

GloSea6 모형의 S2S 예측 성능 평가: MJO 및 동아시아 원격상관

김혜라¹⁾ · 박창현^{2)*} · 손석우²⁾ · 현유경³⁾ · 이조한³⁾

¹⁾워싱턴대학교 대기과학부, ²⁾서울대학교 지구환경과학부,
³⁾국립기상과학원 현업운영개발부 기후모델개발팀

(접수일: 2025년 11월 3일, 수정일: 2025년 12월 6일, 게재확정일: 2025년 12월 8일)

Subseasonal-to-Seasonal (S2S) Prediction Skill of GloSea6 Model: MJO and Its Teleconnections to East Asia

Hera Kim¹⁾, Chang-Hyun Park^{2)*}, Seok-Woo Son²⁾, Yu-Kyung Hyun³⁾, and Johan Lee³⁾

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, University of Washington, Seattle, WA, United States

²⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

³⁾Climate Model Development Team, Operational Systems Development Department,
National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 3 November 2025; revised 6 December 2025; accepted 8 December 2025)

Abstract This study evaluates the subseasonal-to-seasonal (S2S) prediction skill of Madden-Julian Oscillation (MJO) and its East Asian teleconnections using the Korea Meteorological Administration's Global Seasonal Forecasting System version 6 (GloSea6) hindcasts. The MJO prediction skill of the GloSea6 model, in terms of the bivariate correlation of the Real-time Multivariate MJO (RMM) index, is about three weeks in winter, extending to four weeks for MJO phases 2-3. However, the prediction skill of MJO teleconnections to East Asia is limited to about two weeks. This discrepancy arises from prediction errors in MJO spatial structure and magnitude, which drastically increase after forecast week two. In particular, the centers of divergence and convergence become latitudinally biased with weaker magnitudes. These errors are attenuated by latitudinal averaging when computing the RMM index. The bivariate correlation metric also underrepresents magnitude errors. Together, they lead to an overestimation of MJO prediction skills. These results highlight the importance of considering the detailed structure and magnitude of MJO circulation and convection when assessing the prediction skills of MJO and its teleconnections.

Key words: Madden-Julian Oscillation (MJO), East Asia teleconnections, Subseasonal-to-seasonal (S2S) prediction, GloSea6 model

1. 서 론

계절내-계절 예측(Subseasonal-to-Seasonal, S2S 예측)은 약 2주에서 2개월 규모의 예측을 의미하며, 단기

예측과 계절 예측의 중간 시간규모에 속한다. 단기 예측이 초기 조건(initial condition)에 크게 의존하여 예측성이 확보되고, 계절예측이 경계 조건(boundary forcing)의 영향을 통해 일정 수준의 예측성을 보이는 것과 달리, S2S 예측은 뚜렷한 예측성의 원천이 부족하여 상대적으로 예측성이 저하되는 시기로 평가된다(Vitart et al., 2017). 이에 따라 세계기후연구프로그램(WCRP)과 세계날씨연구프로그램(WWRP)은 국제 S2S 프로젝트를 추진하여 예측성을 진단하고 이를 향상시

*Corresponding Author: Chang-Hyun Park, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.
Phone: +82-2-880-8152, Fax: +82-2-883-4972
E-mail: sweetweather@snu.ac.kr

키기 위한 다양한 예측 인자를 개발해왔다(WMO, 2013).

대표적인 예측 인자 중 하나는 매든-줄리안 진동(Madden-Julian Oscillation, MJO)이다(Vitart et al., 2014; Meehl et al., 2021). MJO는 열대 지역의 계절 내 변동성 중 주요 모드로서, 인도양(MJO 위상 2-3)에서 발생한 열대 대류들의 군집이 해양성대륙(MJO 위상 4-5)를 거쳐 서태평양(MJO 위상 6-7)과 중태평양(MJO 위상 8-1)까지 동진하는 약 30~60일의 주기의 변동 현상이다(Madden and Julian, 1971, 1972). MJO에 수반되는 열대 대류활동 변화는 열대지역 강수에 영향을 미칠 뿐 아니라 대류에 따른 비단열 가열에 대한 Gill-타입 반응을 통해 남아시아 몬순을 비롯한 열대 지역 기후에 영향을 미치며(Gill, 1980; Wang and Rui, 1990), 그 중 로스비(Rossby)순환 성분은 대기원격상관을 통해 전지구 기후 및 지상기상에도 중요한 변화를 일으킨다(Zhang, 2013; Stan et al., 2017; Lin, 2022). 정량적으로는 북반구 겨울철 상층 대기 순환의 계절내 변동성의 약 36%가 MJO로 설명될 수 있다는 보고가 있다(Matthews et al., 2004). 실제로 여러 연구들은 MJO를 성공적으로 예측하는 것이 북반구 S2S 예측성 향상으로 이어질 수 있음을 보여주었다(Dias and Kiladis, 2019; Kim et al., 2023).

특히 동아시아는 MJO 변동성이 가장 활발한 인도양-서태평양 온수풀 지역과 근거리에 위치하여 MJO의 영향을 강하게 받는 지역 중 하나로, MJO 위상에 따라 대기 순환뿐 아니라 기온과 강수의 공간 패턴이 뚜렷이 달라진다(Jeong et al., 2005, 2008; Kim et al., 2020). 예를 들어, MJO 대류활동이 인도양에서 활발해지는 동시에 열대 서태평양 지역에서는 억제되는 MJO 위상 2-3 시기에는 한반도를 포함한 동아시아에 음의 지상기온 아노말리가 나타나며, 반대 위상(MJO 위상 6-7)일 때는 양의 지상기온 아노말리가 나타난다(Jeong et al., 2005). 따라서 MJO와 그 원격상관에 따른 순환 변화를 정확히 예측하는 것은 겨울철 동아시아 지상기상 예측에 매우 중요하다.

현대 S2S 예측 시스템을 평가한 연구들에 따르면 예측성이 가장 높은 ECMWF 모형을 제외한 대부분의 모형에서 MJO 예측성은 약 3주 정도로 알려져 있다(Vitart et al., 2017; Kim et al., 2018; Lim et al., 2018). 또한, 모형들은 MJO의 북태평양 지역으로의 원격상관을 정성적으로 재현하기도 한다(Stan et al., 2022). 그러나 현 S2S 예측모형들의 MJO 원격상관 패턴에 대한 유의미한 예측성은 2주가 채 되지 않는다(Stan et al., 2022; Kim et al., 2023). 또한, 예측 2주 이후 원격상관 아노말리의 크기가 크게 과소모의 되는 문제가 지속적으로 나타나고 있으며(Vitart et al., 2017; Stan et al., 2022), 특히 동아시아의 경우 이러한 경향이 더 뚜렷하다고 보고된 바 있다(Garfinkel et

al., 2022; Kim et al., 2023). 따라서 최신 S2S 예측시스템을 기반으로 MJO 지수에 대한 비교적 양호한 예측성과 동아시아 원격상관에 대한 제한적 예측성 간의 불일치 원인을 보다 정밀하게 평가할 필요가 있다.

본 연구는 기상청 국립기상과학원에서 현업 운영 중인 전지구 기후예측시스템(Global Seasonal Forecasting System version 6, GloSea6)의 최신 버전(GloSea6-GC3.2)을 활용하여 겨울철(11~4월) 기간 동안 MJO 예측성과 동아시아 원격상관 예측성을 종합적으로 평가하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 분석에 사용한 자료와 방법을 소개하고, 제3장에서는 MJO 및 동아시아 원격상관에 대한 GloSea6 모형의 예측성능을 평가하며, 마지막으로 제4장에서 주요 결과를 요약하고 향후 활용 가능성을 논의한다.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

MJO 및 동아시아 원격상관을 분석하기 위하여 ERA5 재분석자료(Hersbach et al., 2020)의 동서바람(U), 지위고도(Z), 기온(T), 지상기온(SAT)를 사용하였으며, 상향장파복사(OLR)는 NOAA CPC의 자료를 사용하였다(Liebmann and Smith, 1996). 편의상 본 논문에서는 해당 재분석 자료를 관측으로 명한다. 예측성 평가를 위해 동일한 변수를 GloSea6-GC3.2 모형의 과거기후예측(hindcast)에서도 확보하였다. GloSea6-GC3.2 hindcast는 24년간(1993~2016년) 매월 1일, 9일, 17일, 25일에 초기화되어 255일간 적분되는 앙상블 예측자료이다(Kim et al., 2021). 본 연구에서는 MJO 활동이 활발한 겨울철(11~3월; NDJFM)에 초기화 된 576개 예측자료에 대해 앙상블 평균자료만을 분석에 활용하였다. OLR 및 지상기온은 일평균 자료를 사용하였고, 다른 변수들은 0000 UTC 순간 자료를 활용하였다. MJO 지수 생산을 제외한 모든 분석에서 관측 및 GloSea6 hindcast 자료의 아노말리는 동일하게 관측의 24년(1993~2016) 기간 동안의 달력일 기준 기후평년 값으로부터의 차이로 정의하였다. 다만, GloSea6 hindcast의 경우에는 분석에 사용된 hindcast 전체 자료에 대해 모형의 체계적 평균오차를 예측일별·격자별로 정의하여 추가로 보정하였다. 기상청 국립기상과학원의 GloSea6-GC3.2 모형에서 생산되는 현재예측(forecast)과 과거기후예측은 예측초기조건과 앙상블 구성에서만 차이가 있으며, 그 외의 구성은 동일하다. GloSea6-GC3.2의 hindcast에 대한 세부사항은 Table 1에 정리하였다.

2.2 MJO 지수

MJO 분석에는 Realtime Multivariate MJO 지수

Table 1. Description of GloSea6-GC3.2 hindcast system utilized in this study.

System	GloSea6 (Global Seasonal forecasting system version 6)
Component	Atmosphere UM 11.5 Global Atmosphere 7.2
	Ocean NEMO 3.6 Global Ocean 6.0
	Sea Ice CICE 5.1.2 Global Sea Ice 8.1
	Land JULES 5.6 Global Land 8.0
Initial conditions	Atmosphere ERA-Interim
	Ocean/Sea Ice KMA GODAPS2
Others	Land initialization JULES/ERA5
	Ozone CMIP6 historical
Analysis period	1993~2016
Lead times	61 days
Initialization dates	1, 9, 17, 25
Number of ensemble members	3
Analysis season	November-April (NDJFMA)

(RMM; Wheeler and Hendon, 2004)를 사용하였다. RMM 지수는 열대(15°S-15°N) 지역 위도평균 후 표준화된 200-hPa 동서바람(U200), 850-hPa 동서바람(U850), 그리고 OLR 아노말리에 대한 결합 경험직교함수(combined empirical orthogonal function, CEOF) 분석에서 얻은 제1, 2 고유벡터에 대한 주성분(PC1, PC2)으로 구성된다. RMM 지수는 다변량 정보를 사용함으로써 추가적인 대역 필터 없이도 계절내 특성을 포착할 수 있어, 엘니뇨-남방진동과 관련한 성분 및 분석 기준일 이전의 120일 평균을 빼는 방식으로 저주파 성분만을 제거한다. 본 연구에서는 모형 초기화 날짜를 기준으로 관측의 RMM 주성분 크기($\sqrt{PC1^2 + PC2^2}$)가 1.0 표준편차 이상인 경우만을 MJO 사례로 정의하였다. 또한 초기화 날짜의 MJO 위상에 대한 예측성 비교를 위해 MJO 위상을 4개로 구분하였으며, MJO 위상 2-3, 위상 4-5, 위상 6-7, 위상 8-1에 해당하는 초기화 자료의 개수는 각각 89, 82, 76, 85개이다. 관측 RMM 지수는 Bureau of Meteorology (<https://www.bom.gov.au/climate/mjo/graphics/rmm.74toRealtime.txt>)에서 확보가 가능하다.

모형의 RMM 지수는 관측의 기후평년값과 모형 평균요차를 제거한 아노말리를 기반으로 관측과 동일한

방법으로 산출하되, 시간규모 필터를 위해 예측기간 전후의 자료가 필요한 경우 관측의 값을 이어붙여 사용하였다. 다변량을 사용하는 RMM 지수의 경우 예측 아노말리의 표준화에 관측의 경도평균 표준편차를 사용하였다. 두 지수 모두 주성분 산출 시 모형의 전처리된 아노말리를 관측의 고유벡터에 투영하여 계산하였으며, 이 투영 방식은 관측 대비 모형의 아노말리의 크기가 지수 진폭에 반영되도록 한다.

2.3 예측성 평가

MJO 예측성 평가는 이변량 상관계수(Bivariate correlation coefficient, BCOR)를 사용하였다. BCOR는 예측된 주성분과 관측 주성분 간의 상관성을 나타내며, 식(1)과 같이 정의된다.

$$BCOR(\tau) = \frac{\sum_i^{N_f} [PC1_M(i, \tau)PC1_O(i, \tau) + PC2_M(i, \tau)PC2_O(i, \tau)]}{\sum_i^{N_f} [PC1_M^2(i, \tau)PC2_M^2(i, \tau)]^{1/2} \sum_i^{N_f} [PC1_O^2(i, \tau)PC2_O^2(i, \tau)]^{1/2}} \quad (1)$$

여기서 τ 는 예측 시간(lead time)을, N_f 는 겨울철 초기화 횟수(hindcast 개수)를 나타내며, i 는 각 초기화 실험을 나타낸다. M 과 O 는 각각 GloSea6 모형 예측결과와 이에 상응하는 관측값을 의미한다. 따라서 분자는 예측과 관측의 주성분 시계열 간의 이변량 공분산

을, 분모는 이들의 표준편차로 분자를 표준화하는 과정을 의미한다. BCOR은 상관계수로서, 각각의 표준편차로 표준화된 예측 아노말리와 관측의 아노말리가 시간적으로 정확히 일치할 때 최대값인 1, 부호가 완전 반대일 때 최소값인 -1로 나타난다. 다만 상관계수는 표준화된 패턴의 일치도를 측정할 뿐 원시 아노말리의 진폭 차이는 반영하지 않는다. 일반적으로 BCOR > 0.5이 유의미한 예측성의 기준으로 간주되며, 본 연구에서도 동일한 기준을 적용하여서 MJO의 예측성을 평가하였다.

한편, BCOR과 합성도 비교뿐만 아니라 MJO의 예측성을 평가하기 위한 방법으로 열대 지역 변수들의 공간 패턴 상관계수(Anomaly Pattern Correlation, APC)를 활용하였다. APC는 열대(15°S-15°N, 30°E-150°W)에 대해 계산되며, 식(2)와 같이 정의된다.

$$APC(i, \tau) = \frac{\frac{1}{\sum_g^{N_g} \cos \phi_g} \sum_g^{N_g} (Z_M(i, \tau) Z_O(i, \tau) \cos^2 \phi_g)}{\sqrt{\frac{1}{\sum_g^{N_g} \cos \phi_g} \sum_g^{N_g} (Z_M^2(i, \tau) \cos^2 \phi_g)} \sqrt{\frac{1}{\sum_g^{N_g} \cos \phi_g} \sum_g^{N_g} (Z_O^2(i, \tau) \cos^2 \phi_g)}} \quad (2)$$

여기서 APC는 아노말리 패턴 상관계수를 의미하며, g 는 각 격자 지점, N_g 는 영역 내에 존재하는 전체 격자 수, ϕ_g 는 각 격자 지점의 위도를 의미한다. 즉, 분자는 위도 가중치를 포함한 모형과 관측의 아노말리 공분산을 의미하고, 분모는 각각의 영역에서의 표준편차로 분자를 표준화하는 과정을 의미한다. APC 또한 상관계수로서, 예측된 아노말리의 패턴이 관측의 아노말리 패턴과 일치할 때 최대값인 1을 나타내며, 정반대의 패턴(반대 부호)일 때 최소값인 -1로 나타난다.

이와 유사하게, 식(2)의 분자에 해당하는 공분산을 관측의 분산으로 표준화하는 경우, 공간 패턴 회귀계수(Anomaly Pattern Regression, APR)를 얻을 수 있다. 이는 추후 모형의 아노말리가 관측의 아노말리 대비 가지는 크기를 함께 고려한 예측성 진단 방법으로 추후 분석에 활용되었다.

2.4 기온 경향 수치분석

본 연구에서는 MJO 예측성 뿐 아니라 MJO 원격상관에 따른 동아시아 기온 변화의 예측성도 진단한다. 이때 기온 예측 오차의 원인을 규명하기 위해 기온 아노말리에 대해 기온 경향 수치분석을 적용하였으며, 수치식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla T) + (S_p \omega) + Q + Res \quad (3)$$

여기서 좌변은 시간에 따른 925-hPa 기온 아노말리(T) 변화를 나타낸다. 우변의 첫 번째 항은 수평 기온 이류항으로, 여기서 \mathbf{V} 는 수평방향 바람벡터, 그리고 ∇T 는 수평방향 기온경도를 나타낸다. 본 연구에서는 이 수평 기온 이류항을 다시 동서 방향의 이류항과 남북 방향의 이류항으로 구분하여 분석하였다. 우변의 두 번째 항은 연직 이류항으로 연직 압축/팽창으로 인한 단열 가열/냉각에 따른 기온 변화를 나타낸다. 여기서 S_p 와 ω 는 각각 연직방향의 기온경도와 연직바람을 나타낸다. 세 번째 항 Q 는 태양 복사나 잠열 변화에 의한 비단열 가열/냉각의 효과를 나타낸다. 그리고 마지막 항은 잔차항으로, 위의 모든 항으로 설명되지 않는 기온 변화를 포함한다. 본 분석에서는 비단열 가열항을 직접 계산하지 않고 전체 기온 경향에서 우변의 첫 번째와 두 번째 항을 제외한 값을 비단열 가열항으로 추산하였다. 따라서 잔차항은 남지 않으며, 기온 경향은 네 가지 항(동서 이류, 남북 이류, 연직 이류, 비단열 가열항)으로만 설명된다. 모형 예측 결과에 대한 기온 경향 수치 분석은 비선형 계산과정을 고려하여 각 앙상블 멤버에 대해 적용 후 앙상블 평균을 수행하였다.

본 연구에서는 기온 아노말리 및 기온 경향을 한반도와 동아시아 지역에 집중하여 분석하기 위해, 지역 평균된 시계열 분석을 수행하였으며 이 때 동아시아는 북위 25°-55°, 동경 70°-135°, 그리고 한반도는 북위 30°-45°, 동경 120°-135° 지역으로 정의하였다.

3. 결 과

3.1 MJO 지수 예측성

Figure 1은 겨울철 RMM 지수의 BCOR 예측성을 주(week)별로 나타낸 것이다. 겨울철에 초기화된 모든 예측자료를 기준으로 BCOR 예측성을 측정하였을 때, 그 값은 1주 차의 0.9에서부터 3주차까지 0.5 이상으로 유지되다가, 4주차에서 0.35가 된다(Fig. 1a). 즉, GloSea6의 겨울철 MJO 예측성은 BCOR = 0.5 기준으로 대략 3주 정도이다. MJO 위상에 따른 MJO 예측성 차이를 분석한 결과(Figs. 1b-e), GloSea6 모형은 인도양 위 대류활동이 활발해지는 MJO 위상 2-3과 그 반대 위상(위상 6-7)의 경우에는 4주 정도의 MJO 예측성을 나타내는 반면, 위상 4-5와 위상 8-1에서 모형이 초기화 된 경우에는 MJO 예측성이 3주 정도로 상대적으로 낮게 나타난다. 열대 원격상관의 지연효과를 함께 고려할 때(Kim et al., 2023), MJO에 기인한 중위도 원격상관의 실용적 예측성은 4주 이상으로 기대할 수 있다.

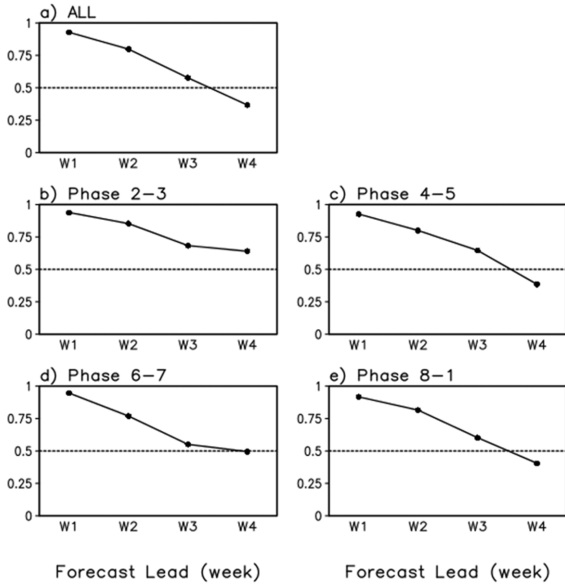


Fig. 1. Weekly BCOR prediction skill of the RMM index for a) boreal winter (November-April), and b-e) each MJO-phase initialization group. The dotted line denotes the threshold of practical prediction skill of BCOR = 0.5.

3.2 MJO-동아시아 원격상관 예측성

열대 지역의 MJO 대류 아노말리에 따른 대류권 상·하층 수렴·발산은 아열대 지역에 로스비파를 유발함으로써 중위도 지상 기상에도 영향을 미친다(Zhang, 2005). 특히 다른 MJO 위상에 비해 MJO 대류활동 아노말리가 쌍극자 형태를 띠는 MJO 위상 2-3과 6-7인 경우 중위도 원격상관 영향이 더 강한 것으로 알려져 있다(Seo and Lee, 2017; Tseng et al., 2019). 동아시아의 경우에도 MJO가 위상 2-3이거나 위상 6-7일 때 지상기온과 강수에 대한 영향이 더욱 뚜렷하다(Jeong et al., 2005, 2008; Kim et al., 2020). 따라서 MJO가 잘 예측될 때 동아시아 지상 기상 예측성도 높을 것으로 기대할 수 있다. 동아시아 원격상관 예측성을 분석하기 위해 MJO 위상 2-3과 6-7에 초기화된 예측자료에 대해 Z925와 지상기온의 예측주별(1~4주) 지연 합성도를 해당 시기의 관측 합성도와 비교하였다(Figs. 2, 3).

Figure 2는 먼저 MJO 위상 2-3 발생 후 Z925와 지상기온 아노말리의 예측장을 관측장과 비교한 것이다. 관측에서 MJO 위상 2-3 발생 1주차에 동아시아 대륙 위에 저기압성, 그리고 북태평양 지역에 고기압성 하층 순환 아노말리가 나타난다(Fig. 2a). 이는 인도양

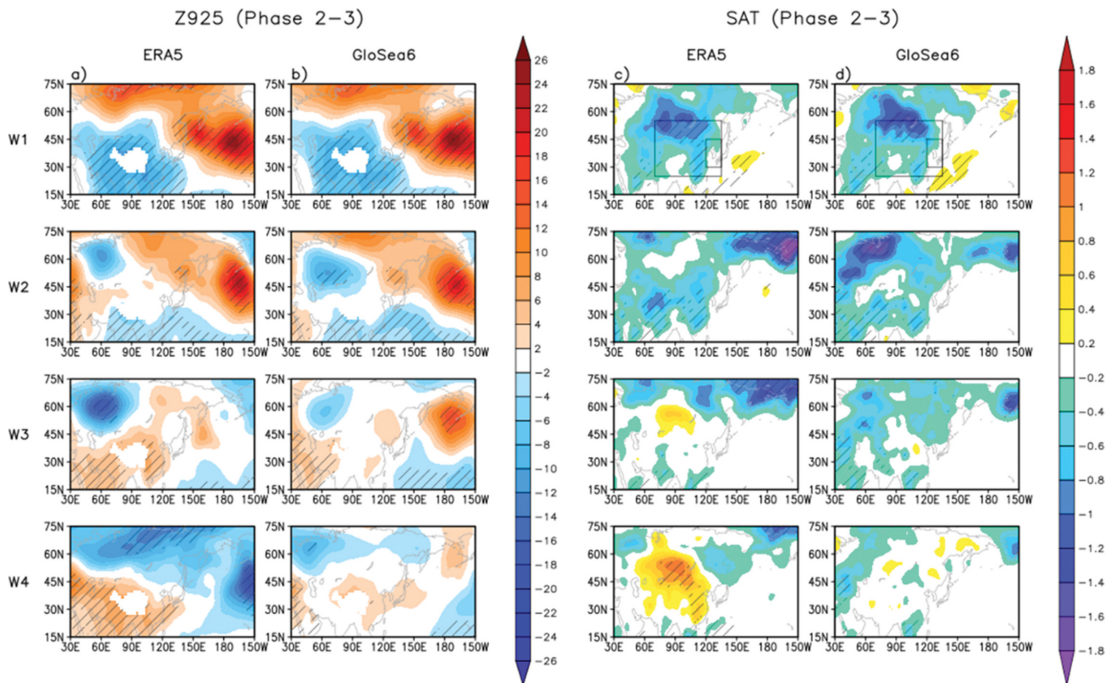


Fig. 2. MJO Phase 2-3 composite of (a, b) 925 hPa geopotential height and (c, d) surface air temperature anomalies in (a, c) the reanalysis and (b, d) GloSea6 hindcasts. From the top are weekly mean composites for the dates corresponding to forecast week 1 to 4. Hatch indicates statistically significant value at 90% confidence level. The boxes in the uppermost panels of (c) and (d) indicate the domain for East Asia and Korean Peninsula defined in this study.

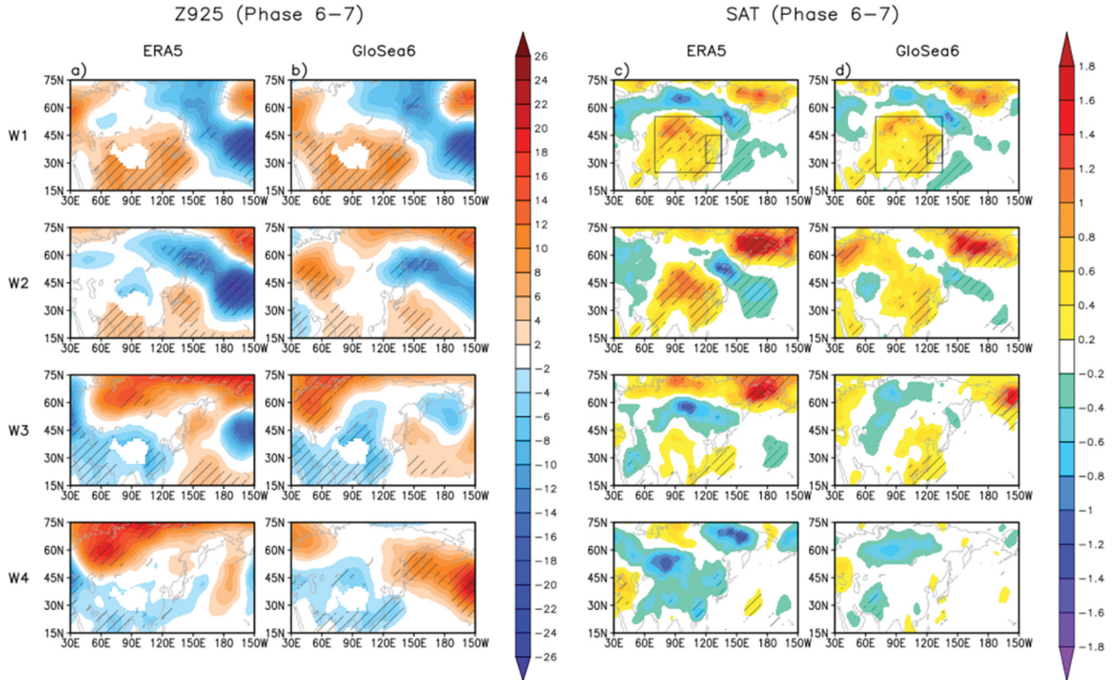


Fig. 3. Same as Fig. 2 but for MJO Phase 6-7.

위에 강화된 대류활동과 열대 서태평양 위에 억제된 대류활동에 따른 잠열 변화에 대한 Gill-타입 로스비 반응의 결과이다(Gill, 1980). MJO 위상 2-3 발생 후 2주차에는, 시간이 지나면서 MJO 위상이 이동함에 따라 순환 아노말리가 함께 동진하는 양상이 보인다. MJO 위상 2-3 발생 후 3~4주 가 지나면서 위상 2-3의 영향은 약화되며, 4주차에는 대부분의 사례에서 반대 MJO 위상이 뒤따름에 따라 1주차의 순환 아노말리와 반대 부호의 순환패턴이 나타난다.

GloSea6 모형은 이러한 일련의 순환 변화를 예측 2주차까지 정성적으로 재현한다(Fig. 2b). 그러나 모형은 MJO 위상 2-3 발생 후 3~4주차에 관측에서 나타난 순환장의 부호역전을 예측하지 못하며, 대신 2주차의 아노말리 패턴과 유사한 아노말리가 동일 지역에서 약화하는 양상이 나타난다. 이러한 순환 예측성의 저하는 지상기온 예측성의 저하로 이어지는 것처럼 보인다(Figs. 2c, d). 관측에서는 위상 2-3 발생 후 2주 간 한반도를 포함한 동아시아 대륙 위에 음의 지상기온 아노말리가 나타나고(Jeong et al., 2005), 순환 아노말리의 진화과정과 유사하게 3~4주차로 가면서 기존 아노말리가 약화되며 아노말리의 부호 역전이 일어난다. GloSea6 모형은 예측 3주차부터 순환뿐 아니라 이에 따른 지상기온 아노말리의 약화 및 부호 역전을 잘 재현하지 못하며, 대신 예측 2주차의 아노

말리가 시간에 따라 약화하는 것으로 보인다. 결론적으로, MJO 위상 2-3에 대한 동아시아 원격상관은 약 2주 정도 시간규모에서 정성적으로 예측된다. 이는 4주였던 MJO 위상 2-3의 MJO 지수 예측성의 절반 수준에 불과하다.

위상 6-7은 위상 2-3의 반대 부호의 구조를 가지기 때문에 동아시아 원격상관 또한 반대 부호로 나타난다(Figs. 3a, c). 따라서 관측에서 MJO 위상 6-7 발생 후 2주 동안 동아시아 대륙 아열대 지역에 고기압성 하층 순환 아노말리와 북태평양 지역에 저기압성 하층 순환 아노말리가 발달하고, 그에 따라 한반도를 포함한 동아시아 대륙 지역에는 양의 지상기온 아노말리가 나타난다. MJO 위상 6-7 발생 3주차부터 기존 아노말리가 약화되고, 4주차에는 부호 역전이 일어난다. GloSea6 모형은 MJO 위상 2-3의 경우보다 MJO 위상 6-7과 관련한 예측 3주차의 아열대 지역 순환 및 지상기온 아노말리를 잘 예측하는 듯 하나, 여전히 아노말리의 크기를 과소모의하고 4주차의 지상기온 부호 역전은 예측하지 못한다(Figs. 3b, d). 결론적으로, MJO 위상 2-3과 6-7 모두 동아시아 원격상관 예측성은 RMM 지수 예측성으로부터 기대한 수준에 미치지 못한다.

예측 오차는 동아시아와 한반도 지상기온의 시계열에서도 일관되게 나타난다(Fig. 4). 동아시아 및 한반

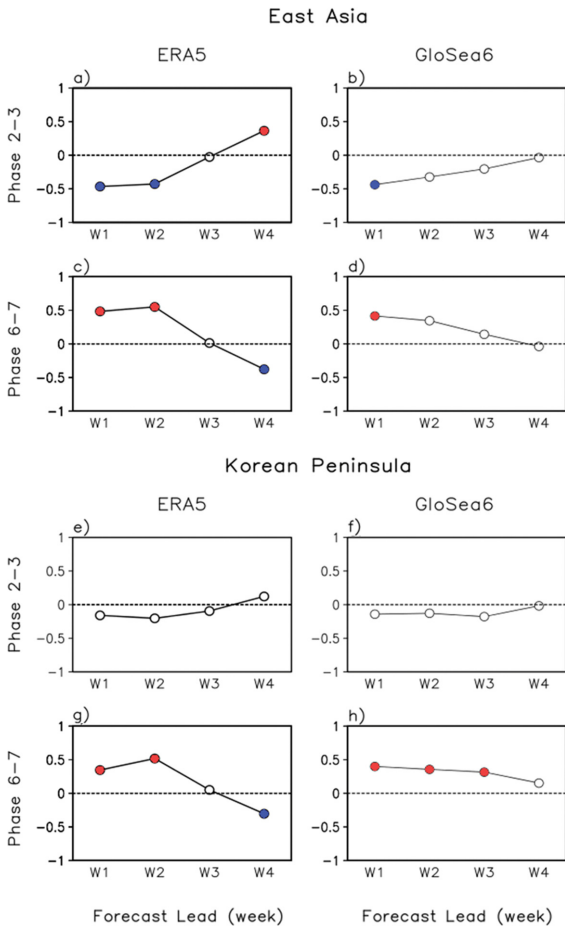


Fig. 4. MJO Phase 2-3 and Phase 6-7 composites of surface air temperature anomaly averaged over (a-d) East Asia and (e-h) Korean Peninsula for (left) the reanalysis and (right) GloSea6 hindcasts. The domain used for averaging is indicated in Figs. 2c-d and 3c-d. Colored marks denote the values statistically significant at 90% confidence level.

도 지상기온 시계열은 Figs. 2, 3의 지상기온 아노말리 지도에 표시된 영역에 대한 지역평균으로 계산되었다(Figs. 2c, d and 3c, d). 동아시아의 경우, 관측에서 MJO 위상 2-3 과 6-7 발생에 따라 지상기온이 1-2주차에서 최대로 나타나고, 3주차에 이 아노말리가 약화하면서 4주차에 부호가 역전된다(Figs. 4a, c). 두 MJO 위상은 서로 정반대의 원격상관 반응을 유발하며, 본 분석에서 정의한 동아시아 지역 지상기온 시계열은 이를 잘 나타낸다(Figs. 4a와 c 비교). 반면 GloSea6 모형은 예측 2주차부터 아노말리의 크기를 뚜렷이 과소모의하며, 관측과는 달리 예측 3주 이후에도 예측 2주차와 동일한 부호의 기온 아노말리가

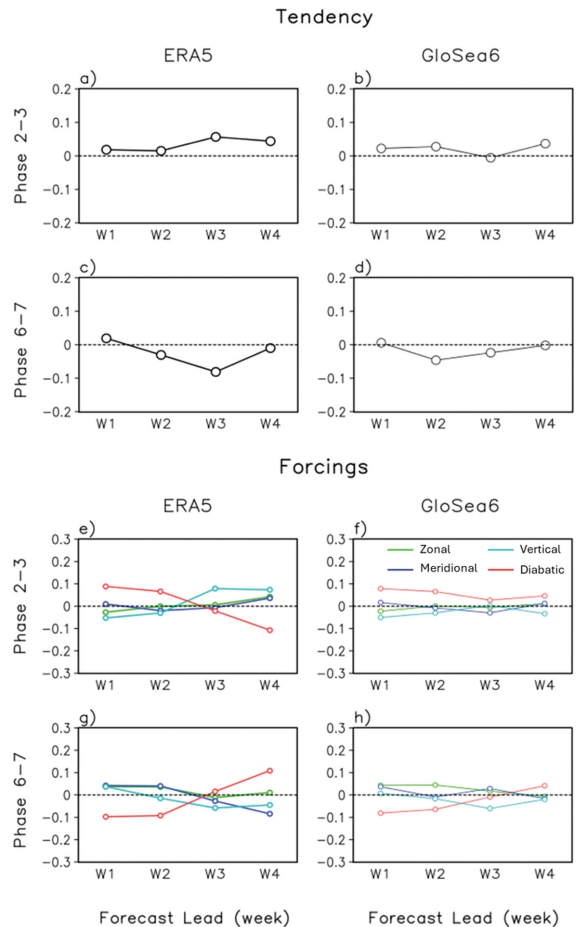


Fig. 5. Same as Figs. 4a-d but for (a-d) 925 hPa temperature tendency and (e-h) forcing terms.

유지된다(Figs. 4b, d). 모형이 예측한 동아시아 지상기온 아노말리는 1주차에 한해서만 유의미한 값을 가진다.

한반도의 경우, MJO 위상 6-7에 대한 지상기온 반응은 동아시아 지역에서 나타난 결과와 유사하게 재현되었다. 그러나 MJO 위상 2-3에 대한 한반도 지상기온 아노말리는 동아시아 아노말리와 부호는 일치하지만 4주 내내 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다(Figs. 4e-h). MJO의 반대 위상은 서로 반대의 아노말리 구조를 보이므로 일반적으로 동아시아 원격상관 반응 또한 정반대로 나타나는 것으로 알려져 있으나, 국지적 반응은 그렇지 않을 수 있음을 시사한다. 이는 두 위상에 대한 순환 반응이 정반대라 하더라도, 그에 따른 기온 이류 패턴 등 메커니즘적 과정은 지역적으로 상이할 수 있기 때문으로 추측된다(Figs. 2, 3 참조). 다만 본 연구에서는 이를 직접적으

로 제시하지 않았으므로, 보다 명확한 규명을 위해서는 추후 연구가 필요하다.

동아시아 지상 기온의 예측 오차가 모형이 순환장과 관련된 역학물리과정을 재현하지 못한 데서 비롯된 것인지에 대해 규명하고자 925 hPa 기온경향 수지분석을 수행하였다(Fig. 5). 수지분석은 체계적인 기온 변화를 보인 동아시아 지역에 대하여 진행하였다. Figures 5a-d는 동아시아 925 hPa 기온 아노말리의 일경향의 주 평균을 나타낸다. 관측된 동아시아 기온 반응은 MJO 위상 발생 1-2주차에서 뚜렷하게 나타나지만(Figs. 4a, c), 기온 경향은 1-2주차에는 상대적으로 작게 나타난다(Figs. 5a, c). 이는 1-2주차의 기온 반응이 결과로 나타나기까지 이전 MJO 위상에 의한 원격상관 강제력이 있었으며, MJO 위상 2-3과 6-7은 이 기간 동안의 기온 아노말리의 유지와 더 관련이 있음을 암시한다. MJO 발생 후 3주차에는 두 위상 모두에 대하여 기온경향이 가장 강하게 나타나며, 이는 관측에서 나타난 4주차 아노말리 부호 역전을 설명할 수 있다(Figs. 4a, c). GloSea6 모형은 MJO 위상 2-3과 6-7 모두에 대하여 1-2주차의 기온경향은 잘 예측하지만, 예측 3주차에 접어들면서 기온 경향을 과소 모의한다(Figs. 5b, d).

기온경향을 야기하는 강제력 요소를 분석한 결과를 살펴보면, 대체적으로 통계적으로 유의하지 않은 값을 나타냈으나, MJO 원격상관에 대한 순환 변화에 직접적으로 영향을 받는 단열과정에 의한 강제력들과

비단열 강제력 항이 대체로 서로 상쇄하는 경향이 나타난다(Figs. 5e-h). MJO 위상 2-3 발생 후 3주차에 강하게 나타난 양의 기온 경향은 주로 연직 이류에 의해, 그리고 MJO 위상 6-7과 관련된 음의 기온 경향은 연직 이류와 남북 이류에 의한 영향을 주로 받는다(Figs. 5e, g). 모형은 MJO 발생 후 2주차까지도 관측의 각 강제력요소의 크기 및 부호를 대체적으로 잘 예측한다. 하지만 예측 3-4주차에는 대부분의 강제력이 관측에 비해 작아진다(Figs. 5f, h). 즉 기온 반응에서 나타난 3~4주차의 예측 오차는 단일 과정의 결과가 아니라, 수평 이류, 연직 단열 가열, 비단열 가열 등 기온 수지 성분 전반의 오차가 결합된 결과로 해석된다. 이는 MJO에 대한 동아시아 기온 반응에 대한 GloSea6 모형의 예측 오차가 중위도 순환 변화에 따른 기온 변화 메커니즘의 특정 과정에 대한 예측 오차에서 기인했기보다는 MJO에 의한 중위도 순환 반응의 전반, 또는 MJO 자체를 재현하지 못함에서 기인했음을 시사한다.

3.3 MJO 예측성 정밀분석

GloSea6 모형의 MJO 예측성을 좀 더 정밀하게 분석하기 위해 RMM 지수를 구성하는 변수(OLR, U200, U850)의 열대(15°S-15°N) 평균 Hovmöller 도표를 관측과 함께 Fig. 6에 나타내었다. 관측(검은 등치선)을 먼저 살펴보면, MJO 위상 2-3의 경우 인도양 위의 음의 OLR 아노말리와 열대 서태평양 위 양의 OLR 아

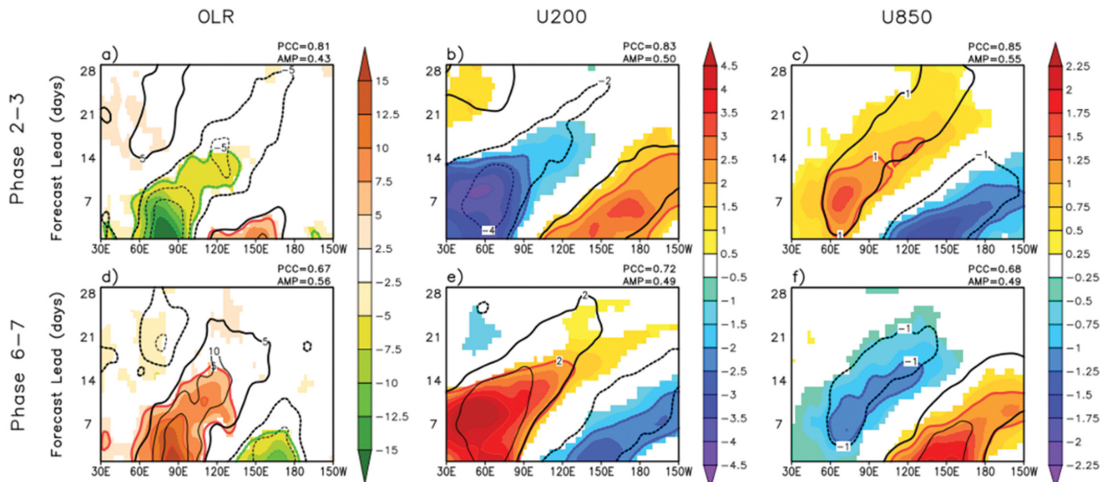


Fig. 6. Hovmöller diagrams of (a) OLR, (b) U200, and (c) U850 anomalies averaged over 15°S-15°N as a function of lead time for MJO Phase 2-3. Bottom panels are the same as top panels except for MJO Phase 6-7. Black contours are the reanalysis, while colored contours and shadings show GloSea6 hindcasts. The contour intervals are 5 W m⁻², 2 m s⁻¹, and 1 m s⁻¹ for OLR, U200, and U850, respectively. Only the values that are statistically significant at 90% confidence level are shaded for the hindcasts. In the upper right of each panel are the pattern correlation coefficient (PCC) and relative amplitude (AMP) for forecast lead weeks 3-4 of the composite shown.

노말리가 시간에 따라 동진함을 알 수 있고(Fig. 6a), 이러한 대류 아노말리에 대해 상층 발산(Fig. 6b)과 하층 수렴(Fig. 6c)이 동반되며 함께 동진함을 알 수 있다. 관측과 모형(채색 등치선 및 음영)을 비교하면, GloSea6 모형은 MJO의 동서구조와 전파(동진)패턴을 변수에 따라서는 3주 이상까지도 정성적으로 잘 예측하며(Figs. 6b, c, e, and f), MJO 지수의 부호를 기반으로 하는 BCOR가 예측 3~4주까지 높게 나타나는 이유를 이러한 위상적 일치로 설명할 수 있다(Fig. 1).

반면 모형이 예측한 아노말리의 크기는 예측 2주차가 지나면서 전반적으로 약해지는 경향이 나타난다(굵은 검은 등치선과 채색 등치선 비교). 특히 대류활동 변화에 해당하는 OLR 아노말리의 경우 예측 2주 이후에는 통계적으로 유의미한 값이 거의 나타나지 않는다(Figs. 6a, d의 채색 음영). 상·하층 수렴발산은 유의미한 아노말리가 상대적으로 더 오래 유지되지만 그 역시도 예측 3주차에는 이미 아노말리의 크기를 눈에 띄게 과소모의한다.

모형이 예측 3~4주차에 관측 대비 나타내는 평균적인 패턴과 강도를 정량적으로 진단하기 위해, 합성장기본의 패턴 상관계수(PCC)와 아노말리 상대 강도(AMP)를 각 도표의 오른쪽 상부에 표시하였다(Kim

et al., 2024). 실제로 예측 3~4주차에서 GloSea6 모형은 MJO 변수의 전파 패턴에 대해 상관계수 0.67~0.85의 값을 나타내나, 아노말리의 강도는 관측의 절반 정도로 과소모의한다. 관측과 모형의 MJO 지수 BCOR는 각각에 대한 변동폭으로 지수를 표준화하는 과정을 거치므로, 이와 같은 아노말리 크기 오차는 간과될 수 있다. 즉, GloSea6 모형이 지수의 BCOR 기준으로는 3주 이상의 MJO 예측성을 보이지만, MJO 아노말리의 크기를 함께 고려할 때 유용한 MJO 예측성은 2주 정도임을 알 수 있다.

동아시아 기온 반응의 경우 아노말리의 크기뿐만 아니라 분포에도 예측 오차가 존재하였다(Figs. 2, 3). 이는 MJO의 수평 구조와도 관련이 있을 수 있다. Figure 7은 MJO 위상 2-3과 6-7 발생 이후 4주 동안의 OLR 아노말리의 주별 합성도를 나타낸다. 관측에서는 열대 인도양과 서태평양에 위치한 쌍극자 형태의 대류 아노말리가 동진하며 발생 4주차에는 거의 반대의 MJO 위상이 나타난다(Figs. 7a, c). 각 MJO 사례마다 동진 속도 등 특성이 다르기 때문에 시간이 지남에 따라 아노말리 합성도의 크기는 다소 감소하나, MJO 구조의 동서방향 및 남북방향 규모는 4주동안 대체적으로 유지된다. 위도 평균 결과(Fig. 6)와 동

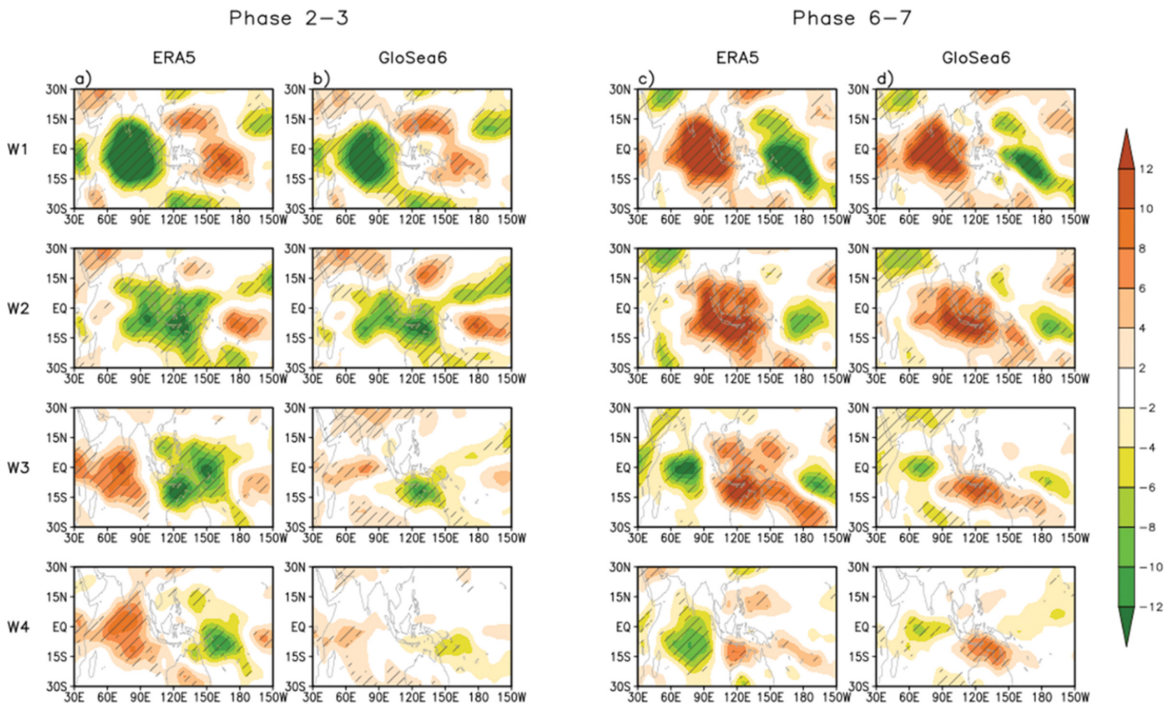


Fig. 7. The MJO Phase 2-3 composite of OLR anomalies in (a) the reanalysis and (b) GloSea6 hindcasts. Panels (c-d) are the same as panels (a-b), except for MJO Phase 6-7. From the top are weekly mean composites for the dates corresponding to forecast week 1 to 4. The hatched area indicates statistically significant value at 90% confidence level.

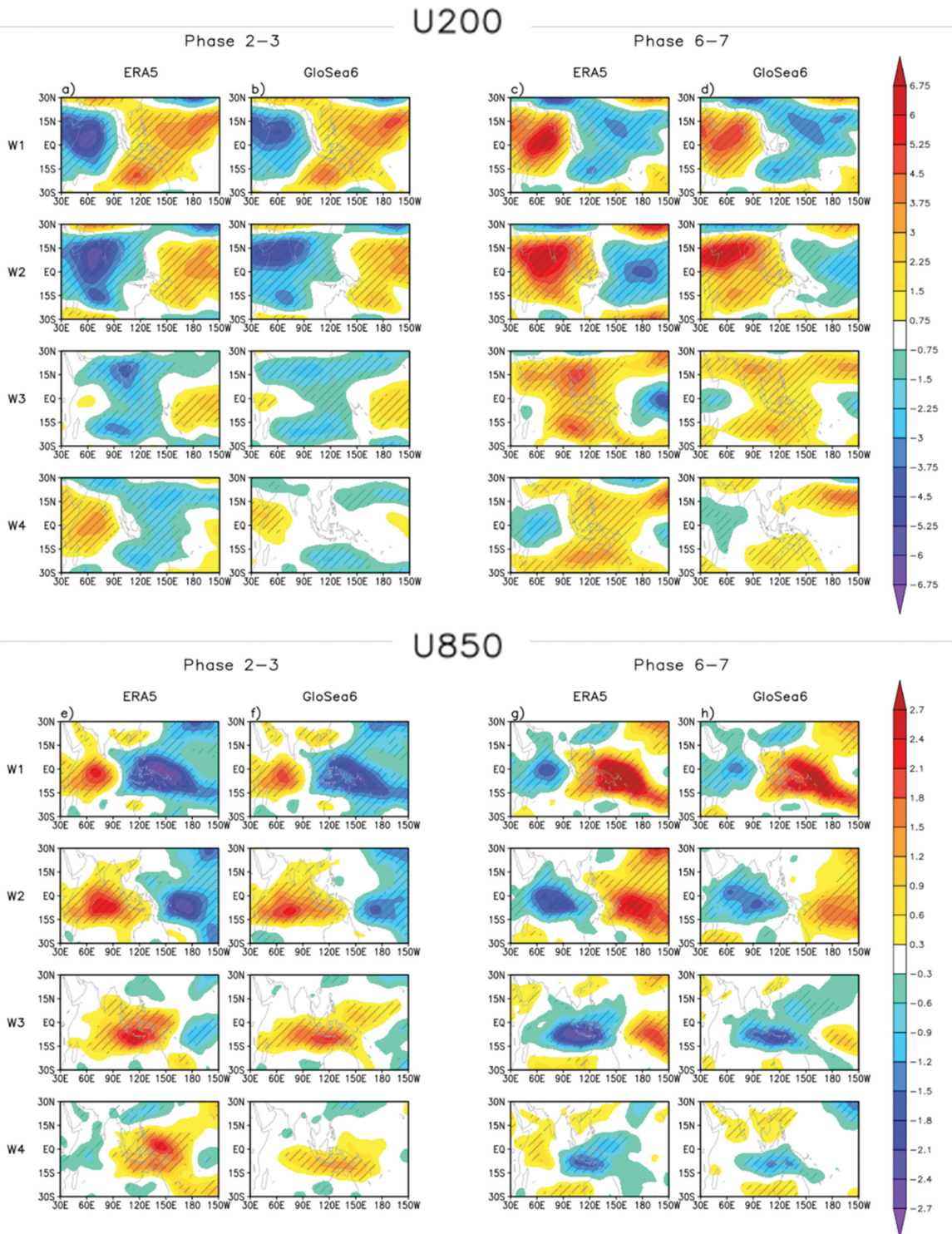


Fig. 8. Groups of panels (a-d) and (e-h) are same as Fig. 7 but for U200 and U850, respectively.

일하게, GloSea6 모형은 대류 아노말리를 과소모의하며, 특히 예측 3주차부터는 유의미한 신호가 뚜렷이 줄어들어(Figs. 7b, d).

중요한 점은 아노말리의 크기뿐 아니라, 대류 아노말리의 공간 구조에서도 예측 오차가 나타난다는 것이다. GloSea6 모형의 경우 아노말리의 동진을 잘 재현하는 것처럼 보이거나 아열대 아노말리를 과소모의하며 MJO 구조의 남북방향 폭이 관측에 비해 작게 나타난다. 특히 북반구 아노말리 신호는 예측 2주차부터 더 큰 폭으로 약화된다. 이는 북반구 원격상관에 중요한 인자인 북반구 로스비 반응 구조에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 이러한 오차는 MJO 위상 2-3과 6-7에서 동일하게 확인된다(Figs. 7b, d). 이러한 남북방향 구조적 오차는 위도 평균 분석에서는 확인되지 않으며, MJO 예측성을 진단할 때 RMM 지수를 활용하는 경우 계산과정에 위도 평균이 포함됨에 따라 MJO의 수평 구조적 예측 오차를 간과할 수 있음을 시사한다.

수평 구조의 오차는 상·하층 동서바람에서도 확인된다(Fig. 8). 관측에서 MJO 위상 2-3은 발생 2주 이내 동인도양, 해양성대륙에서 상층 발산과 하층 수렴 아노말리가 동반되며(Figs. 8a, e), 위도 평균 결과에 따르면 GloSea6 모형이 이러한 양상을 3주 이상의 예측기간동안 정성적으로 예측하는 것처럼 보인다(Figs. 6b, c). 하지만 수평 구조를 살펴보면, 모형이 예측한 상층 발산 아노말리는 예측 1주차부터 이미 관측에 비해 북반구(약 10°N)에 치우쳐 나타나며, 하층 수렴은 남북방향 구조적 오차가 상대적으로 늦게 나타나지만 OLR과 유사하게 아노말리가 남반구에 치우쳐 나타난다(Figs. 8b, f). 이러한 상·하층 수렴·발산장의 예측 오차는 로스비파 소스(Rossby wave source)와 그에 따른 Gill-타입 로스비 반응을 왜곡시킬 수밖에 없으며, 이에 따라 원격상관 반응에 대해서도 예측 오차가 야기되었을 것으로 추측된다. MJO 위상 6-7에서도 마찬가지로, 관측과 달리 상층 및 하층 아노말리의 중심이 각각 북반구와 남반구로 왜곡된다(Figs. 8c, d, g, and h). 상·하층 동서바람에 대해서도 모형은 전반적으로 아노말리의 크기를 과소모의한다.

결론적으로, MJO 원격상관에 대한 강제력으로서의 MJO를 고려할 때, MJO 지수를 기준으로 측정된 3주 이상의 MJO 예측성(Fig. 1)은 과대평가된 것으로 보인다. GloSea6모형에서 MJO에 대한 동아시아 원격상관 반응의 예측성은 2주에 불과했으며, 이는 MJO 아노말리의 크기와 공간 구조에 대한 예측 오차까지 고려했을 때의 MJO의 예측성은 2주 정도이기 때문으로 보인다. MJO 지수 예측성이 과대평가된 원인은 여러 측면에서 설명될 수 있다. 먼저, 지수 선택에 관계없이 BCOR 진단방법은 관측과 모형의 아노말리 간

부호 일치에 초점을 두기 때문에 모형에서 MJO의 변동폭이 과소모의되더라도 위상이 일치할 경우 예측성이 상대적으로 높게 측정될 수 있다. 또한, RMM 지수는 위도평균 과정을 포함하므로 MJO의 남북방향 구조에 대한 예측 오차를 반영하지 못한다는 근본적 한계가 있다. 나아가 아노말리를 EOF 고유벡터에 투영하여 지수를 산출하는 과정 자체도 현상을 단순화시켜 예측성을 다소 과대평가할 여지가 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 기상청에서 현업운영 중인 GloSea6 모형의 hindcast 겨울철 MJO 및 동아시아 원격상관의 예측성을 평가하였다. MJO 예측성을 진단하기 위해 RMM 지수 예측성 분석과 더불어 OLR과 대류권 상·하층 동서바람에 대한 Hovmöller 도표, 수평장 합성도 분석 등을 수행하였다. 동아시아 원격상관 반응의 경우 하층 순환, 지상 기온 아노말리의 합성도를 분석하고, 원격상관 메커니즘의 예측성을 확인하기 위해 기온 경향 수지 분석등을 수행하였다.

그 결과, GloSea6 모형은 지수 기반 평가에서 약 3주 이상의 MJO 예측성을 보였으나(Fig. 1), MJO 원격상관에 따른 동아시아 순환 및 지상 기온 반응은 실용적인 수준에서 2주 정도까지 예측되는 것으로 나타났다(Figs. 2-5). 다시 말해서, 지수 기반 MJO 예측성과 그 원격상관 영향의 예측성 간에 불일치, 즉 모형이 MJO는 잘 예측하지만 그 영향은 잘 예측하지 못하는 현상이 확인되었다. 이러한 불일치는 실존하는 것이 아니라 진단방법상에서 MJO 예측오차가 과소평가된 데에서 비롯된다. 예를 들어, 기온 경향 수지 분석 결과는 동아시아 기온 예측오차가 원격상관 메커니즘 상의 오차가 아니라 MJO 영향의 부재로부터 주로 기인함을 암시한다(Figs. 5f, h). 실제로 예측 2주차가 넘어가면 MJO와 관련된 상·하층 발산/수렴 및 심층 대류 아노말리의 크기에 대한 예측 오차가 급격하게 증가된다. 특히 OLR의 경우 예측 2주차 이후로는 모형 예측장에서 유의미한 아노말리가 대부분 사라지며, 이 때 상·하층 동서바람(발산/수렴) 아노말리 또한 그 강도가 급격하게 약화된다. 더불어 모든 변수에 대해 MJO 수평 구조에 대한 오차가 다소 존재하며, 상·하층 발산/수렴의 경우 남북방향 중심이 관측에 비해 상층에서는 북반구로, 하층에서는 남반구로 치우치는 경향이 나타난다. 이는 월평균 열대 대류에서는 두드러지지 않는다(Park and Son, 2025). MJO와 관련된 발산/수렴의 오차는 이에 동반되는 Gill-타입 로스비 반응이 GloSea6 모형 내에서 왜곡되고 있음을 암시하며, 이 또한 동아시아 원격상관 반응에 대한 예측오차에 기여했을 것으로 추측할 수 있다.

이렇듯 모형이 MJO에 대한 강도오차, 구조적 오차를 나타내는 경우에도, BCOR 기반 지수 상관계수는 모형의 아노말리 크기보다는 관측과의 부호의 일치률 주로 고려하기 때문에 현상의 변동폭이 작게 예측되는 경우에도 예측성이 과대평가될 수 있다. 실제로, MJO 위상 2-3의 경우 위상 6-7보다 OLR 아노말리의 크기를 더 큰 폭으로 과소모의했음에도, 지수 예측성은 더 높게 나타났다(Figs. 1, 7). 또한, RMM 지수의 경우, 지수 산출 과정에 위도 평균 절차가 포함되므로 위에서 언급한 열대의 남북방향 구조 오차를 반영하지 않는다. 아노말리의 수평 구조가 좀 더 직접적으로 반영되는 진단방법으로서 아노말리 패턴상관계수(APC)를 활용하여 모형 초기화 시기에 MJO가 존재하는 GloSea6 hindcast들에 대한 예측성을 진단해 보았을 때, RMM 지수를 구성하는 모든 MJO 변수의 APC는 예측 1주차부터 RMM의 BCOR보다 현저히 낮은 값을 보이며 APC = 0.5를 기준으로 예측성 1~2주를 나타내었다(Figs. 9a, c, and e). 더불어 관측 대비 모형의 아노말리의 크기까지 함께 고려하여 패턴 회귀계수(APR)를 계산했을 때, GloSea6 모형은 모든 변수에 대해 예측 1주차에 대해서만 0.5 이상의 회귀계수를 나타내어 모형이 MJO와 관련한 아노말리 크

기를 과소모의함을 다시 한번 확인시켜주었다. 이러한 결과는 모형이 동아시아 원격상관에 대해 2주 정도의 예측성을 갖는 것과 일맥상통하다. 즉, 모형에서 중위도 반응에 대한 강제력으로서의 MJO의 예측성을 평가하고자 할 때에는, 지수를 기반으로한 예측성에 더불어 MJO의 강도 및 구조에 대한 예측성능도 함께 고려해야 할 것이다.

본문에서는 논하지 않았으나, GloSea6 모형의 경우 MJO 동진 속도에 대한 예측오차도 다소 존재하는 것으로 보인다. 특히 상·하층의 수렴발산 구조(동서바람)는 예측 2주차부터 아노말리가 과소모의 될 뿐만 아니라 동쪽으로 전파하는 속도가 관측에 비해 상대적으로 빠른 경향이 나타난다(Figs. 6b, d, e, and f). 선행 연구에 따르면 MJO의 동진 속도가 느린 경우 강제력의 체류시간이 길어짐에 따라 원격상관 반응이 더 뚜렷해지는데(Yadav and Straus, 2017; Chen, 2021), 본 연구에서 분석한 GloSea6 모형은 그 반대의 경우로서, 원격상관 반응강도가 과소모의 되는데 이 부분이 일부 기여했을 수 있다.

본 연구는 GloSea6 모형의 정성적·정량적 예측성능을 진단하고, MJO 지수가 표현하는 단순화된 현상에서 나아가 원격상관에 중요한 영향을 끼치는 MJO의 복잡한 특성에 대한 예측성을 함께 평가하였다. 모형 계통적 평균 오차를 보정했음에도 GloSea6 모형에서는 MJO의 크기와 수평구조 오차가 여전히 존재하며, 이는 MJO와 관련한 동아시아 순환 및 기온 변화에 대한 예측성을 제한하는 것으로 보인다. 그러나 MJO가 대체적으로 잘 예측되는 2주 동안에는 동아시아의 원격상관 반응뿐 아니라 이와 관련한 역학과정 또한 정성적으로 잘 예측되며, 이로부터 추후 MJO의 예측성능이 개선될 때 MJO와 관련한 동아시아 기후 변동성의 예측성도 향상될 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 「기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발 사업」(RS-2025-02307979) 및 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2025-25438815)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Chen, G., 2021: Diversity of the global teleconnections associated with the Madden-Julian oscillation. *J. Climate*, **34**, 397-414, doi:10.1175/JCLI-D-20-0357.1.
- Dias, J., and G. N. Kiladis, 2019: The influence of tropi-

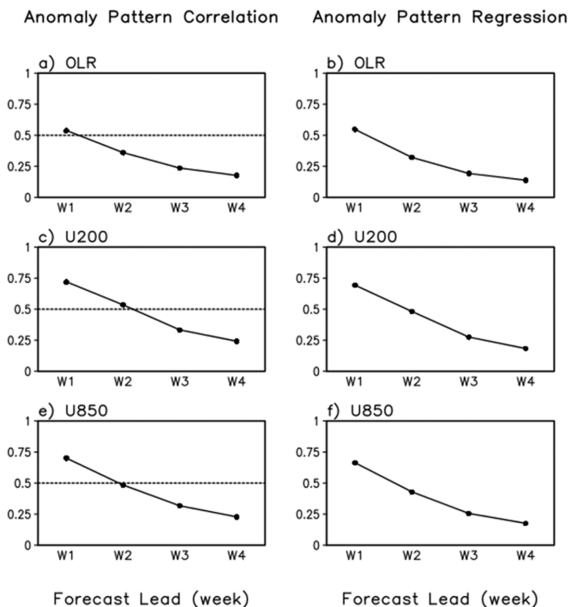


Fig. 9. MJO prediction skill measured by (left) anomaly pattern correlation coefficients and (right) anomaly pattern regression coefficients for the (top) OLR, (middle) U200, and (bottom) U850 anomalies over the tropics (15°S-15°N, 30°E-150°W). Only the hindcasts initialized with MJO in the initial condition are considered.

- cal forecast errors on higher latitude predictions. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 4450-4459, doi:10.1029/2019GL082812.
- Garfinkel, C. I., and Coauthors, 2022: The winter North Pacific teleconnection in response to ENSO and the MJO in operational subseasonal forecasting models is too weak. *J. Climate*, **35**, 8013-8030, doi:10.1175/JCLI-D-22-0179.1.
- Gill, A. E., 1980: Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 447-462, doi:10.1002/qj.49710644905.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Jeong, J.-H., C.-H. Ho, and B.-M. Kim, 2005: Influence of the Madden-Julian oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in east Asia. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **110**, D11104, doi:10.1029/2004JD005408.
- _____, B.-M. Kim, C.-H. Ho, and Y.-H. Noh, 2008: Systematic variation in wintertime precipitation in East Asia by MJO-induced extratropical vertical motion. *J. Climate*, **21**, 788-801, doi:10.1175/2007JCLI1801.1.
- Kim, H.-M., F. Vitart, and D. E. Waliser, 2018: Prediction of the Madden-Julian oscillation: A review. *J. Climate*, **31**, 9425-9443, doi:10.1175/JCLI-D-18-0210.1.
- Kim, H., S.-W. Son, H. Kim, K.-H. Seo, and M.-J. Kang, 2023: MJO influence on subseasonal-to-seasonal prediction in the Northern Hemisphere extratropics. *J. Climate*, **36**, 7943-7956, doi:10.1175/JCLI-D-23-0139.1.
- _____, _____, and C. Yoo, 2020: QBO modulation of the MJO-related precipitation in East Asia. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019JD031929, doi:10.1029/2019JD031929.
- 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**, 341-359, doi:10.14191/Atmos.2021.31.3.341.
- Kim, M., C. Yoo, and H. Kim, 2024: Process evaluation of subseasonal North Atlantic Oscillation prediction in the ECMWF ensemble forecast system. *Geophys. Res. Lett.*, **51**, e2024GL111291, doi:10.1029/2024GL111291.
- Kim, S., J.-S. Kug, and K.-H. Seo, 2020: Impacts of MJO on the intraseasonal temperature variation in East Asia. *J. Climate*, **33**, 8903-8916, doi:10.1175/JCLI-D-20-0302.1.
- Liebmann, B., and C. A. Smith, 1996: Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275-1277.
- Lim, Y., S.-W. Son, and D. Kim, 2018: MJO prediction skill of the subseasonal-to-seasonal prediction model. *J. Climate*, **31**, 4075-4094, doi:10.1175/JCLI-D-17-0545.1.
- Lin, H., 2022: The Madden-Julian oscillation. *Atmos.-Ocean*, **60**, 338-359, doi:10.1080/07055900.2022.2072267.
- Madden, R. A., and P. R. Julian, 1971: Detection of a 40~50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708, doi:10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2.
- _____, and _____, 1972: Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40~50 day period. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123, doi:10.1175/1520-0469(1972)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2.
- Matthews, A. J., B. J. Hoskins, and M. Masutani, 2004: The global response to tropical heating in the Madden-Julian oscillation during the northern winter. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1991-2011, doi:10.1256/qj.02.123.
- Meehl, G. A., and Coauthors, 2021: Initialized Earth System prediction from subseasonal to decadal timescales. *Nat. Rev. Earth Environ.*, **2**, 340-357, doi:10.1038/s43017-021-00155-x.
- Park, C.-H., and S.-W. Son, 2025: Improving subseasonal-to-seasonal prediction of the ENSO-East Asia teleconnection: A dynamical-statistical model approach. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, e70031, doi:10.1002/qj.70031.
- Stan, C., and Coauthors, 2022: Advances in the prediction of MJO teleconnections in the S2S forecast systems. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **103**, E1426-E1447, doi:10.1175/BAMS-D-21-0130.1.
- _____, D. M. Straus, J. S. Frederiksen, H. Lin, E. D. Maloney, and C. Schumacher, 2017: Review of tropical-extratropical teleconnections on intraseasonal time scales. *Rev. Geophys.*, **55**, 902-937, doi:10.1002/2016RG000538.
- Seo, K.-H., and H.-J. Lee, 2017: Mechanisms for a PNA-like teleconnection pattern in response to the MJO. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 1767-1781, doi:10.1175/JAS-D-16-0343.1.
- Tseng, K.-C., E. Maloney, and E. A. Barnes, 2019: The consistency of MJO teleconnection patterns: An explanation using linear Rossby wave theory. *J. Climate*, **32**, 531-548, doi:10.1175/JCLI-D-18-0211.1.
- Vitart, F., G. Balsamo, R. Buizza, L. Ferranti, S. Keeley, L.

- Magnusson, F. Molteni, and A. Weisheimer, 2014: *Sub-seasonal predictions*. ECMWF Tech. Memo., **738**, 1-45, doi:10.21957/6lw4xoik8.
- _____, and Coauthors, 2017: The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 163-173, doi:10.1175/BAMS-D-16-0017.1.
- Wang, B., and H. Rui, 1990: Synoptic climatology of transient tropical intraseasonal convection anomalies: 1975~1985. *Meteor. Atmos. Phys.*, **44**, 43-61, doi:10.1007/BF01026810.
- Wang, W., M.-P. Hung, S. J. Weaver, A. Kumar, and X. Fu, 2014: MJO prediction in the NCEP Climate Forecast System version 2. *Climate Dyn.*, **42**, 2509-2520, doi:10.1007/s00382-013-1806-9.
- Wheeler, M. C., and H. H. Hendon, 2004: An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1917-1932, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2.
- WMO, 2013: Sub-seasonal to seasonal prediction research implementation plan. World Meteorological Organization, 61 pp [Available online at https://wmo.int/sites/default/files/article_bulletin/related_docs/Implementation_plan_V6.4_nolinenos.pdf].
- Yadav, P., and D. M. Straus, 2017: Circulation response to fast and slow MJO episodes. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 1577-1596, doi:10.1175/MWR-D-16-0352.1.
- Zhang, C., 2005: Madden-Julian oscillation. *Rev. Geophys.*, **43**, RG2003, doi:10.1029/2004RG000158.
- _____, 2013: Madden-Julian oscillation: Bridging weather and climate. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1849-1870, doi:10.1175/BAMS-D-12-00026.1.