

## WMO LC-LRF 검증 지수를 활용한 기후예측시스템(GloSea6)의 계절예측 성능 비교 평가

현유경<sup>1)</sup> · 박진경<sup>1)</sup> · 지희숙<sup>1)</sup> · 이조한<sup>1)</sup> · 신범철<sup>1)</sup> · 이상민<sup>1)</sup> ·  
이현주<sup>2)</sup> · 김형진<sup>2)</sup> · 박연희<sup>1)</sup> · 김지영<sup>1)</sup> · 부경온<sup>1)</sup>\*

<sup>1)</sup>국립기상과학원 기후연구부, <sup>2)</sup>APEC 기후센터 기후사업본부

(접수일: 2024년 10월 16일, 게재확정일: 2024년 10월 27일)

### Comparative Assessment of the Seasonal Prediction Skill of Climate Prediction Systems (GloSea6) Using WMO LC-LRF Verification

Yu-Kyung Hyun<sup>1)</sup>, Jinkyung Park<sup>1)</sup>, Hee-Sook Ji<sup>1)</sup>, Johan Lee<sup>1)</sup>, Beomcheol Shin<sup>1)</sup>,  
Sang-Min Lee<sup>1)</sup>, Hyun-Ju Lee<sup>2)</sup>, Hyung-Jin Kim<sup>2)</sup>, Yeon-Hee Park<sup>1)</sup>,  
Ji-Yeong Kim<sup>1)</sup>, and Kyung-On Boo<sup>1)</sup>\*

<sup>1)</sup>Climate Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

<sup>2)</sup>Climate Services and Research Division, APEC Climate Center, Busan, Korea

(Manuscript received 16 October 2024; accepted 27 October 2024)

**Abstract** This study aims to assess the performance of climate prediction systems around the world, and understand objective seasonal prediction skill of KMA's GloSea6. Using the 2023 hindcast verification values provided by the WMO Lead Centre for Long-Range Forecast (LC-LRF), we analyzed the skill in the global, East Asia, and European regions. The differences in prediction skill and RMSE between GPC (Global Producing Centers) were very small in this challenging area. Overall, GloSea6 showed the best ACC across variables and periods. Operating this outstanding climate prediction system not only ensures the provision of the best forecasting services but also offers excellent research and development tools. This result also suggests that seasonal forecasting requires different strategies against short- to medium-range forecast to account for climate prediction sources and reduce uncertainties. The skill differences between GloSea6-Seoul and GloSea6-Exeter, especially in high latitude, could be due to differences in snow and soil temperature initialization. Understanding these differences is important for future prediction system development. GPCs that use atmospheric only models instead of coupled, showed the limitations for seasonal predictions. Systems developed a relatively long time ago tended to perform low, suggesting that continuous improvements and upgrades are important. Among variables, SST showed the best prediction skill with the lowest RMSE. Temperature and pressure variables showed practical skill levels, around 0.5. We aimed to quantitatively assess the skills of climate prediction systems, and this assessment can guide the improvement and development of future systems and serve as a reference.

**Key words:** GloSea6, Prediction skill, LC-LRF, Climate prediction system, Verification

\*Corresponding Author: Kyung-On Boo, Climate Research Development Department, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea.  
Phone: +82-64-780-6620, Fax: +82-64-780-6514  
E-mail: kyungon@korea.kr

## 1. 서 론

최근 기후변화의 가속화로 극단적인 이상기후의 발생 빈도와 강도가 증가함에 따라 점차 국민들의 안전을 위한 기후위기 대응의 필요성은 시급해지고 있다. 전 세계적으로는 지금까지 경험하지 못했던 수준의 위험기상 현상들이 극심한 수준의 피해 규모를 가지며 동시다발적으로 발생하고 있으며, 23년은 전지구적으로 기록상 최고 기온을 기록함과 동시에 캐나다 대형 산불, 리비아 대홍수와 전세계적 폭염을 기록했다. 기후 위기는 우리나라 또한 예외가 될 수 없어서, 16, 18년의 폭염, 20년 역대 최악의 장마, 22년 역대 최대의 서울 도심 집중 호우가 발생하였고, 23년은 전 세계 뿐만 아니라 우리나라 역시도 관측 이래 가장 더웠던 해로 기록되어, 계속해서 ‘역대’, ‘기록상’, ‘최대’, ‘최장’ 등의 문구를 접하는 것이 일상화 되고 있다(KMA, 2017, 2019, 2021, 2023, 2024; WMO, 2024).

날로 대형화되고 있는 기후재난에 대비하기 위해서도 기후예측 정보에 대한 필요성과 사회적 수요는 계속해서 증가할 수 밖에 없으나, 동시에 경험해보지 못한 현상에 대한 불확실성 또한 함께 증가하고 있는 실정이다. 따라서 불확실성을 줄이고 예측성을 더욱 확보하기 위해 기후예측시스템은 더 많은 앙상블을 생산하고, 더 고해상도화 하며, 더 많은 요소를 자료동화하여 초기화하는, 복잡하고 많은 전산자원을 필요로 하는 시스템이 되고 있다. 그리고 이에 따라 시스템을 개발하고 개선하는 데에도 점점 더 많은 시간과 예산과 노력이 들 수밖에 없어졌으며, 한 분야만의 전문성을 가지고서는 개발할 수 없고, 한 국가를 넘어 국제적인 협력이 필수적인 시스템이 되어가고 있다.

기상청은 2008년부터 국제협력을 통해 영국기상청의 통합 모델(UM)을 도입하여 현업으로 운영해왔다. 영국기상청은 1952년 수치예보를 시작, 1965년 현업 일기예보에 수치모델을 적용하여, 선진적인 기상/기후 연구와 수치모델 개발센터로 자리매김하고 있는 기관이다. 특히 영국기상청의 해들리센터는 영국기상청 부속의 세계적인 기후변화 연구센터이자 기후모델링센터로써 기후과학에 선두적인 역할을 하고 있다. 기후예측 분야에서 한국기상청은 2010년부터 해들리센터의 기후예측시스템, GloSea (Global Seasonal Forecasting System)을 도입하여 운영하고 있으며, 영국기상청과 공동 현업 운영이라는 전략을 가지고 앙상블을 실시간으로 교환하고, 예보에 상호 활용하고 있다. 세계적인 기후예측시스템을 운영하고 있다는 것은 최선의 예측 서비스를 제공할 수 있다는 점과 함께 좋은 연구개발 틀을 가지고 있다는 장점을 제공해 오고 있으며, 이는 국내외의 기후예측 모델의 운영과 예측성 진

단(Lee et al., 2014; Jung et al., 2015; Lee et al., 2016; Ham et al., 2017; Park et al., 2017; Kim et al., 2018; Ham et al., 2019; Son et al., 2020; Kim et al., 2021; Hyun et al., 2022), 초기장 생산을 위한 자료동화시스템 개발과 운영(Chang et al., 2021; Choo et al., 2021; Hyun et al., 2022; Park et al., 2023), 앙상블의 활용과 초기장의 영향(Hyun et al., 2020; Park et al., 2021; Kim et al., 2022; Ham et al., 2023; Hyun et al., 2024), 지면초기화(Seo et al., 2016, 2019; Lim et al., 2021; Ji et al., 2022), 기후변동성과 원격상관(Kang et al., 2014; Jung et al., 2016; Kim et al., 2018; Lim et al., 2018; Song et al., 2018; Kim et al., 2019; Kim et al., 2019; Lee et al., 2020; Ham et al., 2021; Kim et al., 2021; Moon et al., 2022; Oh et al., 2022; Hong et al., 2023), 극한 기후(Heo et al., 2019; Lee et al., 2020; Kim et al., 2023; Lee et al., 2024)에 대한 연구 역량을 키우는데 주요한 역할을 하고 있다.

또한 이러한 연구와 기술 개발 역량의 향상과 더불어, 이제는 현재 현업 시스템의 성능이 어느 정도에 위치하고 있고, 향후 시스템을 개발한다면 어느 정도 수준을 목표로 해야 할지에 대한 질문도 던져지고 있다. 이러한 시기적인 요구에 따라, 이 연구에서는 현재 전 세계적으로 운영되고 있는 현업 기후예측시스템들의 객관적인 성능을 조사해 보고자 하였다.

전세계 195개국 중 현업 수치예보시스템을 갖추고 WMO 활동에 기여하고 있는 기관은 한정적이다. 1일~2주 예측성 향상을 목적으로 한 TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) 프로젝트의 경우 전세계 13개 기관(<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/tigge/>)이, 2주에서 2개월 예측성 향상을 위한 S2S (Sub-seasonal to Seasonal) 프로젝트에 13개(<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/s2s/>), 3개월 이상의 전망을 위한 장기예보 선도센터(LC-LRF, Lead Centre for Long-Range Forecast)에 15개 기관이 자료를 생산하여 기여하고 있다(<https://wmo.org>). 각 프로젝트에 따라 참여 기관과 국가들이 조금씩 다르고 한 국가에서 여러 기관이 참여하는 경우도 있지만, 전체적으로 아시아에서 한국, 중국, 일본, 유럽에서 영국, 프랑스, 독일, 이탈리아와 미국, 캐나다, 브라질, 러시아와 호주, 인도, 남아프리카공화국 14개 국가가 수치예보시스템 운영 결과를 WMO에 제공하고 있으며, 여기에 유럽연합/중기예보센터를 추가한다면 15개라고 볼 수 있다.

이 연구에서는 ‘공식’적인 객관성과 ‘현재’의 ‘전세계’ 현업 센터 자료를 기반으로 한다는 측면에서 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지에서 제공되고 있는 자료 생산센터(Global Producing Centre, GPC)의 검증 결과를 그대로 사용하여 종합적인 그리고 변수별, 지역별로 세분한 계절 예측 스킬을 평가하고자 하였다.

이를 통해 기상청의 현업 기후예측시스템인 GloSea와 전세계에서 운영 중인 기후예측시스템들의 객관적인 예측 수준을 가늠해 보고자 하였으며, 최종적으로는 향후 기후예측시스템 개발과 개선을 위한 기반을 마련하고자 한다.

## 2. GloSea의 개발 및 운영 역사

GloSea는 영국기상청에서 개발, 운영하고 있는 기후예측시스템이다. 영국기상청과 모델 협력 파트너십을 맺고 있는 기관들 중 한국과 호주가 특히 계절예측 분야에서 GloSea를 현업으로 도입하여 운영하고 있으며, 인도도 GloSea를 협력을 통해 사용하고 있다.

영국기상청은 1854년 설립되어, 1922년 영국 공영 방송 BBC가 설립되면서 BBC 라디오를 통해 공공 일기예보를 시작하였고, 1936년 BBC 텔레비전 방송국이 개국하면서 세계 최초로 TV에서 날씨 예보를 시작한 역사를 가지고 있다. 이후 1952년 수치예보를 시작하였으며, 1965년 수치예보를 현업으로 운영하기 시작하였다(UKMO history of numerical weather prediction: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/how-forecasts-are-made/computer-models/history-of-numerical-weather-prediction>).

영국기상청에서 월간 예보는 1963년 처음 공공 분야에 제공하기 시작하였는데 당시의 월간 및 계절예측은 여러 가지 기상장과 지수들, 해빙, 눈덮임, 해수면온도 아노말리, 대기 순환 등을 보고 논의를 통해 결정하였다고 되어 있다(Murray, 1970). 이후 1981년부터 1990년대까지는 다변량 통계나 회귀 등의 방법을 통해 장기 예보를 생산하였고, 1990년대 중반부터는 특정 지역의 통계적인 방법을 이용한 예보를 시작하였다.

1990년대 말부터 역학 모델기반의 계절예측 연구 프로젝트가 유럽에서 활발하게 시작되었으며, 영국도 이 시기에 결합 모델을 통한 계절예측 연구를 시작하였다(Ineson and Davey, 1997). 1996년부터 1999년까지 EU PROVOST (PRediction Of climate Variations On Seasonal to interannual Time-scales)라는 계절예측 프로젝트가 유럽에서 시작되었으며, 4개 전지구 모델 [UK Met Office(영국기상청), ECMWF(유럽중기예보센터), Météo-France(프랑스기상청), EDF(Électricité de France, 프랑스 전력공사)]이 참여하여, ERA15 재분석(1979~1993)과 관측 SST를 사용한 9개 앙상블 멤버의 계절예측이 생산되었다. 그리고 이 프로젝트를 통해 전 계절에 대해 중위도 지역의 예측 스킬과 다중모델 앙상블을 통해 얻을 수 있는 이점을 보여주었다(Graham et al., 2000). 이어 2000~2003년에는 EU DEMETER (Development of a European Multimodel

Ensemble system for seasonal to inTERannual prediction)라는 계절~연간 예측을 위한 유럽 다중모델 앙상블 개발 프로젝트가 진행되었으며, 해양자료동화와 해양초기장을 포함하고 있는 7개의 결합모델들이, 9개 멤버로 계절예측에 참여하였다(Palmer et al., 2004; Graham et al., 2005).

2003년 GloSea가 영국기상청과 ECMWF가 참여하는 실시간 다중모델의 일환으로 ECMWF 컴퓨팅 시설에서 현업으로 수행되었다. 각 달에, 한번에 모든 앙상블을 생산하는 burst 방법을 통하여, 40개 앙상블 멤버를 생산하였다. Hindcast 기간은 1987~2001년이었으며 예측이 시작되는 동일 날짜 Hindcast 해에 각 5개 멤버가 생산되었다(Seasonal Prediction at the Met Office: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2003/8021-seasonal-prediction-met-office.pdf>). 이후 GloSea2와 3가 해양자료동화와 해양초기장이 개선되어 운영되었고, 2008년, 현재의 ‘월에서 10년 예측 그룹(Monthly to Decadal Prediction Group)’ 전신인 ‘계절에서 10년 예측 그룹(Seasonal to Decadal Prediction Group)’이 영국기상청 내에 신설되었다. 2011년 GloSea4가 수행되기 시작하였으며, 한국기상청이 2010년 한영 공동 계절예측시스템 운영 협력을 맺고, 기후예측시스템 도입을 시작한 것이 이 GloSea4이다.

기상청이 1964년 월간 예보 대내 시행, 1973년 월간 예보 대외 발표, 1999년부터 국가 기상슈퍼컴퓨터 1호기에서 역학 모델을 도입하여 장기 예보를 생산한 역사를 보면(KMA, 2015; Hyun et al., 2022), 1949년 국립중앙관상대로 시작한 한국기상청이 영국과 같은 시기에 월간 예보를 시행하고 역학 모델을 도입 운영하였다는 사실은 주목할 만하다. 한국은 2010년 한영 계절예측 협력을 시작으로, 2012년 GloSea4를 준현업, 2013년 GloSea5를 현업으로 운영하기 시작하였으며, GloSea5가 크고 작은 버전 개선과 함께 유지되다가, 2022년 GloSea6로 업그레이드하였다(Kim et al., 2021; Hyun et al., 2022). 한국은 영국과 동일 버전 시스템을 유지하면서 GloSea를 현업 운영 중에 있다.

## 3. 자료 및 방법

현업 예측시스템의 성능 평가와 타 시스템과의 비교 검증에 대한 내용은 항상 연구 논문들의 주요 주제였으며, GloSea를 포함한 기후예측시스템의 성능을 비교한 매우 많은 선행연구들이 있어 왔다. 그러나 이들 연구들은, 앞서 언급한 바와 같이 시스템이 복잡해지고 대형화됨에 따라 각 주제의 초점을 맞추어 연구하고 있으며, 각기 다른 예측 기간을, 각기 다른 연구 시점에서 성능을 평가하고 있어, 이를 종합하여 모든 분야와 예측 기간을 갖춘 객관적인 비교를 한다는

것은 사실상 불가능하다.

이에 본 연구는 기온, 강수, 기압 등 예측 변수의 측면에서 모의성능을 전반적으로 판단하고자 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지를 통해 검증 값이 표출되고 있는 13개 GPC 결과를 분석하였다. 검증 변수는 수집되는 6개 변수, 2 m 기온(Temperature 2 m, T2M), 850 hPa 지위고도 기온(850 hPa Geopotential Height Temperature, T850), 평균해수면기압(Mean Sea Level Pressure, MSLP), 500 hPa 지위고도(500 hPa Geopotential Height, Z500), 강수(Precipitation, PRCP), 해수면온도(Sea Surface Temperature, SST)를 모두 사용하였으며, Hindcast 기간은 각 GPC 마다 다르지만 선도센터에서는 공통 기간인 1993년부터 2009년까지를 검증 기간으로 잡고 있다.

Hindcast를 생산하는 기후예측에서는 Forecast에서 자신의 Hindcast 기후값을 빼서 오차를 보정한 후 그 편차, 즉 아노말리를 사용하여 예측을 활용한다. 따라서 앞장에서 살펴보았듯, 기후기간 동안 각 해의 연

변동성을 얼마나 잘 따라가는지를 보는 Hindcast의 아노말리 상관, ACC를 예측 스킬로 삼는다. ACC 계산식은 다음 식(1)과 같으며, 연 변동성에 대한 스킬을 보는 것이므로 Hindcast와 관측 각 14개 해(1993~2009년)의 값들 간의 ACC를 구한 것이다. 이 연구에서는 2023년 선도센터로 전송된 최신 Hindcast의 예측 스킬(Anomaly Correlation Coefficient, ACC)을 주로 살펴보았다.

$$ACC = \frac{\Sigma(H-C)(O-C)}{\sqrt{\Sigma(H-C)^2} \sqrt{\Sigma(O-C)^2}} \quad (1)$$

평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)는 단중기 수치예보에서, 특히 500 hPa 지위고도장 RMSE는 모델 성능을 보는 중요한 기준이 되며, 장기예보 선도센터에서도 기본 검증 방법의 중 하나로 선정하여 사용하고 있다. 또한 Hindcast ACC 검증이 현재 버전의 시스템이 긴 기후 기간 동안 각기 달랐던 해

**Table 1.** System information of GPCs for LC-LRF as of 2023.

GPC	Institute	System	HCST	ENS no	Res (atm, ocn)	Coupled	Impl	Abbrev
Seoul (Korea)	KMA	GloSea6-GC3.2	1993~2016	28	~60 ~25 km	Yes	2022	Seoul
Exeter (UK)	UKMO	GloSea6-GC3.2	1993~2016	28	~60 ~25 km	Yes	2021	Exeter
ECMWF	ECMWF	SEAS5	1993~2016	25	~35 ~25 km	Yes	2017	A
Tokyo (Japan)	JMA	JMA/MRI-CPS3	1991~2020	10	~55 ~25 km	Yes	2022	B
Montreal (Canada)	MSC	CanSIPsv2.1	1980~2020	40	~180 ~100 km	Yes	2021	C
CMCC (Italy)	CMCC	CMCC-SPS3.5	1993~2016	40	~50 ~25 km	Yes	2020	D
Offenbach (Germany)	DWD	GCFS 2.1	1993~2019	30	~100 ~40 km	Yes	2020	E
Toulouse (France)	Met France	System8	1993~2018	25	~35 ~25 km	Yes	2021	F
Beijing (China)	BCC	CSM1.1m	1991~2015	24	~110 ~30 km	Yes	2016	G
Washington (US)	NCEP/CPC	CFSv2	1982~2010	20	~100 ~25 km	Yes	2011	H
Melbourne (Australia)	BoM	ACCESS-S2	1981~2018	27	~60 ~25 km	Yes	2021	I
Moscow (Russia)	HMC	SL-AV	1991~2015	11	~100 -	No	2022	J
CPTEC (Brazil)	CPTEC	CPTEC/COLA	1981~2010	10	~100 -	No	2020	K

에 높고 낮은 아노말리 변동성을 관측과 비교해 얼마나 잘 모의하고 있는지에 대한 성능을 보는 것이라면, Forecast의 확률예측 성능검증 스코어(Relative Operating Characteristics, ROC)를 보는 것은, 그간 각 GPC들이 시스템 개발과 업그레이드를 지속하며, 매 해 현업 예측 스킬이 과거부터 얼마나 증가해 왔는지에 대한 추세를 볼 수 있다. 따라서 RMSE[식(2)]와 Forecast의 ROC 스코어도 함께 살펴보았다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - O_i)^2} \quad (2)$$

ROC는 적중률(probability of detection) 대 오경보율(probability of false detection)을 각 y와 x 축으로 값을 표시하고, ROC 곡선 아래의 면적을 스코어 값으로 사용한다. 적중률은 발생 이벤트를 맞춘 횟수를, 맞추거나 못 맞춘 전체로 나눈 비이며, 오경보율은 발생하지 않은 이벤트를 발생했다고 잘못 맞춘 횟수를, 맞추거나 못 맞춘 전체로 나눈 비이다.

검증 계절은 MAM, JJA, SON, DJF 네 계절이며, 각 예측의 리드시간은 1~3개월이다. 즉, MAM 예측의 경우는 전 달인 2월 중순 전까지, JJA라면 5월 중순 전까지 선도센터로 전송된 예측을 사용한 것이다.

검증에 사용된 예측시스템들은 Table 1에서 정리하였다. 13개 GPC를 대륙별로 보면 유럽에 5개, 아시아 3개, 북미 2개, 남미, 오세아니아, 유라시아(러시아)에 각 1개씩 위치해 있다. 인도의 Pune는 2003년부터 자료가 전송되기 시작하였고, 남아프리카공화국의

Pretoria는 최근 자료가 없어 검증에서 제외되어 있다. CMCC와 Moscow가 결합 모델이 아닌 대기 모델이며, Hindcast 기간은 모두 다르지만, 앞서 언급한 대로 공통되는 17년(1993~2009년)을 비교 검증에 사용하고 있다.

주로 전지구와 우리나라가 속한 동아시아(80°E-180°E, 10°N-60°N) 영역에 대해 초점을 맞추어 살펴 보았다. 그러나 추가적으로 계절예측에서 있어 적도 해양보다 북극의 영향을 더 많이 받는 지역이면서, 가장 많은 GPC들이 모여있는 북반구 고위도의 유럽(15°W-40°E, 30°N-75°N)도 토의를 위해 함께 살펴보았다. 좀 더 자세한 시스템 구성과 검증 방법, 영역 정의에 대해서는 선도센터 홈페이지를 참고할 수 있다([https://wmo.org/seasonVrfyHindDmmeUI/plot\\_VrfyHIND\\_DMME](https://wmo.org/seasonVrfyHindDmmeUI/plot_VrfyHIND_DMME)).

#### 4. 아노말리 상관계수(ACC)를 통한 예측 스킬

##### 4.1 6개 변수 종합

Figure 1은 선도센터에서 수집하는 총 여섯 개 변수의 사계절 아노말리 상관계수(이하 ACC)를 모두 평균한 각 전지구 및 동아시아의 결과로 0.2~0.5 사이의 값을 보였다. 이 결과는 Hindcast 기간을 공통으로 하고, 일부 변수, 특정 영역에 한정된 것임을 다시 한번 언급한다. 변수와 계절을 평균하였기 때문이기도 하겠지만 시스템 간 ACC 차이가 매우 작아, 상위 50%를 차지하고 있는 1~6위 간의 차이가 전지구와 동아시아 모두 0.05 이내이다. GloSea6-Exeter의 ACC

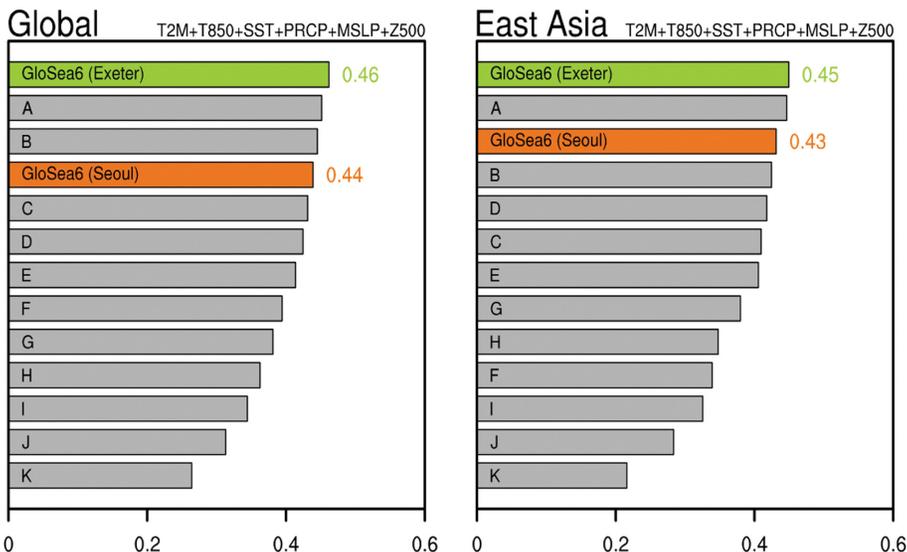


Fig. 1. Global prediction skills (ACC) of 13 LC-LRF GPC's averaged by all four seasons and 6 variables (T2M, T850, MSLP, Z500, PRCP and SST).

는 전지구 0.46, 동아시아지역 0.45로 두 지역 모두에서 가장 높은 ACC를 보이고 있으며, GloSea6-Seoul과 A, B센터의 ACC가 상위 30%에 자리하고 있다. 전반적으로 상위부터 하위로 가면서 ACC 값이 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 상위권에 속하는 시스템들의 ACC 값은 차이가 크게 나지 않고, 하위권 ACC 값에서 차이가 크게 난다는 것을 보인다.

ACC를 산출하기 전 각 변수들의 변동성을 관측과 함께 보면, 한두 해의 아노말리 모의 차이로 ACC 값이 크게 영향을 받을 수 있음을 알 수 있으며, 0.05 값은 매우 작은 차이임을 알 수 있다. 그러나 다수의 변수에서, 긴 기간, 자주 높은 성능이 나타나 평균적인 스킬을 높였다면, 이는 그 예측 시스템의 성능이 높다고 유의미하게 평가할 수 있다고 생각된다. 이 후 계절별, 변수별로 세분하여 보았을 때에도 이러한 ACC 값의 경향이 지속되는지 다음 절에서 계속 자세히 살펴보았다.

결합 모델이 아닌 대기 모델을 사용하는 두 GPC (J, K)의 경우를 보았을 때, 계절 예측에 있어 대기 모델을 사용하는 한계가 있음을 알 수 있다. 모델 해상도를 보았을 때, 상위 30%에 드는 1~4위가 중~고 해상도를 가지고 있었지만(Table 1), 가장 해상도가 좋다고(A, F) 성능이 가장 좋거나, 가장 해상도가 낮다고(C), 성능이 가장 낮은 등의 연관성은 보이지 않았다. 이것으로 무조건 해상도의 영향이 없다고 판단하기는 어렵고, 과거 GloSea4에서 GloSea5로 업그레이드 되면서 135 km에서 60 km로 해상도의 개선이 있었을 때 한차례 성능이 크게 증가한 바를 보면(MacLachlan, 2015), 전구적으로 전반적인 성능을 살펴보았을 때 현재 기후예측시스템들의 해상도 범위 안에서는 그 차이가 직접적으로 나타나지 않는다고 해석된다.

구축 시기를 보면, 대부분이 2020년 이후 구축되었으나, A, G, H는 그 이전에 구축되었다. 이는 센터들에서의 시스템을 구축 운영을 시작한 시기인데, I센터의 ACCESS-S2는 기반이 GloSea5-GC2로 I센터에서 새로이 자체 결합자료동화시스템을 구축하고 2022년 현업 운영을 시작한 것으로, GloSea5-GC2 자체는 2015년에 개발된 시스템이다(MacLachlan, 2015; Wedd et al., 2022). 이를 보았을 때, A를 제외한다면 최근 개발된 시스템의 성능이 상위권을 차지하고, 상대적으로 개발 후 오랜 기간이 지난 시스템이 하위권 성능을 보이고 있어, 모델 개발에 있어 꾸준하고 지속적인 개선 노력과 업그레이드가 중요함을 시사한다.

예측에 사용된 각 시스템의 앙상블 수는 10개에서 40개 사이로 차이가 있었지만, 전반적인 시스템 성능의 순위와 직접적인 관계를 보이지는 않았다. 앙상블

수는 기후예측시스템의 예측성에 매우 중요한 영향을 미치며, 기후예측에서 앙상블의 수가 증가할수록 노이즈가 감소하고 예측 스킬이 증가한다. Park et al. (2021)과 Kim (2019)에서는 각각 기상청 GloSea와 ECMWF의 기후예측시스템에서 앙상블 수를 1개에서부터 최대 각 56개와 51개까지 증가시켜, 앙상블 수가 작은 초반에는 앙상블 증가에 따라 스킬(오차가) 빠르게 증가(감소)하다가 앙상블 수가 많아 질수록 변화율이 점차 둔화되면서 포화되는 특징을 보였다. 각 시스템의 앙상블 수 증가에 따른 예측성 개선도가 타 기관 시스템과의 성능 차이를 넘어 서는지 등은 향후 모델 개발과 앙상블의 영향에 있어 중요하게 살펴볼 수 있는 부분일 것이다. 전반적인 성능이 아닌 변수와 지역에 따라 앙상블 증가에 따른 민감도는 매우 다르며(Park et al., 2021) 특히 신호대잡음비의 측면에서 신호가 매우 약한 중고위도의 노이즈를 최소화하기 위한 앙상블의 확대는 매우 중요한 부분임을 언급하고자 한다(Hyun et al., 2024). 참고로 Table 1에서 기재된 앙상블 수는 모두 선도센터 홈페이지 기재된 그대로를 표기하였으나, Melbourne의 경우 한 초기 날짜당 3개로 기재되어 있는데, BOM (2022)에서 계절예측의 경우 9개 초기 날짜를 사용하여 총 27개 앙상블 멤버를 사용하고 있음을 확인하였다.

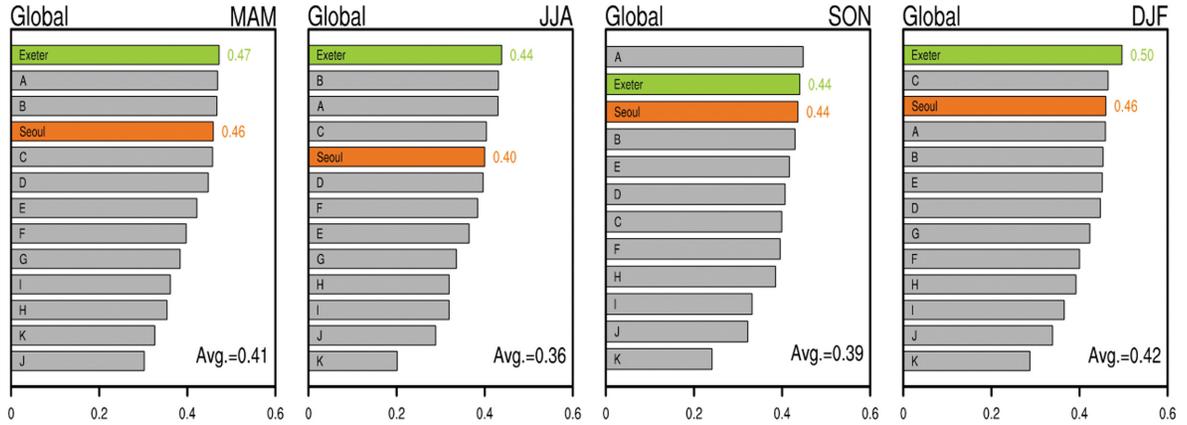
#### 4.2 계절별 ACC

계절별 6개 변수 평균 예측 ACC를 전지구, 동아시아 영역에 대해 세분하여 살펴보았다(Fig. 2). 가장 ACC가 높은 시스템과 같은 시스템 값의 범위는 0.2에서 0.5 사이였지만, 계절 간의 차이는 0.1도 되지 않아 매우 작았다. Figure 1에 비하여 조금씩 순위 변동은 있으나, 전지구와 동아시아 영역에서 GloSea6와 A, B 센터의 ACC 값이 여전히 좋은 상위권의 스킬을 보였다. 동아시아는 전지구 평균과 비슷한 예측 ACC 범위를 가지고 있었는데, 계절 예측에 있어 적도의 예측성이 높고, 극으로 갈수록 떨어지므로(Jung et al., 2015; Hyun et al., 2024; NIMS, 2024) 위치적으로 중간에 위치한 중위도가 전지구 평균 정도의 예측 스킬을 가지는 것을 알 수 있다.

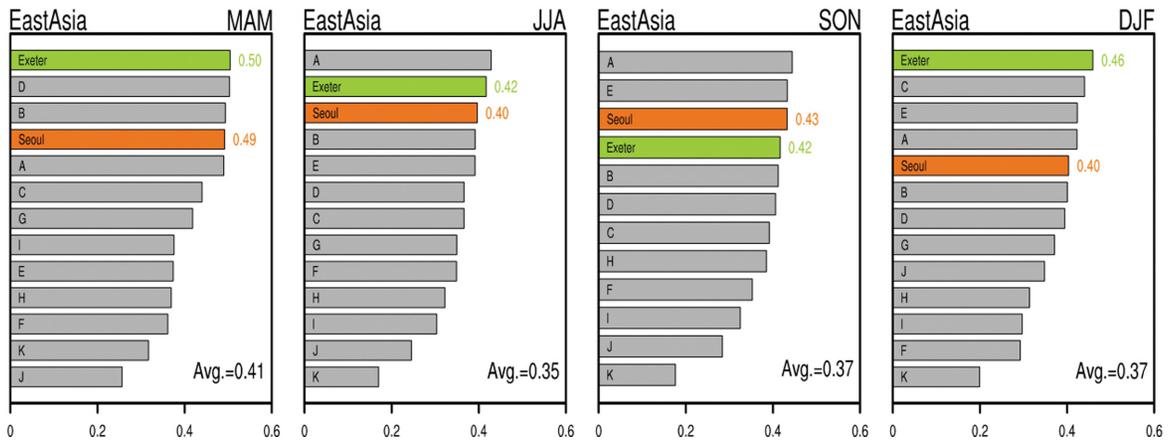
계절 간 차이는 크지는 않지만 전지구와 동아시아에서 봄, 겨울 예측 ACC 값이 더 좋고 여름 ACC 값이 전지구 0.36, 동아시아 0.35로 낮은 경향이 있었다. 상위 30%에 위치한 센터들의 결과만 보아도, 여름이 0.43의 값으로 가장 낮았다(봄/여름/가을/겨울, 0.47/0.43/0.44/0.47). 일반적으로 겨울 예측성이 여름보다 좋은 경향은 잘 알려져 있다(Stan, 2022; Hyun et al., 2024; NIMS, 2024). 육지가 많은 북반구 여름에 대기 불안정이 증가하고 강수가 많아 여름 오차가 커지는 경향이 있는데, Sheshadri et al. (2021)은 중위도에서

## Global

GloSea6 (Seoul)  
GloSea6 (Exeter)



## East Asia



**Fig. 2.** Seasonal prediction skills (ACC) of 13 LC-LRF GPC's averaged by all four seasons and 6 variables for Global (top), East Asia (middle). From the left, MAM, JJA, SON and DJF.

발생하는 난류와 오차의 성장에 대하여 더운 환경에서 에디성장률이 더 커지며, 초기 조건을 잃는 시간이 단축되어 오차의 증가가 가속화 됨을 실험을 통해 보였다. 또한 겨울에는 엘니뇨, 라니냐와 같은 현상이 강한 영향을 미칠 수 있으며, 이러한 기후 변동성이 비교적 잘 예측될 수 있다. 그러나 봄의 경우는 스프링 베리어(spring barrier)라는 현상이 잘 알려져 있는데, 봄의 예측성이 다른 계절보다 어려워 장벽이 있다는 것을 이야기 한다(Webster and Yang, 1992; Webster, 1995; Torrence and Webster, 1998; McPhaden, 2003; Duan and Wei, 2013). 봄에 예측 어려움이 존재한다고 알려진 이유 중 하나는 봄이 ENSO의 과도기적인

시기이라는 점을 이야기한다. 엘니뇨 혹은 라니냐가 겨울에 정점을 찍은 후 전환 과정에서 중립이 되기도, 엘니뇨나 라니냐로 이어지기도 하는 등 해양 온도가 급격히 변하고 대기와 상호작용 등으로 인해 예측이 어렵다는 것이다. 따라서 봄 초기장을 가지고 봄에서 여름까지의 예측을 했을 때, 특히 ENSO 등 적도 태평양 SST의 모의 성능이 많이 감소하는 것을 말한다(<https://www.worldclimateservice.com/2021/05/14/enso-spring-barrier/>). 다른 센터들에서 사용하는 초기장의 날짜를 모두 정확히 확인하기는 힘들지만, GloSea6를 기준으로 본다면 2월 중순에 선도센터로 전송되는 MAM 예측의 경우 1월 말~2월 초 중순 초기장이 사

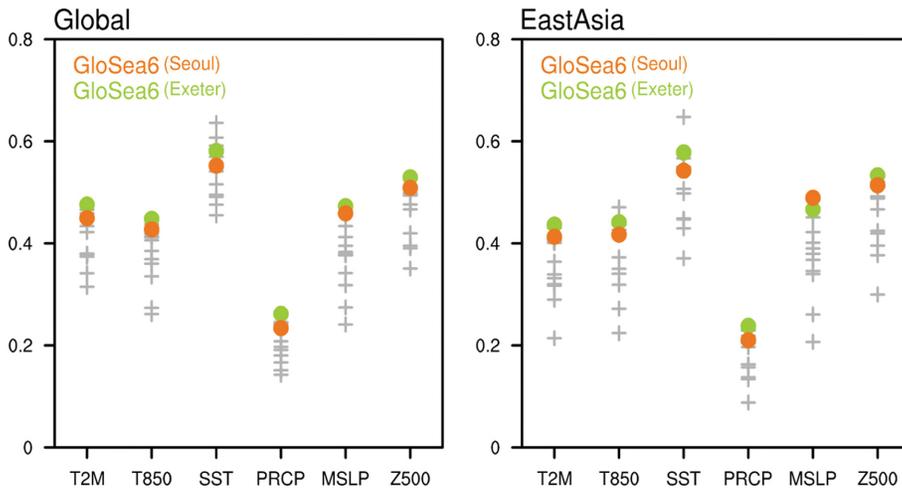
용되고, 5월 전송되는 JJA 예측의 경우는 4월 말~5월 초·중순 초기장이 사용된다. 따라서 봄철 초기장을 사용한 JJA 예측은 낮은 SST 스킬에 영향을 받았을 것으로 생각된다. 실제로 SST만을 따로 살펴보았을 때, 전지구, 동아시아, 유럽 모두에서 JJA의 SST 스킬이 사계절 중 가장 낮은 모습이 더 뚜렷하게 나타났으며, 3월과 4월 초기장을 사용하는 AMJ나 MJJ 예측을 확인하였을 때에도 SST의 스킬이 낮은 스프링 베리어의 특징을 확인할 수 있었다(본문에 제시하지 않음).

Seoul은 Exeter는 동일한 GloSea6이면서 ACC 값에 차이가 있는데 특히, 전지구 여름과 동아시아 겨울의 차이가 컸다(Figs. 1, 2). Hindcast 간 대기/해양 초기장과 초기 날짜, 앙상블 수는 모두 동일하며, 차이는 대기모델의 세부버전과 지면초기장, 오존 강제력 처방과 운영되는 슈퍼컴퓨터 환경이다. 어디에서 이러한 차이가 유래된 것인지를 알아보는 것은 향후 예측 시스템 개발 방향을 잡는데 있어서도 매우 중요하리라 생각된다. Figure 2에서 겨울철 스킬의 경우는 전지구와 동아시아 모두에서 고위도 지역에 위치하여 북극의 영향을 많이 받는 영국 Exeter와 C 센터(캐나다 Montreal)가 높은 것을 주목해 볼 수 있었다. 이에 대해 개선방안을 고찰해보고 이를 7절에서 토의하였다.

#### 4.3 변수별 ACC

Figure 3은 네 계절의 ACC를 평균한 각 변수별 전지구 예측 ACC이다. 계절 간 ACC 값의 범위는 유사하였으나(Fig. 2), 변수별로는 차이가 뚜렷하게 나타났다. SST의 ACC가 0.4-0.7로 모든 변수들 중에서 가장 높았으며 다음으로 Z500, T2M, MSLP, T850, PRCP의 순이다. 전지구 평균임에도 상위 50%의 시스템들에서 SST의 ACC가 0.5을 상회하고, 강수를 제외한 다른 변수들에서도 0.4 이상의 성능을 보이고 있다. 계절 예측의 성능이 유용한 단계에 이르고 있다고 생각된다. 하지만 강수의 경우는 ACC 값이 상대적으로 다른 변수에 비해 낮다. 평가 기법과 대상이 다르긴 하나 기후모델들의 기온 모의 성능이 높고 상대적으로 강수의 성능은 개선의 여지가 많이 남아있다는 점은 기존 결과들에서 잘 알려져 왔다(Bock et al., 2020; Hyun et al., 2020; Lee et al., 2021).

전지구 ACC를 변수별로 따로 보았을 때에도 SST를 제외한 GloSea6의 ACC가 최상위권에 위치하고 있는 것을 알 수 있는데, SST는 GPC들 중에서 B센터가, T2M ACC은 A센터가 가장 좋았으며, 나머지 변수들에서는 모두 GloSea6-Exeter의 성능이 가장 좋았다. GloSea6-Seoul은 MSLP의 성능이, 특히 동아시아



**Fig. 3.** Prediction skills (ACC) of 13 LC-LRF GPC's for each 6 variables (T2M, T850, MSLP, Z500, PRCP and SST) for Global (left) and East Asia (right).

**Table 2.** Averaged prediction skills of top 30% (4 GPCs), top 50% (7 GPCs) and medium (7<sup>th</sup> GPC) for Global.

	T2M	T850	MSLP	Z500	PRCP	SST
Top 30%	0.47	0.44	0.44	0.52	0.25	0.61
Top 50%	0.46	0.42	0.42	0.51	0.24	0.58
Median	0.43	0.41	0.38	0.49	0.21	0.54

**Table 3.** Same as Table 2 but for East Asia.

	T2M	T850	MSLP	Z500	PRCP	SST
Top 30%	0.42	0.45	0.47	0.52	0.23	0.59
Top 50%	0.41	0.43	0.44	0.51	0.22	0.56
Median	0.36	0.42	0.39	0.49	0.20	0.51

영역에서의 스킬이 가장 좋았다. 따로 GloSea6-Seoul의 MSLP 변수를 계절별로 확인하였을 때, 동아시아 여름 MSLP 스킬이 가장 높게 평가되었고, 이것이 전체 Seoul의 MSLP 스킬에 기여하고 있었다(본문에 제시하지 않음).

Table 2와 3에서는 전지구와 동아시아 영역에서 변수별 상위 30%, 상위 50%와 중간 값 ACC를 표시하였다. 향후 시스템을 개선/개발 하는데 있어 기준을 삼는데 참고가 될 수 있으리라고 생각된다.

### 5. 평균제곱근오차(RMSE)

Figure 4에서 변수별 RMSE를 살펴보았다. 기후예측시스템들의 현재 Z500 전지구 RMSE는 15.5에서 19 gpm 사이에 위치하고 있다. 이 값은 3개월 평균된 예측의 RMSE 값으로, 일반적으로 상대적으로 더 고해상도인 단기 수치모델에서 일별로 검증하거나, 기후예측에서 주별, 월별로 검증한 500 hPa gpm의 RMSE 값보다 작은 것을 알 수 있다(Lee et al., 2016; Ham et al., 2017, 2019). 단기 수치모델에서 UM의 전지구 Z500 RMSE 값은 1일에서 12일까지 약 5에서 점차 증가해 100 gpm 사이의 값을 가지고 있으며(Lee et al., 2016), GloSea를 주별 검증하였을 때에는 1~6주까

지 15에서 40 gpm, 월별로 1~6개월에 22에서 30 gpm 사이 값을 보인다. 이는 예측 영역과 기간을 좁고 짧게 잘라 세부적으로 검증하였기 때문에 단기 수치 예보라 하여도 기후 예측 결과보다 RMSE가 더 크다는 것을 보여주고 있으며, 다시 말해 큰 종관규모 파의 이동을 가지고 수치 예보를 하는데 있어 좁은 영역에 짧은 시간 간격을 예측하는 것이 어렵다는 것을 의미한다. 이는 기후 예측 기간에 넓고 긴 기간의 평균적인 예측성을 보는 전략을 취하는 이유를 설명한다.

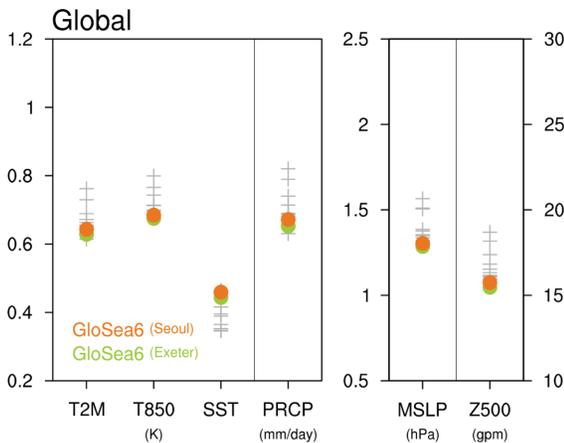
MSLP와 함께 Z500에서는 GloSea6-Exeter와 Seoul의 RMSE가 GPC 중 가장 좋은 낮은 값을 보였으며, 다른 T2M, PRCP, SST 변수에서는 A센터가 가장 낮은 RMSE를 보였다. 이를 계절별로 나누어 보았을 때 그 순위나 경향은 연평균과 큰 차이 없이 유지되는 특징을 보였다(본문에 제시하지 않음).

전반적으로 ACC에서 상위권에 있었던 GPC들이 RMSE도 좋은 경향은 있었으나, 변수별로 ACC 성능이 가장 좋다고 RMSE도 가장 작게 나타나는 직접적인 연관성은 보이지 않았다. 무엇보다 SST를 제외한 기온, 기압, 강수의 RMSE에 있어 GPC들 간의 차이는 매우 작아서 중위권 시스템들의 전지구 평균적인 RMSE는 모두 모여있어 차이가 없다고 봐도 무방할 것으로 해석된다.

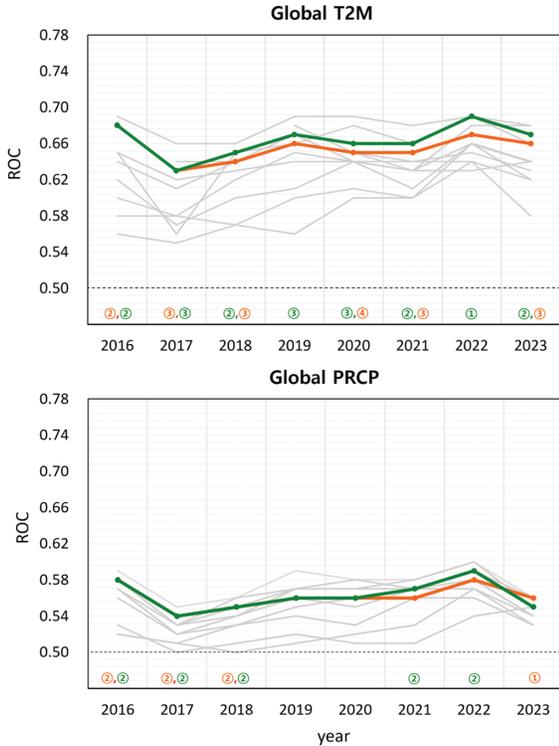
### 6. 확률예측성능 ROC

앞서 Hindcast로 스킬을 검증한 것은 2023년 운영한 시스템으로 과거 기후기간을 모두 재예측하여 긴 기간동안 각기 달랐던 해에 변동성을 얼마나 잘 모의하고 있는지에 성능을 본 것이라면, Forecast의 성능을 본다는 것은, 그동안 각 GPC들이 시스템 개발과 업그레이드를 지속하며 성능이 과거부터 얼마나 개선되어 왔는지에 대한 추세를 볼 수 있다.

Figure 5은 2016년부터 2023년까지 전지구 기온과 강수에 대한 Forecast의 ROC 스코어이다. 따라서 앞의 Hindcast 성과와 연결하여 생각한다면, 그림에서 2023년의 결과가 Hindcast와 동일한 시스템들로 구성된 Forecast 성능을 본 것이며, 이전 해들은 각 센터들에서 시스템을 업그레이드한 시점들에 따라 다른 시스템들로 구성되어 있다. 그림 아래쪽에는 상위 30%인 1~4위까지 GloSea6가 포함된 경우 그 위치를 표



**Fig. 4.** Global RMSE of 13 LC-LRF GPC's for each 6 variables (T2M, T850, MSLP, Z500, PRCP and SST).



**Fig. 5.** ROC score of 13 LC-LRF GPC's for T2M (upper) and PRCP (bottom) forecast from 2016 to 2023 (Orange: GloSea6-Seoul, Green: GloSea6-Exeter, Gray: Other centres).

시하였다.

과거에 비해 최근으로 올수록 전체적으로 GPC들의 기온 ROC가 좋아지는 경향을 확인할 수 있는데, 상위 GPC들의 예측성 개선보다는 하위권 GPC들의 개선도가 더 크고 이에 따라 전체적인 앙상블의 스프레드는 줄어드는 모습이다. 과거부터 꾸준히 GloSea6가 좋은 성능을 보이고 있고, SST의 스킬이 좋았던 B센터가 T2M의 ROC로는 가장 좋은 성능을 보였다.

강수의 경우 기온에 비해 ROC 스코어는 낮고 GPC 간 격차는 작았으나, 여전히 기온 성능이 좋았던 GPC들이 강수 성능도 좋았다. 2023년은 GloSea6-Seoul의 강수 예측성이 가장 좋았으며, 이 해는 전체적으로 강수 예측이 과거에 비해 어려워 스코어가 급격히 떨어진 해이기도 했다. ROC 값이 0.9 이상 / 0.8~0.9 / 0.7~0.8를 Excellent / Very good / good으로, 0.6~0.7 / 0.5~0.6을 sufficient / bad로 판단하므로, 전체적으로 기온 계절예측은 상위권 시스템들이 'sufficient' 수준에 들고 있으나 아직 0.7의 'good'으로는 가지 못하고 있고, 강수는 모든 센터들이 아직 0.6 미만의 'bad'에 머무르고 있다.

따로 그림을 보이지는 않았지만, 동아시아로 영역을 좁혀서 ROC를 살펴보면, 전지구와는 다르게 성능이 좋은 GPC가 일관되게 나타나는 경향이 적고, 각 해마다의 특징과 각 해 운영되던 시스템들마다의 지역별 성능으로 인해 스코어의 변동이 매우 크게 나타났다.

## 7. 요약 및 토의

기후변화의 가속화로 인한 이상기후 발생에 따라 기후위기 대응의 필요성이 시급해지고 기후재난에 대비하기 위한 기후예측 정보에 대한 사회적 수요는 계속 증가하고 있다. 기후예측시스템은 이제 필수적인 시스템이 되었으며 예측성 확보를 위한 노력은 매우 중요한 이슈가 되었다. 매일 매일의 날씨와 달리 긴 시간 규모의 기후는 MJO(매든-줄리안 진동), ENSO(남방진동), IOD(인도양 쌍극자 모드), QBO(성층권 준2년 주기 진동), AO(북극진동), NAO(대서양진동) 등과 같은 기후시스템의 변동성과 천천히 변하고 긴 메모리를 가지는 해양-해빙, 토양, 적설 등의 과정을 예측 원천으로 삼고 있으며, 따라서 기후예측시스템의 성능 향상을 위해 이들 기후 변동성 및 기후 과정들과 원격 상관에 초점을 맞추어 연구들이 수행 되어왔다. 그러나 각 모델링 센터들마다 그 지역 예측성에 영향을 미치는 기후 과정이 다를 것이고, 시스템을 개선한다고 모든 분야, 모든 변수들이 한꺼번에 좋아질 수 없기 때문에 각자 중요하게 생각하는 우선 분야에 집중하게 된다. 따라서 예측시스템들마다 이점이 다를 것이고, 시스템을 사용하는 사용자의 입장에서든 어떠한 분야 혹은 지역에 관심을 두느냐에 따라 예측성이 좋은 시스템이라는 기준은 다르게 정의될 수 있을 것이다.

이 연구에서는 많은 개별 기후 메커니즘에 대한 성능보다는 현업 운영의 관점에서 기온, 강수, 기압 등 예측변수 자체의 모의 성능을 전반적으로 살펴보고 전 세계적으로 운영되고 있는 기후예측시스템들의 객관적인 성능을 조사하고자 하였다.

WMO 장기예보 선도센터에서 표출되는 6개 검증 변수들을 기준으로 Hindcast 기간을 공통으로 맞추고, 전지구와 동아시아 영역에 대하여 스킬을 분석한 결과 ACC 예측성에 있어서 종합적으로 동아시아 ACC는 전지구 ACC와 유사한 성능을 보이고 있었으며, 계절적인 차이는 크지 않았지만, 변수 간의 ACC 차이는 크게 나타났다. 변수별로는 SST의 계절예측 스킬이 가장 좋았으며, RMSE 또한 가장 낮았다. 기온과 기압 변수들에서 모두 0.5 전후의 ACC 값으로 실용적인 수준의 예측성능을 보였다. 기관별 예측시스템의 ACC는 차이가 있었으나 상위 시스템들 간의 차이는 작았으며, 기후예측에 있어 시스템들 간의 RMSE

오차는 ACC 보다도 훨씬 더 작게 나타났다. ROC를 보면 연간 변동성은 있으나, 전세계 기관들의 예측성이 지속적으로 개선되면서, 예측성의 차이가 좁혀지는 경향을 볼 수 있었다.

전지구와 동아시아 영역에서 검증에 사용된 6개 변수를 종합적으로 보았을 때, GloSea6-Exeter의 스킬이 가장 우수하였다. 단기에보부터 연장중기 기간까지 A 센터의 성능이 보편적으로 뛰어난 것은 잘 알려져 있지만, 계절예측에 있어서는 단중기와는 다른 전략으로 기후예측의 원천을 고려하고 불확실성을 줄일 수 있어야 함을 보이며, 이와 동시에 기후예측의 어려움과 또 그만큼 향후 노력이 필요한 분야임을 시사한다. 여전히 도전적인 분야인 계절예측에서 GPC들 간의 예측 스킬과 RMSE 차이는 매우 작았다.

결합 모델이 아닌 대기 모델을 사용하는 GPC의 경우는 계절예측에 있어 대기 모델을 사용하는 한계가 있음을 확인할 수 있었으며, 구축 시기를 보았을 때, 상대적으로 개발 후 오랜 기간이 지난 시스템이 하위권 성능을 차지하고 있어, 모델 개발에 있어 꾸준하고 지속적인 성능 개선 노력과 업그레이드가 중요함을 시사하였다.

마지막으로 GloSea6-Seoul과 Exeter는 동일한 GloSea6를 운영하지만, 스킬의 차이가 있었다. 이들 Hindcast 간 대기/해양 초기장과 초기 날짜, 앙상블 수는 모두 동일하며, 대기모델의 세부버전과 슈퍼컴퓨터에서의 운영 환경을 제외한다면, 지면초기장과 처방되는 오존 강제력의 차이가 있다. 어디에서 이러한 차이가 유래된 것인지 알아보는 것은 향후 예측시스템 개발 방향을 잡는데 있어서도 중요하리라 생각되며, 차이의 원인에 대해 논의해보고자 한다.

### 7.1 GloSea6-Seoul과 Exeter의 NAO 성능

Seoul과 Exeter의 ACC 값 차이가 동아시아 겨울에 커지는 것이(Fig. 2) 극지 예측성에 기인한 것인지를 살펴보기 위해, 두 시스템의 북대서양 진동 NAO 예측성을 비교하여 살펴보았다. NAO는 북대서양 고위도 지역인 아이슬란드(Iceland) 저기압과 북대서양 중간 아조레스(Azores) 고기압 간의 기압 차로 정의된다. NAO는 북대서양에 초점을 맞추고 있는 지수이지만 이 역시 북극 지역과 중위도 사이의 기압 차이로 정의되는 값이기 때문에 AO와 마찬가지로 양의 값일 때 북극 주변의 저기압이 강해지고, 중위도 고기압 간의 기압 차이가 커지면서 북대서양을 가로지르는 따뜻한 습한 서풍이 북유럽의 따뜻한 겨울을 맞이 하게 한다.

Figure 6은 Seoul과 Exeter의 2023년 생산된 Hindcast의 NAO 스킬이다. 11월 1, 9, 17, 25일 초기날짜에 매 7개씩 총 28개 앙상블을 가지고 DJF를 예측한 ACC 값이 Seoul의 경우 0.31, Exeter의 경우 0.56으로 차이가 있었다.

Seoul은 토양수분만을 초기화하고 있으며, Exeter의 경우는 토양수분과 함께 토양온도와 눈을 초기화하여 초기장에 반영하고 있다(Davis et al., 2018). 영국은 앞서 언급한 바와 같이 겨울 예측에 있어 북극 지역에 직접인 영향을 받고 있어 이에 민감할 수 있는 토양수분과 함께 토양온도와 눈을 우선적으로 초기화하였다. 이 차이가 2010년과 같이 NAO가 기록적으로 작은 음의 값으로 떨어졌을 때의 ACC 값 차이를 벌린 것으로 판단 된다.

또 하나의 차이는 오존강제력의 차이이다. 성층권 오존은 자외선의 흡수와 성층권 온도에 직접적으로

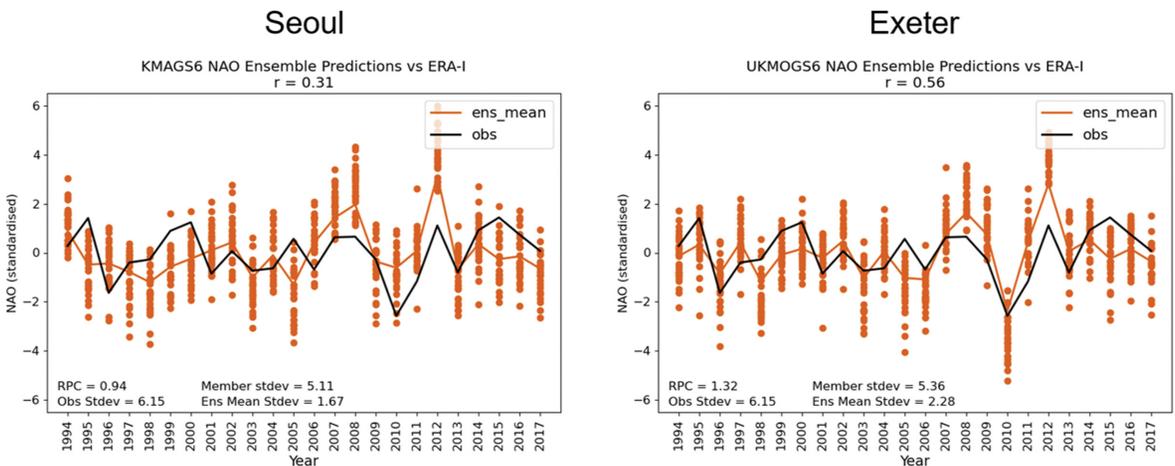
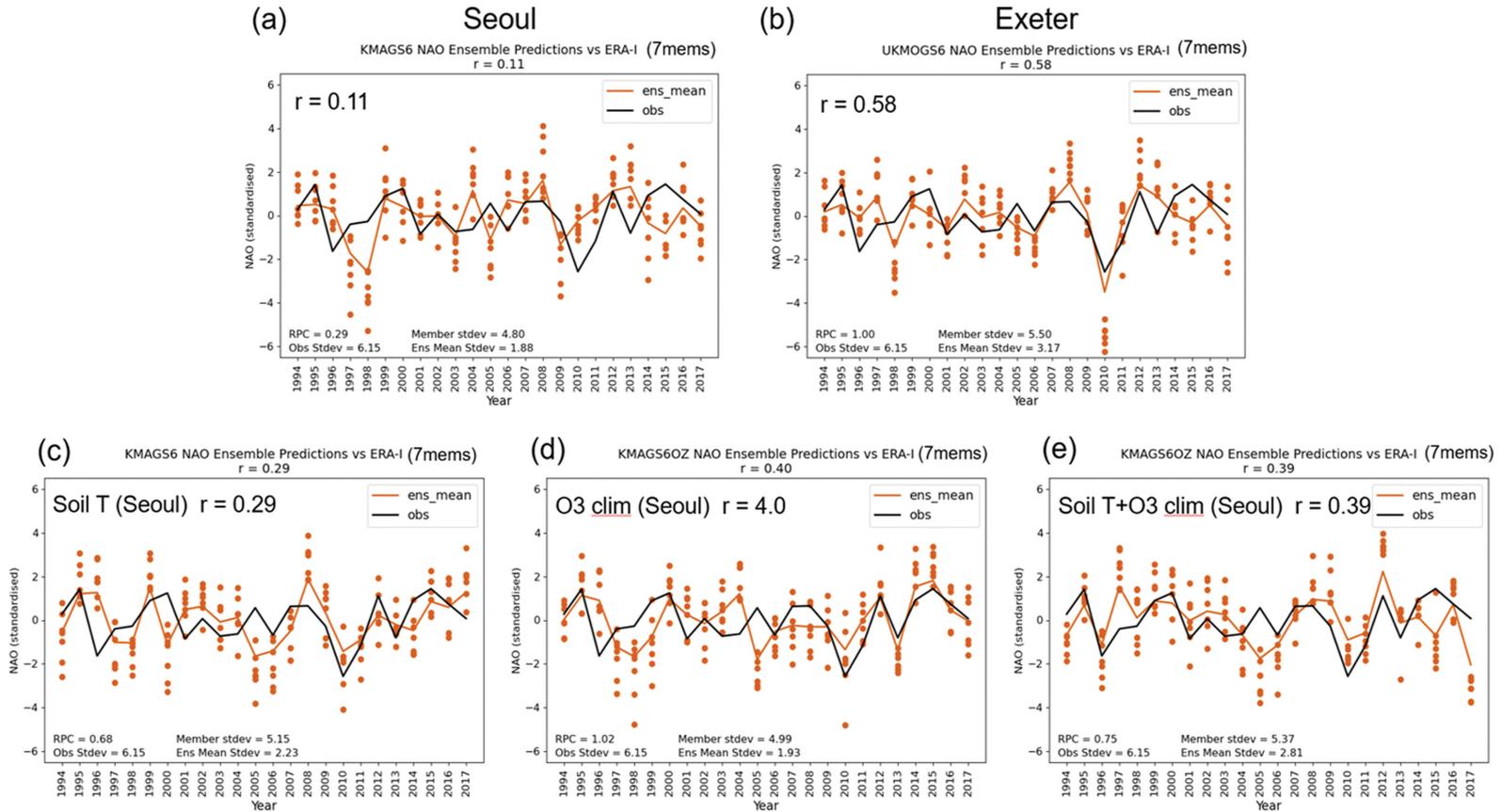


Fig. 6. NAO prediction skill for Seoul (left) and Exeter (right) for DJF. A total of 28 ensemble members for each year, with initial dates of November 1st, 9th, 17th, and 25th.



**Fig. 7.** Increasing NAO prediction skill depending on land initialization and ozone forcing for DJF. (a) and (b) are same as Fig. 6 except for using 7 ensemble members with initial dates of November 1<sup>st</sup>. (c) Seoul with soil temperature initialization, (d) using ozone forcing as climatology and (e) with soil temperature initialization and ozone climatology forcing.

연관되어, 겨울철 극소용돌이에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. GloSea6 이전 버전인 GloSea5에서는 AC&C/SPARC (Atmospheric Chemistry and Climate / Stratospheric Processes and their Role in Climate) 오존 자료의 1994-2005년 기후값을 월주기로 사용하다가, GloSea6부터는 연간 변동성을 고려하기 위하여 CMIP6 Historical과 RCP4.5에 처방된 오존 값을 사용하였다. 그러나 영국기상청은 테스트 결과 CMIP6 오존 강제력이 NAO 예측성을 저하시킨다는 판단 하에 다시 이전의 기후값으로 되돌렸다.

따라서 GloSea6-Seoul에서 지면 초기장과 오존 강제력 처방에 따른 테스트를 수행하여 NAO 성능 차이를 확인해 보고자 하였다.

### 7.2 토양온도 초기화와 오존 강제력 처방 실험

과학원에서는 현재 토양온도 초기화를 준비하여 현업화 예정에 있으며, 토양수분에 토양온도까지 초기화한 실험과 오존 강제력을 기후값으로 변경한 Hindcast 11월 1일 7개 앙상블을 생산하였다(Fig. 7).

Figure 7a와 b는 Fig. 6와 동일하게 Seoul과 Exeter 현업 결과로, 테스트 실험과 맞추어 같은 일자의 7개 앙상블 만을 사용한 결과이다. Figure 7c는 Seoul의 토양온도까지 초기화 한 결과, d 오존 강제력만을 기후값으로 변경한 결과이며, e는 토양온도 초기화와 오존 강제력 기후값을 모두 적용한 결과이다.

따라서 Fig. 6의 Seoul 결과와 Fig. 7a의 Seoul 결과는 앙상블 수가 28개(초기 날짜 1, 9, 17, 25일)와 7개(초기 날짜 1일) 일 때 NAO 예측 스킬 차이이며, Fig. 7a와 c를 비교하였을 때, 앙상블 수가 작음에도 불구하고 토양온도 초기화만으로 NAO 스킬이 0.18 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 7a와 d와 비교하였을 때 오존 강제력 처방의 변경으로 스킬을 약 0.3이나 증가시켜 오존 강제력의 영향이 극지역에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. Figure 7e에서 둘 모두를 적용시켰을 때 최종 0.39의 상관을 보이며 개선되었다. 토양온도 초기화와 오존 강제력에 변경을 준 것 모두 상관을 개선하였으나, 이 두 가지를 함께 반영한다고 더 좋은 결과를 보장하는 것은 아니었으며, R2O (Research to Operation)가 원활이 이루어지기 위해서는 이러한 개발사항들이 현업과 같은 환경에서, 사전에 각각 그리고 병합 테스트되어 평가될 수 있는 테스트베드 역할이 체계적으로 운영되는 것이 중요할 것이다.

유럽은 적도 해양에서 예측성을 직접적으로 확보하지 못하는 지역 특성상 상대적으로 예측 스킬이 낮지만(Hyun et al., 2024), 겨울철 스킬은 극지역에 영향을 지배적으로 받고 있어, 북반구에 고위도에 위치한 영국과 C 센터인 캐나다의 경우는 겨울 예측 스킬 확

보를 위해 극에 관련된 예측성 향상에 많은 노력을 집중하고 있다. 따로 유럽 지역의 겨울 ACC 검증 값을 보았을 때에도 영국 Exeter와 캐나다 Montreal이 가장 좋은 성능을 보였으며, 실제로 영국기상청에서는 NAO의 영향과 적도 ENSO 변동성이 로스비파나 성층권을 매개로 고위도로 전해지는 원격상관 예측성 향상에 초점을 맞추어 많은 연구 논문들이 발간되고 있다(Folland et al., 2012; Scaife et al., 2014, 2016; Athanasiadis et al., 2017; Singh et al., 2018; Lockwood et al., 2022; Hodson et al., 2023). 또한 전 지구와 동아시아 겨울도 이 두 곳의 예측성이 가장 좋을 때 극지역 순환과 변동의 영향은 24년간의 Hindcast 기후기간에서도 유의미하게 전지구 뿐만 아니라 중위도 예측성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

선행연구들에서는 눈은 지면과 대기 사이의 물, 에너지, 탄소 교환과 대규모 순환에 영향을 미칠 수 있으며, 성층권 극 소용돌이와 제트 기류의 변동을 통해 AO에 영향을 미치게 됨을 지적하고 있으며, 현실적인 눈 초기상태의 반영은 기후예측시스템의 예측성 향상에 밀접한 관련이 있음을 지적하고 있다(Lee et al., 2023). 향후 기후예측시스템 개선에서는 눈 초기화를 추가로 적용하여 NAO 및 극지 예측성에 얼마나 더 추가적인 스킬의 개선이 있을지 살펴 볼 계획이며, 겨울 극지역의 좋은 예측성 확보가 고위도 뿐만 아니라 전지구적인 예측성에서 영향을 미치는지도 함께 상세히 살펴볼 것이다. 그리고 이러한 극진동의 영향은 상층 제트의 변동과 관계되어 있으므로 겨울뿐만 아니라 Fig. 2에서 나타났던 다른 계절의 성능 차이에도 어떠한 영향을 미쳤는지 살펴 볼 수 있을 것이다.

또한 오존 강제력을 기후값으로 처방하는 것에 대해서는 극 지역뿐만 아니라 중위도 예측성에 어떤 영향이 있는지를 면밀히 살펴보고 현업 변경이 필요할 것으로 생각된다. Oh et al. (2022)는 GloSea5에서 오존 기후값 강제력을 일 변동값으로 처방하여 개선된 결과를 얻은 바 있다. 향후 좀 더 개선된 오존을 처방할 수 있는 방법을 고려하고, 전지구적인 예측성에 미치는 영향을 살펴볼 수 있을 것이다.

### 7.3 GloSea6-Seoul과 Exeter의 해면기압 성능

앞서 Fig. 3에서 변수별 ACC를 살펴보았을 때, MSLP의 경우는 GloSea6-Seoul의 스킬이 가장 좋았다. 또한 Fig. 4에서는 전지구에 대해서만 RMSE를 보였지만, 따로 동아시아 RMSE를 보았을 때에도 Seoul이 가장 좋은 특징이 있었다. 따라서 모든 계절에 대해 Seoul과 Exeter의 MSLP ACC 공간장 차이를 비교해 보았다(Fig. 8). Figure 8은 각 계절에 MSLP ACC의 Seoul과 Exeter 절대값 차이로, 차이가 Seoul이 더 좋

## MSLP

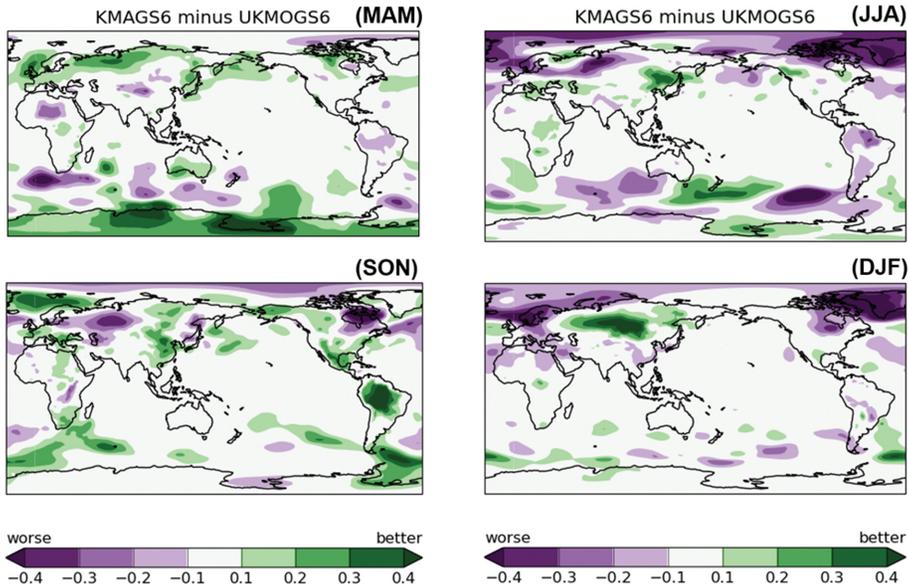


Fig. 8. Difference of MSLP anomaly correlation between GloSea6-Seoul and Exeter during four seasons.

은 큰 값일 때 초록색으로 개선도를 나타낸 것이다. 동아시아 MSLP 성능이 좋았던 것은 대체로 유라시아 내륙의 ACC 스킬이 좋았던 이유임을 알 수 있다. 앞서 논의한 Seoul과 Exeter의 겨울철 북극 지역에서의 스킬 차이가 MSLP 공간장에서도 나타났으며, 여름철도 유사하였다. 그러나 봄과 가을에는 Seoul의 스킬이 대부분의 영역에서 더 좋았으며, 겨울에도 시베리아 내륙에서는 ACC 스킬이 0.4 이상 더 좋음을 확인할 수 있었다. 또한 같은 극 지역이지만 봄철 남극에서는 Seoul의 스킬이 좋았다. 이러한 점은 강제력이나 초기화 등의 차이가 지역과 계절에 따라 유리함과 불리함이 다르게 작용할 수 있음을 보여준다. 앞서 보았던 지면 초기화의 차이가 시베리아 내륙에서의 좋은 MSLP 스킬에 기여했는지, 그리고 지면 초기화와 오존 강제력의 차이가 지역과 계절별로 예측성에 어떻게 기여하였는지 향후 상세히 살펴볼 예정이다.

이 연구를 통해 기상청과 세계적으로 운영되는 기후예측시스템들의 성능 현황을 파악할 수 있었으며, 최종적으로는 향후 시스템 개선/개발 방향 설정의 기준 자료로 활용할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기후예측 현업 시스템 개발」(KMA2018-00322)과 「아태 기후정보

서비스 및 연구개발 사업」(KMA2013-07510)의 지원으로 수행되었습니다.

### REFERENCES

- Athanasiadis, P. J., A. Bellucci, A. A. Scaife, L. Hermanson, S. Materia, A. Sanna, A. Borrelli, C. MacLachlan, and S. Gualdi, 2017: A multisystem view of wintertime NAO seasonal predictions. *J. Climate*, **30**, 1461-1475, doi:10.1175/JCLI-D-16-0153.1.
- Bock, L., A. Lauer, M. Schlund, M. Barreiro, N. Bellouin, C. Jones, G. A. Meehl, V. Predoi, M. J. Roberts, and V. Eyring, 2020: Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool. *JGR Atmospheres*, **125**, e2019JD032321, doi:10.1029/2019JD032321.
- Bureau of Meteorology, 2022: Seasonal Prediction ACCESS-S2 Hindcast (1981~2018). *NCI Australia.*, doi:10.25914/60627ad0ba3ee.
- Chang, P.-H., S.-O. Hwang, S.-H. Choo, J. Lee, S.-M. Lee, and K.-O. Boo, 2021: Global ocean data assimilation and prediction system in KMA: Description and assessment. *Atmosphere*, **31**, 229-240, doi:10.14191/Atmos.2021.31.2.229 (in Korean with English abstract).
- Choo, S.-H., P.-H. Chang, S.-O. Hwang, H.-J. Jo, J. Lee, S.-M. Lee, Y.-K. Hyun, and J.-H. Moon, 2021: Assessment of assimilation impact of Argo float

- observations in marginal seas around Korean Peninsula through observing system experiments. *Atmosphere*, **31**, 283-294, doi:10.14191/Atmos.2021.31.3.283 (in Korean with English abstract).
- Davis, P., R. Comer, D. Fereday, J. Knight, S. Kobayashi, C. MacLachlan, A. Scaife, 2018: An improved approach for land-surface initialization in the Met Office's seasonal forecasting system (GloSea). *Int. Conf. Subseasonal to Decadal Prediction*, 17-21 Sep., NCAR, Boulder CO, USA, [Available online at [https://www.wcrp-climate.org/images/WCRP\\_conferences/S2S\\_S2D\\_2018/pdf/Programme/orals/presentations/A5-03\\_PhilipDavis.pdf](https://www.wcrp-climate.org/images/WCRP_conferences/S2S_S2D_2018/pdf/Programme/orals/presentations/A5-03_PhilipDavis.pdf)].
- Duan, W., and C. Wei, 2013: The 'spring predictability barrier' for ENSO predictions and its possible mechanism: results from a fully coupled model. *Int. J. Climatol.*, **33**, 1280-1292, doi:10.1002/joc.3513.
- Folland, C. K., A. A. Scaife, J. Lindesay, and D. B. Stephenson, 2012: How potentially predictable is northern European winter climate a season ahead? *Int. J. Climatol.*, **32**, 801-818, doi:10.1002/joc.2314.
- Graham, R. J., and coauthors, 2000: An assessment of seasonal predictability using atmospheric general circulation models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2211-2240, doi:10.1002/qj.49712656712.
- \_\_\_\_\_, M. Gordon, P. J. McLean, S. Ineson, M. R. Huddleston, M. K. Davey, A. Brookshaw, and R. T. H. Barnes, 2005: A performance comparison of coupled uncoupled versions of the Met Office seasonal prediction general circulation model. *Tellus A: Dyn. Meteor. Oceanogr.*, **57**, 320-339, doi:10.3402/tellusa.v57i3.14666.
- Ham, H., D. Won, and Y.-S. Lee, 2017: Performance assessment of weekly ensemble prediction data at seasonal forecast system with high resolution. *Atmosphere*, **27**, 261-276, doi:10.14191/Atmos.2017.27.3.261 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, S.-M. Lee, Y.-K. Hyun, and Y. Kim, 2019: Performance assessment of monthly ensemble prediction data based on improvement of climate prediction system at KMA. *Atmosphere*, **29**, 149-164, doi:10.14191/Atmos.2019.29.2.149 (in Korean with English abstract).
- Ham, Y.-G., J.-G. Kim, J.-G. Lee, T. Li, M.-I. Lee, S.-W. Son, and Y.-K. Hyun, 2021: The origin of systematic forecast errors of extreme 2020 East Asian summer monsoon rainfall in GloSea5. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, doi:10.1029/2021GL094179.
- Heo, S.-I., Y.-K. Hyun, Y. Ryu, H.-S. Kang, Y.-J. Lim, and Y. Kim, 2019: An assessment of applicability of heat waves using extreme forecast index in KMA climate prediction system (GloSea5). *Atmosphere*, **29**, 257-267, doi:10.14191/Atmos.2019.29.3.257 (in Korean with English abstract).
- Hodson, D. L., R. T. Sutton, and A. A. Scaife, 2023: Signal-to-noise and predictable modes of variability in winter seasonal forecasts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **149**, 2598-2616, doi:10.1002/qj.4522.
- Hong, D.-C., H.-S. Park, S.-W. Son, J. Kim, J. Lee, and Y.-K. Hyun, 2023: Downward influences of Sudden Stratospheric Warming (SSW) in GloSea6: 2018 SSW case study. *Atmosphere*, **33**, 493-503, doi:10.14191/Atmos.2023.33.5.493 (in Korean with English abstract).
- Hyun, S.-H., S.-O. Hwang, S.-M. Lee, and S.-H. Choo, 2022: Verification of the KMA ocean model NEMO against Argo floats and drift buoys: a comparison with the up-to-date US Navy HYCOM. *Atmosphere*, **32**, 71-84, doi:10.14191/Atmos.2022.32.1.071 (in Korean with English abstract).
- Hyun, Y.-K., J. Park, J. Lee, S. Lim, S.-I. Heo, H. Ham, S.-M. Lee, H.-S. Ji, and Y. Kim, 2020: Reliability assessment of temperature and precipitation seasonal probability in current climate prediction systems. *Atmosphere*, **30**, 141-154, doi:10.14191/Atmos.2020.30.2.141 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2022: The KMA Global Seasonal forecasting system (GloSea6) – Part 2: Climatological mean bias characteristics. *Atmosphere*, **32**, 87-101, doi:10.14191/Atmos.2022.32.2.087 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, Y.-H. Park, J. Lee, H.-S. Ji, and K.-O. Boo, 2024: Characteristics of Signal-to-Noise paradox and limits of potential predictive skill in the KMA's Climate Prediction System (GloSea) through ensemble expansion. *Atmosphere*, **34**, 55-67, doi:10.14191/Atmos.2024.34.1.055 (in Korean with English abstract).
- Ineson, S., and M. K. Davey, 1997: Interannual climate simulation and predictability in a coupled TOGA GCM. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 721-741, doi:10.1175/1520-0493(1997)125<0721:ICSAPI>2.0.CO;2.
- Ji, H.-S., S.-O. Hwang, J. Lee, Y.-K. Hyun, Y. Ryu, and K.-O. Boo, 2022: Assimilation of satellite-based soil moisture (SMAP) in KMA GloSea6: The results of the first preliminary experiment. *Atmosphere*, **32**, 395-409, doi:10.14191/Atmos.2022.32.4.395 (in Korean with English abstract).
- Jung, M.-I., S.-W. Son, J. Choi, and H.-S. Kang, 2015: Assessment of 6-month lead prediction skill of the GloSea5 hindcast experiment. *Atmosphere*, **25**, 323-

- 337, doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.323 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, Y. Lim, K. Song, D. Won, and H.-S. Kang, 2016: Assessment of stratospheric prediction skill of the GloSea5 hindcast experiment. *Atmosphere*, **26**, 203-214, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.203 (in Korean with English abstract).
- Kang, D., M.-I. Lee, J. Im, D. Kim, H.-M. Kim, H.-S. Kang, S. D. Schubert, A. Arribas, and C. MacLachlan, 2014: Prediction of the Arctic Oscillation in boreal winter by dynamical seasonal forecasting systems. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 3577-3585, doi:10.1002/2014GL060011.
- Kim, D.-K., Y.-H. Kim, and C. Yoo, 2019: Predictability of Northern Hemisphere teleconnection patterns in GloSea5 hindcast experiments up to 6 Weeks. *Atmosphere*, **29**, 295-309, doi:10.14191/Atmos.2019.29.3.295 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., M.-I. Lee, D. Kim, H.-S. Kang, and Y.-K. Hyun, 2018: Representation of boreal winter MJO and its teleconnection in a dynamical ensemble seasonal prediction system. *J. Climate*, **31**, 8803-8818, doi:10.1175/JCLI-D-18-0039.1.
- \_\_\_\_\_, M. A. Janiga, and K. Pegion, 2019: MJO propagation processes and mean biases in the SubX and S2S reforecasts. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 9314-9331, doi:10.1029/2019JD031139.
- \_\_\_\_\_, 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**, 341-359, doi:10.14191/Atmos.2021.31.3.341 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-Y., Y.-K. Hyun, J. Lee, and B.-C. Shin, 2021: Assessment on the East Asian summer monsoon simulation by improved Global Coupled (GC) model. *Atmosphere*, **31**, 563-476, doi:10.14191/Atmos. 2021.31.5.563 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.-W., H. Kim, K. Song, S.-W. Son, Y. Lim, H.-S. Kang, and Y.-K. Hyun, 2018: Subseasonal-to-Seasonal (S2S) prediction skills of GloSea5 model: Part 1. Geopotential height in the northern hemisphere extratropics. *Atmosphere*, **28**, 233-245, doi:10.14191/Atmos.2018.28.3.233 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, 2019: *Optimal ensemble size for Sub-seasonal to Seasonal (S2S) prediction system*. M. S. thesis, Dept. of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 41 pp.
- Kim, T., E. Kim, M. Lee, D.-H. Cha, S.-M. Lee, J. Lee, and K.-O. Boo, 2023: Characteristics of tropical cyclones over the western North Pacific related to extreme ENSO and a climate regime shift in sub-seasonal forecasting with GloSea5. *Climate Dyn.*, **61**, 2637-2653, doi:10.1007/s00382-023-06705-x.
- KMA, 2015: *Long-range Forecast Work Manual*. Korea Meteorological Administration, 110 pp [Available online at <http://book.kma.go.kr>] (in Korean).
- \_\_\_\_\_, 2017: *2016 Year Book*. Korea Meteorological Administration, 612 pp [Available online at <http://book.kma.go.kr>] (in Korean).
- \_\_\_\_\_, 2019: *2018 Year Book*. Korea Meteorological Administration, 431 pp [Available online at <http://book.kma.go.kr>] (in Korean).
- \_\_\_\_\_, 2021: *2020 Year Book*. Korea Meteorological Administration, 322 pp [Available online at <http://book.kma.go.kr>] (in Korean).
- \_\_\_\_\_, 2023: *2022 Year Book*. Korea Meteorological Administration, 413 pp [Available online at <http://book.kma.go.kr>] (in Korean).
- \_\_\_\_\_, 2024: *2023 Year Book*. Korea Meteorological Administration, 400 pp [Available online at <http://book.kma.go.kr>] (in Korean).
- Lee, J.-H., H. M. Sung, J. Kim, S. Shim, J.-C. Ha, Y.-H. Byun, and Y.-H. Kim, 2021: Assessment of model performance in East Asia based on the CMIP6 multi-model ensemble. *J. Climate Change Res.*, **12**, 461-478, doi:10.15531/KSCCR.2021.12.5.461 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., M.-I. Lee, S. Tak, E. Seo, and Y.-K. Lee, 2023: Assimilation of snow water equivalent from AMSR2 and IMS satellite data utilizing the local ensemble transform Kalman filter. *Geosci. Model Dev.*, doi: 10.5194/gmd-2023-221 (preprint / in press).
- Lee, M.-I., H.-S. Kang, D. Kim, D. Kim, H. Kim, and D. Kang, 2014: Validation of the experimental hindcasts produced by the GloSea4 seasonal prediction system. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 307-326, doi:10.1007/s13143-014-0019-4.
- Lee, S.-J., Y.-K. Hyun, S.-M. Lee, S.-O. Hwang, J. Lee, and K.-O. Boo, 2020: Prediction skill of East Asian summer monsoon indices in KMA Global Seasonal Forecasting System (GloSea5). *Atmosphere*, **30**, 293-309, doi:10.14191/Atmos.2020.30.3.293 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-M., H.-S. Kang, Y.-H. Kim, Y.-H. Byun, and C. Cho, 2016: Verification and comparison of forecast skill between global seasonal forecasting system version 5 and unified model during 2014. *Atmosphere*, **26**, 59-72, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.059 (in

- Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, J. Lee, A.-R. Ko, Y.-K. Hyun, and Y. Kim, 2020: Seasonal forecasting of tropical storms using GloSea5 hindcast. *Atmosphere*, **30**, 209-220, doi:10.14191/Atmos.2020.30.3.209 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, Y.-K. Hyun, B. Shin, H. Ji, J. Lee, S.-O. Hwang, and K.-O. Boo, 2024: The seasonal forecast characteristics of tropical cyclones from the KMA's Global Seasonal Forecasting System (GloSea6-GC3.2). *Atmosphere*, **34**, 97-106. doi:10.14191/Atmos.2024.34.2.097 (in Korean with English abstract).
- Lim, S.-M., Y.-K. Hyun, H.-S. Kang, and S.-W. Yeh, 2018: Prediction skill of East Asian precipitation and temperature associated with El Nino in GloSea5 hindcast data. *Atmosphere*, **28**, 37-51, doi:10.14191/Atmos.2018.28.1.037 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, Y.-K. Hyun, H. Ji, and J. Lee, 2021: Application of land initialization and its impact in KMA's operational climate prediction system. *Atmosphere*, **31**, 327-340, doi:10.14191/Atmos.2021.31.3.327 (in Korean with English abstract).
- Lockwood, J. F., and Coauthors, 2022: Predictability of European winter 2020/2021: Influence of a mid-winter sudden stratospheric warming. *Atmos. Sci. Lett.*, **23**, e1126, doi:10.1002/asl.1126.
- MacLachlan, C., and Coauthors, 2015: Description of GloSea5: The Met Office high resolution seasonal forecast system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 1072-1084, doi:10.1002/qj.2396.
- McPhaden, M. J., 2003: Tropical pacific ocean heat content variations and ENSO persistence barriers. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1480, doi:10.1029/2003GL016872.
- Moon, J.-Y., K.-Y. Kim, J.-A. Cho, Y.-M. Yang, Y.-K. Hyun, and B.-J. Kim, 2022: Assessment of MJO simulation with Global Coupled (GC) model 2 and 3.1. *Atmosphere*, **32**, 235-246, doi:10.14191/Atmos.2022.32.3.235 (in Korean with English abstract).
- Murray, R., 1970: Recent developments in long-range forecasting in the Meteorological Office. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **96**, 329-336, doi:10.1002/qj.49709640817.
- NIMS, 2024: *Evaluation of the 2023 Forecasts Performance of the Operational Climate Prediction System (GloSea6)*. National Institute of Meteorological Sciences, 71 pp [Available online at <http://book.kma.go.kr>] (in Korean).
- Oh, J., S.-W. Son, and S.-Y. Back, 2022: Influence of UTLS Ozone on the QBO-MJO connection: A case study using the GloSea5 model. *Atmosphere*, **32**, 223-233, doi:10.14191/Atmos.2022.32.3.223 (in Korean with English abstract).
- Palmer, T. N., and Coauthors, 2004: Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**, 853-872, doi:10.1175/BAMS-85-6-853.
- Park, H.-S., J. Lee, S.-M. Lee, S.-O. Hwang, and K.-O. Boo, 2023: Global ocean data assimilation and prediction system 2 in KMA: Operational system and improvements. *Atmosphere*, **33**, 423-440, doi:10.14191/Atmos.2023.33.4.423 (in Korean with English abstract).
- Park, S., D.-J. Kim, S.-W. Lee, K.-W. Lee, J. Kim, E.-J. Song, and K.-H. Seo, 2017: Comparison of extended medium-range forecast skill between KMA ensemble, ocean coupled ensemble, and GloSea5. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 393-401, doi:10.1007/s13143-017-0035-2.
- Park, Y.-H., Y.-K. Hyun, S.-I. Heo, and H.-S. Ji, 2021: Assessment of the prediction performance of ensemble size-related in GloSea5 hindcast data. *Atmosphere*, **31**, 511-523. doi:10.14191/Atmos.2021.31.5.511 (in Korean with English abstract).
- Scaife, A. A., and Coauthors, 2014: Skillful long-range prediction of European and North American winters. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 2514-2519, doi:10.1002/2014GL059637.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2016: Seasonal winter forecasts and the stratosphere. *Atmos. Sci. Lett.*, **17**, 51-56. doi:10.1002/asl.598.
- Seo, E., M.-I. Lee, J.-H. Jeong, H.-S. Kang, and D. Won, 2016: Improvement of soil moisture initialization for a Global Seasonal Forecast System. *Atmosphere*, **26**, 35-45, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.035 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2019: Impact of soil moisture initialization on boreal summer subseasonal forecasts: mid-latitude surface air temperature and heat wave events. *Climate Dyn.*, **52**, 1695-1709, doi:10.1007/s00382-018-4221-4.
- Sheshadri, A., M. Borrus, M. Yoder, and T. Robinson, 2021: Midlatitude error growth in atmospheric GCMs: The role of eddy growth rate. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL096126. doi:10.1029/2021GL096126.
- Singh, D., M. Ting, A. A. Scaife, and N. Martin, 2018: California Winter Precipitation Predictability: Insights from the Anomalous 2015-2016 and 2016-2017 Seasons. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 9972-9980, doi:10.1029/2018GL078844.
- Son, S.-W., H. Kim, K. Song, S.-W. Kim, P. Martineau, Y.-K.

- Hyun, and Y. Kim, 2020: Extratropical prediction skill of the Subseasonal-to-Seasonal (S2S) prediction models. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **125**, e2019JD031273, doi:10.1029/2019JD031273.
- Song, K., H. Kim, S.-W. Son, S.-W. Kim, H.-S. Kang, and Y.-K. Hyun, 2018: Subseasonal-to-Seasonal (S2S) prediction of GloSea5 model: Part 2. Stratospheric Sudden Warming. *Atmosphere*, **28**, 123-139, doi:10.14191/Atmos.2018.28.2.123 (in Korean with English abstract).
- Stan, C., 2022: The forecast skill of the Northern Hemisphere middle latitudes seasonal oscillation and its impact on the surface air temperature. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL095543, doi:10.1029/2021GL095543.
- Torrence, C., and P. J. Webster, 1998: The annual cycle of persistence in the El Niño-Southern oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 1985-2004, doi:10.1002/qj.49712455010.
- Webster, P. J., and S. Yang, 1992: Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **118**, 877-926, doi:10.1002/qj.49711850705.
- \_\_\_\_\_, 1995: The annual cycle and the predictability of the tropical coupled ocean-atmosphere system. *Meteor. Atmos. Phys.*, **56**, 33-55, doi:10.1007/BF01022520.
- Wedd, R., and Coauthors, 2022: ACCESS-S2: the upgraded Bureau of Meteorology multi-week to seasonal prediction system. *J. So. Hemisph. Earth*, **72**, 218-242, doi:10.1071/ES22026.
- WMO, 2024: *2023 Climate State Report*. World Meteorological Organization, 47 pp.