

Global Coupled 모델 2와 3.1의 MJO 모의성능 평가

문자연¹⁾ · 김기영^{1)*} · 조정아¹⁾ · 양영민²⁾ · 현유경³⁾ · 김백조³⁾

¹⁾(주)포디솔루션 기업부설연구소, ²⁾난징정보과학기술대학교 대기과학과,

³⁾국립기상과학원 기후연구부

(접수일: 2022년 7월 20일, 수정일: 2022년 8월 1일, 게재확정일: 2022년 8월 4일)

Assessment of MJO Simulation with Global Coupled Model 2 and 3.1

Ja-Yeon Moon¹⁾, Ki-Young Kim^{1)*}, Jeong-A Cho¹⁾, Young-Min Yang²⁾,
Yu-Kyung Hyun³⁾, and Baek-Jo Kim³⁾

¹⁾Research Institute, 4D Solution, Co., Ltd., Seoul, Korea

²⁾Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, China

³⁾Climate Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 20 July 2022; revised 1 August 2022; accepted 4 August 2022)

Abstract A large number of MJO skill metrics and process-oriented MJO simulation metrics have been developed by previous studies including the MJO Working Group and Task Force. To assess models' successes and shortcomings in the MJO simulation, a standardized set of diagnostics with the additional set of dynamics-oriented diagnostics are applied. The Global Coupled (GC) model developed for the operation of the climate prediction system is used with the comparison between the GC2 and GC3.1. Two GC models successfully capture three-dimensional dynamic and thermodynamic structure as well as coherent eastward propagation from the reference regions of the Indian Ocean and the western Pacific. The low-level moisture convergence (LLMC) ahead of the MJO deep convection, the low-level westerly and easterly associated with the coupled Rossby-Kelvin wave and the upper-level divergence are simulated successfully. The GC3.1 model simulates a better three-dimensional structure of MJO and thus reproduces more realistic eastward propagation. In GC2, the MJO convection following the LLMC near and east of the Maritime Continent is much weaker than observation and has an asymmetric distribution of both low and upper-level circulation anomalies. The common shortcomings of GC2 and GC3.1 are revealed in the shorter MJO periods and relatively weak LLMC as well as convective activity over the western Indian Ocean.

Keywords: MJO, Global Couple model, Dynamics-oriented diagnostics, Climate prediction system

1. 서론

적도에서 발생하는 계절안 진동(Madden-Julian Oscillation, MJO)은 전구 규모로 동진하고 움직임과

진폭이 비교적 큰 동서 순환으로, Walker 순환과 아주 유사한 구조를 가진다(Madden and Julian, 1971, 1972; Weickmann et al., 1985). MJO는 동서 바람 성분, 해면 기압 등의 역학적인 양이나(Madden and Julian, 1971; Lau and Phillips, 1986), 상향 장파 복사(outgoing longwave radiation, OLR) 및 강수량 등의 분포에서도 뚜렷이 관측된다. 특히 바람 분포에서 중태평양부터 동태평양까지는 비교적 약하지만 거의 전 적도대에서

*Corresponding Author: Ki-Young Kim, 4D Solution, Co., Ltd., 286 Beotkkot-ro, Geumcheon-gu, Seoul 08511, Korea.
Phone: +82-2-878-0126, Fax: +82-2-6954-0126
E-mail: kiyoungkim3@4dsolution.co.kr

나타나고, OLR과 강수량의 분포에서는 주로 인도양과 서태평양에 한정되어 나타나는 특징이 있다 (Weickmann et al., 1985; Knutson and Weickman, 1987). 약 30-60일 주기를 가지는 MJO는 서인도양에서 시작해 느린 속도로 적도선을 따라 서태평양쪽으로 이동하는 대류 요란과 관련된 변화인데(Madden and Julian, 1971, 1972), 높은 온도를 보이는 해수면상의 대기에서 발생하는 대기 내부의 역학적 현상으로 파악되고 있다. 계절의 연주기 분포에 따라 강도와 위치가 변화하며 아시아 몬순뿐만 아니라 전세계 기상, 기후, 그리고 극한현상까지 원거리 영향력을 가진다(Zhang, 2013).

MJO는 기상과 기후를 이어주는 시간 규모에서 발생하기 때문에 단기에서부터 장기까지 이음새 없는 예보를 위해 예측성이 낮은 계절내(subseasonal) 예보 분야에서 중요하게 고려되고 있는 예측인자이다(Waliser et al., 2003). Wheeler and Hendon (2004)은 MJO의 전파를 추적하고 예측하기 위해 Real-time Multivariate MJO (RMM) 지수를 개발하였다. 여러 연구기관 및 현업기관에서 이 지수를 활용하여 MJO 관련 예측정보를 제공하고 있다. 현업 예보를 하고 있는 기관에서 과거 재현 자료를 이용하여 MJO를 가장 우수하게 예측한 경우 그 한계가 10-34일(겨울의 경우 14-42일)로 알려져 있다(Waliser et al., 2003; Kim et al., 2018). 이러한 한계를 극복하기 위해 계절내 예측성 향상을 위한 지속적인 모델의 개선이 요구되며 동시에 모델의 모의성능을 정확하게 평가하여 문제점과 원인을 파악하는 것이 필요하다.

MJO 모의성능을 객관적으로 그리고 정량적으로 진단하기 위해 WMO 산하 MJO Task Force 팀(이전, US CLIVAR MJO Working Group)에서는 물리적인 프로세스 기반 MJO 진단 매트릭스를 개발하였다(MJOWG, 2009; Ahn et al., 2017; Wang et al., 2020). CMIP5에 참여한 모델들을 대상으로 대류권 하층 수증기 수송 과정을 진단하는 매트릭스를 적용한 결과, 모델의 MJO 성능을 개선하기 위해서는 대류과정에서 수증기량의 변화를 잘 표현하는 것이 매우 중요함을 제안하였다(Kim et al., 2014). 또한, Wang et al. (2018)은 역학적인 과정과 관련되어 있는 MJO 성능을 진단할 수 있는 방법을 추가로 개발하였다. 이들은 3차원의 역학적 그리고 열역학적 MJO 구조를 잘 모의하는 모델이 동쪽으로의 전파를 성공적으로 모의할 수 있음을 제시하였다.

기상청에서는 전지구 기후예측시스템(Global Seasonal forecasting system version 6, GloSea6)을 2021년 말부터 현업 운영을 시작하였다. 그 이전 버전인 GloSea5는 Global Coupled (GC) Model v.2 (GC2), GloSea6는 GC3.2가 각각 적용되었다(Kim et al., 2021a). 새

로운 현업시스템에 대한 MJO 모의성능을 평가하는 것은 연구자들에게 현업시스템의 특성에 대해 알려주어 향후 이 자료를 활용한 연구에 도움을 줄 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 위에서 소개한 프로세스 기반 MJO 진단 매트릭스를 GC모델의 개선에 따른 두 버전에 적용하여 MJO 모의 성능을 진단 비교하였다. 이를 통해 새로운 현업 기후예측시스템의 계절내 예측성과 그 향상 정도를 평가하고자 한다. 한편, 본 연구가 시작된 시점이 기상청 현업모델인 GC3.2-GloSea6가 구축되기 이전이기 때문에, 본 논문에서는 GC3.2 대신 GC3.1을 사용하였다. GloSea6는 기본적으로 GC3.1을 기반으로 하나, 해양모델과 해빙모델은 동일한 채 다층적설모수화 등 대기와 지면모델에서만 약간의 추가적인 개선이 이뤄진 GC3.2를 적용한 것이어서 이 두 버전은 거의 동일한 과학적 구성으로 볼 수 있으므로(Hyun et al., 2022), 본 연구의 GC3.1의 분석 결과는 현업예측시스템 GloSea6에 대한 결과로 유추할 수 있을 것이다. 2장은 연구에서 사용된 재분석 자료와 모델에 대한 설명이 작성되었고 3장은 프로세스 기반 MJO 매트릭스 진단 방법을 적용하여 GC2와 GC3.1의 모의결과를 비교해 제시하였다. 4장에서 결과를 요약하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 관측(재분석) 자료

열대지역의 대류활동 분석을 위해 NOAA interpolated OLR의 일 평균 자료를 사용하였다(Liebmann and Smith, 1996). 비습, 바람은 Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalysis (ERA5) 재분석(이후, 관측 또는 OBS)을 사용하였다(Bell et al., 2020). MJO의 계절적 의존도로 인해 열대지역 동서 구조가 가장 활발한 1979-2018년 겨울철(11월-4월, NDJFMA) 기간에 대해 분석하였다. 수평해상도는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 로 내삽하였다.

2.2 모델자료

영국 기상청에서 개발한 결합 모델인 GC2는 Global Atmosphere 6.0과 Global Land 6.0 (GA6.0 and GL6.0; Walters et al., 2017), Global Ocean 5.0 (GO5.0; Megann et al., 2014), Global Sea Ice 6.0 (GSI6.0; Rae et al., 2015)으로 이루어져 있으며, GC3.1은 Global Atmosphere 7.1과 Global Land 7.0 (GA7.1 and GL7.0; Walters et al., 2019), Global Ocean 6.0 (GO6.0; Storkey et al., 2018), Global Sea Ice 8.1 (GSI8.1; Ridley et al., 2018)로 이루어져 있다. Williams et al. (2018)과 Kim et al. (2021b)에 의하면, GC2와 GC3.1의 차이는 모델 구성이며 구름, 복사, 해빙 매개변수 및 에어로졸 scheme

등의 개선으로 남극해의 해수면 온도와 대기모델 구름 모의에 대한 예측성이 향상되었다. 대기모델에서는 복사 플럭스 모의를 크게 개선해 대류 권계면에서의 기온 오차를 개선하는 효과가 나타났고, warm rain 강수물리과정의 새로운 모수화 방안(Boutle et al., 2014)을 채택해 비습 개선에 영향을 주었다. 또한, 6A convection scheme을 새롭게 도입해 적운 모수화 과정이 개선되었다. 모델의 분석 기간 및 수평해상도(대기: N216, 해양: ORCA025L75)는 관측 자료와 동일하게 내삽하여 적용하였다. GC3.1에 대한 보다 상세한 설명은 이 버전과 큰 차이가 없는 GC3.2-GloSea6를 자세히 기술한 Kim et al. (2021a)를 참고할 수 있다.

Hyun et al. (2022)에 의하면, GloSea5에서 GloSea6로 업그레이드 됨에 따라 열대, 중위도 대류권계면과 성층권에서 음의 지위고도 오차, 대류권 기온의 한랭 오차, 적도 대류권에서의 건조 오차가 감소하였으며, 적도 해수면 온도의 한랭 오차와 남반구해수면 온도의 온난 오차가 개선되어, 해양에서의 주요 기후변동 모드들의 모의에 긍정적인 영향을 간접적으로 유추하였다.

2.3 MJO 지수 및 진단방법

모델의 MJO 성능 진단을 위해 두가지 방법으로 자료를 생산하였다. 첫번째는 Wheeler and Hendon (2004)에 따라 분석 기간의 일별 기후값과 연별 계절 주기를 제거하고 120일 이동 평균을 다시 제거하여 아노말리를 계산하였다. 두번째는 Lanczos window (Duchon, 1979)를 이용한 band-pass filter를 통해 20-70일로 분리된 아노말리를 생산하였다. 각각의 자료는 Unfiltered와 Filtered로 구분하고 Unfiltered 자료를 이용하여 모델자료의 기본성능을 분석한 뒤, Filtered 자료를 이용하여 MJO 프로세스를 자세하게 분석하였다. 20-70일로 분리된 상층과 하층 동서바람(U200, U850), 그리고 상향장파복사(OLR)로부터 열대지역 남북 영역(15°S-15°N) 평균하여 다변량(Multivariate) EOF 분석을 수행하였다. 모델과 관측자료에 대해 각각 주요 모드인 EOF1과 EOF2로부터 RMM1 (PC1)과 RMM2 (PC2)를 계산하여 MJO 지수(Wheeler and Hendon, 2004)를 산출하였다. 최종적으로 산출된 분석기간(1979-2018년 겨울)의 일별 아노말리와 MJO 지수에 의해 생산된 합성장을 이용하여 모델에서 모의하는 MJO의 열역학 또는 역학적인 구조를 진단하였다. 이때, MJOWG (2009), Wang et al. (2018), 그리고 Wang et al. (2020)에서 제시된 여러가지 방법들 중 제한적인 모델자료로부터 도출될 수 있는 진단 방법들을 선택하여 정량적/정성적인 진단결과를 다음과 같이 계산하였다.

(1) MJO 주기 모의성능: 열대지역(10°S-10°N) OLR

의 wavenumber power spectrum을 계산하여 MJO 영역(25-100일, 1-3 파수)에 대해 평균하여 계산한다.

- (2) MJO 지수의 Coherency 성능: RMM1과 RMM2의 시간-지연 상관계수를 계산하여 최댓값과 최솟값의 절대값을 평균하여 계산한다.
- (3) MJO 동진전과 모의성능: MJO가 인도양 서부에서부터 중태평양까지 동쪽으로 전파해가는 과정을 인도양 서부(West of Indian Ocean, W-IO: 10°S-10°N, 70°-90°E), 인도양(Indian Ocean, IO: 10°S-10°N, 80°-100°E), 서태평양(Western Pacific, WP: 10°S-10°N, 130°-150°E), 해양성 대륙(Maritime Continent, MC: 10°S-10°N, 110°-130°E), 서태평양 동부(East of Western Pacific, E-WP: 10°S-10°N, 140°-160°E) 영역 중심의 OLR 회귀계수로 산출한 관측과 모델의 시간-경도별 전파 패턴의 상관계수를 계산한다.
- (4) 하층 수증기 수송구조 모의성능: 하층(850 hPa) 수증기(비습)의 수송을 계산하여 인도양과 서태평양 중심에서 OLR 회귀계수로 수평장을 산출하고 관측과 모델 사이의 패턴상관계수를 계산한다. 이때 인도양 중심의 경우는 A 구역(15°S-15°N, 50°-160°E)에 대해, 서태평양 중심은 B 구역(15°S-15°N, 100°E-150°W)에 대해 계산한다.
- (5) 상층 발산 바람구조 모의성능: 상층(200 hPa) 바람의 발산/수렴을 계산하여 (4)와 같은 방법으로 산출한다.
- (6) 하층 바람구조 모의성능: 하층(850 hPa) 동서바람을 (4)와 같은 방법으로 산출한다.

3. 결 과

3.1 MJO 주기 및 MJO 지수 Coherency 모의성능

Figure 1은 Wavenumber-frequency power spectrum 구조 및 MJO 영역(25-100일, 1-3 동서 파동수)에서 계산된 MJO 주기를 나타낸다. 2장에서 설명한 바와 같이 필터를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우로 구분되어 있으며 MJO 공간-시간 규모에서의 특징을 볼 수 있다. MJO OLR의 동진 파동 최대값은(Figs. 1a, d) 30-60일과 동서 파동수 1-2의 범위에서 필터 적용 여부와 상관없이 나타난다. 네모 박스의 MJO 영역에 대해 평균하게 되면 Unfiltered의 경우 약 43일, Filterd의 경우 약 41일로 두 경우 모두 약 40일의 MJO 주기에서 뚜렷하게 구분되는 것을 알 수 있다. 모델에서는 Unfiltered의 경우 최댓값 위치가 100일 이상의 장 주기에서 나타나고 약 25일 미만의 주기까지 관측보다 넓은 범위에서 진동이 관찰된다. 또한 서진하는 로스비 파의 영향력이 관측과 달리 모델에서 강한 것

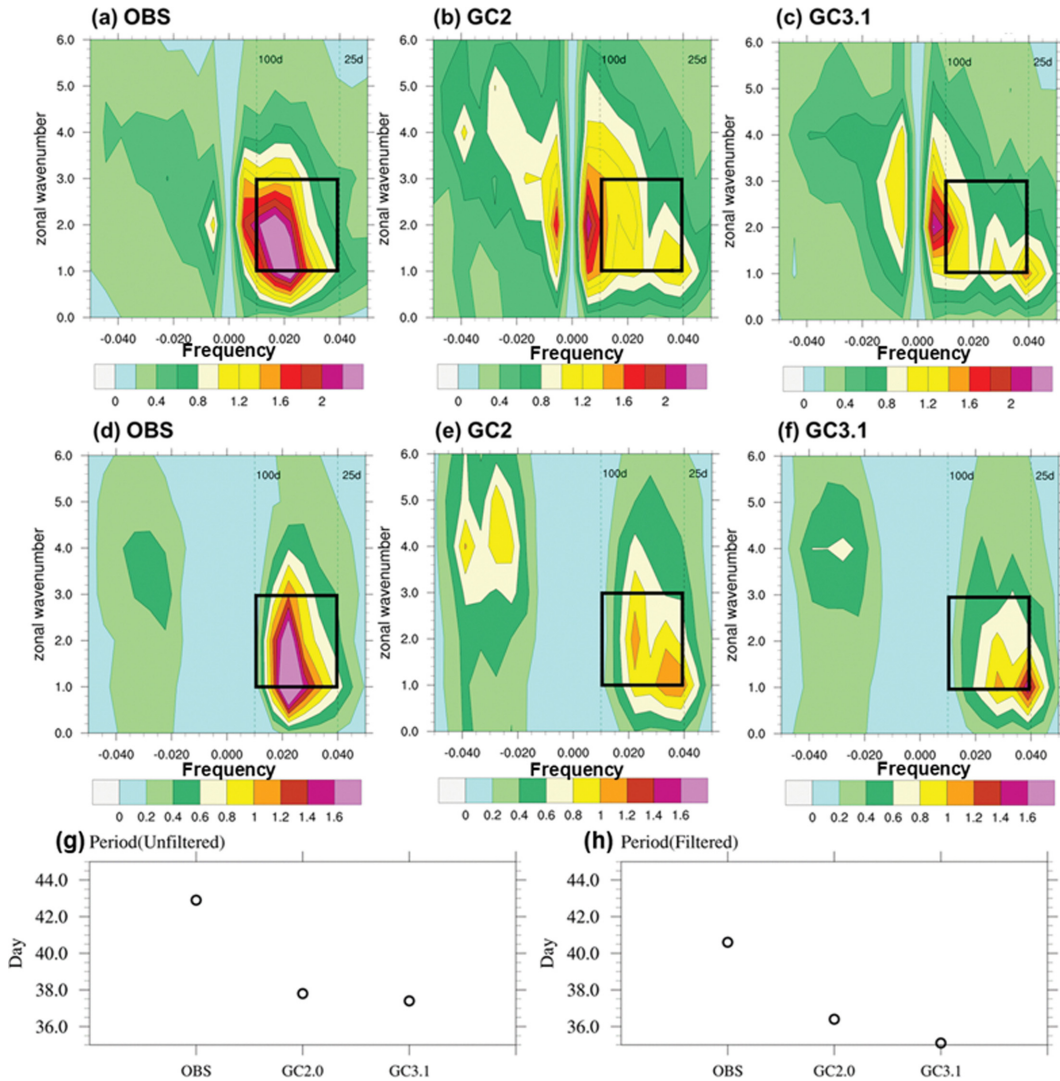


Fig. 1. Wavenumber-frequency power spectra of 10°S-10°N averaged OLR (unit: W^2m^{-4} per frequency interval per wavenumber interval) for (a) (d) OBS, (b) (e) GC2, and (c) (f) GC3.1 models. Dotted lines are drawn at frequencies corresponding to 25 and 100 days. The black box is the band where the MJO period from (g) unfiltered (a-c) and (h) filtered (d-f) OLR is calculated.

으로 분석된다. 필터를 하게 되면 관측과의 차이가 감소하지만 MJO 영역에서의 스펙트럼 강도는 모델이 관측의 20% 정도만 모의한다. 동진 파동 대비 서진 파동의 크기 비율이 모델에서 크게 나타나며 특히 GC2에서 더 큰 오차가 발생한다. 관측에서 동서 파동수 1-3 범위에서 나타나는 스펙트럼 최대값이 모델에서는 1-2 범위에 집중되며 GC2보다 GC3.1에서 더 뚜렷하게 나타난다. 필터를 적용했을 때 두 모델에서 모두 짧은 규모(약 25일)에서 최대값이 위치하는 것을 알 수 있다. MJO 영역에서 모델이 모의하는 주기는 필터하지 않은 경우는 약 37-38일, 필터한 경우는

약 34-37일로 차이는 크지 않다. 그러나 관측과 비교하면 약 5-7일 이상 진동 주기가 짧게 나타나며 강도 또한 약하게 모의하고 있다.

Figure 2는 MJO RMM1과 RMM2 지수 사이의 시간-지연 상관을 시계열로 나타낸 것으로 MJO의 동쪽 전파가 얼마나 일관되게 진동하는지에 대한 성능을 알아볼 수 있다. Coherency 값이 낮을수록 RMM 지수 간 관련성이 낮아 일정한 속도로 동진하는 구조가 발생하기 어려움을 뜻한다. Figure 2a 관측에서 10일 전에 가장 높은 상관계수 값(filtered: 0.8, unfiltered: 0.6)이 나타나고 이로부터 약 19일 후에 가장 낮은 값

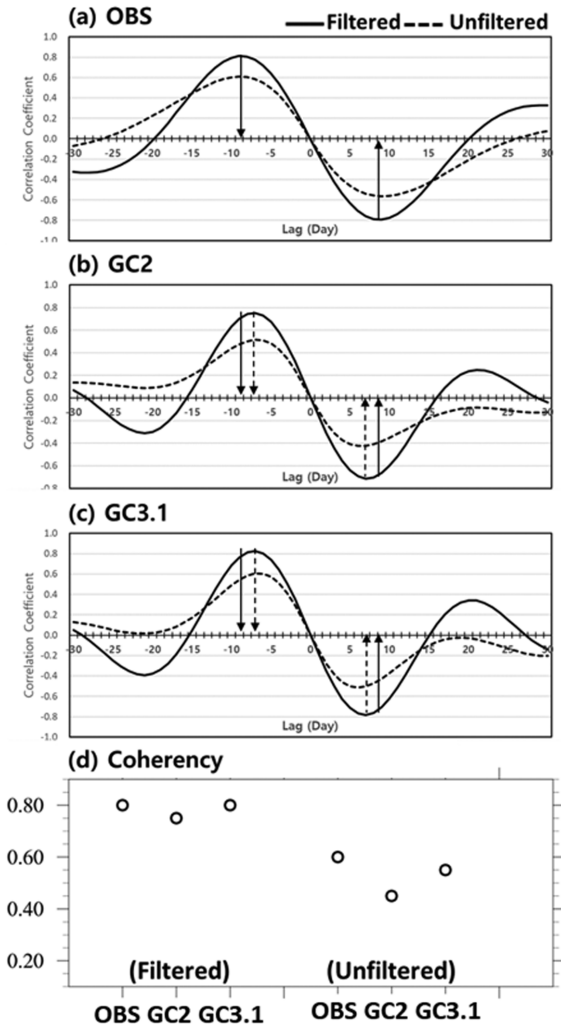


Fig. 2. The lead-lag correlation between RMM1 and RMM2 indices by filtered (solid line) and unfiltered (dashed line) data from (a) OBS, (b) GC2, and (c) GC3.1 models. MJO coherency is plotted with open circles in (d). The solid and dashed arrows indicate the maximum and minimum values from the OBS and models, respectively.

(filtered: -0.8 , unfiltered: -0.6)이 나타난다. Coherency는 필터 적용 및 적용 전의 값이 모두 약 0.8 과 0.6 의 높은 값으로 MJO 전파의 진동성이 매우 일관되게 나타나고 있음을 보여주는 결과이다. 모델의 경우도 관측과 유사한 결과를 보여준다. 필터를 적용한 경우 $20-70$ 일 밴드 안에서의 진동성이 강조되어 관측과 더 유사한 결과를 보이며 약 0.8 의 Coherency 값이 산출되었고 필터 적용하지 않은 경우 관측 대비 차이가 발생하여 약 $0.5-0.6$ 의 값으로 나타난다. GC3.1이 GC2

에 비해 필터 적용 전후 모두 Coherency 값에서 더 작은 오차를 보여준다.

Figures 1과 2로부터 관측에 비해 모델은 MJO 주기를 약 5-7일 짧게 모의하며 MJO가 동쪽으로 전파함에 있어 GC2 보다 GC3.1에서 더 일관된 진동성을 갖고 전파하는 특성이 있음을 알 수 있다.

3.2 MJO 동진 전파 모의성능

인도양과 서태평양 중심에서의 Filtered OLR 시계열을 기준으로 대류 활동과 하층 수증기 수송의 시간-지연 회귀계수를 분석하였다. 인도양 중심지역(Fig. 3a)에서 OLR은 약 5 m s^{-1} 의 속도로 동진하며 해양성 대륙 지역에서 잠시 동쪽으로 전파의 소강상태를 보이다가 다시 서태평양, 날짜변경선까지 동진 패턴을 유지한다. 서태평양 중심(Fig. 3b)에서 보면 인도양에서 출발한 OLR이 서태평양에서 강화되어 점차 동진하여 소멸하는 과정을 보여준다. 모델에서도 이러한 패턴이 인도양과 서태평양 기준에서 관측과 유사한 강도로 모의하고 있다. 대부분의 기후모델에서 나타나는 MJO 모의 성능의 한계(Jiang, 2017; DeMott et al., 2018; Yang et al., 2021)는 해양성 대륙에서의 MJO 전파 불연속점(120°E)의 존재인데 GC2와 3.1에서는 이러한 부분이 개선되었음을 확인할 수 있다. 관측에 비해 해양성 대륙에 가까워질수록 OLR이 약화되는 모습이 두 모델에서 나타나지만 GC3.1은 관측과 좀 더 유사하게 강도가 표출되고 중태평양까지 대류 구역이 위치한다. 관측에 비해 짧은 시간에 동진하였다가 빨리 쇠퇴하는 구조는 두 모델 모두의 주요 차이점으로 확인된다.

MJO 대류 구역의 전면에는 하층 저기압성 순환의 소용돌이로부터 다량의 수증기가 유입된다. 이로 인해 대류권 하층의 수증기량이 증가하게 되어 적운형 구름이 점진적으로 발달하면서 MJO의 동진 전파에 유리한 조건으로 작용한다(Kim et al., 2014; Ahn et al., 2020). 모델에서 이러한 특징이 모의되고 있는지 확인하기 위해 Figs. 3a-b와 동일한 방법으로 하층 수증기 수송(음영)을 표시하고, 비교를 위해서 Figs. 3a-b의 OLR을 실선으로 중첩하여 Figs. 3c-d에 제시하였다. 인도양 중심구역에서 동진하는 대류 활동의 전면에서 수증기 수송이 약 5일의 시간차를 두고 먼저 발생하여 해양성 대륙 지역을 지나 서태평양에서 다시 강화되었다가 점차 쇠퇴하는 모습을 관측에서 확인할 수 있다. 모델에서도 유사한 패턴이 관찰되지만 GC2에서는 서인도양과 해양성 대륙 지역에서 수증기 수송이 매우 약한 것을 확인할 수 있고 인도양과 서태평양 중심에서 모두 OLR과의 시간지연 차이가 관측에 비해 뚜렷하게 구분되지 않는다. 즉, 해수면온도가 높고 많은 양의 수증기가 존재하는 인도양과 서태평

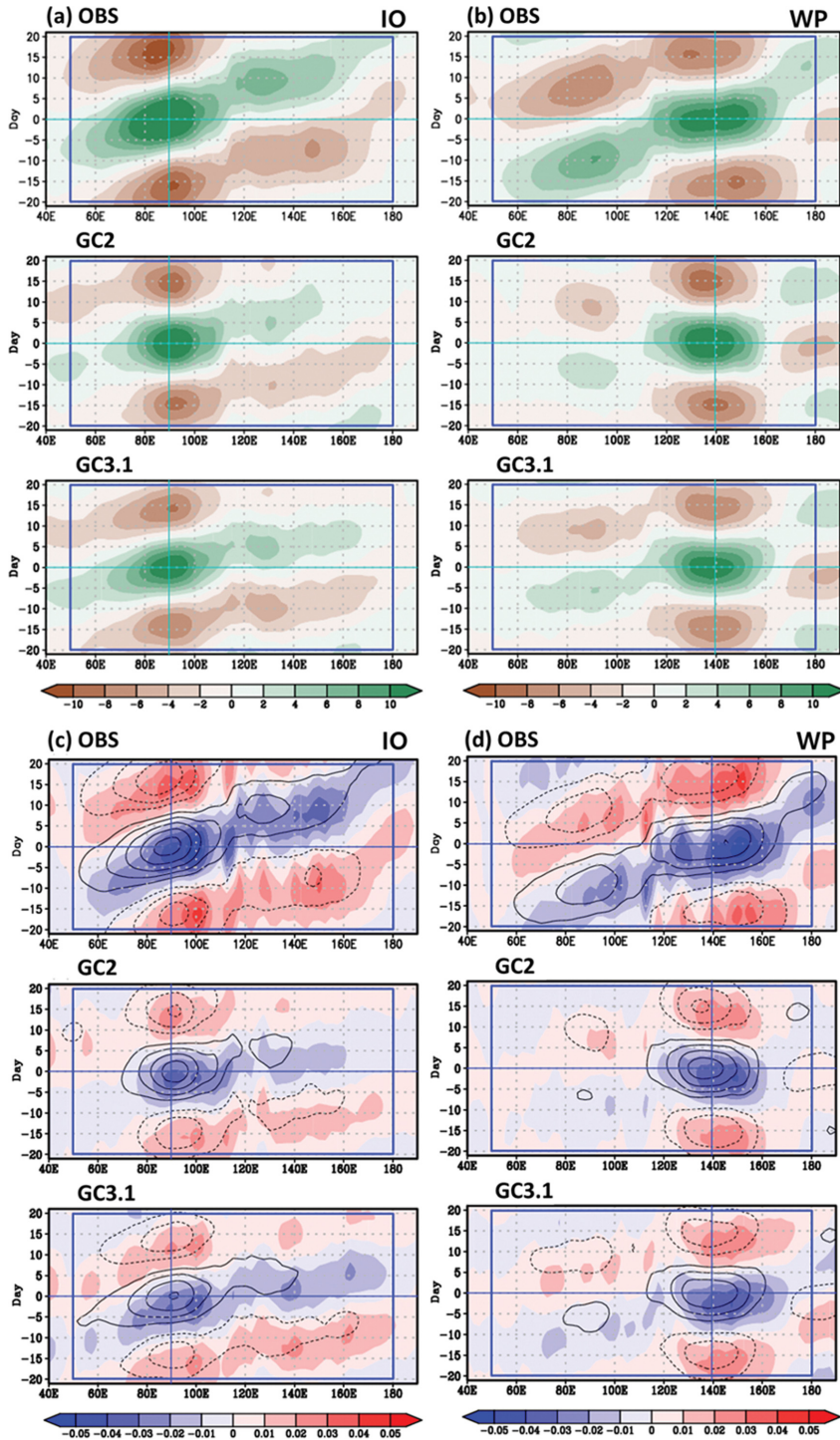


Fig. 3. Eastward propagation of MJO (a) (b) OLR anomalies (Unit: Wm^{-2}) and (c) (d) 850 hPa moisture convergence (shading, Unit: $10^{-4}s^{-1}$) with OLR anomalies (contour) as indicated by the lead-lag regression of 20-70-day filtered OLR averaged over $10^{\circ}S-10^{\circ}N$. The reference regions are equatorial (a) (c) Indian Ocean (IO: $10^{\circ}S-10^{\circ}N, 80^{\circ}-100^{\circ}E$) and (b) (d) western Pacific (WP: $10^{\circ}S-10^{\circ}N, 130^{\circ}-150^{\circ}E$) during NDJFMA: (top) OBS, (middle) GC2, (bottom) GC3.1 models.

양 중심 지역이 아닌 경우는 충분한 양의 수증기 수송이 이루어지지 않은 상태로 대류 구역이 동진하기 어려운 조건이 될 수 있다. 반면, GC3.1에서는 이러한 오차가 개선되면서 서인도양에서부터 중태평양까지 수증기 수송이 지속적으로 동진하여 OLR에 앞서 발생한다. GC2 대비 GC3.1의 개선사항으로 Hyun et al. (2022)은 해양성 대륙에서의 하층 수분량과 수평 경도가 관측과 유사하게 개선된 점을 보여주었고, Williams et al. (2018)은 적도 지역의 전반적인 SST의 오차가 개선되면서 해양성 대륙에서의 온도가 1K 상승함에 따라 대류권 하층의 비습이 증가하였음을 언급하였다. 이로부터 Figs. 3a-b에서 MJO 대류 활동의 동진 성능이 GC3.1에서 개선된 점은 하층 수증기 수송의 개선과 관련되어 있음을 가늠해 볼 수 있다.

지역을 세분화하여 인도양 서부, 해양성 대륙, 그리고 서태평양 동부 중심에서의 MJO 동진 전파 성능을 10°S-10°N, 50°E-180° (Fig. 3 박스) 영역에 대해 산출하여 Fig. 4에 제시하였다. 하층 수증기 수송(상단)은 OLR (하단) 보다 약 0.1-0.2 낮은 성능으로 나타나고, 해양성 대륙과 서태평양 중심에서 GC3.1 모델이 GC2 보다 더 좋은 성능을 보인다. 인도양 중심의 경우 수증기 수송 패턴이 GC2에서 높게 나타나고 OLR도 동일한 결과를 보인다. 두 모델 간의 성능 차이는 0.1 미만으로 크지 않지만 수증기 수송과 OLR의 성능 변

화가 일관되게 나타나는 것은 의미가 있다. 인도양에서부터 해양성 대륙까지 수증기 수송의 점진적인 수렴 및 이동과 함께 대류 구역이 이동하며 시간지연 상관이 나타나는 점과 해양성 대륙에서부터 서태평양 지역까지 다시 다량의 수증기 유입과 대류성 구름의 발달로 인한 정체 이후 빠른 속도로 쇠퇴하는 과정 등이 모델에서 유사하게 모의되고 있으며 지역별 세분화를 통해 모델의 개선여부를 알 수 있다.

인도양 중심에서 GC2에 비해 GC3.1의 다소 약한 대류 활동과 관측에 비해 빠른 위상 전파 등의 오차가 있지만 해양성 대륙에서 수증기량의 증가와 서태평양 중심에서 강도의 개선 등으로 전반적인 MJO의 성능은 GC3.1에서 향상된 것으로 간주할 수 있다.

3.3 MJO 상·하층 구조 모의 성능

관측에서 밝혀진 MJO의 열역학-역학적인 3차원 구조는 대류권 하부 경계층에서 발생하는 저기압성 요란으로부터 대류성 구름의 중심이 동쪽으로 이동할 때 MJO 대류 활동의 전면에 대류권 하층 수증기량의 증가, 대류권 하층에서 극으로 향하는 바람, 이로부터 발생하는 수증기 이류, 그리고 이어지는 적란운의 발달과 적란운 상층에 모우 구름의 형성으로 이루어져 있다(Kim et al., 2014; Wang et al., 2016).

MJO의 수평 및 연직 구조를 진단하기 위해 하층에서 수송되는 수증기(비습)의 수평적 구조와 상층 발산 및 바람의 수평적 구조를 Figs. 5와 6에 제시하였다. Figure 5에서 음의 값으로 나타나는 수렴 구역은 인도양(a)과 서태평양(b) MJO의 대류 최대 구역에서 각각 발생하며 동서방향으로 비대칭 구조를 이룬다. (a)의 경우 해양성 대륙을 지나 서태평양까지, (b)의 경우 중태평양 날짜변경선까지 열대수렴대와 남태평양수렴대를 따라 발달한다. 모델에서도 이와 유사한 구조를 보이지만 인도양 중심지역에서 서쪽으로 강도가 약하게 나타나며 150°E 동쪽에서의 수증기 수송이 두 모델에서 관측보다 더 많이 발생한다. 한편, 적도를 중심으로 남북 대칭 구조는 GC3.1이 관측과 더 유사한 구조로 나타나며 인도양 중심에서 동쪽으로 수렴하는 구역도 관측과 가까운 강도로 모의한다. 서태평양 중심구역에서는 북반구 지역의 강도는 두 모델이 관측과 유사하지만 남반구 지역은 GC2에서 더 큰 오차가 발생한다. GC3.1 모델은 수평적인 범위 및 강도에 있어서 관측과 유사한 분포를 보여준다.

Figure 6은 상층(200 hPa) 발산과 바람 벡터의 구조를 Fig. 5와 같은 영역에서 나타내었다. 하층의 수증기 수송은 대류권 하층 비단열 가열 과정과 상호연관성을 가지고 연직 운동의 원인으로 작용한다. Figure 5와 함께 연직으로 발달하는 하층 수렴 - 상층 발산 구조를 관측과 유사하게 모의하는지 비교해 볼 수 있다.

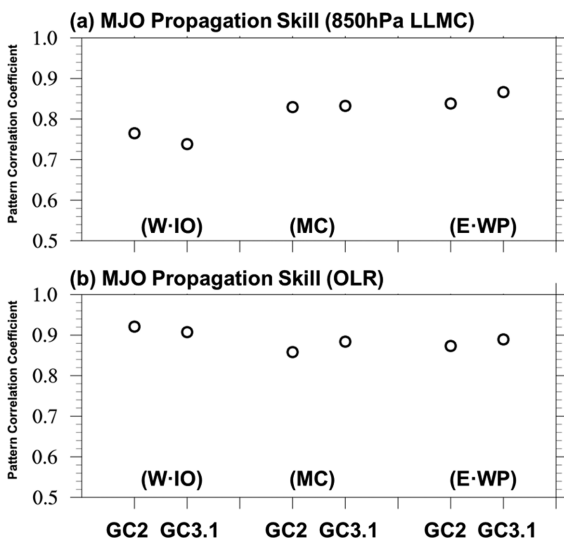


Fig. 4. MJO propagation skill by (a) Low-level (850 hPa) Moisture Convergence (LLMC) and (b) OLR for GC2 and GC3.1 models over the west of the Indian Ocean (W-IO: 10°S-10°N, 70°-90°E), Maritime Continent (MC: 10°S-10°N, 110°-130°E), and east of Western Pacific (E-WP: 10°S-10°N, 140°-160°E).

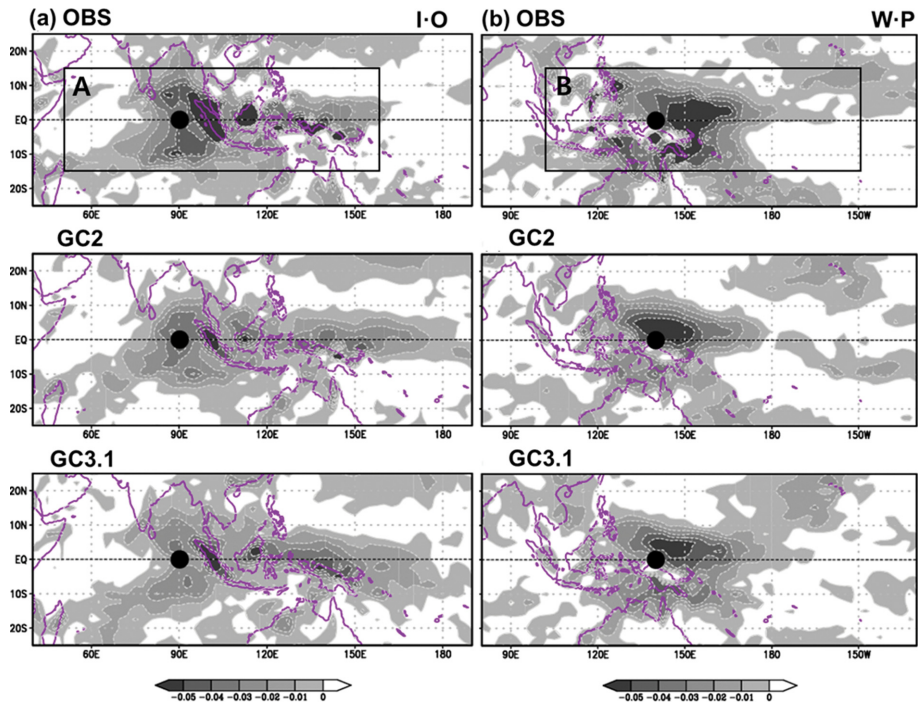


Fig. 5. The regressed 20-70 day filtered low-level (850 hPa) moisture convergence onto the 20-70 day filtered OLR at the equatorial (a) Indian Ocean (IO: 10°S-10°N, 80°-100°E) and (b) Western Pacific (WP: 10°S-10°N, 130°-150°E) by the observation, GC2, and GC3.1 models. The main center is symbolized by the black-filled circle.

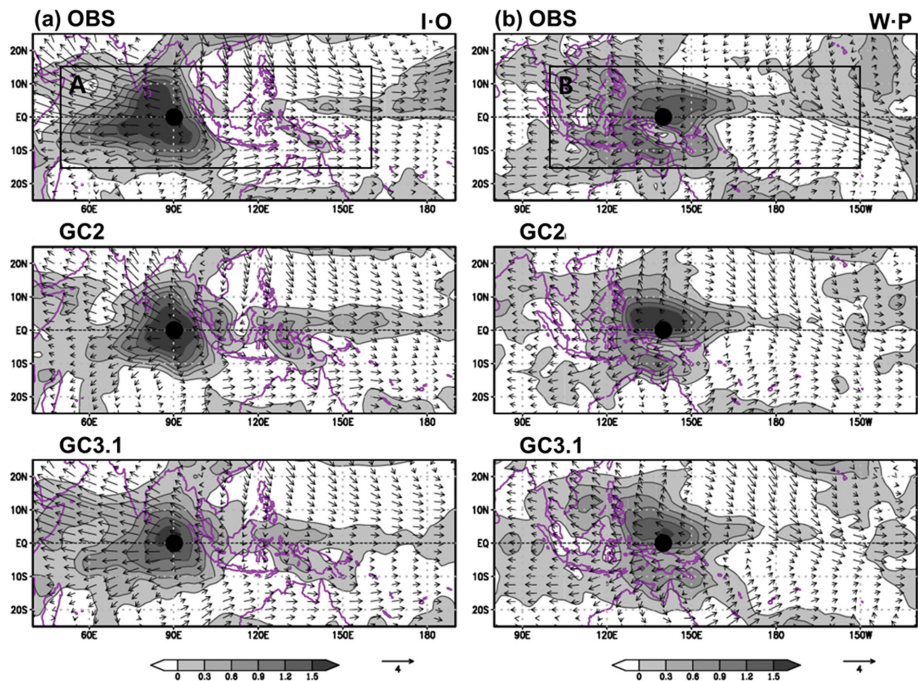


Fig. 6. The same as in Fig. 5, except for 200 hPa wind (ms^{-1} , vector) and divergence (10^{-4} s^{-1} , shading).

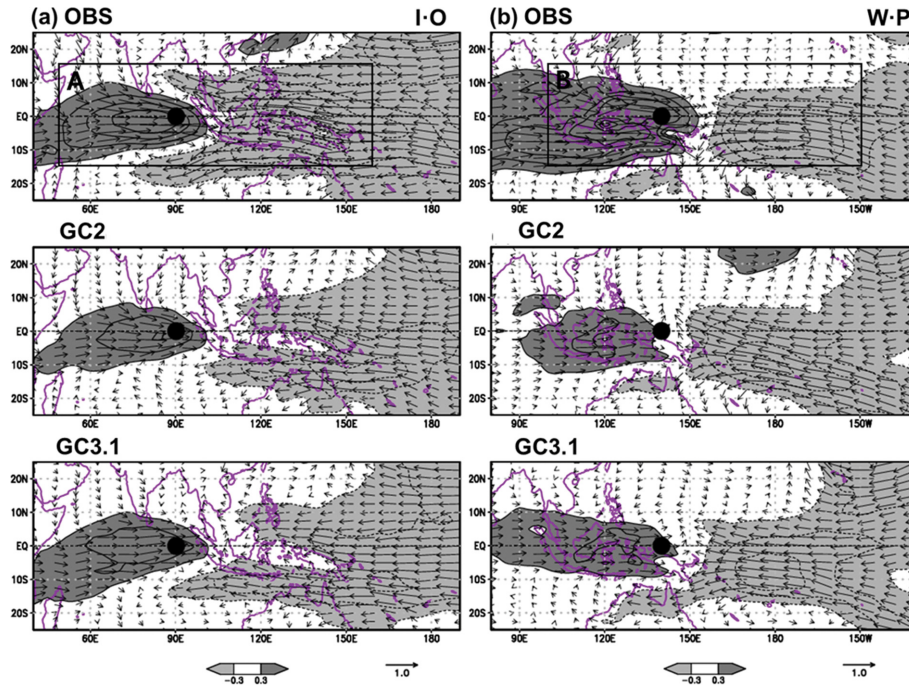


Fig. 7. The same as in Fig. 5, except for 850 hPa winds (ms^{-1} , vector) and zonal wind speed (ms^{-1} , shading).

인도양과 서태평양을 중심으로 MJO 대류 최대 구역의 상공에 양의 값으로 발산 구역이 위치하며 발산 중심의 서쪽 열대 지역에는 동풍, 동쪽에는 서풍이 우세한 구조를 이룬다. 또한 동쪽 서풍에 비해 서쪽 동풍이 비대칭적으로 강하다. 두 모델에서 이러한 특징이 잘 모의되며 하층에서의 비교적 약한 수렴으로 인해 상층에서도 관측에 비해 발산의 크기는 다소 작게 나타난다. 하층에서 남북 대칭 구조가 더 잘 이루어진 GC3.1 모델은 상층 발산 바람도 GC2 모델에 비해 남쪽과 북쪽의 대칭적인 바람의 세기를 잘 모의하고 있다. 서태평양 중심 MJO의 경우 발산 구역의 서쪽에서 강한 동풍이 위치하고 동쪽에서 북반구 겨울철 열대 수렴대의 방향으로 남동쪽의 발산 바람이 우세하게 작용하는 것을 볼 수 있다. 이러한 구조는 특히 GC3.1 모델에서 서태평양 북반구 쪽의 강한 발산 구역과 중태평양 남반구 쪽의 강한 수렴 구역이 특징적으로 표현되어 있다.

Figure 7은 MJO 관련 하층 동서 바람의 구조를 하층 바람 벡터와 함께 표출한 것이다. Wang et al. (2018)에 따르면 MJO 하층 바람의 구조에서 로스비 파와 켈빈 파의 최대 풍속의 비율은 약 0.8이며 동서 범위의 비율은 켈빈 파가 약 2.1배 길게 위치하는데 이는 Fig. 7a 인도양 중심 MJO의 분포에서 확인할 수 있다. 서태평양의 중심에서는(Fig. 7b) 로스비 파와 켈

빈 파의 강도와 범위 차이가 감소하여 대칭의 구조에 가까운 분포를 보인다. 모델에서는 전반적으로 강도 면에서는 모두 약한 경향을 보여주지만, 인도양 중심 서쪽의 남북 방향에서 수렴되어 유도되는 하층 서풍 및 동쪽에서 반대의 위상으로 동풍이 강하게 발달하는 구조는 관측과 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 서태평양 중심에서는 GC3.1 모델에서 관측과 더 유사한 대칭 구조가 모의되는 것을 확인할 수 있다.

모델이 모의하는 MJO 상층과 하층의 구조적 특징을 정량적으로 평가하고 MJO 동진전과 구조성능과의 관련성을 알아보기 위해 Figs. 5-7(하층 수증기 수송, 하층 바람, 상층 발산)의 박스 영역 A (인도양 중심 MJO)와 B (서태평양 중심 MJO)를 기준으로 관측 대비 모델간 패턴상관계수를 x축의 값으로, Fig. 3의 OLR 시간-지연 회귀분포에서 박스 영역($10^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E}-180^{\circ}$)을 기준으로 관측 대비 모델간 패턴상관계수를 y축 값으로 표출하였다(Fig. 8). 하층 수증기 수송, 하층 바람, 그리고 상층 발산의 구조는 관측과 유사한 구조를 모의할수록 MJO 동진 전과 성능 또한 높게 나타나는 일관된 결과가 관찰된다. GC2 모델이 GC3.1에 비해 MJO 중심 구역의 위치(인도양과 서태평양)와 상층 및 하층 변수에 따라 성능의 변화가 더 크게 나타난다. 즉, GC3.1 모델에서 모의하는 MJO의 상층/하층 구조 및 동진 전과 성능이 GC2 보다 안정

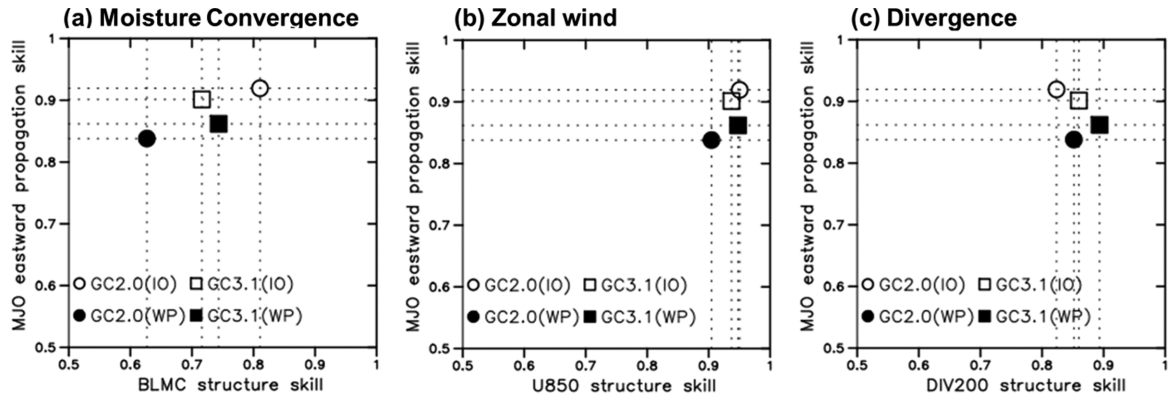


Fig. 8. The relationship between MJO eastward propagation skill and (a) low-level (850 hPa) moisture convergence, (b) low-level (850 hPa) zonal wind, and (c) upper-level (200 hPa) divergence structure skill. The MJO eastward propagation skill indicates the pattern correlation coefficient (PCC) calculated between the GC models and observation in Fig. 3a and 3b (10°S - 10°N , 50°E - 180°). The PCC skill for (a)-(c) are calculated over the Indian Ocean (IO, 15°S - 15°N , 50° - 160°E [rectangle A in Fig. 5a]) and Western Pacific (WP, 15°S - 15°N , 100°E - 150°W [rectangle B in Fig. 5b]).

적인 것으로 판단된다. Figure 8에서 정량적으로 도출된 GC 모델의 MJO 모의 성능은 동일한 방법을 적용하여 계산한(Ahn et al., 2017; Wang et al., 2018; Wang et al., 2020) CMIP5에 참여 모델들과 비교했을 경우에도 매우 우수한 모델의 범주에 속한다.

4. 결 론

이 연구는 S2S (Subseasonal to Seasonal) 기후예측을 위해 사용되고 있는 GC 두 모델의 MJO 모의 성능을 객관적으로 평가하기 위해 열역학-역학적 프로세스 기반의 진단 방법을 적용하여 관측(재분석)과 비교하였다.

열대 지역의 Wavenumber-frequency power spectrum 분석 결과, 두 모델은 공통적으로 관측에 비해 장주기(100일 이상)에서부터 25일 이하 주기까지 넓은 범위에서 나타나고, MJO 영역에서는 스펙트럼 강도가 약하고 약 5-7일 짧은 주기로 발생하였다. MJO RMM1과 2 지수 사이의 시간지연 상관관계로부터, 일관되게 진동하는 MJO의 성능(Coherency)은 20-70일 밴드로 분리하기 전과 후에 모델과 관측 사이의 값이 0.2-0.3의 차이가 있었다. GC2에 비해 GC3.1이 관측에 가까운 값을 보여 MJO 동진 전파에 매우 중요한 진동성의 coherency 성능이 향상된 것을 확인하였다.

인도양과 서태평양 지역에서 발달한 MJO 대류운을 중심으로 하층 수증기 수송과 대류 활동의 시간-지연 회귀계수를 분석한 결과, 대부분의 기후모델에서 나타나는 MJO 모의 성능의 한계 지역인 해양성 대류에 가까워질수록 상관성이 약화되는 모습이 관찰되었다.

하지만 MJO 전파 불연속점(120°E)은 나타나지 않았고 GC2에 비해 GC3.1에서 더 개선되어 해양성 대류에서 중태평양까지 관측과 유사한 동쪽 범위의 확장이 구현되었다. 모델에서는 서인도양에서부터 중태평양까지 MJO가 발달하여 소멸하는 과정이 관측에 비해 빠르게 전개되었으며, 이는 MJO 주기 모의성능에서 나타난 결과와 함께 모델에서 개선되어야 할 부분이라고 판단된다.

MJO 대류 구역의 전면에서 다량의 수증기가 공급되면, 빠르게 진행되는 대류운의 속도를 조절할 수 있다. 이를 확인한 결과, 인도양과 서태평양 중심구역에서 동진하는 대류 활동의 전면에 수증기 수송이 시간차를 두고 먼저 발생하는 모습을 관측에서 확인할 수 있었고 모델에서도 유사한 패턴이 관찰되었다. 하지만 GC2에서는 서인도양과 해양성 대류 지역에서 수증기 수송이 매우 약하였고, 수증기 수송 이후 대류운의 이동에서 시간지연 차이가 관측에 비해 길지 않았다. 반면, GC3.1에서는 이러한 오차가 다소 개선이 되면서 수증기 수송이 지속적으로 이루어지고 대류운과의 시간차이도 연장되었다.

MJO의 수평-연직구조의 역학적인 과정에 대한 모의성능 분석을 위해 인도양과 서태평양 대류운 발생 지역을 중심으로 모델에서 구현되는 하층(850 hPa) 및 상층(200 hPa)의 순환구조와 하층 수증기 수송의 구조를 진단하였다. MJO 대류 구역을 중심으로 하층 수렴과 상층 발산 구역에는 남북으로 대칭구조가, 동서로 비대칭 구조가 발달하며 모델에서도 유사한 패턴이 모의되었다. GC2에 비해 GC3.1은 인도양 및 서태평양 중심구역에서 남북 대칭구조를 더 잘 모의하였

고 해양성 대륙 지역에서의 수증기 수송의 오차가 개선되는 결과를 보였다. 그러나 인도양에서 관측에 비해 하층 수증기 수송이 약하고 상층 발산구역이 동쪽에 위치하는 점은 두 모델 모두 오차로 나타났다. MJO의 하층 바람 구조는 로스비-켈빈 파의 결합된 구조가 특징적인데, 모델에서는 로스비 파와 켈빈 파의 최대 풍속의 비율 및 동서 범위의 비율을 관측과 비슷한 범위로 모의하였다. 하지만 전반적으로 강도가 약하게 나타났고, 이는 하층에서 수송되는 수증기량이 적은 것과 연결되는 것으로 판단된다. 하층의 약한 수증기 수송은 대류에 의한 비단열 가열의 감소에 영향을 주어, 결국 MJO와 관련된 수평 바람장의 강도가 관측보다 약해지는 결과를 초래할 수 있다.

모델이 모의하는 MJO 상층과 하층의 구조적 특징에 관한 성능을 정량적인 결과로 산출하여 동진 전과 모의의 성능과 함께 비교하였다. 하층 수증기 수송, 하층 바람, 그리고 상층 발산 구조의 모의성능이 좋아질수록 MJO 동진 전과 성능 또한 높게 나타나는 일관된 결과가 나타났다. GC3.1 모델에서 모의하는 MJO의 상층/하층 구조 및 동진 전과 성능의 변화폭이 GC2보다 적게 더 안정적으로 나타났다.

본 연구에서 정량적으로 계산한 GC 모델의 MJO 모의의 성능 결과는 관측에 비해 짧은 주기, 해양성 대륙에서의 약한 수증기 수송과 이로부터 유도되는 약한 대류활동과 하층 순환구조, 그리고 상층의 약한 발산 등의 오차가 있었지만 동일한 방법을 적용하여 계산한 CMIP5 참여 모델들과 비교했을 때(Ahn et al., 2017; Wang et al., 2018; Wang et al., 2020) 매우 우수한 모델의 범주에 포함된다. GC2에 비해 다양한 과정에서 향상된 결과를 보인 GC3.1을 기반으로 업그레이드된 기후예측시스템에서의 S2S 예측결과를 기대하며 차기 연구에서는 여름철을 대상으로 한 연구 및 MJO 원격상관의 진단에 관해 진행해 보고자 한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 「기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발사업」(KMI2020-01310)과 2019년도 정부재원(과학기술정보통신부 여성과학기술인 R&D 경력복귀 지원사업, WISET 제 2019-535 WISET 제 2019-535호)의 한국연구재단과 한국여성과학기술인 지원센터의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, M.-S., D. Kim, K. R. Sperber, I.-S. Kang, E. Maloney, D. Waliser, and H. Hendon on behalf of WGNE MJOTF, 2017: MJO simulation in CMIP5 climate models: MJO skill metrics and process-oriented diagnosis. *Climate Dyn.*, **49**, 4023-4045, doi:10.1007/s00382-017-3558-4.
- _____, _____, D. Kang, J. Lee, K. R. Sperber, P. J. Gleckler, X. Jiang, Y.-G. Ham, and H. Kim, 2020: MJO propagation across the Maritime Continent: Are CMIP6 models better than CMIP5 models? *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL087250, doi:10.1029/2020GL087250.
- Bell, B., and Coauthors, 2020: ERA5 hourly data on pressure levels from 1950 to 1978 (preliminary version). Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) [Available online at <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>].
- Boutle, I. A., S. J. Abel, P. G. Hill, and C. J. Morcrette, 2014: Spatial variability of liquid cloud and rain: observations and microphysical effects. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **140**, 583-594, doi:10.1002/qj.2140.
- DeMott, C. A., B. O. Wolding, E. D. Maloney, and D. A. Randall, 2018: Atmospheric mechanisms for MJO decay over the Maritime Continent. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 5188-5204, doi:10.1029/2017JD026979.
- Duchon, C. E., 1979: Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **18**, 1016-1022.
- Hyun, Y.-K., 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).
- Jiang, X., 2017: Key processes for the eastward propagation of the Madden-Julian Oscillation based on multi-model simulations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 755-770, doi:10.1002/2016JD025955.
- Kim, D., and Coauthors, 2014: Process-oriented MJO simulation diagnostic: moisture sensitivity of simulated convection. *J. Climate*, **27**, 5379-5395, doi:10.1175/JCLI-D-13-00497.1.
- Kim, H.-R., J. Lee, Y.-K. Hyun, and S.-O. Hwang, 2021a: 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, 2021b: Assessment on the East Asian summer monsoon simulation by improved Global Coupled (GC) model. *Atmosphere*, **31**, 563-576, 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

- sonal (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).
- Knutson, T. R., and K. M. Weickmann, 1987: 30-60 day atmospheric oscillation: Composite life cycles of convection and circulation anomalies. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1407-1436.
- Lau, K.-M., and T. J. Phillips, 1986: Coherent fluctuations of extratropical geopotential height and tropical convection in intraseasonal time scales. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 1164-1181.
- Liebmann, B., and C.A. Smith, 1996: Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275-1277.
- Madden, R. A., and P. Julian, 1971: Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708.
- _____, and _____, 1972: Description of a global-scale circulation cell in the tropics with a 40-50 day period. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123.
- Megann, A., D. Storkey, Y. Aksenov, S. Alderson, D. Calvert, T. Graham, P. Hyder, J. Siddorn, and B. Sinha, 2014: GO5.0: The joint NERC-Met Office NEMO Global Ocean model for use in coupled and forced applications. *Geosci. Model Dev.*, **7**, 1069-1092, doi:10.5194/gmd-7-1069-2014.
- MJOWG, 2009: MJO simulation diagnostics. *J. Clim.*, **22**, 3006-3030.
- Rae, J. G. L., H. T. Hewitt, A. B. Keen, J. K. Ridley, A. E. West, C. M. Harris, E. C. Hunke, and D. N. Walters, 2015: Development of the Global Sea Ice 6.0 CICE configuration for the Met Office Global Coupled model. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 2221-2230, doi:10.5194/gmd-8-2221-2015.
- Ridley, J. K., E. W. Blockley, A. B. Keen, J. G. L. Rae, A. E. West, and D. Schroeder, 2018: The sea ice model component of HadGEM3-GC3.1. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 713-723, doi:10.5194/gmd-11-713-2018.
- Storkey, D., and Coauthors, 2018: UK Global Ocean GO6 and GO7: A traceable hierarchy of model resolutions. *Geosci. Model Dev.*, doi:10.5194/gmd-11-3187-2018.
- Waliser, D. E., K. M. Lau, W. Stern, and C. Jones, 2003: Potential predictability of the Madden-Julian oscillation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**, 33-50.
- Walters, D. N., and Coauthors, 2017: The Met Office Unified Model Global Atmosphere 6.0/6.1 and JULES Global Land 6.0/6.1 configurations. *Geosci. Model Dev.*, **10**, 1487-1520, doi:10.5194/gmd-10-1487-2017.
- _____, and Coauthors, 2019: The Met Office Unified Model Global Atmosphere 7.0/7.1 and JULES Global Land 7.0 configurations. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 1909-1963, doi:10.5194/gmd-12-1909-2019.
- Wang, B., F. Liu, and G. Chen, 2016: A trio-interaction theory for Madden-Julian oscillation. *Geosci. Lett.*, **3**, doi:10.1186/s40562-016-0066-z.
- _____, S.-S. Lee, D. E. Waliser, C. Zhang, A. Sobel, E. Maloney, T. Li, X. Jiang, and K.-J. Ha, 2018: Dynamics-oriented diagnostics for the Madden-Julian Oscillation. *J. Clim.*, **31**, 3117-3135, doi:10.1175/JCLI-D-17-0332.1.
- Wang, J., H. M. Kim, D. Kim, S. A. Henderson, C. Stan, and E. D. Maloney, 2020: MJO teleconnections over the PNA region in climate models. Part II: Impacts of the MJO and basic State. *J. Clim.*, **33**, 5081-5101, doi:10.1175/JCLI-D-19-0865.1.
- Weickmann, K. M., G. R. Lussky, and J. E. Kutzbach, 1985: Intraseasonal (30-60 day) fluctuations of outgoing longwave radiation and 250mb streamfunction during northern winter. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 941-961.
- 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.
- Williams, K. D., and Coauthors, 2018: The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) Configurations. *J. Adv. Model. Earth Sys.*, **10**, 357-380, doi:10.1002/2017MS001115.
- Yang, Y.-M., T. Shim, J.-Y. Moon, K.-Y. Kim, and Y.-K. Hyun, 2021: Diagnosing ISO Forecast from GloSea5 Using Dynamic-Oriented ISO Theory. *Atmosphere*, **12**, 114, doi:10.3390/atmos12010114.
- Zhang, C., 2013: Madden-Julian oscillation: Bridging weather and climate. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1849-1870, doi: 10.1175/BAMS-D-12-00026.1.