

북태평양 스톰트랙 활동과 동아시아 겨울 몬순의 상관성에 관한 CMIP5 모델의 모의 성능

윤재승¹⁾ · 정일웅^{1),*} · 신상희²⁾

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾강릉원주대학교 산학협력단

(접수일: 2015년 2월 27일, 수정일: 2015년 3월 6일, 게재확정일: 2015년 3월 6일)

Performance of CMIP5 Models for the Relationship between Variabilities of the North Pacific Storm Track and East Asian Winter Monsoon

Jae-Seung Yoon¹⁾, Il-Ung Chung^{1),*}, and Sang-Hye Shin²⁾

¹⁾Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangwon, Korea

²⁾Industry Academy Cooperation Group, Gangneung-Wonju National University, Gangwon, Korea

(Manuscript received 27 February 2015; revised 6 March 2015; accepted 6 March 2015)

Abstract Based on the CMIP5 historical simulation datasets, we assessed the performance of state-of-the-art climate models in respect to the relationship between interannual variabilities of the North Pacific synoptic eddy (NPSE) and East Asian winter monsoon (EAWM). Observation (ERA-Interim) shows a high negative correlation (-0.73) between the interannual variabilities of East Asian winter monsoon (EAWM) intensity and North Pacific synoptic eddy (NPSE) activity during the period of 1979~2005. Namely, a stronger (weaker) EAWM is related to a weaker (stronger) synoptic eddy activities over the North Pacific. This strong reverse relationship can be well explained by latitudinal distributions of the surface temperature anomalies over East Asian continent, which leads the variation of local baroclinicity and significantly weakens the baroclinic wave activities over the northern latitudes of 40°N . This feature is supported by the distribution of the meridional heat flux ($\bar{v'\theta'}$) anomalies, which have negative (positive) values along the latitudes $40\sim 50^{\circ}\text{N}$ for strong(weak) EAWM years. In this study, the historical simulations by 11 CMIP5 climate models (BCC-CSM1.1, CanESM2, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, HadGEM2-AO, HadGEM2-CC, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, and NorESM1-M) are analyzed for DJF of 1979~2005. Correlation coefficient between the two phenomena is -0.59 , which is comparable to that of observation. Model-to-model variation in this relationship is relatively large as the range of correlation coefficient is between -0.76 (HadGEM2-CC and HadGEM2-AO) and -0.33 (MRI-CGCM3). But, these reverse relationships are shown in all models without any exception. We found that the multi-model ensemble is qualitatively similar to the observation in reasoning (that is, latitudinal distribution of surface temperature anomalies, variation of local baroclinicity and meridional heat flux by synoptic eddies) of the reverse relationship. However, the uncertainty for weak EAWM is much larger than strong EAWM. In conclusion, we suggest that CMIP5 models as an ensemble have a good performance in the simulation of EAWM, NPSE, and their relationship.

Key words: East asian winter monsoon, North Pacific synoptic eddy, storm track, CMIP5 models

*Corresponding Author: Il-Ung Chung, Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 210-702, Korea.
Phone : +82-33-640-2325, Fax : +82-33-640-2320
E-mail : iuchung@gwnu.ac.kr

1. 서 론

중위도 스톱트랙에서 일시성 에디들(transient eddies)은 대기에서 운동량, 에너지, 그리고 수분을 수송하는 주된 메커니즘이며, 이러한 이유로서 지구 기후 시스템의 가장 중요한 성분들 중 하나이다(O'Gorman, 2010). 뿐만 아니라, 지구 온난화하에서 이 열대 밖 스톱트랙의 변화는 날씨 패턴을 변화시킴으로써 해양 순환, 탄소 순환, 그리고 사회 등에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 스톱트랙은 개개의 스톱트랙 경로보다는 중규모 경압과 관련된 고주파 요란이 지배적인 지역을 가리킨다(Chang and Fu, 2002). 그러므로 스톱트랙의 변동성은 중위도 기본 상태와 매우 관련이 깊으며, 이렇게 기본류에서 관찰된 변화는 중규모 에디의 시간평균 활동을 이해하는 데 매우 중요한 역할을 한다. Chang (2006)은 겨울철 태평양 제트류 및 스톱트랙의 구조가 오로지 평균류에만 의존할 뿐 세세한 강제에는 민감하지 않음을 발견하였다. Lau (1998) 또한 스톱트랙의 월 변화가 기후 모드에서 양의 피드백을 가지는 순환의 저주파 성분의 변동과 관계가 있음을 보고하였다. 이러한 맥락에서 중위도 스톱트랙과 중위도 기본류와의 상호작용을 이해하는 것은 매우 중요하다.

동아시아 겨울 몬순(East Asia winter monsoon, 이하 EAWM)은 열대 밖과 열대의 행성규모 순환에 큰 영향을 준다(Chang and Lau, 1982). EAWM의 가장 두드러지는 특징은 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 강화로 나타나며, 일본 남쪽 300 hPa 고도에서 나타나는 한대제트류의 강화다. 그리고 대륙권 중층의 동아시아 기압골은 더욱 강해져 이 기간 동안 한국과 일본의 겨울을 더 춥게 만든다(Jhun and Lee, 2004). Nakamura et al. (2002)은 최근 17년 겨울에 걸쳐 태평양 스톱트랙과 EAWM 사이의 관계를 규명했다. 이들은 EAWM과 관계된 남북방향 열수송과 태평양 스톱트랙의 경년 변동성 사이에 반대 위상(out-of-phase)의 관계를 발견했다. 이들은 이러한 분석을 근거로 북서태평양에서 발생한 겨울철 스톱트랙 활동의 강화가 1980년대 후반부터 십년간 발생한 EAWM의 약화와 관련됨을 주장하였다. 즉 겨울철 스톱트랙 활동의 약화는 1980년대 중반 이후에는 덜 분명해진다는 것이다. Lee et al. (2010)은 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 40년 재분석자료(이하 ERA40)를 사용하여 겨울철 북태평양 스톱트랙에서의 중관 에디 활동의 강도와 EAWM의 강도 간에 높은 음의 상관관계가 존재함을 밝히고, 그 이유를 성공적으로 설명하였다. 또한 Zhang et al. (2013)은 EAWM과 함께 나타나는 계절풍은 태평양에서의 경압과 수송에 중요한 요소이며, 태평양 스톱트랙의

발달에 기여한다는 사실을 입증하였다. 이처럼 최근에도 북태평양 스톱트랙과 EAWM의 관계에 대해서 활발히 연구가 이루어지고 있다.

PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison)가 구축해 놓은 세계 우수 집합 기후 모델들(Coupled Global Climate Models, CGCMs)에 의한 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase-5) 실험 결과가 이 두 중위도 현상(EAWM과 스톱트랙) 자체에 대한 모의 성능뿐 아니라 시간 규모가 다른 이 현상들 간의 상관성에 대해 현실성 높은 모의 성능을 보인다면, 이 모델들에 의해 생산된 미래 변화 전망에 대해서도 높은 신뢰도를 부여할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 이 두 중위도 현상들간의 상관성 모의 성능을 기후 모델 평가를 위한 척도로 삼았고, 11개의 CMIP5 참여 모델의 모의 자료를 분석하였다. 재분석자료와 CMIP5 모델 결과들과의 상호 비교를 통해 겨울철 동아시아 기후에 영향을 미치는 EAWM과 북태평양 스톱트랙의 관계를 파악하고, 이 두 현상들과 이들간의 상관성에 대한 CMIP5 기후 모델들의 모의 성능을 살펴보고자 한다.

2. 자료 및 연구 방법

과거 모의 결과의 검증을 위해 ECMWF에서 생산된 Interim 재분석자료(이하 ERA-I; Dee et al., 2011)를 사용하였다. 분석변수는 일·월 평균 지표 기온과 지위고도, 동서바람, 남북바람 등이며, 분석기간은 1979~2005년으로 수평해상도는 전지구 위·경도 1.5° × 1.5°이다. 겨울철의 모습을 비교하기 위해 12월, 1월 그리고 2월 자료(이하 DJF)를 사용하였으며, 어느 해 겨울철을 그 해 12월과 다음 해 1월과 2월로 정의하였다.

이 연구에 사용된 모델 자료는 CMIP5 프로젝트에 참여하고 있는 11개 모델에 의해 생산된 자료로서, 이 중 1979년부터 2005년 겨울철 기간에 대해 과거 모의(historical run) 결과를 분석하였다. 분석에 이용된 11개 CGCMs의 목록은 다음과 같다: BCC-CSM1.1, CanESM2, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, HadGEM2-AO, HadGEM2-CC, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, NorESM1-M. 또한 과거 모의는 관측자료와 일관된 변화하는 다음의 모든 강제 조건들-인위적인 영향 및 화산폭발에 의한 대기 조성(이산화탄소를 포함)과 복사 강제, 단기체류 화학종(short-lived species)의 배출 농도, 자연적/인위적 에어로졸과 에어로졸 전구체, 그리고 지면이용도 등을 포함한다(Taylor et al., 2012).

본 연구에서는 Jhun and Lee (2004)에 의해 고안된 동아시아 겨울 몬순지수(East Asian winter monsoon

index, 이하 EAWMI)를 이용하였다. EAWMI는 (27.5°N~37.5°N, 110°E~170°E)와 (50°N~60°N, 80°E~140°E)의 두 영역에 대해 평균된 250 hPa 동서바람 아노말리의 차이로서, 이 지수는 시베리아 고기압과 알류산 저기압과 각각 높은 상관을 보이며 육지-해양 대비 정보를 포함하며 중위도 동아시아 지역에서의 겨울철 몬순 변동성을 잘 나타낸다. 또한 강한 몬순해와 약한 몬순해를 정의하기 위해, $\pm 1\sigma$ 를 넘는 EAWMI가 나타나는 해를 선택하였다.

또한 북태평양 스톱트랙의 분석을 위해 Butterworth 밴드패스 필터(Stearns, 1984)를 이용하여, 일 평균 250 hPa 남북 바람장을 2~8일 밴드패스 필터링한 후 분산을 계산하였다(Chang et al., 2002). 북태평양 스톱트랙은 스톱의 생성 혹은 소멸되는 지역에 따라, 빈도나 강도 변화 혹은 연직 구조에 대한 정보를 분석하고자 하는 목적에 따라, 다양한 분석방법을 적절하게 이용하는 것이 필요하다(Greeves et al., 2007). 본 연구에서는 동아시아 겨울몬순과 관련된 북태평양 스톱트랙 강도의 경년변동성을 살펴보고자, 계산된 남북바람의 분산을 스톱트랙 풍상측 영역(30~60°N, 120~160°E)에 대해 평균함으로써 북태평양 스톱트랙 지수(North Pacific synoptic eddy index, 이하 NPSEI)를 구하였다(Lee et al., 2010). 스톱트랙 풍상측 지역에서의 에디 활동은 트랙을 따라 전파되어 태평양 지역에서의 스톱트랙의 발달과 경압성 발달에 영향을 미친다(Orlanski, 2005).

위에서 구한 두 지수를 활용하여, 북태평양 스톱트랙 활동과 동아시아 겨울 몬순 사이의 상관분석을 통해 두 중위도 현상간의 관계에 대한 원인 분석을 다음과 같이 실시하였다. 먼저, EAWMI의 강한 경년 변동성에 근거하여, 전형적인 EAWM 패턴과 관련된 회귀 지도 분석을 실시하였고, 강한 몬순 기간과 약한 몬순 기간 동안의 동서바람 평균 및 아노말리 장 분석, 동중국 대륙(80°E~120°E) 동서평균 지상 2 m 기온 아노말리의 자오 분포 분석, 경압과정을 통한 파동의 상향 전파를 알기 위해 남북 열속(heat flux) 분석을 실시하였다.

3. 결 과

3.1 북태평양 스톱트랙과 동아시아 겨울 몬순의 관계

앞서 정의한 EAWMI와 NPSEI의 변동성에 대해 재분석자료(ERA-I)의 결과를 Fig. 1에 나타냈다. 재분석 자료에서 나타난 EAWMI와 NPSEI 사이의 관계는 -0.73으로 매우 높은 음의 상관성이 나타났다. 즉, 동아시아 겨울 몬순이 강할 때, 북태평양 스톱트랙 활동은 약해지고, 반대로 동아시아 겨울 몬순이 약할 경우 북태평양 스톱트랙 활동은 강해짐을 의미한다.

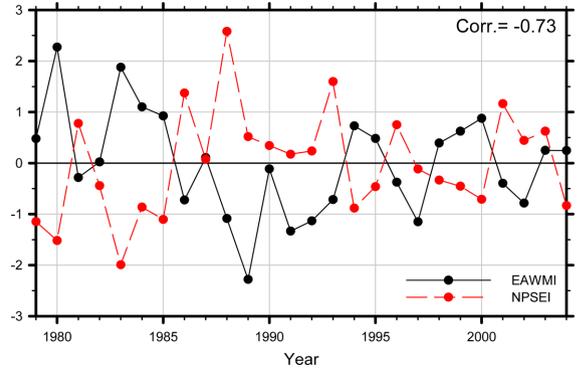


Fig. 1. Time series of the normalized anomalies of North Pacific synoptic eddy index (NPSEI, dotted line) and East Asian winter monsoon index (EAWMI, solid line) during boreal winter (DJF) during 1979~2005 in ECMWF Interim reanalysis.

Table 1. The correlation coefficient between normalized NPSEI and EAWMI from ERA-Interim and CMIP5 models.

Model	Correlation
ERA-Interim	-0.73
BCC-CSM1.1	-0.41
CanESM2	-0.59
GFDL-ESM2G	-0.66
GFDL-ESM2M	-0.72
HadGEM2-AO	-0.76
HadGEM2-CC	-0.76
IPSL-CM5A-LR	-0.47
MPI-ESM-LR	-0.71
MPI-ESM-MR	-0.51
MRI-CGCM3	-0.33
NorESM1-M	-0.60
MME	-0.59
Std. Dev.	0.1466

Table 1에는 ERA-I와 CMIP5 모델에 나타난 두 현상간의 상관성 결과를 나타냈다. 다중-모델 앙상블 평균(이하, MME 평균) 결과에서는 -0.59로 비교적 높은 음의 상관성이 나타났으나 모델들간 편차는 다소 존재한다. HadGEM2-AO와 HadGEM2-CC, GFDL-ESM2M, 그리고 MPI-ESM-LR은 관측과 상당히 비슷한 높은 상관성을 잘 모의한 반면, MRI-CGCM과 BCC-CSM1.1, 그리고 IPSL-CM5A-LR 모델은 두 관계를 낮게 모의하였다. 그러나 모든 CMIP5 모델에서 두 현상 사이에 음의 상관관을 보인 특징은 잘 모의하였다.

또한, 본 연구에서는 분석기간 동안의 EAWMI를 기준으로 삼아, $\pm 1\sigma$ 를 벗어난 해를 강한 몬순해와 약

Table 2. The number of strong and weak monsoon years in ERA-Interim and CMIP5 models.

Model	No. of Strong Monsoon	No. of Weak Monsoon
ERA-Interim	3	5
BCC-CSM1.1	4	4
CanESM2	5	5
GFDL-ESM2G	5	3
GFDL-ESM2M	4	4
HadGEM2-AO	3	6
HadGEM2-CC	4	5
IPSL-CM5A-LR	5	3
MPI-ESM-LR	6	2
MPI-ESM-MR	5	4
MRI-CGCM3	5	4
NorESM1-M	4	5

한 몬순해로 구분하였다. Table 2에는 강한 몬순해와 약한 몬순해들이 나타난 횟수를 재분석자료와 11개 CMIP5 모델에 대해 나타냈다. ERA-I의 경우 강한 몬순해는 3회, 약한 몬순해는 5회에 걸쳐 나타났다. CMIP5 모델 중에서 강한 몬순해의 경우 MPI-ESM-LR 모델이 6회로 관측보다 두 배 높은 빈도로 모의

한 반면, 약한 몬순해의 경우 HadGEM2-AO 모델이 6회로 관측보다 높은 빈도를 보였다. HadGEM2-AO를 제외한 모든 모델들에서 동일한 기간에 대해 강한 몬순해의 빈도수가 관측에 비해 높게 모의되며 약한 몬순해의 빈도수는 낮게 모의됨을 확인할 수 있다. 이는 모델이 재분석자료에 비해 동아시아 겨울몬순을 과대모의하는 경향을 보임을 의미한다. 또한 EAWMI의 표준편차를 살펴보면, 11개 모델 중 7개 모델에서의 경년변동성이 재분석자료에 비해 다소 약하게 모의되는 경향을 보인다.

3.2 동아시아 겨울 몬순의 패턴

앞서 보인 EAWMI와 NPSEI 간의 음의 상관성이 나타난 결과를 더 자세히 살펴보기 위해 동아시아 겨울 몬순의 평균 모습에 근거하여 지상 2 m 기온과 250 hPa 동서바람, 850 hPa 하층바람 및 500 hPa 지위고도 아노말리와 EAWMI의 회귀지도 분석을 각각 재분석자료(Fig. 2)와 CMIP5 모델자료(Fig. 3)를 이용하여 수행하였다(Lee et al., 2010). 관측에서, 전형적인 동아시아 겨울 몬순의 패턴을 확인할 수 있다. 즉, 동아시아 겨울 몬순이 강할 때, 시베리아 고기압 및 알류산 저기압의 강화가 뚜렷하게 나타난다(Fig. 2d). 이로 인해 야기된 강한 북풍은 동아시아 지역에 차가운 공기를 몰

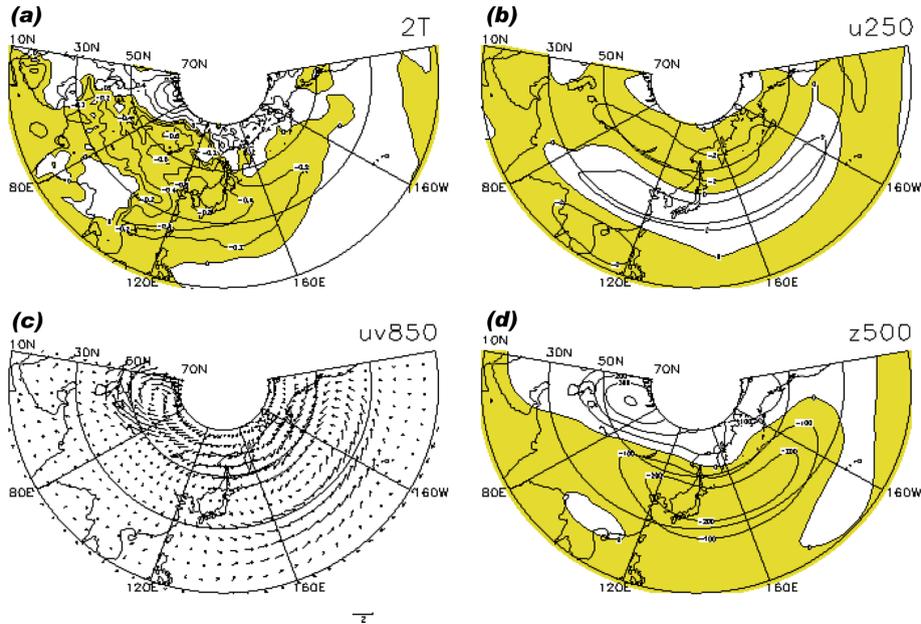


Fig. 2. Regression maps of (a) 2 m temperature anomaly, (b) 250 hPa zonal wind anomaly, (c) 850 hPa horizontal wind anomaly, and (d) 500 hPa geopotential height anomaly, based on the East Asian winter monsoon index during boreal winter (DJF) in ERA-Interim. The contour intervals are (a) 0.2 K, (b) 2 m s⁻¹, and (d) 100 m, and the unit of vector in (c) is 2 m s⁻¹. Shaded region depicts negative value.

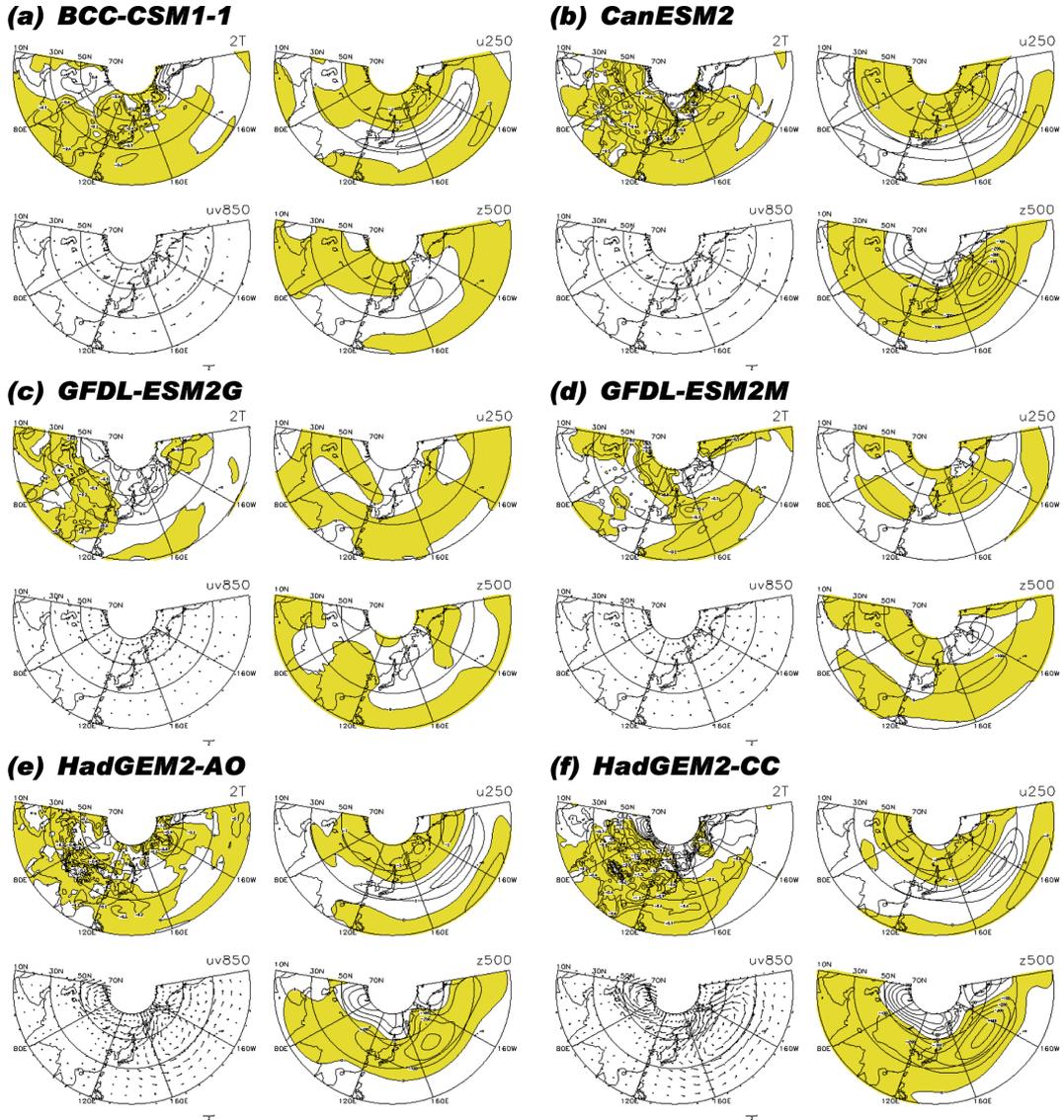


Fig. 3. Same as Fig. 2 except (a) BCC-CSM1.1, (b) CanESM2, (c) GFDL-ESM2G (d) GFDL-ESM2M, (e) HadGEM2-AO, (f) HadGEM2-CC, (g) IPSL-CM5A-LR, (h) MPI-ESM-LR, (i) MPI-ESM-MR, (j) MRI-CGCM3, (k) NorESM1-M, (l) MME.

고 와 한반도를 중심으로 하는 북서태평양 지역 지상 기온에 강한 음의 아노말리가 나타난다(Fig. 2a). 그 결과 상층에는 북태평양 제트가 강화되고 고위도 지역의 편서풍이 약해지는 모습을 보인다(Fig. 2b). 이는 북태평양 지역의 저기압성 하층순환 및 시베리아 지역의 고기압성 하층순환의 강화(Fig. 2c)와도 일관된다.

CMIP5 모델의 회귀지도에서도 전반적으로 재분석 자료에서 나타난 이러한 공간적인 분포 특징을 확인할 수 있다. 다-모델 앙상블 평균을 살펴보면, 하층 냉각, 40°N을 중심으로 이남지역의 제트의 강화와 이북

지역의 제트 약화, 그리고 시베리아 고기압 및 알류산 저기압의 강화 등 주요 특징을 매우 잘 모의하고 있다(Fig. 3i). 특히, NPSEI와 EAWMI 간의 상관관계가 높았던 HadGEM2-AO (Fig. 3e)와 HadGEM2-CC (Fig. 3f) 모델에서 관측과 상당히 유사한 패턴을 보이며 동아시아 겨울몬순과 관련된 경년변동성이 뚜렷하게 나타난다. 비록 아열대 제트의 중심이나 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 중심 위치가 관측에서 보다 동쪽에 위치하는 등 위치와 크기에서 다소 차이는 존재하나 분포의 특징과 변수들의 일관된 변화 경

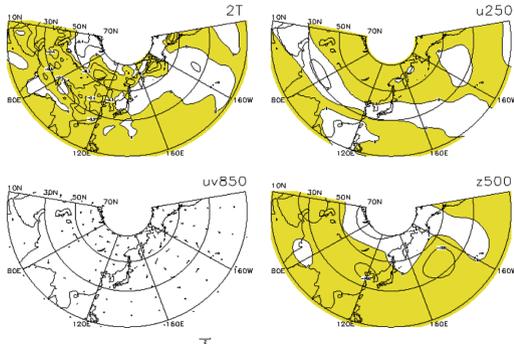
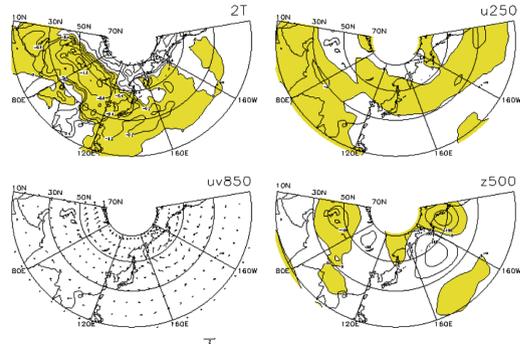
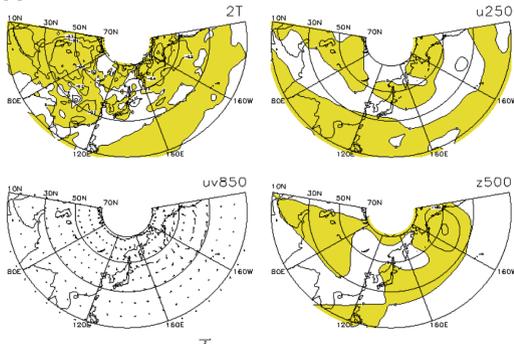
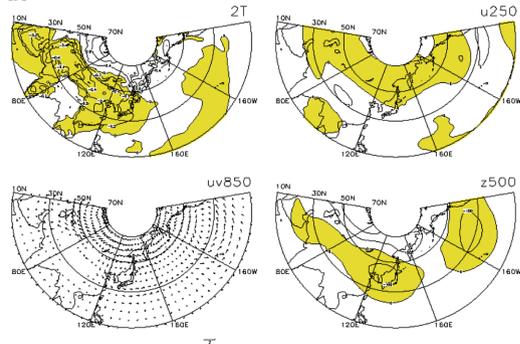
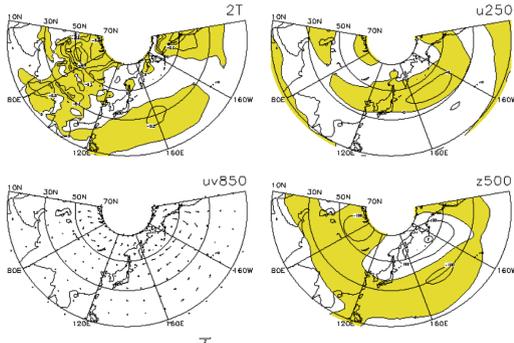
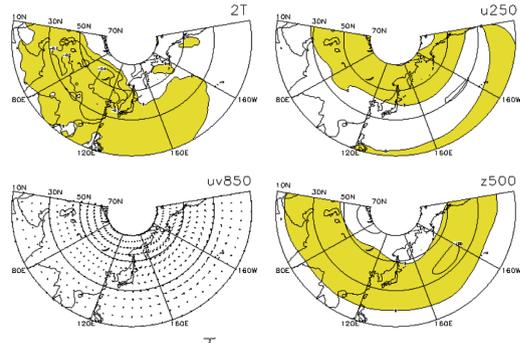
(g) IPSL-CM5A-LR**(h) MPI-ESM-LR****(i) MPI-ESM-MR****(j) MRI-CGCM3****(k) NorESM1-M****(l) MME**

Fig. 3. Continued.

향은 좋은 모의능력을 나타낸다. 비교적 상관계수가 낮았던 CanESM2 (Fig. 3b) 모델도 변수들의 공간분포 특징들을 일관되게 잘 모의한다. 반면, GFDL-ESM2G (Fig. 3c) 모델은 몬순과 스톱트랙 간의 상관성은 비교적 잘 모의하였으나, 경년변동성과 관련된 시베리아 고기압 및 알류산 저기압의 패턴이나 아열대 제트의 강화를 표현하는 데는 다소 미흡한 모의 성능을 보였다.

3.3 스톱트랙 에디 활동

동아시아 겨울몬순과 상층 제트와의 관련성을 Fig.

2와 Fig. 3에서 확인하였다. 관측과 모델 앙상블 모두에서, 몬순이 강할 때, 40°N을 중심으로 이남지역의 아열대 제트의 강화와 이북 지역의 한대 제트 약화가 뚜렷하게 나타나며 몬순이 약할 때는 반대의 특징이 나타난다. 따라서 한대 제트의 변화는 에디 활동의 변화와 이어져, 스톱트랙 강도의 증감과도 관련이 깊다. Figures 4와 5에는 강한 몬순해와 약한 몬순해에 대해, 태평양 지역(120°E~160°W)에서의 동서-평균된 동서바람과 동서바람 아노말리의 연직-위도 단면을 보였다. 재분석자료에서(Fig. 4), 강한 몬순해의 경우 아열대 제트의 중심 근처(20~40°N)에서 양의 아노말리가, 40~

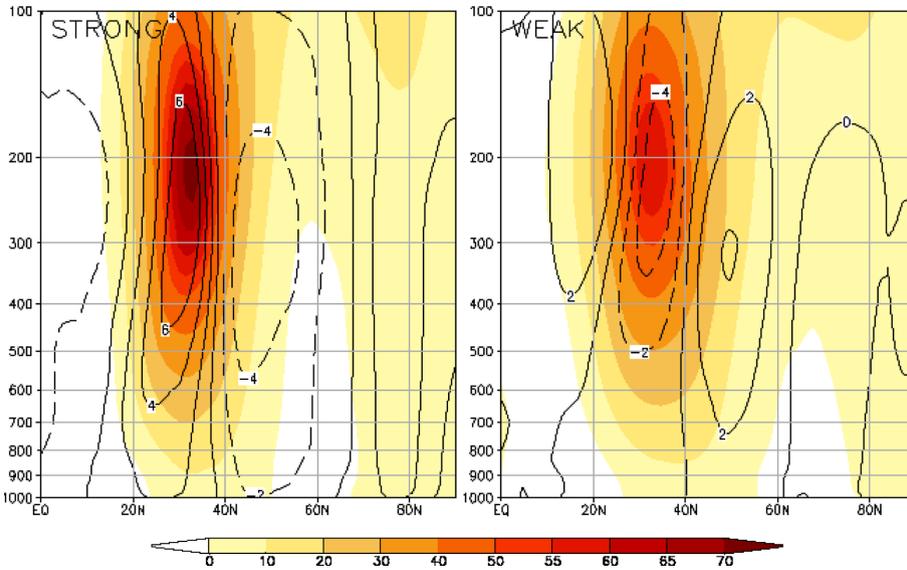


Fig. 4. Height-latitude cross sections of zonal wind (shaded, $m s^{-1}$) and its anomalies (contour, $m s^{-1}$) during boreal winter (DJF) for strong monsoon years (left) and weak monsoon years (right) in ERA-Interim. Each was obtained by zonal average of corresponding longitude belt extending from $120^{\circ}E$ to $160^{\circ}W$. Contour interval is $2 m s^{-1}$.

$60^{\circ}N$ 의 북쪽 가장자리에서 음의 아노말리가 나타난다. 이는 아열대 제트가 좁아지면서 강도는 증가함을 의미한다. 반대로 약한 몬순해의 경우 아열대 제트의 중심이 존재하는 $20\sim 40^{\circ}N$ 위도 범위에서 뚜렷한 음의 아노말리가, $40\sim 60^{\circ}N$ 에서 양의 아노말리가 나타나 아열대 제트가 약해지면서 폭은 넓어진다. 이는 강한 몬순해에서는 북태평양 스톱트랙의 중심부가 위치하는 고위도 지역에서 편동풍 아노말리가 나타나며 에디 활동이 약해짐을 의미한다. 반대로 약한 몬순해에서는 편서풍 아노말리의 발생과 함께 고위도 지역에서 스톱트랙이 강화되는 특징을 보인다.

다-모델 앙상블(Fig. 5i)에서도 관측과 동일하게 강한 몬순해에서 아열대 제트의 중심이 강화되고 약한 몬순해에서는 약화되는 특징이 나타난다. 그러나 아열대 제트의 폭의 변화는 뚜렷하게 확인하기 어렵고 중심위치의 고도 또한 관측에 비해 낮게 모의되는 경향을 보인다. 하지만 이는 모델간의 편차가 다소 존재해, 앙상블 평균을 통해 서로 상쇄되었기 때문으로 보인다. 예를 들어, CanESM2 (Fig. 5b) 모델의 경우, 아열대 제트와 한대 제트 중심의 위치나 강한 몬순해의 아열대 제트의 강화 및 폭의 축소, 약한 몬순해의 아열대 제트의 약화 및 폭의 확대 등이 재분석자료와 상당히 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. HadGEM2-AO (Fig. 5e) 역시 제트 중심의 고도가 관측에 비해 다소 낮게 모의되기는 하나, 강한 몬순해와 약한 몬순해의 제트 변화의 특징은 상당히 잘 모의하고 있다.

흥미로운 점은, MPI-ESM-LR (Fig. 5h)의 경우 몬순과 스톱트랙 사이의 상관성 모의 성능도 좋고, 강한 몬순해의 특징도 잘 모의하는 데 반해, 약한 몬순해의 제트 중심이 다른 모델들과 완전히 반대로 강화되어 역학적 일관성이 맞지 않는다. 위치나 크기에 있어 다소간의 차이는 존재해도 강한 몬순해에 아열대 제트의 중심이 강화되고 고위도 지역(한대 제트)에서 약화되며, 약한 몬순해에는 아열대 제트의 중심이 약화되고 고위도 지역(한대 제트)에서 강화되는 특징이 MPI-ESM-LR을 제외한 모든 모델에서 일관되게 나타난다.

스톱트랙과 아열대제트 및 한대 제트의 상관을 살펴보기 위해 동서바람장과 아노말리 장의 최대가 나타나는 위도대를 구분하여 ERA-I와 CMIP5 모델 각각에 대해 NPSEI와 250 hPa 동서바람의 상관계수를 구해 Table 3에 나타냈다. 동서바람장의 평균은 경도 $20^{\circ}E\sim 160^{\circ}W$ 영역에 대해 $25\sim 40^{\circ}N$ 과 $45\sim 60^{\circ}N$ 각각의 위도 범위로 영역평균을 계산하였다. ERA-I의 경우 아열대 제트의 중심 영역에 대해서는 뚜렷한 음의 상관을 보이는 반면, 동서바람 아노말리가 최대가 나타나는 $45\sim 60^{\circ}N$ 영역에서는 양의 상관성이 나타난다. 즉, 북태평양 스톱트랙 활동이 $25\sim 40^{\circ}N$ 영역에서 강해지면 아열대 제트가 약해지고, $45\sim 60^{\circ}N$ 영역에서는 한대 제트가 강화되는 반대의 특징을 나타낸다. 이러한 양상은 앞서 보인 Fig. 4에서 나온 결과에서 강한 몬순해 기간일 때 $40^{\circ}N$ 을 기준으로 고위도($45\sim 60^{\circ}N$)와

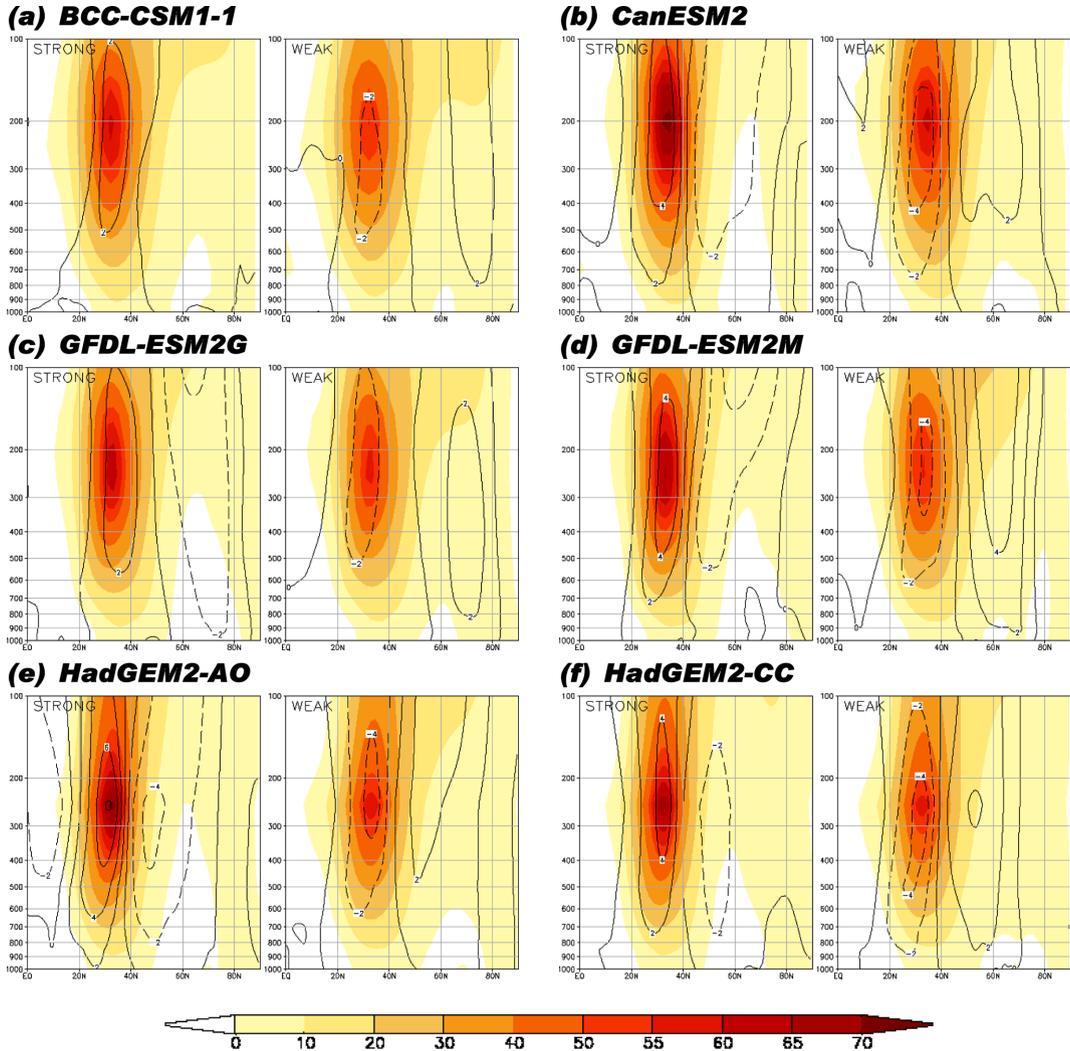


Fig. 5. Same as Fig. 4 except in simulations by (a) BCC-CSM1.1, (b) CanESM2, (c) GFDL-ESM2G, (d) GFDL-ESM2M, (e) HadGEM2-AO, (f) HadGEM2-CC, (g) IPSL-CM5A-LR, (h) MPI-ESM-LR, (i) MPI-ESM-MR, (j) MRI-CGCM3, (k) NorESM1-M, (l) MME.

저위도(25~40°N) 지역에서 양의 아노말리와 음의 아노말리가 보인 결과와 일관된다.

CMIP5 모델들의 경우 두 현상간의 상관성이 높았던 HadGEM2-CC나 GFDL-ESM2G 모델의 경우 두 영역 모두에서 높은 상관을 모의하였다. 대부분의 모델들은 두 영역에서 서로 반대의 상관을 보이며, 상관계수의 크기 역시 서로 비슷하게 나타났다. 그러나 HadGEM2-AO의 경우 아열대 제트의 중심 영역에 대해서는 상당히 높은 음의 상관을 보였으나(-0.82), 아노말리가 최대가 나타나는 45~60°N 영역에서는 상관계수가 현저히 낮은 값을 나타냈다(+0.49).

3.4 경압성의 역할

아열대 제트와 관련되어 스톱트랙 활동에 영향을 주는 기온 경도를 살펴보기 위해, 강한 몬순해와 약한 몬순해에 대한 지상 2 m 기온 아노말리의 동서-평균된(80~120°E의 경도 범위) 위도별 자오 분포를 분석하였다(Fig. 6). ERA-I에서는 강한 몬순해의 경우 40~60°N 위도 범위에 최대의 한랭 아노말리가 나타났고, 70~80°N 위도 범위에 최대의 온난 아노말리가 나타났다. 반면, 약한 몬순해의 경우 60~70°N 위도에 최대 온난 아노말리가, 70~80°N 위도에서 최대 한랭 아노말리가 나타났다.

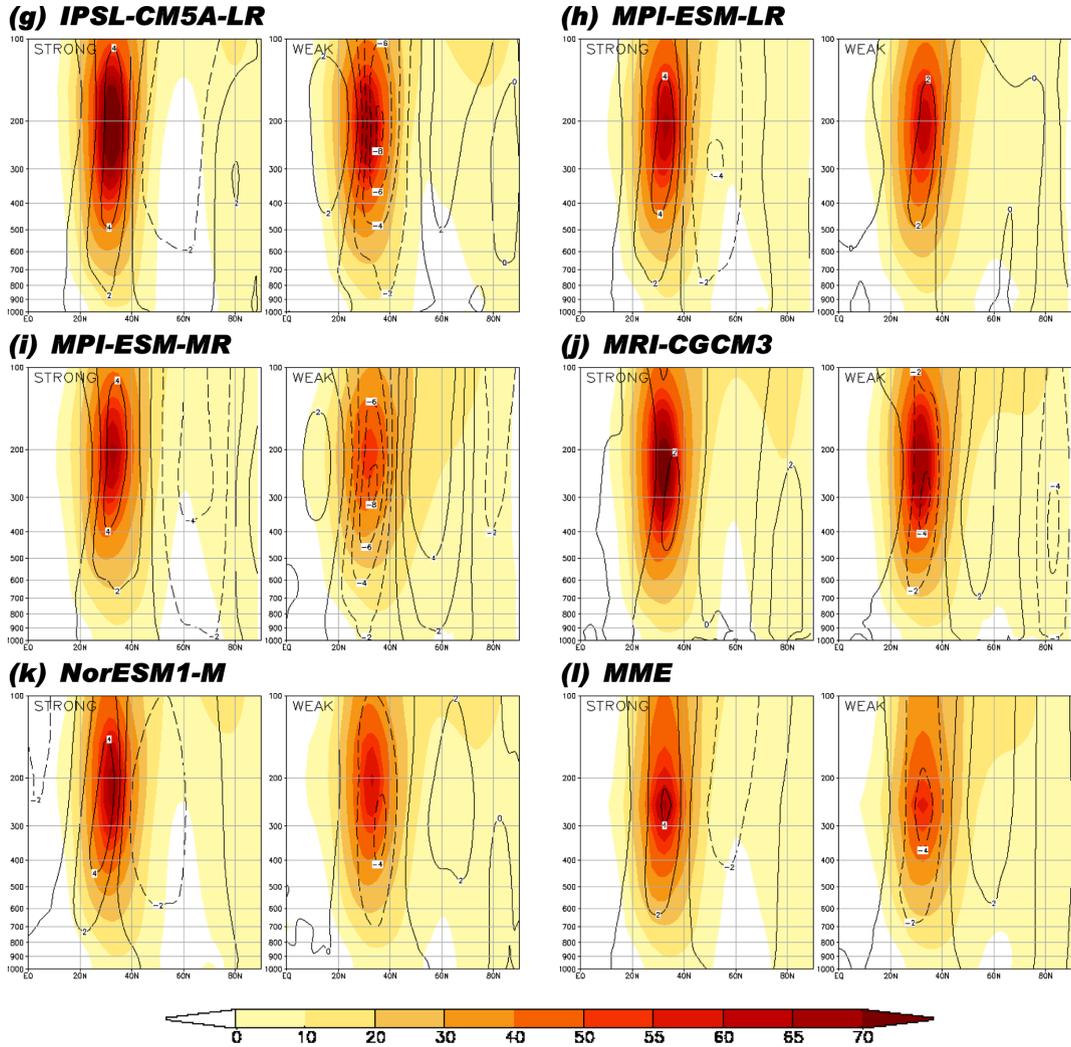


Fig. 5. Continued.

CMIP5 모델의 경우 강한 몬순해일 때 지표 기온 아노말리의 자오 분포에 있어서 ERA-I에서 보인 분포와 유사하게 40~60°N 위도 범위에 최대의 음의 아노말리가 나타났고, 70~80°N 위도 범위에 최대의 양의 아노말리가 나타났다. MME 평균에서도 ERA-I에서 보인 분포와 유사하게 모의하였다. 반면, 약한 몬순해의 경우 모델들에서 나타난 모습과 관측과의 차이뿐만 아니라 모델들간의 편차가 강한 몬순해에 비해 더 크게 나타났다.

위의 모습을 자세히 살펴보기 위해 Fig. 6와 동일한 조건에서의 기온 경도의 자오 분포를 살펴보았다 (Fig. 7). ERA-I에서 언급하였던 모습과 동일하게 강한 몬순해의 경우 30~40°N 위도 범위에 최대 증가가

나타났고, 55~70°N 위도 범위에 최대 감소가 나타났다. 반면, 약한 몬순해의 경우 45~50°N 위도 범위와 60~70°N 위도 범위에서 최대 증가가 나타났고, 50~60°N 위도에서 최대 감소가 나타났다. 이러한 모습이 CMIP5 모델에서도 유사한 결과를 나타냈다. 즉, 강한 몬순해에서는 지표 기온 경도 아노말리의 자오 분포에 있어서 MME 평균은 관측과 대체로 유사하게 모의하였지만, 강한 몬순해에서 HadGEM2-AO 모델의 경우 관측과 MME 평균과는 다르게 최대 감소가 나타나는 55~70°N 위도 범위에서 반대로 최대 증가의 모습이 나타났다. 이러한 부분에 있어서 개선되어야 할 필요성이 있다. 반면, 약한 몬순해에서는 관측과의 차이 및 모델들간의 편차가 강한 몬순

Table 3. The correlation coefficients between normalized NPSEI and 250 hPa seasonal mean westerlies over the subtropical jet core (25°N~40°N) and maximum storm track region (45°N~60°N) for 26 winter seasons (DJF).

Model	25°N~40°N	45°N~60°N
ERA-Interim	-0.60	+0.65
BCC-CSM1.1	-0.52	+0.64
CanESM2	-0.45	+0.33
GFDL-ESM2G	-0.77	+0.70
GFDL-ESM2M	-0.64	+0.66
HadGEM2-AO	-0.82	+0.49
HadGEM2-CC	-0.70	+0.76
IPSL-CM5A-LR	-0.50	+0.52
MPI-ESM-LR	-0.74	+0.65
MPI-ESM-MR	-0.45	+0.44
MRI-CGCM3	-0.50	+0.42
NorESM1-M	-0.59	+0.60

해에 비해 더 크게 나타났다. 즉, 강한 몬순해에 비해 약한 몬순해에 대한 불확실성이 더 크게 나타났을 보였다.

스톱트랙과 관련해, 시간-평균류 대비 스톱트랙의 일시성 에디들의 전파를 설명하기 위해 ERA-I와 CMIP5 모델, 그리고 MME 평균의 $\overline{v'\theta'}$ 아노말리를 나타냈다(Figs. 8과 9). $\overline{v'\theta'}$ 아노말리는 종관 에디들에 의한 남북 열 수송을 나타낸다. 관측에 나타난 1979~2005년까지 강한 몬순해와 약한 몬순해에 대해서 $\overline{v'\theta'}$ 아노말리를 살펴보면(Fig. 8), 강한 몬순해의 경우 $\overline{v'\theta'}$ 아노말리가 40~50°N의 위도대를 따라 음의 모습을 보였다. 이는 남북 열 수송이 작아짐을 의미하는데, 열 수송이 작아지면 경압 파동이 평균보다 상대적으로 약해지는 모습을 의미한다. 따라서 강한 몬순해에 종관 에디들에 의한 자오 열 수송이 40~50°N의 위도대를 따라 감소하게 되면 기온 경도가 작아짐으로써 경

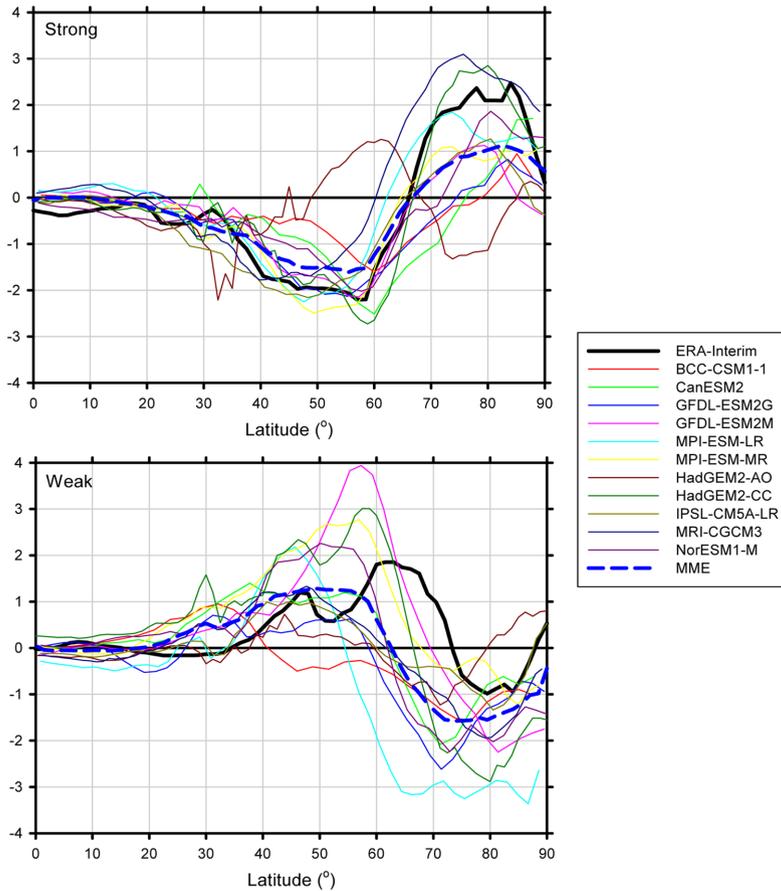


Fig. 6. Latitudinal distributions of the surface air temperature anomalies zonally-averaged over 80~120°E for strong (top) and weak (bottom) monsoon years. Thick solid line is for ERA-Interim, thick dashed line is for MME mean, and thin solid lines are for CMIP5 models.

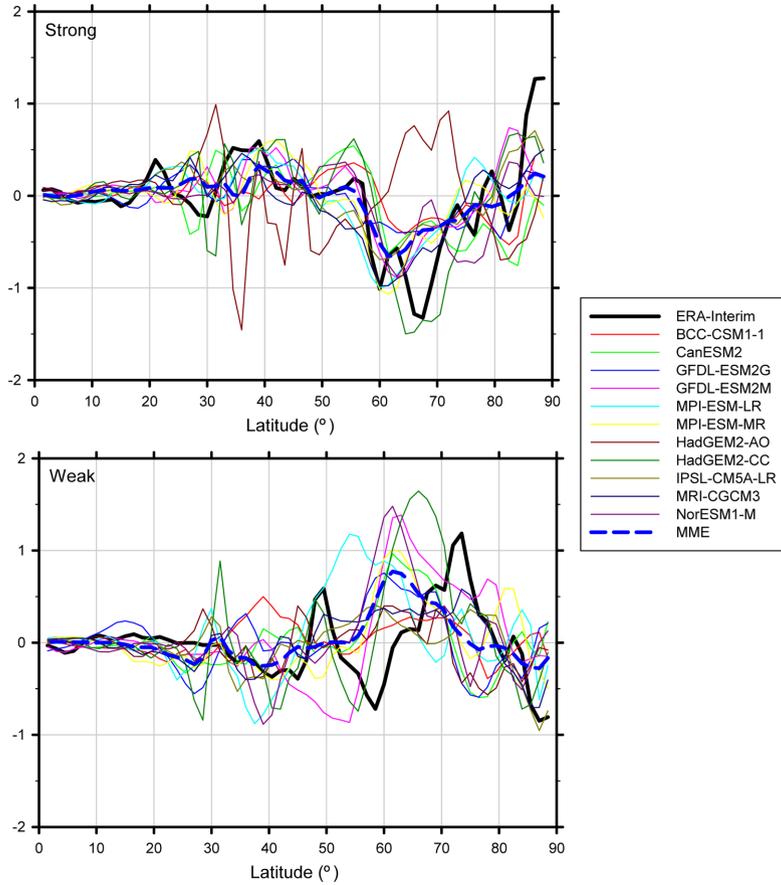


Fig. 7. Same as Fig. 6 except meridional surface temperature gradient anomalies.

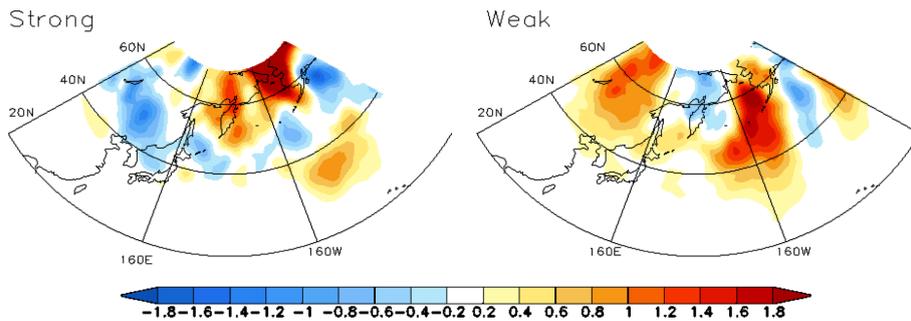


Fig. 8. Anomalies of 700 hPa meridional heat flux ($\overline{v'\theta'}$) for strong (left) and weak (right) monsoon years in ERA-Interim. Shading interval is 0.2 Pa m s⁻².

압성이 약화되고 이에 따라 북태평양 스톱트랙 활동이 감소하게 된다. 약한 몬순해에의 경우는 반대로 $\overline{v'\theta'}$ 아노말리가 양의 모습을 보이고 있다. 즉, 약한 몬순해에서는 기온 경도가 커지게 됨으로써 북태평양 스톱트랙 활동이 증가하게 된다. CMIP5 MME 평균

(Fig. 9i)에서는 강한 몬순해에서의 에디 열속의 약화 및 약한 몬순해의 에디 열속의 강화 특징이 잘 나타나기는 하나 과대모의되는 경향을 보인다. 이런 과대모의의 경향은 개개의 모델에 나타난 열속 분포에서도 찾을 수 있다.

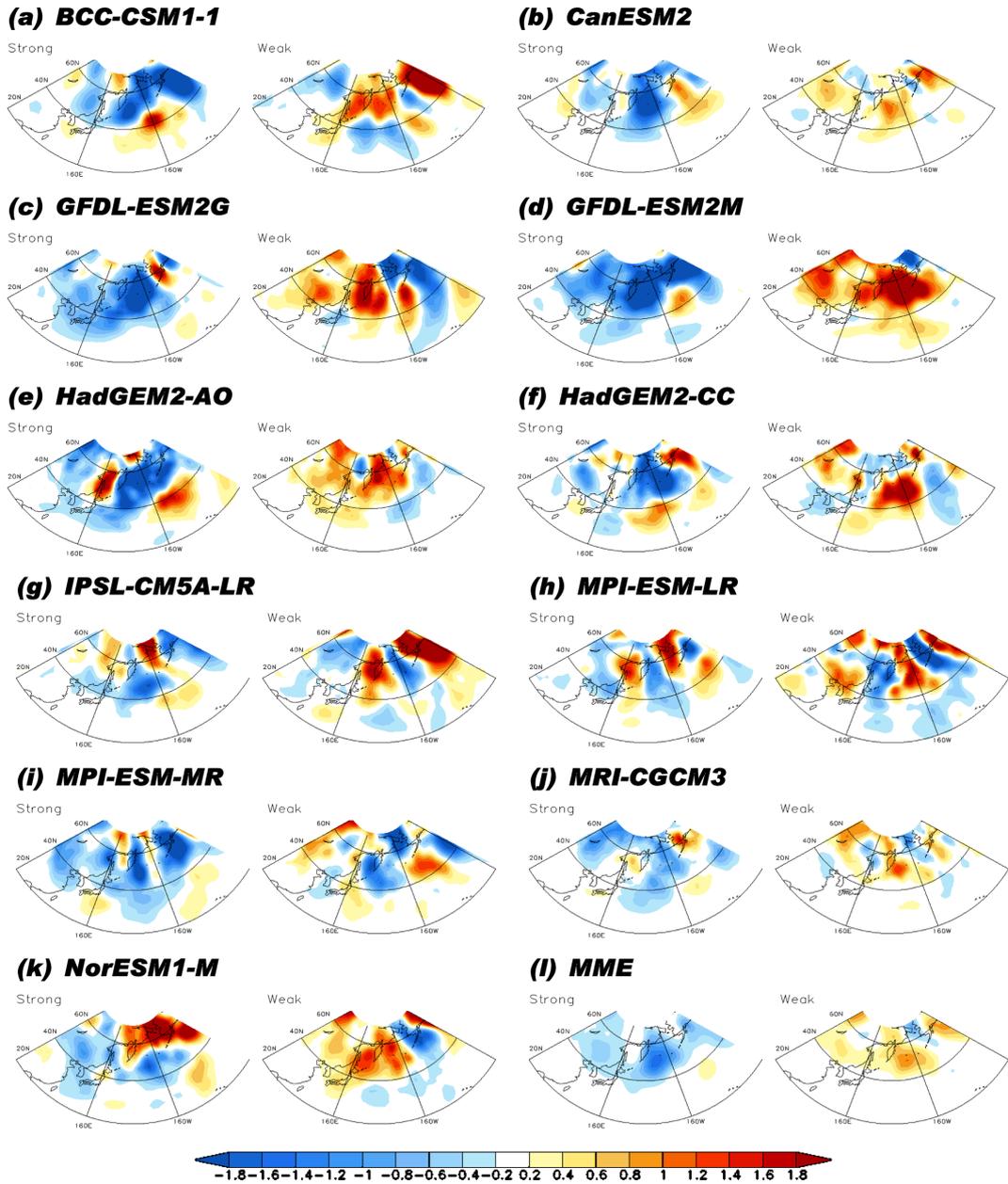


Fig. 9. Same as Fig. 8 except in simulations by (a) BCC-CSM1.1, (b) CanESM2, (c) GFDL-ESM2G, (d) GFDL-ESM2M, (e) HadGEM2-AO, (f) HadGEM2-CC, (g) IPSL-CM5A-LR, (h) MPI-ESM-LR, (i) MPI-ESM-MR, (j) MRI-CGCM3, (k) NorESM1-M, (l) MME.

4. 결론 및 토의

재분석자료에 나타난 동아시아 겨울 몬순 강도의 경년 변동성과 겨울철 북태평양 스톱트랙 활동의 경년 변동성은 서로 높은 음의 상관성을 보인다. 즉 강

(약)한 EAWM 해에 북태평양 스톱트랙에서의 종관 에디 활동은 약화(강화)되는 경향을 가지는 모습은 Lee et al. (2010)의 연구에서 ERA40 자료를 사용하여 밝힌 바 있다. 이 연관성은 아시아 대륙 지표 온도 아노말리의 위도 분포에 따른 고위도(40°N 이북)

지역에서의 경압성 변화로써 설명될 수 있다. 이 연구에서는 CMIP5 참여 모델들의 과거 모의 자료를 사용하여 1979~2005년의 기간에 대해서 현 기후 모델들이 이 상관성을 얼마나 잘 재현하지는지를 검증하였다.

먼저 두 현상에 대해 상관성을 조사한 결과, CMIP5 MME 평균은 -0.59 의 비교적 높은 음의 상관성을 보였다. -0.73 의 높은 상관계수를 나타낸 재분석자료에 비해 작은 값이나, HadGEM2-CC나 HadGEM2-AO, GFDL-ESM2M, MPI-ESM-LR 등은 -0.76 과 -0.76 , -0.72 , -0.71 로 관측과 거의 같은 높은 음의 상관성을 보였다. 비교적 낮은 상관성을 가지는 모델도 존재하긴 하나, 모든 CMIP5 모델에서 동아시아 겨울몬순과 북태평양 스톱트랙 활동 사이에 음의 상관관이 나타나는 특징을 뚜렷하게 확인할 수 있었다.

다음으로는 동아시아 겨울몬순의 변동성과 관련이 깊은 동서평균 지표기온 아노말리 분포를 살펴보았다. 강한 몬순해의 경우 재분석자료와 CMIP5 MME 평균에서 $40\sim 60^\circ\text{N}$ 위도 범위에 최대의 음의 아노말리가 나타났고, $70\sim 80^\circ\text{N}$ 위도 범위에 최대의 양의 아노말리가 나타났다. 반면, 약한 몬순해의 경우 MME 평균은 강한 몬순해와 뚜렷한 반대의 위상을 보이는데 비해, 재분석자료의 경우 고위도에서 나타나는 음의 아노말리가 다소 축소된 특징을 보인다. 또한 모델들간 편차 역시 강한 몬순해에 비해 약한 몬순해에 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 남북 기온경도 아노말리 분포에 영향을 미쳐, 약한 몬순해의 경압성 모의의 불확실성을 높인다. 특히 고위도 지역에서의 경압성 분포는 스톱트랙과도 연관이 깊으므로, 약한 몬순해에 나타나는 CMIP5 모델의 불확실성이 EAWMI와 NPSEI의 상관성에 영향을 미치는 것으로 보인다.

이러한 특징은 남북방향 열속 아노말리 분석결과에도 분명하게 나타난다. 강한 몬순해의 경우 $40\sim 50^\circ\text{N}$ 위도대를 따라 자오 열수송이 감소하는 모습을 CMIP5 모델에서도 차이는 있지만 대체로 잘 모의하였다. 이는 남북 방향으로의 열 수송이 감소함에 따라 경압 파동이 상대적으로 약해짐을 의미한다. 따라서 강한 몬순해에서 북태평양 스톱트랙 활동이 약화되는 모습이 잘 설명된다. 그러나 약한 몬순해의 경우, 앙상블 결과는 재분석자료와 유사한 패턴을 보이나, 강한 몬순해에 비해 모델들 사이의 편차가 뚜렷하게 나타난다. 따라서 이런 중위도 현상들을 연구하기 위해서는 하나의 모델을 사용하는 것보다 여러 개의 모델들을 이용하고, 현상들 사이의 변동성에 일관성이 나타나는 모델들의 앙상블을 이용하여 연구를 하면 좋은 결과를 보일 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 국립기상연구소 용역과제

“NIMR-2012-B-2 (RCP 시나리오를 활용한 극한 기후 변화 분석(III) 연구)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Chang, C.-P., and K. M. Lau, 1982: Short-term planetary scale interactions over the Tropics and midlatitudes during northern winter. Part I: Contrasts between active and inactive periods. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 933-946.
- Chang, E. K. M., 2006: An idealized nonlinear model of the Northern Hemisphere winter storm tracks. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 1818-1839, doi:10.1175/JAS3726.1.
- _____, and Y. Fu, 2002: Interdecadal variations in Northern Hemisphere winter storm track intensity. *J. Climate*, **15**, 642-658.
- _____, S. Lee, and K. L. Swanson, 2002: Storm track dynamics. *J. Climate*, **15**, 2163-2183.
- 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.
- Greeves, C. Z., V. D. Pope, R. A. Stratton, and G. M. Martin, 2007: Representation of northern hemisphere winter storm tracks in climate models. *Clim. Dynam.*, **28**, 683-702.
- Hoskins, B. J., I. N. James, and G. H. White, 1983: The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1595-1612.
- 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.
- Kwon, Y.-A., W.-T. Kwon, and K.-O. Boo, 2007: Future projections on the spatial distribution of onset date and duration of natural seasons using SRES A1B data in South Korea. *J. Korean Geogr. Soc.*, **42**, 835-850.
- Lau, N.-C., 1988: Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 2718-2743.
- Lee, Y.-Y., G.-H. Lim, and J.-S. Kug, 2010: Influence of the East Asian winter monsoon on the storm track activity over the north pacific. *J. Geophys. Res.*, **115**, D09102, doi:10.1029/2009JD012813.
- Nakamura, H., T. Izumi, and T. Sampe, 2002: Interannual and decadal modulations recently observed in the pacific storm track activity and East Asian winter monsoon. *J. Climate*, **15**, 1855-1874.

- O’Gorman, P. A., 2010: Understanding the varied response of the extratropical storm tracks to climate change. *PNAS*, **107**, 19176-19180.
- Oranski, 2005: A new look at th Pacific storm track variability: Sensitivity to tropical SSTs and to upstream seeding. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1367-1390.
- Stearns, S. D., 1984: Digitale verarbeitung analoger signale. *R. Oldenbourg Verlag Muenchen*.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Yun, W.-T., K.-O. Boo, R.-S. Kim, and H.-M. Cho, 1998: A study of East Asian wave character and variability of North-West Pacific high in northern summer. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 365-375.
- Zhang, Y., K. R. Sperber, and J. S. Boyle, 1997: Climatology and interannual variation of the East Asia winter monsoon: Results from the 1979-95 NCEP-NCAR reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2605-2619.
- Zhang, M., Y. Qi, and X.-M. Hu, 2013: Impact of East Asian winter monsoon on the Pacific storm track. *Meteor. Appl.*, doi: 10.1002/met.1423.