

상부 대류권-하부 성층권 오존이 성층권 준 2년주기 진동과 매든-줄리안 진동 상관성에 미치는 영향: GloSea5 이용 사례

오지영^{1),2)} · 손석우^{1)*} · 백승윤¹⁾

¹⁾서울대학교 지구환경과학부, ²⁾기상청 기후과학국 기후예측과

(접수일: 2022년 6월 28일, 수정일: 2022년 8월 20일, 게재확정일: 2022년 9월 7일)

Influence of UTLS Ozone on the QBO-MJO Connection: A Case Study Using the GloSea5 Model

Jiyoung Oh^{1),2)}, Seok-Woo Son^{1)*}, Seung-Yoon Back¹⁾

¹⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

²⁾Korea Meteorological Administration, Daejeon, Korea

(Manuscript received 28 June 2022; revised 20 August 2022; accepted 7 September 2022)

Abstract Recent studies have shown that Madden-Julian Oscillation (MJO) is modulated by Quasi-Biennial Oscillation (QBO) during the boreal winter; MJO becomes more active and predictable during the easterly phase of QBO (EQBO) than the westerly phase (WQBO). Despite growing evidences, climate models fail to capture the QBO-MJO connection. One of the possible reasons is a weak static stability change in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) by neglecting QBO-induced ozone change in the model. Here, we investigate the possible impact of the ozone-radiative feedback in the tropical UTLS on the QBO-MJO connection by integrating the Global Seasonal Forecasting System 5 (GloSea5) model. A set of experiments is conducted by prescribing either the climatological ozone or the observed ozone at a given year for the EQBO-MJO event in January 2006. The realistic ozone improves the temperature simulation in the UTLS. However, its impacts on the MJO are not evident. The MJO phase and amplitude do not change much when the ozone is prescribed with observation. While it may suggest that the ozone-radiative feedback plays a rather minor role in the QBO-MJO connection, it could also result from model biases in UTLS temperature and not-well organized MJO in the model.

Keywords: QBO-MJO connection, UTLS, Ozone-radiative feedback

1. 서 론

매든-줄리안 진동(Madden-Julian Oscillation, MJO, Madden and Julian, 1971, 1972)은 적도 대류권에서 강한 대류를 동반한 주요 변동모드로써, 인도양 지역

에서부터 서태평양 지역으로 약 30~60일 주기로 동진하는 현상이다. MJO와 관련된 대류 및 순환은 전 지구 날씨 및 기후 시스템과 상호작용하기 때문에, 계절내-계절(Subseasonal-to-Seasonal, S2S) 모델에서 적도 예측성을 향상시킬 수 있는 요소로 여겨진다(Vitart et al., 2017). 뿐만 아니라, 대류에 의한 변동이 파동의 형태 및 원격 상관을 통해서 영향을 주기 때문에 중·고위도 지역의 예측성 향상에도 도움을 줄 수 있다(Zhang, 2005, 2013; Kim et al., 2018).

선행 연구에 의하면 MJO의 대류 활동은 북반구 겨

*Corresponding Author: Seok-Woo Son, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.
Phone: +82-2-880-8147, Fax: +82-2-883-4972
E-mail: seokwooson@snu.ac.kr

울철에 적도 성층권 준 2년주기 진동(Quasi-Biennial Oscillation, QBO)의 위상에 따라 다르게 나타난다(Yoo and Son, 2016; Son et al., 2017; Martin et al., 2021). 특히 겨울철 하부 성층권의 동서 방향 바람 편차 성분이 동풍(EQBO)일 때 MJO 대류가 활발해지고, 반대로 서풍(WQBO)일 때는 대류가 억제되는 경향이 있다. 뿐만 아니라 EQBO 시기의 MJO 전파 속도는 WQBO 시기에 비해 느리고, 지속 시간이 길어지며, 좀 더 서태평양 지역으로 이동하는 경향이 있다. Lim et al. (2019)과 Kim et al. (2019)는 S2S 모델 간의 비교를 통해서 WQBO 시기에 비해 EQBO 시기일 때 최대 10일 정도 MJO의 예측성이 큰 것을 보여주었다. 그러나 이를 설명할 수 있는 명확한 물리적 메커니즘은 아직 밝혀지지 않았다.

QBO와 MJO의 상관성을 결정하는 요인으로 QBO에 의해서 유도되는 정적 안정도 변화(Nie and Sobel, 2015; Son et al., 2017; Hendon and Abhik, 2018; Martin et al., 2019)가 제안되었다. 적도 성층권 50 hPa 동서 바람을 기준으로 EQBO 위상 일 때 2차 순환에 의해 하부 성층권이 차가워지고, 이로 인해 적도 상부 대류권-하부 성층권(Upper Troposphere and Lower Stratosphere, UTLS)의 정적 안정도가 감소하게 된다. 동시에 대류권계면의 높이가 높아져, MJO와 관련된 강한 대류가 더 높은 고도까지 도달하여 QBO-MJO의 상호작용 가능성을 높일 수 있다.

QBO에 의해 유도되는 열적 성층화(thermal stratification)와 대류권계면의 변화는 단일 과정뿐만 아니라 수증기나 오존의 변화와 관련된 비단열 과정에 의해서 더욱 강화될 수 있다. 구체적으로 구름-복사 피드백(Lim et al., 2018; Son et al., 2017; Sun et al., 2019; Sakaeda et al., 2020)과 오존-복사 피드백(Lim and Son, 2020; Raphaldini et al., 2021)은 QBO와 관련된 UTLS 변화를 강화시킬 수 있다. 일례로 EQBO 일 때 대류권계면 부근의 냉각으로 인해 더 많은 권운이 생기고 대류권에 더 많은 장파 복사 가열을 일으키게 된다. 이는 UTLS 지역의 정적 안정도를 약화시키는데 기여할 수 있다. 뿐만 아니라 2차 순환에 의해 상승기류가 강화되면 상부 대류권에서 하부 성층권으로 오존량이 적은 공기가 유입되어 단파복사의 흡수가 줄어들게 된다. 이로 인해 하부 성층권의 기온이 냉각되면서 UTLS 정적 안정도를 감소시킨다. 즉 EQBO에 의해 동반되는 상부 대류권 구름-복사 피드백 및 하부 성층권 오존-복사 피드백은 UTLS의 안정도를 감소시켜 MJO의 대류를 강화시키는데 기여할 수 있다.

관측과 달리 대부분의 기후 모형은 QBO와 MJO의 상관성을 모의하지 못하고 있다(Lim et al., 2020; Kim et al., 2020; Martin et al., 2021). 이는 대부분의 모델이 UTLS 지역의 기온을 잘 모의하지 못하기 때문이

다(Kim et al., 2020). EQBO와 WQBO 차이에 의한 관측 기온은 70 hPa에서 최대 약 3 K 범위를 보여주고 있는 반면, 대부분의 모델에서는 기온의 차이가 약하게 나타난다. 그 원인으로 앞서 기술한 권운과 오존의 물리과정이 논의되고 있다. 현재 많은 기후모형에서 권운 과정은 잘 모의되고 있지 않다. 오존 또한 적절히 처방되고 있지 않다. 대부분의 기후 모형들에서 오존은 기후값으로 처방되고 있어 오존-복사 피드백 과정을 무시하고 있다. 화학 기후모형에서 오존이 직접 계산되기는 하지만, QBO 자체가 잘 모의되지 않는 단점이 있다(Butchart et al., 2018).

본 연구는 QBO-MJO 상관성에 있어 오존-복사 피드백의 중요성을 평가하고자 한다. 구체적으로 모형에 오존 기후값 대신 실제 관측 오존을 처방함으로써, 오존의 변동성이 QBO-MJO 상관성에 어떤 영향을 미치는지 살펴보고자 한다. 기존 연구와 달리 기후 모형 대신 S2S 모형을 본 연구에 활용하였다. S2S 모형은 일반적인 기후 모형에 비해 고해상도이기 때문에 적도 대류권 및 성층권의 물리 과정을 보다 자세하게 표현할 수 있는 장점이 있다. 무엇보다도 개선된 연구 결과를 현업 S2S 예측에 적용하기가 용이하다.

2. 자료 및 방법

2.1 관측자료

이 연구에서는 SAGE-II, III, HALOE, UARS MLS, EOS Aura MLS (Davis et al., 2016) 등 여러 위성 자료를 사용하여 산출되는 관측 오존 자료인 Stratospheric Water and OzOne Satellite Homogenized (SWOOSH) 자료를 사용하였다. SWOOSH 자료의 경우 1984년부터 관측이 시작되었지만, 2003년까지 시-공간적 분포가 굉장히 불규칙적이므로, 이 연구에서는 2004년부터의 자료를 고려하였다. 따라서 최신 기간에 해당하는 2004년부터 2020년 사이의 SWOOSH 월평균 오존 자료를 사용하였다. SWOOSH 오존 자료는 수평 해상도가 2.5도, 연직으로는 261 hPa부터 1 hPa까지 12개의 등압면 자료로 구성된다. 대류권에서는 기존 현업 모형에서 사용하는 Atmospheric Chemistry and Climate (AC&C)/Stratospheric Processes and their Role in Climate (SPARC) 오존 기후값이 사용되었다.

결과를 평가하기 위한 비교 자료로써, 2.5도 간격의 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis v5 (ERA5, Hersbach and Dee, 2016; Copernicus Climate Change Service, <https://climate.copernicus.eu>)의 일별 동서 바람 및 기온 자료를 사용하였다. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 장파복사(Outgoing Longwave Radiation, OLR) 자료 또한 적도 지역의 대류 활동을

살펴보기 위한 자료로 사용하였으며, 이 두 기관의 자료는 QBO를 정의하고 MJO를 평가하는데 사용되었다.

2.2 성층권 준2년주기진동과 매든-줄리안 진동 지수

QBO 위상과 MJO 대류가 강한 사례를 선택하기 위해서, Yoo and Son (2016)에서 사용한 QBO 지수 산출 방법을 사용하였다. 일반적으로 QBO 지수는 50 hPa 동서 방향 평균의 바람 아노말리를 기반으로 10°S-10°N 영역을 평균하여 산출하게 된다. QBO 지수가 -0.5 표준편차보다 작을 경우 EQBO, 0.5 표준편차보다 큰 경우는 WQBO로 정의한다.

MJO 지수를 산출하기 위해서 real-time multivariate MJO index (RMM, Wheeler and Hendon, 2004)를 계산하였다. RMM 지수의 경우 15°S-15°N 범위의 영역 평균된 200 hPa (U200), 850 hPa (U850) 동서 방향의 바람과 OLR 편차를 이용, 계절 내 변동성을 고려하여 결합 EOF (Empirical Orthogonal Function) 분석을 실시한다. 이 연구에서는 기존 연구(e.g., Marshall et al., 2017)에서 사용하는 방법과 동일하게 Wheeler and Hendon (2004)에서 산출된 두 모드를 모델장에 투영하여 RMM 지수를 산출하였다.

OLR 분포는 MJO의 전형적인 시간 규모에 해당하는 20~100일 기간의 대역 필터(Waliser et al., 2009)를 적용하였다. 61일 예측 기간보다 더 긴 시간규모에 대해서 필터링을 하기 위해 기존 연구(Janiga et al., 2018)에서 사용한 모델 초기화 이전 시기에 대해서 관측 자료를, 모델 예측 이후 기간에 대해서는 0으로 처방하는 zero-padding 방법을 적용하였다. 이는 S2S 모델의 짧은 적분시간 속에서 계절내 변동성을 확인하기 위해 사용된다(Janiga et al., 2018; Wheeler and Weickmann, 2001).

2.3 모델 및 실험 구성

본 연구에서 사용된 전구 모델은 Hadley Centre Global Environment Model version 3 (HadGEM3, MacLachlan et al., 2015) 기반 계절내 예측시스템인 Global Seasonal Forecasting System version 5 (GloSea5)이다. 대기-지면-해양-해빙이 결합된 모델로 대기의 수평 해상도는 동서 방향으로 ~0.83도, 남북 방향으로 ~0.56도이다. 연직 해상도는 85층으로 모델의 최상단 층은 0.01 hPa에 해당한다. 대기와 지면 초기장은 ERA-Interim (Dee et al., 2011) 재분석 자료가 사용되었다. 해양과 해빙의 초기화를 위해 Forecast Ocean Assimilation Model (FOAM)에서 산출된 해양 분석장을 사용한다. 분석을 위해 GloSea5 모델 자료는 수평 해상도 2.5도 간격으로 내삽하였다. GloSea5에 대한 자세한 내용은 MacLachlan et al. (2015)을 참고하면 된다.

QBO와 MJO의 상관성에 대해 UTLS 지역의 오존에 의한 정적안정도 변화 효과를 살펴보기 위해서, 2004년 이후 SWOOSH 오존 자료의 샘플링이 가능한 EQBO 기간 중 관측 오존의 농도 차이가 뚜렷한 2006년 1월 1일 초기화 사례를 선정하였다. 선정된 이날짜는 선행연구(e.g., Hendon and Ahbik, 2018; Martin et al., 2020)에서 사용되었던 기간에 포함되는 사례에 해당한다.

규준실험에서는 SWOOSH의 2004년부터 2020년 기 후값 오존을 사용하였다. 이 실험은 COZ (Constant OZone)로 명명하였다. 대조 실험은 사례 실험의 해당 년도와 월에 해당하는 SWOOSH 오존값을 사용하였으며 YOZ (Year-to-year varying OZone)라 명명하였다. 두 실험에서 월평균 오존 자료를 일간격으로 내삽하여 처방하였다. 모델은 사례별로 61일 적분하였고, 오존 자료를 제외한 다른 구성은 COZ와 YOZ 실험 모두 동일하다. 실험에서는 COZ와 YOZ 각각 2006년 1월 1일 초기화한 현업과 동일한 3개 앙상블 멤버의 평균이 사용되었다.

참고로 GloSea5 예측은 오존 자료와 처방 주기를 제외하면 COZ와 유사하다. 오존 처방에 있어 COZ의 경우 관측 SWOOSH가 일 주기, GloSea5에서는 AC&C/SPARC 오존 기후값을 월 주기로 사용한다.

3. 결 과

QBO 위상에 따른 동서 방향 평균 동서 바람, 오존 및 기온의 변화를 살펴보기 위해 10°S-10°N 영역 평균하여 Fig. 1에 2004년부터 2020년까지 시간과 고도의 함수로 각각 나타냈다. 적도 동서 방향 평균 동서 바람의 시간에 따른 변화는 동풍 편차와 서풍 편차를 반복하면서 하루 성층권으로 하향 전파한다(Fig. 1a). 대체로 서풍 편차의 경우 좀 더 규칙적이고, 빠르게 하향 전파하며, 특히 50 hPa 이상 고도에서는 약 20 m s⁻¹의 진폭이 일정하지만 50 hPa 이하에서는 급격히 감소하는 경향이 있다. 반면 동풍 편차는 그 강도가 더 강하고 지속 시간이 상대적으로 긴 편이다(Baldwin et al., 2001).

QBO에 의해 유도되는 연직 시어의 차이는 온도풍 균형에 의해 기온에도 영향(Andrew et al., 1987)을 미치게 된다(Fig. 1b). EQBO 시기 적도 하루 성층권에 동풍 시어가 형성되면 적도 UTLS 부근에 상승 운동과 기온의 음의 아노말리, 아열대 지역에 하강 운동과 기온의 양의 아노말리를 유도하게 된다(Collimore et al., 2003). 따라서 기온의 분포도 연직 운동과 관련된 단열 과정에 의해서 EQBO 시기에 한랭 편차, WQBO 시기에는 온난 편차를 나타내게 된다. 기온의 경우 순환과 관련된 단열 과정뿐만 아니라 오존과 같

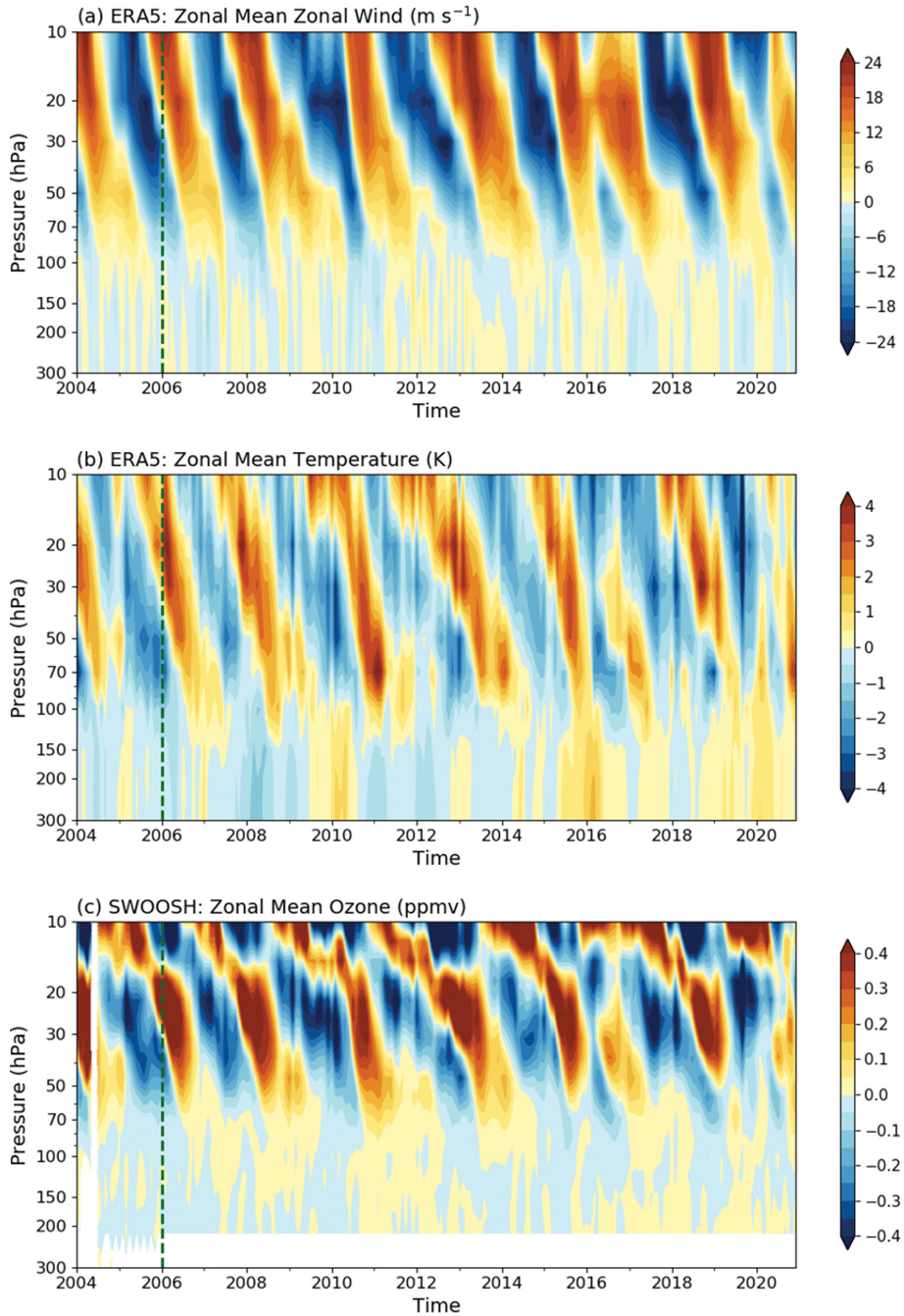


Fig. 1. Time-pressure cross section of (a) ERA5 monthly zonal-mean zonal wind (m s^{-1}), (b) temperature anomalies (K) and (c) SWOOSH ozone (ppmv) averaged over 10°S - 10°N .

은 비단열 과정에 의해서 영향을 받을 수 있다.

QBO에 의해 유도되는 시어의 변화는 오존이나 수증기와 같은 화학 조성에도 영향을 준다(e.g., Baldwin et al., 2001; Butchart et al., 2003). EQBO 시기에 2

차 순환에 의해 UTLS 지역에서 상승 운동이 형성되면 그 결과 상부 대류권에서 오존 농도가 적은 공기가 하부 성층권으로 유입되고, WQBO 시기에는 상대적으로 오존 농도가 높은 성층권에서 하층으로 전달

되어 UTLS 지역의 오존 농도가 높아진다. 따라서 동서 바람과 기온의 QBO 패턴과 유사하게 적도 오존은 하부 성층권의 동서 바람이 서풍 일 때 양의 아노말리, 동풍 일 때는 음의 아노말리가 나타나고, 시간에 따라 양과 음의 아노말리를 번갈아 가며 성층권에서 대류권으로 점차 하향 전파하는 패턴을 나타낸다 (Fig. 1c). 오존의 시간에 따른 연직 분포를 살펴보면 기존 연구(Baldwin et al., 2001)와 동일하게 약 20 hPa를 기준으로 하부 성층권과 중부 성층권 두 층으로 존재하며, 이는 약 1/4 가량의 위상 차이를 갖는다. 약 20 hPa 보다 상층에서는 다른 기체들과 광화학 반응에 의해 생성과 소멸 화학적 주기(chemical lifetime)가 짧고, 20 hPa 보다 하층에서는 상대적으로 역학 과정에 비해 길기 때문에 오존은 장주기 미량 기체(long-lived tracer)로 여겨진다(Baldwin et al., 2001).

QBO 위상에 따른 바람, 기온 및 오존의 공간 분포를 확인하기 위해서, 본 연구에서 사례로 선정한 EQBO 2006년 1~2월 동서 방향 평균의 동서 바람, 기온 및 오존 아노말리를 위도와 고도의 함수로 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 아노말리는 월평균 기후값을 제거하여 계산하였다. 동서 바람의 경우 50 hPa 중심으로 $\sim 15 \text{ m s}^{-1}$, 기온은 70 hPa를 기준으로 $\sim 2.5 \text{ K}$ 정도 차이가 난다. 이 결과는 장기간(1974~2014)의 관측(see Fig. 4 in Kim et al., 2020)에서 나타나는 범위에 해당한다. 오존의 경우 40~100 hPa 지역에서 EQBO 사례일 때 기후 값에 비해 20~25% 가량 오존이 적게 나타나고, 15~30 hPa 지역에서는 10~15% 가량 오존이 많게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이는 성층권 오존 편차가 QBO의 위상에 따라 연직 이류의 편차에 의해 영향을 받기 때문이다(e.g., Baldwin et al., 2001).

S2S 모델들은 수치적인 기법, 모델의 경계장 및 연직 해상도 등 각 모델마다 다른 전략을 채택하기 때문에, 각 모델에서 QBO 바람의 편차는 다소 다른 것으로 알려져 있다(Lim et al., 2019; Wang et al., 2019). 따라서 예측 기간 동안의 바람 성분을 잘 나타내는 것은 QBO와 MJO의 상관성을 조사하는데 중요하다. COZ와 YOZ의 예측 전체 기간의 일별 50 hPa 동서 평균 바람(U50)에 대해 관측과 비교하여 살펴본 결과, COZ와 YOZ 두 실험의 상관 관계가 각각 0.76, 0.82에 해당하였으며, 체공근평균오차(RMSE)도 2.4~2.9 범위로 Lim et al. (2019)에 나타난 것과 유사 범위로 나타났다.

Figure 3은 관측과 동일한 기간인 2006년 1월 1일부터 2월 28일까지 기후값 오존(COZ)과 실제 관측 오존(YOZ)을 처방한 각 실험의 관측 기후값 대비 동서 방향 바람 및 기온 아노말리를 위도와 고도의 함수로 보여준다. 앞서 언급한 바와 같이 두 실험 간 유일한 차이는 성층권 오존 처방에 있다. YOZ와 COZ

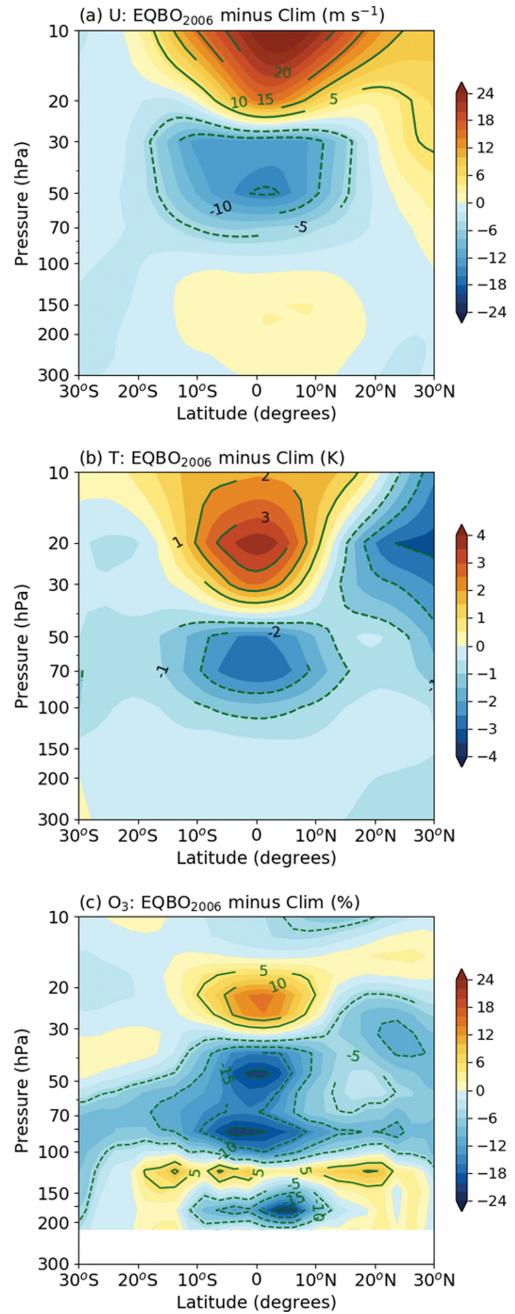


Fig. 2. Latitude-pressure distribution of (a) ERA5 zonal wind anomalies (m s^{-1}), (b) temperature (K) and (c) SWOOSH zonal-mean ozone (%) in EQBO winter of January-February 2006.

실험에서 오존의 차이는 Fig. 2c와 같다. 동서 방향 바람의 경우(Figs. 3a-c) 두 실험 모두 관측과 유사한 구조를 나타내고 있다. 관측에 비해 COZ의 경우 50

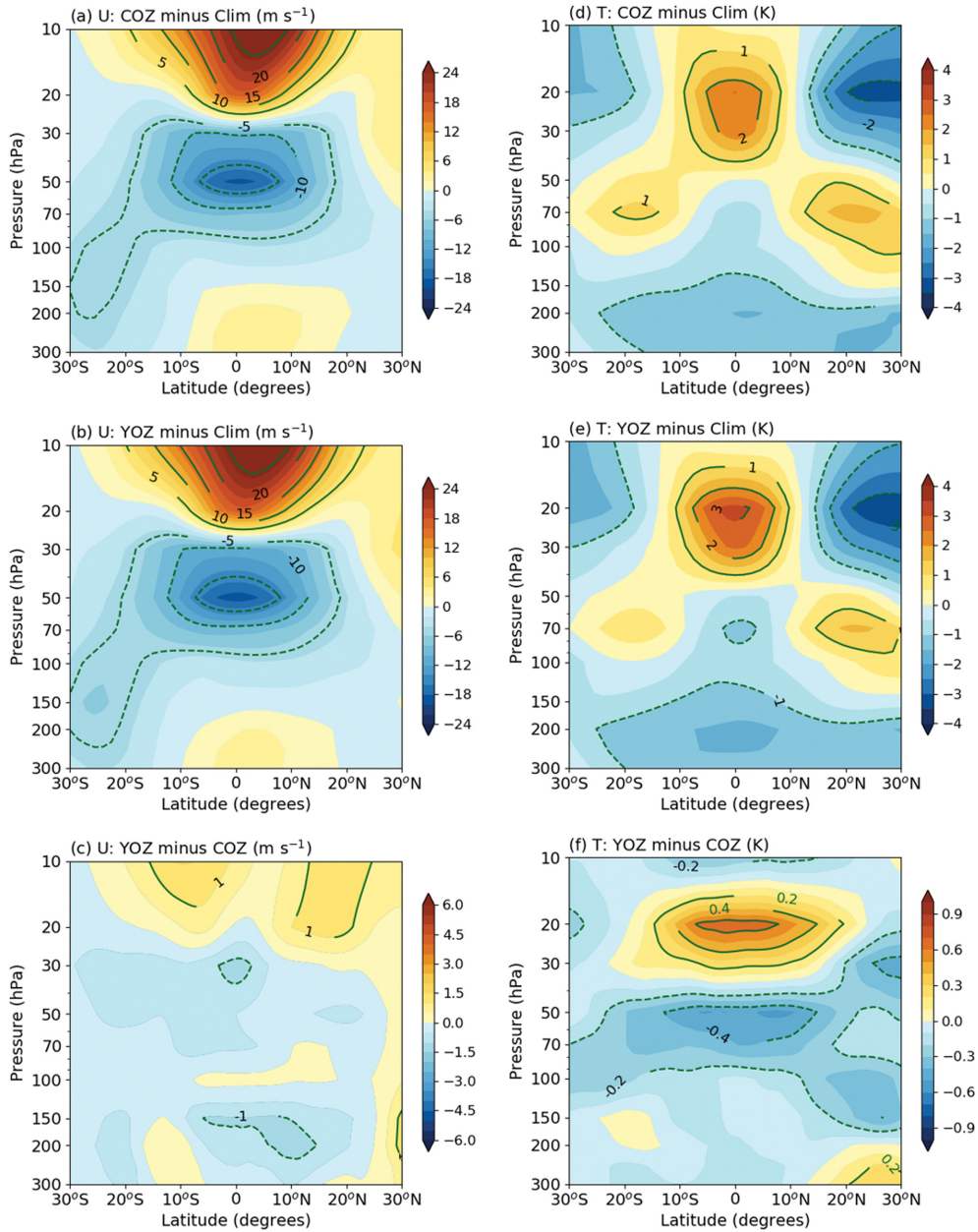


Fig. 3. Differences in zonal-mean zonal wind (m s^{-1}) and temperature (K) (a), (d) between COZ and observed (ERA5) climatology, (b), (e) between YOZ and observed (ERA5) climatology, and (c), (f) between YOZ and COZ experiments averaged over January-February 2006.

hPa을 중심으로 $1\sim 2 \text{ m s}^{-1}$ 정도 강하게 모의하였다. COZ와 YOZ는 거의 유사하였으나, YOZ 실험 결과 COZ에 비해 0.5 m s^{-1} 정도 약하게 모의하여 상대적으로 관측에 가까운 분포를 보였다.

두 실험 모두 적도 하부 성층권 50~100 hPa 지역에

서 한랭 편차, 그 위 20~30 hPa 부근의 중부 성층권에서 온난 편차, 그리고 적도 밖(off-equatorial) 아열대 하부 성층권에서 약한 온난 편차가 나타난다(Figs. 3d-f). 이는 ECMWF 모형을 이용한 기존 연구(Martin et al., 2021)와 유사하다. 관측에 비해서 두 실험 모

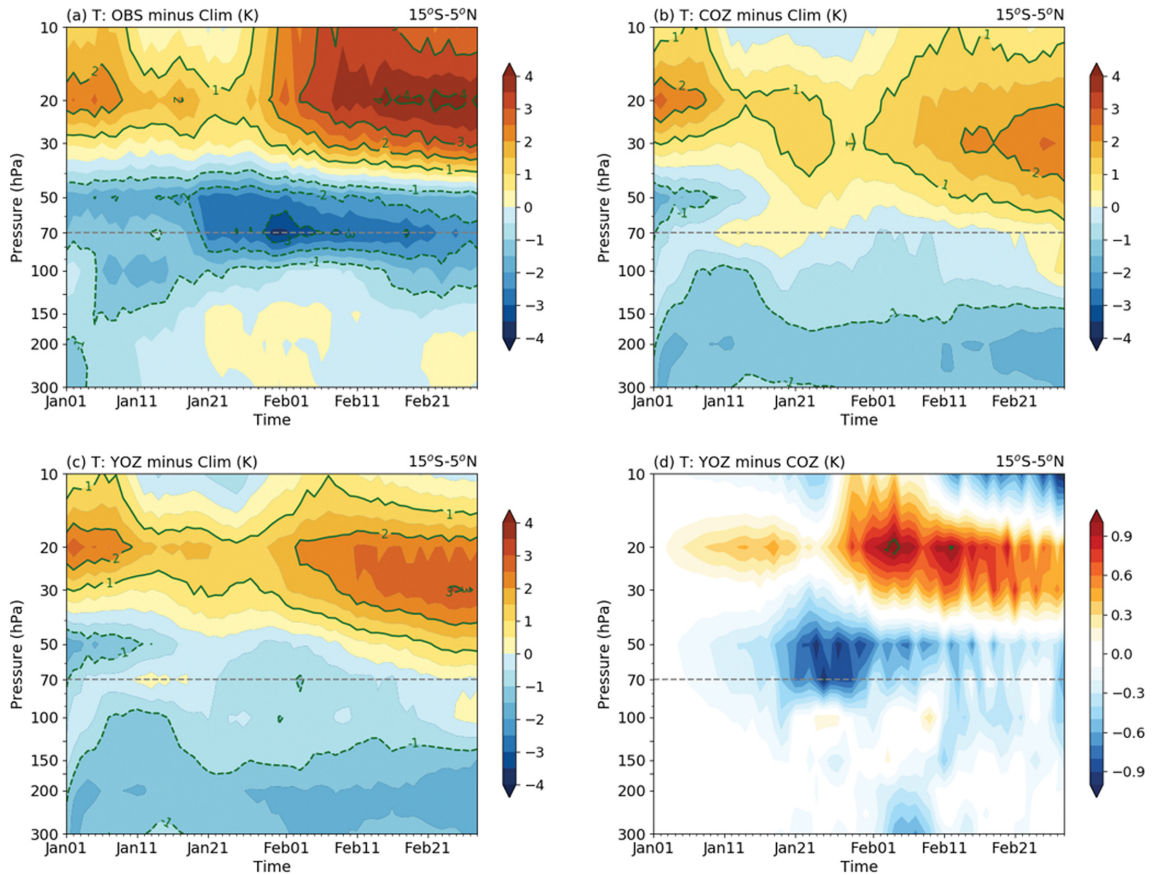


Fig. 4. Longitude-time sections of zonal-mean temperature anomalies (K) averaged from 15°S to 5°N in (a) observation, (b) COZ, (c) YOZ, and (d) differences between YOZ and COZ in January-February 2006.

두 적도 하부 성층권 70 hPa 근처 한랭 편차가 매우 약하게 모의하였다(Fig. 2b와 비교). 이는 EQBO 2차 순환에 의한 적도 하부 성층권 기온 변화가 크게 과소 모의되었음을 의미한다. 모델에서 QBO-MJO 상관성이 나타나지 않는 Lee and Klingaman (2018)의 원인 중 하나로 판단된다.

다만 COZ에 비해서 YOZ 실험의 경우(Fig. 3f), UTLS 지역에서 기온 차이가 더 크게, 더 넓은 폭으로 발생한 것을 확인할 수 있다. 50~70 hPa 부근으로 COZ에 비해 YOZ가 약 0.4~0.5 K 정도 UTLS 지역의 기온 차이가 발생한다. 기존 연구(Butchart et al., 2003; Li et al., 1995; Pohlmann et al., 2019; Tweedy et al., 2020)에서는 모델에서 오존을 포함한 쌍방향 화학 과정(interactive chemistry)을 고려하면, 오존에 의한 비단열과정의 가열 및 냉각이 쌍방향 화학 과정을 고려하지 않을 때에 비해서 약 15~35% 정도 QBO의 기온 편차를 강화할 수 있다는 것을 보여주었다. 위 실험 결과는 기후값에 비해 관측 오존에 의한 복사 과

정으로 약 17% 가량 기온 편차를 강화시키는 결과로 기존 연구와 일치한다.

COZ와 YOZ의 예측 기간에 따른 동서 방향 평균 기온의 변화를 살펴보기 위해 15°S-5°N 지역을 평균하여 2006년 1월 1일부터 2월 28일의 예측 시간과 고도의 함수로 Fig. 4에 나타내었다. Figures 4a-c는 각각 관측, COZ와 YOZ의 기온을, Fig. 4d는 두 실험의 차이(YOZ minus COZ)를 보여준다. 관측의 경우 20 hPa 중심의 양의 아노말리, 70 hPa 중심의 음의 아노말리가 뚜렷하게 나타나며, 2월 1일 부근 70 hPa 한랭 편차의 중심이 강화되는 것을 볼 수 있다. 두 실험에서 20 hPa 근처 기온 분포는 관측과 다소 유사하나 관측에 비해 아노말리가 약하게 모의되었다. 그러나 70 hPa 근처의 한랭 편차는 제대로 모의되지 않았다. 초기 한랭 아노말리는 10일 이내 사라지고 이후에는 뚜렷한 기온 아노말리가 확인되지 않았다. 반면 관측과 달리 100 hPa 이하의 상부 대류권에 한랭 편차가 강하게 모의되었다. 이는 모형의 적도 상부 대

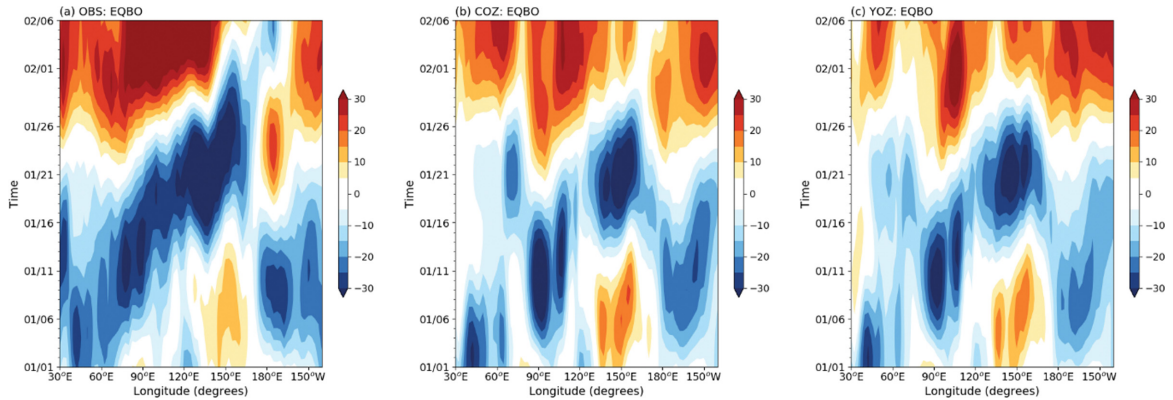


Fig. 5. Longitude-time sections of bandpass-filtered (20~100 days) OLR ($W m^{-1}$) averaged from $15^{\circ}S$ to $5^{\circ}N$ in (a) observation, (b) COZ, and (c) YOZ. Temporal evolution is shown from 1 January to 6 February, 2006 when MJO is well defined in observation.

류권 및 하부 성층권 과정의 개선이 필요함을 시사한다.

두 실험을 비교했을 때, YOZ는 COZ에 비해 50~70 hPa 지역과 20 hPa 부근에 각각 기온의 한랭 및 온난 편차가 크게 나타난다(Fig. 4d). 특히 예측 시간이 지남에 따라 초기화 약 20일 이후인 1월 20일부터 2월 1일에는 두 실험 간의 편차 차이가 최대에 이른다. 이는 오존의 하부 성층권 복사 시간 규모가 20일 내외임을 의미한다(Randel et al., 2021).

UTLS의 정적 안정도 변화(Fig. 4d)에 대한 MJO의 반응을 살펴보기 위해서, 관측과 실험 모두에 20~100 일 대역의 MJO 필터를 적용한 OLR 분포를 시간과 경도 함수로 살펴보았다(Fig. 5). 필터를 적용할 때 모델 적분 이전 기간은 관측 값으로 적분 이후에 해당하는 기간은 값을 0으로 처방하였다(Janiga et al., 2018). 먼저, 관측 분포에서는 30~60°E 부근의 서인도양에서 대류가 시작하여 점차 발달하고 그 강도를 유지한 채 예측 기간동안 인도양에서 태평양 부근으로 느린 속도로 동진한다. 반면 COZ와 YOZ 두 실험의 경우 MJO의 전파 양상은 정성적으로 잘 모의하지만 MJO와 관련된 대류의 강도는 과소 모의하는 것으로 나타났다. 관측과 유사하게 서인도양 부근에서 대류의 발달이 시작되었으나, 60~90°E 부근 인도양과 120°E 부근의 해양 대륙(Maritime Continent)에서 대류가 약해지는 결과를 나타내었다. 그러나 COZ 실험과 YOZ 실험의 열적 성층화 차이가 가장 뚜렷하게 나타나는 기간인 1월 21일부터 2월 1일 범위 대류의 강도를 살펴 보았을 때, 두 실험 간의 차이는 매우 작았다. 뿐만 아니라 각각의 앙상블 멤버에서도 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다. 이는 오존-복사 피드백에 의한 UTLS 정적안정도 변화가 MJO 대류에 큰 영향을 끼치지 못했음을 시사한다. 이는 오존-복사 피드백에 의한 기

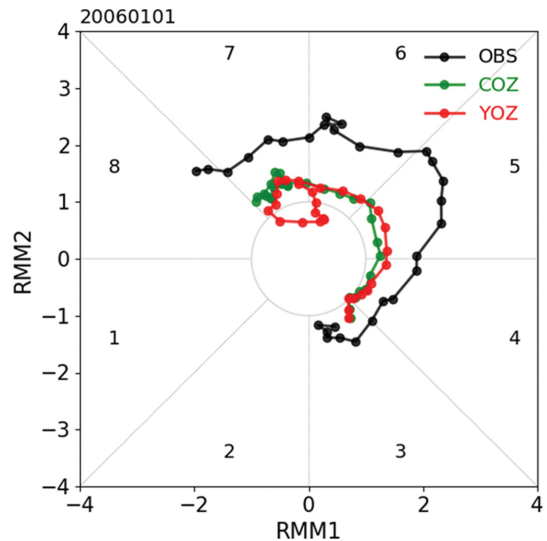


Fig. 6. MJO RMM phase diagram in observation (black), COZ (green), and YOZ (red). The time evolution starts on 8 January and ends on 5 February, 2006.0410.

온의 반응이 크지 않았기 때문으로 추정된다(Fig. 4d).

각 실험에서의 MJO 위상 별 진폭의 차이를 정량적으로 살펴보기 위해서, 시간에 따른 MJO의 위상과 진폭에 대한 정보를 제공하는 standard RMM phase diagram을 Fig. 6에 나타내었다. 표출된 기간은 초기화 일주일 후 두 실험 간 50~100 hPa의 기온 차이가 발생하는 1월 8일부터 2월 5일에 해당한다. 각 점은 1일 간격의 MJO의 위상 및 진폭을 의미하고, 각 색깔은 관측(black), COZ 실험(green), YOZ 실험(red)의 정보를 나타낸다. 관측에서는 동인도양(MJO 위상 3)

에서 시작된 MJO 대류가 해양 대륙 지역(MJO 위상 4-5)을 거쳐 태평양 지역까지 전파하는 것으로 나타났다. 하지만 COZ와 YOZ 실험에서는 관측보다 확연히 약한 MJO 대류가 동인도양 부근에서 나타났으며, 해양 대륙을 넘어 전파하는 양상을 보인다. RMM의 변화를 확인해 보았을 때, COZ와 YOZ 실험 사이의 UTLS의 변화가 가장 뚜렷하게 차이가 존재하는 1월 21일부터 2월 1일 사이의 MJO 진폭의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 Fig. 5와 일맥상통하는 결과이다.

4. 요약 및 토의

EQBO일 때 겨울철 MJO의 대류 활동이 WQBO 시기에 비해 활발해지는 경향이 있으며, MJO의 예측성 또한 높은 것으로 보고되었다. 이를 설명하기 위한 메커니즘 중 하나로 UTLS 정적 안정도 변화가 논의되고 있다. 그러나 많은 기후모형에서 오존은 기후값으로 처방되고 있으며, 이로 인해 QBO 위상에 따른 UTLS 정적 안정도 변화가 과소 모의되고 있다. 이에 본 연구는 QBO-MJO 관계에 있어 오존의 역할을 살펴보았다. 보다 구체적으로 GloSea5에 기후값 오존(COZ)과 2006년의 오존(YOZ)을 처방하여 오존-복사 피드백(Lim and Son, 2020; Raphaldini et al., 2021)이 대류권 MJO에 미치는 영향을 살펴보았다.

COZ와 YOZ 실험에서 나타난 기온 편차는 관측에 비해 과소 모의되었으나, YOZ 실험의 기온 편차는 COZ 실험에 비해 초기화 약 20일 이후 UTLS 지역에서 0.4~0.5 K 정도로 약 17% 가량 개선되었다. 그러나 두 실험 간의 MJO 대류 차이는 크게 나타나지 않았고, 또한 MJO 진폭 및 위상에서도 큰 차이를 볼 수 없었다. 결과적으로 2006년 겨울 사례에 대해 오존-복사 피드백에 의한 열적 성층화는 MJO 대류의 변화에 크게 영향을 주지 않은 것으로 파악되었다.

이 연구에서 UTLS 지역의 COZ와 YOZ의 기온 차이가 명확함에도 불구하고, QBO-MJO의 상관성을 설명하지 못하는 이유는 다음과 같은 것으로 추정된다. 먼저 QBO에 대한 하부 성층권 기온 반응이 제대로 모의되지 않았다. 기존 연구(e.g., Hendon and Abhik, 2018; Lee and Klingaman, 2018; Klotzbach et al., 2019;)에서 QBO에 대한 MJO 발달이 UTLS 지역의 기온 영향에 따라 매우 민감함을 보였다. 바람장이 관측과 유사하게 모의됨에도 불구하고 이에 대한 2차 순환이 잘 모의되지 않음으로써, EQBO에 의한 하부 성층권 한랭 아노말리가 모의되지 않았다(Fig. 3). 본 연구에서 사용한 모형의 하부 성층권 과정에 큰 오차가 있음을 의미한다.

모델이 관측보다 MJO를 약하게 모의하는 것도 원

인으로 추정된다. Figures 5, 6에서 나타낸 것처럼 관측의 경우 예측 기간 동안 대류가 잘 조직화되고 대류의 강도가 시간이 지남에 따라 유지되었던 반면, 모델 실험의 경우 대류 발달이 약했다. MJO 대류가 모델에서 비교적 정성적으로 잘 모의가 되었던 선행 연구들은 관측보다는 약하지만 QBO의 위상에 따른 유의미한 MJO의 변화가 나타났다(Back et al., 2020; Martin et al., 2020). MJO 대류가 보다 연속적으로 잘 발달하고 그 강도와 전파를 모델에서 재현할 수 있다면 QBO의 MJO 조절 효과가 더 잘 드러날 수 있을 것이다.

또 다른 가능성은 오존에 의한 UTLS 지역 기온 변화의 진폭과 높이가 실제 MJO 대류에 영향을 미칠 만큼 크지 않을 수 있다. 비록 오존에 의한 근소한 범위의 UTLS 정적안정도 변화 개선이 있었으나 그 차이가 MJO에 영향을 줄 수 있을 정도로 크지 않았다. 이는 0.5 K 이하의 QBO에 의한 기온 변화 존재시 MJO에 대한 효과가 미비할 수 있다는 결과와 일치한다(Martin et al., 2021). 뿐만 아니라 이는 사례에 대한 의존성이 클 수 있기 때문에, 오존에 의한 기온 편차가 강화되는 여러 사례에 대한 추가적인 분석이 추후에 필요할 것으로 보인다.

마지막으로 UTLS 지역에서의 오존과 같은 화학 조성 뿐만 아니라 다른 물리 과정에 의한 부분이 QBO-MJO의 상관성을 나타내는데 영향을 끼칠 수 있다. 오존과 더불어 권운과 관련된 구름-복사 피드백에 대한 연구가 주목받고 있다(Son et al., 2017; Sun et al., 2019; Sakaeda et al., 2020). EQBO 시기 대류권계면 부근 권운의 증가는 더 강한 MJO에 의해서 발생할 수 있기 때문에 구름 변화와 관련된 인과 관계에 대한 논의가 필요할 것이다.

본 연구는 단일 사례 분석에 국한되었다. 향후 보다 정량적인 QBO-MJO 관계 연구를 위해, 다양한 사례에 대해 더 많은 앙상블 수를 고려한 연구가 필요하다. 특히 EQBO 뿐만 아니라 WQBO 사례를 같이 고려한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해주신 두분의 심사위원님께 감사의 말씀을 드립니다. 이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(2017R1E1A1A01074889).

REFERENCES

Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*, Academic, San Diego,

- Calif., 489 pp.
- Back, S.-Y., J.-Y. Han, and S.-W. Son, 2020: Modeling evidence of QBO- MJO connection: A case study. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL089480.
- Baldwin, M. P., and Coauthors, 2001: The quasi-biennial oscillation. *Rev. Geophys.*, **39**, 179-229.
- Butchart, N., A. A. Scaife, J. Austin, S. H. E. Hare, and J. R. Knight, 2003: Quasi-biennial oscillation in ozone in a coupled chemistry-climate model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **108**, 4486.
- _____, and Coauthors, 2018: Overview of experiment design and comparison of models participating in phase 1 of the SPARC quasi-biennial oscillation initiative (QBOi). *Geosci. Model Dev.*, **11**, 1009-1032.
- Collimore, C. C., D. W. Martin, M. H. Hitchman, A. Huesmann, and D. E. Waliser, 2003: On the relationship between the QBO and tropical deep convection. *J. Climate*, **16**, 2552-2568.
- Copernicus Climate Change Service 2017: ERA5: Fifth Generation of ECMWF Atmospheric Reanalyses of the Global Climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). ECMWF [Available online at <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!home>].
- Davis, S. M., K. H. Rosenlof, B. Hassler, D. F. Hurst, W. G. Read, H. Vömel, H. Selkirk, M. Fujiwara, and R. Damadeo, 2016: The Stratospheric Water and Ozone Satellite Homogenized (SWOOSH) database: a long-term database for climate studies. *Earth Syst. Sci. Data*, **8**, 461-490, doi:10.5194/essd-8-461-2016.
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597, doi:10.1002/qj.828.
- Hendon, H. H., and S. Abhik, 2018: Differences in vertical structure of the Madden-Julian oscillation associated with the quasi-biennial oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 4419-4428, doi: 10.1029/2018GL077207.
- Hersbach, H., and D. Dee, 2016: ERA5 reanalysis is in production, ECMWF Newsletter 147, ECMWF, Reading, UK [Available online at <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production>].
- Janiga, M. A., C. J. Schreck, J. A. Ridout, M. Flatau, N. P. Barton, E. J. Metzger, and C. A. Reynolds, 2018: Subseasonal forecasts of convectively coupled equatorial waves and the MJO: Activity and predictive skill. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 2337-2360, doi:10.1175/MWR-D-17-0261.1.
- Kim, H., F. Vitart, and D. Waliser, 2018: Prediction of the Madden-Julian Oscillation: A Review. *J. Climate*, **31**, 9425-9443, doi:10.1175/JCLI-D-18-0210.1.
- _____, J. H. Richter, and Z. Martin, 2019: Insignificant QBO-MJO prediction skill relationship in the SubX and S2S subseasonal reforecasts. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 12655-12666, doi:10.1029/2019JD031416.
- _____, J. M. Caron, J. H. Richter, and I. R. Simpson, 2020: The lack of QBO-MJO connection in CMIP6 models. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL087295, doi:10.1029/2020GL087295.
- Klotzbach, P., S. Abhik, H. H. Hendon, M. Bell, C. Lucas, A. G. Marshall, and E. C. J. Oliver, 2019: On the emerging relationship between the stratospheric quasi-biennial oscillation and the Madden-Julian oscillation. *Sci. Rep.*, **9**, 2981, doi:10.1038/s41598-019-40034-6.
- Lee, J. C. K., and N. P. Klingaman, 2018: The effect of the quasi-biennial oscillation on the Madden-Julian oscillation in the Met Office unified model global ocean mixed layer configuration. *Atmos. Sci. Lett.*, **19**, e816, doi:10.1002/asl.816.
- Li, D., K. P. Shine, and L. J. Gray, 1995: The role of ozone-induced heating anomalies in the quasi-biennial oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 937-943.
- Lim, Y., S.-W. Son, and D. Kim, 2018: MJO prediction skill of the subseasonal-to-seasonal prediction models. *J. Climate*, **31**, 4075-4094, doi:10.1175/JCLI-D-17-0545.1.
- Lim, Y., S.-W. Son, A. G. Marshall, H. H. Hendon, and K.-H. Seo, 2019: Influence of the QBO on MJO prediction skill in the subseasonal- to-seasonal prediction models. *Climate. Dyn.*, **53**, 1681-1695, doi:10.1007/s00382-019-04719-y.
- Lim, Y., and S.-W. Son, 2020: QBO-MJO Connection in CMIP5 models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019-JD032157, doi:10.1029/2019JD032157.
- 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.
- _____, and _____, 1972: Description of Global-Scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123.
- MacLachlan C., and Coauthors, 2015: Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 1072-1084, doi:10.1002/qj.2396.
- Marshall, A. G., H. H. Hendon, S.-W. Son, and Y. Lim, 2017: Impact of the quasi-biennial oscillation on predictability of the Madden-Julian oscillation. *Climate.*

- Dyn.*, **49**, 1365-1377, doi:10.1007/s00382-016-3392-0.
- Martin, Z., S. Wang, J. Nie, and A. Sobel, 2019: The impact of the QBO on MJO convection in cloud-resolving simulations. *J. Atmos. Sci.*, **76**, 669-688, doi:10.1175/JAS-D-18-0179.1.
- _____, F. Vitart, S. Wang, and A. Sobel, 2020: The impact of the stratosphere on the MJO in a forecast model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019JD032106, doi:10.1029/2019JD032106.
- _____, C. Orbe, S. Wang, and A. Sobel, 2021: The MJO-QBO relationship in a GCM with stratospheric nudging. *J. Climate*, **34**, 4603-4624, doi:10.1175/JCLI-D-20-0636.1.
- Nie, J., and A. Sobel, 2015: Responses of tropical deep convection to the QBO: Cloud-resolving simulations. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3625-3638, doi:10.1175/JAS-D-15-0035.1.
- Pohlmann, H., W. A. Müller, M. Bittner, S. Hettrich, K. Modali, K. Pankatz, and J. Marotzke, 2019: Realistic quasi-biennial oscillation variability in historical and decadal hindcast simulations using CMIP6 forcing. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 14118-14125, doi:10.1029/2019GL084878.
- Randel, W., F. Wu, A. Ming, and P. Hitchcock, 2021: A simple model of ozone-temperature coupling in the tropical lower stratosphere. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 18531-18542, doi:10.5194/acp-21-18531-2021.
- Raphaldini, B., A. S. W. Teruya, Leite da Silva, P. Dias, L. Massaroppe, and D. Y. Takahashi, 2021: Stratospheric ozone and quasi-biennial oscillation (QBO) interaction with the tropical troposphere on intraseasonal and interannual timescales: a normal-mode perspective. *Earth Syst. Dynam.*, **12**, 83-101, doi:10.5194/esd-12-83-2021.
- Sakaeda, N., J. Dias, and G. N. Kiladis, 2020: The unique characteristics and potential mechanisms of the MJO-QBO relationship. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2020JD033196, doi:10.1029/2020JD033196.
- Son, S.-W., Y. Lim, C. Yoo, H. H. Hendon, and J. Kim, 2017: Stratospheric control of the Madden-Julian oscillation. *J. Climate*, **30**, 1909-1922, doi:10.1175/JCLI-D-16-0620.1.
- Sun, L., H. Wang, and F. Liu, 2019: Combined effect of the QBO and ENSO on the MJO. *Atmos. Ocean. Sci. Lett.*, **12**, 170-176, doi:10.1080/16742834.2019.1588064.
- Tweedy, O. V., L. D. Oman, and D. W. Waugh, 2020: Seasonality of the MJO impact on upper troposphere-lower stratosphere temperature, circulation, and composition. *J. Atmos. Sci.*, **77**, 1455-1473, doi:10.1175/JAS-D-19-0183.1.
- Vitart, F., 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.
- Yoo, C., and S.-W. Son, 2016: Modulation of the boreal wintertime Madden-Julian Oscillation by the stratospheric quasi-biennial oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 1392-1398, doi:10.1002/2016GL067762.
- Waliser, D. K., and Coauthors, 2009: MJO simulation diagnostics. *J. Climate*, **22**, 3006-3030.
- Wang, S., M. K. Tippett, A. Sobel, Z. Martin, and F. Vitart, 2019: Impact of the QBO on prediction and predictability of the MJO convection. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 11766-11782, doi:10.1029/2019JD030575.
- Wheeler, M., and K. M. Weickmann, 2001: Real-time monitoring and prediction of modes of coherent synoptic to intraseasonal tropical variability. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2677-2694.
- 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.
- Zhang, C., 2005: Madden-Julian oscillation. *Rev. Geophys.*, **43**, RG2003.
- _____, 2013: Madden-Julian oscillation: Bridging weather and climate. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1849-1870, doi:10.1175/BAMS-D-12-00026.1.