

APCC 기후예측 시스템 소개 및 기후예측 방법, 예측성의 이해

김유진*
김형진, 유진호

APEC 기후센터



강의 목표



장기 예보

(2022년 11월 ~ 2023년 1월)

2022년 10월 24일 11시 발표

※ 다음 3개월 전망은 2022년 11월 23일 11시 발표

※ 기압계 변화 시 수정 전망이 발표될 수 있고, 매주 목요일 발표되는 1개월 전망 등 최신 전망을 참고하시기 바랍니다.



강의 목표: 기후예측 정보가 어떻게 생산되나?

1. 기후예측 방법 알기
2. APCC 기후예측 시스템의 소개
3. 기후예측 정보의 예측성, 신뢰성 알기

목차

1. 기후예측 방법
 - A. 기후예측이란
 - B. 통계모델 & 역학 모델, 다중모델 예측
 - C. 역학모델과 통계모델을 이용한 실제 계절예측 과정

2. APCC 기후예측 시스템의 소개
 - A. APCC 다중모델예측 시스템 - 계절예측
 - B. APCC 계절내 예측 시스템 - BSISO

3. 기후예측의 예측성
 - A. 예측성, 검증
 - B. 계절예측의 예측성
 - C. 계절 내 예측의 예측성
 - D. 기후예측 기술의 미래

기후

- 특정 기간 동안 기대(~평균)되는 날씨 상태
 - 특정 기간 : 2016년 여름, 2010~19년 겨울 등
 - 날씨는 매일매일 변하고, 기후는 이러한 특정기간 동안 변화의 일정한 패턴
- 고정된 값이 아니라 변화함
 - 기후 변동, 기후 변화
 - 최근 30년 사이의 평균: 현재 기후의 기준, 기후 평년값 (혹은 예년)

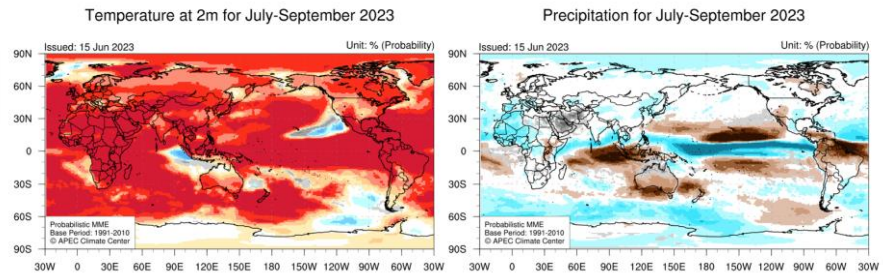
기후예측이란

- 선행시간 별 분류
 - 단기예보 (1일-3일)
 - 중기예보 (-10일)
 - 장기예보 (1개월-수년)
 - 1개월/6개월 동안 평균적인 날씨 상태 (계절예측)
 - 1개월-1년 동안 기후 모드 (ENSO)
 - 기후변화 전망
 - 수십년의 평균 날씨 상태

날씨 예보

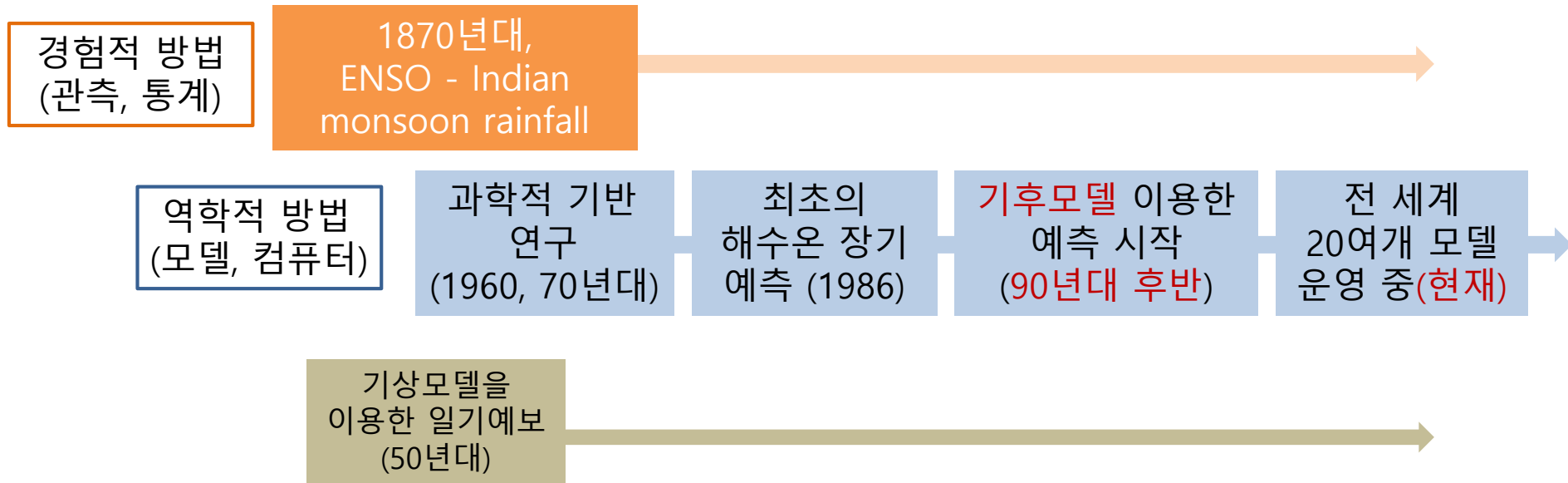
APCC 계절예측

기후전망 (2023년 07월 ~ 2023년 09월)



기후예측

기후예측 기술의 변천



※ 컴퓨터모델을 이용한 기후예측은 상대적으로 늦게 시작한 예보 기술이나 현재 기후예측의 주류 기술

역학 모델 (수치모델)

- 역학모델은 해양-육지-대기가 충분히 결합되어 물리 법칙(heat, momentum, water fluxes)이 격자 단위로 계산
- 최초: NOAA's CPC CFS, ECMWF's SEAS systems
- 날씨예보와 많은 부분을 공유할 수 있어, 급속도로 발달
- APCC MME, WMO LC MME 다중역학모델
- But, 비용이 많이 들고 운영이 상대적으로 어려움(통계모델)
- 모델 격자와 실제 예측지점과의 괴리: Downscale, 통계적 후처리
- [주류] 계절예측하는 기관 -> 역학모델 보유

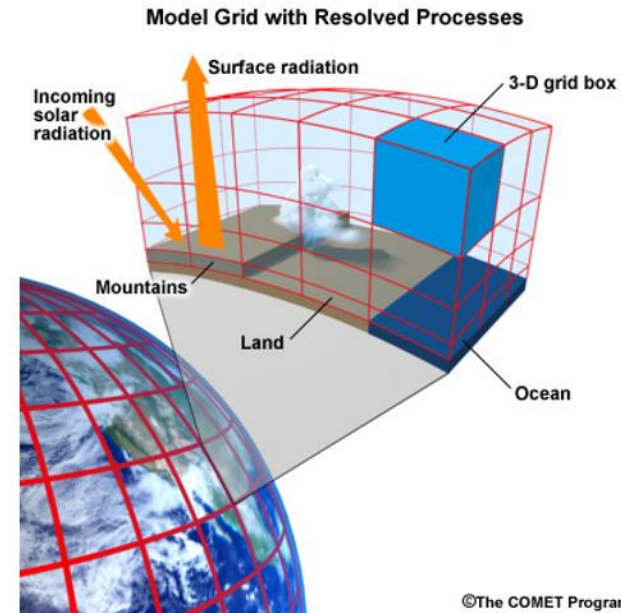


Figure 1. Schematic of a dynamical model used for seasonal climate prediction courtesy of UCAR COMET Program.1

<https://climateai.medium.com/a-very-brief-history-of-seasonal-climate-forecasting-for-agriculture-8948736748ac>

<Troccoli, 2010: Review Seasonal climate forecasting. Meteorol. Appl. 17:252-268.>

통계 모델

- 지역기후현상과 물리변수들의 상관관계(원격상관관계)
- 상관관계 -> equation -> 통계예측모델 구성
- 예>남극 얼음 - ENSO -> SIC 계절예측

A Markov Model for Seasonal Forecast of Antarctic Sea Ice*

DAKE CHEN AND XIAOJUN YUAN

Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, New York

(Manuscript received 1 August 2003, in final form 9 February 2004)

ABSTRACT

A linear Markov model has been developed to simulate and predict the short-term climate change in the Antarctic, with particular emphasis on sea ice variability. Seven atmospheric variables along with sea ice were chosen to define the state of the Antarctic climate, and the multivariate empirical orthogonal functions of these variables were used as the building blocks of the model. The predictive skill of the model was evaluated in a cross-validated fashion, and a series of sensitivity experiments was carried out. In both hindcast and forecast experiments, the model showed considerable skill in predicting the anomalous Antarctic sea ice concentration up to 1 yr in advance, especially in austral winter and in the Antarctic dipole regions. The success of the model is attributed to the domination of the Antarctic climate variability by a few distinctive modes in the coupled air-sea-ice system and to the model's ability to detect these modes. This model is presently being used for the experimental seasonal forecasting of Antarctic sea ice, and a current prediction example is presented.

1. Introduction

Antarctic sea ice, with its large seasonal and inter-annual variabilities, greatly affects the energy balances in the atmosphere and ocean by changing surface albedo, salt injection and the insolation at the air-sea

1983; Carleton 1989; Simmonds and Jacka 1995; Ledley and Huang 1997; Harangozo 2000; Yuan and Martinson 2000, 2001; Kidson and Renwick 2002; Kwok and Comiso 2002). Various mechanisms have been proposed for the ENSO-high-latitude teleconnection (e.g., Mo

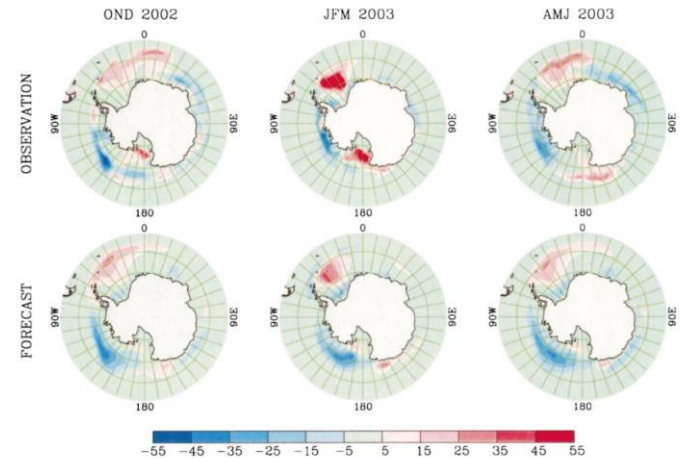


Fig. 9. Comparison of ice anomaly real-time model forecasts with observations. The model was initialized using the observations in OND of 2002, and forecasts were made for JFM of 2003 (3-month lead) and AMJ of 2003 (6-month lead). Units are the same as in Fig. 1.

실제 우리나라 계절예측에 사용하는 여러 통계적 방법, 모델, 후처리하는 다음 강의에..

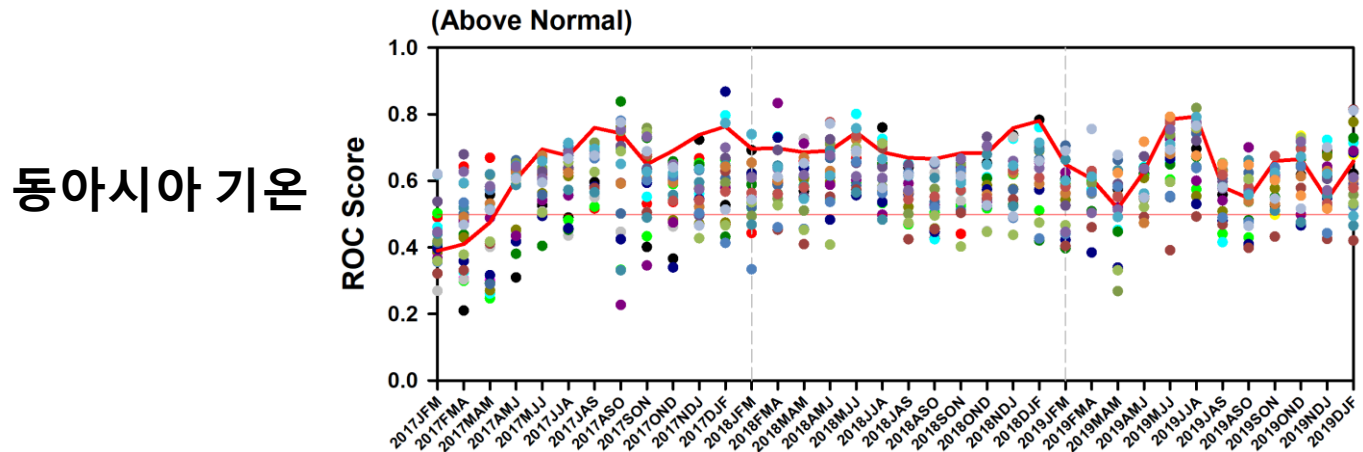
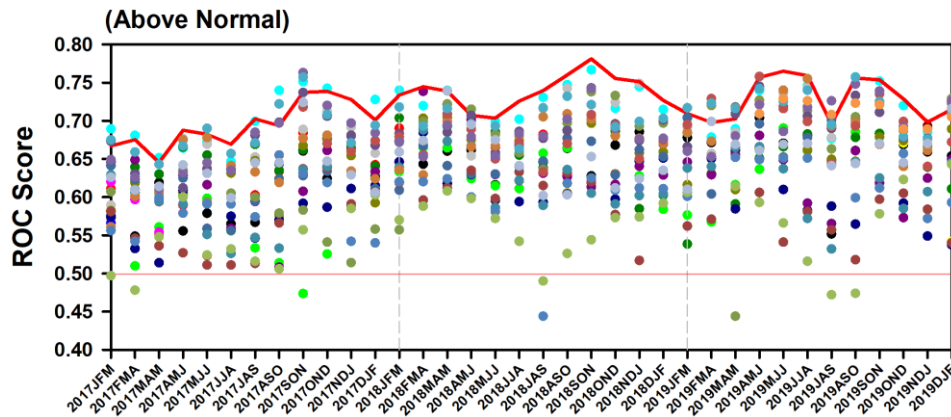
여러 역학모델 - 다중역학모델 앙상블, MME

Signal, Noise, and Error

- OBS : $X = X_s + X_n$
 - Model FCST : $Y = Y_s + Y_n = X_s + E + Y_n$
 - X_s 를 완벽히 알 수 없기 때문에 “E” 도 알 수 없음.
 - 그러나 여러 개의 Y 를 합치면(즉, 여러 모델의 예측을 종합하면) 모델간 오차의 상쇄로 “E” 가 줄어든다는 사실 발견
- 다중모델 앙상블(Multi-Model Ensemble)

다중모델 앙상블(MME) 기술

Q. MME를 하면 좋아지는가? YES

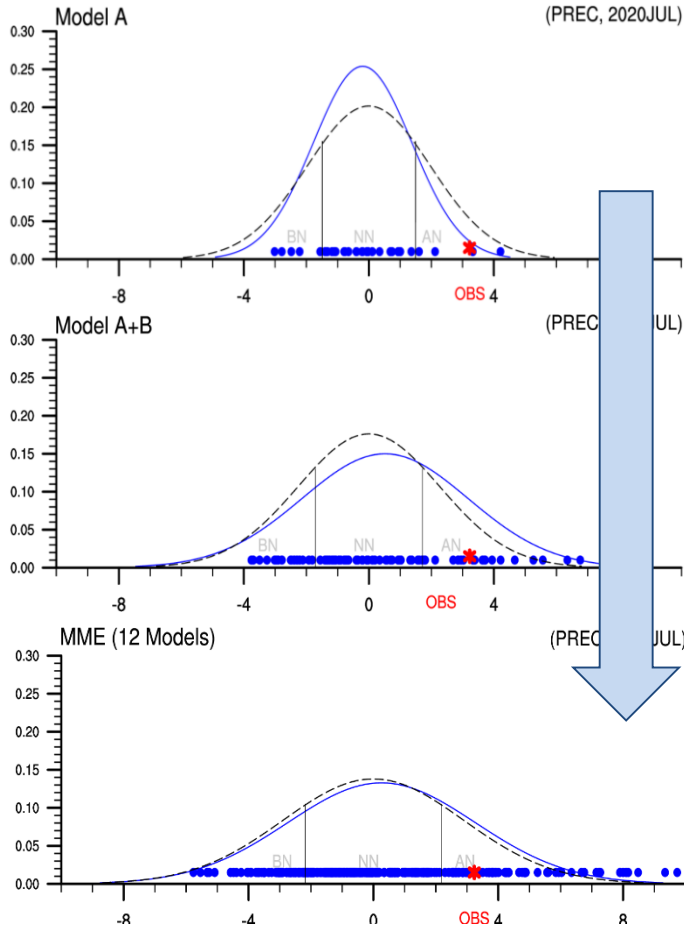


MME 예측의 장단점

- 높은 수준의 예측성능이 안정적으로 유지
 - 단, 한 개의 매우 우수한 모델보다 낫다는 보장은 없음(지역별, 계절별로 어떤 단일 모델이 좋을 순 있으나 현재까지는 평균적으로 MME가 우수)
 - 모델 생태계의 문제
- 약점은 없나?
 - 예보가 모두 나쁜 경우 더 큰 오류 (집단광기)
 - 변수간 물리적 상관성이 낮을 수 있음
 - 너무 신중함 (모델이 알 수 없다고 한다면..)

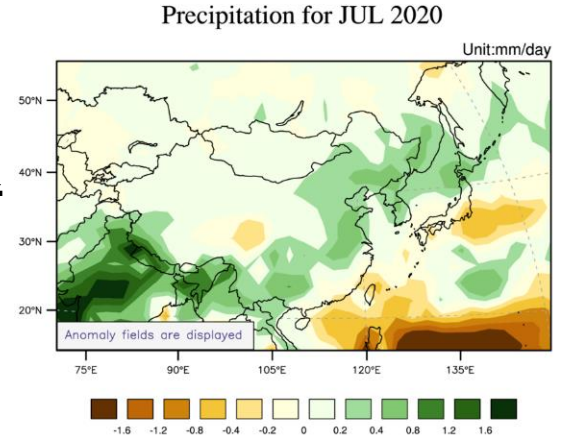
다중모델 앙상블(MME) 기술

MME 예측의 장단점

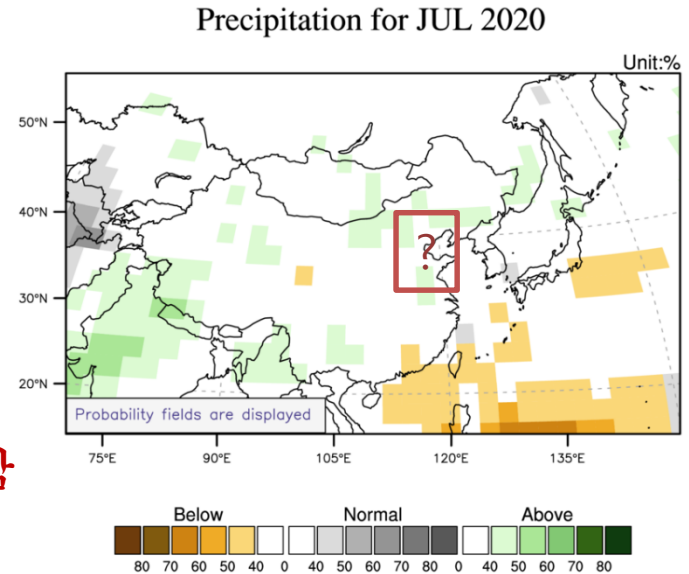


모델예측의 앙상블이
증가하면서 점차 고르게
분포하는 경향

관측



MME
너무
신중함



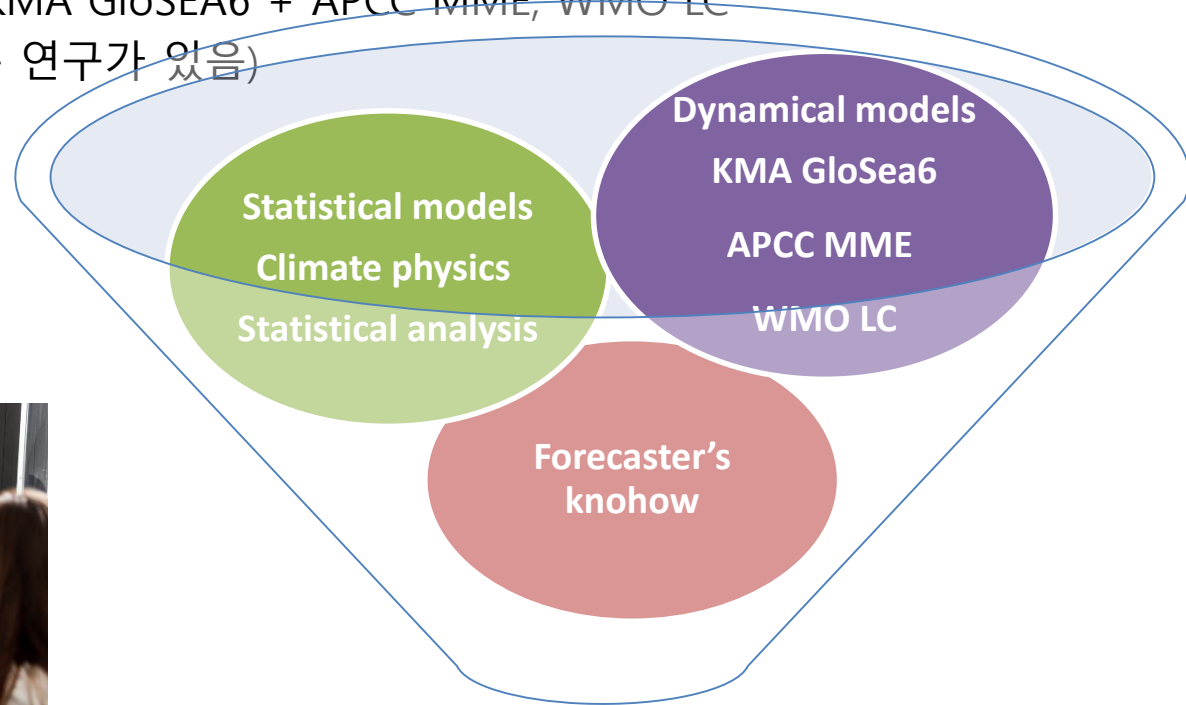
계절예측의 과정

- 역학모델 + 경험적 통계모델 + 예보관들의 지혜
- 우리나라 계절예측의 바탕 - KMA GloSEA6 + APCC MME, WMO LC
- 우리나라 기후 연구 (정말 많은 연구가 있음)
- 계절예측 전문가들의 노하우
 - 관학연 협동 회의

회의중!



다른 나라에서도 마찬가지로



Consensus Climate
Forecast
종합적 계절 예측

계절예측의 과정

- 전통적 계절예측 3-6개월 선행
- 비교적 최근 1개월 선행 주별 기후예측 범주확률예보



3개월전망 (2023년 7월 ~ 9월)

2023년 6월 23일 11시 발표

※ 다음 3개월 전망은 2023년 7월 24일 11시 발표

※ 기업계 변화 시 수정 전망이 발표될 수 있고, 매주 목요일 발표되는 1개월 전망 등 최신 전망을 참고하시기 바랍니다.

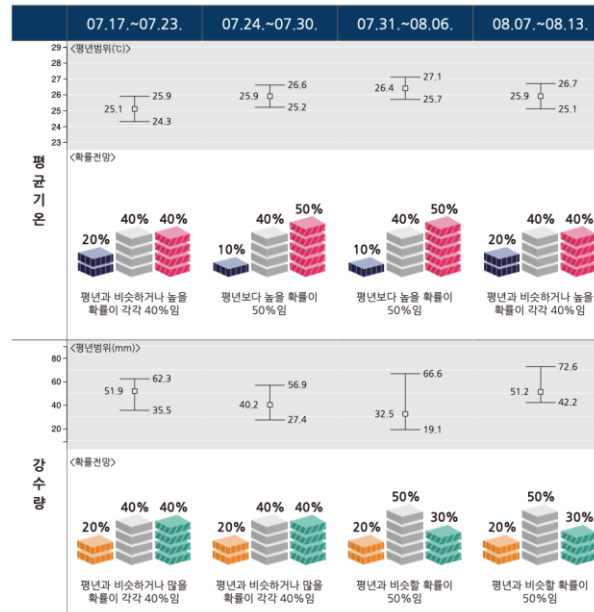


1개월전망 (2023년 7월 17일 ~ 8월 13일)

기 상 청

2023년 7월 6일 11시 발표

※ 다음 1개월 전망은 2023년 7월 13일 11시 발표



목차

1. 기후예측 방법

- A. 기후예측이란
- B. 통계모델 & 역학 모델, 다중모델 예측
- C. 역학모델과 통계모델을 이용한 실제 계절예측 과정

2. APCC 기후예측 시스템의 소개

- A. APCC 다중모델예측 시스템 – 계절예측
- B. APCC 계절내 예측 시스템 – BSISO

3. 기후예측의 예측성

- A. 예측성, 검증
- B. 계절예측의 예측성
- C. 계절 내 예측의 예측성
- D. 기후예측 기술의 미래

APEC기후센터 기후예측시스템

☑ 전세계 다중모델앙상블 기후예측

| APCC | WMO(KMA/APCC 운영) | NMME | C3S |
|---|---|--|---|
| 15개 모델 | 14개 모델 | 5개 모델 | 8개 모델 |
| BCC_CSM1.1m BOM_ACCESS_S1 CMCC_SPS3 HMC_GCM JMA_JRA55 KMA_GLOSEA6 ECCC_CANSIPsv2.1 NASA_GEOS5 NCEP_CFSv2 UKMO_GLOSEA6 METEOFRACTANCE_MFSys8 | BCC_CSM BOM_ACCESS_S1 CMCC_SPS3 HMC_GCM JMA_JRA55 KMA_GLOSEA5 ECCC_CANSIPsv2.1 NCEP_CFSv2 UKMO_GLOSEA6 METEOFRACTANCE_MFSys8 | ECCC_CANSIPsv2.1 NASA_GEOS5 NCEP_CFSv2 | CMCC_CPS3 JMA_JRA55 ECCC_CANSIPsv2.1 NCEP_CFSv2 UKMO_GLOSEA6 METEOFRACTANCE_MFSys8 |
| APCC_SCOPS CWB_TCWB1Tv1.1 PNU/RDA_CGCMv2.0 MGO_MGOAM2 | CPTEC_GCM DWD_GCFS2 ECMWF_SEAS5 SAWS_EPS | GFDL_SPEAR NCAR_CCSM4 | DWD_GCFS2 ECMWF_SEAS5 |

1.0×1.0

매월 15일

6개월 선행

2.5×2.5

매월 20일

6개월 선행

1.0×1.0

매월 9일

6개월 선행

1.0×1.0

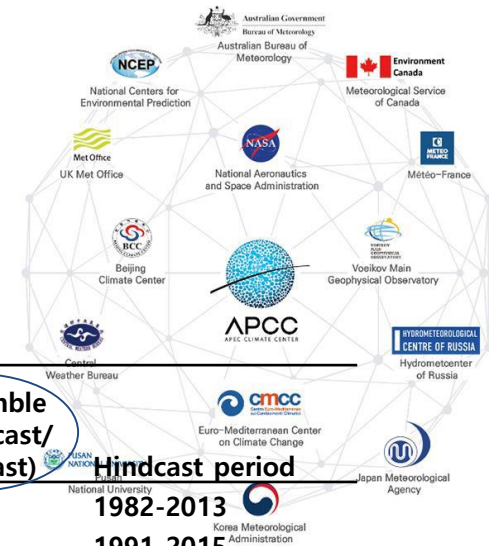
매월 13일

6개월 선행

APEC기후센터 기후예측시스템

☑ APEC 기후센터 다중모델앙상블 기후예측시스템

- 전 세계 11개국 15개 기관의 기후예측모델 자료 수집
- 다중모델앙상블 기법을 통해 기후정보 생산
- APEC기후센터 홈페이지를 통해 제공
(<https://apcc21.org/ser/global/outlookSummary.do?lang-ko>)

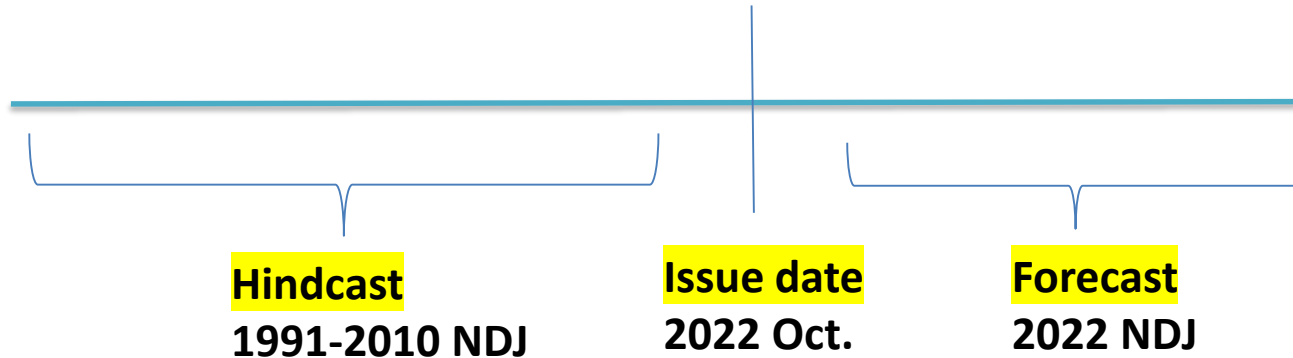


| Institute | Country | Model | Resolution (Atmospheric) | Resolution (Ocean) | Ensemble (hindcast/forecast) | Hindcast period |
|-----------|----------------|--------------|--------------------------|--------------------|------------------------------|-----------------|
| APCC | Korea | SCoPs | T159L31 | 0.3-0.5x1.0 L40 | 10 | 1982-2013 |
| BCC | China | CSM1.1m | T119L40 | 1x1/3 | 24 | 1991-2015 |
| BoM | Australia | ACCESS-S2 | N216L85 | 0.25 L75 | 11 | 1982-2018 |
| CMCC | Italy | SPS3.5 | 1x1, L46 | 1/4x1/4, L50 | 20 | 1993-2016 |
| CWB | Chinese Taipei | TCWB1Tv1.1 | T119L40 | 1x1 | 30 | 1982-2019 |
| HMC | Russia | SL-AV | 1.125x1.40625 L28 | | 10/20 | 1981-2010 |
| JMA | Japan | MRI-CPS2 | TL159L60 | 0.3-0.5x1.0 L53 | 10/51 | 1979-2014 |
| KMA | Korea | GloSea5GC2 | N216L85 | ORCA025L75 | 12/42 | 1991-2016 |
| METFR | France | MF Sys8 | TL359 | 0.25 L75 | 25/51 | 1993-2016 |
| MGO* | Russia | MGOAM-2 | T42L18 | | | 1979-2004 |
| MSC | Canada | CanSIPsv2 | 1.4x1.4 T63L35 | 1.40x0.94 | 20 | 1981-2010 |
| NASA | USA | GEOS-S2S-2.1 | 0.5 | 0.5 | 4-10 | 1982-2016 |
| NCEP | USA | CFSv2 | T126L64 | 0.25-0.5x0.5 L40 | 20 | 1982-2010 |
| PNU | Korea | PNU CGCMv2.0 | T42L18 | 2.8125 | 35 | 1990-present |
| UKMO | UK | GloSea5 | N216L85 | ORCA025L75 | 28/42 | 1993-2016 |

APEC기후센터 기후예측시스템

☑ APEC 기후센터 다중모델앙상블 기후예측시스템

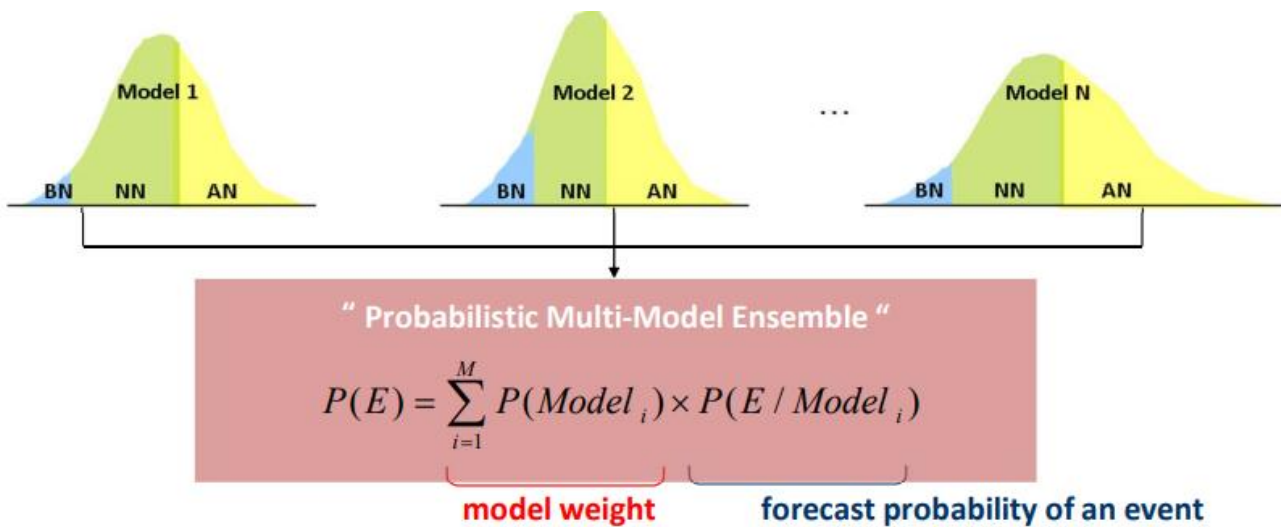
- Hindcast (Retrospective forecast): 평년기간, climatology. MME 특성상 개별모델보다 짧은 편임
- Forecast(real-time forecast) : 실제 예측



- 단정 MME 예측 (Deterministic MME Forecast)
 - 편차(anomaly)로 제공
 - 편차(anomaly): 예측값과 기후값 (또는 평년값) 과의 차이
- 확률 MME 예측 (Probabilistic MME Forecast)
 - 3분위 확률값 제공(평년보다 낮음, 평년과 비슷, 평년보다 높음)
 - 1991-2010 기간의 hindcast를 기준으로 3분위 범주 산정

APEC기후센터 기후예측시스템

☑ APEC 기후센터 다중모델앙상블 확률예측



비모수화:

$$P(A) = N_A / N$$

모수화:

$$P(A) = 1 - \int_{-\infty}^{x_a} F(x) dx ,$$

$F(x)$: Theoretical PDF

$$P(E) = \frac{1}{\sum_{i=1}^M \sqrt{n_i}} \sum_{i=1}^M \sqrt{n_i} P(E / \text{Model}_i)$$

n : Ensemble size of i model
 M : Total number of participating modes in MME

● 다중모델 확률예측

- 각 카테고리별 (AN, NN, BN) 모델이 예측하는 앙상블 확률(%) - 각 카테고리별 P의 합은 100
- 개별모델의 확률예측을 MME 기법을 이용하여 combine
- 우세한 카테고리 선정은 Chi-square test, 불확실성이 크다면, 모름으로 예측 (white)

APEC기후센터 기후예측시스템

☑ APEC 기후센터 다중모델앙상블 기후예측시스템

사용할 만한 정보란? 정보의 가치 (properties of usable information)

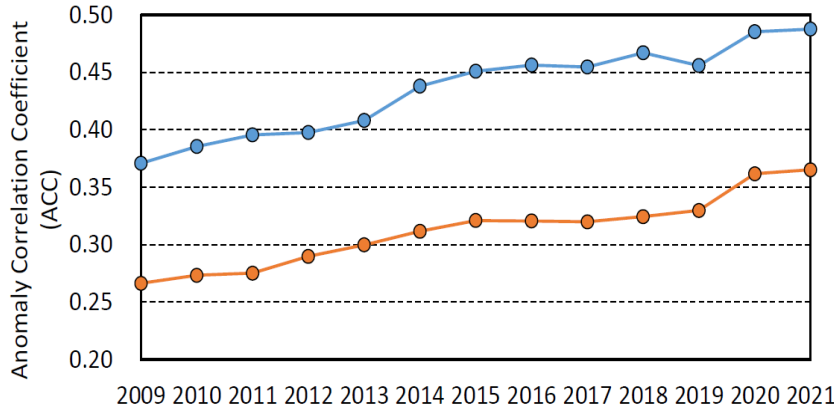
- **Credibility (신뢰성) : 믿을 만 한가?**
 - 정보의 품질 + 정보 제공 주체의 권위
- **Saliency (중요성) : 사용자의 필요와 상황에 적합한가?**
 - Scale, Variables, Products
- **Legitimacy (정당성) : 투명하고 왜곡없이 만들어졌는가?**
 - 객관성, 재현가능성, Openness

APEC기후센터 기후예측시스템

☑ APEC 기후센터 다중모델앙상블 기후예측시스템

• Credibility (신뢰성)

Global 3month mean Precip. and 2m Temp. hindcast skill

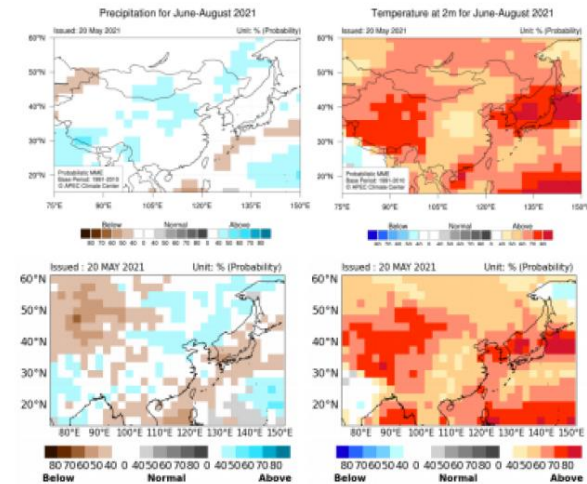


Individual models' improvement
+
Increased diversity
(8 countries → 11 countries)

Real time forecast skill during last 3 years (19-21), ROC score

| Source | APCC | WMOLC | ECMWF | NCEP | UKMO | JMA | Avg |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temp | 0.695 | 0.692 | 0.671 | 0.642 | 0.663 | 0.684 | 0.670 |
| Prec | 0.584 | 0.582 | 0.575 | 0.576 | 0.562 | 0.585 | 0.576 |

동아시아 특화 모델 선별 MME

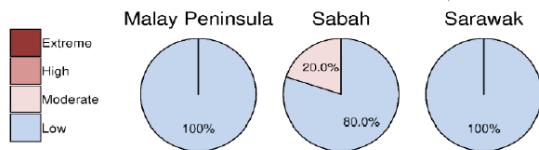
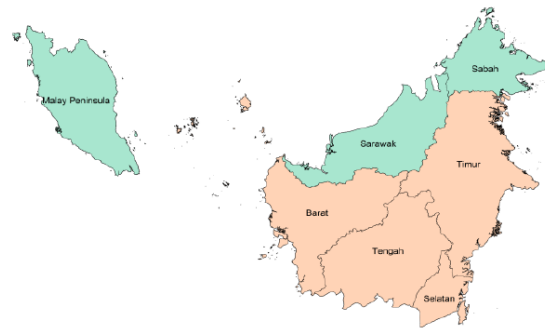


APEC기후센터 기후예측시스템

☑ APEC 기후센터 다중모델앙상블 기후예측시스템

• Saliency (중요성)

동남아시아 산불 경보 시스템



4-7월 (ASO), 10-1월 (FMA)
건기 산불이 중요

경제, 산업에 큰 영향

국제공동연구 (미국, 인도네시아, 일본 등)
&
Data tools

APEC기후센터 기후예측시스템

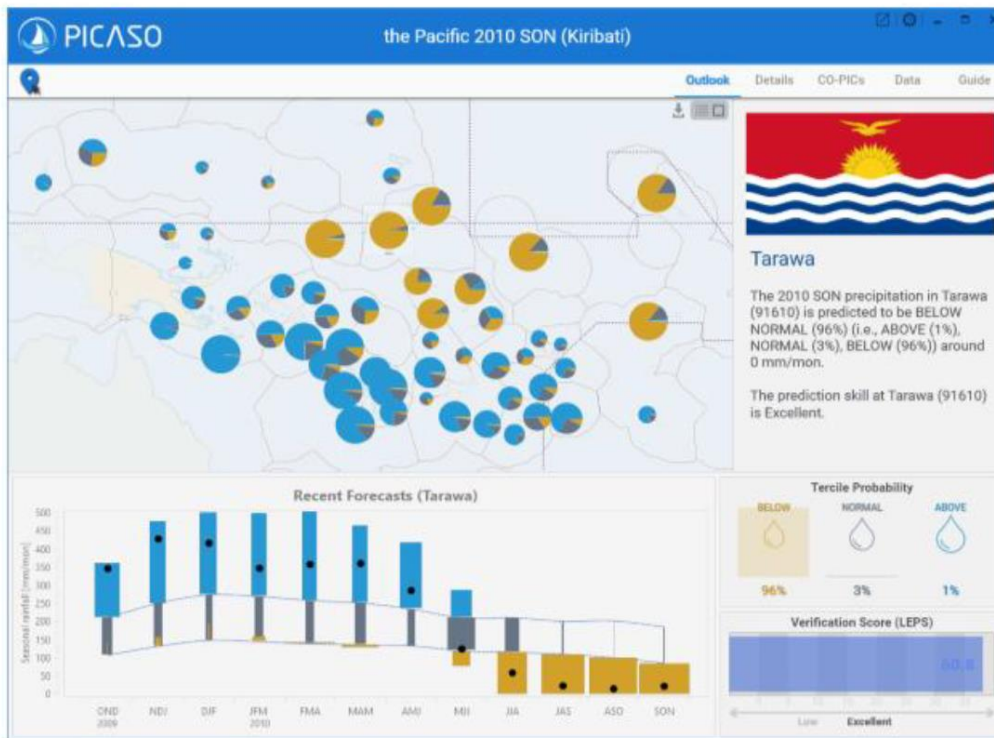
☑ APEC 기후센터 다중모델앙상블 기후예측시스템

- **Credibility (신뢰성) + Saliency (중요성)**

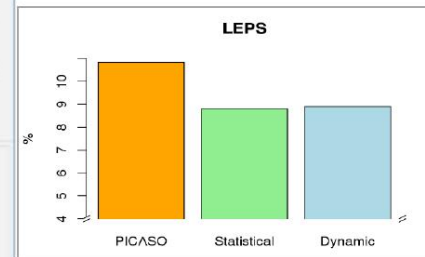
PICASO

(Pacific Islands Country Advanced Seasonal Outlook)

태평양 도서국 맞춤 기후정보
 PICASO - 태평양 도서국 기상청 시스템
 지역 맞춤 계절예측 후처리
 정확성 증대
 태평양 도서국에서 중요한 데이터



Convert MME forecast to local forecast for Pacific islands



APCC 기후예측시스템



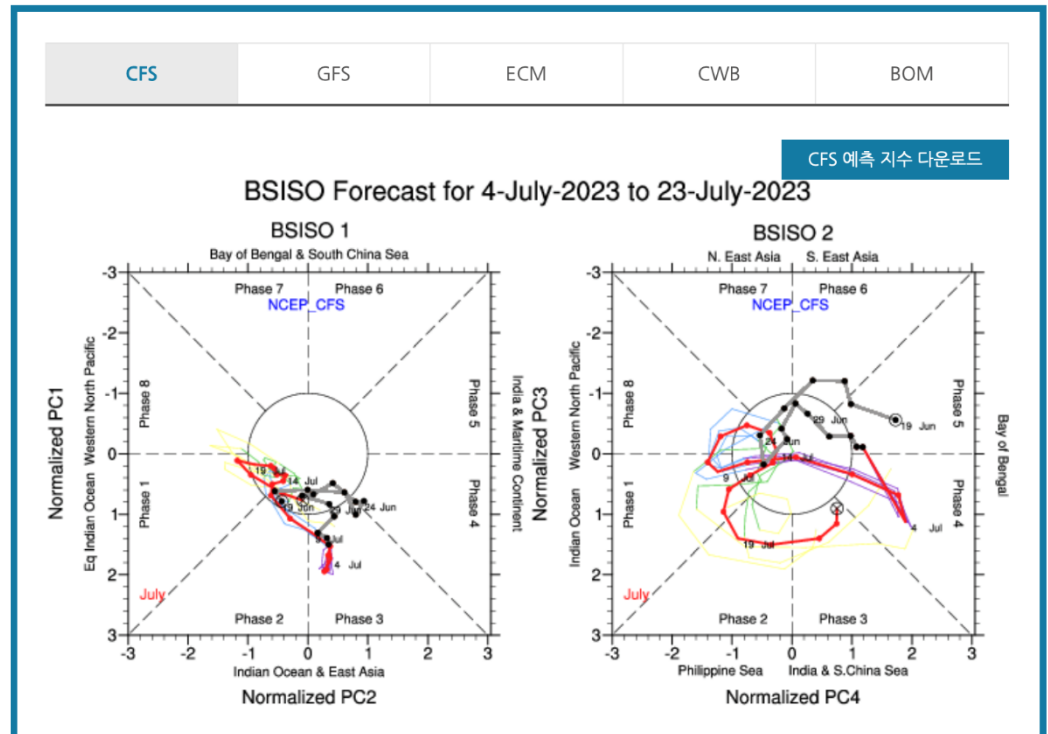
☑ 계절내 예측 – BSISO • Credibility (신뢰성) + Saliency (중요성)

- 아시아 지역의 여름철 계절내 진동 (BSISO, Boreal Summer Intraseasonal Oscillation) 지수의 감시 및 예측 정보를 5-10월 매일 제공
- 적도 인도양에서 발생-> 점진적으로 동북진, 날씨에 영향을 주는 대규모 대류현상
- 계절내 기후 현상, 전지구적 관점에서 중요한 인자
- 계절내 시스템 중 어느정도 역학모델의 예측성을 확보한 인자
- 더 많은 내용은 다음 강의에서

• BSISO 위상도

맨위로

BSISO 1과 2 각 모드의 위치와 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 원 안에 위치하면 약한 BSISO, 원 밖에 위치하면 강한 BSISO로 간주합니다.





목차

1. 기후예측 방법

- A. 기후예측이란
- B. 통계모델 & 역학 모델, 다중모델 예측
- C. 역학모델과 통계모델을 이용한 실제 계절예측 과정

2. APCC 기후예측 시스템의 소개

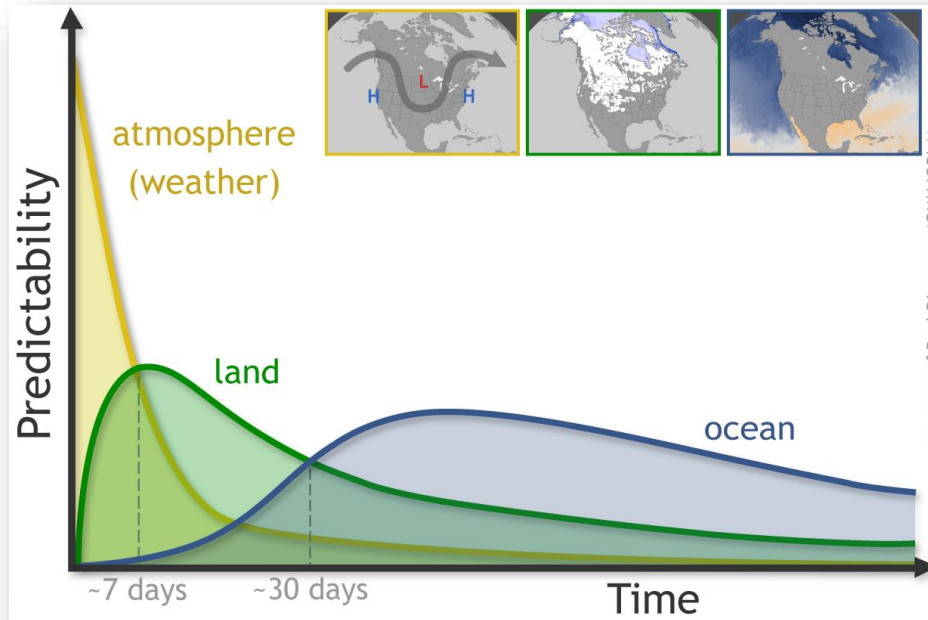
- A. APCC 다중모델예측 시스템 - 계절예측
- B. APCC 계절내 예측 시스템 - BSISO

3. 기후예측의 예측성

- A. 예측성, 검증
- B. 계절예측의 예측성
- C. 계절 내 예측의 예측성
- D. 기후예측 기술의 미래

신뢰도, 믿을만 한가?
활용성, 가이드
모델의 발전, 미래

예측성



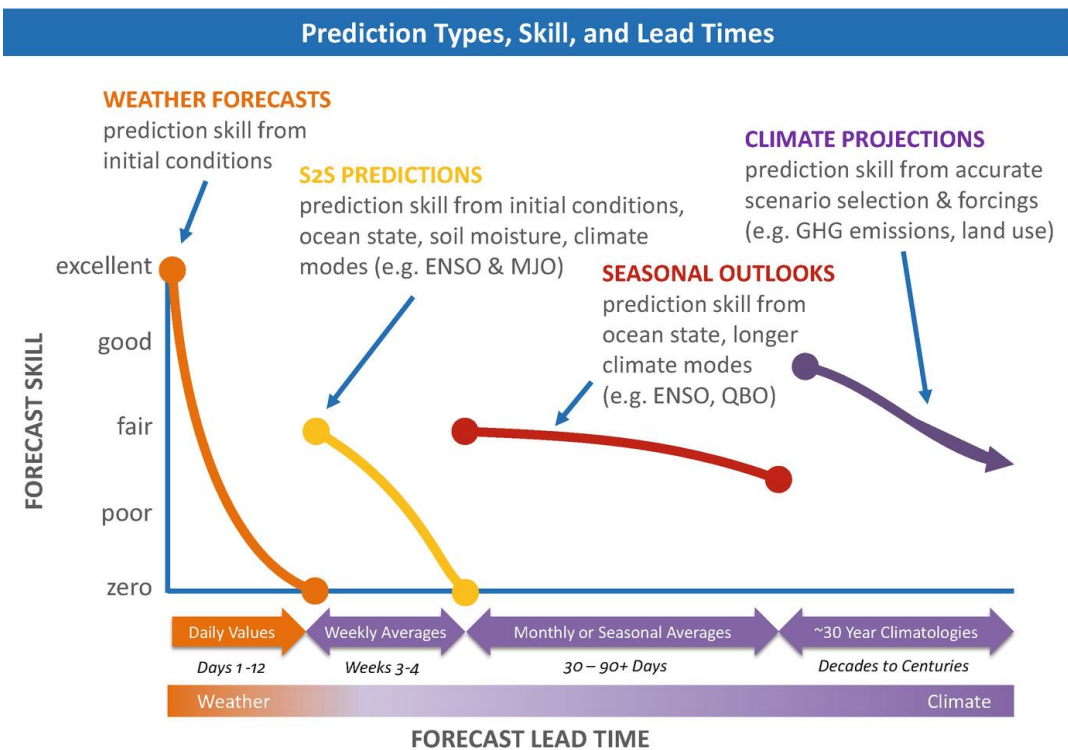
모델을 이용한 날씨와 기후 예측의 소스는? 초기조건, internal variability, forcing

- 날씨예측(10일 이내): **대기의 상태**
- 장기에측(30일 이후): **해양의 상태**
- 중장기에측(2주-4주): **대기, 육지, 해양의 상태**

예측성

Timescale showing the skill progression from weather and seasonal forecast to climate projections, as used in VISCA DSS.

Source: Adapted from iri.columbia.edu/news/qa-subseasonal-prediction-project



Adapted from iri.columbia.edu/news/qa-subseasonal-prediction-project

역학모델의 기후예보 예측력 중기 예보

S2S (subseasonal to seasonal)
몇 주 내~ 1개월 선행
주별 평균
skill fair – zero

장기예보

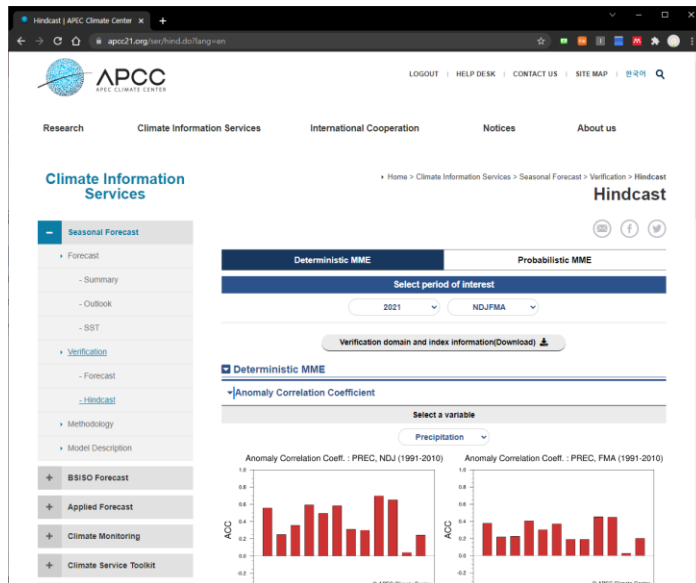
Seasonal outlooks
1개월~ 6개월 선행
월별, 계절별 평균
skill fair 유지

‘평균’예보, 정보의 가치
기간에 따라 forecast skill 차이
- predictability source 차이

검증

- 모델의 예측력 Forecast skill – Verification – 수치로 표현

| Deterministic | Probabilistic |
|---|--|
| ACC (Anomaly Pattern Correlation Coefficient) | ROC (Relative Operating Characteristics Curve) |
| RMSE (Root Mean Square Error) | Reliability diagram |
| TCC (Temporal Correlation Coefficient) | Brier skill score |



- ACC – 단정예측

모델의 예측 아노말리는 관측의 아노말리와 얼마나 공간적으로 잘 맞는가?

-1~1, 1: perfect

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \omega_i (F_i - \bar{F})^2 \sum_{i=1}^N \omega_i (O_i - \bar{O})^2}}$$

Over bar means time average (climatology)

F : forecast

O : observation

W: weighting

<Murphy, A.H., 1988: Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient. Mon. Wea. Rev. 116. 2417-2424.
WMO, 2002: Standardised verification system (SVS) for long-range forecasts LRF. Manual on the GDS (WMO-No. 485), volume 1. >
<<https://www.apcc21.org/ser/hind.do?lang=ko>>

검증

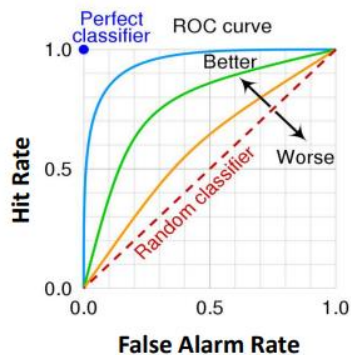
● ROC – 확률예측

- Contingency Table
- Hit Rate vs. False Alarm Rate
- 이벤트 발생/발생 안함을 식별하는 능력이 어느 정도인가?
- 0-1, 1: perfect, under 0.5: no skill

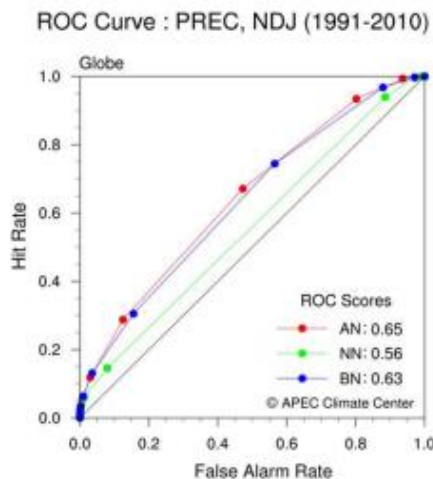
| Event Forecast | Event observed | | |
|----------------|----------------|--------------------------|----------------|
| | Yes | No | Marginal total |
| Yes | Hit (H:14) | False Alarm (F:2) | H+F |
| No | Miss (M:6) | Correct Rejection (C:22) | M+C |
| Marginal total | H+M | F+C | H+F+M+C = N |

- Hit Rate = $H / (H+M)$

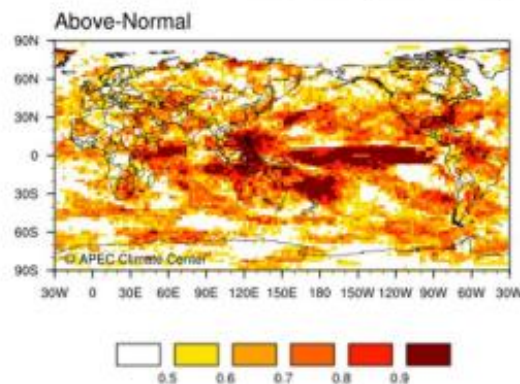
- False Alarm Rate = $F / (F+C)$



Fawcett, Tom(2006). "An Introduction to ROC Analysis" Pattern Recognition Letters. 27 (8): 861-874. <https://www.apcc21.org/ser/hind.do?lang=ko>

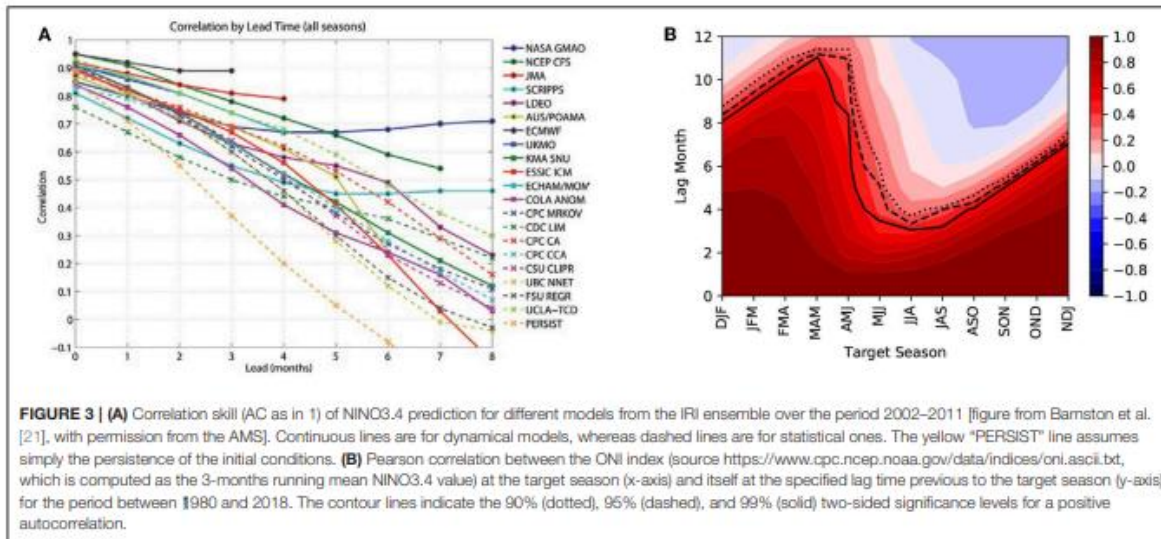


ROC Score : PREC, NDJ (1991-2010)



예측성

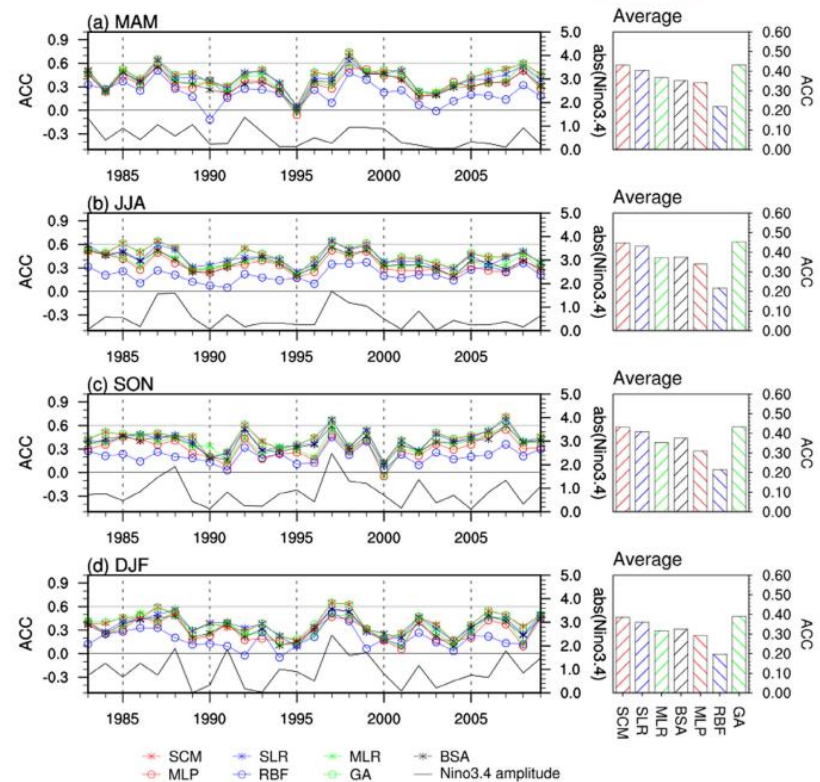
- 계절예측의 예측성
 - SST, ENSO
 - 0.5 기준 5개월 정도
 - 예측성의 계절적 특성



가을 vs. 여름 엘니뇨 예측 신뢰도

예측성

- 계절예측의 예측성
 - SST, ENSO - 계절예측성의 source
 - WMO MME
 - Nino3.4 지수와 ACC skill
 - 관측과 예측의 공간 패턴
 - 지역규모에서는 주

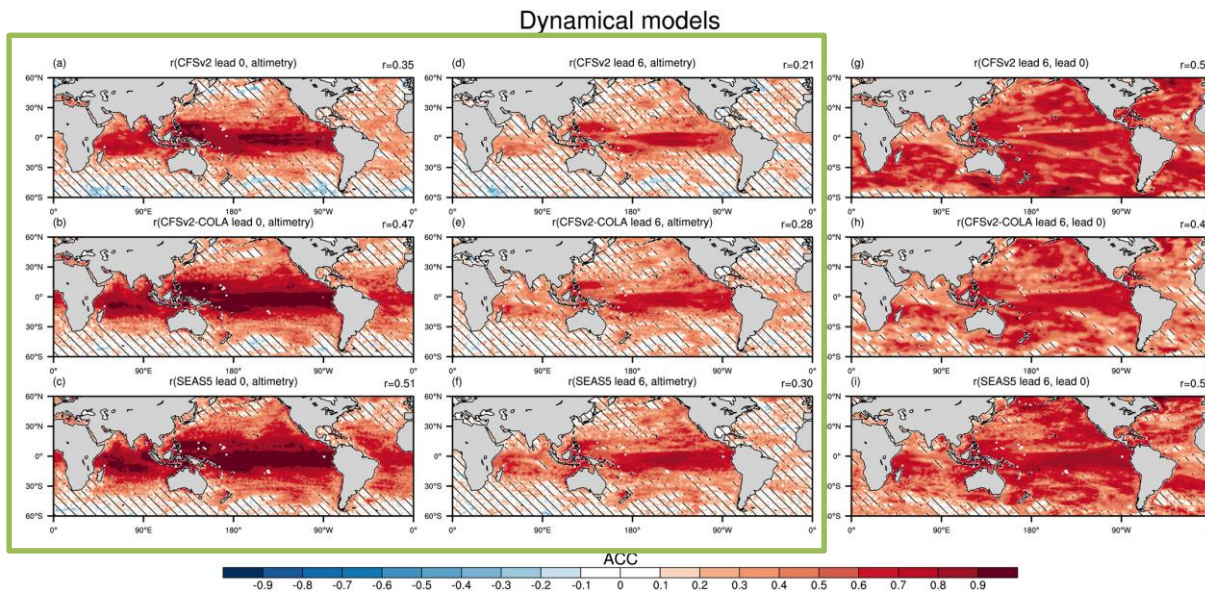


강수. Kim et al. 2020, Assessment of MME methods for seasonal prediction using WMO LC-LRFMME hindcast dataset

FIGURE 3 Time series of ACCs between observations and predictions of 2-m temperature by each MME method over the globe (coloured lines with marker) and absolute value of Niño 3.4 index (black line) for (a) MAM, (b) JJA, (c) SON, and (d) DJF for the period 1983–2009. The average scores during the same period are also shown [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

예측성

- 계절예측의 예측성
 - Sea Level anomalies 적도 / 중위도



ENSO - 적도 해수면 온도 변동성 -> 전지

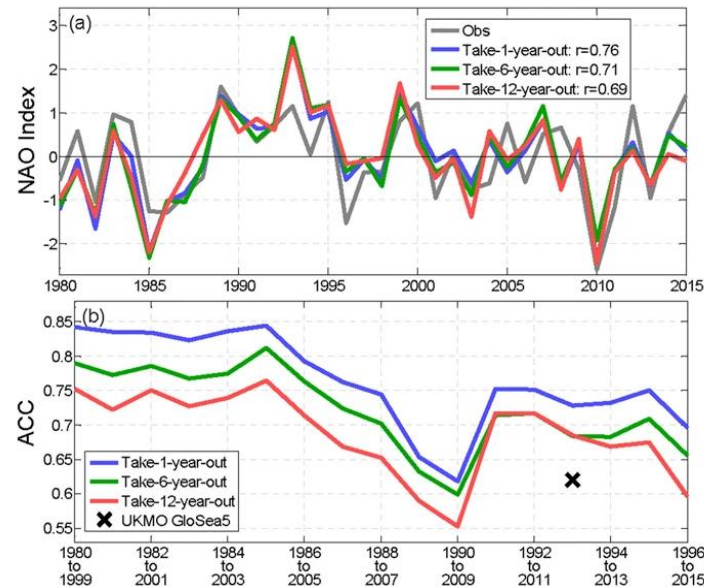
해양 > 육지
계절예측성의 source

Retrospective forecast skills at lead-0 and -6 months for three dynamical model forecasts of monthly sea-level anomalies. These models are chosen from the 10-model ensemble to represent ocean initializations utilizing either no altimetry observations (CFSv2), temperature and salinity that are influenced by altimetry (CFSv2-COLA), or assimilation with altimetry (SEAS5). Anomaly correlation coefficients (ACCs) are between the model forecasts and either the altimetry (a-c for lead-0 month, and d-f for lead-6 months) or a single member of respective model lead-0 month forecast (g-i for lead-6 months). All four start times (January, April, July, and October) are considered. Hatching indicates correlations that are not statistically significant at the 5% level using a one-tailed t -test. The domain average of ACC is shown for each panel (r).

Long et al. 2021. Seasonal forecasting skill of sea-level anomalies in a multi-model prediction framework. JGR Oceans

예측성

- 계절예측의 예측성
 - NAO (North Atlantic Oscillation)
 - Dominant mode in the Atlantic domain, 대기모드, 유럽 겨울철
 - 대기 모드, 중위도 지역, 통계예측 모델의 예측성



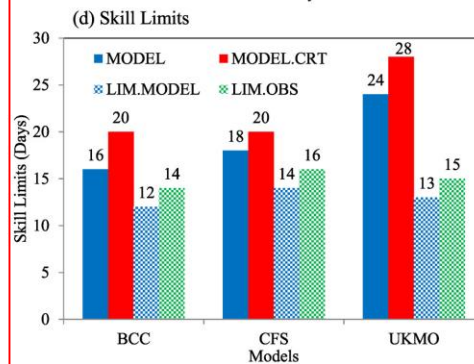
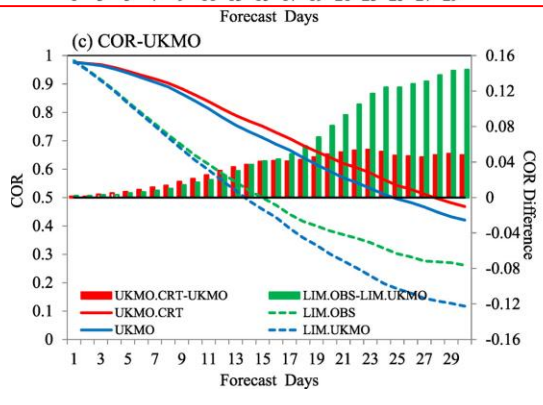
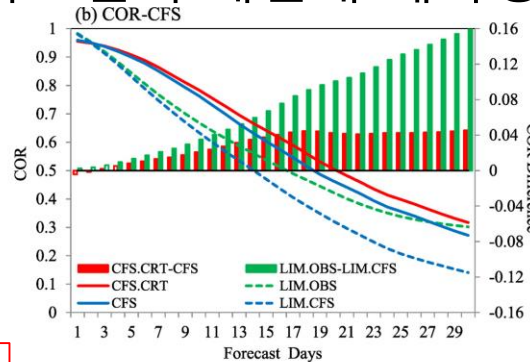
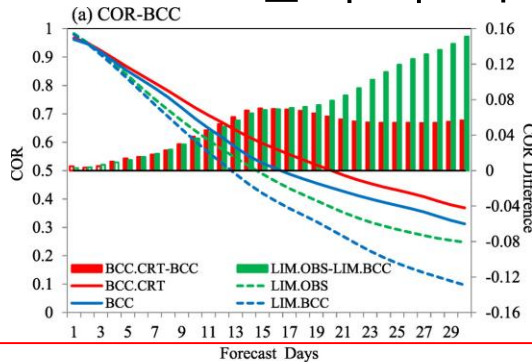
Wang et al. 2017. A robust empirical seasonal prediction of winter NAO and surface climate. *Scientific Reports*

(a) The observed and predicted DJF-mean NAO index for the 1980–2015 period. (b) The forecast skill of each 20-year window. NAO is defined as the difference between the monthly mean sea level pressure (SLP) anomalies averaged over the domains of (50°W–10°E, 25–55°N) and (40°W–20°E, 55–85°N). Similar results are obtained with several other popular NAO indices (see Methods). The year corresponds to the January of each DJF season.

예측성

- 계절내 예측의 예측성

- 대표적 현상: MJO. 겨울철 적도지역 인도양->태평양 강한 대류현상 30-60일 주기. 역학모델의 계절내 예측성



Madden-Julian oscillation (MJO) prediction skills (lines) and the differences (bars) of the bivariate correlation coefficient (COR) for the real-time multivariate MJO (RMM) index as a function of forecast days in the (a) BCC, (b) CFS, and (c) UKMO models. The blue and red solid lines indicate skills of the original model (denoted BCC, CFS, and UKMO) and that after linear dynamics-based corrections (denoted BCC.CRT, CFS.CRT, and UKMO.CRT), and the red bars indicate their differences (denoted BCC.CRT-BCC, CFS.CRT-CFS, and UKMO.CRT-UKMO). The green and blue dashed lines indicate the skills of the standalone LIM predictions from LIM_obs (denoted LIM.OBS) and LIM_fcs model (denote LIM.BCC, LIM.CFS, and LIM.UKMO), and the green bars indicate their differences (denoted LIM.OBS-LIM.BCC, LIM.OBS-LIM.CFS, and LIM.OBS-LIM.UKMO). The solid color bars show that the differences are significant at the 95% confidence level. The skill limits with the criterion of COR exceeding 0.5 of each model are given in (d). BCC, Beijing climate center; CFS, climate forecast system; LIM, linear inverse modeling; UKMO, UK met office.

Wu Jie and Fei-Fei Jin, 2021. Improving the MJO forecast of S2S operation models by correcting their biases in linear dynamics. *Geophys. Research Lett.*



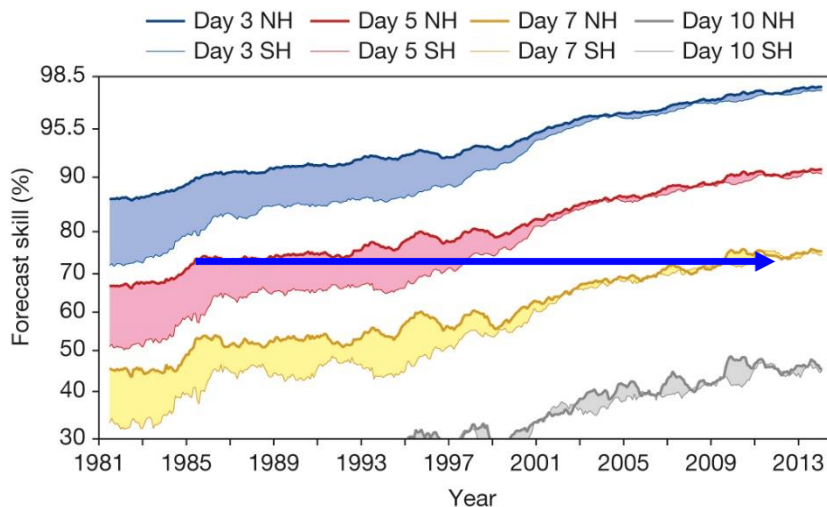
예측 기술 개선



☑ 예측 정확도는 개선되고 있는가?

• 날씨예측: 지난 30년 간 1일/10년 증가

✓ 현재 7일 후 예측정확도 = 20년 전 5일 후 예측 정확도



※ 60% 이상 유용한 예측, 80% 이상 높은 정확도

• 중기예측: ECMWF는 향후 10년 간 10% 증가를 목표

✓ 2-3주 예측성공률 2016년 60% → 2025년 70%

(chance forecast의 예측성공률은 50%)

※ ECMWF 로드맵 2016-2025

• 장기예측: 지난 10년 간 대략 1%/년 내외 증가

| Field | Lead (months) | S3 mean | S4 mean | S4 wins |
|--------------|---------------|---------|---------|---------|
| Tropics T850 | 1 | 0.573 | 0.605 | 12/12 |
| Tropics T2m | 1 | 0.601 | 0.635 | 12/12 |
| NH Z500 | 1 | 0.246 | 0.270 | 7/12 |
| NH T850 | 1 | 0.266 | 0.306 | 10/12 |
| NH T2m | 1 | 0.345 | 0.375 | 10/12 |
| Tropics T850 | 4 | 0.443 | 0.509 | 11/12 |
| Tropics T2m | 4 | 0.431 | 0.492 | 12/12 |
| NH Z500 | 4 | 0.167 | 0.221 | 11/12 |
| NH T850 | 4 | 0.192 | 0.249 | 11/12 |
| NH T2m | 4 | 0.240 | 0.287 | 10/12 |

Table 4.2.1 Area-mean of grid-point anomaly correlations for different variables, regions and lead times, averaged over the 12 start dates. For scores computed in individual start dates, the last column shows in how many cases (i.e. initial months) ACC is higher for S4 than for S3.

※ ECMWF 기후예측모델 정확도(상관계수) 개선(2007-2011)

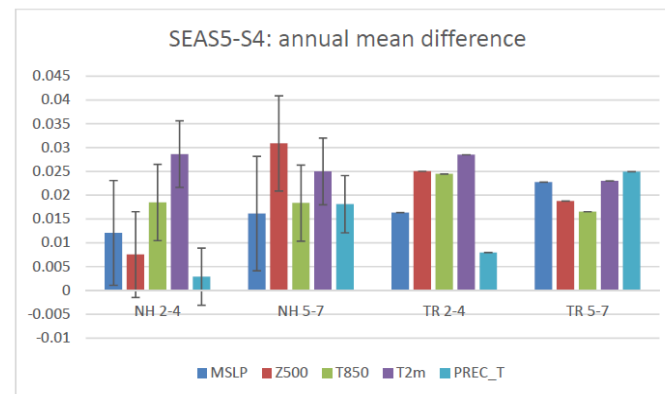


Figure A 4: Annual mean of SEAS5 - S4 differences in aggregated anomaly correlation over NHEX (NH) and TR30 (TR), for re-forecasts verifying at 2-4 month and 5-7 months, based on 1981-2010 15 member re-forecasts. Bars for NH indicate the 1 sigma sampling uncertainty in the correlation difference.

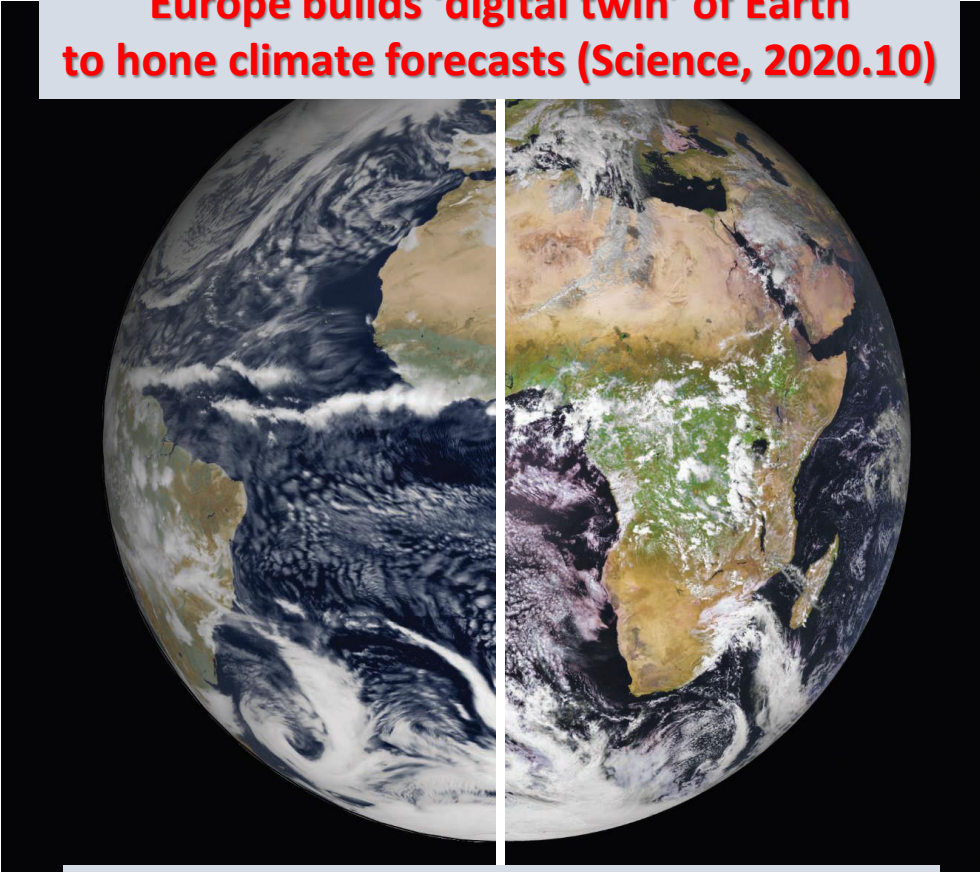
※ ECMWF 기후예측모델 정확도(상관계수) 개선(2011-2017)

기후예측 기술의 미래

☑ 이음새 없는(seamless) 기후예측 기술 개발

- 세계기상기구, 선진국은 예측성 향상을 위해 이음새 없는 예측기술의 구현을 추구
 - ✓ WMO : 지구시스템 예측 향상을 위해 이음새 없는 예측을 전략 목표로 설정
 - ✓ 유럽(ECMWF): 중기예보 성능의 향상을 위해 지구시스템모델을 이용한 이음새 없는 예측을 발전 전략으로 설정
 - ✓ 영국 : 이음새 없는 대기 및 해양예측시스템과 환경 예측시스템 개발을 전략 목표로 설정
 - ✓ 미국 : 기상 및 기후예보 정확도 개선을 위한 이음새 없는 예측시스템 구축을 목표로 설정
 - ✓ 호주 : 지구시스템 수치예보 역량 강화를 위해 이음새 없는 모델시스템을 주요 목표로 설정
 - ✓ 독일 : 모든 시간규모에서의 이음새 없는 예측을 개발전략으로 설정

Europe builds 'digital twin' of Earth to hone climate forecasts (Science, 2020.10)



수일에서 수년 예측을 위해 개발되고 있는 기후모델이 거대연산(exascale) 자원을 이용하여 1km의 정밀도(resolution)로 재현한 결과(좌측)와 관측(우측)과의 비교

기후예측 기술의 미래

APCC

기후예측 모델 개선: 1년 후의 몬순 성공적 예측



ARTICLE

Check for updates

<https://doi.org/10.1038/s41467-021-22299-6>

OPEN

Skilful predictions of the Asian summer monsoon one year ahead

Yuhei Takaya¹, Yu Kosaka², Masahiro Watanabe³ & Shuhei Maeda⁴

The interannual variability of the Asian summer monsoon has significant impacts on Asian society. Advances in climate modelling have enabled us to make useful predictions of the seasonal Asian summer monsoon up to approximately half a year ahead, but long-range predictions remain challenging. Here, using a 52-member large ensemble hindcast experiment spanning 1980–2016, we show that a state-of-the-art climate model can predict the Asian summer monsoon and associated summer tropical cyclone activity more than one year ahead. The key to this long-range prediction is successfully simulating El Niño–Southern Oscillation evolution and realistically representing the subsequent atmosphere–ocean response in the Indian Ocean–western North Pacific in the second boreal summer of the prediction. A large ensemble size is also important for achieving a useful prediction skill, with a margin for further improvement by an even larger ensemble.

Yuhei T. et al.,
**Skilful predictions
of the Asian
summer monsoon
one year ahead,**
Nature
Communications,
2021. 4

기후예측 기술의 미래

☑️ **신기술(AI, 딥러닝 등)을 이용한 기후예측 기술 개발**

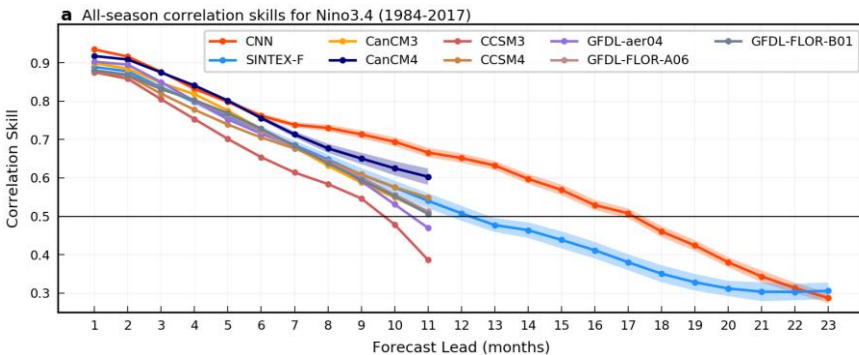
- 선진국은 인공지능 기술을 기후예측에 접목하기 위한 기술 개발을 적극적으로 추진하고 있음
 - ✓ 미국 : 국가기관 및 대학 등에서 인공신경망 기법을 이용한 강수의 확률 중기예측 기법, 머신러닝을 이용한 기온과 강수의 중장기 예측 기법 등을 개발 중
 - ✓ 유럽: 국가기관 및 대학에서 머신러닝을 이용한 기온 등의 확률 중기예측 기법, 딥러닝을 이용한 중기예측의 오차보정 기법 등을 개발 중
 - ✓ 중국 : 일부 대학에서 머신러닝을 이용한 기온의 장기예측 기법 등을 개발 중
 - ✓ 일본 : 출연연구소에서 머신러닝을 이용한 기온의 장기예측 기법 등을 개발 중
- IBM, Microsoft 등의 글로벌 기업 역시 인공지능 기술을 이용한 기후예측 기술개발을 추진 중
 - ✓ Microsoft: 머신러닝 기법에 기반한 장기예측시스템을 개발하고 미국에서 운용 중인 기후예측모델과 비교
- 국내에서는 일부 대학, APCC 등이 기계학습, 딥러닝 등을 이용한 중장기 기후예측 기술개발 추진 중

기후예측 기술의 미래

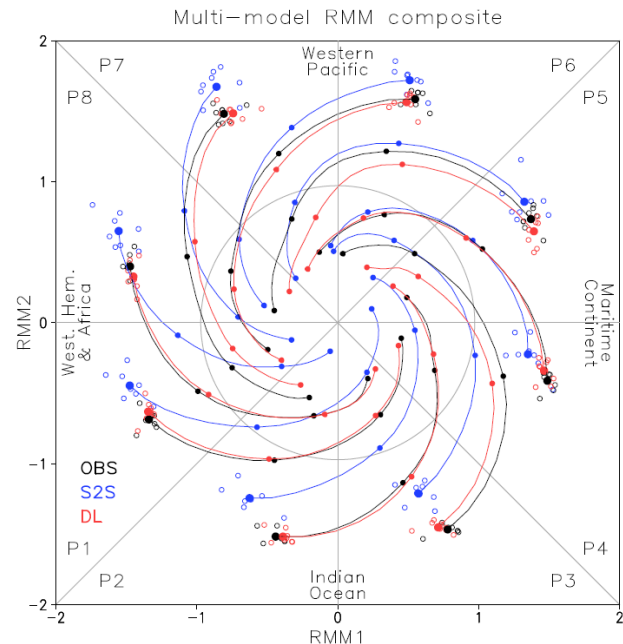
DL을 이용한 기후예측 개선

- DL을 이용한 ENSO 예측
 - 약 18개월 전에 ENSO 예측 가능

- DL을 이용한 MJO 예측
 - 기후예측 모델의 오차 보정 효과 : 강도 90%, 위상 77%



(Ham et al., Nature, 2019)



(Kim et al., Nature, 2021)

기후예측 기술의 미래



☑ 지역맞춤형 기후예측 기술 개발

- 다중모델앙상블 기후예측을 이용하여 특정지역에 대한 역학-통계 모형 구축
- 전문가 선정 예측인자 가이드에 AI 알고리즘을 적용 → 예측인자 자동 선정, 기후전망 자동 생성

ESPreSSO v3.0.6 Patent#10-1901311, Copyright 2018, W.Kim @ Team ESPreSSO by WonMoo Kim (WonMoo.Kim@apcc21.org)

Climate Outlook for September [Lead+1] Tmean 2019:

The ESPreSSO™ thinks the Eastern Pacific 2 m air temperature through teleconnection is important aspect to consider in APCC MME when predicting September [Lead+1] Tmean in Korea.
In September 2019, the 2 m air temperature is predicted to be exceptionally positive in APCC MME.
As a result, the ESPreSSO™ predicts the September Tmean to be AN (AN: 44%, NN: 36%, BN: 20%). The mode of Tmean is predicted to be 20.6°C, with the Highest Density Intervals (HDIs) of 50% and 90% are expected to be 20.0 ~ 21.2°C and 19.2

① 특정지역(ex. 우리나라)에 대한 기후예측 전망 제시

ESPreSSO v3.0.6 Patent#10-1901311, Copyright 2018, W.Kim @ Team ESPreSSO by WonMoo Kim (WonMoo.Kim@apcc21.org)

Conceptual Diagram of Climate Drivers and Responses:

Above conceptual diagram shows that the September [Lead+1] Tmean is moderately positively related to the Eastern Pacific 2 m air temperature as defined by t2m [170°W-110°W, 10°N-25°N] for some stations through teleconnection.

③ 선택된 예측인자와 특정지역(ex. 우리나라) 기후 사이의 관련성, 영향 정도, 의미를 모식도로 제시

Predictor information: Specifically, September [Lead+1] Tmean in Korea is moderately positively related to the Eastern Pacific 2 m air temperature as defined by t2m [170°W-110°W, 10°N-25°N] for some stations through teleconnection.
In September 2019, the 2 m air temperature is predicted to be exceptionally positive in APCC MME.
As a result, the ESPreSSO™ predicts the September Tmean to be AN (AN: 44%, NN: 36%, BN: 20%).
Note that the prediction skill of ESPreSSO™ for September [Lead+1] Tmean is high (HSS 29.1%)

Map:

② 기후예측 전망에 이용된 예측인자 제시 + 권역별 상세 예측 제시

Verification Information: ④ 예측성능의 검증 결과 제시

| Lead | Cast | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|------|------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1 | ALL | -4.6 | -2.6 | 32.9 | -2.6 | 23.6 | 23.0 | 10.8 | 18.9 | 29.1 | 35.1 | 12.8 | 10.8 |
| | HIND | 0.9 | -4.5 | 49.1 | -1.8 | 26.8 | 15.2 | 8.9 | 22.3 | 30.4 | 33.0 | 19.6 | 17.0 |
| | FORE | -20.0 | 2.5 | -12.5 | -5.0 | 13.9 | 47.2 | 16.7 | 8.3 | 25.0 | 41.7 | -8.3 | -8.3 |
| 2 | ALL | 3.3 | 3.3 | 28.9 | 15.1 | 31.8 | 29.7 | 14.9 | 4.7 | 31.1 | 20.9 | 12.8 | 23.0 |
| | FORE | 3.6 | -1.8 | 43.8 | 19.6 | 39.3 | 23.2 | 14.3 | 8.9 | 27.7 | 27.7 | 11.6 | 19.6 |
| 3 | ALL | 15.1 | 9.2 | 19.1 | -0.7 | 33.1 | 34.5 | 20.9 | 6.8 | 29.1 | 6.8 | 10.8 | 16.9 |
| | HIND | 17.0 | 8.9 | 22.3 | 6.2 | 33.0 | 24.1 | 25.0 | 11.6 | 22.3 | 11.6 | 14.3 | 27.7 |
| | FORE | 10.0 | 10.0 | 10.0 | -20.0 | 33.3 | 66.7 | 8.3 | -8.3 | 50.0 | -8.3 | 0.0 | -16.7 |

기후예측 기술의 미래

☑ 예보객관화 기술 개발

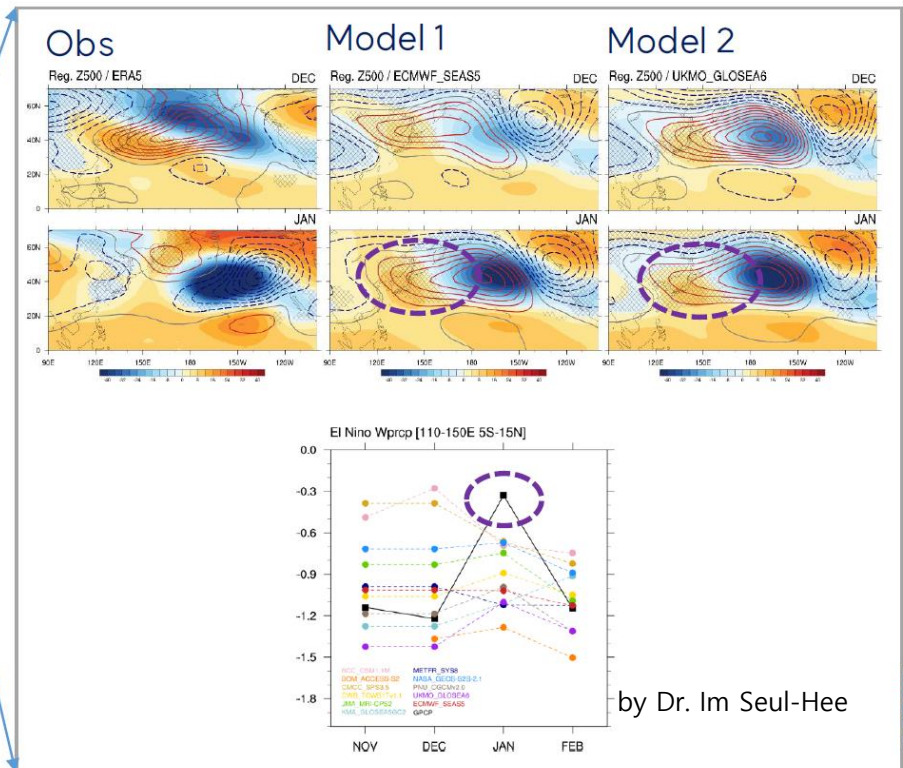
- 역학모델, 통계모델, 통합된 정보
- 예측 인자 발굴, 분석, 적용, 평가 등의 예보 생산 과정을 무인시스템화

✓ 예보 recipe



Systematic, Unmanned process

R2O





Summary

강의 목표: 기후예측 정보가 어떻게 생산되나?

1. 기후예측 방법 알기
2. APCC 기후예측 시스템의 소개
3. 기후예측의 예측성 알기

1

기후예측이란
통계모델 & 역학모델, 다중모델 예측
실제 계절예측 과정
ENSO 예측

3

예측성의 원천, 검증 스코어
계절예측의 예측성
계절내예측의 예측성
기후예측 기술의 미래

2

APCC 다중모델예측 시스템 - 계절예측
APCC 계절내예측 시스템 - BSISO



여러분이 더 알아야 할 내용



- 계절예측을 위한 예보관의 지혜, 우리나라 기후분석
- 계절내 예측 BSISO, MJO
- 기후변화란



감사합니다.

