

GloSea5의 과거기후 모의자료에서 나타난 El Niño와 관련된 동아시아 강수 및 기온 예측성능

임소민^{1)*} · 현유경¹⁾ · 강현석¹⁾ · 예상욱²⁾

¹⁾국립기상과학원 지구시스템연구과, ²⁾한양대학교 해양융합공학과

(접수일: 2017년 11월 10일, 수정일: 2018년 1월 12일, 게재확정일: 2018년 2월 2일)

Prediction Skill of East Asian Precipitation and Temperature Associated with El Niño in GloSea5 Hindcast Data

So-Min Lim^{1)*}, Yu-Kyung Hyun¹⁾, Hyun-Suk Kang¹⁾, and Sang-Wook Yeh²⁾

¹⁾Earth System Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

²⁾Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, Ansan, Korea

(Manuscript received 10 November 2017; revised 12 January 2018; accepted 2 February 2018)

Abstract In this study, we investigate the performance of Global Seasonal Forecasting System version 5 (GloSea5) in Korea Meteorological Administration on the relationship between El Niño and East Asian climate for the period of 1991~2010. It is found that the GloSea5 has a great prediction skill of El Niño whose anomaly correlation coefficients of Niño indices are over 0.96 during winter. The eastern Pacific (EP) El Niño and the central Pacific (CP) El Niño are considered and we analyze for EP El Niño, which is well simulated in GloSea5. The analysis period is divided into the developing phase of El Niño summer (JJA(0)), mature phase of El Niño winter (D(0)JF(1)), and decaying phase of El Niño summer (JJA(1)). The GloSea5 simulates the relationship between precipitation and temperature in East Asia and the prediction skill for the East Asian precipitation and temperature varies depending on the El Niño phase. While the precipitation and temperature are simulated well over the equatorial western Pacific region, there are biases in mid-latitude region during the JJA(0) and JJA(1). Because the low level pressure, wind, and vertical stream function are simulated weakly toward mid-latitude region, though they are similar with observation in low-latitude region. During the D(0)JF(1), the precipitation and temperature patterns analogize with observation in most regions, but there is temperature bias in inland over East Asia. The reason is that the GloSea5 poorly predicts the weakening of Siberian high, even though the shift of Aleutian low is predicted. Overall, the predictability of precipitation and temperature related to El Niño in the GloSea5 is considered to be better in D(0)JF(1) than JJA(0) and JJA(1) and better in ocean than in inland region.

Key words: GloSea5, Seasonal Prediction, El Niño, East Asia, Teleconnection

*Corresponding Author: So-Min Lim, Earth System Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6716, Fax: +82-64-738-6514
E-mail: smlim48@gmail.com

1. 서 론

El Niño는 열대 동태평양 지역의 해수면 온도가 평년에 비해 상승하는 현상으로 열대 태평양뿐만 아니라 전 지구적인 기후시스템의 변동을 유발한다(Horel and Wallace, 1981). El Niño의 발생은 해양-대기 상호작용과 열대-중위도 원격상관을 통해 중위도 지역의 기후 변동성에 영향을 주며, 한반도와 중국, 일본을 포함하는 동아시아 지역의 몬순 시스템에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Webster and Yang, 1992; Webster et al., 1998; Wang et al., 2000; Alexander et al., 2002; Min et al., 2015). 동아시아 몬순은 여름 몬순과 겨울 몬순으로 구분할 수 있는데, 여름 몬순은 동아시아 지역에 남풍 계열의 바람을 유도하여 열대 서태평양과 인도양의 수증기를 중국 동부 지역과 한반도, 일본에 유입시켜 많은 양의 강수를 발생시키고, 겨울 몬순은 동아시아 지역의 연안을 따라 강한 북풍 계열의 바람을 발달시켜 차가운 수평류의 유입을 용이하게 만들고 기온의 하강을 유도한다(Jhun and Lee, 2004; Wang et al., 2008; Wang and Chen, 2010).

El Niño와 동아시아 몬순의 관계에 대한 연구는 다양하게 수행되어 왔으며, 그 중 Zhang et al. (1996)은 El Niño 발생시 열대 태평양 지역의 해수면 온도 상승으로 인한 서태평양 지역의 대류활동의 변화가 그 지역에 고기압성 흐름을 유도하고, 이로 인해 동아시아 지역의 연안을 따라 부는 남풍의 세기가 강화됨을 밝혔다. 따라서 El Niño가 여름철에 발생하면 동아시아를 향해 부는 남서풍을 강화시켜 동아시아 여름 몬순이 강화되고, El Niño가 겨울철에 발생하면 동아시아 지역에 부는 북풍을 약화시켜 동아시아 겨울 몬순이 약화된다. 일반적인 El Niño는 주로 겨울철에 발생하며, El Niño가 발달하는 과정에 따라 동아시아 지역의 기후가 다르게 나타난다(Rasmusson and Carpenter, 1982; Wu et al., 2003). El Niño의 발달 과정별 특징을 살펴보면, El Niño가 발달하는 여름철에는 북서태평양 하층 저기압의 서편에 위치한 북풍의 영향으로 중국 북부 지역의 강수는 감소하고, 이후 겨울철에는 필리핀 해 고기압에 의한 남풍 편차의 영향으로 중국 남동부 지역 및 한국은 평년보다 따뜻하고 습윤한 특징을 보인다(Rasmusson and Carpenter, 1982; Kang and Jeong, 1996; Wang et al., 2000). El Niño가 쇠퇴하는 여름철이 되면, El Niño의 절정 시기부터 계속 유지된 필리핀 해의 고기압이 동아시아 여름 몬순과 초여름의 메이유/바이유/장마의 강화를 유도한다(Wang et al., 2001; Lee et al., 2017).

한편, 최근 연구들은 El Niño의 형태에 따라 동아시아 지역에서 나타나는 원격상관이 다르므로 El Niño의 형태를 구분할 필요성에 대해 언급하고 있다(Weng

et al., 2007, 2009; Kug et al., 2009; Yuan and Yang, 2012; Kim et al., 2014; Jeong et al., 2017). 그 중 Weng et al. (2007, 2009)은 동태평양 El Niño와 중태평양 El Niño를 나누어 중국과 일본의 기후 변동성을 살펴보았으며, El Niño의 형태에 따라 여름철과 겨울철에 나타나는 기온과 강수의 변동이 다를 수 있음을 확인하였다. Kug et al. (2009)도 두 가지 형태의 El Niño를 나누어 보았으며, 동태평양 El Niño가 발달할 때는 한반도의 기온이 낮아지고, 중태평양 El Niño가 발달할 때는 한반도의 기온이 높아짐을 확인하였다. 그리고 만약 두 가지 형태의 El Niño를 고려하지 않는다면 그 영향이 상쇄되어 한반도의 기후와 El Niño의 관련성이 낮아짐을 밝혔다.

한국 기상청/국립기상과학원은 영국 기상청과 공동으로 전지구 모델인 Hadley Centre Global Environmental Model Version 3 (HadGEM3)를 기반으로 한 계절예측시스템(Global Seasonal Forecasting System, GloSea)을 현업으로 운영 중이다. 초기 버전은 GloSea version 4 (GloSea4)이고 2014년부터는 수평해상도의 향상과 지면모델 교체 등을 통해 업그레이드된 버전인 GloSea version 5 (GloSea5)를 이용하고 있다. 2016년 4월 말에는 대기 모델과 해양 모델의 버전을 업그레이드 하였으며, 과거기후 모의자료에 사용되는 해양 초기장을 변경하고, 그 기간을 1996년부터 2009년에서 1991년부터 2010년으로 연장하였다. GloSea5의 El Niño 예측성능에 대한 선행 연구들 중 Jung et al. (2015)은 GloSea5가 모의하는 월별 Niño3.4 지수 예측성능을 살펴보았는데, 그 결과 초기화된 월에 상관없이 모두 유의미한 예측성능을 나타냈으며, 특히 가을철과 겨울철에는 예측성능이 더 높게 나타나고, 봄철에는 예측성능이 감소하는 특징이 있음을 밝혔다. MacLachlan et al. (2014)에서는 GloSea5의 El Niño 예측성능이 선행 시간 5개월까지 높은 것으로 밝혔으며, El Niño와 La Niña에 의한 강수의 원격상관패턴은 GloSea4보다 GloSea5에서 향상됨을 확인하였다. Kim et al. (2015)은 GloSea5에서 El Niño와 관련된 겨울철 내 열대 태평양 지역의 해수면 온도와 강수에 대한 예측성능은 높게 나타나지만, 온대지역과의 원격상관패턴에 대한 예측성능은 낮음을 지적하였는데, 그 이유는 GloSea5가 북서태평양과 적도중태평양 지역에서 강수의 발달을 잘 모의하지 못하기 때문으로 밝혔다.

선행 연구들에서는 GloSea5가 모의하는 El Niño에 대한 예측성능과 겨울철 내 El Niño와의 원격상관에 대한 분석이 이루어졌다. 그러나 El Niño는 겨울철 외에 다른 계절에도 동아시아 지역에 영향을 미치고, El Niño의 형태 또한 고려해야 한다. 그러므로 El Niño의 형태에 따라 GloSea5가 모의하는 El Niño의 발달부터 쇠퇴까지 동아시아 기후와의 원격상관에 대한

예측성능의 검증이 필요하다. 본 연구에서는 GloSea5 과거기후 모의자료를 이용하여 두 가지 형태의 El Niño를 구분하고, El Niño의 발달부터 쇠퇴하는 기간에 대해 발달 과정별로 분석하여 각 시기에 나타나는 예측성능을 평가하였다. 이에 따라 2장에서는 분석에 이용한 자료와 분석 방법에 대해 설명하고, 3장에서는 이상상관계수를 통해 GloSea5의 El Niño 및 동아시아 강수와 기온의 예측성능을 진단하고 두 가지 형태에 따른 El Niño 발달 해를 정의하였다. 그리고 4장에서는 El Niño와 관련된 동아시아 강수 및 기온에 대하여 El Niño의 발달기 여름철, 절정기 겨울철, 그리고 쇠퇴기 여름철로 나누어 시기별 GloSea5의 원격상관 예측성능을 평가하였으며, 5장에서는 4장에서 나타난 시기별 예측성능 차이의 원인을 알아보기 위해 각 시기별로 동아시아 주변의 순환장을 살펴보았다. 마지막으로 6장에는 요약 및 토의를 기술하였다.

2. 자료 및 분석 방법

분석에는 GloSea5의 과거기후 모의자료를 이용하였으며, GloSea5는 대기, 해양, 해빙, 지면 모델들과 각 모델들을 결합하는 결합자로 구성되어 있다. GloSea5의 구성 요소들 중 대기 모델은 Met Office Unified Model version 8.6 (MetUM; Brown et al., 2012; Walters et al., 2011)이며, 지면 모델은 Joint UK Land Environment Simulator version 8.6 (JULES; Best et al., 2011), 해양 모델은 Nucleus for European Modelling of the Ocean version 3.4 (NEMO; Madec, 2008), 그리고 해빙 모델은 Los Alamos sea ice model version 4.1 (CICE; Hunke and Lipscomb, 2010)이다. 각 구성 모델들은 OASIS3 coupler를 통해 결합되어 있으며, 대기 모델의 수평격자 해상도는 $0.83^\circ \times 0.56^\circ$ (약 56 km)이고, 연직으로는 85개의 층(약 85 km)을 가진다.

과거기후 모의자료는 1991년부터 2010년까지 총 20년 동안 매 달 1일, 9일, 17일, 25일에 초기화되어 약 8개월의 기간 동안 적분이 수행되고, 앙상블 멤버는 확률적 운동에너지 후방산란 방법(Stochastic Kinetic Energy Backscattering; SKEB2)을 고려하여 각 초기시간에 대해 3개씩 생산된다. 생산된 자료는 MacLachlan et al. (2015)에서 제시된 앙상블 평균 방법을 따라 1~3개월의 선행시간을 갖는 자료를 만드는데, 여름철(6~8월 평균) 자료는 초기시간 4월 25일, 5월 1일, 9일의 앙상블 멤버를 이용하고, 겨울철(12~2월 평균) 자료는 초기시간 10월 25일, 11월 1일, 9일의 앙상블 멤버를 이용한다.

GloSea5의 예측성능을 평가하기 위해 사용한 재분석 자료 중 지위고도장, 해면기압장, 동서바람장, 남북바람장, 2 m 기온은 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 의 해상도를 지닌 The

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-analysis (ERA-interim; Dee et al., 2011)의 자료를 이용하였고, 해수면 온도는 $1^\circ \times 1^\circ$ 의 해상도를 지닌 Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set (HadISST; Rayner et al., 2003), 강수량은 해상도가 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 인 Global Precipitation Climatology Project (GPCP; Adler et al., 2003) 자료를 이용하였다.

분석기간은 과거기후 모의자료가 존재하는 1991년부터 2010년까지의 여름철과 겨울철로 설정하였으며, 강수, 기온, 바람, 기압에 대한 합성장을 분석하였다. GloSea5의 El Niño 및 동아시아 강수와 기온에 대한 예측성능을 분석하기 위해서는 이상상관계수(Anomaly Correlation Coefficient; ACC)와 표준편차 분석이 수행되었고, 이상상관계수를 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$ACC = \frac{\sum_{m=1}^M [f_m - \bar{f}][o_m - \bar{o}]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M [f_m - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M [o_m - \bar{o}]^2}}$$

여기서, M 은 분석기간 전체(1991년부터 2010년까지, 총 20년)인 20이고, m 은 1991년부터 2010년의 각 연도를 의미한다($m=1\sim 20$). f_m 과 o_m 는 해당 연도에 해당하는 GloSea5와 관측의 해수면 온도 값을 나타내며, \bar{f} 와 \bar{o} 는 분석기간 전체의 해수면 온도 평균이다. 선형적 관점에서 ACC가 1에 가까울수록 관측에서 나타난 해수면 온도의 변동성을 모델이 잘 모의하고 있음을 의미한다. 그리고 El Niño의 원격상관 및 다른 기후 변동성과의 관계를 알아보기 위해서는 상관분석 및 회귀분석이 수행되었다.

3. El Niño 발생 및 동아시아 강수, 기온 예측성능

3.1 El Niño 발생 예측성능

GloSea5의 El Niño 발생 예측성능을 알아보기 위해서 겨울철 열대 태평양 해수면 온도의 ACC를 구하였으며, ACC 값은 열대 태평양 특히, 열대 동태평양과 중태평양 지역에서 0.9 이상으로 매우 높고 통계적으로 유의미한 것을 확인할 수 있다(Fig. 1). 관측의 Niño 지수들(Niño3 지수: $150^\circ\text{--}90^\circ\text{W}$, $5^\circ\text{S--}5^\circ\text{N}$, Niño3.4 지수, Niño4 지수: $160^\circ\text{E--}150^\circ\text{W}$, $5^\circ\text{S--}5^\circ\text{N}$)과 GloSea5가 모의하는 Niño 지수들 간의 ACC 값 또한 모든 지수에서 99% 이상의 신뢰도를 가지고 0.96 이상의 높은 상관관계를 나타낸다(Table 1). 일반적인 계절예측 시스템들의 El Niño 예측성능은 상당한 것으로 알려져 있는데, 타 계절예측시스템에서 11월 초기시간 자료를 이용하여 구해진 겨울철 El Niño의 ACC 값을 보면, European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)의 System 4와 The National Center

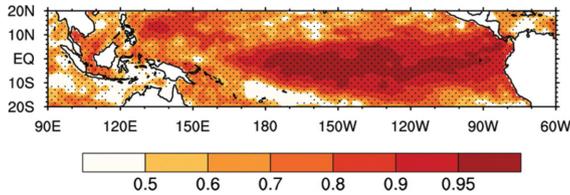


Fig. 1. The anomaly correlation coefficient for sea surface temperature anomaly during winter. Dotted area indicates statistically significant values at the 90% confidence level.

Table 1. The anomaly correlation coefficient between Niño indices in observation and the GloSea5 and the standard deviations of Niño index in observation and the GloSea5 during winter.

	Anomaly correlation coefficient	Standard deviation	
		Observation	GloSea5
Niño3	0.97 ^{***}	1.084	1.474
Niño3.4	0.96 ^{***}	1.162	1.517
Niño4	0.97 ^{***}	0.846	0.950

*: 90% confidence level.

** : 95% confidence level.

***: 99% confidence level.

for Environmental Prediction (NCEP)의 CFSv2가 각각 0.97과 0.85이고, The APEC Climate Center coupled Multi-Model Ensemble (APCC MME)는 0.94의 값을 가진다(Kim et al., 2012; Jeong et al., 2012). 그리고 The Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5 (MIROC5)은 선행시간 7개월까지 0.85 이상의 값을 가지고, GloSea5 이전 버전인 GloSea4도 선행시간 5개월까지 0.85 이상의 값을 가진다(Imada et al., 2015; MacLachlan et al., 2014). 이를 통해 타 계절예측시스템과 GloSea5의 El Niño 예측성능이 우수한 것을 확인하였으며, GloSea5의 1~3개월 선행시간 자료는 겨울철 El Niño의 발생을 잘 예측할 수 있다고 볼 수 있다. GloSea5가 모의하는 El Niño의 강도를 알아보기 위해 Niño 지수들의 표준편차를 구하였으며, GloSea5의 표준편차 값이 관측에 비해 크게 나타나므로 GloSea5는 관측보다 El Niño의 세기를 강하게 모의함을 알 수 있다(Table 1). 그리고 관측과 GloSea5의 표준편차 값의 차이가 동쪽으로 갈수록 (Niño3 지역) 크게 나타나므로 GloSea5는 열대 중태평양보다 동태평양으로 갈수록 관측에 비해 Niño 지수의 강도를 크게 모의한다.

두 가지 형태의 El Niño인 동태평양과 중태평양 El Niño를 정의하는 방법에는 여러 가지 방법이 존재한다(Ashok et al., 2007; Kug et al., 2009; Yeh et al.,

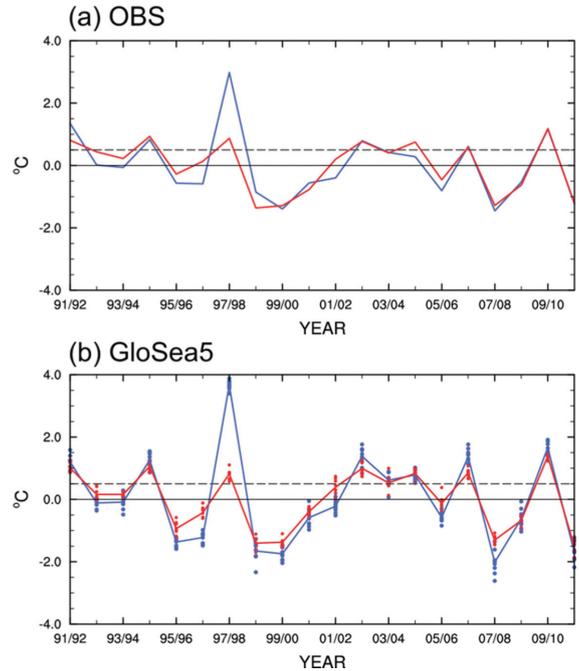


Fig. 2. Niño3 (blue line) and Niño4 (red line) indices in (a) observation and (b) the GloSea5 during winter. Dots are individual ensemble members and dashed line indicates 0.5°C.

2009; Ren and Jin, 2011). 이 중 Kim et al. (2014)를 통해 한반도 기후변동성에 가장 영향이 높다고 알려진 Kug et al. (2009)의 방법은 정규화된 Niño3 지수가 1 이상이면서 정규화된 Niño4 지수보다 크면 동태평양 El Niño, 반대로 정규화된 Niño4 지수가 1 이상이면서 정규화된 Niño3 지수보다 크면 중태평양 El Niño로 정의한다. 이 방법을 적용하면 분석기간 동안에는 정규화된 값이 작게 나타나 일반적으로 알려진 El Niño 발생 해보다 적게 선정된다. 즉, 동태평양 El Niño 발생 해는 1991/92년, 1997/98년 겨울철이고, 중태평양 El Niño 발생 해는 1994/95년, 2009/10년 겨울철이 된다. 따라서 Kug et al. (2009)의 정의 방법과 한반도 기후변동성에 비슷한 영향을 보인다고 알려진 Yeh et al. (2009)의 정의 방법을 이용하였다. 이 방법은 해수면 온도 편차를 통해 구한 Niño3 지수와 Niño4 지수를 이용한다(Fig. 2a). Niño3 지수가 0.5°C 이상의 값을 가지면서 Niño4 지수보다 크면 동태평양 El Niño로 정의하고, Niño4 지수가 0.5°C 이상의 값을 가지면서 Niño3 지수보다 크면 중태평양 El Niño로 정의하며, 분석기간 동안에 동태평양 El Niño 발생 해는 1991/92년, 1997/98년, 2002/03년, 2006/07년 겨울철이고, 중태평양 El Niño 발생 해는 1994/95년,

Table 2. List of the eastern Pacific (EP) and the central Pacific (CP) El Niño years in observation.

	EP El Niño	CP El Niño
JJA(0)	1991, 1997, 2002, 2006	1994, 2004, 2009
D(0)JF(1)	1991/92, 1997/98, 2002/03, 2006/07	1994/95, 2004/05, 2009/10
JJA(1)	1992, 1998, 2003, 2007	1995, 2005, 2010

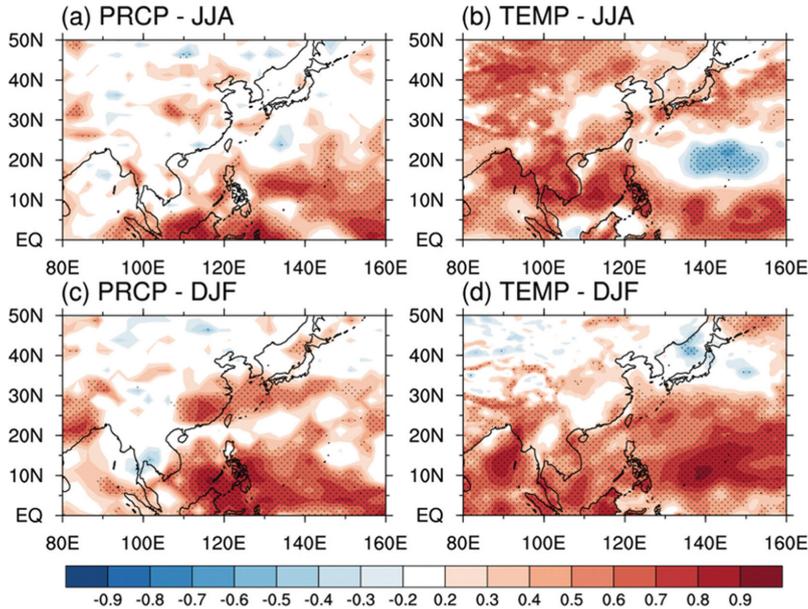


Fig. 3. The anomaly correlation coefficient for precipitation (left panel) and temperature anomaly (right panel) during summer (upper panel) and winter (lower panel). Dotted area indicates statistically significant values at the 90% confidence level.

2004/05년, 2009/10년 겨울철이 된다(Table 2). 이는 알려진 동태평양 및 중태평양 El Niño 발생 해와도 일치하는 모습을 보이므로 분석에는 Yeh et al. (2009)의 정의를 이용하였으며, 동태평양 El Niño는 EP El Niño, 중태평양 El Niño는 CP El Niño로 명명하였다. GloSea5의 EP El Niño와 CP El Niño 해를 알아보기 위해 Niño3 지수와 Niño4 지수를 구하였다(Fig. 2b). GloSea5의 EP El Niño 발생 해는 1991/92년, 1994/95년, 1997/98년, 2002/03년, 2003/04년, 2006/07년, 2009/10년 겨울철이고, CP El Niño 발생 해는 2004/05년 겨울철이다. 관측에 비해 EP El Niño 발생 해가 많이 모의되고 CP El Niño 발생 해가 적게 모의된 이유는 Table 1에서 볼 수 있듯이 관측보다 GloSea5의 Niño3 지수 변동폭이 Niño4 지수의 변동폭보다 크게 나타나면서 1994/95년과 2009/10년 겨울철도 EP El Niño 해로 모의되었기 때문이다. 그리고 2003/04년의 경우는 앙상블 평균값은 EP El Niño 해로 나타나지만 앙상블 멤버에 따라 El Niño 발생 해로 정의되지 않을 수도 있다. 그러므로 본 연구에서는 GloSea5에

서 발생 해가 한 번밖에 되지 않은 CP El Niño를 제외하고, EP El Niño 발생에 따른 동아시아 강수 및 기온에 대한 예측성능을 분석하였으며 이후 나타내는 El Niño는 EP El Niño를 의미한다. 관측과 동등한 비교를 위해 GloSea5의 El Niño 발생 해도 관측과 동일하게 적용하였으며, El Niño 발생 해를 기준으로 그 이전에 El Niño가 발달하기 시작하는 여름철을 El Niño 발달기 여름철(JJA(0))로 정의하고, 이후 El Niño가 발생하고 절정에 이르는 겨울철을 El Niño 절정기 겨울철(D(0)JF(1)), 그리고 절정에 도달한 El Niño가 쇠퇴하는 여름철을 El Niño 쇠퇴기 여름철(JJA(1))로 나타냈다(Table. 2). 즉, 1991년, 1997년, 2002년, 2006년 여름철은 JJA(0), 같은 해의 겨울철은 D(0)JF(1), 1992년, 1998년, 2003년, 2007년 여름철은 JJA(1)이 된다.

3.2 동아시아 강수 및 기온 예측성능

El Niño 발생에 따른 동아시아 강수 및 기온의 예측성능을 보기에 앞서 GloSea5의 여름철과 겨울철 동아시아 강수 및 기온에 대한 예측성능을 구하였다(Fig.

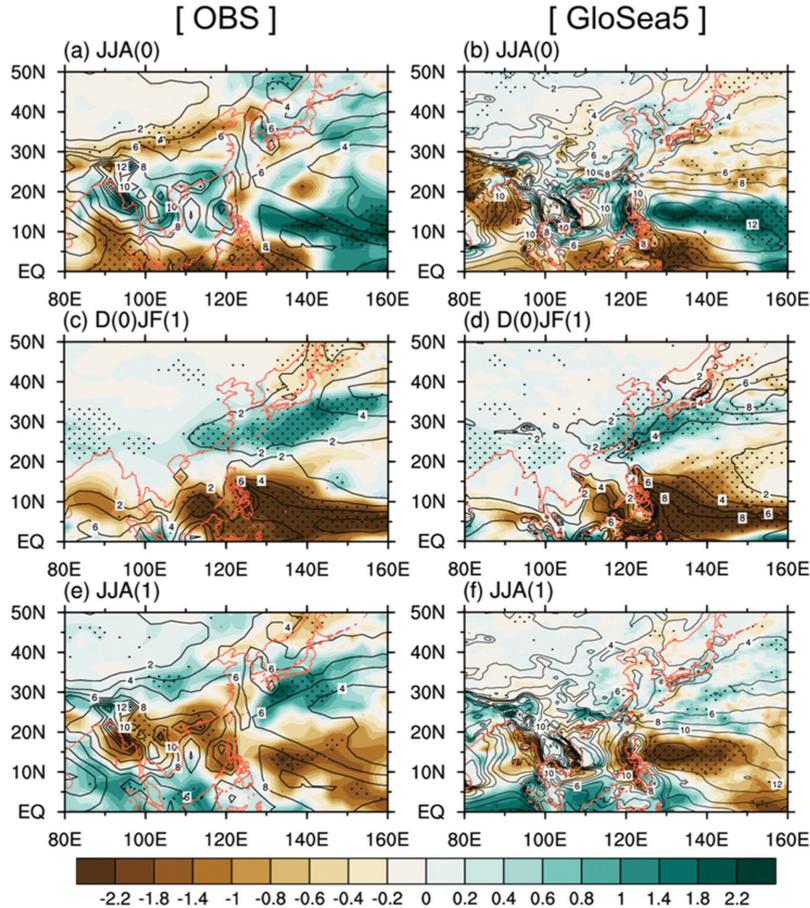


Fig. 4. The composite map of precipitation anomaly (shaded) during developing phase of El Niño summer (JJA(0)), mature phase of El Niño winter (D(0)JF(1)), and decaying phase of El Niño summer (JJA(1)), and the overlaid contours denote climatological precipitation during summer and winter. The units are mm day^{-1} and contour interval is 2 mm day^{-1} . Dotted area indicates statistically significant values at the 90% confidence level.

3). 여름철 강수는 주로 열대 서태평양 지역에서 ACC 값이 0.4 이상의 유의미한 예측성능을 가지고 있고 벵골 만과 인도차이나 반도, 중위도 지역의 예측성능은 낮게 나타난다(Fig. 3a). 겨울철 강수 예측성능도 여름철과 유사한 모습을 보이지만 인도 동부 지역과 중국 동부 지역부터 일본 남부 해양 지역에서 0.4 이상의 ACC 값이 나타난다(Fig. 3c). 여름철과 겨울철의 기온은 열대 서태평양 지역에서 0.4 이상의 ACC 값을 나타내 유의미한 예측성능을 볼 수 있으며, 강수와는 다르게 벵골 만과 인도차이나 반도에서도 유의미한 예측성능을 볼 수 있다(Figs. 3b, d). 여름철 기온은 중위도 내륙 지역과 해양에서 0.4 이상의 ACC 값이 넓게 분포하는 것을 볼 수 있으나, 북서태평양 지역에는 음의 ACC 값이 유의미하게 나타나고 말레이시아 부근에도 작은 음의 ACC 값이 나타나는 것을 볼 수

있다. 겨울철 기온은 여름철과 비교하면 중위도 내륙 지역의 예측성능은 낮지만, 북서태평양 지역에 나타나는 음의 ACC 값은 나타나지 않는다. 하지만 동해와 일본 동쪽 해양에서 음의 ACC 값을 볼 수 있다.

4. El Niño의 발달, 절정 및 쇠퇴에 따른 동아시아 강수 및 기온

4.1 강수

El Niño의 발달기, 절정기 및 쇠퇴기에 나타나는 동아시아 지역의 강수 특징을 보기 위해 JJA(0)와 D(0)JF(1), JJA(1) 시기의 강수 합성장을 살펴보았다(Fig. 4). 관측의 JJA(0) 시기에는 벵골 만 북부에서부터 인도차이나 반도와 중국 남부를 걸쳐 열대 서태평양 지역까지 넓게 양의 강수 편차가 존재한다(Fig. 4a).

중국 중부 지역에는 한반도 북부까지 동서방향으로 뻗은 음의 강수 편차를 볼 수 있으며, 연해주와 한반도 남부 및 일본 주변에서는 양의 강수 편차를 볼 수 있다. D(0)JF(1) 시기가 되면 20°N 이남의 해양 지역에서는 강한 음의 강수 편차가 나타나고, 중국 동부 지역부터 일본 남부, 북서태평양 지역에는 동서 방향으로 뻗은 양의 강수 편차가 위치한다(Fig. 4c). 그리고 동해와 일본 북부 지역에 약한 음의 강수 편차가 나타나며, 내륙 지역에는 $\pm 0.2 \text{ mm day}^{-1}$ 이내의 약한 강수 편차가 나타난다. JJA(1) 시기에는 JJA(0) 시기에 양의 강수 편차가 위치했던 뱅골 만 북부에서부터 중국 남부, 열대 서태평양 지역에는 음의 강수 편차가 나타나고, 음의 강수 편차가 위치했던 중국 중부 지역과 한반도, 대만 동쪽부터 일본 남동부 해양 지역까지는 넓게 양의 강수 편차가 위치한다(Fig. 4e). 그리고 연해주 부근에서는 JJA(0) 시기와 반대로 약한 음의 강수 편차를 볼 수 있다. JJA(1) 시기의 강수 편차 구조는 JJA(0)와 반대로 나타남을 알 수 있는데, 이것은 El Niño의 발달기와 쇠퇴기 여름철에 나타나는 2년 주기의 동아시아 몬순 변동을 잘 보여준다(Shen and Lau, 1995; Wu et al., 2003).

GloSea5가 모의하는 El Niño의 발달 과정 별 강수 합성장을 살펴보면, D(0)JF(1) 시기(Fig. 4d)에는 관측과 매우 유사하게 예측하였고, JJA(0)와 JJA(1) 시기(Figs. 4b, f)의 20°N 이남 지역은 관측과 유사하게 예측하였으나, 동아시아 내륙 지역에 나타나는 동서방향의 강수 편차에 대해서는 뚜렷한 형태를 나타내지 못했다. 세부적으로 살펴보면 JJA(0) 시기에는 인도차이나 반도의 서편에서부터 열대 서태평양 지역에 넓게 나타나는 양의 강수 편차는 잘 나타난다(Fig. 4b). 하지만 중국 내륙 지역의 강수는 뚜렷한 형태를 나타내지 않아 중국 중부 지역과 한반도 북부 지역에는 음의 강수 편차가 형성되지 않았고, 한반도 남부 지역의 양의 강수 편차는 약하게 모의되었으나 연해주와 북태평양에 존재하는 양의 강수 편차는 나타나지 않았다. D(0)JF(1) 시기에는 남중국 해 및 필리핀 해 부근의 음의 강수 편차와 중국 동부 지역에서부터 북서태평양 지역까지 뻗어있는 동서방향의 양의 강수 편차가 잘 나타난다(Fig. 4d). 동해와 일본 북부의 음의 강수 편차는 그 강도를 관측보다 작게 나타냈고, 동아시아 내륙 지역에는 약한 강수 편차가 나타난다. JJA(1) 시기에는 인도차이나 반도의 서편에서부터 열대 서태평양 지역에 나타나는 강한 음의 강수 편차를 모의하였고, 대만 동쪽부터 일본 남동부 해양 지역에는 전체적으로 약한 양의 편차를 모의하였지만, 중국 남부 지역에는 오차가 나타났다(Fig. 4f). 그리고 대부분의 동아시아 내륙 지역에서 강수 편차가 작게 나타남에 따라 중국 중부 지역과 연해주 부근의 강수 편

차가 잘 모의되지 않았다. 그러나 GloSea5의 JJA(0) 시기와 JJA(1) 시기의 강수 편차 구조는 대칭적인 모습을 나타내어 GloSea5도 El Niño의 발달기와 쇠퇴기 여름철에 나타나는 2년 주기의 동아시아 몬순 변동을 잘 모의한다.

4.2 기온

Figure 5는 시기별 기온 합성장으로 관측의 JJA(0) 시기에는 인도 동부 지역에서 중국 남부 지역을 거쳐 열대 서태평양 지역까지 음의 기온 편차, 중국 중부 지역 및 한반도 북부, 일본 남부와 북서태평양 지역에는 양의 기온 편차가 나타나며, 연해주와 오호츠크해를 포함한 북태평양 지역에는 음의 기온 편차가 나타난다(Fig. 5a). 그 중 티베트 고원 동편과 북태평양에선 다른 지역에 비해 그 강도가 크게 나타난다. D(0)JF(1) 시기가 되면 인도차이나 반도와 남중국 해에 양의 기온 편차, 티베트 고원과 그 이남에는 음의 기온 편차가 나타난다(Fig. 5c). 그리고 중국 북부, 한반도와 일본 그리고 북서태평양 지역에 강한 양의 기온 편차가 넓게 위치하고, 중국 동부 지역에도 양의 기온 편차가 나타난다. 열대 서태평양과 북태평양 지역에는 음의 기온 편차가 나타나며, 오호츠크 해에서는 강한 음의 기온 편차가 나타난다. JJA(1) 시기의 기온 편차도 JJA(0) 시기와 거의 반대로 나타나는 경향이 있으며, 인도 동부 지역에서부터 인도차이나 반도, 중국 남부 지역 및 열대 서태평양에는 양의 기온 편차, 중국 중부 및 북부, 한반도, 일본 그리고 북서태평양 지역에는 강한 음의 기온 편차가 나타난다(Fig. 5e).

GloSea5가 모의하는 El Niño의 발달 과정 별 기온 합성장은 JJA(0)와 JJA(1) 시기의 열대 서태평양 지역과 D(0)JF(1) 시기의 해양 지역에서 관측과 유사하게 나타나 높은 예측성능을 보이지만, 동아시아 내륙 지역에서 나타나는 기온의 편차는 잘 나타나지 않아, 내륙 지역에서의 예측성능은 좋지 않을 것으로 보인다. 구체적으로 JJA(0) 시기에는 중국 남부 지역에서부터 남중국 해를 거쳐 열대 서태평양 지역에 나타나는 음의 기온 편차와 일본 남부의 약한 양의 기온 편차는 모의하였으나, 북서태평양 지역의 양의 기온 편차와 북태평양의 음의 기온편차는 모의하지 못하였다(Fig. 5b). 그리고 관측에서 볼 수 있는 중국 중부 및 북부, 연해주 지역 나타나는 기온 편차도 관측과 반대의 경향을 보인다. D(0)JF(1) 시기에는 동해 일부분을 제외한 해양 지역을 관측과 유사하게 모의하였고, 티베트 고원과 그 남부 지역의 음의 기온 편차도 모의하였으나 일부에서는 그 강도가 강하게 나타났다(Fig. 5d). 그리고 티베트 고원 이남 지역의 음의 기온 편차도 모의하였으나, 중국 동부 및 북부 지역, 한반도 부근에서 넓게 나타나는 양의 기온 편차는 모의되지 않았

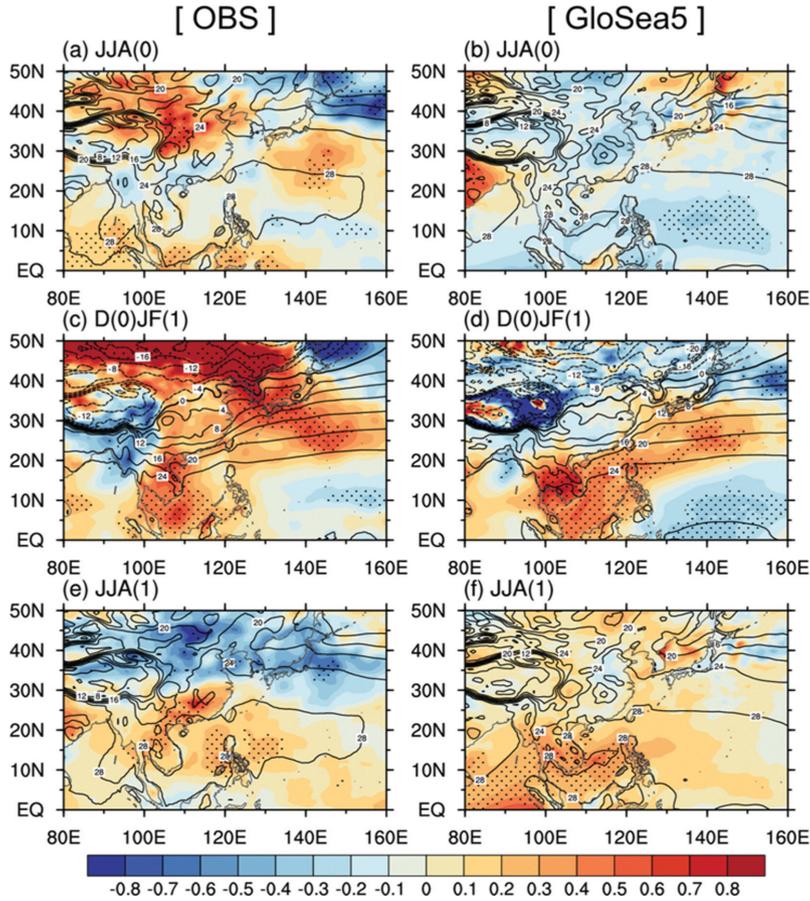


Fig. 5. Same as Fig. 4, except for 2 m air temperature anomaly. Unit is $^{\circ}\text{C}$.

다. JJA(1) 시기에는 벵골 만에서부터 열대 서태평양 지역까지 나타나는 양의 기온 편차를 모의하였고, 일본에는 약한 음의 기온 편차가 모의되었지만, 중국 남부와 30°N 이북 지역의 기온은 전반적으로 모의되지 않았다(Fig. 5f).

본 연구에서 나타난 관측의 강수와 기온 편차(Figs. 4a, c, e, and 5a, c, e)를 함께 보면 대체로 JJA(0)와 JJA(1) 시기의 전체 영역과 D(0)JF(1) 시기의 티베트 고원 남부 지역과 벵골 만 및 남중국 해에서 양의 강수 편차가 위치한 지역에는 음의 기온 편차가 나타나고, 음의 강수 편차가 위치한 지역에서는 양의 기온 편차가 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 D(0)JF(1) 시기의 서태평양 및 북태평양 지역에서는 양의 강수 편차가 위치한 지역에 양의 기온 편차를 볼 수 있고, 음의 강수 편차가 위치한 지역에는 음의 기온 편차를 볼 수 있다. 이는 Trenberth and Shea (2005)에서 밝힌 바대로 동아시아 지역에서 나타나는 강수와 기온의 관계가 여름철과 겨울철에는 전반적으로 음의 상

관을 가지고, 서태평양과 우리나라, 일본을 포함한 지역의 겨울철에는 양의 상관을 가진다는 결과와 일치한다. 또한 Trenberth and Shea (2005)는 강수와 기온이 음의 상관을 갖는 지역에서는 강수의 변동이 기온의 변동에 영향을 주고, 양의 상관관계를 갖는 지역에서는 기온의 변동이 강수의 변동에 영향을 준다고 밝혔다. 즉, 여름철 동아시아 지역과 겨울철 동아시아 내륙 지역에서는 강수의 발생이 기온의 하강을 유도하고, 강수가 없으면 기온이 상승하지만, 겨울철 서태평양과 한반도 및 일본에서는 기온의 상승이 수증기의 증가를 유도하여 강수가 증가하게 된다. GloSea5에서는 JJA(0)와 JJA(1) 시기에 강수 예측성능이 좋았던 열대 서태평양 지역에서는 기온 편차와 음의 관계를 잘 만족시키고 있으며, D(0)JF(1) 시기에도 중국 내륙 지역을 제외한 나머지 지역에서 그 관계가 잘 나타난다. 그러나 중국 내륙 지역에서는 강수 변동이 기온의 변동을 유도하는 모습이 잘 나타나지 않는데, 그 이유는 GloSea5가 JJA(0)와 JJA(1) 시기에 나타나

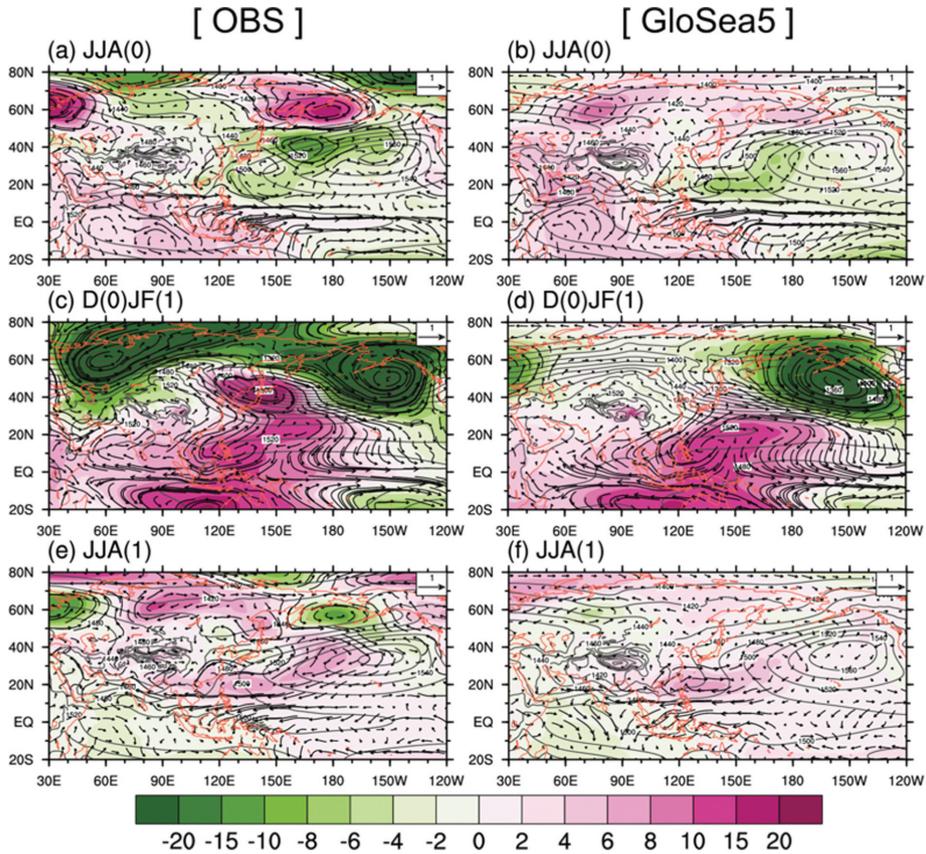


Fig. 6. Same as Fig. 4, except for geopotential height anomaly and wind anomaly at 850 hPa, and the overlaid contours denote climatological geopotential height at 850 hPa during summer and winter. Units are m and $m s^{-1}$, respectively.

는 동서방향의 강수 편차를 뚜렷하게 모의하지 못한 것이 원인으로 보인다.

5. El Niño 발달, 절정 및 쇠퇴에 따른 동아시아 주변 순환장

GloSea5의 강수와 기온의 예측성능이 JJA(0)와 JJA(1) 시기의 남중국 해 및 열대 서태평양 지역과 D(0)JF(1)의 해양 지역에서는 높고 동아시아 내륙 지역에서는 낮게 나타나는 이유를 알아보기 위해 시기별로 동아시아 주변의 하층 순환과 연직 순환 구조를 살펴보았다(Figs. 6 and 7). 일반적으로 알려진 El Niño와 관련된 동아시아 주변의 하층 순환 구조는 El Niño가 발달하는 봄철과 여름철(JJA(0))에는 북서태평양 지역에 저기압성 편차가 위치하고, 같은 해의 가을철이 되면 남중국 해에 고기압성 편차가 발달하기 시작한다. 겨울철(D(0)JF(1))이 되면 남중국 해에서 발달한 고기압성 편차가 필리핀 해로 확장되어, 이후 봄철과 여

름철(JJA(1))까지 강도는 약하지만 유지되는 모습을 보인다. 그리고 이 고기압 편차는 동아시아 내륙 지역에 습윤한 공기의 유입을 용이하게 만들어 동아시아 몬순에 영향을 주게 된다(Wang et al., 2000; Wu et al., 2003). 또한 El Niño의 발생은 위커 순환과 동아시아 지역 부근의 해들리 순환의 변동을 통해 동아시아 몬순에 영향을 준다(Yuan and Yang, 2012; Lee et al., 2017). 즉, El Niño가 발달하는 여름철(JJA(0))에 열대 서태평양 부근에 하강 기류 편차가 발생하면 20°N 부근에는 상승 기류 편차가 유도되며, 그 강도는 겨울철(D(0)JF(1))에 강화된다. 20°N 부근의 상승 기류 편차는 중국 동남부 지역과 북서태평양의 양의 강수 편차를 발생시키고, 이듬해 봄철과 여름철(JJA(1))이 되면 상승 기류 편차가 북쪽으로 이동하여 북서태평양 고기압과 몬순의 강화를 유도한다.

GloSea5는 JJA(0), D(0)JF(1), JJA(1) 시기에 나타나는 저위도 지역의 하층 순환장(Figs. 6b, d, f)을 관측(Figs. 6a, c, e)과 유사하게 모의함에 따라 남중국 해

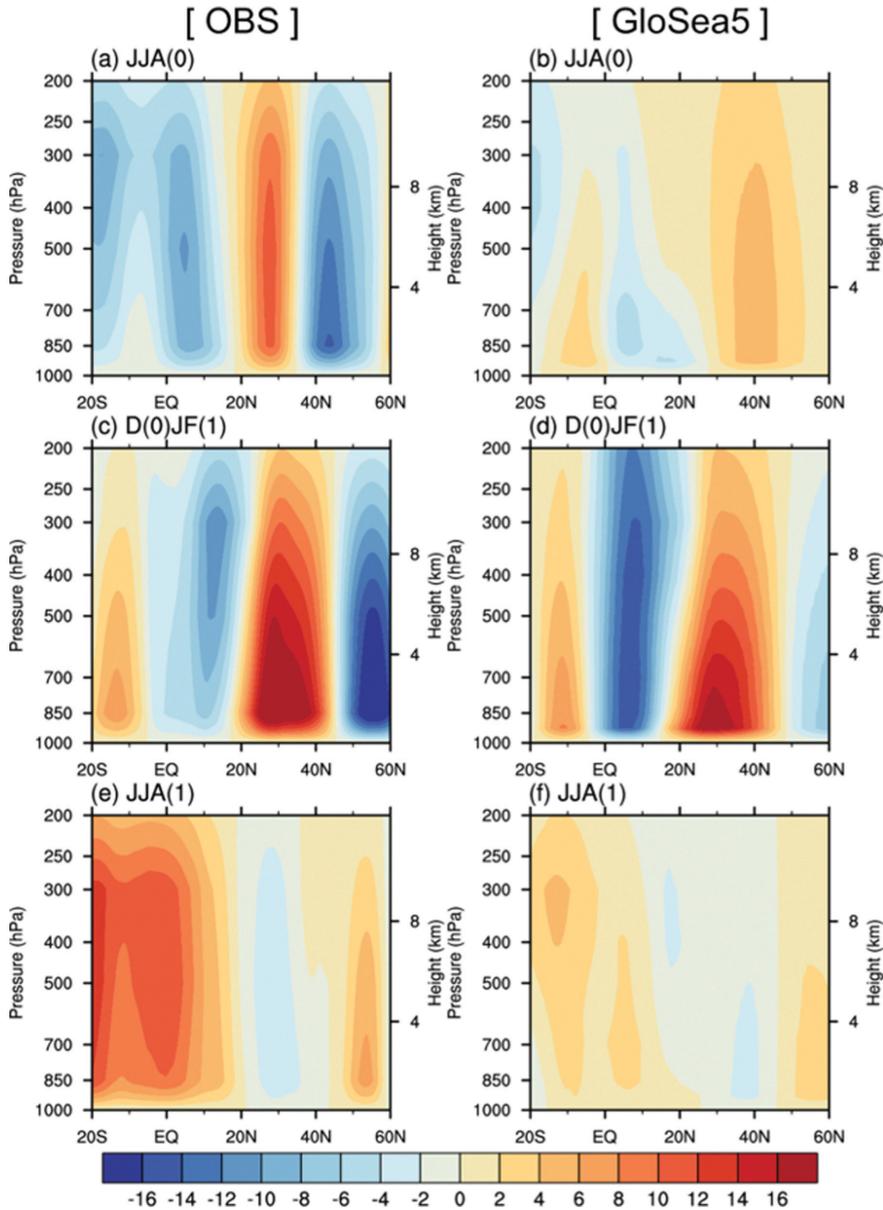


Fig. 7. Same as Fig. 4, except for zonal mean stream function at 100° - 140° E. The positive (negative) values indicate anti-cyclonic (cyclonic) circulations. Unit is $10^{10} \text{ kg s}^{-1}$.

와 열대 서태평양 지역에서의 강수와 기온 편차를 관측과 유사하게 나타내고, 강수와 기온의 관계도 잘 만족시킨다(Figs. 4 and 5). 그러나 중위도와 고위도 지역에서 하층 순환장과 연직 순환장에 오차가 생겨 D(0)JF(1) 시기의 강수 편차를 제외한 나머지 시기에는 강수와 기온 편차에 오차가 나타난다. 시기별로 살펴보면 JJA(0) 시기의 북서태평양 지역 하층에는 저

기압성 편차가 있고 15 - 30° N 부근에 상승 기류 편차가 있는 것을 볼 수 있다(Figs. 6b and 7b). 하층 저기압과 상승 기류는 강수 증가를 유도하여 인도차이나 반도에서부터 열대 서태평양 지역까지 양의 강수 편차가 잘 나타나고, 강수의 영향을 받는 기온도 음의 편차로 나타난다(Figs. 4b and 5b). 그러나 관측과 비교하면 GloSea5는 고위도로 갈수록 북서태평양에서

Table 3. The correlation coefficient between Niño index and the Siberian High Index (40°-60°N, 80°-120°E), and the Aleutian Low Index (40°-60°N, 160°E-160°W) during winter.

	Siberian high index		Aleutian low index	
	Observation	GloSea5	Observation	GloSea5
Niño3	-0.39*	-0.35	-0.51**	-0.70***
Niño3.4	-0.39*	-0.34	-0.54**	-0.73***
Niño4	-0.36	-0.29	-0.52**	-0.73***

*: 90% confidence level.
 **: 95% confidence level.
 ***: 99% confidence level.

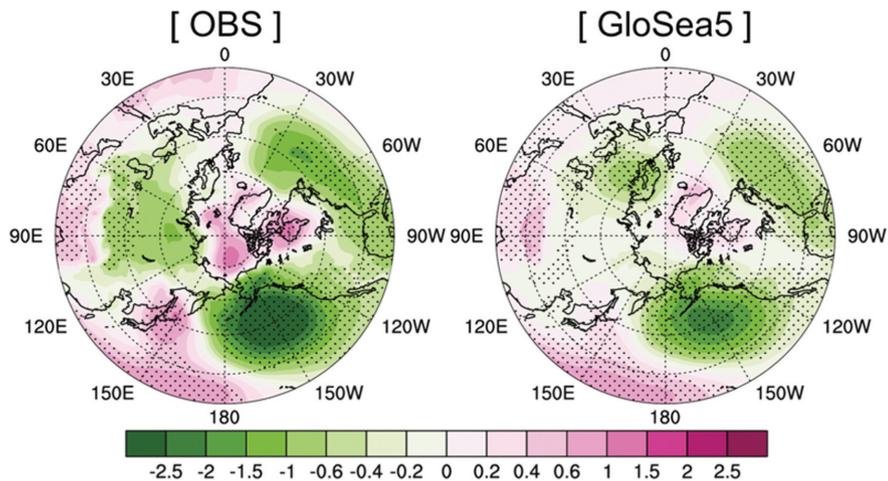


Fig. 8. The regression map of sea level pressure anomaly with Niño3 index for the period of 1991/92~2010/11 winters. Unit is hPa and dotted area indicates statistically significant values at the 90% confidence level. The regression maps of sea level pressure anomaly with Niño3.4 and Niño4 indices are very similar to that of Niño3.4 (not shown).

북태평양 방향으로 전파되는 로스비 파를 잘 모의하지 못하고, 연직 순환 구조도 위도와 고도가 높아질수록 오차가 발생한다(Figs. 6a, b, and 7a, b). 따라서 45°N 부근에 반시계방향의 연직 순환이 모의되지 않아 중국 내륙에는 하강 기류 편차와 음의 강수 편차가 나타나지 않았고, 연해주 지역에는 상승 기류 및 하층 저기압성 편차가 나타나지 않아 양의 강수 편차가 모의되지 않았다. D(0)JF(1) 시기에는 필리핀 해에 하층 고기압 편차가 형성되어 열대 지역의 고온다습한 공기가 고기압 서편의 남서풍을 타고 북서태평양 지역에 유입되며, 20°N 부근의 상승 기류 편차로 인해 북서태평양 지역에는 양의 기온 편차와 양의 강수 편차가 잘 모의되었다(Figs. 4d, 5d, 6d, 7d). 이 시기의 중위도 내륙 지역은 강수 변동이 기온 변동을 유도하는 시기인데, 중국 내륙 지역에서 강수 편차의 크기가 작으므로 기온은 강수보다는 다른 영향을 받을 것으로 보인다. 그러므로 하층 순환장을 통해 중국 동

부 및 북부, 한반도의 기온 오차의 원인을 알아보았다(Figs. 6c, d). 관측에서는 알류산 저기압 중심의 이동과 시베리아 고기압의 약화로 인해 일본 북부 주변에 고기압 편차가 나타나며, 이 고기압의 가장자리를 타고 부는 남동풍은 극 지방의 찬 공기의 남하를 어렵게 만들고 따뜻한 공기를 북상시키므로 중국 동부 및 북부 지역과 한반도, 일본 남부 지역에서는 양의 기온 편차를 볼 수 있다(Fig. 5c). GloSea5에서는 알류산 저기압 중심의 이동은 잘 모의하지만 시베리아 고기압의 약화와 일본 북부 주변의 고기압 편차가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 따라서 극 지역 찬 공기의 남하가 용이해지고 따뜻한 공기는 북상하지 못하여 중국 내륙 지역과 한반도 주변에 관측보다 낮은 값의 기온 편차가 나타난다(Fig. 5d). D(0)JF(1) 시기의 동아시아 주변 하층 순환장에서 오차가 나타나는 원인을 알아보기 위해 겨울철에 우세한 시베리아 고기압 및 알류산 저기압과 El Niño의 상관관계를 살펴보았

다(Table 3). Niño3 지수와 시베리아 고기압 지수의 상관계수는 관측과 GloSea5가 0.04 이하의 차이를 보이고, 알류산 저기압 지수와 상관계수는 GloSea5에서 더 크게 나타나므로, GloSea5 내에서 나타나는 El Niño와 시베리아 고기압, 알류산 저기압의 변동은 관측과 비슷하거나 더 밀접한 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 GloSea5의 하층 기압장을 보면 시베리아 고기압의 약화가 잘 나타나지 않는데, 그 이유는 GloSea5가 시베리아 고기압의 변동폭을 작게 모의하기 때문으로 판단되며, 이는 Niño 지수와 해면기압장을 회귀분석한 결과에서 확인할 수 있다(Fig. 8b). Figure 8을 보면 GloSea5에서 나타나는 시베리아 고기압 지역의 회귀계수는 관측보다 작게 나타난다. 그러므로 GloSea5에서 모의하는 시베리아 고기압의 변동은 관측과 비슷한 정도로 Niño 지수와 상관성을 가지고 있지만, 그 크기가 작아서 동아시아 지역에 유의미한 영향을 주지 못하는 것으로 여겨진다. JJA(1) 시기에는 북서태평양 지역에 고기압 편차가 잘 모의되고 10-20°N 부근에 강도는 약하지만 하강 기류 편차가 모의되어 열대 서태평양 지역에는 음의 강수 편차와 양의 기온 편차가 나타난다(Figs. 4f, 5f, 6f, 7f). 그리고 고온다습한 공기가 북서태평양 고기압의 서쪽 가장자리를 타고 이동함에 따라 북서태평양 지역에서 양의 강수 편차를 확인할 수 있다. 그러나 JJA(0) 시기와 마찬가지로 북서태평양에서 북태평양 방향으로 진행되는 로스비 파를 고위도로 갈수록 모의하지 못하고 연직 순환 구조도 위도와 고도가 높아질수록 오차가 발생하여(Fig. 6e, f, and 7e, f) 중국 내륙 지역의 강수 편차와 30°N 이북의 기온 편차가 잘 모의되지 않았다.

6. 요약 및 토의

본 연구는 GloSea5에서 El Niño의 발달부터 쇠퇴까지 시기별로 나타나는 동아시아 강수와 기온에 대해 예측성능을 평가하였다. 먼저 GloSea5와 관측의 Niño지수들(Niño3, Niño3.4, Niño4) 간의 ACC 값을 통해 GloSea5의 한 달 선형시간 자료를 이용할 때에는 El Niño 예측성능이 매우 높음을 확인하였다. El Niño 발생 해 정의에는 두 가지 형태의 El Niño를 고려하였으며, GloSea5에서 잘 모의된 EP El Niño 사례를 선정하였다. GloSea5가 모의하는 El Niño의 발달, 절정 및 쇠퇴에 따른 동아시아 강수 및 기온에 대해 분석하였고 시기별로 예측성능이 다름을 확인하였다. GloSea5는 El Niño 발달기 여름철인 JJA(0) 시기에 하층 기압장과 바람장, 상승 기류 편차를 저위도에서 잘 모의하여 열대 서태평양 지역의 양의 강수 편차와 음의 기온 편차를 잘 모의하였다. 그러나 중

국 내륙에서 나타나는 음의 강수 편차와 양의 기온 편차를 모의하지 못하였고, 연해주와 북태평양 지역의 양의 강수 편차도 모의하지 않아 강수의 영향을 받는 기온 편차도 오차가 나타났다. 이는 고위도로 갈수록 하층 순환장에 로스비 파를 모의하지 못하고, 연직 순환 구조에도 오차가 발생하기 때문이다. El Niño 절정기 겨울철(D(0)JF(1))에는 북서태평양의 양의 강수 편차 및 양의 기온 편차를 매우 잘 모의하였다. 그 이유는 GloSea5가 필리핀 해의 고기압 편차를 잘 모의하여 고온다습한 공기가 남서풍을 타고 북상하고, 20°N 부근에는 상승 기류 편차가 존재하여 북서태평양 지역에서는 양의 강수 편차와 양의 기온 편차가 나타나기 때문이다. 그러나 중국 내륙 대부분의 지역에서는 관측보다 낮은 기온 편차를 나타냈는데, 그 원인은 GloSea5가 알류산 저기압 중심의 동진은 모의하였으나 시베리아 고기압의 약화와 일본 북부 주변의 고기압 편차를 뚜렷하게 모의하지 못하면서 찬 공기의 남하가 용이해졌기 때문이다. El Niño 쇠퇴기 여름철인 JJA(1)에는 JJA(0)와 반대로 나타나는 특징이 있으며, 열대 서태평양 지역의 음의 강수 편차와 양의 기온 편차를 모의하였다. 이는 북서태평양 지역의 하층 고기압성 편차와 10-20°N 부근에 약한 강도의 하강 기류 편차가 모의되었기 때문이며, 이 고기압 편차에 의해 고온다습한 공기가 이동하면서 대만 동쪽부터 일본 남동부 해양 지역에는 양의 강수 편차가 모의되었다. 그러나 중국 내륙의 강수 편차와 30°N 이북의 기온 편차가 잘 모의되지 않았는데, 그 이유는 JJA(0)와 마찬가지로 하층 순환장과 연직 순환 구조가 고위도로 갈수록 오차가 발생하기 때문이다. 전체적으로 보면 GloSea5의 El Niño와 관련된 동아시아 강수와 기온의 예측성능은 JJA(0)와 JJA(1) 시기보다는 D(0)JF(1) 시기에 높으며, JJA(0)와 JJA(1) 시기의 해양 지역에서 높다. 추가적으로 본 연구에서 이용한 GloSea5 과거기후 예측자료 외에 이전 버전인 GloSea5-GA3의 과거기후 예측자료를 이용하여 같은 분석을 수행하였다. GloSea5-GA3는 과거기후 예측기간이 1996년부터 2009년까지로 본 연구에서 사용한 기간보다 짧아 EP El Niño와 CP El Niño를 구분하지 않고 분석하였는데, 그 결과는 현재 버전의 시기별 강수 및 기온 예측성능과 비슷하게 나타났다.

GloSea5는 El Niño 발생에 대해서는 우수한 예측성능을 보이지만, 열대 동태평양의 해수면 온도 변동을 열대 중태평양보다 크게 모의하면서 CP El Niño 발생 해를 EP El Niño 발생 해로 정의하는 경향이 나타났다. 그리고 El Niño와의 원격상관에 대해서는 고위도로 갈수록 하층 기압장 및 바람장을 뚜렷하게 모의하지 못하였고, 연직 순환 구조 또한 여름철에 위

도와 고도가 높아질수록 오차가 나타났다. Niño 지수와 겨울철 시베리아 고기압의 상관관계는 GloSea5에서 관측과 비슷하거나 더 밀접하게 나타났으나, Niño 지수 변동에 따른 그 변동폭은 관측보다 작게 나타났다. 그러므로 GloSea5는 열대 동태평양 해수면 온도의 변동성과 El Niño 발생에 따른 고위도 지역의 하층 순환장, 여름철 연직 순환 구조 모의에 개선이 필요하며, 시베리아 고기압의 변동폭 모의 성능도 개선이 필요하다.

본 연구에서는 여름철과 겨울철에 대해 분석하기 위해 각 계절에 대해 3개월 평균값을 이용하였다. 그러나 최근의 연구들은 계절 평균된 값을 이용하면 El Niño의 영향, 특히 한반도의 강수에 유의미한 영향을 나타내지 않으므로 계절 내 분석이 필요함을 언급하고 있고(Ho et al., 2016; Son et al., 2016), El Niño가 발생한 이후에 El Niño의 유지되는지 혹은 La Niña로 전환되는지에 따라 한반도에 나타나는 영향도 다르다고 알려져 있으므로(Yeo et al., 2017), 추후에는 El Niño에 따른 계절 내 변동과 El Niño 발생 이후 상태를 고려한 분석이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국립기상과학원 주요사업 ‘기상업무지원 기술개발연구(NIMS-2016-3100)’의 일환으로 수행되었습니다. 세밀한 심사를 해주신 두 분 심사자님들께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

Adler, R. F., and Coauthors, 2003: The version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *J. Hydrometeorol.*, **4**, 1147-1167, doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2.

Alexander, M. A., I. Bladé, M. Newman, J. R. Lanzante, N.-C. Lau, and J. D. Scott, 2002: The atmospheric bridge: the influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *J. Climate.*, **15**, 2205-2231, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<2205:TABTIO>2.0.CO;2.

Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata, 2007: El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.*, **112**, C11007, doi:10.1029/2006JC003798.

Best, M. J., and Coauthors, 2011: The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description - Part 1: Energy and water fluxes. *Geosci. Model Dev.*, **4**,

677-699, doi:10.5194/gmd-4-677-2011.

Brown, A., S. Milton, M. Cullen, B. Golding, J. Mitchell, and A. Shelly, 2012: Unified modeling and prediction of weather and climate: A 25-year journey. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 1865-1877, doi:10.1175/BAMS-D-12-00018.1.

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.

Ho, C.-H., W. Choi, J. Kim, M.-K. Kim, and H.-D. Yoo, 2016: Does El Niño-Southern Oscillation affect the precipitation in Korea on seasonal time scales? *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 395-403, doi:10.1007/s13143-016-0016-x.

Horel, J. D., and J. M. Wallace, 1981: Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 813-829, doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0813:PSAPAW>2.0.CO;2.

Hunke, E. C., and W. H. Lipscomb, 2010: CICE: The Los Alamos sea ice model documentation and software user's manual, Version 4.1, LA-CC-06-012. Technical report, Los Alamos National Laboratory, N.M, 116 pp.

Imada, Y., H. Tatebe, M. Ishii, Y. Chikamoto, M. Mori, M. Arai, M. Watanabe, and M. Kimoto, 2015: Predictability of two types of El Niño assessed using an extended seasonal prediction system by MIROC. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 4597-4617, doi:10.1175/MWR-D-15-0007.1.

Jeong, H.-I., and Coauthors, 2012: Assessment of the APCC coupled MME suite in predicting the distinctive climate impacts of two flavors of ENSO during boreal winter. *Climate Dyn.*, **39**, 475-493, doi:10.1007/s00382-012-1359-3.

Jeong, J.-H., and Coauthors, 2017: The status and prospect of seasonal climate prediction of climate over Korea and East Asia: A review. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 149-173, doi:10.1007/s13143-017-0008-5.

Jhun, J.-G., and E.-J. Lee, 2004: A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon. *J. Climate.*, **17**, 711-726, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0711:ANEAWM>2.0.CO;2.

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).

Kang, I.-S., and Y.-K. Jeong, 1996: Association of interan-

- nual variations of temperature and precipitation in Seoul with principal modes of pacific SST. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **32**, 339-345.
- Kim, H.-M., P. J. Webster, and J. A. Curry, 2012: Seasonal prediction skill of ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 retrospective forecast for the Northern Hemisphere Winter. *Climate Dyn.*, **39**, 2957-2973, doi:10.1007/s00382-012-1364-6.
- Kim, J.-S., J.-S. Kug, S.-W. Yeh, H.-K. Kim, and E.-H. Park, 2014: Relation between climate variability in Korea and two types of El Niño, and their sensitivity to definition of two types of El Niño. *Atmosphere*, **24**, 89-99, doi:10.14191/Atmos.2014.24.1.089.
- Kim, S., H.-S. Kim, S.-K. Min, H.-Y. Son, D.-J. Won, H.-S. Jung, and J.-S. Kug, 2015: Intra-winter atmospheric circulation changes over East Asia and North Pacific associated with ENSO in a seasonal prediction model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 49-60, doi:10.1007/s13143-014-0059-9.
- Kug, J.-S., F.-F. Jin, and S.-I. An, 2009: Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *J. Climate*, **22**, 1499-1515, doi:10.1175/2008JCLI2624.1.
- Lee, J.-Y., and Coauthors, 2017: The long-term variability of Changma in the East Asian summer monsoon system: A review and revisit. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 257-272, doi:10.1007/s13143-017-0032-5.
- MacLachlan, C., and Coauthors, 2014: 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.
- Madec, G., 2008: NEMO ocean engine. Note du Pôle de modélisation. *Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France*, **27**.
- Min, S.-K., and Coauthors, 2015: Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: A review. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 103-121, doi:10.1007/s13143-015-0066-5.
- Rasmusson, E. M., and T. H. Carpenter, 1982: Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 354-384, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0354:VITSST>2.0.CO;2.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- Ren, H.-L., and F.-F. Jin, 2011: Niño indices for two types of ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L04704, doi:10.1029/2010GL046031.
- Shen, S., and K.-M. Lau, 1995: Biennial oscillation associated with the East Asian summer monsoon and tropical sea surface temperatures. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 105-124, doi:10.2151/jmsj1965.73.1_105.
- Son, H.-Y., J.-Y. Park, and J.-S. Kug, 2016: Precipitation variability in September over the Korean Peninsula during ENSO developing phase. *Climate Dyn.*, **46**, 3419-3430, doi:10.1007/s00382-015-2776-x.
- Trenberth, K. E., and D. J. Shea, 2005: Relationships between precipitation and surface temperature. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14703, doi:10.1029/2005GL022760.
- Walters, D. N., and Coauthors, 2011: The Met Office Unified Model global atmosphere 3.0/3.1 and JULES global land 3.0/3.1 configurations. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 919-941, doi:10.5194/gmd-4-919-2011.
- Wang, B., R. Wu, and X. Fu, 2000: Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?. *J. Climate*, **13**, 1517-1536, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2.
- _____, R. Wu, and K.-M. Lau, 2001: Interannual Variability of Asian Summer Monsoon: Contrasts between the Indian and the Western North Pacific-East Asian Monsoons. *J. Climate*, **14**, 4073-4090, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<4073:IVOTAS>2.0.CO;2.
- _____, Z. Wu, J. Li, J. Liu, C.-P. Chang, Y. Ding, and G. Wu, 2008: How to measure the strength of the East Asian summer monsoon. *J. Climate*, **21**, 4449-4463, doi:10.1175/2008JCLI2183.1.
- Wang, L., and W. Chen, 2010: How well do existing indices measure the strength of the East Asian winter monsoon?. *Adv. Atmos. Sci.*, **27**, 855-870, doi:10.1007/s00376-009-9094-3.
- 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.
- _____, V. O. Magaña, T. N. Palmer, J. Shukla, R. A. Tomas, M. Yanai, and T. Yasunari, 1998: Monsoons: Processes, predictability, and prospects for prediction. *J. Geophys. Res.*, **103**, 14451-14510, doi:10.1029/97JC02719.
- Weng, H., K. Ashok, S. K. Behera, S. A. Rao, and T. Yamagata, 2007: Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Climate Dyn.*, **29**, 113-129, doi:10.1007/s00382-007-0234-0.
- _____, S. K. Behera, and T. Yamagata, 2009: Anomalous

- winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events. *Climate Dyn.*, **32**, 663-674, doi:10.1007/s00382-008-0394-6.
- Wu, R., Z.-Z. Hu, and B. P. Kirtman, 2003: Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia. *J. Climate*, **16**, 3742-3758, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3742:EOERAI>2.0.CO;2.
- Yeh, S.-W., J.-S. Kug, B. Dewitte, M.-H. Kwon, B. P. Kirtman, and F.-F. Jin, 2009: El Niño in a changing climate. *Nature*, **461**, 511-514, doi:10.1038/nature08316.
- Yeo, S.-R., S.-W. Yeh, Y. Kim, and S.-Y. Yim, 2017: Monthly climate variation over Korea in relation to the two types of ENSO evolution. *Int. J. Climatol.*, **38**, 811-824, doi:10.1002/joc.5212.
- Yuan, Y., and S. Yang, 2012: Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: focus on ENSO cycles. *J. Climate*, **25**, 7702-7722, doi:10.1175/JCLI-D-11-00576.1.
- Zhang, R., A. Sumi, and M. Kimoto, 1996: Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 49-62, doi:10.2151/jmsj1965.74.1_49.