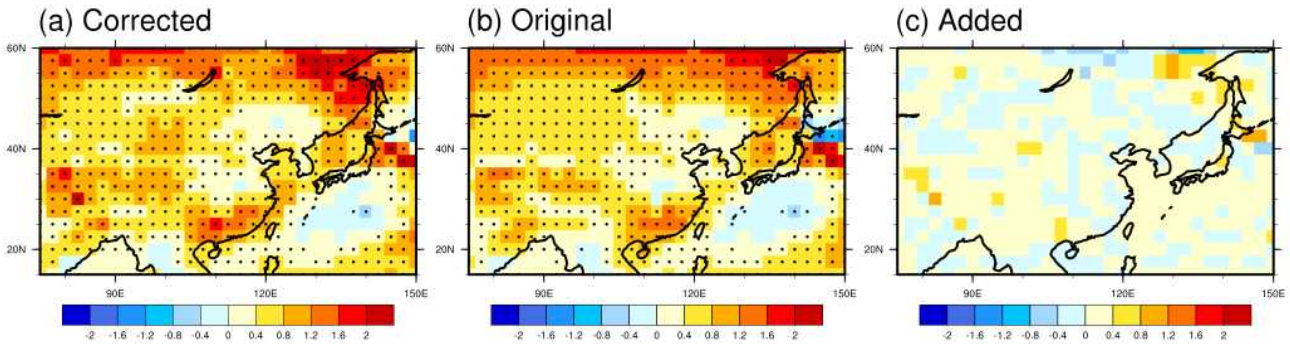


Figure 3.130. (a) Corrected forecast and (b) original forecast 2-m anomalies at 2021 May (dot: over $\pm 0.43 \sigma$) by empirical quantile mapping method. (c) added spatial pattern for correction ($a = b + c$). APCC SCOPS 1-month-lead forecast is used.

모든 모델에 대해 분위사상기법을 통해 기온 예측 보정을 수행하고, SCM DMME로 기온예측패턴을 나타내었다(Figure 3.131). 위와 마찬가지로, Figure 3.118의 선형추세기법을 통한 SCM DMME의 기온 예측 보정과 비교하면, 보정이 매우 미미하고, 실제 관측(Figure 3.117)과 비교해 보아도, 보정을 통해 얻을 수 있는 이득이 거의 없는 것을 확인하였다.

t2m Anom. Forecast 2021 MAY SCM

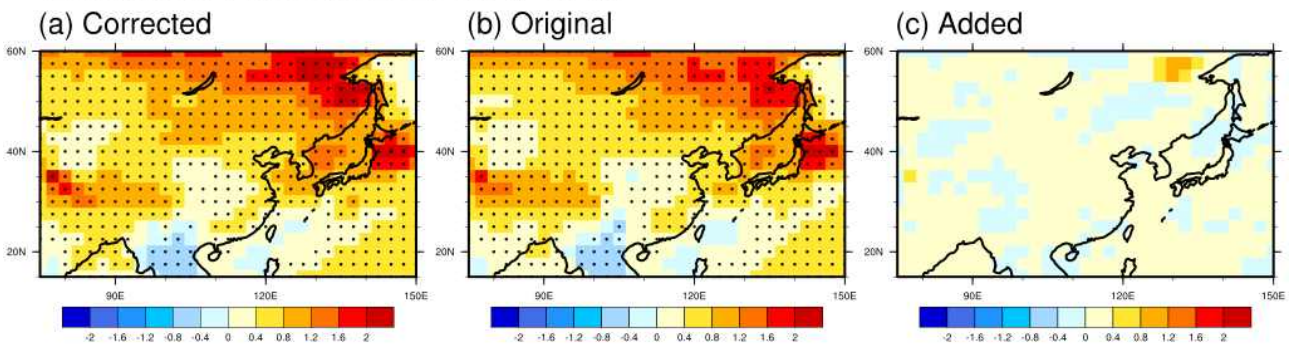


Figure 3.131. Same as Figure 3.130 but for SCM MME.

분위사상기법에 의해 보정되는 보정 상수 공간 패턴(Figure 3.131c)을 월별로 2013-2022년 10년 평균하여 다음의 Figure 3.132에 나타내었다. 본 연구에서는 모델의 온난화 경향을 관측과 유사하게 하기 위해 음의 방향으로 보정을 하고자 하였지만, 분위사상기법으로는 대부분 격자에서 양의 방향으로 수정이 된 것을 볼 수 있다.

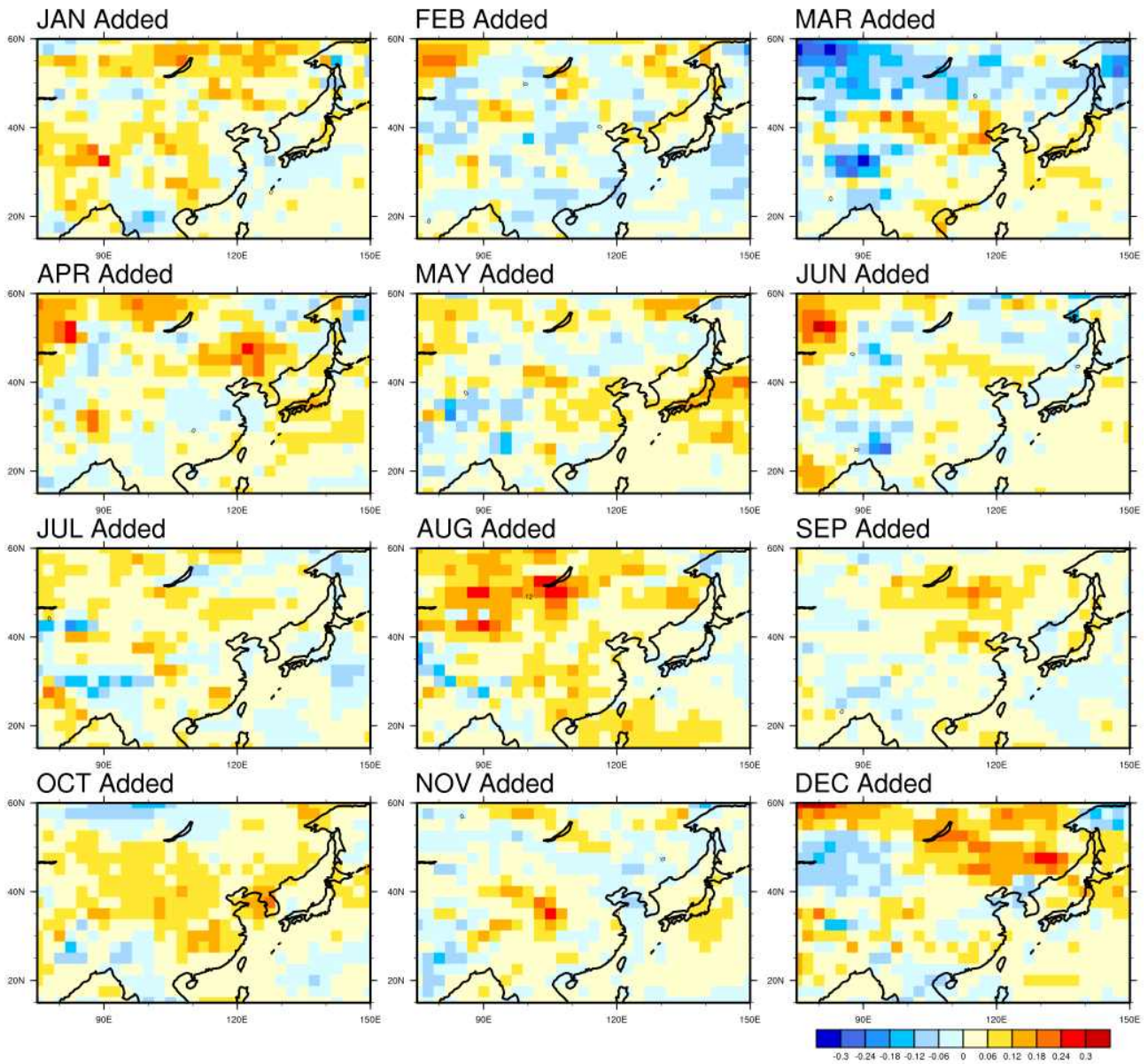


Figure 3.132. Monthly Added spatial patterns for SCM DMME averaged 2013-2022. 12-month averaged patterns correspond to Figure 3.118c. Note that the color scales are different from those of Figures 3.130-131.

분위사상기법으로 보정 전후 예측 스킬을 확인하기 위해 월별 PCC를 Figure 3.133에, 이들의 차이를 Figure 3.134에 나타내었다. 보정 후 대부분의 기간에 PCC가 증가하지는 않고, 그 차이 또한 매우 미미하여 보정 후 패턴 변화도 크지 않고, 스킬의 차이도 미미한 것을 확인하였다.

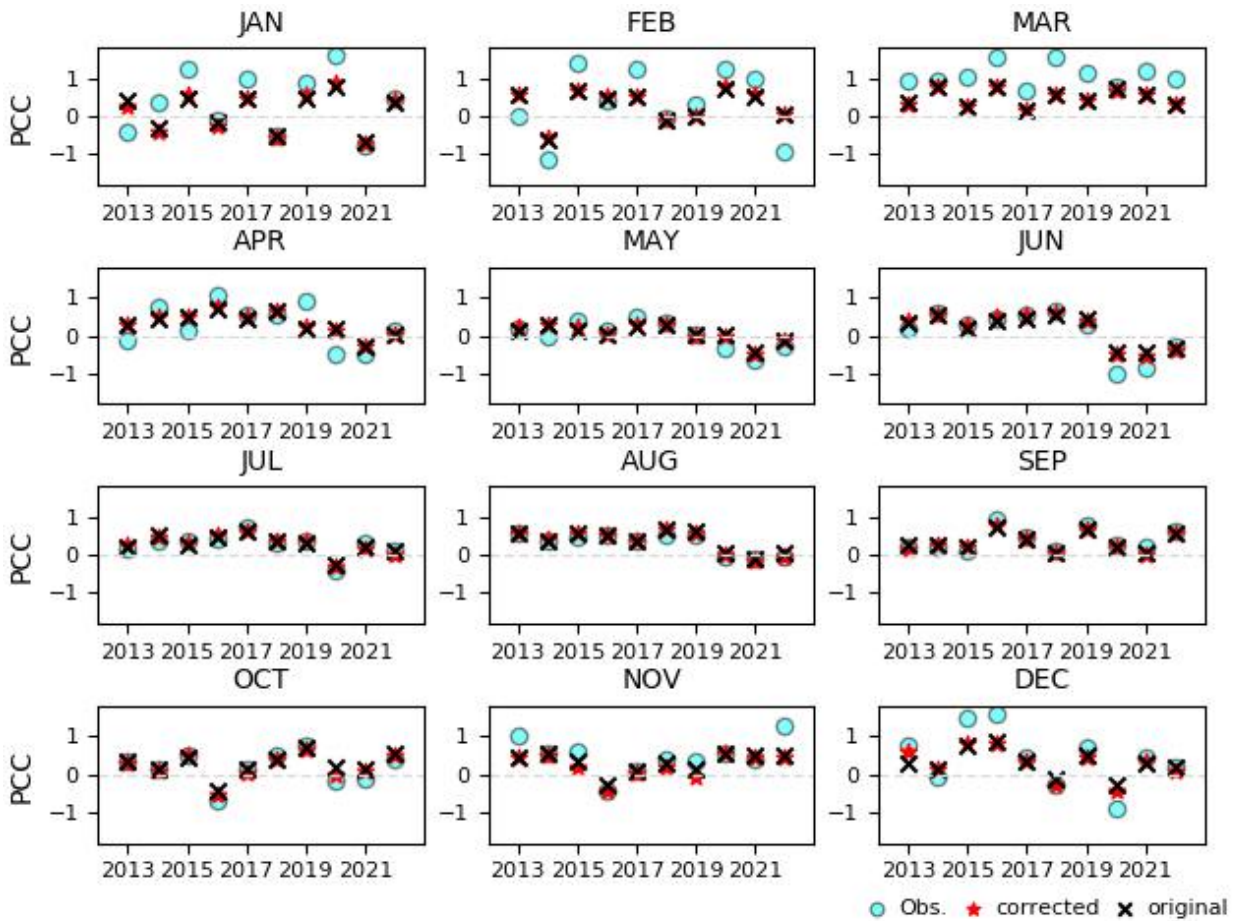


Figure 3.133. Monthly anomaly pattern correlation coefficient (PCC) of original air temperature forecast (black x) and corrected forecast (red star). Cyan circles are presented the area averaged temperature anomalies.

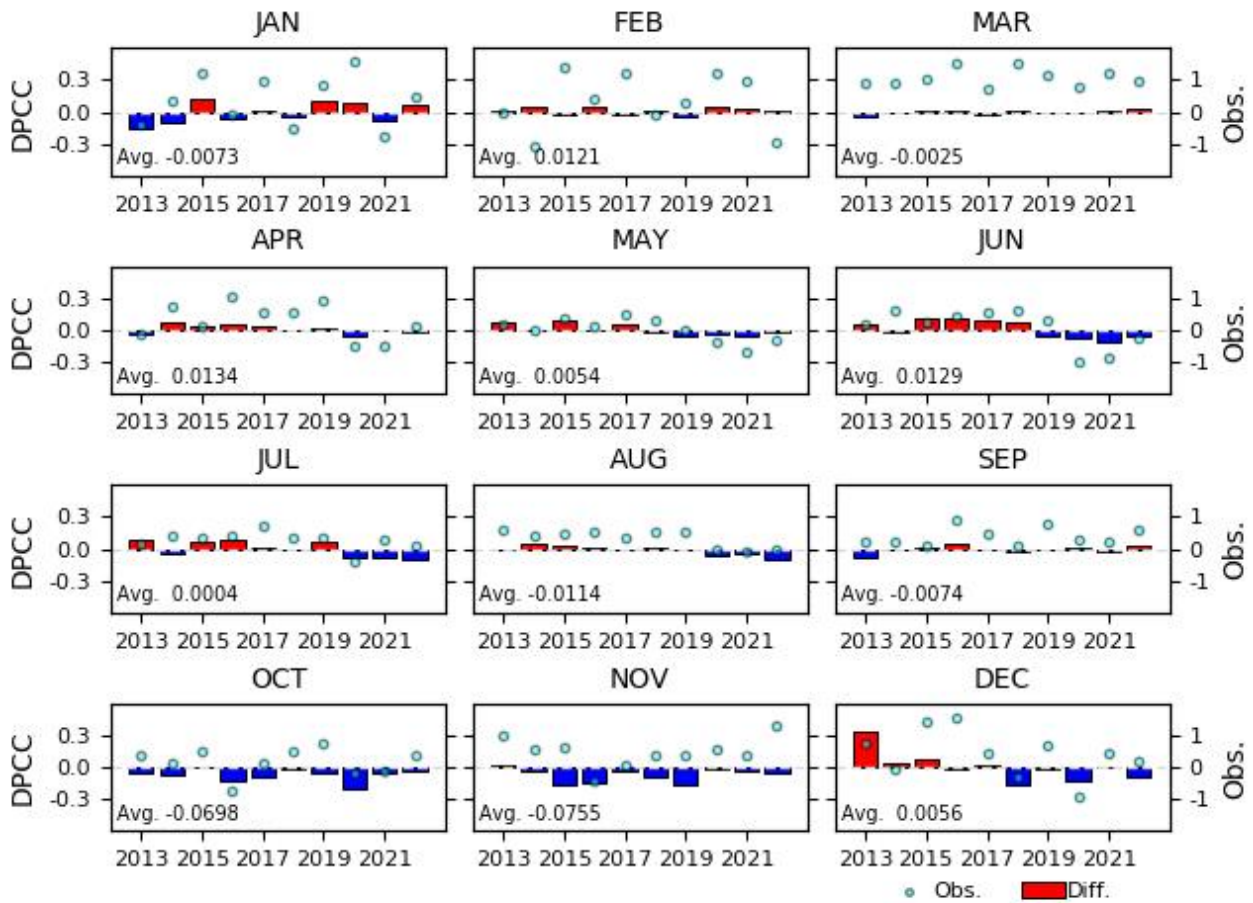


Figure 3.134. Monthly differences of anomaly pattern correlation coefficient between corrected and original temperature forecast as in Figure 3.133.

앞서 분위사상기법은 계절예측의 기법을 고려하여 평균으로부터의 아노말리를 보정하였는데, 본래 분위사상기법은 평균이나 편차를 보정하기 위해 원값을 이용한다. 이러한 취지를 고려하여 본 연구에서도 본값(기온)을 이용하여 보정을 하였다. Figure 3.135와 3.136은 이를 위한 격자, 한 모델에서의 관측과 모델의 시계열, ECDF 분포도이다. 앞선 Figure 3.126~3.129와 같지만 원값을 이용한 시계열, 분포도이다. 관측과 모델의 분포에서 평균과 표준편차의 차이가 크기에 보정값이 매우 크다. 또한 이 격자에서 모델에 비해 관측값이 크기 때문에 수정되는 값은 모델에 비해 매우 큰 것을 확인하였다.

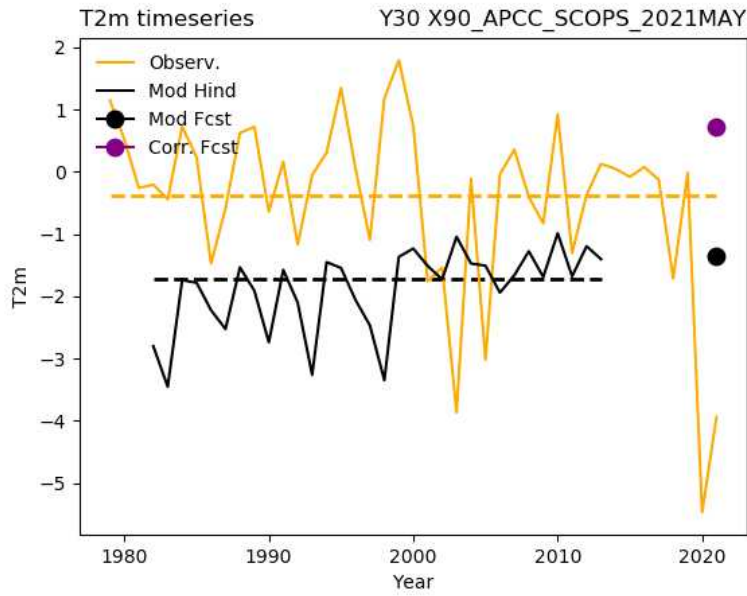


Figure 3.135. Time series of 2-m temperature of observation (orange line, 1991-2021), model hindcast (black line, 1982-2013, APCC SCOPS), and forecast (black filled dot) for 2021 May (30° N, 90° E). Corrected forecast by empirical cumulative distribution function (ECDF) method is purple filled dot.

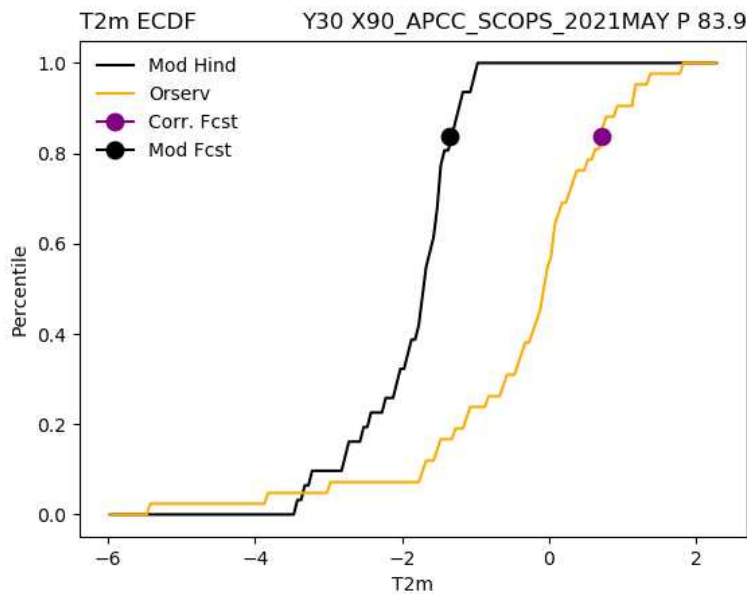


Figure 3.136. Empirical cumulative distribution of hindcast (model, black line) observation (orange line), target forecast (black dot) and corrected forecast (purple dot) for Figure 3.135.

한 격자에서 나타나는 이러한 보정 과정을 공간에서 표현한 것이 Figure 3.137a~c이다. 대부분의 공간에서 보정 후 양의 방향으로 더 커진 것을 확인하였다. 이것은 지역규모 모델이나 기후 시나리오 모델에서 편차나 표준편차를 보정하기 위한 과정과 유사하다고 할 수 있다. 이처럼 원값은 양의 방향으로 수정되었지만, 계절예측은 기후평균에 대한 아노말리이므로, 이를 위해 보정된 예측값을 관측 평균(보정 후 평균값은 관측의 평균값으로 대체)을 제거하고, 아노말리를 계산하여 이를 공간으로 표현한 것이 Figure 3.137d-f이다. 아노말리 예측에서는 보정상수가 원값에서의 보정 상수만큼은 크지 않지만 여전히 양의 값을 가진다. 이는 모델예측을 대체하는 관측자료의 표준편차가 크기에, 같은 분위에서 이동을 하여도 대부분 양의 방향으로 보정이 되기에 나타나는 것으로 보인다. 즉, Figure 3.127에서 보이는 보정과 유사한 것이다. 이는 일반적인 편이 보정 방법이 계절예측에서 적용할 때 주의해야하는 것을 보여준다. 따라서 관측과 모델 자료의 표준편차가 크게 차이나므로 이러한 특성을 고려하여 보정된 기온을 표준편차로 나누어 표준화하였다(Figure 3.137g-i). 표준화 까지 거치고 난 후 보정상수는 음의 방향으로 수정된 것을 보여주지만, 이는 관측 아노말리와 비교해보았을 때 공간의 특성을 살려서 보정되지 않는 것으로 보여진다.

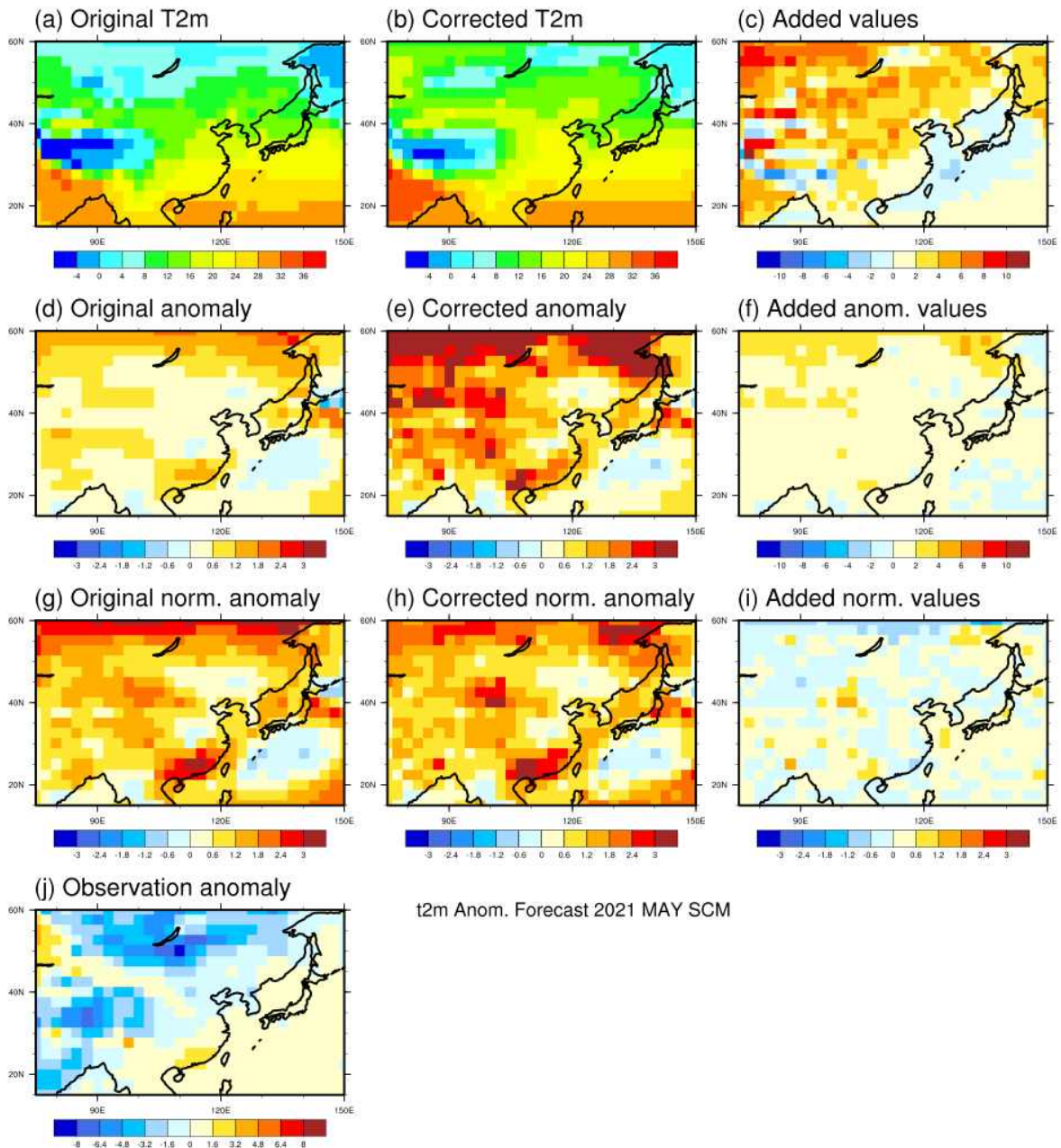


Figure 3.137. (a) Original forecast and (b) corrected forecast 2-m temperature of APCC SCOPS at 2021 May by empirical quantile mapping method as in Figure 3.135. (c) Added spatial pattern for the correction ($c=b-a$). APCC SCOPS 1-month-lead forecast is used. (d) Original forecast 2-m temperature anomaly, (e) corrected forecast anomaly, and (f) added values for the correction anomaly forecast ($f=e-d$). (g) Normalized original forecast anomaly, (h) corrected normalized anomaly and (i) added spatial pattern for the normalized forecast ($i=h-g$). (j) Observation anomaly of 2021 May (climate period is 1982–2013).

Figure 3.138은 분위사상기법으로 보정된 기온예측을 SCM DMME에 적용한 것이다. 보정 후 기온 예측은 원래의 예측 패턴에 대부분 양의 방향으로 수정이 되었고, 표준화된 패턴은 음의 방향으로 보정된 것으로 보이긴 하지만 그 값 자체는 미미하다.

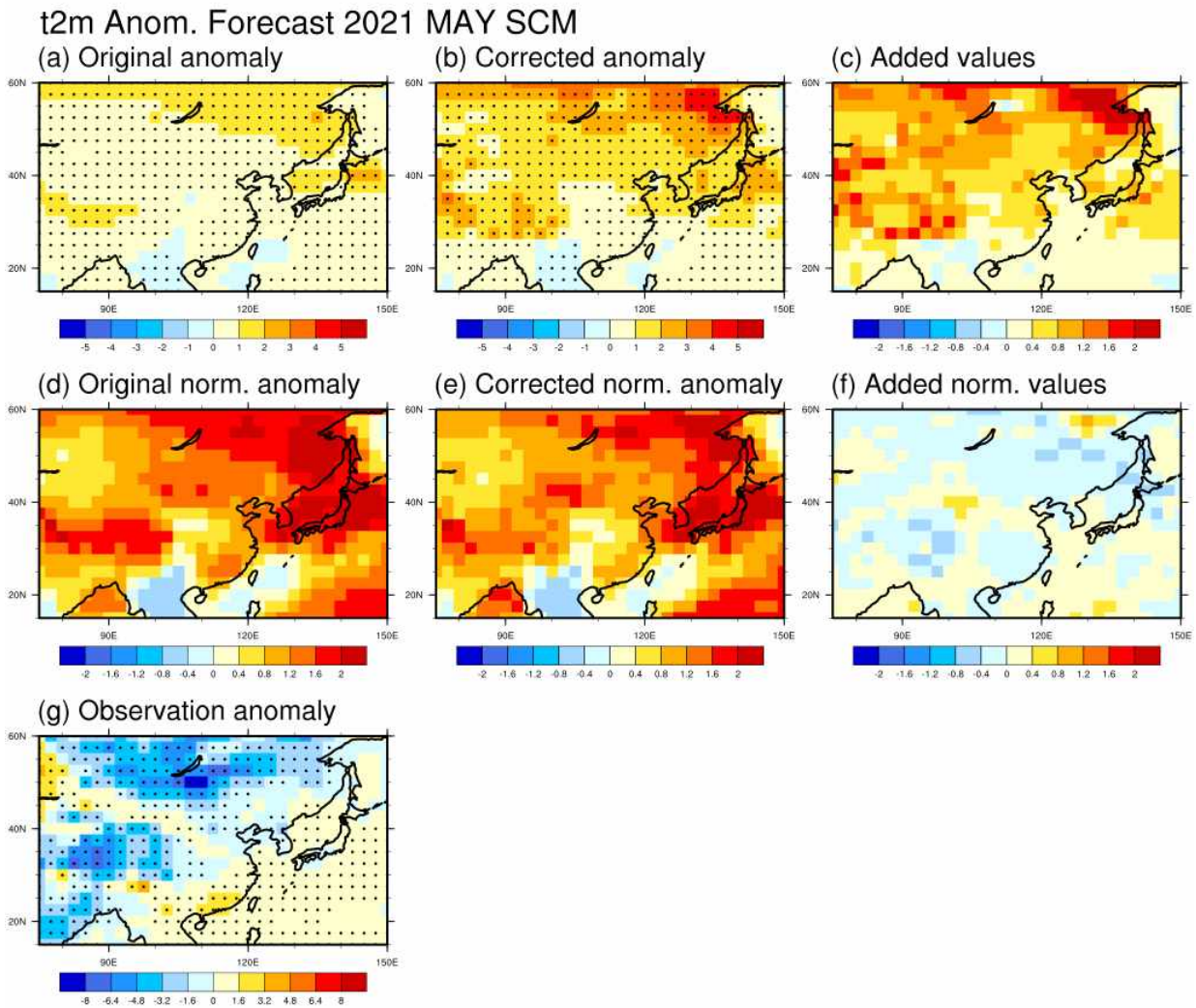


Figure 3.138. (a) Original forecast and (b) corrected forecast 2-m temperature of SCM DMME at 2021 May by empirical quantile mapping method as in Figure 3.135. (c) Added spatial pattern for the correction ($c=b-a$) of SCM DMME. (d) Original normalized anomaly forecast of SCM DMME, (e) corrected normalized anomaly forecast, and (f) added spatial pattern for the correction ($f=e-d$). (g) Observation anomaly of 2021 May (climate period is 1991-2010). Black dots represent 0.43 sigma.

기온의 분위사상기법 보정은 실시간 예측 2013년부터 2022년까지 매월 수행하였고, 얼마나 보정되었는지 보일 수 있는 보정 상수 c (Figure 3.138c)를 다음의 Figure 3.139에 월별로 나타내었는데 이는 10년 보정 상수를 평균한 패턴이다. 2021년 5월에도 대부분 동아시아 지역에서는 양의 보정 상수를 보였는데, 10년 평균에서도 5월 보정 상수는 양의 값을 보인다. 다른 달에도 대부분 양의 값을 보이는데, 다만, 2, 3월에는 일본 동북부 해양 일부 지역에서 음의 값을 보인다. 월별로 비교했을 때는 12월에 가장 크게 보정되었다. 이는 관측과 모델 자료의 표준편차의 차이에서 비롯되는 것이므로, 비교를 위해 이를 표준편차로 나누어 다음의 Figure 3.140에 나타내었다.

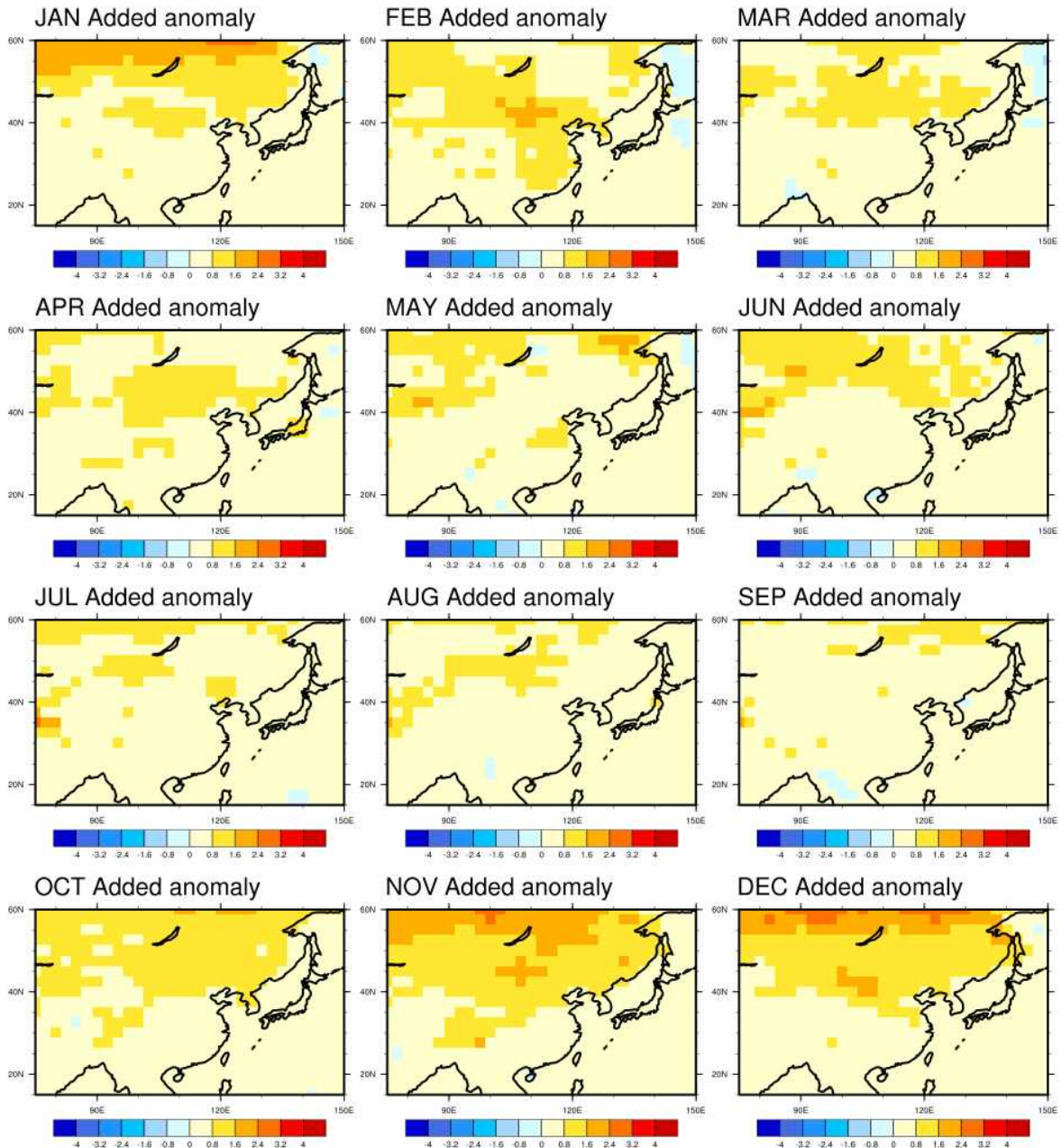


Figure 3.139. Monthly added spatial patterns for SCM DMME averaged 2013-2022 to correct 2-m temperature anomaly forecast by empirical CDF of original values. 12-month averaged patterns corresponds to Figure 3.138c.

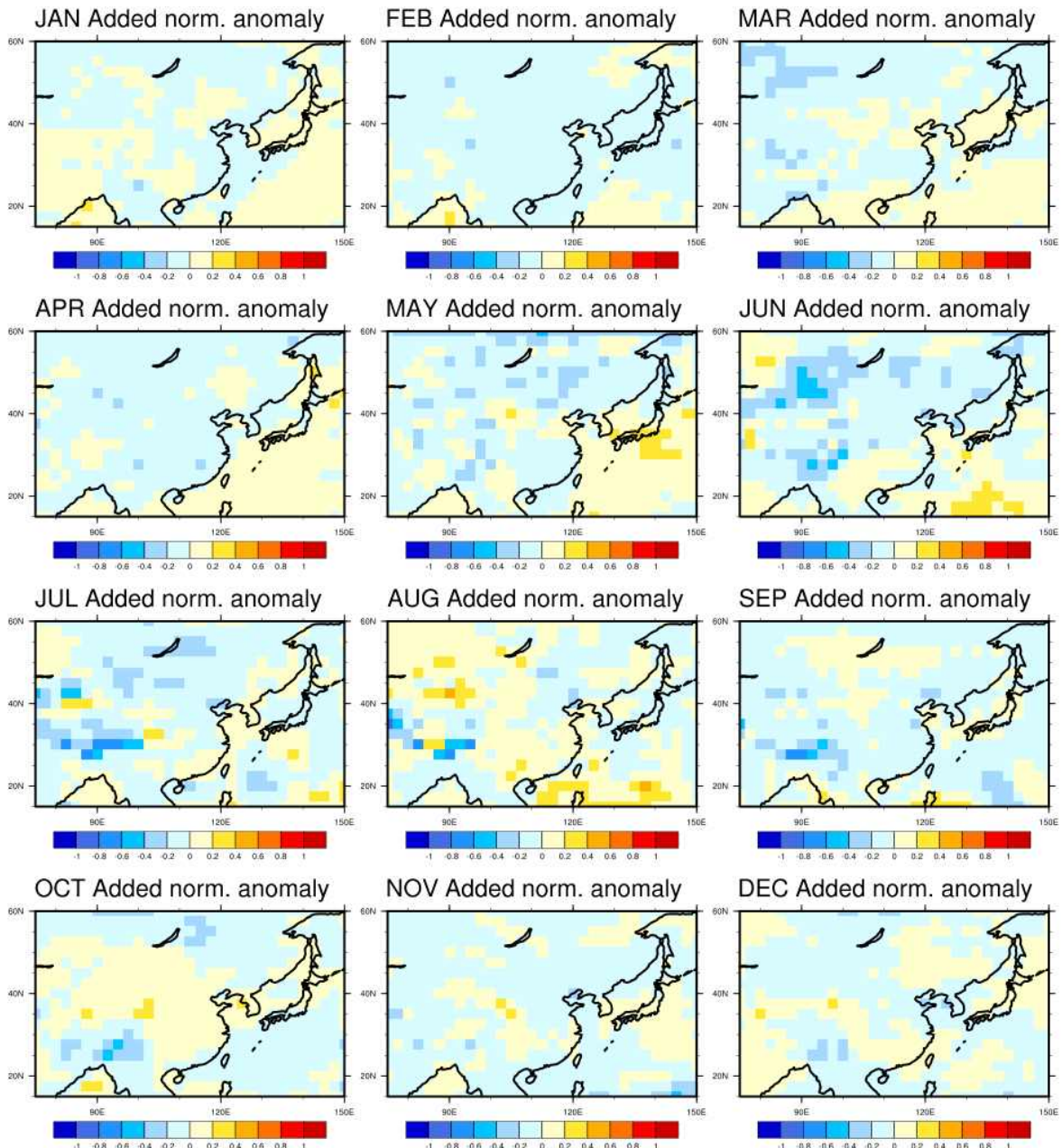


Figure 3.140. Monthly normalized added spatial patterns for SCM DMME averaged 2013-2022 to correct 2-m temperature anomaly forecast by quantile mapping of empirical CDF of original values. 12-month averaged patterns corresponds to Figure 3.138f.

표준화된 보정 상수는 대부분의 지역에서 음의 방향으로 보정된 것을 보여주긴 하지만, 그 값 자체는 작아서 선형추세 기법에 의한 보정상수를 표준화하여 비교해보면, 그 값이 매우 작다는 것을 알 수 있다(약 1/2). 다만, 기존의 기온 계절예측은 아노말리로 자료를 생산하였기에, 보정된 후 기온의 계절예측도 아노말리로 표현하여야 하겠고, 따라서 보정 상수 또한 Figure 3.139가 되는 것이 타당하다. 이러한 보정 상수를 공간 평균하여 시계열로 나타낸 것이 Figure 3.141이다.

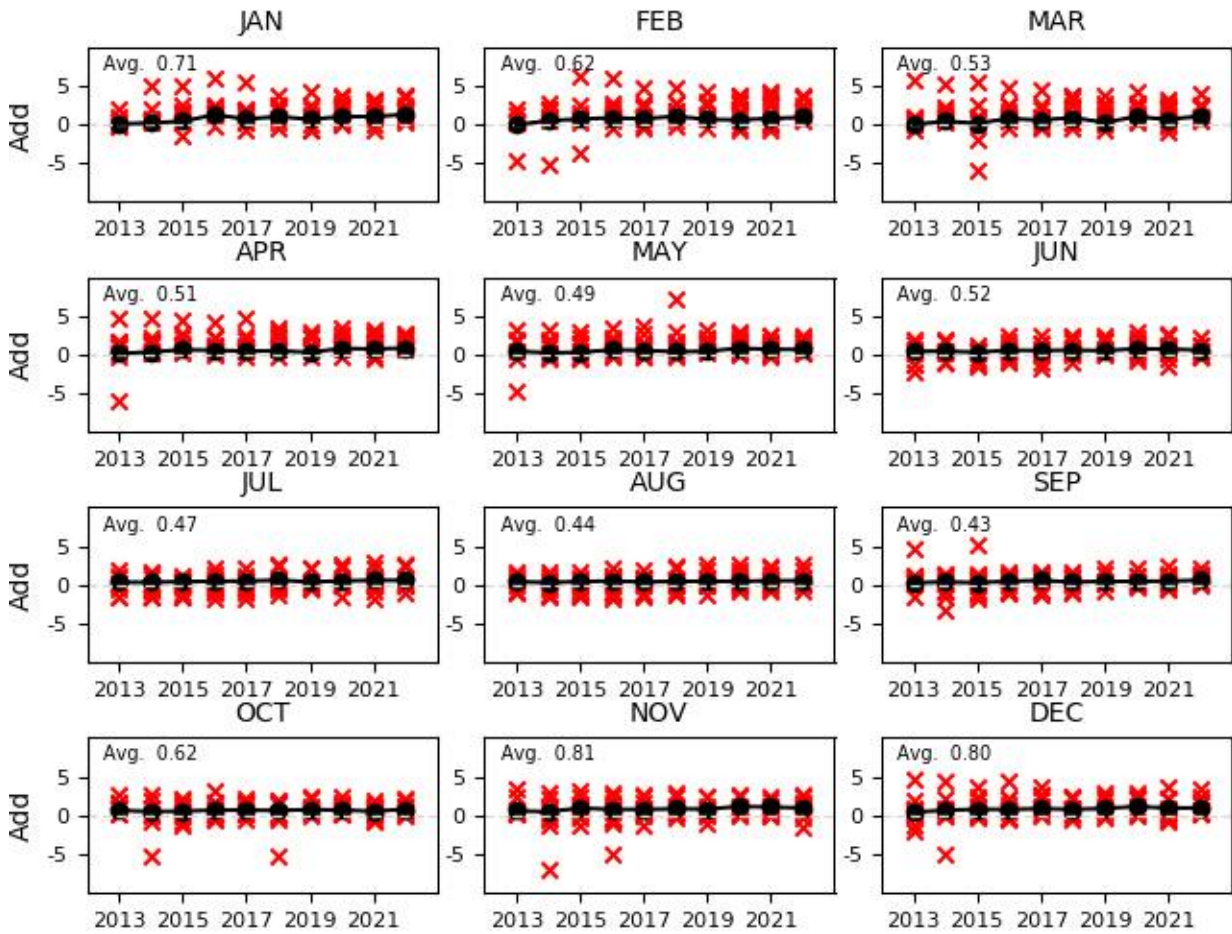


Figure 3.141. Monthly time series from 2013 to 2022 spatially averaged added values in East Asia as in Figure 3.139. Red x are individual models and black solid line is SCM DMME.

월별로 대부분의 개별모델은 양의 방향으로 보정이 되었고, 이에 따라 SCM DMME 또한 양의 방향으로 보정이 되었다. SCM DMME 보정 상수의 월별 평균값은 0.43-0.81로 대부분 양의 방향으로 수정이 된 것을 확인하였다.

보정 전후 SCM DMME의 PCC 스킬을 다음 Figure 3.142와 143에 나타내었다. 보정 후 뚜렷한 스킬의 상승을 보이지 않고, 그 차이 또한 미미하여 선형추세 보정 기법에 비해 분위사상 기법은 기온 예측의 장기적 경향을 보정하는데 이득이 크게 없는 것을 확인하였다.

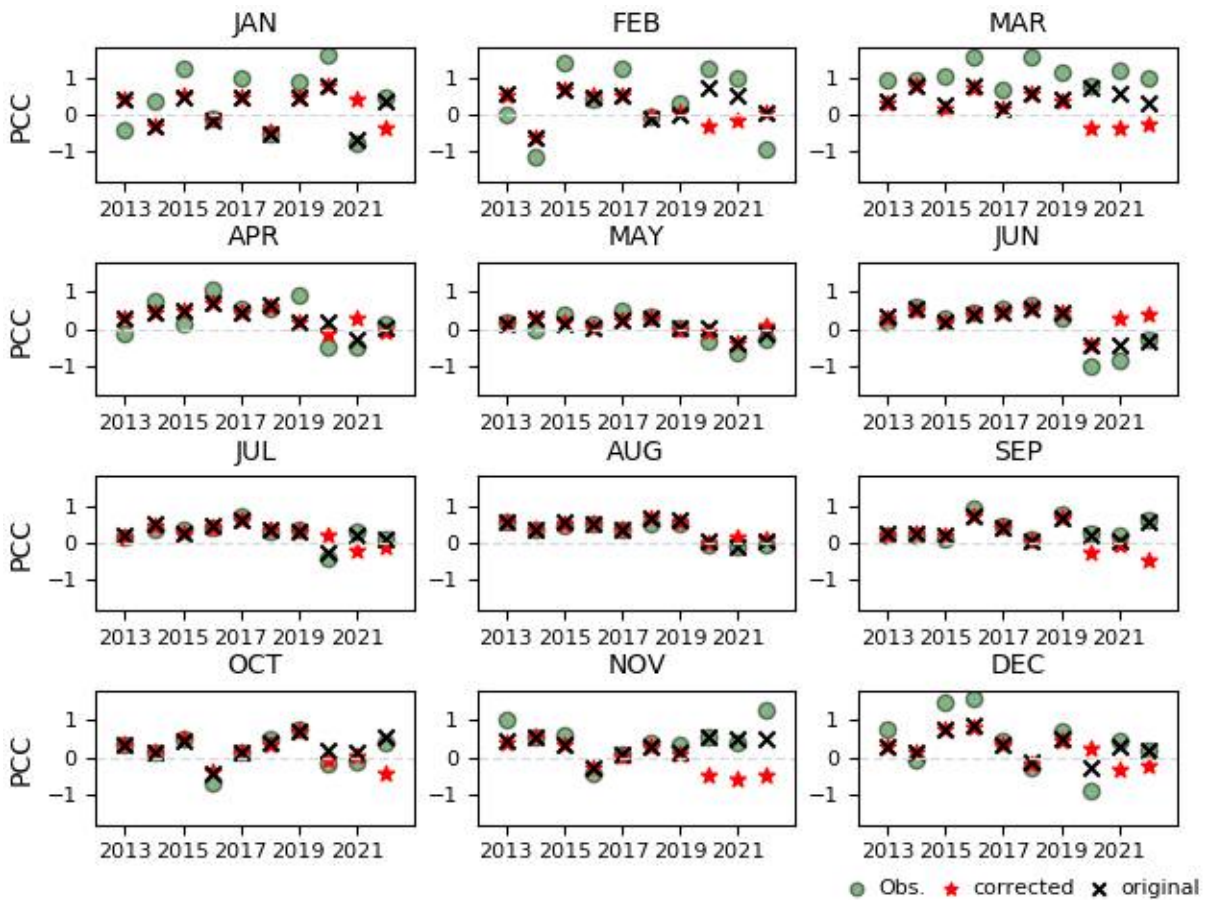


Figure 3.142. Monthly anomaly pattern correlation coefficient (PCC) of original air temperature forecast (black x) and corrected forecast (red star) by empirical CDF quantile mapping of original temperature as in Figure 3.138. Green circles are presented the area averaged temperature anomalies.

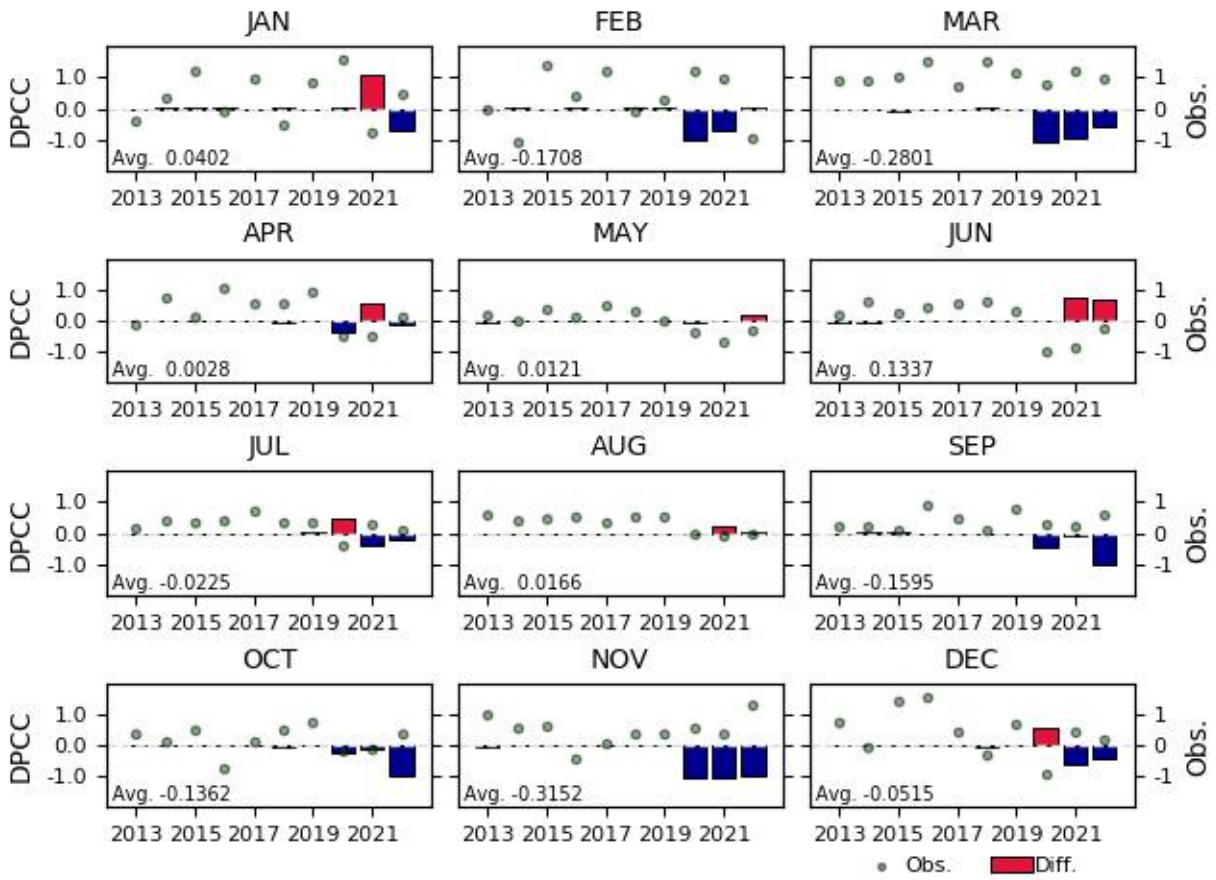


Figure 3.143. Monthly differences of PCC between corrected and original temperature forecast as in Figure 3.142.

3.6.2. 현업에 활용할 수 있는 기반 마련

본 연구에서는 현업에 활용할 수 있는 기반을 마련하기 위해 여러 가지를 고려하였다. 앞서 서술했듯, 첫째, 보정을 위한 훈련기간은 hindcast 기간, 타겟인 보정기간은 실시간 예측으로 하여 전 예측 기간(2013-2022)의 hindcast에 대해 예측력 비교를 하였는데 이러한 기간 선정이 실제 현업에서 얻을 수 있는 가장 현실적인 조합이라 판단된다. 또한 훈련기간을 hindcast 기간으로 하였기에, 미래에 현업에서 매년 달라질 수 있는 hindcast 기간에도 본 연구 결과와 큰 차이 없이 적용할 수 있다.

두 번째, 현업에 적용하여 예측력을 향상할 수 있도록 더 나은 방법을 찾기 위해 여러 가지 방법을 비교하였다. 현업 생산에서 기온 계절예측의 온난화 문제를 제기하였고, 모델과 관측 기온의 장기적 경향을 분석하였으며 이를 보정하기 위해 분석한 장기적 경향을 직관적으로 수정할 수 있는 선형추세 보정 방법을 적용하였다. 또한 기후모델 후보정 기법으로 널리 쓰이는 분위사상기법을 비교하여 현업에 더 적합한 방법을 찾고자 하였다. 여기서 비교는 예측력을 향상하는 것뿐만 아니라 현업에 적용하여 동아시아의 과도한 온난화를 해결할 수 있는 방법을 찾는 것에 목적이 있다.

세 번째, 격자기반의 보정, 예측력 비교를 하여 동아시아뿐 아니라 현업에서는 다른 지역에서도 적용하기 용이하도록 하였다. 격자기반의 보정, 비교는 후에 고해상도 모델에서도 크게 다르지 않게 적용할 수 있으리라 판단된다.

네 번째, 본 연구에서 적용한 훈련 기간은 개별모델의 hindcast 기간으로 하여 분석하였기에 다중모델앙상블의 단점일 수 있는 상대적으로 짧은 hindcast를 어느 정도 극복할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 실제 관측의 기후기간은 1991년부터 가장 최근의 시점으로 설정하고 보정을 시행하였기 때문에 현업 자료의 단점인 최근 기후 자료 부재의 문제점을 해결할 수 있을 것이라 판단된다.

따라서 본 연구의 결과로 현업에서 활용할 수 있는 기반이 마련되었다고 판단되고 무엇보다 현업을 생산하면서 제기된 문제점인 동아시아 지역 기온의 과도한 온난화를 해결할 수 있을 것이라 기대한다. 본 연구의 내용은 매년 현업에서 자동으로 생산이 가능한 코드를 작성하여(2024년) 현업에 보조자료로 활용할 수 있도록 할 계획이다.

3.7. 고해상도 MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축

3.7.1. 제5차 모델제공기관회의(MPM) 개최 및 협력체계 구축

APCC는 계절예측정보를 제공해주는 자료제공기관의 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 MPM(Model Providers' Meeting)을 2년마다 정기적으로 개최하고 있다. 올해는 제5차 회의로 각 기관이 예측시스템 현황 및 최근 개선 사항을 공유하고 APCC MME 예측시스템 개선 방안 논의를 위해 8월 29일~31일까지 부산에서 개최되었다(Figure 3.144). 이번 회의에서는 APCC를 포함해 총 10개 기관(호주/미국/러시아/캐나다/일본/대만/한국 기상청, APEC 기후센터, 이탈리아 유럽지중해 기후변화센터, 한국 국립농업과학원)에서 참여하였다.

특히, 이번 회의는 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 요청하였다. 그 결과, 4개 기관(러시아/호주/미국/캐나다 기상청)은 계절내예측자료 제공에 동의하였고, 이탈리아 유럽지중해 기후변화센터는 향후 이음새없는 예측자료 생산 예정이며 이후 자료 제공에 동의하였다. APCC 또한 SCoPS를 활용한 계절내예측자료 시범 생산 계획하고 있으며 향후 2~3년 내에 자료제공이 가능할 것이다. 또한, 일본 및 한국 기상청은 내부 논의를 거쳐 자료제공 동의 여부를 추후 회신할 예정이다. 즉, 이번 회의를 통해 4개 기관 자료제공 동의, 2개 기관 자료제공 예정, 2개 기관 내부 논의 후 자료제공 여부 결정이라는 성과를 이루어 냈다. 이번 회의 결과를 바탕으로 제5차 MPM에 참여하지 못한 자료제공기관(중국/영국/프랑스 기상청, 미국 해양대기청, 러시아 중앙지구물리연구소)에게도 회의록과 함께 자료제공에 대한 요청 서한을 발송 예정이며, 자료수집을 위한 후속조치를 통해 계절내 예측자료를 센터에서 자체 수집할 예정이다.



Figure 3.144. The 5rd APCC Multi-Model Ensemble Model Providers' Meeting(Aug. 29- Sep. 1, 2023, Busan).

3.7.2. MME 계절내예측 운영 기반체계 구축

3.7.2.1. 계절내예측 현황 파악

3.7.2.1.1. 국외 계절내예측 자료 및 시스템 조사

현재 다양한 현업기관에서 계절내 예측시스템을 운영하고 있으며, 계절내 예측에 관한 국제간 프로젝트(WWRP/WCRP S2S, NOAA/CPO Subseasonal Experiment; SubX)를 통해 자료를 제공하고 있다(Figure 3.145). SubX 참여하는 모델은 대부분 북미 모델로 구성되어 있으며, 준실시간(2~3일 지연)으로 IRI Data Library를 통해 자료가 공개 되어있으며, S2S는 현재 전세계 11개 모델이 참여하고 있고 연구 및 교육 목적으로 3주 지연된 자료를 ECMWF, IRI, CMA로부터 받을 수 있다(Figure 3.146). 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(Figure 3.147). 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.

일부 기관에서는 MME 계절내예측시스템을 시범운영 중이며(Figure 3.148), WMO 장기에보 선도센터에서는 S2S 모델을 활용하여 MME 계절내예측시스템을 2016년부터 시험 운영해 오고 있으며, 현재 5개 모델(ECMWF, NCEP, UKMO, ECCO, 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 장기에보 선도센터에서 시범운영 해오던 MME 계절내예측 업무를 수행할 예정이며 현재 6개 모델(CMA, ECMWF, UKMO, KMA, NCEP, ECCO)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.

		Center	Model version	Forecast frequency	Forecast Time range	Forecast Ens. Size	Hindcast frequency	Hindcast Ens. Size	Hindcast period
S2S	WMO	BoM	POAMA P24	2/week(Sun, Thu)	0-61	33	6/month(1,6,11,16,21,26)	33	1981-2013
		CMA	BCC-CPS-S2Sv2	2/week(Mon, Thu)	0-60	4	2/week(Mon, Thu)	4	Past 15 years
		ECMWF	CY47R3	2/week(Mon, Thu)	0-46	51	2/week(Mon, Thu)	11	Past 20 years
		JMA	GEPS2203	Weekly(Wed)	0-34	50	2/month(15, last day)	13	1991-2010
		NCEP	CFSv2	Daily	0-44	16	Daily	4	1999-2010
		UKMO	GloSea6	daily	0-60	4	4/month(1, 9, 17 and 25th)	7	1993-2016
		ECCC	GEPS7	Weekly(Thu)	0-32	21	Weekly(Thu)	4	2001-2020
		KMA	GloSea6 GC3.2	Daily	0-60	4	4/month(1, 9, 17, 25)	3	1993-2016
		MF	CNRM-CM6.0	Weekly(Thu)	0-32	51	4/month(1, 8, 15, 22)	15	1993-2012
		HMCR	RUMS	Weekly (Thu)	0-46	41	Weekly(Thu)	11	1990-2015
		ISAC-CNR2	GLOBO	Weekly (Thu)	0-32	41	Every 5 days (2, 7, 12, 17, 22, 27)	5	1981-2010
SubX	ECCC	(Same as S2S)							
	EMC	GEFSv12	Weekly(Wed)	0-35	31	Weekly(Wed)	11	2000-2018	
	ESRL	FLMr1p1	Weekly(Wed)	0-32	4	Weekly(Wed)	4	1999-2016	
	GMAO	GEOS_V2p1	Every 5 days	0-45	4	Every 5 days	4	1999-2015	
	NCEP	(Same as S2S)							
	NRL	LESM	Daily	0-45	1	- 4 days	1	1999-2016	
	RSMAS	CCSM4	Weekly(Sun)	0-45	9	Weekly(Sun)	3	1999-2016	

Figure 3.145. Subseasonal to seasonal datasets from S2S and SubX project.

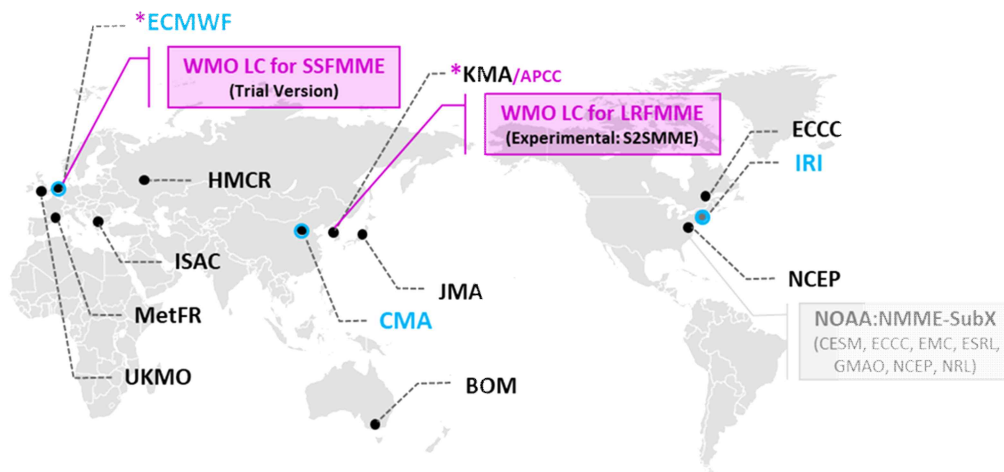
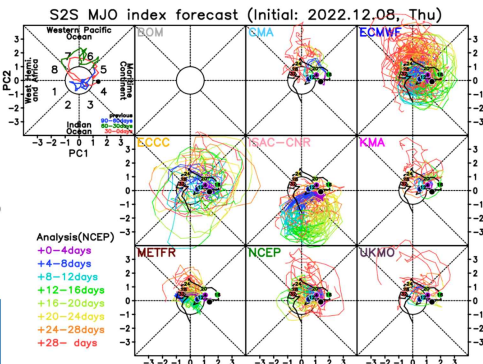
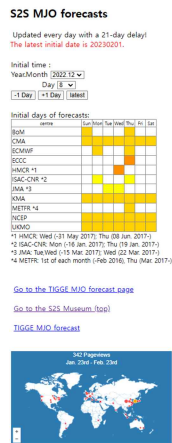


Figure 3.146. Contributing centers in S2S and SubX projects; S2S data provider (black circle), Archiving data centre (blue circle), WMO Lead Center for long-range forecast MME (WMO LC-LRFMME) and subseasonal to seasonal forecast MME (WMO LC-SSFMMME).



Forecast period starting on 2023/02/02

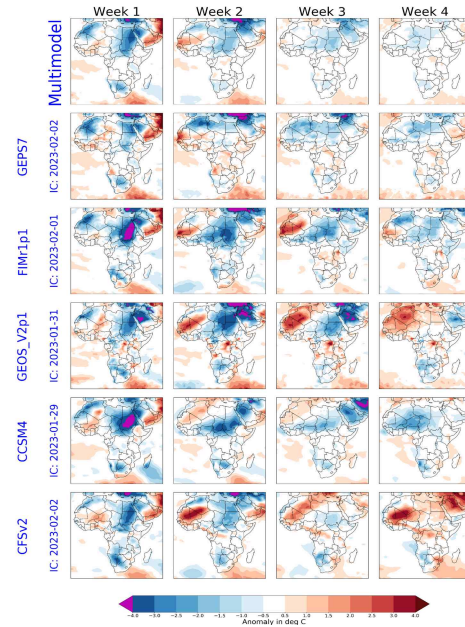


Figure 3.147. Examples of S2S MJO forecasts in S2S Museum (left) and Climate Hazards Center (right).

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

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

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

Type	Product/Variable	Frequency/Period	Region	Model	Verification	Note
<ul style="list-style-type: none"> Median probabilities Biweekly probabilities Weekly probabilities Flexible biweekly probabilities Flexible weekly probabilities 	<ul style="list-style-type: none"> 2m temperature Precipitation 	<ul style="list-style-type: none"> Weekly/week 3-4 Weekly/week 2-3, 3-4 Weekly/week 2, 3, 4 Weekly/week 2-3, 3-4 Weekly/week 1, 2, 3, 4 	<ul style="list-style-type: none"> Global, Africa Asia, Australia Europe, Pacific Middle East North/Central/South America Caribbean 	<ul style="list-style-type: none"> Multi-model (only) 	<ul style="list-style-type: none"> RPSS(weekly 2-3, 3-4) RPSS(weekly 1, 2, 3, 4) 	<ul style="list-style-type: none"> Issued weekly on Fridays Weekly means for calendar week(Mon to Sun) SubX datasets

❖ NMME-SubX: CPC(Operation, weather.ou.edu/~kpegon/subx/forecasts/forecasts.html)

Type	Product/Variable	Frequency/Period	Region	Model
<ul style="list-style-type: none"> Ensemble mean (anomalies) 	<ul style="list-style-type: none"> 2m temperature 500hPa geopotential height Precipitation 	<ul style="list-style-type: none"> Weekly/Week 1,2,3,4, 3-4 	<ul style="list-style-type: none"> Global North America Northern Hemisphere (only for Z500) 	<ul style="list-style-type: none"> ESRL-FIMr1p1 RMSAS-CCSM4 EMC-GCFSv12_CPC GMAO-GEOS-V2p1 NRL-NESM ECCC-GEPS7 NCEP-CFSv2 SUBX-MME

> Real-time forecasts to inform CPC operational forecasts (Week 3-4 Outlooks; temperature & precipitation (Exp.))

Figure 3.148. S2S MME prediction systems from WMO LC-SSF MME, IRI, and NOAA/CPC.

3.7.2.1.2. 센터 내 계절내예측 자료 및 연구 조사

본 연구에서는 APCC가 보유 중인 계절내 예측자료 현황 및 센터에서 수행해 온 계절내예측 연구를 조사하고 종합적인 리뷰를 통해 활용 가능성을 파악하였다. 우선, 예측자료의 경우 MME를 수행하기 위해서는 참여모델의 공통 과거재현기간을 활용한 기후값으로 예측에 대한 편차를 계산하기 때문에 MME 분석을 위해서는 과거재현기간이 개별 모델에 비해 짧아지는 한계점이 있다. 현재 WMO에서 활용 중인 5개 모델(ECMWF, ECCO, NCEP, UKMO, KMA)의 공통 과거재현 기간은 9년(2002~2010년)으로 이는 예측성 평가 및 예측기술 개발 결과에 대한 보편적이고 일관된 결과를 도출하기에는 상당히 짧은 기간이다. 따라서 본 연구에서는 이를 극복하기 위해 SubX에서 제공하는 NCEP의 2010~2016년의 6시간 원시자료를 수집/표준화하여 결과적으로 분석 기간을 9년에서 15년(2002~2016년)으로 확장하였다. 또한, 과거재현기간의 예측정보가 타 모델과 특성이 달라 2020년 3월 모델 개선 이후 WMO 현업에 활용하지 못했던 JMA에 대한 전처리 작업을 수행함으로써 기존의 5개 모델에서 6개 모델로 참여모델을 확장 시켰다.

문자연 등(2018)은 센터에서 처음으로 계절내규모의 예측 기술개발 및 예측성 평가를 수행한 과제로, MME 공통 과거재현기간 및 모델 가중치에 대한 다양한 민감도 분석에서부터 계절내 규모의 기후현상(MJO, 블로킹)에 대한 재현 가능성 진단 및 특성 분석을 수행한 연구이다. 문자연 등(2018)은 용이한 비교 분석을 위해 예측날짜(목요일 기준)와 동일한 과거재현날짜의 자료를 제공하는 3개 모델(ECMWF, ECCO, NCEP)의 12년(1991~2010년) 예측자료(hindcast@v2017) 및 2016/17 실시간 예측자료를 활용한 분석으로 MME에 대한 보편적인 결과를 보장하기에는 참여모델의 수가 적고, 동일한 조건의 목요일 예측모델만 활용한 점은 현업에 적용하기에는 한계가 있다. 하지만 연구에서 적용한 MME 기법 및 과거재현기간에 따른 민감도 실험 등은 최근 개선/개발된 최신의 모델의 예측자료, 다양한 모델 참여, 과거재현기간 확대 등을 통해 추후 계절내예측 기술개발 단계에서 충분히 적용해 볼 가치가 있다고 판단된다.

그 이후 기상청 현업모델 KMA-GloSea5을 초점으로 예측활용 및 예측성 평가 가이드라인 개발을 목적으로 김가영 등(2019, 2020)의 연구들이 수행되었다. 이는 GloSea5의 오차분석 및 특성 진단을 위해 GloSea5의 12년(1991~2010년) 예측자료(hindcast@v2018, 2019)를 활용하여 타 모델과의 상대적인 예측력 비교평가에 초점을 맞춘 연구로 계절내 MME 예측까지 분석을 확대하진 않았다. 특히 김가영 등(2020)에서는 GloSea5 기후값 생산 방안에 따른 몇 가지 실험을 전구/열대/동아시아에 대해서 2019년 실시간 예측에 대해서 수행하였다. 그 결과, GloSea5 모델의 예측성능을 향상시키기 위해서는 기후값을 생산할 때 거리가중치를 두는 방법보다는 예측날짜와 가까운 다양한 과거재현자료를 생산하는 것이 더 효율적임을 제시하였다. 또한 김가은 등(2021)은 주 2회 예측자료를 생산하는 ECMWF 모델을 활용하여 동아시아 지역을 대상으로 2019년 1월~2021년 6월까지 총 139회 실시간 예측결과에 대해 기후값 민감도 실험을 수행하였으며 그 결과 기후값에 따른 예측력 차이는 크지 않음을 확인하였다. 즉, 기존의 센터에서 수행되었던 선행 연구들은 특정 지역/모델을 대상으로 실시간 예측자료를 활용한 분석이라는 한계점이 있으며, 본 연구에서는 이를 극복하기 위해 현업을 목적으로 전구를 대상으로 최종적으로 다양한 모델을 적용한 MME에 적합한지에 대한 판단 및 안정적인 예측력 분석을 위해 긴자료(hindcast)에 대한 종합적인 분석을 수행할 예정이다.

3.7.2.2. MME 계절내예측 현업운영 체계 구축

본 과제는 현업을 목적으로 시작된 사업으로 WMO S2S 현업자료를 활용하여 우선적으로 특성이 상이한 개별모델의 전처리 및 MME 수행을 위한 Pilot 시스템을 개발하였다(Figure 3.149). 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 2.15의 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, v200이다. 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 3.150에 나타내었다.

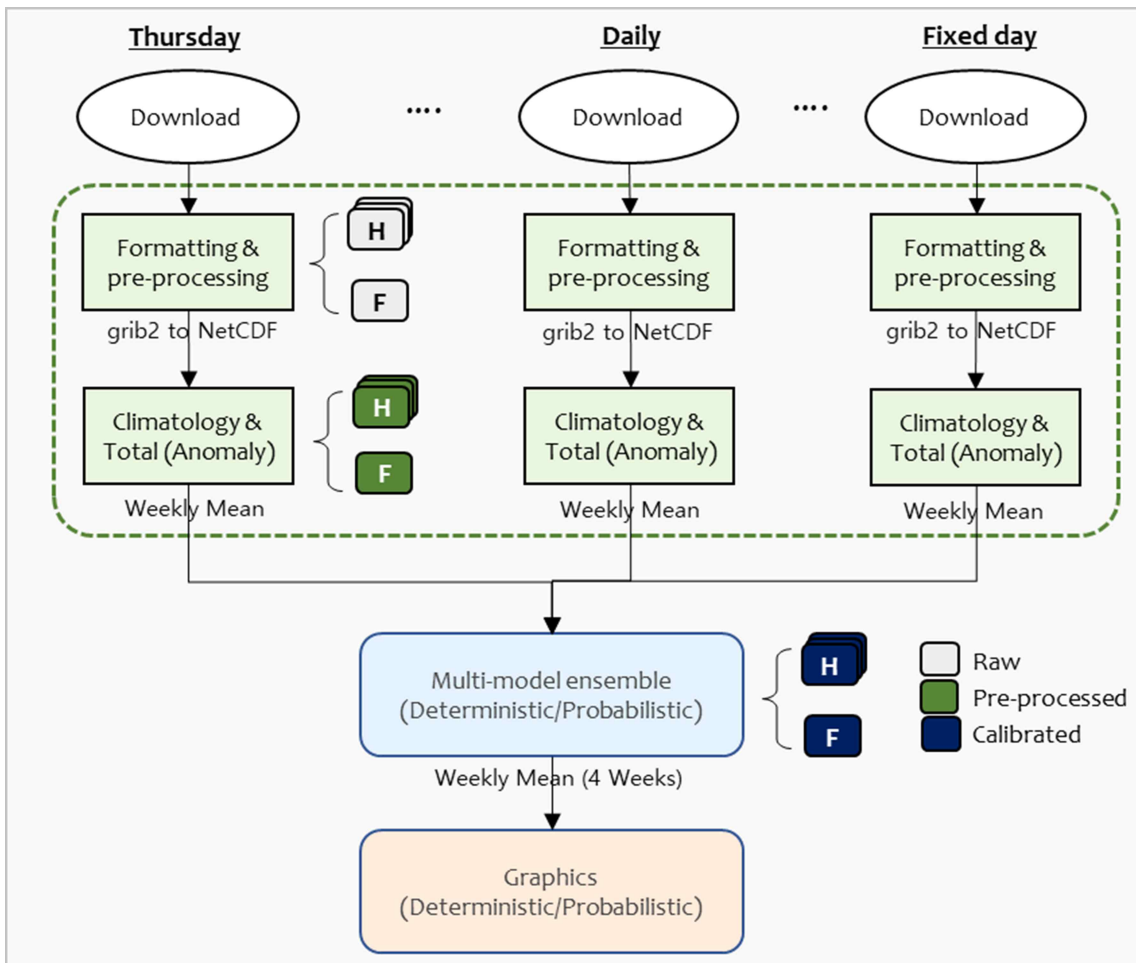


Figure 3.149. MME subseasonal forecast procedures in pilot system.

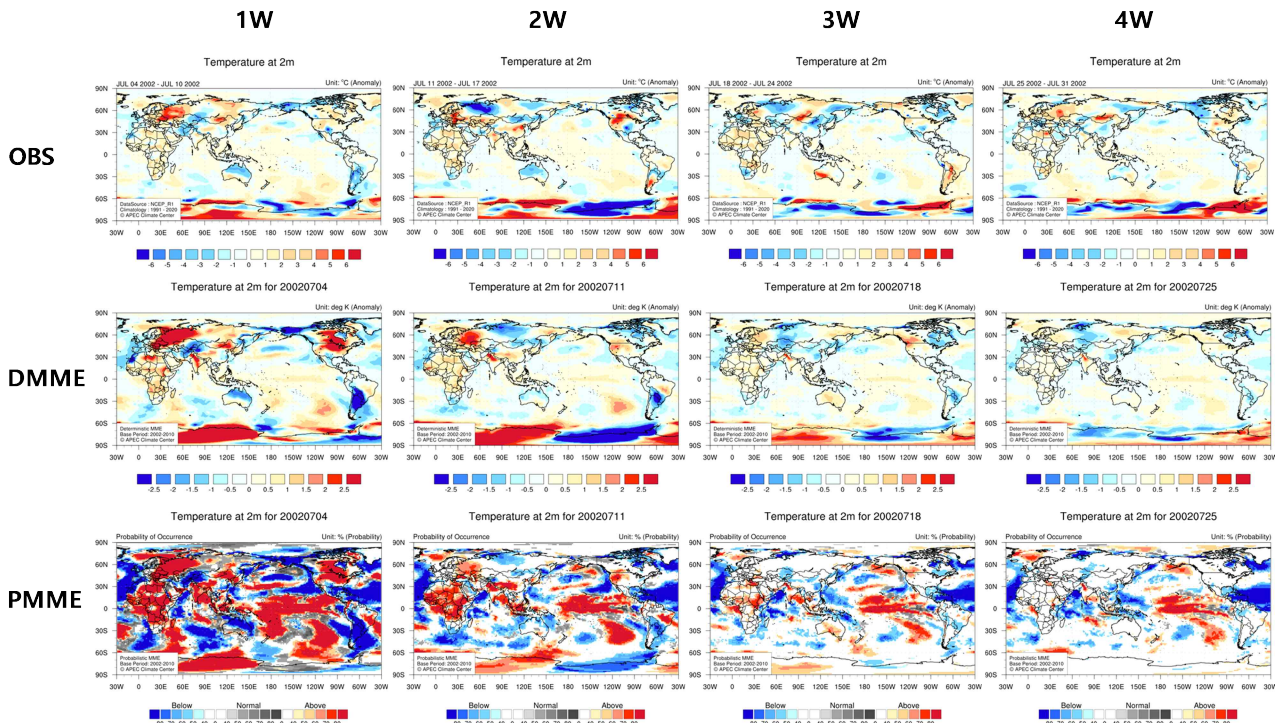


Figure 3.150. Observations and 1~4 weeks subseasonal (deterministic and probabilistic) MME forecasts during 4~25 July 2022.

3.7.2.3. MME 계절내예측 현업운영을 위한 기반 연구

3.7.2.3.1. 참여모델 기후값 재현능력 평가

WMO 장기예보 센터로부터 제공받은 자료 및 본 연구에서 추가로 수집한 자료에 대한 전처리 확인을 위해 개별모델의 기후값을 우선 평가하고자 한다. 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 개별모델의 공통재현기간 2002~2016년(15년)에 대한 결과값이다. Figure 3.151~3.152의 가로축은 관측에 대한 모델 기후값의 오차를 나타낸 것으로, 선행시간이 1일(동그라미)에서 32일(별표)로 길어짐에 따른 차이를 확인할 수 있다. 초기 선행시점에서 대부분의 모델은 관측과 유사하며, 전구 지표 기온은 과소모의하는 경향을 보이며 선행시간이 길어질수록 음의 오차는 증가한다. 하지만 지역적으로 살펴보면, 적도 지역은 서태평양 지역에서 양의 오차를 보이는 반면, 특히 남극 대륙 및 북반구 고위도 대륙에서 선행시간이 길어질수록 음의 오차가 점차 커지는 것을 확인 할 수 있다(Figure 3.153). 또한 예측날짜에 대한 경년변동성이 실제 관측과 얼마나 다른지를 Figure 3.151~3.152의 표준편차값의 오차를 통해 확인할 수 있으며, 변수/모델에 관계없이 선행시간이 증가할수록 모델이 모의한 변동성은 감소하는 경향이 뚜렷하다.

NCEP은 다른 모델과 달리, 초기 선행시점에서 기후값을 과대모의하는 경향을 보이며 선행시간이 길어질수록 오차는 줄어든 것으로 보인다. 하지만 초기 선행시점에서 NCEP은 남극과 북극과 맞닿은 북반구 고위도 해안선에서 강한 양의 오차를 보이며, 선행시간이 길어질수록 이

러한 양의 오차는 다소 줄어들지만(유라시아 대륙 일부) 상대적으로 대륙지역의 음의 오차가 점차 강해지면서 강한 음/양의 값이 상쇄되어 나타나는 현상으로 선행시간이 길어지면서 관측과 가깝게 모의했다고 보기는 어렵다(Figure 3.153). 또한 ECCC의 경우, 초기 선행시점에서는 관측과 유사하나 선행시간이 길어짐에 따라 오차가 다른 모델과 달리 과대모의하는 것으로 나타났다. 이는 초기 선행시점에서는 나타나지 않았던 북극과 맞닿은 북반구 고위도 해안선의 강한 양의 오차가 선행시간이 길어지면서 커지면서 전구 평균적으로 과대모의하는 것으로 나타났다.

강수의 경우, 초기 선행시간에서 대부분 모델은 과대모의(특히, 적도지역)하는 경향을 보이며 선행시간이 증가에 따른 오차는 변화는 크지 않은 것으로 보였다(Figure 3.154). 지위고도는 초기 선행시점에서 대부분의 모델의 과소모의하는 경향을 보이며, 선행시간에 따른 변화는 모델 별로 다르게 나타났다(Figure 3.155).

기후값의 공간분포 유사성 및 절대값 차이를 검증하고자 PCC/RMSE 지수를 적용한 결과를 Figure 3.156에 제시하였다. 선행시간이 증가함에 따라 대부분 지역/변수/모델에서 공간분포 유사성에 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 모델은 ECMWF이며 이는 기존의 연구들과 일치하는 결과를 보이며 본연구에서 활용한 자료의 수집 및 전처리/표준화 작업이 안정적으로 되었음을 확인하였다.

Long Term Mean and Standard-Deviation (T2M)

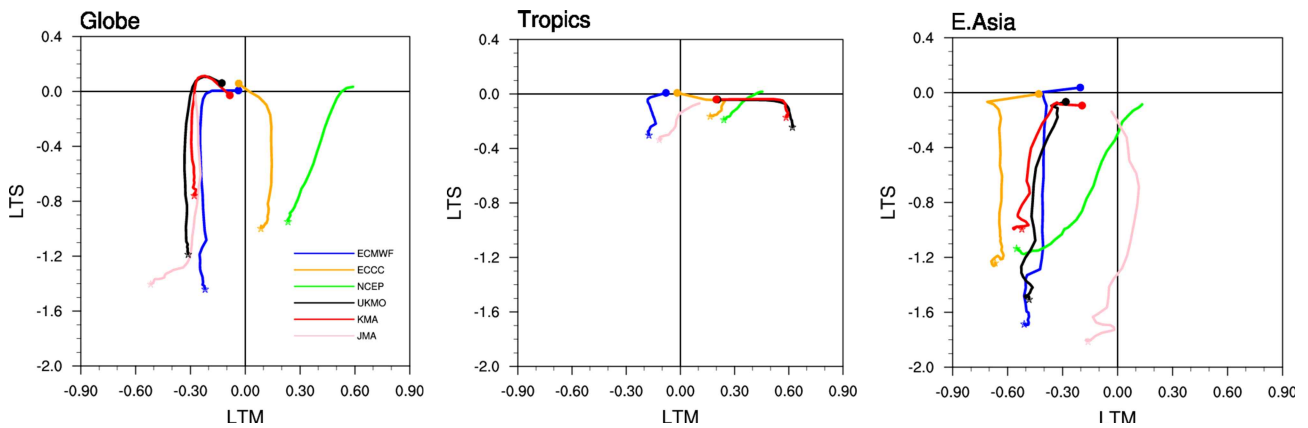


Figure 3.151. Temporal evolution of biases in long-term mean (LTM) and long-term standard-deviation(LTS) of temperature at 2m (T2M) over globe, Tropics, and E. Asia increasing lead days from 1 to 32 for 6 models. Bias is defined as a mean value of differences relative to the observed LTM and LTS over globe during all year around.

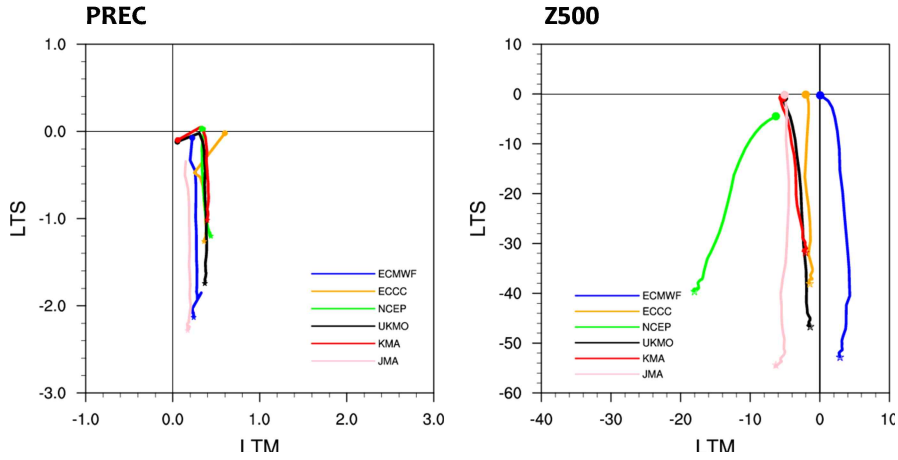


Figure 3.152. Same as Fig. 3.151, except for PREC and Z500 over globe.

Mean Bias (Temperature)

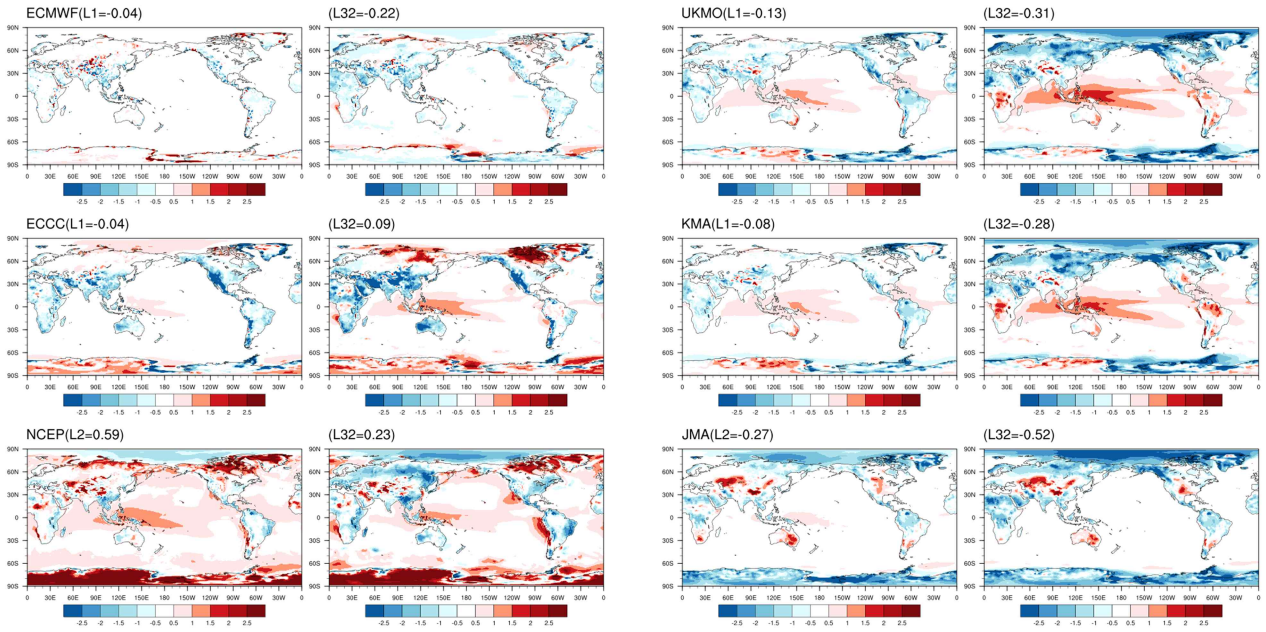


Figure 3.153. Bias in long-term mean (climatology) of temperature at 2m at 1 and 32 leads for 6 models.

Mean Bias (Precipitation)

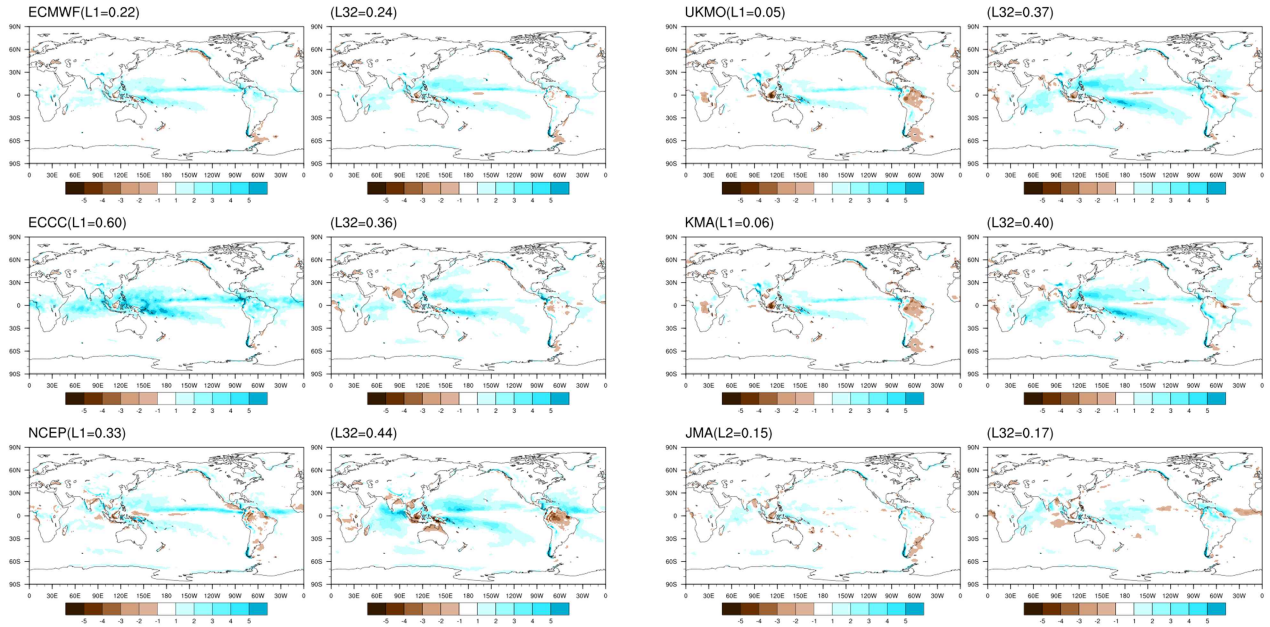


Figure 3.154. Same as Fig. 3.153, except for precipitation.

Mean Bias (Geopotential Height)

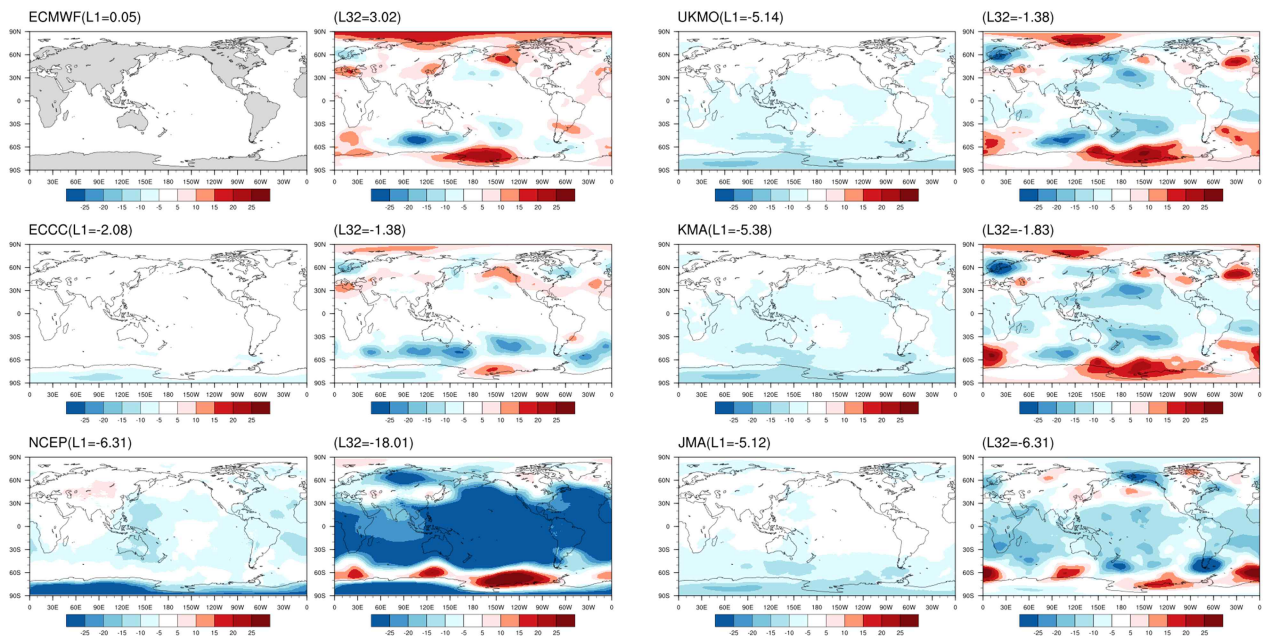


Figure 3.155. Same as Fig. 3.153, except for geopotential height at 500hPa.

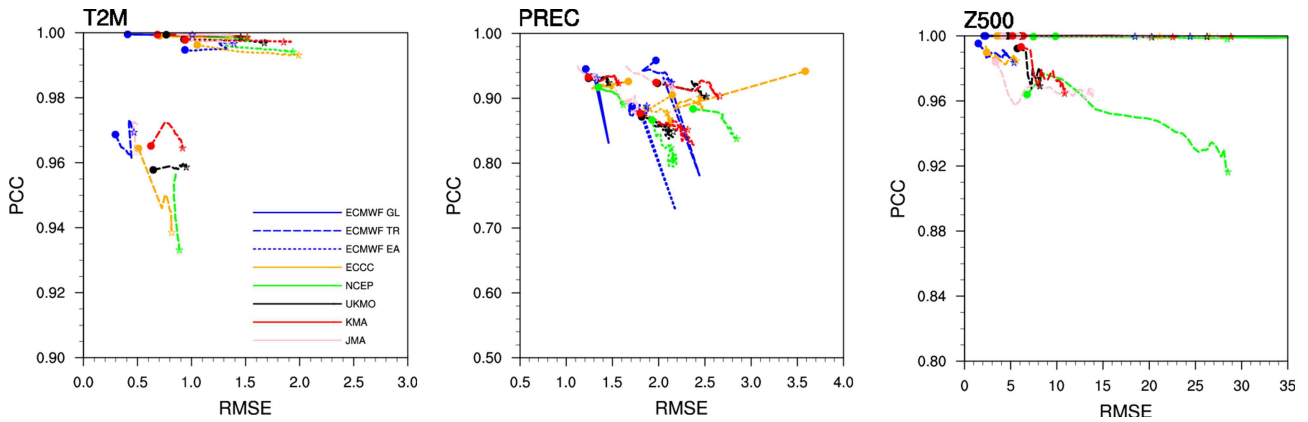


Figure 3.156. Temporal evolution of PCC and RMSE of long-term pattern for three variables with increasing lead days from 1 to 32 over globe, tropics and East Asia domains for 6 models during all year round.

3.7.2.3.2. 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 SubX 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 과거재현예측정보를 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.

3.7.2.3.2.1. 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., 2018; 김가영 등, 2019; 김가은 등, 2021; Zheng et al., 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 과

거재현자료 수를 늘이는 방법을 다양한 모델에 적용하여 최종적으로 MME 계절내예측에 영향을 미치는지 알아보았다(Table 3.11). 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 3.11).

Figure 3.157은 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.

$$ACC\ DF(\%) = \frac{ACC_{clim} - ACC_{clim3w}}{ACC_{clim3w}} \times 100 \quad [3.5]$$

$$RMSE\ DF(\%) = \frac{RMSE_{clim3} - RMSE_{clim3w}}{RMSE_{clim3w}} \times 100 \quad [3.6]$$

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 3.158). 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.

Table 3.11. 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, %)

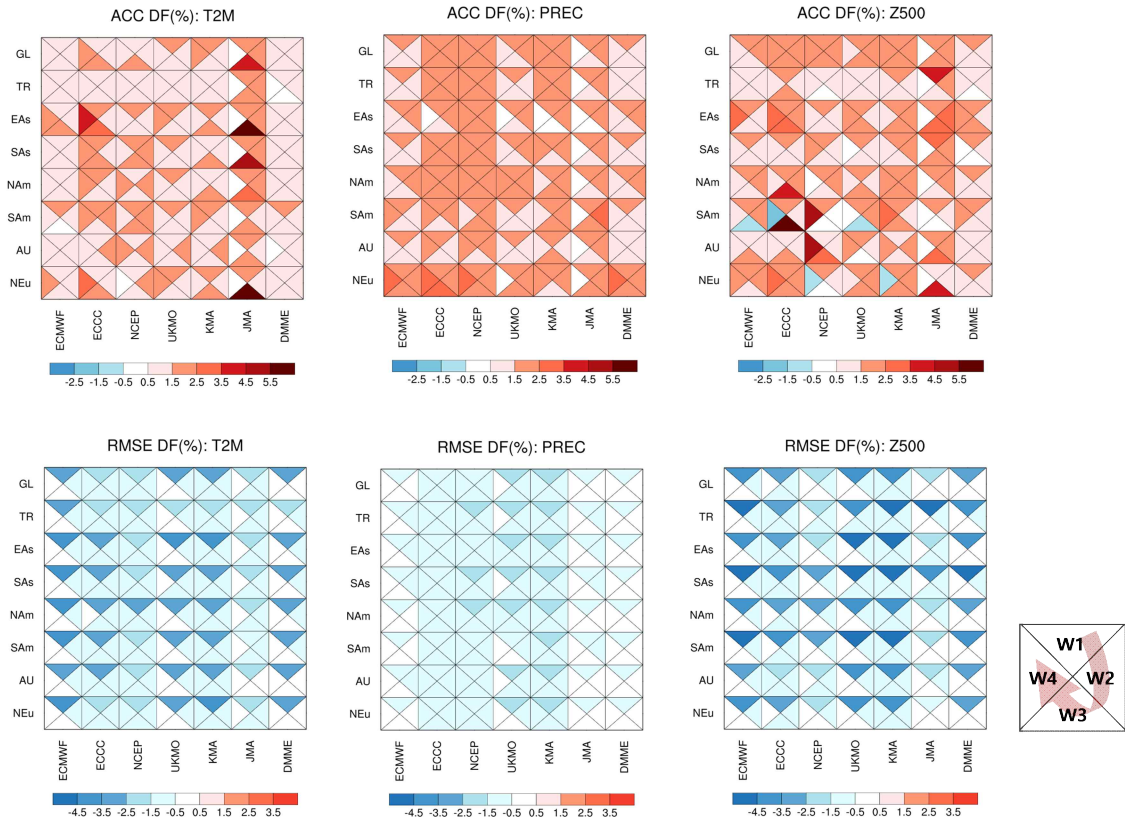


Figure 3.157. Relative skill difference of clim in terms of annual mean ACC and RMSE for the period 2002–2016 related to clim3w for each model and MME(%) of temperature at 2m(T2M), precipitation(PREC) and geopotential height at 500hPa(Z500) over 8 regions.

Relative Skill Difference w/clim (MME, %)

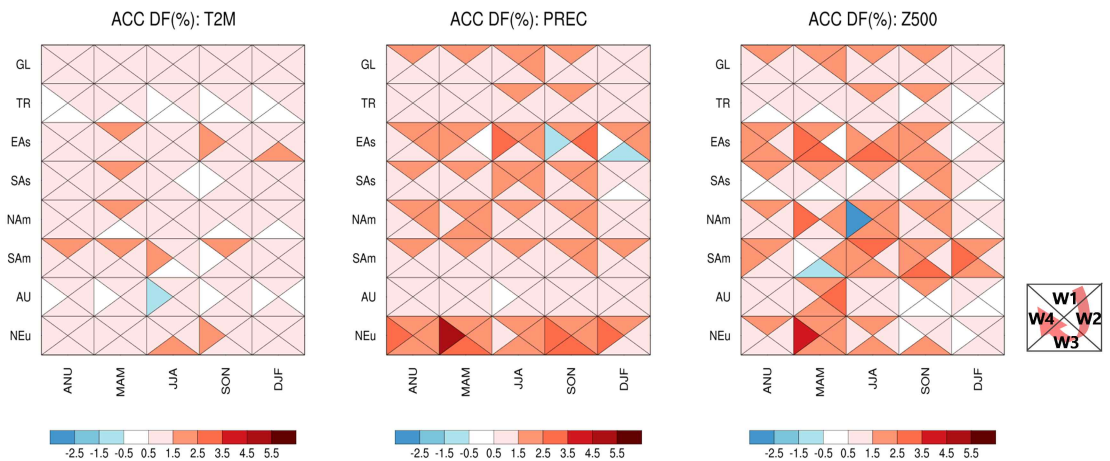


Figure 3.158. Relative skill difference of clim in terms of annual and seasonal mean ACC and RMSE for the period 2002–2016 related to clim3w for MME(%) of temperature at 2m(T2M), precipitation(PREC) and geopotential height at 500hPa(Z500) over 8 regions.

3.7.2.3.2.2. 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 3.159). 반면 MME 예측일을 월요일로 하는 경우 ECMWF는 목요일 예측자료 중 다섯 번째 리드의 월요일 자료를 시작으로 월~일요일까지 평균이 1주가 된다(Figure 3.160).

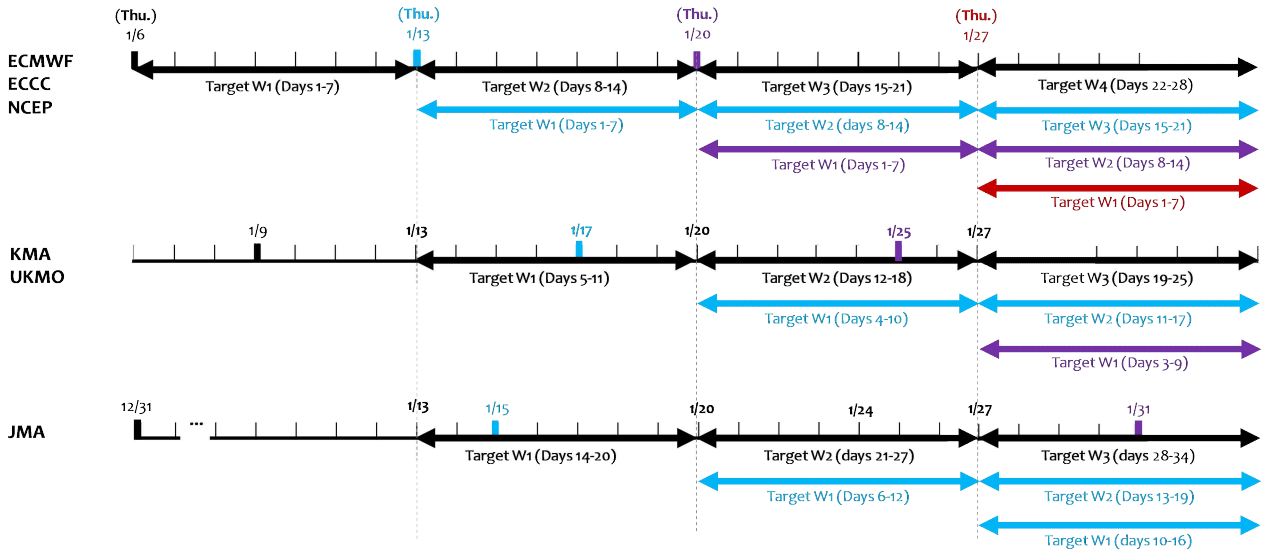


Figure 3.159. Diagram for individual models when Thursday is the MME forecast day.

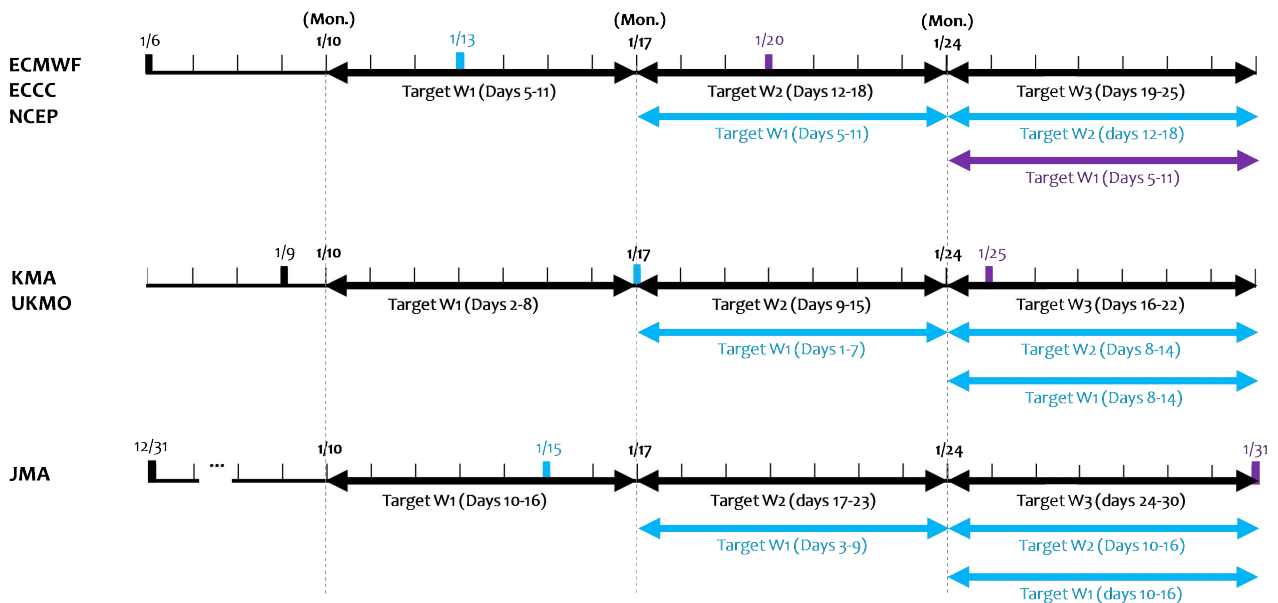


Figure 3.160. Same as Fig. 3.159, except for Monday.

MME 예측일을 목요일(이론적인 예측력)에서 하루씩 변경 해가면서 개별모델 및 MME 예측력 변화를 살펴보았다(Figure 3.161~3.163). 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 보

이며, 강수는 1주에서 0.10% 예측력 차이를 보인다. 하지만 4주 이상부터는 MME 예측일에 따른 전구 예측력 차이는 크지 않은 것으로 보이며 지역적으로도 동일한 결과를 보였다(Figure 3.164).

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. 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 예측자료부터 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.

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 3.165). 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 3.166에 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.

Anomaly Pattern Correlation (T2M)

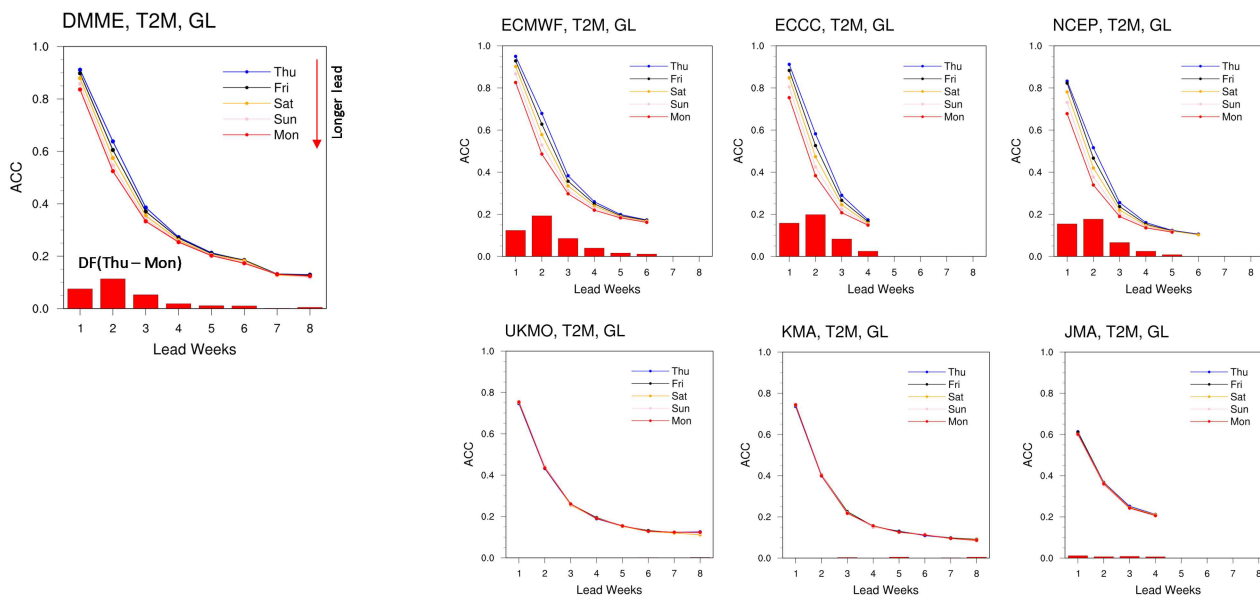


Figure 3.161. ACC of individual models and MME T2M prediction over globe for 4 lead weeks depending on MME target forecast day from Thursday to Monday. The skill difference between MME forecasts at target day on Thursday and Monday is displayed with histogram.

Anomaly Pattern Correlation (PREC)

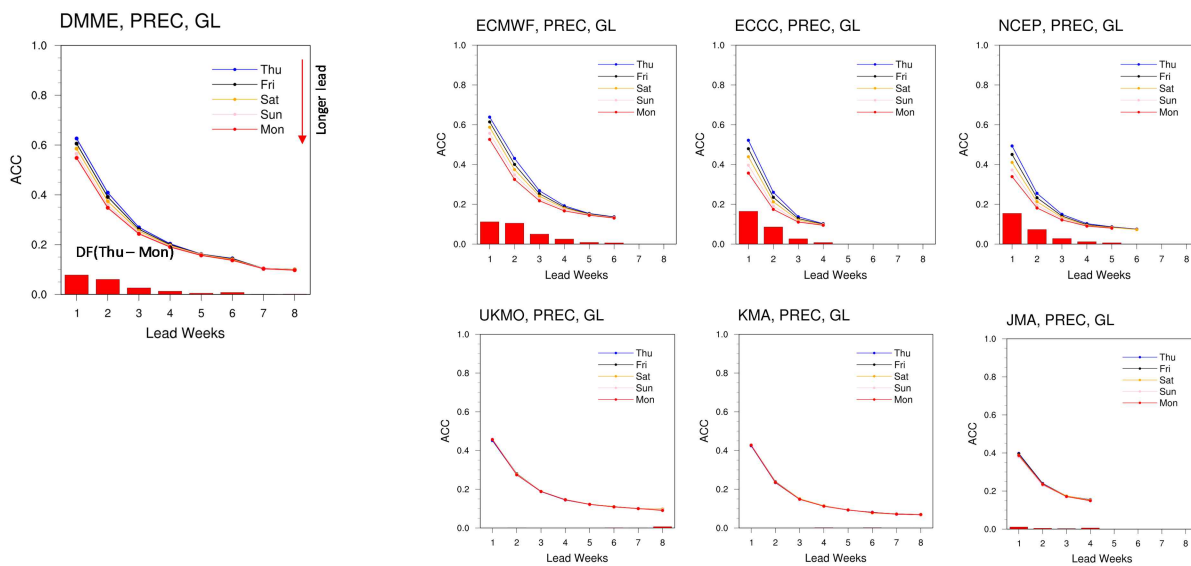


Figure 3.162. Same as Fig. 3.161, except for PREC.

Anomaly Pattern Correlation (Z500)

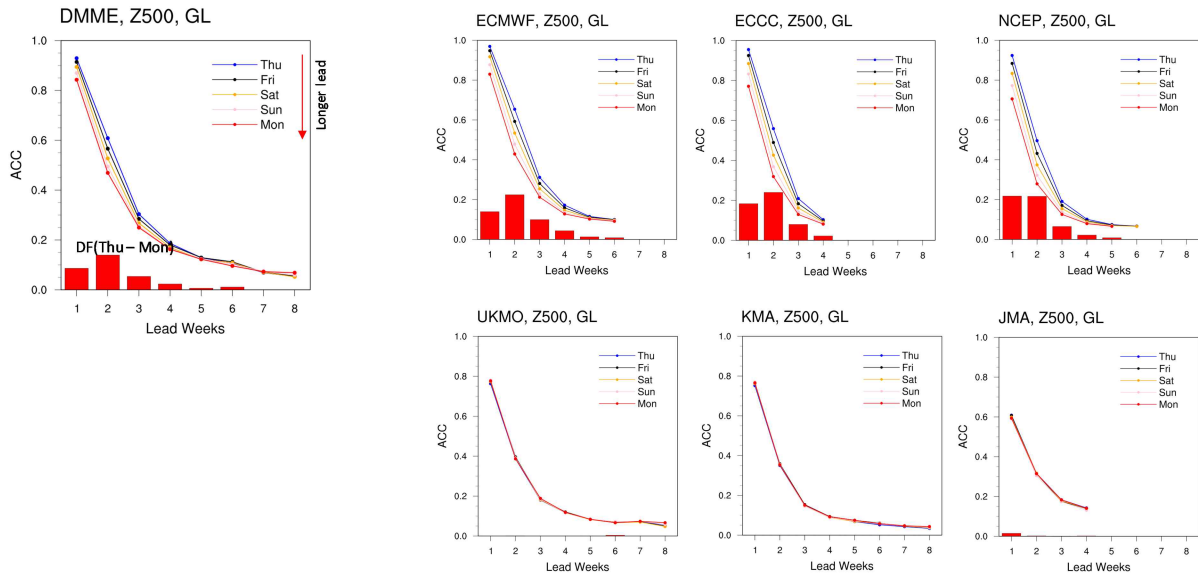


Figure 3.163. Same as Fig. 3.161, except for Z500.

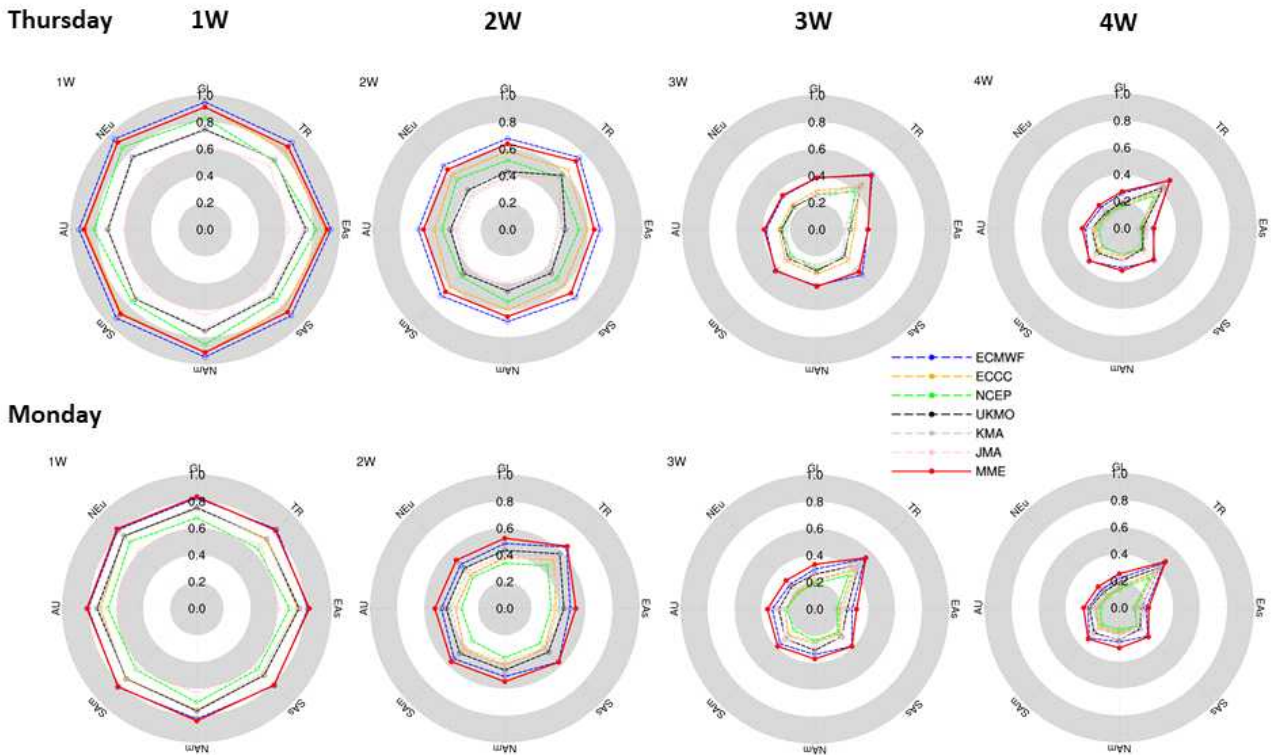


Figure 3.164. ACC of individual models and MME T2M prediction over 8 regions for 4 lead weeks at target day on Thursday and Monday.

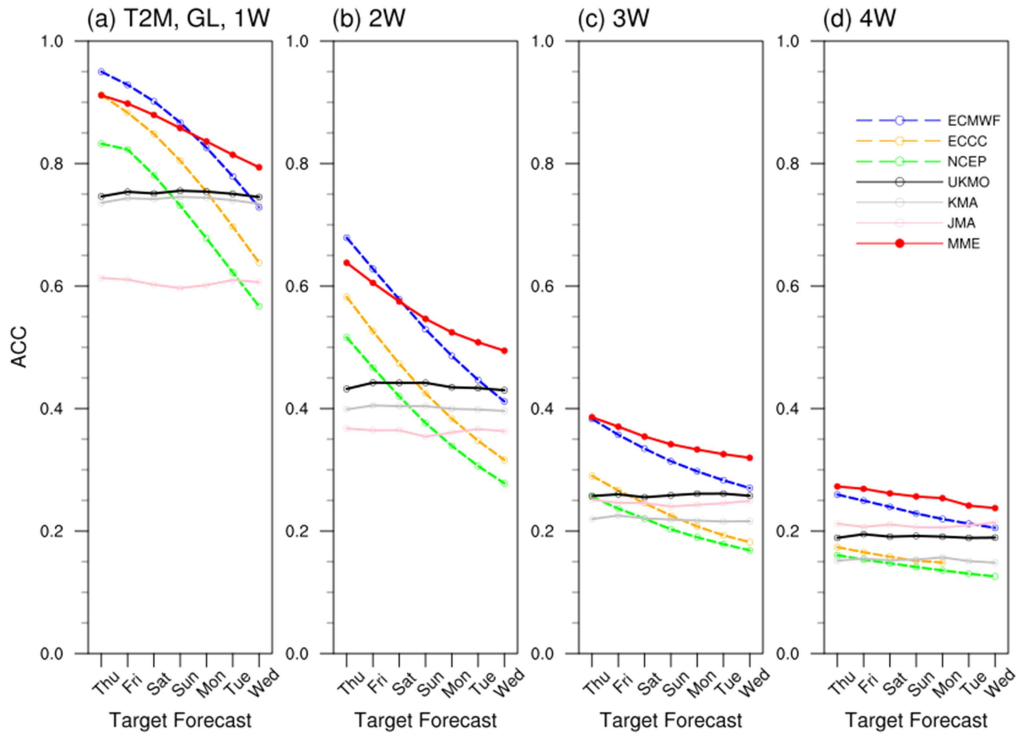


Figure 3.165. ACC of individual models and MME T2M prediction over globe for 4 lead weeks depending on MME target forecast day from Thursday to Wednesday.

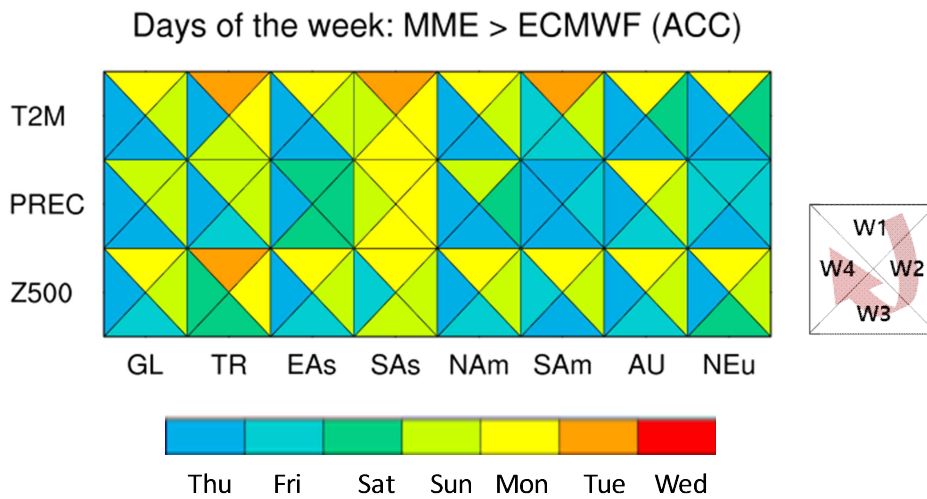


Figure 3.166. MME forecast day at which prediction skill for MME becomes higher than that for ECMWF for each variable and region for 4 lead weeks.

3.7.2.3.3. 개별모델 및 MME 예측성 평가

앞선 일자료 처리 방안 마련을 위한 민감도 실험 결과를 바탕으로, 개별모델의 기후값은 예측일과 동일하거나 가장 가까운 과거재현자료를 활용하는 방법(clim)으로 MME 예측 타겟일은 월요일을 기준으로 주(월~일 평균)를 정의하였다. Figure 3.167은 개별모델 및 MME 주별 예측성 평가에 앞서 MME의 기후값 재현능력을 먼저 살펴보았다. MME는 각 모델의 구조적인 오차가 줄어들면서 앞선 Figure 3.153~3.155에서 보여준 개별모델에 비해 오차가 상당히 적게 나타나며, 리드 증가에 따른 관측과의 오차는 초기 선행시점에 보여준 오차와 같은 방향으로 증가하는 경향을 보였다. 하지만 전반적으로 모델에서 나타났던 변수별 주요한 오차 특징(예, 기온의 경우 대부분의 대륙에서는 과소모의, 서태평양/인도양 지역에서는 과대모의, 강수의 경우 ITCZ를 따라 서태평양/인도양에서의 과대모의 등)은 그대로 유지되는 경향을 보였다.

Figure 3.168은 3개 변수에 대해서 6개의 개별모델 및 MME 예측자료의 전구 주별 예측성 및 누적 예측성을 보여준다. 여기서 MME는 6개 모델 예측의 단순평균값으로, 1~4주까지는 6개 모델이 모두 참여하고, 5주부터는 개별모델의 예측길이 한계로 인해 참여모델 수가 점차 줄어든다. 모든 모델 및 MME는 선행시간이 증가할수록 예측력이 떨어지며, 예측력 감소율은 선행시간이 증가할수록 줄어드는 경향을 보였다. 전구평균 기온 및 지위고도는 1주에서 개별모델은 약 0.6~0.8 정도의 상당히 높은 예측력을 보이고, 강수의 경우 다른 두 변수에 비해서는 다소 낮은 0.35~0.55 정도의 예측력을 보였다. 그 결과, 대부분의 예측자료는 변수별로 정도의 차이가 있으나 누적된 예측성능 중 1주 선행시간의 예측성이 가장 큰 부분을 차지하고, 선행시간이 증가할수록 해당 선행시간이 차지하는 예측성의 비율이 줄어든다. 개별 모델 중 ECMWF는 타 모델에 비해 상대적으로 높은 예측성을 4주 이상까지 유지하고 특히 강수에 대해서는 다른 모델에 비해 높은 편이다. 개별모델의 주별 예측성을 지역별로 살펴보면(Figure 3.169~3.171), 전반적으로 예측자료들의 변수별/지역별 예측성의 차이는 있지만 앞서 언급한 바와 같이 선행 1주에서 가장 높고, 예측 선행시간이 증가할수록 지역간 예측성능 차이는 커지는 것으로 나타났다. 열대지역의 예측성은 다른 지역에 비해 변수에 상관없이 상대적으로 높고 4주에도 기온 및 지위고도의 경우 0.3~0.4 정도의 예측력이 유지되는 반면, 동아시아 및 유라시아 대륙은 3~4주로 갈수록 예측력이 급격하게 떨어지며 강수의 경우 개별모델의 예측성능이 0에 가까워진다.

MME 예측성을 살펴보면, 1주 일부지역(적도 및 남미지역에서 지표기온)을 제외하고는 지역/변수/주 관계없이 모든 개별모델에 비해 MME 예측력이 우수하게 나타나며, 특히 상대적으로 3~4주에서 개별모델에 비해 MME 예측력이 높게 나타난다. 그 결과, 기온 및 지위고도는 4주 누적 예측성이 2.0에 가까운 값을 보이며 예측력이 오랫동안 지속됨을 나타낸다. 마지막으로 S2S 규모에서의 MME 효율성을 확인하기 위해 개별모델 평균 대비 MME 예측력의 상대적인 비율을 Figure 3.172에 제시하였다. 또한, 개별 모델 중 최고의 예측력을 보이고 있는 ECMWF에 대해서도 MME의 효율성을 함께 평가하였다.

$$MMEEfficiency_{Mean}(\%) = \frac{ACC_{MME} - ACC_{Mean}}{ACC_{Mean}} \times 100 \quad [3.7]$$

$$MMEEfficiency_{ECMWF}(\%) = \frac{ACC_{MME} - ACC_{ECMWF}}{ACC_{ECMWF}} \times 100 \quad [3.8]$$

전구 평균 기온/강수/지위고도 모두 1-4주 모두 개별모델 평균 예측력에 비해 MME 예측력이 높게 나타나며(ACC: 30-40%), 개별모델 중 최고의 예측력을 보이는 ECMWF 비해서도 1-4주 평균 약 10-20% 정도의 높은 예측력을 보인다. 특히, 변수에 상관없이 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 어려운 점이 있으며, 4주 이상부터는 참여모델 수가 점차 작아지기 때문에 MME 효율성이 낮아지는 것으로 이해된다. 지역적으로 살펴보면(Figure 3.173) 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. 따라서, 본 연구를 통해 S2S 규모에서 개별모델 대비 MME 효율성이 높음을 확인하였고, 특히 예측력이 낮은 지역 3-4주에서 MME의 가능성을 파악하였다. 이는 기존의 연구(문자연, 2018)에서 제시했던 결론에 비해 MME 적용 효율이 크게 진단한 결과라고 할 수 있으며, 이는 문자연 등(2018)은 3개 모델로 제한되었다는 것과 3개의 모델 중 최고 성능모델인 ECMWF를 포함했다는 점에서 MME 장점을 살리기에는 한계가 있었던 것으로 보인다.

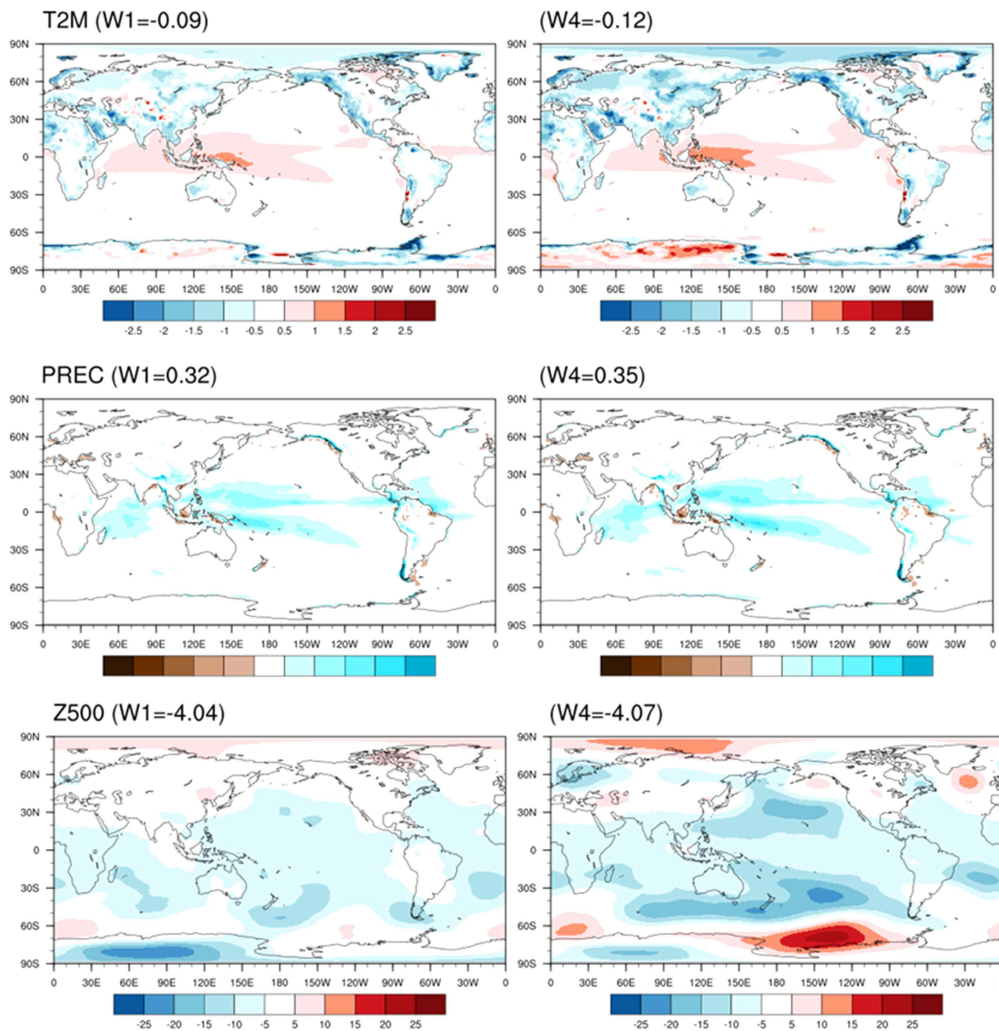


Figure 3.167. Bias in long-term mean (climatology) of T2M, PREC and Z500 at 1 and 4 lead weeks for multi-model ensemble.

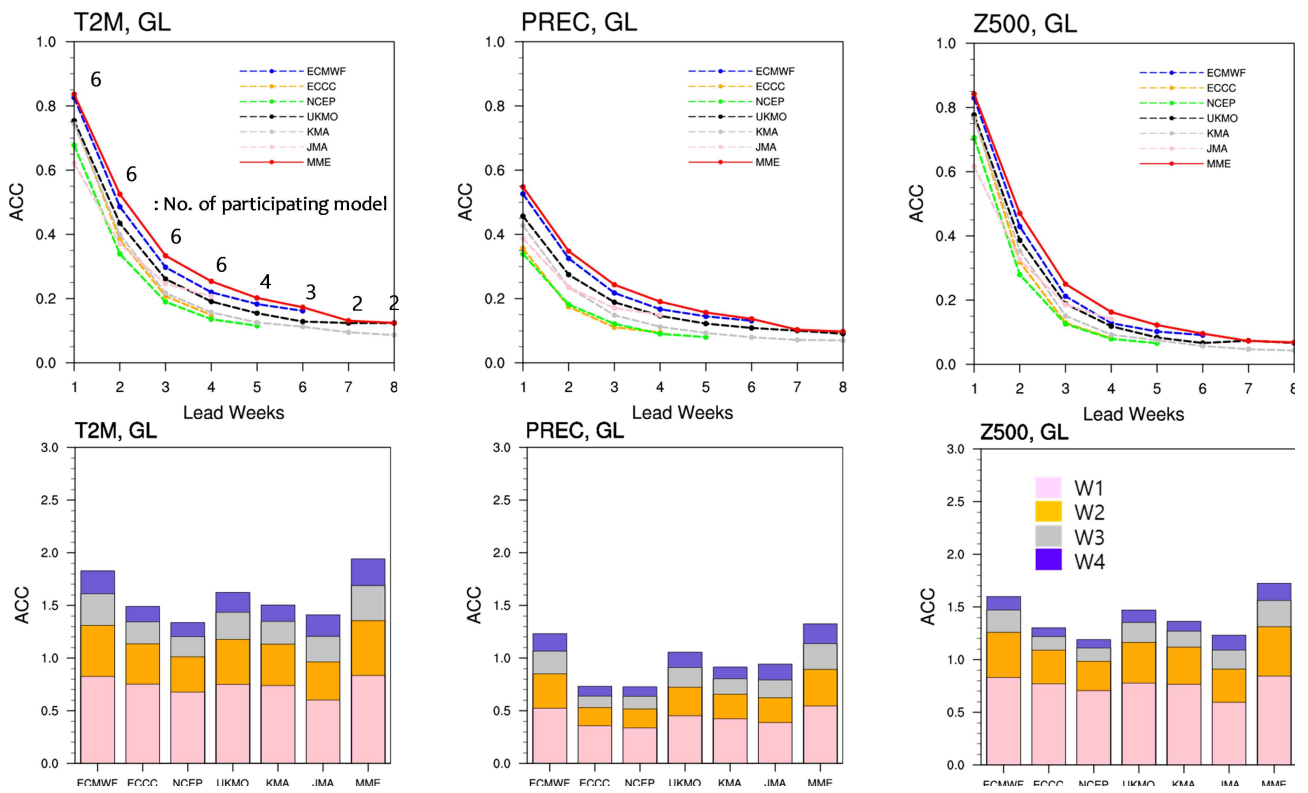


Figure 3.168. ACC of weekly mean T2M, PREC, and Z500 over globe for 6 individual models and multi-model ensemble.

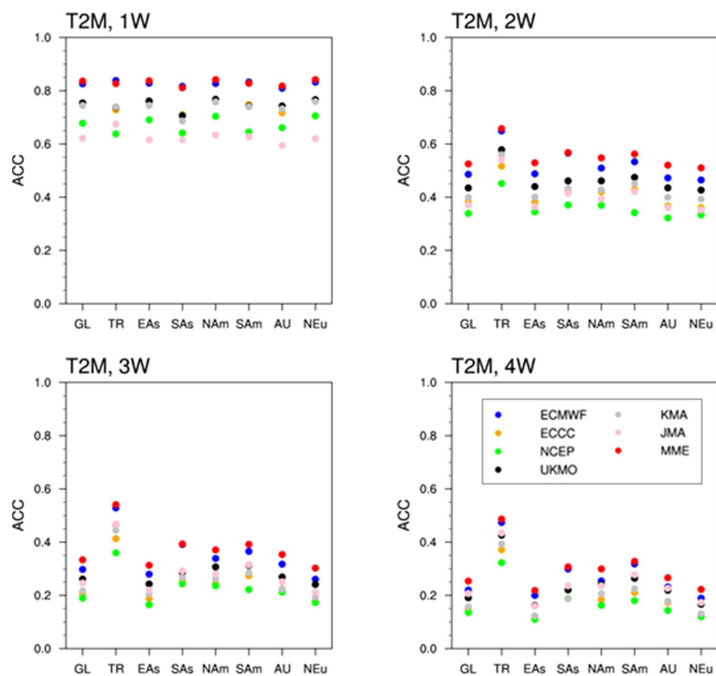


Figure 3.169. ACC of weekly mean T2M over globe for 6 individual models and multi-model ensemble.

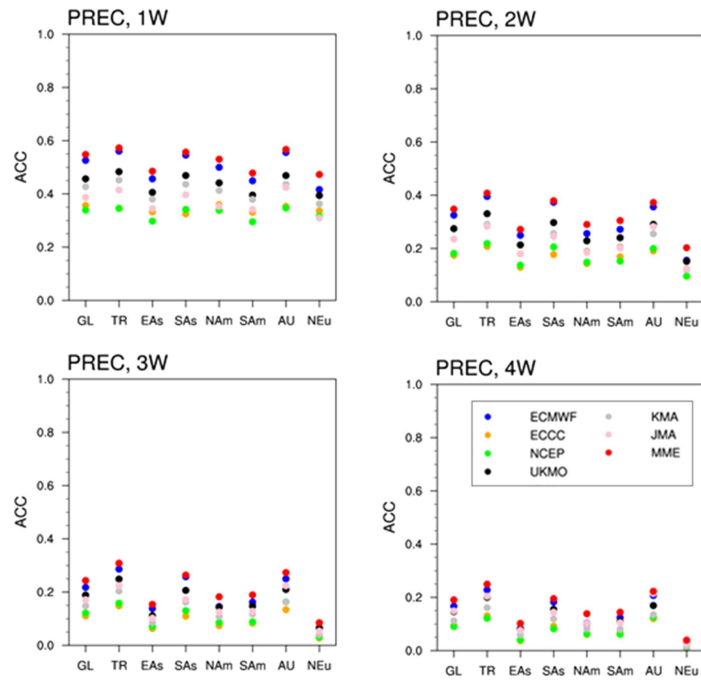


Figure 3.170. Same as Fig. 3.169, except for PREC.

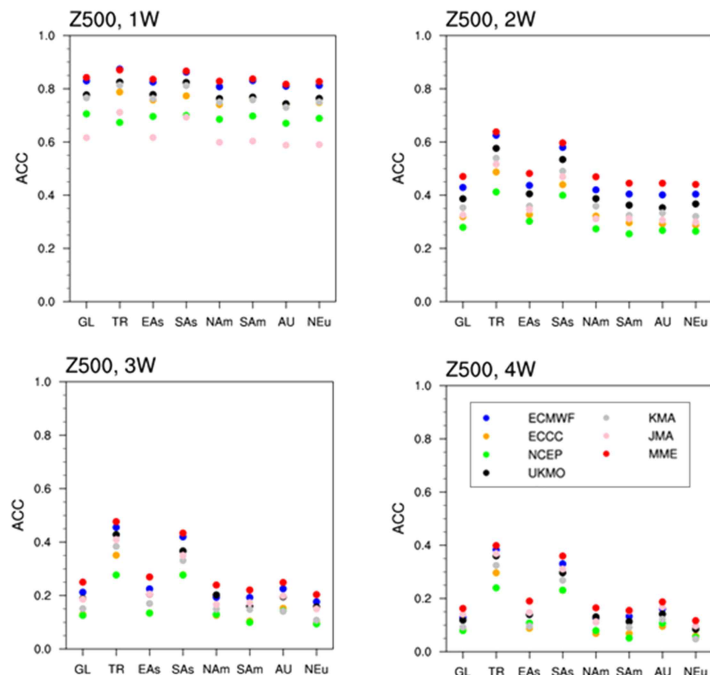


Figure 3.171. Same as Fig. 3.169, except for Z500.

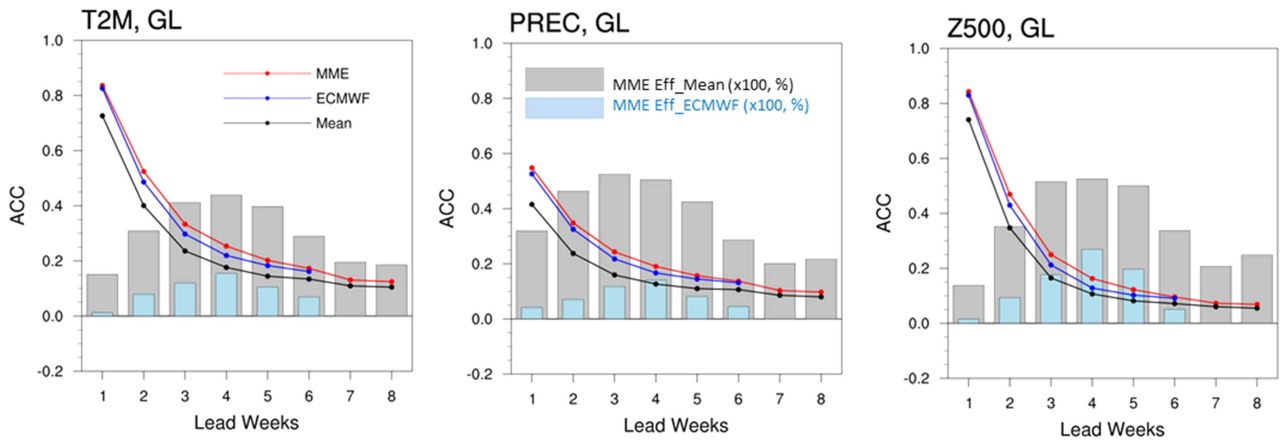


Figure 3.172. ACC of weekly mean T2M, PREC, and Z500 prediction for ECMWF (blue line), average of 6 individual models (Mean, black line), and MME (red line) over globe. MME efficiency related to ECMWF (blue bar) and Mean (grey bar) for 8 lead weeks is displayed with histogram.

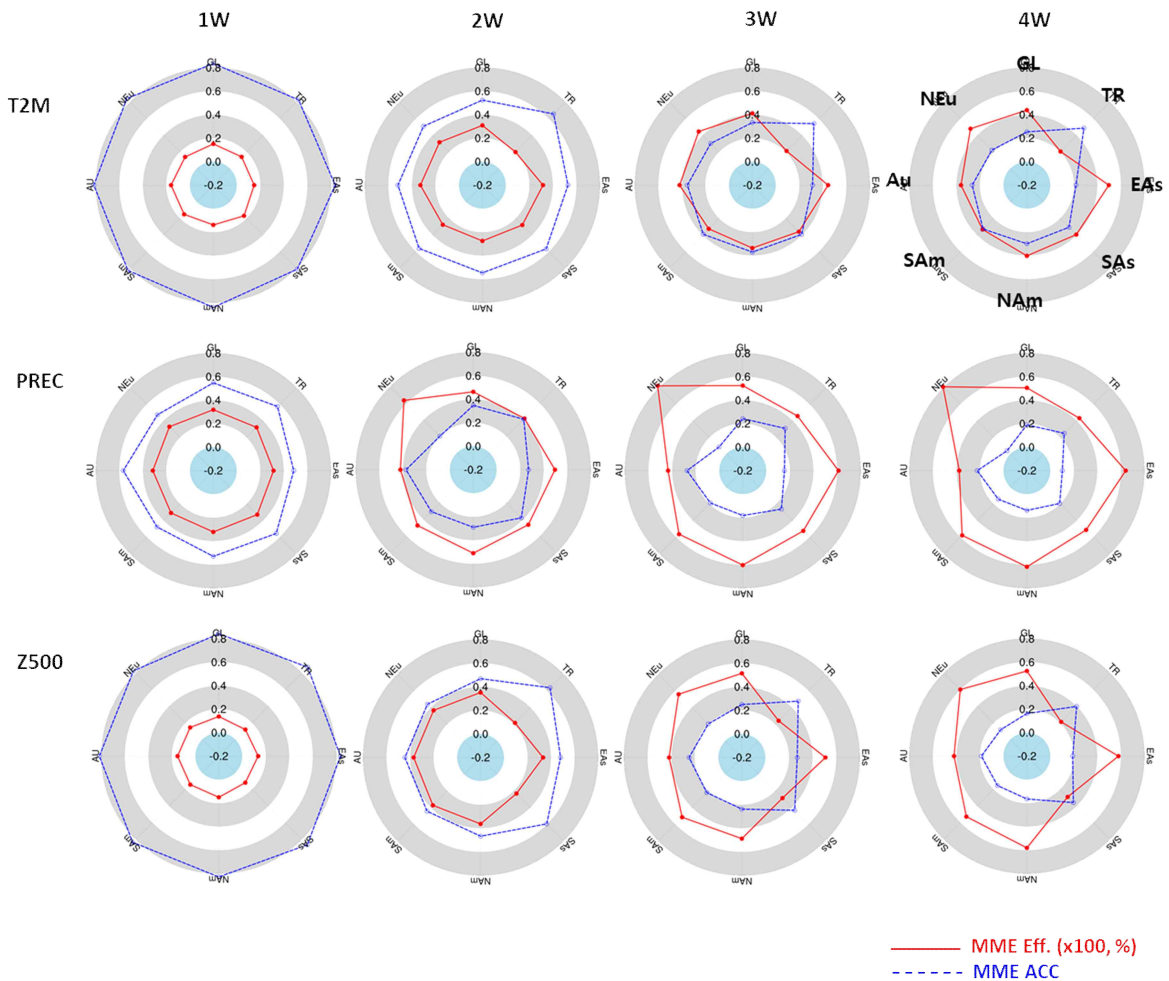


Figure 3.173. MME efficiency related to mean skill of T2M, PREC, and Z500 prediction from 6 individual models for 4 lead weeks over 8 regions.

3.7.3. SCoPS 계절내예측자료 생산을 위한 기반체계 마련

APCC SCoPS 모델을 APCC 고해상도 MME 계절내예측시스템 참여모델의 일환으로 활용하기 위해 모델의 계절내예측자료 생산 가능성 및 개선 필요사항을 파악하였다. 먼저, 현재 SCoPS 계절예측에서는 가우시안(Gaussian) 분포를 따르는 5개의 섭동장(perturbation)을 이용하여, 1일, 5일에 해당하는 초기장에서 각 5개의 섭동장으로 10개의 앙상블 멤버를 구성하고 있다. 그러나 통상적으로 계절내예측은 선행시간 0주부터 예측을 사용하기 때문에 약 5일의 시간 지연 기법으로 앙상블을 구성하는 것은 예측성에 제약이 있을 것으로 판단하였다. 계절내예측 자료의 신뢰도 향상 및 현업 내부적으로 실현 가능성을 고려했을 때, 앙상블 생산은 오직 섭동장을 이용하는 방법으로 hindcast는 5개, real-time forecast는 10개의 앙상블 멤버를 구성하고자 한다(Table 3.12).

Table 3.12. Ensemble method of SCoPS seasonal and sub-seasonal forecast.

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

Figure 3.174는 현재 SCoPS의 계절예측 생산 체계와 계절내 예측 생산 체계 안을 나타낸 것이다. 계절예측과 계절내예측의 차이는 예측 기간, 예측 주기, hindcast 기간 및 주기, 앙상블 구성 기법이다. 계절예측에서는 6개월 예측을 하고 계절내 예측에서는 약 60일로 2개월 예측을 목표로 하고 있다. 그리고 앙상블 개수는 동일하게 10개이지만 위에서 언급한 것과 같이 앙상블 구성 방법에는 차이가 있다. 그리고 계절예측에서 월 1회 생산하던 예측 자료를 계절내예측에서는 hindcast, forecast 모두 주 1회 생산 예정이다. 그리고 기존 계절예측에서 Hindcast 기간은 1982~2013년이었는데 이는 최신 기후를 반영하기에는 한계가 있고 계절예측에 현재 참여하고 있는 국내외 타 모델과 비교했을 때도 상대적으로 hindcast 기간이 짧기 때문에 연장 생산이 필요하다. 따라서 계절 및 계절내 예측의 hindcast는 최대 2016년까지 연장 생산하고자 한다. 그리고 제공변수는 유동적이지만 현재 MME 계절예측에 제공하고 있는 10개 변수를 제공할 예정이다. Figure 3.175는 SCoPS 계절예측과 계절내예측의 런 스크립트에서 가장 큰 차이가 나는 파트를 발췌한 그림이다. 스크립트 내에 NDAY라는 변수가 예측 일수를 설정하는 파트인데 그림 상단의 계절예측에서는 초기장 해당 월을 포함해 줄리안데일로 약 7개월이 설정되어 있고 하단의 계절내예측에서는 60일이 기본으로 설정되어 있다. 그리고 case 구문이 앙상블을 구성하는 파트인데 계절예측에서는 1, 5일로 설정 되어있고 계절내예측에서는 매일 어느 날짜든 선택할 수 있게끔 설정되어 있다.

Figure 3.176은 SCoPS 계절내예측 현업 시스템 구동 스케줄을 나타낸 것이다. 제시된 일정은 매주 월요일에 APCC MME 계절내예측이 수행된다는 가정하에 일정을 모식화 한 것이다. SCoPS 계절내예측시스템의 입력자료로 사용되는 재분석자료(NCEP CFSR, ARGO)는 현업서버로 수집되는데 불가피하게 2일의 지연이 발생한다. 따라서 매주 수요일의 재분석 자료를 금요일에

수집하여 전처리 및 초기장 생산을 거쳐 60일의 계절내 예측자료가 생산되면 업무일 기준 월요일 오전에 후처리를 거쳐 MME의 참여모델로써 제공될 예정이다. 이 과정은 매주 금요일에 수행될 예정이다.

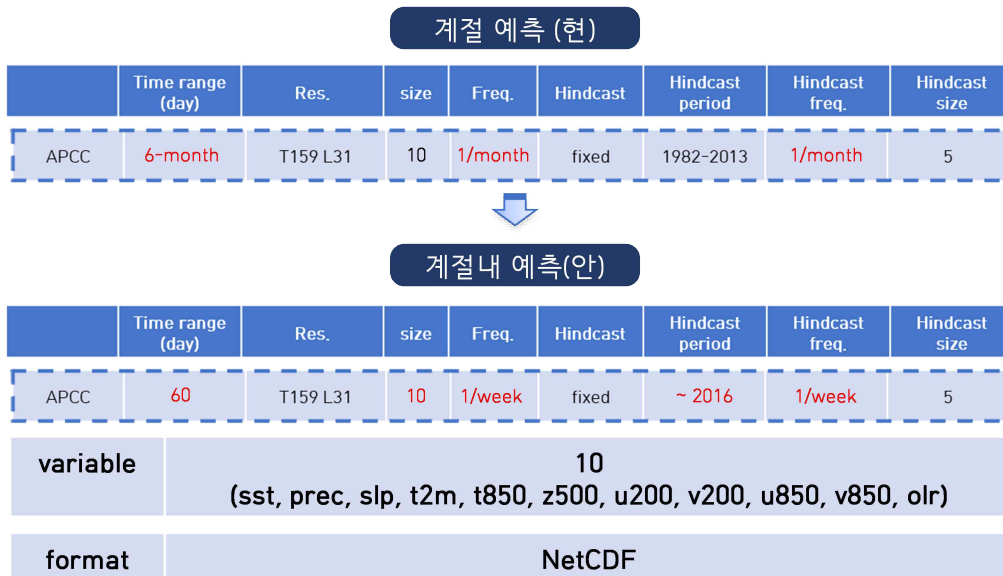


Figure 3.174. Plan to model description summary of SCoPS seasonal and sub-seasonal system.

```

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=214; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
5 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=210; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
esac

else
case ${DY} in
1 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=214; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
5 ) INDATE=$MON-0$DY; INDATE1=$KK; NDAY=210; OUTDATE=$MON-0$DY; LAST_CHUNK=6; MTH=04 ;;
esac

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 3.175. Example of SCoPS seasonal (upper) and sub-seasonal (bottom) forecast run script.

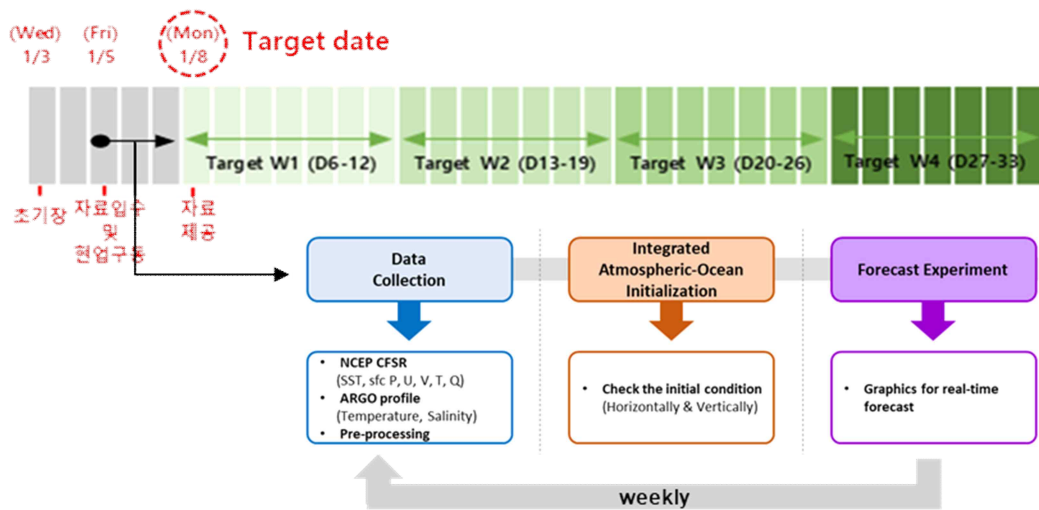


Figure 3.176. Schedule of SCoPS sub-seasonal real-time forecasting system.

그리고 계절내예측 뿐만 아니라 계절예측에서 타기관의 S2S 모델과 비교했을 때 현재 SCoPS의 hindcast 기간은 2013년까지인데 최근의 기후 특성을 반영하기에는 상대적으로 짧은 경향이 있다. 따라서 모델이 개발된 지 약 10년이 지난 현재, 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 선행 작업을 시도하였다.

Table 3.13은 SCoPS hindcast와 forecast 기간을 나타낸 것이다. 현재 SCoPS의 hindcast 기간을 1982~2013년이고 forecast는 2014년부터 현재까지이다. 그러나 추후 hindcast를 1982~2016년까지 연장할 계획이 있다. 계절내예측은 hindcast 기간을 타 기관 비교 및 현업 실현 가능성을 고려했을 때 1991~2016년으로 계획하고 있다. 결과적으로는 계절 및 계절내예측에서 공통적으로 hindcast 연장을 필요한데 연장을 위해서는 먼저 hindcast 생산 방법을 살펴볼 필요가 있다. 현재 계절예측에서 SCoPS hindcast와 real-time forecast의 가장 큰 차이점은 초기장을 구성하는 입력자료이다. SCoPS는 100년 free run을 통해 생산된 배경장을 1982년 1월 1일의 초기 추정값으로 설정하고 CFS 재분석 자료와 다양한 해양 연직 프로파일 데이터(MBT, XBT, PFL, OSD, CTD, DRB, MRB) 등을 입력자료로 사용하여 hindcast 기간 (1982년 1월부터 2013년 12월) 동안의 일별 초기장을 생산하였다. 그러나 해양 연직 프로파일 데이터의 실시간 수집의 한계로 real-time forecast의 경우 실시간 수집이 가능한 ARGO 연직 프로파일 데이터를 대체하여 사용하고 있다. 따라서 hindcast를 연장하기 위해서는 2014년부터 2016년까지 해양 연직 프로파일을 입수하여 기존 hindcast를 만드는 방식으로 연장 생산을 해야 한다.

Table 3.13. Hindcast and forecast period of SCoPS seasonal and sub-seasonal forecast.

	현재		계획	
	Hindcast	Forecast	Hindcast	Forecast
계절예측	1982~2013년	2014~현재	1982~2016년	2014~현재
계절내예측	-	-	1991~2016년	2014~현재

Figure 3.177은 hindcast 자료의 해양 초기장 생산 과정을 모식화한 그림이다. 먼저 입력 자료를 World Ocean Database (WOD)에서 수집을 해야한다. 따라서 이용가능한 연직 프로파일 데이터를 모두 FTP로 수집을 해야하는데 2014년 이후로 WOD 버전이 변경되면서 기존에는 WOD13을 사용했지만 현재는 WOD18을 수집해야 한다. 이때 연직 내삽층이 40개에서 137개로 변경되어 기존보다는 좀 더 연직적으로 촘촘한 격자를 가지는 프로파일 데이터가 수집될 수 있게 되었다. 자료 수집이 완료되면 SCoPS 입력자료 생산을 위한 전처리를 하게 되는데 매트랩 코드를 이용하여 ascii 형태의 다양한 프로파일 원자료에서 수평 및 연직 등격자로 자료를 변환하고 필요 변수만을 추출하는 과정이다. 이렇게 전처리가 된 해양 초기장 자료는 대기 초기장 자료와 3차원 자료 동화되어 최종적으로 SCoPS 모델 초기장으로 만들어진다. SCoPS 초기장자료는 매일 구성모델간 플럭스를 주고 받으며 일별로 생산이 되므로 2014년 1월부터 2016년 12월까지의 초기장을 생산하고 산출된 초기장으로 매일 6개월 예측 hindcast를 생산하면 hindcast 연장이 완료된다.

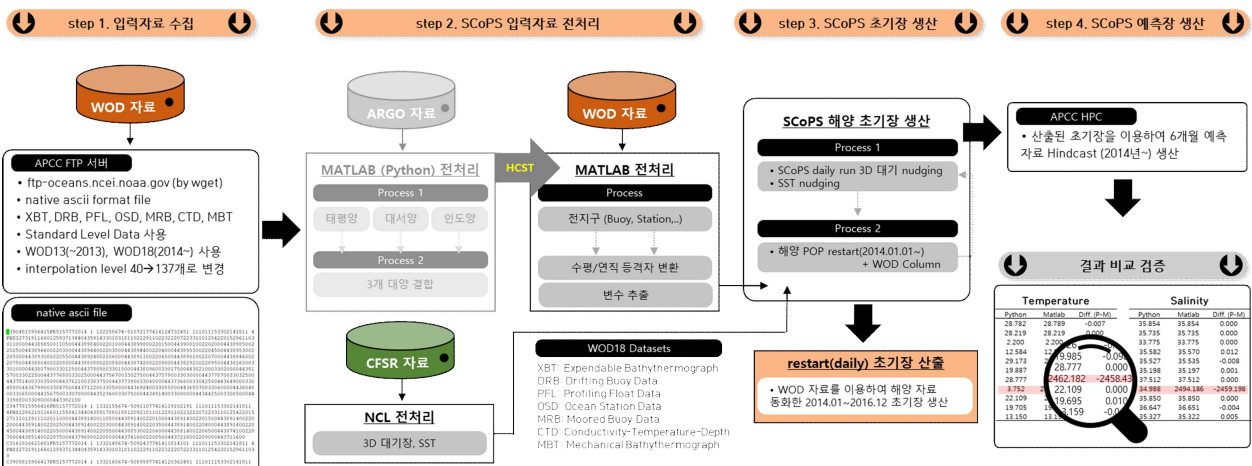


Figure 3.177. Flow chart of producing the SCoPS ocean initial data.

Figure 3.178은 Figure 3.177의 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 음

의 값으로 치우치는 뚜렷한 특징은 나타나지 않고 평균적으로 절대값 약 0.05 미만의 차이값을 나타내는 것으로 확인하였다. 올해 hindcast 연장을 위한 기반 구축 및 테스트를 하였고 내년 부터 현업화를 진행할 예정이다.

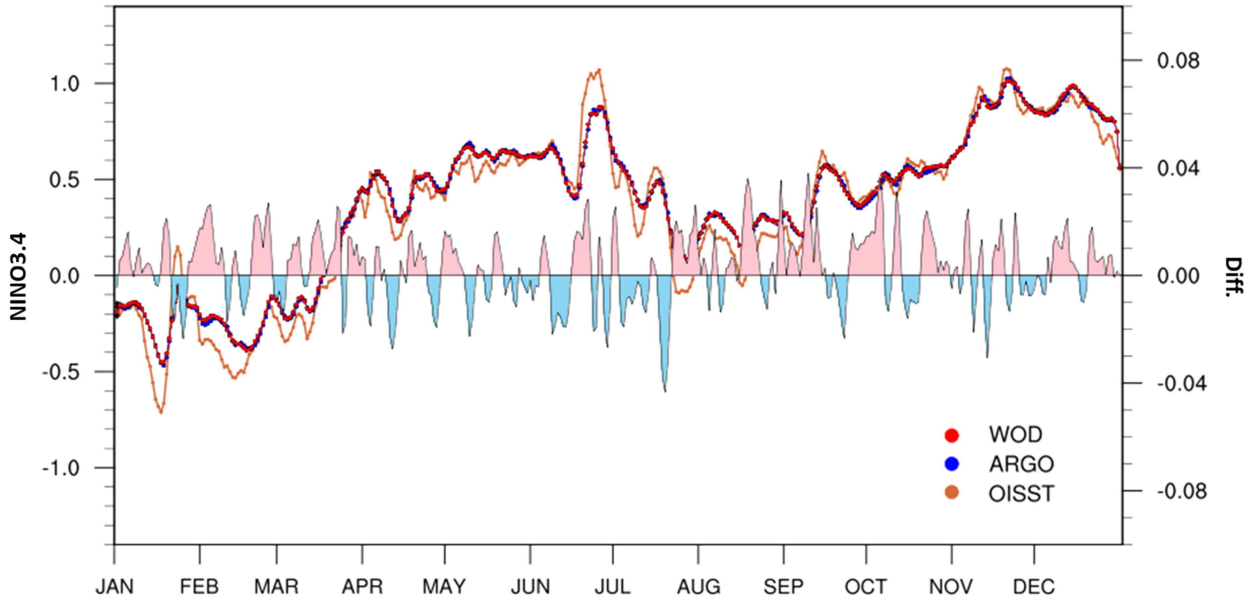


Figure 3.178. Nino3.4 index (line) and difference(shading) between forecast using ARGO and hindcast using WOD as ocean initial condition for the period of 2014.

3.8. 기후분야 국제협력 및 정책지원

3.8.1. WMO 장기예보 선도센터 운영 실무 및 개선 지원

3.8.1.1. WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 시스템 운영

WMO 장기예보 선도센터의 계절예측 현업은 앞서 언급한 바와 같이 한달에 걸쳐 수행된다. 매달 기상청 기후예측과에 WMO 장기예보 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 왔다. 3월부터 GPC Pune의 계절예측 자료를 수집하여 WMO 장기예보 선도센터 다중모델 앙상블 예측 시스템에 참여를 준비하였다. 다른 GPC의 계절예측 자료 제공일은 Table 3.14와 같다. 대부분의 GPC는 15일 전에 계절예측자료를 제공해주고 있으며, 월별 평균 자료 제공일자는 14일이었다. 자료가 수집, 표준화가 완료되면 다중모델 앙상블 계절예측 시스템이 운영되고, 기상청과 APCC의 계절전망을 위한 기초 자료로 활용된다. WMO 장기예보 선도센터의 다중모델 앙상블 예측 시스템 운영을 포함한 일정은 Figure 3.179에 나타난 것과 같이 매달 자료 수집에서부터 시스템 운영, 기상청과 WMO 전문가 그룹에게 자료가 제공되는 일정과 GSCU 보고서 초안 작성 지원 이후 최종본의 WMO 장기예보 선도센터 누리집 업데이트 등 모두 포함된다.

Table 3.14. Date of data collection from GPCs.

GPC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV
Beijing	15	13	15	15	15	12	18	31	12	11	15
CMCC	13	13	13	13	13	13	13	13	13	10	9
CPTEC	7	7	8	10	7	14	12	10	13	9	8
ECMWF	14	14	14	14	14	14	14	9	8	10	7
EXETER	20	11	11	11	26	12	11	11	11	11	11
Melbourne	9	9	8	8	4	7	7	9	8	10	6
Montreal	12	9	8	8	8	7	7	9	8	10	6
Moscow	13	10	11	13	12	14	13	10	15	13	13
Offenbach	3	3	3	3	8	7	4	5	5	4	5
Pretoria	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	-
Seoul	10	10	14	10	9	13	13	11	12	11	8
Tokyo	13	13	13	13	14	13	13	13	13	13	13
Toulouse	14	14	14	14	14	14	14	11	11	12	13
Washington	12	12	12	13	16	13	13	14	12	12	12

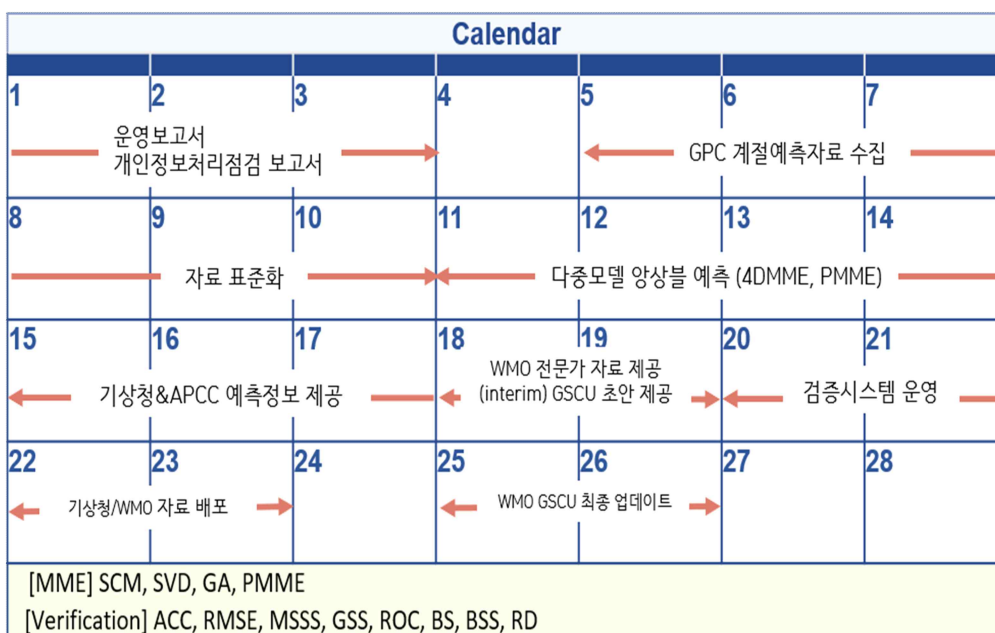


Figure 3.179. Schedule of WMO LRFMME.

WMO 장기예보 선도센터에 참여하는 개별 GPC와 PMME의 실시간 확률 예측 성능을 살펴본 것이다 (Figure 3.180, Figure 3.181). 각 카테고리별 ROC Score의 시계열 분석에 사용된 예측기간은 2017년 JFM부터 2023년 SON이다. Figure 3.180과 Figure 3.181에서 붉은 실선은 MME를 나타내며, 각 점들은 개별 GPC를 의미한다. 파란색으로 표시된 점은 ECWMF의 예측 성능을 나타낸다. Table 3.15와 3.16은 전구영역과 동아시아 영역에 대한 연도별 ROC Score의 예측성능 (AN, NN, BN카테고리의 평균)을 나타내며, 전구에 비해 동아시아 영역의 예측성능이 낮게 나타난다.

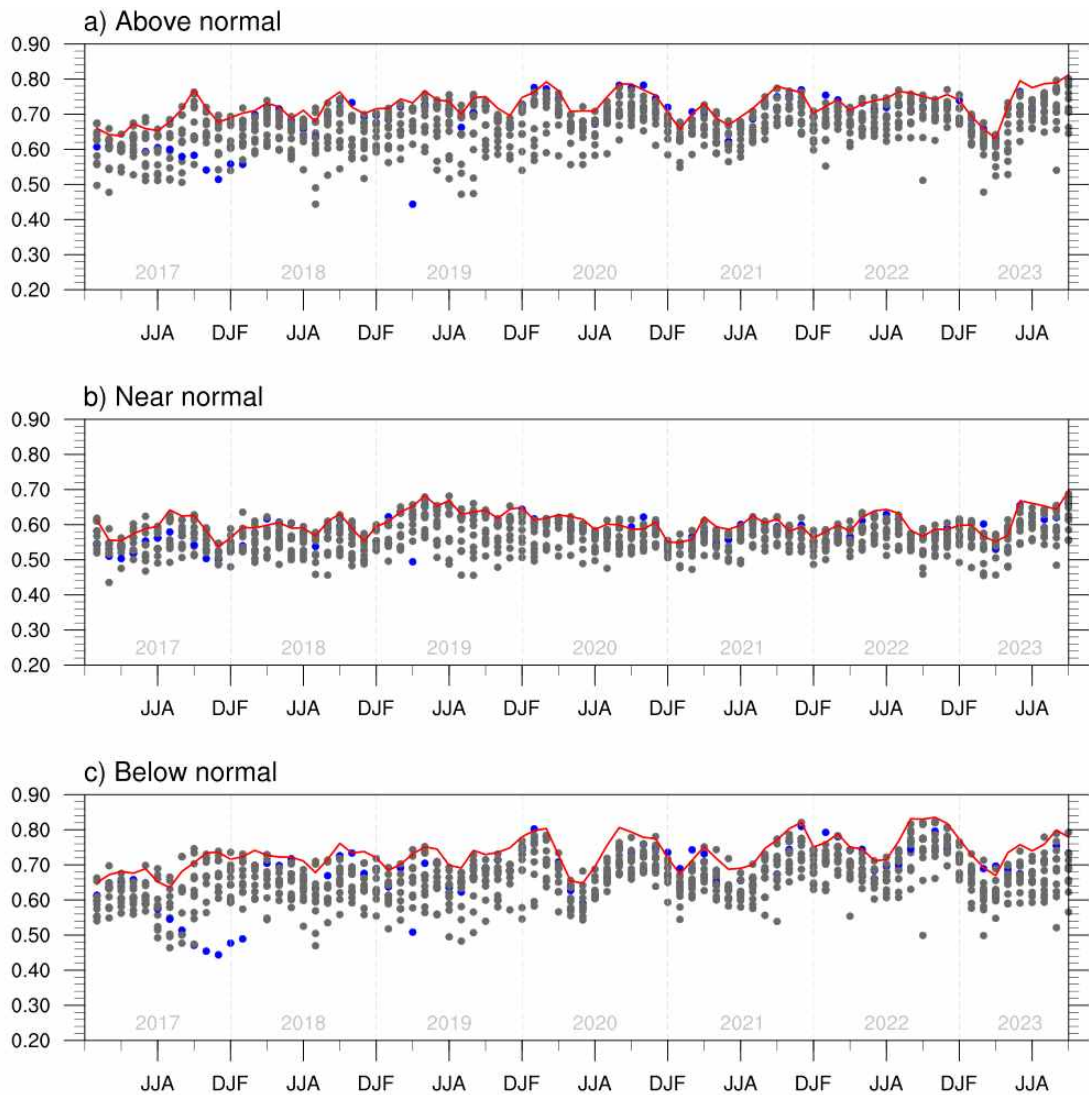


Figure 3.180. Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of 2m temperature for three terciles, i.e., a) the above normal, b) near normal and below normal for the period JFM2017-SO2023. ROC score for PMME prediction is indicated by red line. The grey dots indicate the ROC score of the WMO LC-LRFMME individual GPCs and the blue dot indicates ECMWF.

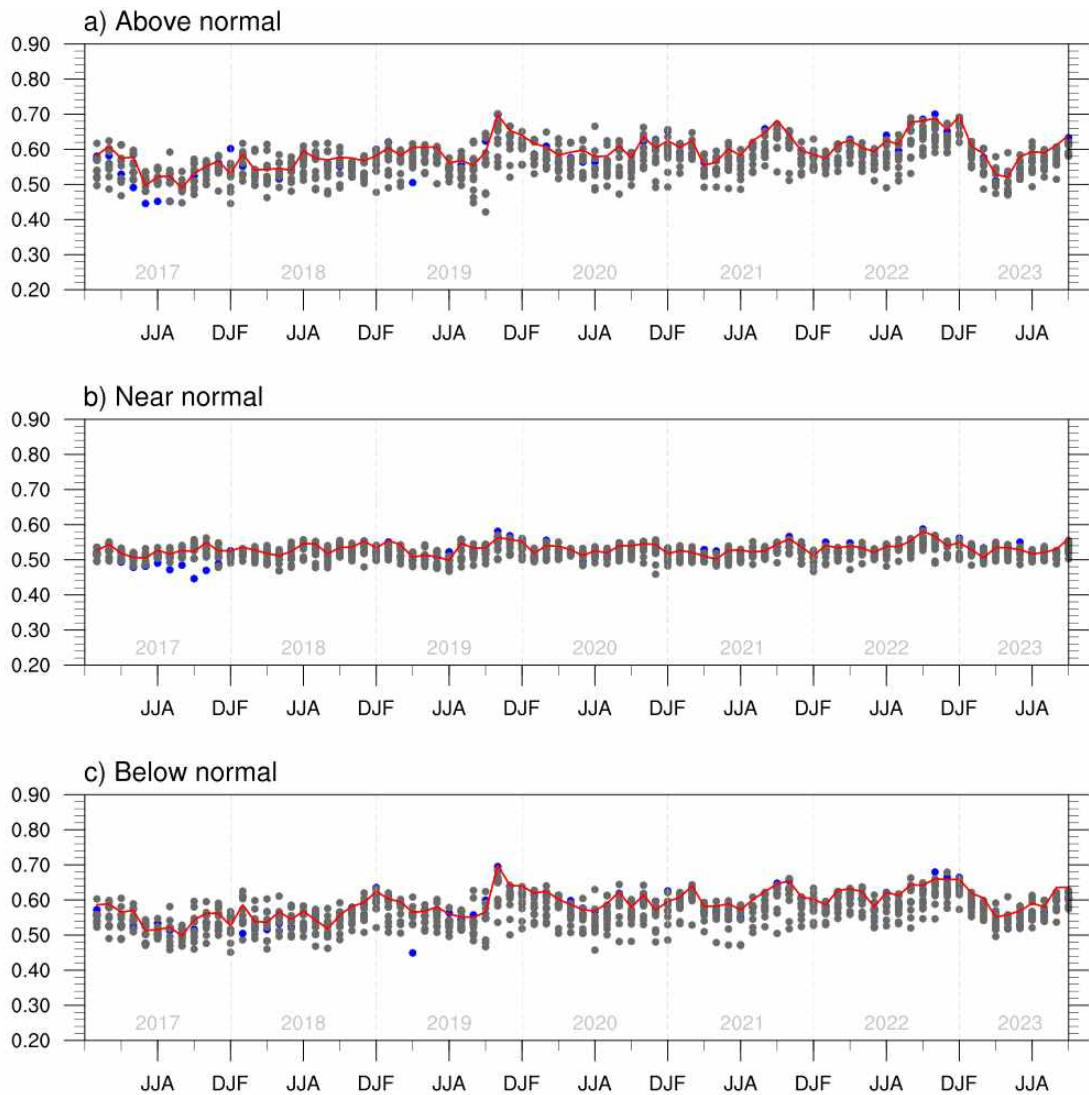


Figure 3.181. Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of precipitation for three terciles, i.e., a) the above normal, b) near normal and below normal for the period JFM2017-SON2023. ROC score for PMME prediction is indicated by red line. The grey dots indicate the ROC score of the WMO LC-LRFMME individual GPCs and the blue dot indicates ECMWF.

Table 3.15. 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	
		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	0.64	0.53
2	CMCC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.66	0.58	0.64	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	0.58	0.53
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	0.68	0.55
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	0.55
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	0.63	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	0.68	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	0.55
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	0.54
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	0.66	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	0.66	0.56
12	Toulouse	—	—	—	—	—	—	0.68	0.56	0.65	0.56	0.64	0.56	0.64	0.58	0.62	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	0.62	0.56
	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	0.70	0.57

※ 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 3.16. 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	
		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	0.55	0.51
2	CMCC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.54	0.54	0.50	0.51
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	0.46	0.47
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	0.51	0.49
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	0.58	0.53
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	0.54	0.53
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	0.53
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	0.52	0.54
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	0.50	0.51
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	0.57	0.54
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	0.51	0.50
12	Toulouse	—	—	—	—	—	—	0.62	0.57	0.64	0.56	0.60	0.51	0.54	0.51	0.49	0.53
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	0.56
	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	0.55	0.54

※ Montreal : 2014JJA~2016DJF의 경우, Montreal3과 Montreal4의 ROC 평균값

※ ECMWF:2015~2016년검증자료생산

※ CMCC: 2021OND이후자료

※ Offenbach:2017SON이후자료

※ Pretoria:2015AMJ이후자료

※ Observation:PREC/CAMS-OPI,T2M/NCEP-R1

※ 2016OND이전은개별hindcast사용

※ 2016OND예측부터공통hindcast기간(1993~2009)사용

※ 전체기간위도별가중치적용

※ ROC값은AN, NN, BN의평균값을의미

올해는 2012년부터 축적된 WMO 장기에보 선도센터 계절예측자료를 NINO3.4 지수의 예측력을 각 GPC의 과거기간(hindcast)과 실시간 예측결과를 상호비교해 보았다. 상호비교를 위해 사용된 GPC는 2012년부터 계절예측자료를 제공해오고 있는 GPC Beijing, ECMWF, Exeter, Melbourne, Montreal, Seoul, Tokyo, Washington의 총 8개의 계절예측 모델 결과를 이용하였다. Figure 3.182는 hindcast와 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 Seoul과 Tokyo의 경우 Forecast의 RMSE 감소와 TCC증가를 보였다. Figure 3.183과 Figure3.184는 각 개별 계절예측모델의 forecast와 hindcast 기간에 대한 NINO3.4의 시계열을 나타낸다. 그림 내 회색실선은 관측의 NINO3.4를 나타내며, 관측과 예측값의 차이는 막대그래프로 표시하였다. Hindcast에 비해 Forecast기간의 TCC의 감소가 RMSE의 증가가 크게 나타났던 GPC Beijing의 경우 2015/16년 엘니뇨를 제대로 예측하지 못한 것으로 나타났다. 계절예측모델의 예측력은 해수면 온도 예측에서 기인하는 만큼 해수면도 예측력에 대한 보다 상세한 분석을 수행한다면 기온 및 강수량 계절전망에 참고 자료로 활용가능 할 것으로 보인다.

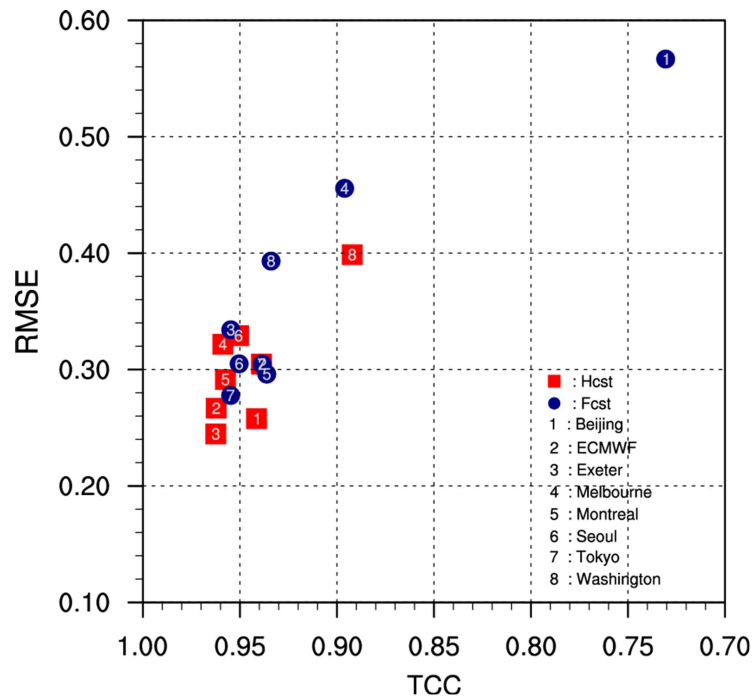


Figure 3.182. Anomaly correlation coefficient (ACC) and Root Mean Square Error (RMSE) skill score for Niño-3.4 SST (regional average over 5° S-5° N, 170-120° W) during the forecast (2013-2021) and hindcast (1993-2009) periods.

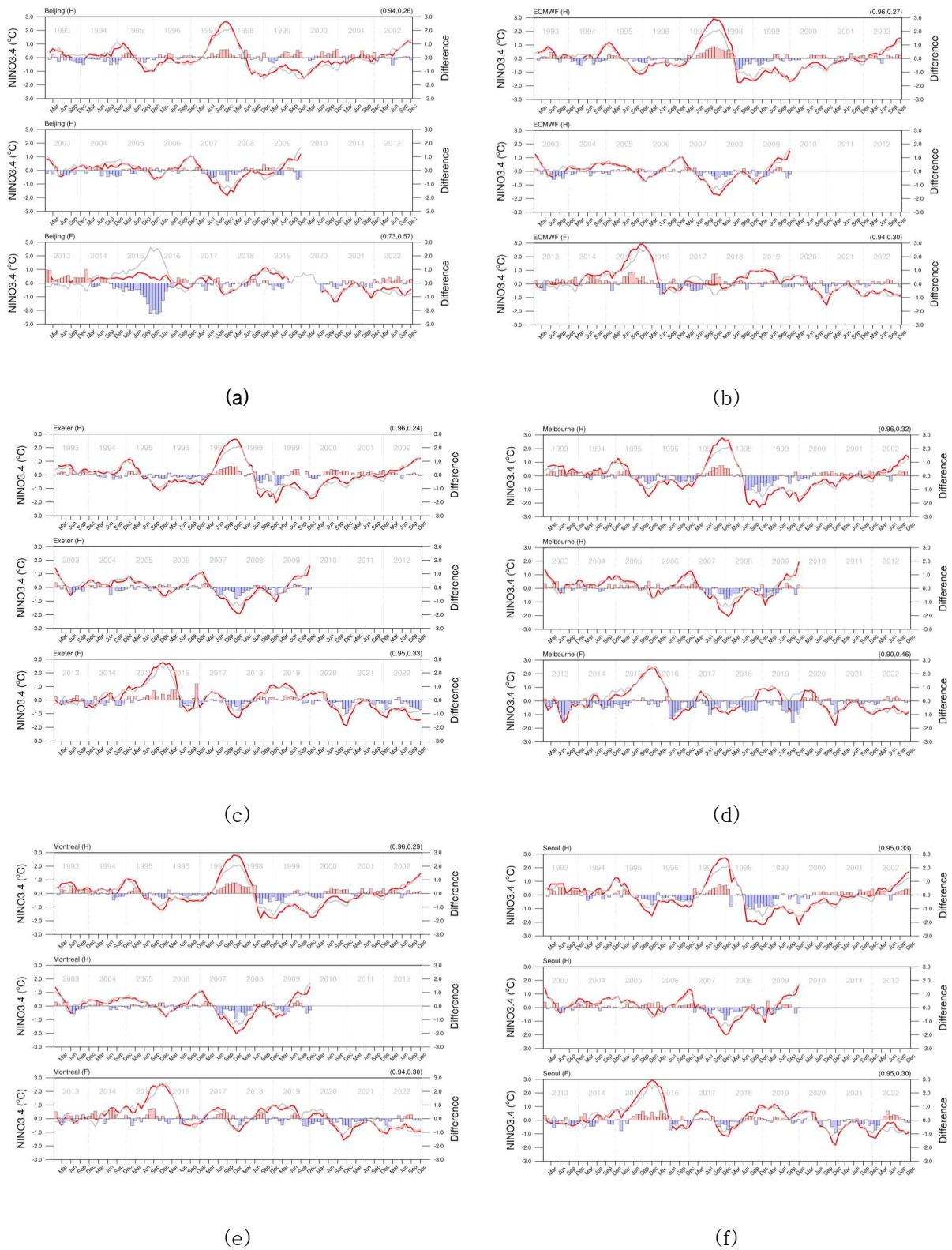
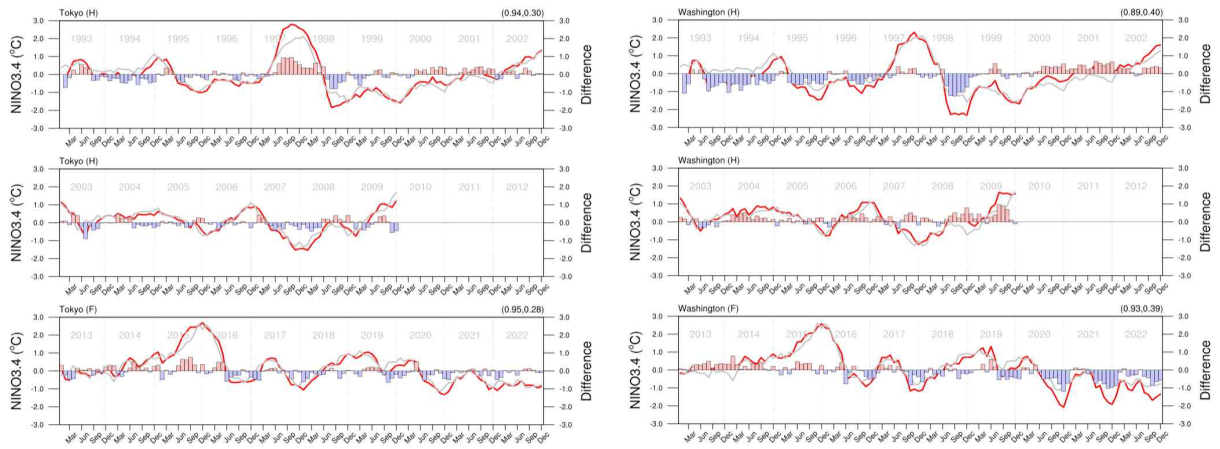


Figure 3.183. Time series of the Niño-3.4 SST. Forecast and observation are highlighted with red and gray lines, respectively. The difference between forecast and observation is indicated by bar. Panels (a)-(f) shows GPC Beijing, ECMWF, Exeter, Melbourne, Montreal, and Seoul.



(a)

(b)

Figure 3.184. Same as Figure 3.183, but panels (a)-(b) shows GPC Tokyo and Washington.

3.8.1.2. WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 시스템 개선

WMO 장기예보 선도센터에 참여하고 있는 GPC는 계절예측의 정확도 향상을 위해 지속적으로 계절예측시스템을 개선해왔으나, 2023년은 특별한 GPC 계절예측시스템은 업데이트가 진행되지 않았다. 따라서 이번 절에서는 WMO장기예보선도센터에서 2023년 한해 동안 진행된 계절 예측 시스템 개선 또는 수정 현황에 대해 기술하고자 한다.

3.8.1.2.1. 관측 해수면 온도 자료 서비스 중단에 따른 시스템 개선

기존 WMO 장기예보 선도센터 다중모델 앙상블 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 WMO 장기예보 선도센터 운영시스템의 수정이 진행되었다. 기존 기후지수예측 표출 시스템을 살펴보면, NOAA로부터 OISST 고해상도 자료 수집, 기후값 및 기후 편차장 생성의 표준화 과정을 거친다. 그러나 시스템을 확인해 본 결과 표준화된 자료는 Figure 3.185와 같이 매달 동일한 형태로 운영서버에 저장되어 서버 용량관리에 비효율적으로 자료가 축적되고 있었다. Figure 3.185의 ‘198111_202209_anom_sst.nc’는 1991년 11월부터 2022년 9월 까지의 기후편차장을 의미하며, ‘198111_202210_anom_sst.nc’는 1991년 11월부터 2022년 10월 까지의 기후편차장으로 10월 자료가 추가되었을 뿐 ‘198111_202209_anom_sst.nc’와 차이가 없다. ‘198111_202209_sst_clm.nc’와 ‘198111_202210_sst_clm.nc’은 월별 기후값으로 두 파일은 파일명만 다를 뿐 값에서는 차이가 없다. 기존 해수면 온도 자료는 저해상도의 월별 자료이기에 서버 용량을 크게 차지하는 것은 아니지만, 이후 고해상도 자료가 축적될 시 서버 용량 관리에 문제를 일으킬 수 있기에 이러한 점을 고려하여 시스템을 수정하고자 하였다. 그리고 자료 표준화 이후에도 그래픽 표출 시스템에서는 GRIB2 형태의 기존 파일을 불러와 자료를 처리하는 불필요한 과정을 거치는 것으로 확인되었다. GPC Seoul 기후지수 표출 시스템의 경우 표준화된 자료의 메타 정보를 활용하지 않고, 시간 변수의 개수를 바탕으로 관측자료를 추출하여 잘못된 관측정보가 그래픽에 표출되어 누리집을 통해 제공되고 있었다. 잘못된 정보의 표출은 WMO장기예보선도센터의 계절예측 정보에 대한 신뢰도를 떨어뜨는 문제로 발전할 수 있기에 다음의 몇가지 사항을 고려하여 WMO 장기예보 선도센터와 GPC Seoul 기후지수 표출 시스템을 수정·개선하였다 (Figure 3.185~3.187).

- 비효율적 자료 저장에 대한 개선
- 자료 표준화 후 Raw 자료 미사용
- 메타정보활용
- 유지보수의 위한 가독성 향상

```

Oct 14 07:58 198111_202209_anom_sst.nc
Oct 14 07:58 198111_202209_sst_clm.nc
Nov 14 07:37 198111_202210_anom_sst.nc
Nov 14 07:37 198111_202210_sst_clm.nc
Dec 14 11:44 198111_202211_anom_sst.nc
Dec 14 11:44 198111_202211_sst_clm.nc
Jan 12 16:43 198111_202212_anom_sst.nc
Jan 12 16:43 198111_202212_sst_clm.nc
Feb 13 12:51 198111_202301_anom_sst.nc
Feb 13 12:51 198111_202301_sst_clm.nc
Mar 15 16:39 198111_202302_anom_sst.nc
Mar 15 15:35 198111_202302_sst_clm.nc

```

Figure 3.185. List of standardized data.

```

4) GPC Seoul 기후지수 표출 프로그램
/home/season/SEASON/PYTD/seoul/gpc_nino34.py

#####
# >> Reading Data
#####
#> oisstPath
sst_files = sorted(glob.glob(oisstPath+'oiv2mon.*.grb'))

st_date = sst_files[0].split('/')[-1].split('.')[1]
en_date = sst_files[len(sst_files)-1].split('/')[-1].split('.')[1]

tdelta = relativedelta(YM,datetime.strptime(st_date,"%Y%m"))
obStrt = (tdelta.years)*12 + tdelta.months - 5 - 1

sst_data = ANOD+"/"+st_date+"_"+en_date+"_anom_sst.nc"
clm_data = ANOD+"/"+st_date+"_"+en_date+"_sst_clm.nc"

anom_nc = Dataset(sst_data,"r")
clm_nc = Dataset(clm_data,"r")

anom_lon = anom_nc.variables['lon'][:].data
anom_lat = anom_nc.variables['lat'][:].data

#### Calculate Climate Index (observation)

ix = np.where( (anom_lon>=REGION[0]) & (anom_lon<=REGION[1]) )[0]
jy = np.where( (anom_lat>=REGION[2]) & (anom_lat<=REGION[3]) )[0]

anom_sst = anom_nc.variables['anom_sst'][obStrt:obStrt+5,jy,ix].data.mean(axis=(1,-,))

```

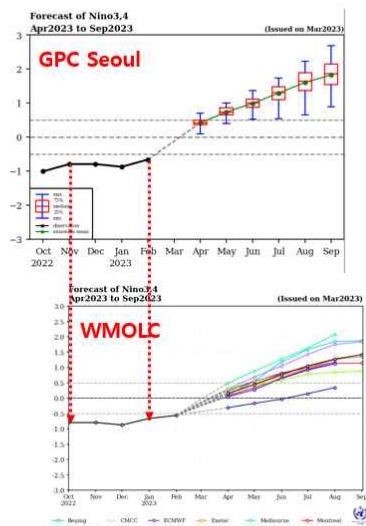


Figure 3.186. The python script to plot the climate index.

```

4) GPC Seoul 기후지수 표출 프로그램
/home/season/SEASON/PYTD/seoul/gpc_seoul_INDI.py

MODEL = "Seoul"
AREA = "Nino3,4"
FNAME = "NINO34"
latS, latN, lonL, lonR = -5, 5, 190, 240

dataPath = DAOU + "/" + str(YYYYMM) + "/INDI/PRE"

# Setting TIME
#
YM = datetime.strptime(str(YYYYMM),"%Y%m")
fltim = (YM + relativedelta(months=1)).strftime("%Y%m")
pltim = (YM + relativedelta(months=-1)).strftime("%Y-%m") + '-01'
p5tim = (YM + relativedelta(months=-5)).strftime("%Y-%m") + '-01'

# Reading Observation DATA
#
obs_sst_ano_fil = ANOD+"/"+anom_sst.nc"
obs_sst_clm_fil = ANOD+"/"+clim_sst.nc"

obs_sst_ano_ds = xr.open_dataset(obs_sst_ano_fil)
obs_sst_clm_ds = xr.open_dataset(obs_sst_clm_fil)

obs_sst_ano = obs_sst_ano_ds.sel(time=slice(p5tim,pltim),lat=slice(latS,latN),lon=slice(lonL,lonR))
obs_sst_ano_mean = obs_sst_ano.mean(dim=['lat','lon'])

```

수행하는 달을 기준으로 -1개월의 날짜

수행하는 달을 기준으로 -5개월의 YYYY-MM

해당 영역의 위경도 index가 아닌 정보 값으로부터 자료 Slice

Coordination Name을 이용하여 평균 수행 -> 가독성을 높임

Figure 3.187. The revised python script to plot the climate index.

WMO 장기에보선도센터 검증 시스템의 경우 표준화된 해수면 온도 자료가 아닌 원시 자료를 그대로 활용하기에 표준화된 해수면 온도자료를 활용하여 검증할 수 있게 수정하였으며, 저해상도에서 고해상도 해수면 온도자료로 전환한 검증결과를 비교하여 관측자료 수정 이후에 시스템의 무결성을 확인하였다. Figure 3.188는 저해상도 해수면 온도자료와 고해상도 해수면 온도자료를 이용하여 2022NDJ 예측을 검증한 결과이다.

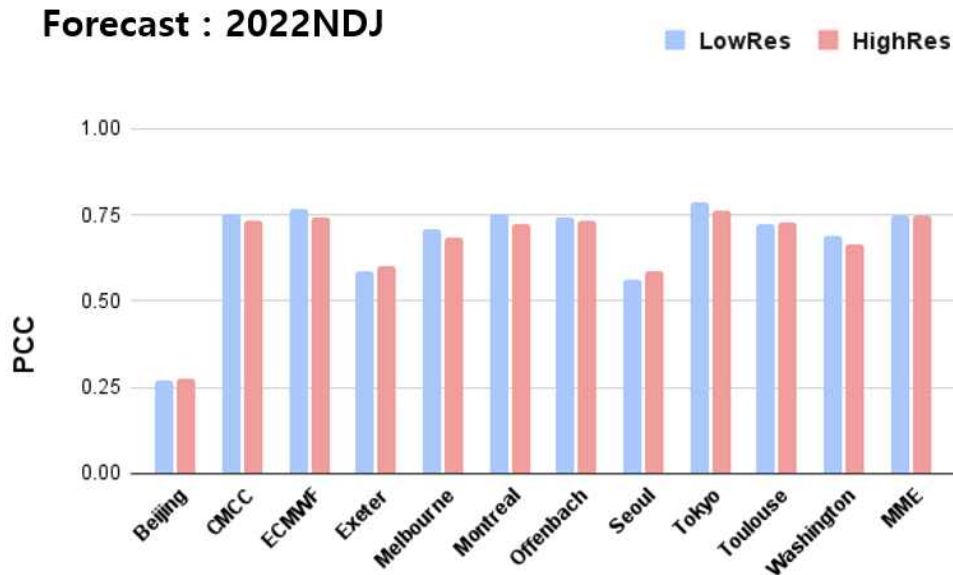


Figure 3.188. The verification results for NDJ 2022 using high resolution and low resolution OISST.

3.8.1.2.2. WMO 계절예측 전문가 자료 제공을 위한 시스템 개선

WMO 장기에보 선도센터 기후예측자료 활용성 증대를 목적으로 다중모델 앙상블 예측이 완료되는 시점에 WMO 계절예측 전문가 그룹에게 interim GSCU (Figure 3.189)와 개별 GPC 예측자료(Figure 3.190)를 PowerPoint의 형식으로 생산하여 이메일로 발송하고 있다. 대국민 서비스를 하고 있는 WMO 장기에보 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 번거로움이 있었다. 현업 시스템 운영자의 편의성 증대를 위해 운영시스템 내에 Powerpoint 자료 생성 python library를 설치하여 현업운영 서버 내에서 자료를 생성할 수 있도록 python 프로그램을 개발하였다 (Figure 3.191).

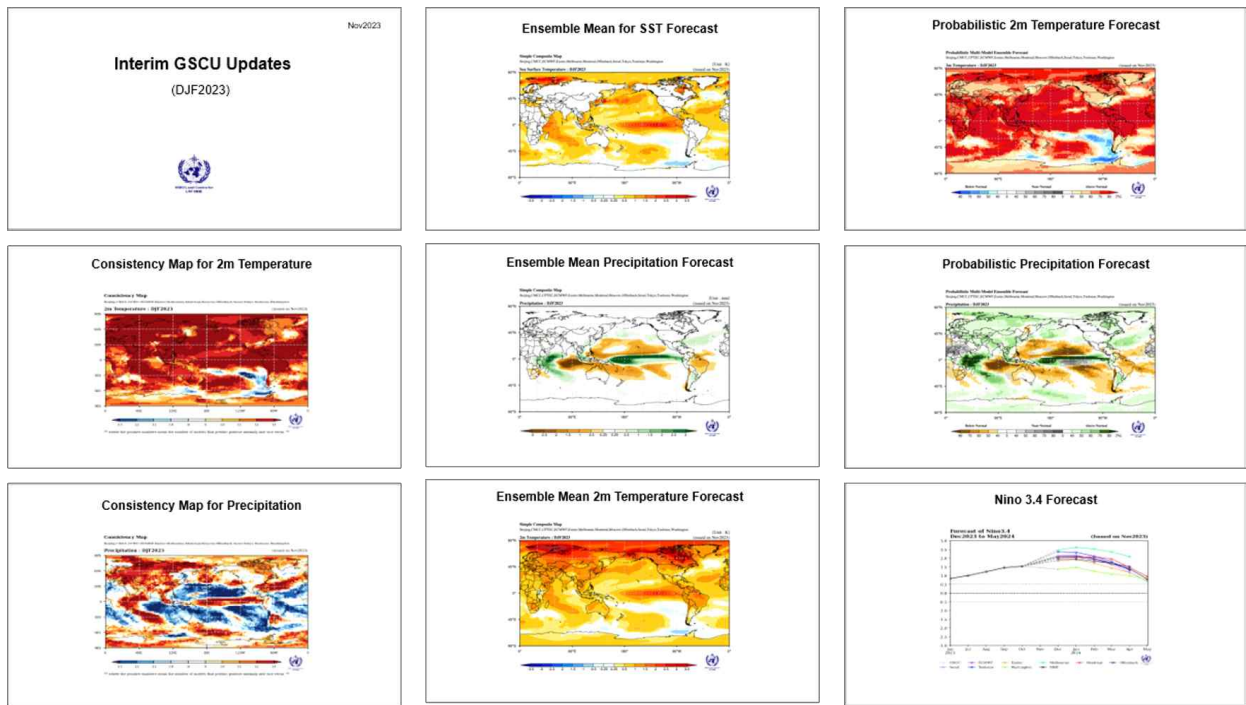


Figure 3.189. Example of interim GSCU.

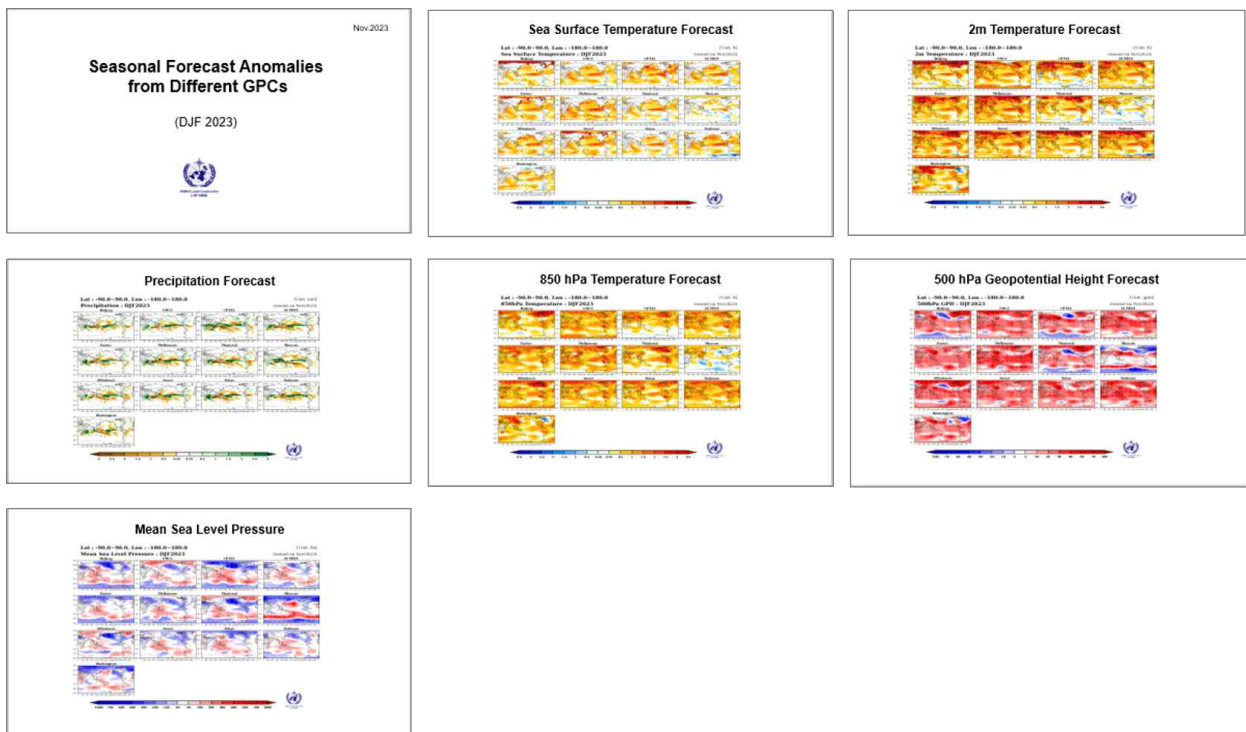


Figure 3.190. Example of powerpoint for WMO expert team.

3.8.1.2.3. 관측자료 표출 시스템 개선

WMO 장기예보 선도센터 누리집의 /Seasonal/Observation/ 메뉴에서는 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) 자료를 사용하여 1993-2009, 1991-2020, 그리고 1981-2010년의 기후기간을 이용하여 산정된 기후 편차장을 제공하고 있다. 2023년 사용자에게 의해 Figure 3.192와 같이 기후편차장의 그래프에 오류가 있음을 전달받아 그래픽 생산을 위한 프로그램을 확인한 결과, 매일 10일경 ERA5의 자료가 수집된 이후 기후편차장 생성 과정이 크론타입을 이용하여 자동으로 생성하도록 되어 있으나, 사용자가 임의로 기후편차장 생성 프로그램을 구동할 경우 같은 월의 자료가 반복적으로 저장되고 있어 기후편차장 계산 및 기후값 계산 시 오류가 발생한 것으로 파악되었다. 기존 프로그램은 시간정보 (메타 정보)에 대한 검증 과정 없이 개발되어 오류 발생 가능성이 큰 만큼 메타 정보를 활용할 수 있게 프로그램을 수정하였으며, 프로그램 내에서 기후값을 호출 할 때 또한 시간 정보를 미활용하여 잘못된 자료를 호출하는 경우가 발생했다. 또한 ERA5 자료 결합시 옵션을 미 사용하여 자료 포맷 이상의 값에서 에러값이 발생하는 것을 확인하고 자료를 결합시 추가 옵션을 적용하는 것으로 프로그램을 수정하였다(Figure 3.193). 관측자료표출을 위한 ERA5 원시자료 수집, 시간정보 검증, 기후편차장 생성의 과정은 모두 크론타입을 활용하여 개발되어 매달 10월 자동으로 구동된다.

(문제파악) 관측 자료 확인

- 매일 10일 자료수신 및 편차장 생성 (Crontab)
- 같은 월에 반복 수행시 시간에 대한 검증과정 없이 데이터 결합

(Time) 202201 202202 **202203 202203 202203 202203** 202204

- Anomaly 계산과정에도 시간 (월) 정보에 대한 검증없이 Time Dimension의 개수로서 해당월 파악

(Forecast Time) 202201 202202 **202203 202203 202203 202203** 202204

(Climatology Time) 1 2 3 4 5 6

```

// Compute Monthly Anomaly
dim_lon = dim_x(index)
dim_lat = dim_y(index)
nlon = 22
if mod(dim_lat, nlon) < 0 then
    anomdat = indat
else
    ym = y+dim_lat-1, nlon
    anomdat(y:ym:nlon-1, 1) = indat(y:ym:nlon-1, 1) - indat2
end if

do while
    indat2 = indat + mod(dim_lat, nlon) // make time index multiple of 22
    anomdat = indat
    ym = y+indat2-1, nlon
    anomdat(y:ym:nlon-1, 1) = indat(y:ym:nlon-1, 1) - indat2
end do

// Save Anomaly Data
anomdatAnomaly_op_ncl = "Anomalies from Annual Cycle"
// Save Anomaly Data
outfile = ERA5_mon_anom_d12
outfile = outfile+ERA5_mon_anom_**yearname(ivar)**+climlatry(1)*"+climlon(1)*".ncl
dim_lon = dim_x(anomdat)
dim_lat = dim_y(anomdat)
title = "ERA5 monthly anomaly (climate: "+climlatry(1)*"+climlon(1)*")"
write_nc_file(outfile, dim_lon(1), dim_lat(1), dim_lon(1), dim_lat(1), outfile, indat, anomdat, title, varname(ivar))
    
```

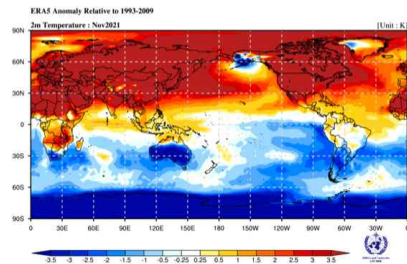


Figure 3.192. Problem with observational plot.

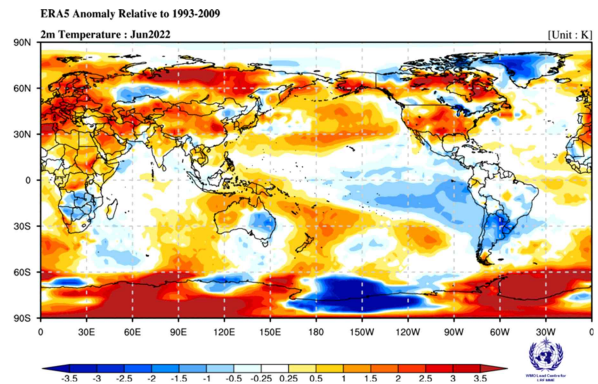
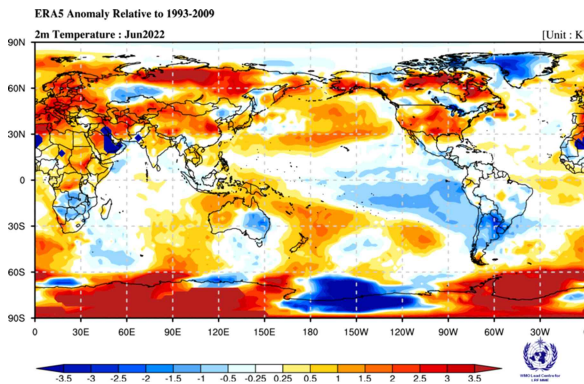


Figure 3.193. Results of data before and after applying merge option.

3.8.1.3. WMO 장기예보 선도센터 기후예측자료 활용성 증대를 위한 국내·외 협력 업무

3.8.1.3.1. 지역기후포럼 (Regional Climate Outlook Forum)

WMO 장기예보 선도센터는 기후예측자료 활용성 증대시키고 국제 협력을 통해 WMO 장기예보 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 APCC와 기상청의 기후예측과에서 참석하여 WMO 장기예보 선도센터의 MME 예측결과를 지역 전문가들과 공유하고 있으며, 2023년에는 2019년부터 시작된 COVID-19의 전 세계적인 유행으로 인해 온라인 회의로 진행되었다. 올해 WMO 장기예보 선도센터는 총 4개의 지역기후포럼에 MME 기후 예측정보를 제공하였다(Table 3.17). 상반기에는 남아시아 지역의 여름철 기후전망을 위해 개최된 SASCOF-25(25th South Asian Climate Outlook Forum)에 참석하여 WMO 장기예보 선도센터 MME 예측정보와 그동안 진행된 WMO 장기예보 선도센터의 개선사항을 발표하였다. SASCOF는 Asian southwest와 northeast 몬순 기후의 영향을 받는 지역의 기후전망을 위한 회의로 2010년부터 매년 개최되고 있으며 그동안 SASCOF의 발전 과정은 Figure 3.194와 같다. 제25차 SASCOF와 하반기에 개최된 제 26차 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 WMO 장기예보 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(EI 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 있다. 그러나 WMO 장기예보선도센터의 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. 실제 Figure 3.195에 나타낸 각국의 발표자료 예시와 같이, 파키스탄, 몰디브, 미얀마 등 다수의 국가에서 국가 장기예보 생산과에서 WMO 장기예보 선도센터 계절예측 정보를 참고자료로 활용하고 있음을 확인하였다.

Table 3.17. The list of RCOF in 2023.

RCOF	Place	Date
25th South Asian Climate Outlook Forum(SASCOF-25)	Online	27, April
26th South Asian Climate Outlook Forum(SASCOF-26)	Online	26-27, September
11 th East Asia winter Climate Outlook Forum(EASCOF-11)	Tokyo/Japan	6-8, November
21st ASEAN Climate Outlook Forum (ASEANCOF-21)	Online	21, November

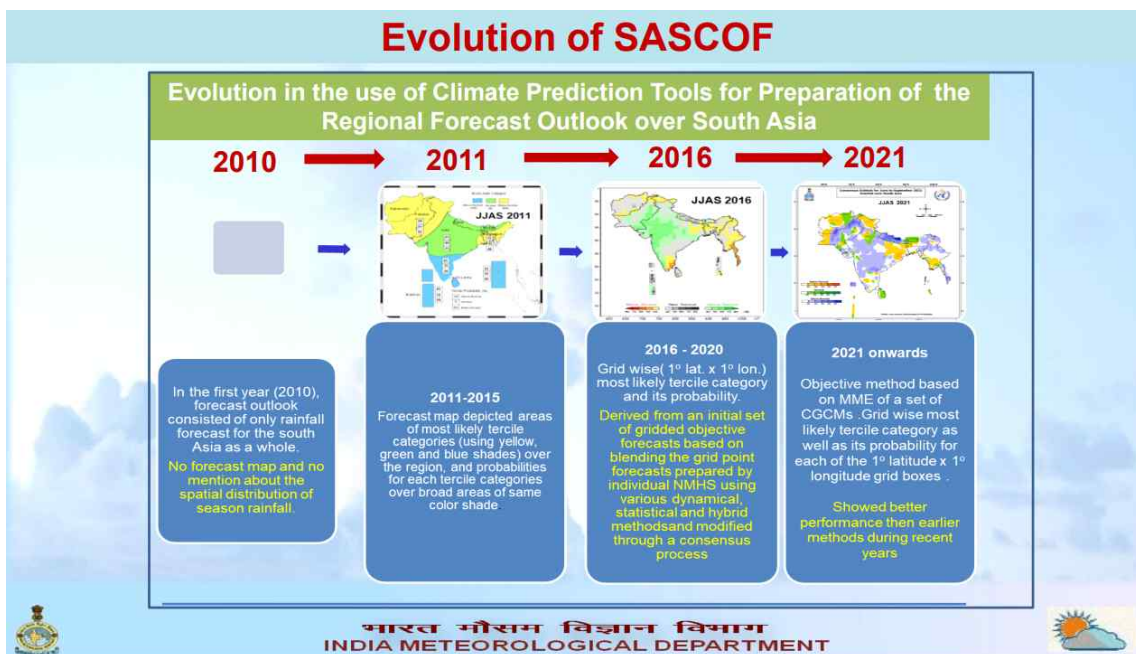


Figure 3.194. Evolution of SASCOF.

하반기에는 ASEANCOF-21 온라인 회의에 참석하여 WMO 장기에보 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. 제21차 ASEANCOF는 “The Future of Climate Services in Southeast Asia” 라는 주제로 MSS(Meteorological Service Singapore)와 ASEANCOF 워킹그룹이 주관으로 개최되었다. ASEANCOF 워킹 그룹은 2021년 ASEANCOF의 중장기적인 발전과 지원을 목적으로 설립된 조직적으로 특히, 객관적인 계절전망 개선을 목표로 하고 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 영

향을 미치는 기후인자 (El Nino-Southern Oscillation(ENSO), Indian Ocean Dipole(IOD))와 Northeast 몬순 시기의 기후전망에 대한 의견을 공유하였다. 회의 참가 영상과 WMO 장기예보 선도센터에서 발표한 기후전망 자료의 예시를 Figure 3.196에 나타내었다. 2023년 RCOF 발표 시에는 기후전망 자료의 예시에 나타난 것과 같이 최근 (2016년부터~) WMO장기예보선도센터의 기온 및 강수예측장을 함께 제시하여 그동안 WMO장기예보선도센터의 다중모델앙상블 예측시스템은 Northeast 몬순 기간동안 기온과 강수를 어떻게 예측했는지 예측 경향성을 한눈에 확인 할 수 있도록 자료를 제공하였다. WMO장기예보선도센터의 강수 예측은 공간적으로 관측과 상당한 차이를 보이고 있으나, 기온은 상대적으로 관측과 유사한 공간 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 특히 2023년과 같이 연초 라니냐가 점차 쇠퇴하고 엘리뇨로 발달했던 2018년은 경우 다른 해에 비해 상당히 높은 예측력을 보인다. 이렇듯 과거 해당 기간의 실시간예측결과를 함께 제공함으로써 실시간 예측정보의 활용성 증가시키고자 하였다. 제 21차 ASEANCOF에서도 말레이시아, 미얀마, 태국 등의 아세안 지역 기상청 또한 WMO 장기예보 선도센터 계절예측 정보를 참고자료로 활용하고 있음을 확인하였다(Figure 3.197). 이번 RCOF 회의에서는 WMO 장기예보선도센터 다중모델 앙상블 예측 시스템의 hindcast 기간에 대한 문의가 있었다. 현재 WMO장기예보선도센터 다중모델 앙상블 예측시스템의 hindcast 기간은 각 계절예측 시스템의 공통기간을 기반으로 사용하다보니 1993~2009년(총 17년)으로 다른 모델 또는 기관의 예측자료에 비해 상당히 짧은 편이며, 최근 기후 변동을 포함하지 못할 뿐만 아니라 WMO 권고 기후 기간인 1991~2020년과도 상당한 차이를 보인다. 이에 따라 향후 WMO장기예보선도센터 다중모델 앙상블 예측 시스템의 공통 hindcast period 변경 계획을 수립할 필요가 있을 것으로 보인다.

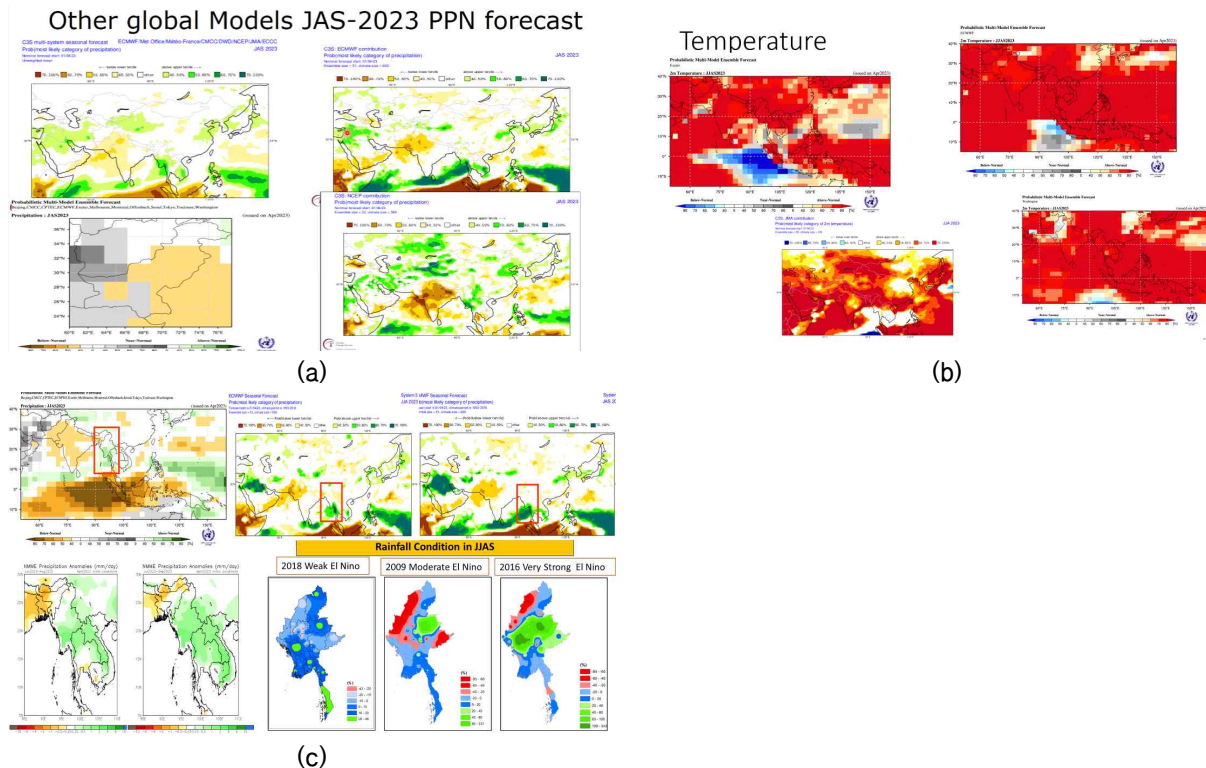


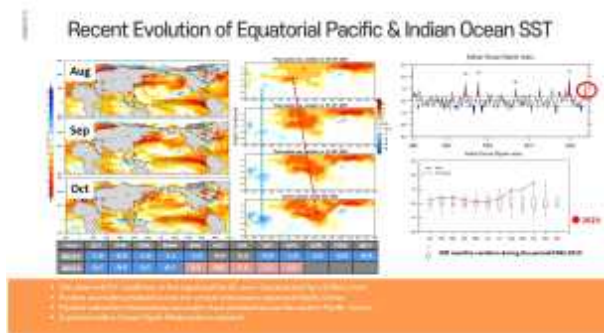
Figure 3.195. Examples of the use of seasonal climate information from WMOLC-LRFMME (I).



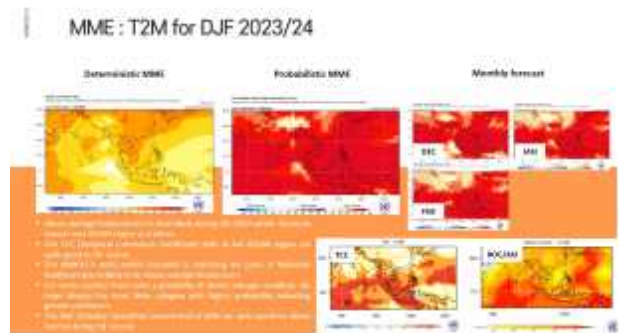
(a)



(b)



(c)



(d)

ASEANCOF-21

Forecast for Northwest Monsoon in the last few years

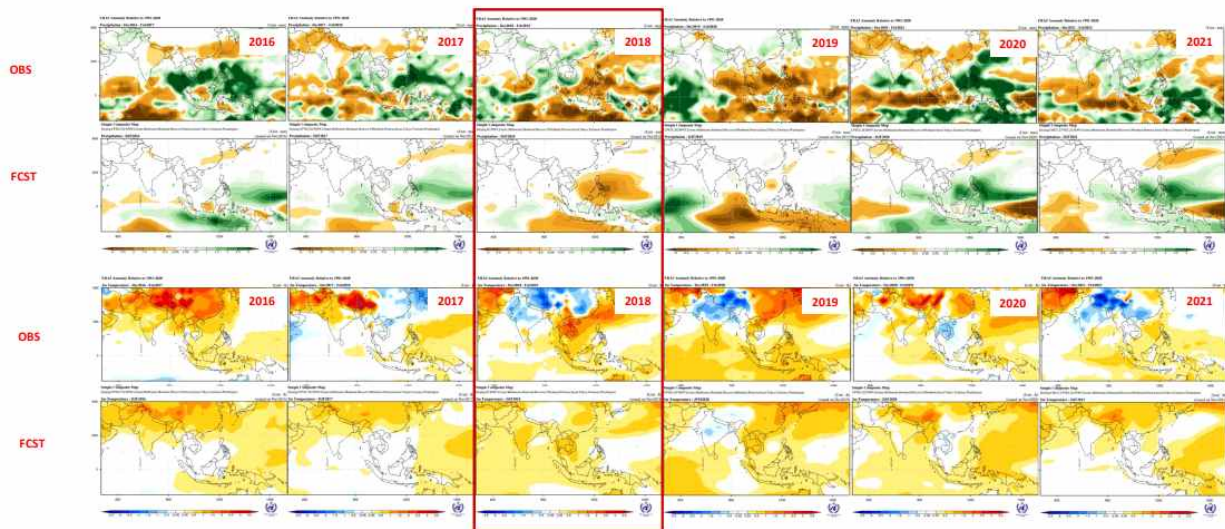


Figure 3.196. (a) Official photo from the ASEANCOF-21 and (b), (c), (d), and (e) are examples of presentation that were delivered on ASEANCOF-21.

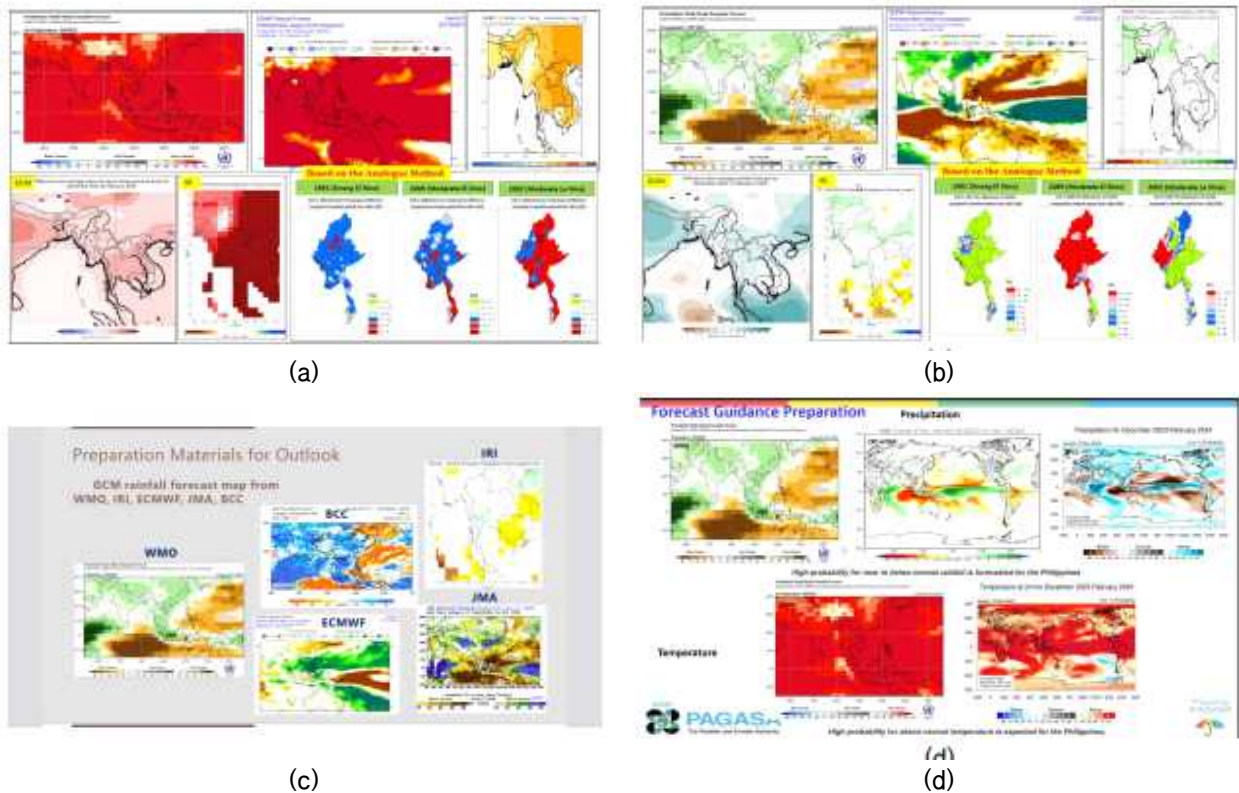


Figure 3.197. Examples of the use of seasonal climate information from WMOLC-LRFMME (II).

3.8.1.3.2. 기타 기상청 기후예측과와의 협력 사항

APCC와 기상청 기후예측과 간의 원활한 업무 협력을 위해서 매월 초에 지난달 WMO 장기예보 선도센터 운영에 관한 운영 보고서를 작성하여 기상청 기후예측과 및 APCC 감독부서인 기상청 기후정책과에 제공하고 있다. 보고서에는 WMO 장기예보 선도센터 현업시스템 및 서버 운영상의 특이 사항, 홈페이지 이용 현황 및 WMO 장기예보 선도센터 예측자료 제공 실적 등을 포함하고 있다. 2023년 12월 현재 WMO 장기예보선도센터 홈페이지는 총 92개국에서 총 476명의 회원이 이용하고 있으며, 2022년과 비교해 16명의 신규회원이 추가되었다. WMO 장기예보 선도센터 홈페이지의 2023년 월별 이용 현황을 Figure 3.198에 나타내었다.

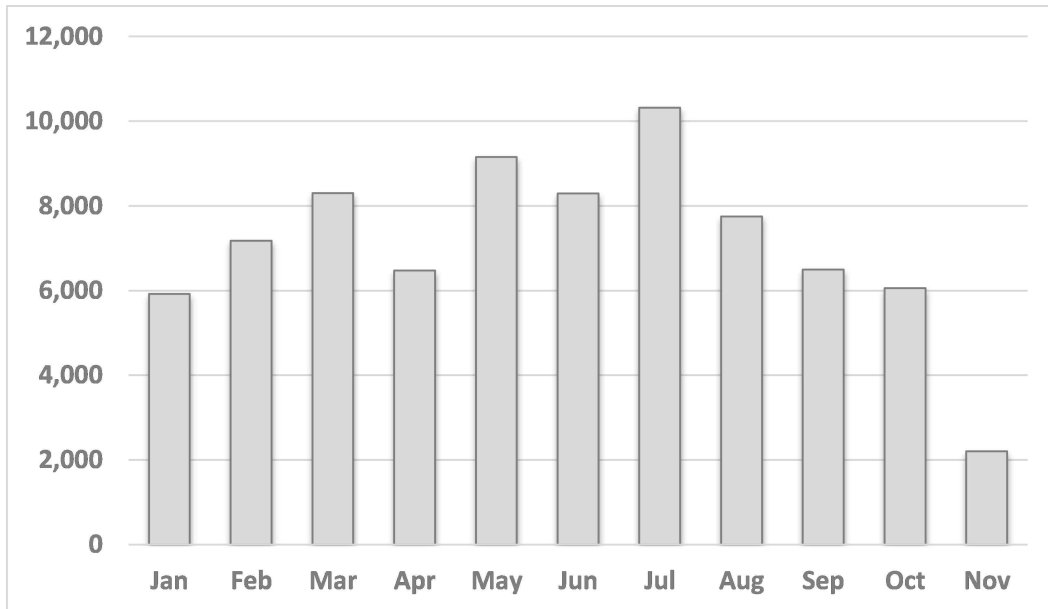


Figure 3.198. The number of monthly visitors of WMO LC-LRFMME website in 2023.

WMO 장기예보 선도센터는 7월 26일부터 15개 참여기관이 선도센터 자료 개방에 동의하여 기후 예측 자료를 국내외 공공, 민간, 학계 등 모든 사용자에게 전면 개방하였다. 이를 위해 기존 WMO 장기예보 선도센터 누리집의 로그인 기능을 삭제하고, 사용자의 이해를 돕기 위한 기후 예측 자료 내려받기 사용설명서를 영문과 한글판으로 제작·배포하여 자료 접근 편의성과 활용성을 증대하였다. 자료 완전 개방으로 WMO 장기예보 선도센터의 전 지구 다중모델앙상블 기후 예측 자료는 기후 예측 분야 학술연구·기술 개발뿐만 아니라 이상기후에 민감한 곡물·에너지 선물거래, 마케팅 등 산업계에서도 활용될 수 있을 것이다. 이렇게 기후예측자료가 공공, 민간, 학계 등 모든 사용자에게 전면 개방되면서 신규 회원의 유입이 22년에 비해 감소한 것으로 보인다.

기상청에서는 「개인정보 보호법」 제 31조제2항제2호(개인정보 처리 실태 및 관행의 정기적인 조사 및 개선), 제6호(개인정보파일의 보호 및 관리·감독)에 따라 개인정보보호 수준 향상과 인식 제고를 위하여 기상청 및 산하기관의 개인정보 관리체계와 침해예방 활동 등을 주기적으로 점검하고, 개인정보처리시스템 등에 대한 접근권한이 없는자가 접근 통제 및 관리체계 강화를 통해 개인정보 분실, 도난, 유출, 위조, 변조 또는 훼손방지를 위해 개인정보처리시스템 접근 권한 관리 기준을 마련하여 정기적으로 점검하고 있다 (월, 분기별). 따라서 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지의 개인정보처리시스템 접근 권한 및 사용자 정보 조회 및 변경 내역점검을 매월 그리고 반기별로 수행하여 개인정보 관리 실태를 자체적으로 점검하고 있으며 점검 결과는 기상청 기후예측과에 제공하고 있다.

3.8.1.4. WMO 장기예보 선도센터 예측 시스템 개선 용역 사업 지원

3.8.1.4.1. 목적 및 기대효과

앞서 언급한 것과 같이, WMO 장기예보 선도센터는 2009년 4월 한국 기상청과 미국 기상청 (GPC Washington)의 공동 운영 형태로 지정되면서 2023년 현재 전 세계 14개 GPC가 생산하는 장기 예측자료를 수집·표준화하고, 표준화된 GPC 자료 및 다중모델앙상블 (Multi-Model Ensemble, MME) 예측자료를 WMO 회원국에 제공하는 역할을 수행해 오고 있다. 현재 WMO 장기예보 선도센터 예측시스템은 자료처리 기술, 웹 시스템 기술, 데이터베이스 기술을 종합적으로 적용하여 운영하고 있으며, 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 있으며, APCC는 WMO장기예보선도 시스템 개선 용역의 실무적인 기술적 지원을 수행하고 있다. 2023년에는 “WMO 장기예보 선도센터 시스템 기능강화 (II) 용역 사업이 4월부터 11월까지 약 7개월 동안 진행되었으며, 용역사업의 범위는 아래와 같이 크게 4개로 구분되어 진행되었다. 특히 올해는 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지내에 표출되는 계절예측 정보의 가시화 개선을 통해 기후 정보를 보다 빠르게 해석하고 판단할 수 있도록 개선하였다. 상세한 내용은 다음절에 서술하였다.

- WMO 장기예보 선도센터 시스템 개선
- 계절예측 자료 생산/제공을 위한 현업시스템 개선
- 제공 메뉴 재구성 및 표출 개선
- 웹서비스 현황 분석 및 개선방안 제시

WMO 장기예보 선도센터 예측 시스템 기능강화 용역 사업 수행으로 WMO 장기예보 선도센터 시스템 개선에 따라 전세계 회원국 사용자에게 안정적으로 품질 높은 서비스를 제공할 수 있을 것으로 보이며, WMO 장기예보 선도센터 기후예측 자료 활용도 또한 증대시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 WMO 장기예보 선도센터에 자료를 제공하는 GPC와의 국제적 협업 체계를 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

3.8.1.4.2. 사업 수행 내용

- WMO 장기예보 선도센터 시스템 개선

WMO 장기예보 선도센터는 2022년까지 14개 기관으로부터 수집한 기후예측자료를 이미지와 디지털 형식의 다중모델 앙상블 예측 자료로 생산하여 누리집을 통해 제공하고 있었다. 2023년 초 인도 기상청의 계절 예측 시스템이 GPC로 승인이 되면서 WMO 장기예보선도센터의 15번째 참여 기관이 되었다. 이에 따라 인도 기상청 계절 예측자료를 WMO 장기예보선도센터 누리집을 통해 제공하기 위해서는 표준화와 그래픽 생성 과정에 대한 시스템 개발이 필요하다. GPC Pune의 계절 예측 시스템은 해양-대기 결합 모델로 해양 모델은 GFDL-MOM4를 대

기모델은 GFS T382 Spectral Resolution 64 levels의 해상도를 가지며, hindcast 기간은 2003년에서 2017년으로 WMO장기예보 선도센터 다중모델 앙상블 계절 예측 시스템의 공통 hindcast 기간인 1993년~2009년에 포함되지 않아 다중모델 앙상블 예측시스템에는 참여할 수 없다. 보다 상세한 정보는 Table 3.18과 같다. 다만 Table3.18에서는 hindcast의 앙상블 개수를 12개, forecast의 앙상블 개수를 최소 20개로 표시하고 있으나, GPC Pune의 계절 예측 시스템 자료 추출상의 문제로 년도별, 변수별로 앙상블 개수가 상이하다. 표준화 시스템에서는 이러한 이슈를 고려하여 년도별로는 앙상블 개수를 달리 처리할 수 있도록 조치하였으나, 변수별로는 앙상블 개수를 달리하여 처리할 경우 프로그램이 보다 복잡해지며 앙상블 개수는 확률예측자료 처리시 문제가 될 수 있기에 변수별 최소 앙상블수를 가지는 변수를 기준으로 앙상블 수를 설정하여 표준화처리 하도록 프로그램을 구성하였다. Figure 3.199는 WMO 장기예보선도센터 누리집을 통해 제공되는 GPC Pune에 대한 계절예측 그래픽의 예시이다. GPC Pune의 그래픽은 누리집의 /Seasonal/Forecast/Individual Forecast 메뉴에 한정하여 정보를 제공하며, 기존 타 GPC에서 제공하고 있던 Rectangular, Timeseries, Stereographic에 대한 계절예측 그래프를 제공한다.

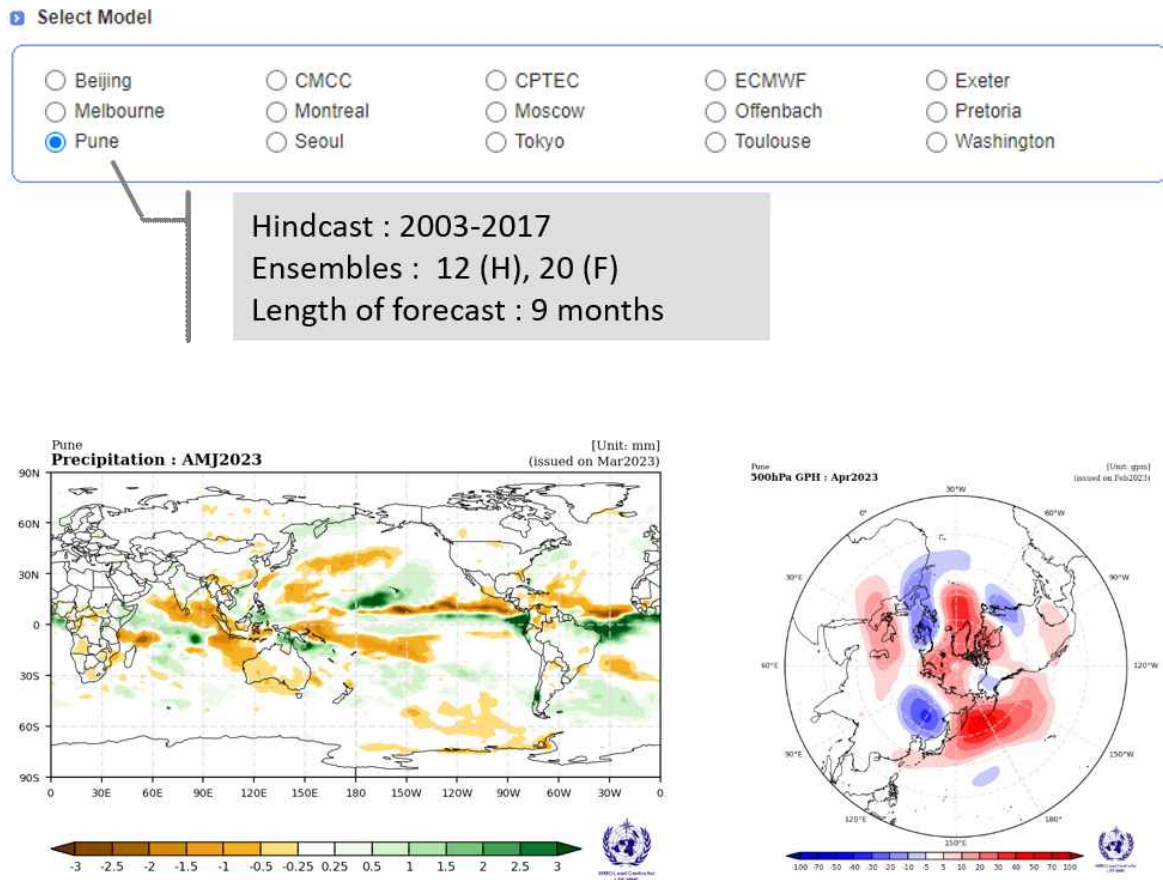


Figure 3.199. Samples of seasonal forecast for GPC Pune.

Table 3.18. Model description of long-range forecast system from GPC Pune.

January 2018	
Is it a coupled forecast system?	Yes
Is it a Tier-2 forecast system?	No
Atmospheric model resolution	GFS T382 Spectral Resolution 64 levels
Ocean model (if applicable)	GFDL-MOM4p0d, Resolution: 0.25° between 10°S to 10°N latitude band and 0.5° elsewhere, 40 vertical levels
Source of atmospheric initial conditions	NCMRWF, New Delhi, India
Source of ocean initial conditions	INCOIS, Hyderabad, India
If Tier-2, what is the source of SST predictions?	N/A
Hindcast period	2003-2017
Ensemble size for the hindcasts	12 ensemble members
How is the hindcast ensemble configured?	Hindcast are initialized from every 5th day starting from the first day of each month. Two members run are carried out at each initial day using 00 GMT and 12 GMT initial conditions
Ensemble size for the forecast	Minimum of 20 ensemble members
How is the forecast ensemble configured?	Forecast are initialized everyday starting from the first day of each month. Two members run are carried out at each initial day using 00 GMT and 12 GMT initial conditions
Length of forecasts	9 months
Data format	GRIB2
What is the latest date predicted anomalies for the next month/season become available?	Around the 15th of each calendar month
How are the forecast anomalies constructed?	Forecast anomalies are constructed by subtracting the model Hindcast climatology (2003-2017)
URL where forecast(maps) are displayed	https://rcc.imdpune.gov.in/prediction.php
Point of Contact	Dr. Sreejith O. P (op.sreejith@imd.gov.in) Dr. Sabeerali C. T. (sabeer.ct@imd.gov.in)

또한 올해 용역과제를 통해서 지역기후포럼 지역에 대한 자료를 생산하고 표출시스템을 개선하였다. 앞서 설명한 바와 같이 WMO 장기예보 선도센터의 중요한 역할 중의 하나는 WMO 주관으로 지역별 기상청과 전문가들이 합의된 기후 전망생산하기 위한 자리인 지역기후포럼에 참석하여 WMO 장기예보 선도센터의 다중모델 앙상블 예측결과를 지역 전문가들과 공유하고 이와 관련된 다양한 응용 분야의 전문가와 의견을 교환하여 WMO 장기예보 선도센터의 다중모델 앙상블 예측 결과의 활용성 강화를 위해 노력하는 것이다. 이미 많은 국가에서 국가별 또는 지역별 계절전망을 위해서 WMO 장기예보 선도센터 다중모델 앙상블 예측결과를 중요한 참고자료로 활용하고 있고, WMO 장기예보 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 WMO 장기예보 선도센터 누리집 메뉴에 지역기후포럼을 추가하였다. WMO 장기예보 선도센터 누리집을 통해 제공되는 지역기후 포럼은 Table 3.19에 나타낸 것과 같이 RA(Regional Association)I~VI까지 총 22개 영역으로 구성된다. 누리집에서는 Figure 3.200에서와 같이 Select Region 메뉴에서 'RCOF' 를 설정하면 RA와 RA이하 지역기후포럼명을 선택할 수 있도록 하였다. 이외의 모든 설정(범례 등)은 기존과 동일하게 구성하였다.

Table 3.19. Area information of Regional Climate Outlook Forum.

No.	RA	RCOF	Lon1	Lon2	Lat1	Lat2
1	RA I	GHACOF	21.81	51.41	-11.76	23.15
2	RA I	PRESASS	-25.36	27.46	1.66	27.31
3	RA I	PRESAGG	-16.71	16.19	-1.46	13.90
4	RA I	PRESAC	5.60	31.31	-13.46	13.08
5	RA I	PRESANORD	-13.17	36.24	18.97	37.54
6	RA I	SARCOF	11.68	63.50	-46.98	5.39
7	RA I	SWIOCOF	16.45	63.50	-46.98	-0.98
8	RA II	EASCOF	73.50	153.99	18.16	53.56
9	RA II	FOCRA II	19.64	-169.00	-11.01	81.86
10	RA II	SASCOF	60.52	101.17	-0.69	38.49
11	RA III	SSACOF	-109.46	-28.84	-55.98	5.27
12	RA III	WCSACOF	-109.46	-57.45	-55.98	12.46
13	RA IV	CACOF	-118.45	-66.85	-4.23	32.72
14	RA IV	CariCOF	-89.23	-51.62	1.16	27.23
15	RA V	ASEANCOF	92.17	141.02	-11.01	28.55
16	RA V	PICOF	112.91	-124.77	-54.78	20.54
17	RA VI	SEECOF	13.38	51.68	29.19	52.38
18	RA VI	MedCOF	-18.17	51.68	14.72	52.38
19	RA VI	NEACOF	19.64	-169.00	36.67	81.86
20	RA VI	ACF	-180.00	180.00	60.00	90.00
21	RA VI	ArabCOF	-17.10	59.84	-1.66	37.54

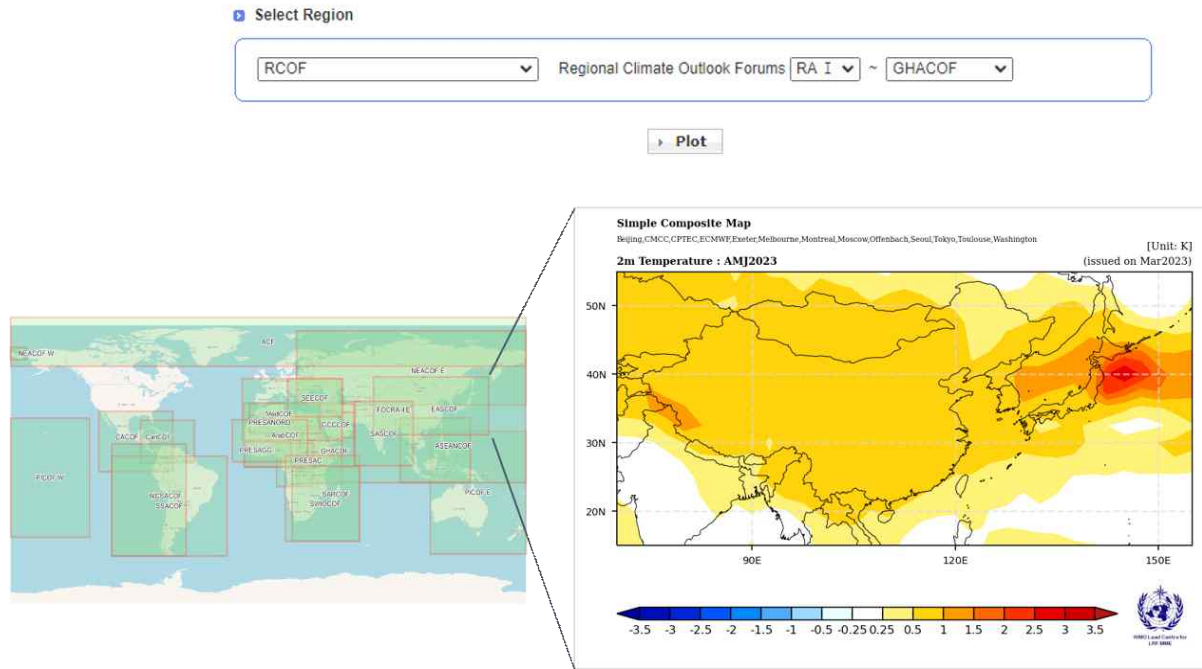


Figure 3.200. Samples of providing seasonal forecast for Regional Climate Outlook Forum region.

그리고 용역과제에서는 서비스 요소 확대 제공을 위해 시스템을 개선이 진행되었다. WMO 장기에보 선도센터 누리집을 통해 기본적으로 6개의 변수 (기온, 강수, 해수면온도, 해면기압, 500 hPa 지위고도, 850 hPa 기온)에 대한 예측 정보를 제공하고 있고, 다중모델 앙상블 예측결과는 6개 변수와 함께 850 hPa 바람장 예측결과를 제공해왔다. 850 hPa 바람장 예측 정도를 개별 모델에 대해서도 제공할 수 있게 자료 처리 및 그래픽 생성 프로그램을 작성하여 누리집과 연동하였다. 그 예시 결과는 Figure 3.201에 나타낸 것과 같으며, 누리집의 /Seasonal/Forecast/Individual Forecast 메뉴에서 추가된 850 hPa 바람장 예측결과를 확인 할 수 있다. 850 hPa 바람장의 경우, GPC Washington과 Pretoria는 해당 변수의 예측결과를 WMO 장기에보 선도센터에 제공하고 있지 않아 서비스가 되지 않는다.

더불어 북극 해빙은 기후변화로 인해 중요한 예측인자로 인식되고 있으며 겨울철 계절기후전망을 위한 참고자료로 활용되고 있다. WMO 장기에보 선도센터에서는 북극 해빙 예측 중요성을 인식하여 해빙예측 정보를 누리집을 통해 제공하기 위해 GPC에 해빙 자료 생산 여부를 사전 조사하여 그 결과를 Table 3.20에 나타내었다. 모든 GPC의 계절예측모델은 Sea ice extent를 예측결과를 생산하고 있지 않으며, sea ice extent를 대체할 수 있는 변수로 sea ice concentration이나 sea ice fraction을 생산하고 있다. 올해 용역과제에서는 GPC Seoul, Exeter, ECMWF, Toulouse의 sea ice fraction 정보를 수집하고 표준화를 거친 후 Figure 3.202와 같이 누리집을 통해 제공할 수 있게 시스템을 구축하였다. sea ice fraction이 0.15 이상인 지역만 표출하도록 하였다.

Select Parameters

All
 Precipitation
 2m Temperature
 850hPa Wind
 500hPa GPH
 850hPa Temperature
 Mean Sea Level Pressure
 Sea Surface Temperature

Issued date: 2023 MAR Period: 2023 APR ~ 2023 APR Parameters: Plot Download Print

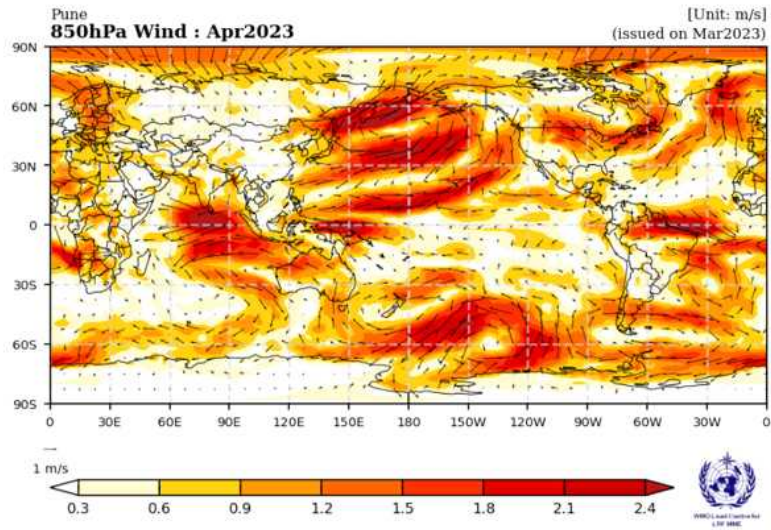


Figure 3.201. Wind at 850 hPa on WMOLC website.

Table 3.20. Results for investigation whether each GPC produces “sea ice extent (SIE)” variableSea ice extent (SIE) variable

GPC	Sea Ice Extent	Alternative Variables	Possibility of Data Conversion to SIE	Data type
Beijing	×	sea ice concentration	Yes	NetCDF
CMCC	×	sea ice concentration	Yes	NetCDF
CPTEC	×	N/A	N/A	N/A
ECMWF	×	sea ice concentration	Yes	NetCDF
Exeter	×	sea ice concentration	Yes	GRIB2
Melbourne	×	sea ice fraction	N/A	NetCDF
Montreal	×	sea ice concentration	N/A	NetCDF
Moscow	×	N/A	N/A	N/A
Offenbach	×	sea ice cover	Yes	NetCDF
Pretoria	×	–	–	–
Seoul	×	sea ice concentration	Yes	NetCDF
Tokyo	×	sea ice concentration	N/A	GRIB2
Toulouse	×	sea ice concentration	Yes	NetCDF
Pune	×	sea ice concentration	Yes	NetCDF
Washington	×	sea ice concentration	Yes	GRIB2

Select Parameters

- Precipitation
- 500hPa GPH
- Mean Sea Level Pressure
- 2m Temperature
- 850hPa Temperature
- Sea Surface Temperature
- 850hPa Wind
- Sea ice extent

Plot

Issued date: 2023 JUL Period: 2023 AUG - 2023 OCT Parameters: Hemisphere: North

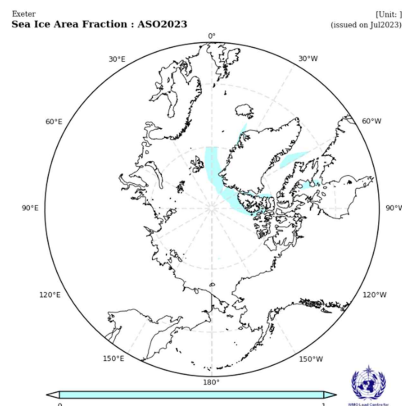


Figure 3.202. Sea ice extent on WMOLC website.

- 계절예측 자료 생산/제공을 위한 현업시스템 개선

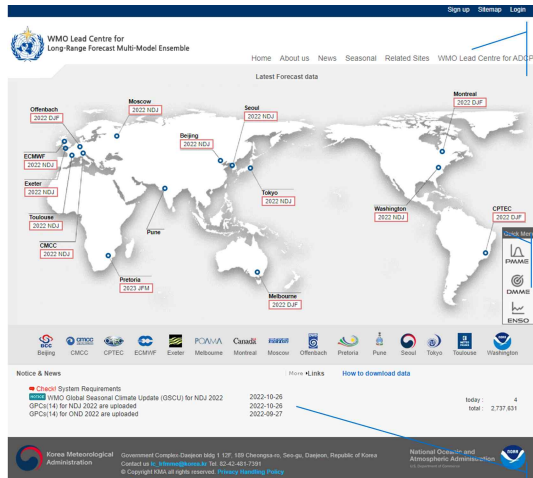
WMO 장기예보 선도센터 계절예측 시스템은 기본적으로 기후분야에서 많이 사용하고 NCL(NCAR Command Language)과 Shell를 사용하여 개발되었다. 그러나 NCAR에서 개발된 NCL의 경우 2019년 NCL Version 6.6.2를 마지막으로 더 이상의 업데이트가 진행되지 않고 있으며, NCAR에서도 기후 자료의 분석과 표출을 위한 개발 언어로 Python을 채택하고 있다. Python은 스크립트 언어로 컴파일 과정없이 인터프리터에 의해 실행 결과를 바로 확인하고 수정하면서 코드를 작성할 수 있는 장점을 가지며, 쉽고 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 WMO 장기예보 선도센터 계절예측 시스템도 Python개발언어로 시스템을 변경하여 향후 개발의 용이성과 확장성을 확보하려 하였다. 그 일환으로 2022년에는 14개 GPC의 기후예측자료 표준화를 위한 전처리 프로그램과 개별 GPC 그래픽 생성 프로그램을 Python으로 변경하였으며, 2023년도에는 결정론적 다중모델 앙상블 계산과정과 확률론적 다중모델 앙상블 계산과정, 그리고 그래픽 표출 처리 프로그램을 Python 프로그램으로 변경하였다.

- 제공 메뉴 재구성 및 표출 개선

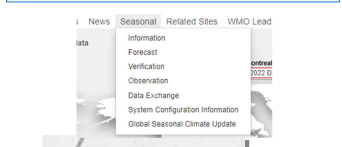
2017년 WMO 장기예보 선도센터의 신규 홈페이지가 구축된 이래 용역과제를 통해 화면 구성 및 메뉴 등 많은 부분이 개선되어 왔다. 그러나 매년 용역을 수행하는 업체가 변경되면서 홈페이지 화면구성이나 폰트 등이 통일감 없이 진행된 경우가 많았으며, 동일한 메뉴가 반복적으로 표시 되고 있었다. 이러한 점을 개선하여 홈페이지 사용자에게 통일성 있는 화면과 메뉴를 제공하기 위해 메뉴 통합 및 재배열, 메인 화면의 재구성, 폰트 확대 등의 개선작업이 이루어졌다(Figure 3.203). 또한 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자가 보다 편리하게 홈페이지 메뉴나 정보를 찾을 수 있게 사용자 매뉴얼을 작성하여 업로드 했으며, 홈페이지 메인에 최신 계절예측 정보 알림 서비스를 추가하여 업데이트된 계절 예측 정보를 한눈에 알아볼 수 있게 수정하였다.

- 웹서비스 현황 분석 및 개선방안 제시

2023년 용역과제에도 WMO 장기예보 선도센터의 개선 방향 수립을 위해 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자 의견 및 요구 사항을 수렴하는 등 웹서비스 현황분석을 통한 개선 방안을 제시하는 내용이 포함되었다. 서비스 만족도 파악을 위해 전반적인 만족도를 묻는 항목을 포함하여 6가지 (자료 사용 목적, 콘텐츠, 메뉴 레이아웃, 웹사이트 뒤로가기 기능, 콘텐츠 일관성, 사용자 편의성) 세부 만족도를 묻는 문항으로 구성하였다. 2023년 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 서비스 만족도 조사에는 총 105명이 참여하였으며, 세부적인 사용자의 요청 사항으로는 예측정보의 시간 해상도(응답자의 약 30%) 및 공간 해상도(응답자의 약 38%)의 증가를 개선 요소로 꼽았으며, 서비스 속도도 응답자의 약 10%가 개선을 요구하였다. 향후 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 및 운영시스템 개선시 검토할 필요가 있다.



메뉴 표출개선



퀵메뉴 배치



공지사항 수정

contact us관련 수정

Notice & News

Check! System Requirements	2022-10-26
WMO Global Seasonal Climate Update (GSCU) for NDJ 2022	2022-10-26
GPCs(14) for NDJ 2022 are uploaded	2022-10-26
GPCs(14) for OND 2022 are uploaded	2022-09-27

Government Complex Daejeon bldg 1 12F, 189 Cheongs-ro, Seo-gu, Daejeon, Republic of Korea
 Contact us ic_frmme@korea.kr Tel. 82-42-481-7391
 © Copyright KMA all rights reserved. [Privacy Handling Policy](#)

정보 Update 알림 →



Figure 3.203. Improvements of WMOLC website in 2023.

3.8.2. WMO S2S 국제조정사무소(ICO) 운영

당해년도에는 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 업무협약, 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. 아태지역 기후예측 기술지원 및 협력

3.8.3.1. 2023년 APCC 기후정보 생산 및 활용 사용자 워크숍 개최

APCC 기후정보 생산 및 활용 사용자 워크숍은 국내 기후관련학과 대학생 및 대학원생 15명을 대상으로 운영되었으며, 3월부터 기획되어 7월 12일(수)부터 14일(금)까지 3일간 APCC 국제회의장에서 개최되었다. 교육은 12명의 APCC 연구원의 이론강의와 실습교육으로 진행되었으며, 강의 내용은 아래와 같다.

- (이론) 기후예측자료의 이해
- (이론) APCC 기후예측시스템 소개 및 기후예측 방법, 예측성의 이해
- (이론) 기후예측의 생산 및 검증
- (이론) 미래 기후전망 자료 활용 기후 변화 영향 평가
- (이론) 여름철 계절내 진동 예측 생산 및 활용
- (이론) 기후감시와 분석
- (이론) 동남아시아 산불예측정보서비스 사례 소개
- (실습) APCC 기후정보서비스 시스템 소개 및 회원가입
- (실습) 기후자료 서비스 실습
- (실습) 기후자료 처리서비스 실습
- (실습) 사용자 맞춤형 계절예측 및 검증 실습
- (실습) 상세화 예측 실습

총 10개 대학 및 기관에서 15명이 참석하였으며, 워크숍에 대한 전반적인 만족도를 조사한 결과 종합 평균점수 4.7점(5점 만점)으로 참가자 대부분이 워크숍의 취지를 이해하고 높은 효

용성을 확인한 것으로 조사되었다. 참석자 전원이 워크숍 프로그램이 참가목적과 기대에 부합하고, 개인의 역량강화에 도움이 되며, 행정지원 역시 충분했다고 평가하였다. 추가적인 의견으로는 참가자 수준에 맞는 프로그램의 난이도 조절 및 질의응답 시간을 충분히 고려한 시간安排 등이 있었으며, 기후정보서비스 플랫폼 실습과 관련하여서는 서버 및 처리속도 개선을 요청하였다. 워크숍 활성화를 위해 파이썬 등과 같은 프로그래밍 교육과 Open AIP, 기후자료 시각화, 통계분석, wget 활용 정보추출 등의 심화과정에 대한 수요가 있었으며, 조별실습을 통한 실습결과 발표에 대한 의견도 수렴하였다. 기후정보서비스 플랫폼 실습교육을 통해 수렴된 사용자의 피드백과 니즈는 예측운영과의 기후정보서비스팀에서 수렴하였으며, 이는 향후 수요에 부응하는 맞춤형 서비스 개발에 기여할 것으로 기대된다.

3.8.3.2. APCC 태평양 네트워크 TF 운영

APCC 태평양 네트워크 TF는 2022년부터 운영되고 있으며, 2023년 중 아래의 활동을 추진하였다.

(가) 제12차 및 제13차 태평양도서국 기후전망포럼(Pacific Island Climate Outlook Forum, PICOF) 참석 및 발표

- 제12차 PICOF 참석('23.4.20(목), 화상회의)
 - APCC ENSO 현황 및 전망 발표
 - WMO RA-V Pacific Regional Climate Centre(RCC) 장기예보분과 회원으로서 2022년 11월~4월 대기 기후전망 리뷰, 2023년 5월~10월 대기 기후전망 자료 제공 및 기후전망 작성/검토의견 제시
 - 태평양 지역 기상청들이 사용하는 기후예측서비스와 기후정보 관련 의견 수렴
- 제13차 PICOF 참석('23.10.23(월), 피지)
 - APCC ENSO 현황 및 전망 발표
 - 2023년 5월-10월 기후/해양/열대사이클론 감시
 - 2023년 11월-2024년 4월 기후/해양/열대사이클론 전망
 - 각국 NMHS(National Meteorological and Hydrological Services)의 예보 방식 현황 및 최종 사용자를 위한 맞춤형 예보 방식 논의
 - 농업 및 어업 분야에 미치는 ENSO의 영향, 농업 및 어업 분야의 요구사항, 미디어를 통한 NMHS의 예보 결과 전달 방식 논의

(나) 제6차 태평양기상위원회 및 제3차 태평양기상장관회의 참석

- 제6차 태평양기상위원회 참석('23.8.14(월)~16(수), 피지)
 - 태평양 기상위원회는 태평양지역 기상청장 및 관련국가(미국, 영국)의 대표가 정기적

으로 모여 태평양지역의 기상, 기후 관련 주요 현황과 정책 방향을 결정하는 회의로 약 200여명이 참가하였다. APCC는 GCF-UNEP 프로젝트의 성과 및 향후 계획 관련 발표하였으며, 각국 기상청장 및 지역기구, 주요 파트너 기관과 네트워킹을 통해 지역 내 기상기후 서비스 관련 주요 정보를 수집하였다. 또한 후속사업 발굴 및 타 프로젝트와의 협업을 통한 사업 스케일업 가능성을 모색하였다.

○ 제3차 태평양기상장관회의 참석('23.8.18(금), 피지)

- 제3차 태평양기상장관회의는 기상·기후관련 부처의 장관들이 기상, 기후, 수문학, 해양 및 관련 서비스 제공과 기상청의 역할, 국가 및 지역 안전, 지속가능한 개발에 대해 논의하는 장으로, 기상청의 전략적 방향 제시 및 공여자의 지원 요청 등이 논의되었다. 특히 극단적인 기상·기후 현상과 변칙적인 기후에 대한 기후정보를 제공하여 여러 기후 민감 분야의 의사결정을 지원하고 대책을 마련할 수 있도록 지원해야 함이 강조되었다.

(다) 기타 네트워크 회의 참석 및 논의 참여

○ 제1차 태평양도서국 기후서비스패널(PICS Panel) 회의 참석('23.3.8, 온라인)

- 태평양도서국 기후서비스패널은 태평양기상위원회의 전문가 자문조직으로 태평양기후전망포럼 및 지역기후센터 네트워크 활동과 연계한 다양한 안건을 논의한다. 기후서비스패널은 2023년 태평양도서국 내 각종 회의 일정을 공유하고 회의에서 다룰 주요 안건 및 발표자를 논의하였다.

○ 제1차 협력기관 및 국제공여기관 회의 참석('23.8.17(목), 피지)

- WMO, UNDP, UNDP, UNESCO, UNDRR, UNOCHA, GCF, World Bank 등 주요 국제기구와 태평양도서국에 기여하고 있는 공여기관(APCC, 미국 NOAA, USAID, 영국 UK Commission, EU, 일본 JICA 등), 태평양도서국 지역기구(PIFs, USP, SPC, SPREP) 등이 참석하는 회의로 파트너 간 협력강화 및 시너지 효과 창출, 태평양 지역의 필요 우선순위 지정, 재난 재해 대응 등에 초점을 맞추어 협의가 진행되었다. 특히 기상·기후 서비스 강화 및 운영을 위해서는 추가적인 투자가 필수적이며, 정확한 예측과 경보 제공을 위해서는 이해관계자들을 파악하고 참여를 촉진시키는 것이 필요하다. 특히 태평양 파트너 코디네이션 메커니즘(PPCM, Pacific Partner Coordination Mechanism)을 통해 사업간 중복의 최소화를 위한 점검이 필요하며 어떤 기금이 어떤 사업에 쓰였는지 일목 요연하게 파악하고 상호 정보를 공유하는 것이 필요하다는 것을 논의하였다. 또한 ICT 분야의 역량배양, 다중위험 조기경보시스템 개발 등이 우선순위가 매우 높은 사업분야로 논의되었으며, 각 기관의 지원을 요청하였다.

3.8.4. IPCC 등 기후분야 국제회의 참석 및 정부대표단 활동

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 서남극의 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 **모두에 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 GtCO₂ per year in 2030, 0–8 GtCO₂ per year in 2050, and 0–16 GtCO₂ per year in 2100; annual rates of agriculture, forestry and land-use related CDR deployment range from 0–5 GtCO₂ per year in 2030, 1–11 GtCO₂ per year in 2050 and 1–5 GtCO₂ 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 CO₂/yr, e.g., blue carbon management) to higher potential (>3 Gt CO₂/yr, e.g., agroforestry);

Longer Report p52, sec 3.3.4, line 4–9

The larger the overshoot, the more net negative CO₂ emissions needed to return to a given warming level (high confidence). Reducing global temperature by **removing CO₂** would require net negative emissions of 220 GtCO₂ (best estimate, with a likely **range 160–370 GtCO₂**) 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 GtCO₂** by 2100, pathways that return warming to 1.5°C (>50%) after high overshoot reach median values of **360 GtCO₂** (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 CO2 and non-CO2 emissions, particularly methane, limits peak warming levels and reduces the requirement for net negative CO2 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)>

o 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.

제58차 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 총회결과 전문

<B. 장기 기후변화, 리스크 및 대응>

o (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.

o (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 고기후

에서 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 있을 것이라고 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 2100년 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 emissions라는 의미를 명확히 하기위한 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 포함하는지 질의하였으며, 독일, 덴마크 등은 오버슈트가 유발하는 역효과를 조금 더 구체적으로 제시할 것을 제안
 - 저자는 오버슈트가 return 개념을 포함하는 것임을 설명한 후 피드백 과정을 부연 설명하는 수정안을 제시하고 회원국은 이를 승인함

- **(B.7.2)** 오버슈트 기후 영향 요인에 영향을 주고 이로 인해 자연과 인간에 대한 위협이 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 신속하고 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 가능함이 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.6.에서 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.
- 넷 째 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 효과적

으로 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 관련 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

4. 요약 및 결론

본 과제에서는 크게 다음의 여섯 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 기온 계절예측 보정, 5) MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축, 6) 기후분야 국제협력 및 정책지원에 대한 과제를 수행하였고 각 주제별 주요내용을 정리하면 다음과 같다.

4.1. APCC 기후예측시스템의 운영 및 예측정보 제공

APCC는 11개국 15개 MME 참여기관의 협조를 바탕으로 저해상도 및 고해상도 MME 계절예측시스템을 활용하여 결정론적 및 확률론적 MME 기법을 적용한 다양한 기후정보 콘텐츠를 안정적으로 생산하고, 홈페이지 및 자료서비스 플랫폼을 통해 매월 15일 총 12회 제공하였다. 또한, APCC 계절예측정보의 현 수준을 진단하고 개선하기 위하여 매년 계절예측정보의 예측력 분석을 수행하고 있으며, 그 결과 APCC 계절예측정보의 예측력은 꾸준히 향상하여 2013년 대비 2023년의 예측력(hindcast ACC)은 전구 13.93%, 전구 21.06%가 향상되었다.

동아시아 지역 확률계절예측시스템은 WMO의 지역 규모 계절 예측 및 해석이 이루어져야 한다는 권고를 수용하여 2022년에 개발된 시스템으로써 동아시아 주요 기후인자인 ENSO와 서태평양 강수 변동성의 재현성을 우수한 모델들을 선별하여 맞춤형 확률 정보를 제공하는 시스템이다. 본 시스템을 안정적으로 운영하여 2023년 기준 총 12회의 동아시아 지역 맞춤형 확률 예측 정보를 홈페이지를 통해 제공하였으며, 운영 현황 및 선별모델 목록 등을 정리하는 운영 일지를 별도로 작성하여 보다 안정적이고 체계적으로 운영할 수 있었다.

BSISO 계절내예측시스템은 통상적으로 매년 5월부터 10월까지 운영이 되지만 올해는 BSISO의 입력자료가 되는 NOAA OLR의 자료 제공 중단 문제로 부득이하게 9월 중순 현업을 조기종료 하였다.

인도네시아를 대상으로 운영중이던 산불예측시스템의 말레이시아 지역확장에 따라 홈페이지를 개선하여 말레이시아와 인도네시아의 산불예측시스템 서비스를 모두 할 수 있도록 개편 완료하였다. 인도네시아는 매년 4월에서 7월까지, 말레이시아는 10월에서 1월까지 각 4개월 동안 월 1회 매월 20일에 APCC의 FHEWS 홈페이지를 통해 정보를 제공한다.

4.2. APCC 기후예측시스템 개선

APCC 기후전망 개선에서는 기후전망 구독자의 선호도 및 만족도뿐만 아니라 타 기후예측 현업기관의 기후전망 운영 현황을 고려하여, 2013년에 고안되어 현재까지 유지되어 온 APCC의 기존 기후전망을 새로이 디자인하고 개선함으로써 가독성과 가시성을 높였다.

사용자의 가장 많은 수요가 있었던 고해상도 예측정보를 제공하기 위하여 2021년 고해상도 계절예측시스템을 구축한 바 있으며, 고해상도 계절예측정보의 예측 수준을 진단하기 위하여 고해상도 관측자료가 필요함에 따라 현업 운영에 적합한 관측 및 재분석 자료를 선정하였고, 이에 따라 고해상도 관측자료 전처리 시스템을 구축하였다. 이러한 고해상도 관측자료를

활용하여 python 및 각종 모듈과 NCL로 구성된 고해상도 기후예측 검증시스템을 구축하였으며, 저해상도 기후예측 검증시스템과 병행 운영하여 고해상도 기후예측 검증정보를 장기적으로 축적하면서 충분한 신뢰성을 확보할 수 있도록 심층적인 예측력 진단을 수행하고자 한다.

현재 APCC MME hindcast 기간은 참여기관 모델들의 hindcast 기간 분포를 고려하여 1991-2010년(20년) 기간이며, 해당 기간의 기후평년값을 활용하여 예측 편차(anomaly) 정보 및 3분위 확률 정보를 제공하고 있으나, WMO에서는 기후평년값의 대표성을 갖기 위한 최소 기간으로 24년을 권고함에 따라 APCC MME 참여기관의 협조를 바탕으로 hindcast 기간 확장 기반 연구를 수행하였다. MME 참여기관 모델들의 hindcast 기간 분포를 분석하여 최소의 결측해를 갖게 되는 두 가지 기간(1991-2014년, 1993-2016년)을 선정하였고, 기준 실험(control)과 두 가지 기간에 대한 4가지 비교군 민감도 실험을 수행하였으며, 그 결과 1993-2016년의 기간을 사용한 실험이 예측력의 큰 변화 없이 최신 기후의 경향성을 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다. 이에 해당 기간으로 hindcast 기간을 확장할 경우, MME 계절예측 정보의 효용성 및 긍정적 영향이 있을 것으로 기대된다.

BSISO 계절내예측시스템은 개선을 통해 1개월 한반도 예측에 활용하는 등 계절내 예보에서의 BSISO의 실질적인 활용성을 높이고자 하였다. 따라서 기상청 및 APCC 내부의 수요를 반영하여 한반도를 포함한 영역 확대, BSISO 영향장 제공 기간 확대, 예측 조기 제공을 수행하였다.

APCC HPC 노후화에 따른 대체 계산 자원 마련을 위해 SCoPS 계절예측시스템을 기상청 슈퍼컴퓨터 5호기(두루)에 이식하고 안정화를 마치고 hindcast (1982~2013년) 자료 생산을 완료하였다. 그리고 두루에서 생산된 자료와 기존의 APCC HPC에서 생산된 hindcast 민감도 실험을 진행하였고, 그 결과 계절과 변수에 따라 차이는 조금씩 있었지만 일관된 특징을 나타내지는 않았다. 특히 기후모델의 예측성에 중요한 인자인 열대태평양 지수에서 차이가 거의 없는 것을 확인하였고, 겨울철 북극 지역의 순환장에서 두 자료간 평균장 차이가 나타나는 것을 확인하였다.

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.

4.3. 신규 홈페이지 구축을 위한 기후정보 웹 콘텐츠 구현

APCC MME 계절예측 정보는 현재 정적 기후정보를 제공하고 있으며, 보다 이해하기 쉽고 편리하게 활용할 수 있도록 동적 기후정보 웹 콘텐츠를 제공하고자 웹 콘텐츠별 디지털 자료 생산 시스템을 구축하였다. 동적 기후정보가 구현되는 홈페이지의 DB와 원활히 연계하기 위해 자료의 재구축 과정이 포함되어 있으며, 이를 통해 APCC MME 계절예측 정보의 활용성이 높아질 것으로 기대한다.

4.4. MME 기온 계절예측 보정

전구적으로 기후 온난화가 진행되면서, 지역 규모에서 나타나는 기온의 계절예측과 현실에서의 장기적 경향의 괴리는 현업을 활용하는 입장에서는 예측 결과를 신뢰하지 못하는 큰 원인 중 하나였다. 본 과제에서는 동아시아에서의 이러한 기온의 장기적 경향을 보정하기 위해 크게 두 가지 방법(선형추세 보정기법, 분위사상기법)을 이용하여 보정, 예측력을 비교하였다. 그 중 선형추세 보정기법을 이용하여 생산한 보정된 기온 계절예측은 예측력이 보다 향상되었고, 장기적 관점에서 실시간 예측 자료에서 선형추세의 공간적 특성을 고려하여 적절하게 보정이 된 것을 확인하였다. 더불어, 현업에서 용이하게 활용하기 위해 기온의 보정, 예측력의 비교의 훈련기간을 hindcast 기간, 타겟인 보정 기간은 실시간 예측 기간으로 설정하였다. 또한 격자기반의 보정을 하여 고해상도 모델에서도 활용이 용이하게 하였고, 다른 지역에 대해서도 쉽게 적용할 수 있다. 기온의 보정에는 최대한 개별모델의 모든 hindcast를 활용하도록 하고, 매번 바뀔 수 있는 hindcast 기간의 적용을 염두에 두었기에 후에 현업활용에서도 용이할 것이라 판단된다. 무엇보다 현업을 생산하면서 제기된 문제점인 동아시아 지역 기온의 과도한 온난화를 해결하여 예측력을 향상시킬 수 있을 것이라 기대한다.

4.5. MME 계절내예측시스템 개발을 위한 기반체계 구축

APCC 이음새없는 예측시스템개발을 위한 준비 단계로 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. 또한, WMO 장기예보 선도센터 자료를 활용하여 APCC 계절예측 MME 시스템과 일관성을 고려한 범용적이고 효율적인 운영 시스템을 개발하였으며, 제5차 APCC 자료제공회의를 통해 S2S 개별모델 예측자료 확보 가능성을 타진하였다. 마지막으로, WMO 장기예보 선도센터에서 제공받은 S2S 자료를 활용하여 다양한 민감도 실험을 통해 개별모델 일자료 처리방안 마련 및 MME의 활용성(3-4주)에 대한 가능성을 확인하였고, 향후 APCC MME 계절내예측 참여모델의 일환으로 활용하기 위해 APCC in-house 모델인 SCoPS의 계절내예측 활용 가능성을 조사하여 예측 주기 및 예측 기간 등의 설정과 추가로 앙상블 확대, hindcast 연장 등 필요사항을 정리하였다. 이러한 노력을 바탕으로 2024년에는 S2S MME 현업 운영을 위한 기술을 시험 개발하고자 한다.

4.6. 기후분야 국제협력 및 정책지원

2023년 현재 WMO 장기예보 선도센터는 전 세계 14개 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 WMO 장기예보 선도센터 시스템 개선 용역과제를 2018년부터 수행하여, 더욱 안정적인 시스템 운영과 사용자 맞춤형 고품질의 예측정보를 서비스하기 위해 노력하였다. 2023년에는 특히 WMO 장기예보 선도센터 시스템을 개선하여 GPC Pune 참여를 준비하였으며, 지역기후포럼 지역에 대한 예측 정보와 해빙자료 등을 사용자 맞춤형 계절예측 정보를 제공하기 위해 시스템 개선이 이루어졌다. 또한 현업운영자의 효율적이며 안정적인 시스템 관리를 위해 현업시스템 개선이 수행되었다. 그리고 국제적 협업 체계 강화를 위해 WMO에서 주관하는 다양한 지역 기후 포럼에 맞춤형 MME 예

측정정보를 제공하여 WMO 장기예보 선도센터의 기후예측 자료 활용도 향상을 위해 노력하였다. 이와 같은 WMO 장기예보 선도센터의 국내·외 활동과 안정적인 시스템 개선 노력을 통해 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.

APCC가 생산하여 제공하는 다양한 기후정보와 서비스의 활용성을 확대하고, 서비스의 잠재적 신규사용자를 확보하기 위하여 기후정보 생산 및 활용 사용자 워크숍을 개최하였고, 국내 기후관련학과 대학생 및 대학원생 15명을 대상으로 운영되었다.

태평양 네트워크 TF를 통해 제12차 PICOF, 제13차 PICOF, 제6차 태평양기상위원회 및 제3차 태평양기상장관회의, 제1차 태평양도서국 기후서비스패널(PICS Panel) 회의, 제1차 협력기관 및 국제공여기관 회의 참석 등을 통해 APCC의 지속적인 지역 기후서비스 지원 활동을 추진하였다.

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.

사사

연구에 사용된 다중모델 앙상블 자료는 APCC MME Producing Centres (PCs)에 의해 생산된 hindcast/forecast 자료를 바탕으로 APCC가 수집, 재가공하였으며 자료를 생산/제공해주신 APEC 기후센터에 감사드립니다.

References

- 김가영, 김해정, 오지현, 유태우, 이운영, 정여민, 정유란, 정유림, 함수련, 윤순조, 2019: 다중모델 기반 계절내 예측 활용 가이드라인 개발, *APEC기후센터 연구보고서*, APEC기후센터
- 김가영, 김해정, 이운영, 정여민, 함수련, 2020: 기후예측모델 개선을 위한 예측성 평가 및 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, 송봉근, 이현주, 임아영, 임창묵, 정다운, 정임국, 최재원, 2022: APCC 기후정보 활용성 강화를 위한 고해상도 MME 계절내-계절예측시스템 기반구축 및 웹 콘텐츠 다양화. APEC 기후센터, 195 pp.
- 문자연, 이운영, 오지현, 김가영, 2018: 아태지역 15-60일 MME 예측 기술 개발 및 검증 기술 개발, *APEC기후센터 연구보고서*, APEC기후센터
- 송찬영, 김소희, 안중배. 2021: 경험적 분위사상법을 이용한 지역기후모형 기반 미국 강수 및 가뭄의 계절 예측 성능 개선. *대기*, 31(5), 637-656.
- 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.
- Barnston, A. G., Tippett, M. K., Ranganathan, M., and L'Heureux, M. L., 2019: Deterministic skill of ENSO predictions from the North American multimodel ensemble. *Clim. Dyn.* 53, 7215-7234. doi: 10.1007/s00382-017-3603-3.
- Batte, L., L. Dorel, C. Ardilouze, and J. F. Guerey, 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>.
- 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.

- Graham, R. J., and Coauthors, 2011: Long-range forecasting and the Global Framework for Climate Services. *Climate Res.*, **47**, 47–55, doi:<https://doi.org/10.3354/cr00963>.
- 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>.
- Gudmundsson, L., J. B. Bremnes, J. E. Haugen, and T. Engen-Skaugen, 2012: Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **16**, 3383–3390.
- Ham, H., D. Won, and Y. Lee, 2017: Performance Assessment of Weekly Ensemble Prediction Data at Seasonal Forecast System with Hgih Resolution. *Atmosphere*, **27**, 261–276, <https://doi.org/10.14191/Atmos.2017.27.3.261>.
- 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.
- 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>.
- 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.
- 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 S. M. Oh, 2014: Assessment of APCC multimodel ensemble prediction in seasonal climate forecasting: retrospective (1983–2003) and real-time forecasts (2008–2013). *J. Geo. Res.*, **119** (21), 12,132–12,150.
- Min, Y. M., V. N. Kryjov, S. M. Oh, and H. J. Lee, 2017: Skill of real-time operational forecasts with the APCC multi-model ensemble prediction system during the period 2008–2015. *Clim. Dyn.*, **49**, 4141–4156, doi:10.1007/s00382-017-3576-2.
- 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.
- 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. Delecluse, M. Deque, E. Diez, F. J. Doblas-Reyes, H. Feddersen, R. Graham, S. Gualdi, J.-F. Gueremy, 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.
- 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.
- Vitart, F., G. Balasamo, R. Buizza, L. Ferrantik, S. Keeley, L. Magnusson, F. Molteni, and A. Weisheimer, 2014: Sub-seasonal predictions. *ECMWF Tech. Memo*, **738**, 45pp.
- 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.
- 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.
- WMO, 2015: *Seamless Prediction of the Earth System: from minutes to months*. ISBN: 978-92-63-11156-2.
- Wood, A. W., L. R. Leung, V. Sridhar, and D. P. Lettenmaier, 2004: Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model Outputs. *Climatic Change*, 62, 189–216.
- 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.