

CMIP5 MME와 Best 모델의 비교를 통해 살펴본 미래전망: II. 동아시아 단 · 장기 미래기후전망에 대한 열역학적 및 역학적 분석

김병희 · 문혜진 · 하경자*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공

(접수일: 2015년 2월 17일, 수정일: 2015년 3월 20일, 게재확정일: 2015년 4월 8일)

Future Change Using the CMIP5 MME and Best Models: II. The Thermodynamic and Dynamic Analysis on Near and Long-Term Future Climate Change over East Asia

Byeong-Hee Kim, Hyejin Moon, and Kyung-Ja Ha*

*Department of Atmospheric Sciences, Division of Earth Environmental System,
Pusan National University, Busan, Korea*

(Manuscript received 17 February 2015; revised 20 March 2015; accepted 8 April 2015)

Abstract The changes in thermodynamic and dynamic aspects on near (2025~2049) and long-term (2075~2099) future climate changes between the historical run (1979~2005) and the Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 run with 20 coupled models which employed in the phase five of Coupled Model Inter-comparison Project (CMIP5) over East Asia (EA) and the Korean Peninsula are investigated as an extended study for Moon et al. (2014) study noted that the 20 models' multi-model ensemble (MME) and best five models' multi-model ensemble (B5MME) have a different increasing trend of precipitation during the boreal winter and summer, in spite of a similar increasing trend of surface air temperature, especially over the Korean Peninsula. Comparing the MME and B5MME, the dynamic factor (the convergence of mean moisture by anomalous wind) and the thermodynamic factor (the convergence of anomalous moisture by mean wind) in terms of moisture flux convergence are analyzed. As a result, the dynamic factor causes the lower increasing trend of precipitation in B5MME than the MME during the boreal winter and summer over EA. However, over the Korean Peninsula, the dynamic factor causes the lower increasing trend of precipitation in B5MME than the MME during the boreal winter, whereas the thermodynamic factor causes the higher increasing trend of precipitation in B5MME than the MME during the boreal summer. Therefore, it can be noted that the difference between MME and B5MME on the change in precipitation is affected by dynamic (thermodynamic) factor during the boreal winter (summer) over the Korean Peninsula.

Key words: CMIP5, MME, B5MME, temperature, climate change, Korean Peninsula, precipitation, RCP4.5, moisture flux

*Corresponding Author: Kyung-Ja Ha, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, 30 Jangjeondong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea.
Phone : +82-51-510-2177, Fax : +82-51-515-1689
E-mail : kjha@pusan.ac.kr

1. 서 론

온실가스의 증가로 인한 기후변화는 전 지구적으로 일어나고 있다. 특히, 그 변화는 대규모 대기 순환의 변화로부터 야기된다. 대순환 모델(General Circulation Model, GCM)을 이용하여 온실가스가 증가함에 따라 대기 순환의 변화를 살펴보았을 때 해들리 셀과 워커 순환의 약화, 중 · 고위도 제트 약화 또는 북상이 일어나는 것을 보였다(Vecchi and Soden, 2007; Lim and Simmonds, 2009). 특히, 해들리 순환의 극향 이동은 아열대 지역의 사막 확장에도 영향을 끼친다(Frierson et al., 2007; Lu et al., 2007). 또한, 온실가스의 증가로 인하여 대기온도가 증가하는데 이는 Clausius-Clapeyron (C.-C.) 관계에 의해 대기 중의 수증기량을 증가시키는 원인이 된다. 증가한 대기 중의 수증기량은 지역적으로 강수에도 영향을 끼친다. 선행연구들에 따르면 지구온난화에 의해 전 지구 강수량이 증가하는 일관적인 결과를 GCM을 통하여 보였다(Held and Soden, 2006; Chou et al., 2009; Seager et al., 2010; Cherchi et al., 2011; Hsu et al., 2012; Lee and Wang, 2014; Lee et al., 2014b). 하지만 대기 중의 수증기량의 증가에 비해 강수의 증가량은 C.-C. 관계에서 보다 적게 나타나는 것으로 추정되었다(Held and Soden, 2006). 이는 강수의 증가가 그 지역에서 수증기량의 증가뿐만 아니라 대기 순환에 의한 수송에도 영향을 받기 때문이다(Zhou and Yu, 2005; Held and Soden, 2006; Yun et al., 2008; Seo et al., 2013; Lee et al., 2014a, b; Oh and Ha, 2014).

기후 변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 제 5차 기후변화 평가 보고서(AR5)에서는 표준 온실가스 시나리오를 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)로 새롭게 선정하였다. 그리고 이 시나리오를 이용하여 5단계 접합모델 상호비교 프로젝트(the phase five of the Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5)에 참여하는 모델들은 다양한 미래 강수에 대한 예측결과들을 산출했고 이에 대한 결과를 분석한 연구들이 진행되었다. 모델들의 미래 전망에 대한 불확실성을 줄이기 위해 현재 기후 관측과 좀 더 유사하게 모의하는 best 모델들을 선정하여 RCP 4.5 시나

리오에서 21세기 후반 전 지구 몬순 강수 및 몬순 지역의 변화를 살펴 본 결과, 북반구 몬순 지역에서 수증기량의 현저한 증가와 해들리 순환의 강화로 인하여 북반구 몬순 강수가 강화될 것으로 예상하였다. 또한, 아시아 몬순 강수 기간이 길어지고 동아시아 연평균 강수량대비 여름철 강수 비율이 증가할 것으로 예측하였다(Lee and Wang, 2014). Seo et al. (2013)은 기능 평점(skill score) 방법을 이용하여 신뢰도 높은 모델을 선정해 수증기 증발량 증가와 수분 수렴 강화로 인해 동아시아 여름 몬순이 증가하는 것을 보였다. Moon et al. (2014)은 동아시아 지역(20°N~50°N, 110°E~150°E)에서 겨울철과 여름철 지표면 온도(surface air temperature, SAT)와 강수의 단기 및 장기 미래 전망을 RCP4.5 시나리오를 이용한 CMIP5의 20개 모델들의 결과를 이용하여 다중 모델 앙상블(multi-model ensemble, MME)과 현재 기후 관측과 좀 더 유사하게 모의하는 5개의 Best 모델 MME(B5MME)를 이용하여 미래 기후 변화를 살펴본 결과, 동아시아 지역에서 MME와 B5MME는 겨울철에 강수 증가율이 여름철보다 더 강하게 전망하였다. 또한, MME와 B5MME의 SAT 증가는 비슷하지만 B5MME의 강수 증가율은 MME에 비해 작게 전망하였다. 한반도 지역(33°N~43°N, 124°E~131°E)에서 MME는 겨울철에 강수 증가율이 B5MME보다 더 크게 증가할 것으로 전망하는 반면에 여름철에 B5MME의 강수증가율이 MME보다 더 크게 증가할 것으로 전망하였다. 즉, 한반도 지역에서 B5MME가 MME에 비해 겨울철에 강수증가율을 낮게 전망하고 여름철에는 높게 전망하였다. 지표 온도 1도가 올라갈 때 동아시아의 강수량은 MME에서 약 4~5% 증가하는 것으로 추정하는 반면에 B5MME는 약 2~4% 증가하는 것으로 추정한다(Table 1). 전 지구적으로 강수의 증가는 지표 기온 1도 증가시 약 2~3% 증가하는 것으로 추정한다(Held and Soden, 2006; Lee and Wang, 2014). 기존 선행 연구와 비교하였을 때 B5MME의 미래 전망이 비슷하게 나타나므로 MME보다 더 신뢰할 수 있다고 할 수 있다. 하지만 MME와 B5MME가 미래 기후 전망에 있어서 이러한 차이가 나타나는 원인을 Moon et al. (2014)에서 밝히지 못하였다. 이러한 계절간 MME와 B5MME의 미래 기후 변화 차이를 규명하는 것은 동아시아와

Table 1. The percentage change in precipitation on the surface air temperature change of MME and B5MME over East Asia (20°N~50°N, 110°E~150°E) during DJF and JJA in the near future (2025~2049) and the long term future (2075~2099).

	DJF		JJA	
	Near future	Long term future	Near future	Long term future
MME	5.72%/K	4.15%/K	4.26%/K	4.15%/K
B5MME	4.78%/K	2.73%/K	3.66%/K	3.50%/K

Table 2. Description of CMIP5 models used in the study. Refer to <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/availability.html> for detailed information.

Model No	Coupled Model	Institution	AGCM Resolution	Ens No
1	ACCESS1-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization and Bureau of Meteorology, Australia (CSIRO-BOM)	1.875° × 1.25°	1
2	BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (BCC)	2.8125° × 2.8125°	1
3	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	2.8125° × 2.8125°	5
4	CCSM4	National Center for Atmospheric Research (NCAR)	1.25° × 0.9375°	1
5	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques/Centre European de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS)	1.40625° × 1.40625°	1
6	CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization and the Queensland Climate Change Centre of Excellence (CSIRO-QCCCE)	1.875° × 1.875°	3
7	FGOALS-g2	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; and CESS, Tsinghua University (LASG-CESS)	2.8125° × 2.8125°	1
8	GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA GFDL)	2.5° × 2°	1
9	GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA GFDL)	2.5° × 2°	1
10	GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA GISS)	2.5° × 2°	2
11	HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre (MOHC)	1.875° × 1.24°	1
12	HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre (MOHC)	1.875° × 1.24°	1
13	INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics (INM)	2° × 1.5°	1
14	IPSL-CM5A-LR	Institute Pierre-Simon Laplace (IPSL)	3.75° × 1.875°	4
15	IPSL-CM5A-MR	Institute Pierre-Simon Laplace (IPSL)	2.5° × 1.258°	1
16	MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	1.40625° × 1.40625°	1
17	MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	2.8125° × 2.8125°	1
18	MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	1.875° × 1.875°	3
19	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI)	1.125° × 1.125°	1
20	NorESM1-M	Norwegian Climate Centre (NCC)	2.5° × 1.875°	1

한반도 강수의 미래 변화에 대한 예측과 이해 향상에 도움을 줄 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 미래 기후 전망의 차이에 대한 원인을 열역학적 및 역학적 측면에서 분석하여 밝히고자 한다.

본 연구는 Moon et al. (2014)에서 나타내지 못한 동아시아와 한반도 지역에서의 MME와 B5MME의 미래 기후 전망 차이에 대한 원인 분석을 하기 위하여 수증기 수지 방정식을 통해 열역학적, 역학적 측면에서 분석하고자 한다. 2장에서는 모델 자료와 분석방법을 설명하고, 3장과 4장에서는 각각 겨울철과 여름철에서 나타나는 열역학적, 역학적 원인을 기술하고, 5장에서 중요 결과를 요약한다.

2. 모델 자료 및 분석 방법

CMIP5에 참여한 총 20개의 접합 대순환 모델들

(Coupled General Circulation Models, CGCMs)의 실험결과들을 본 연구에서 사용하였다. 이 20개의 모델들은 1850년부터 2005년까지 과거기후 모의실험 (historical run)과 2006년부터 2100년까지 저농도 모의실험(RCP4.5)을 하였다. 사용된 20개 모델에 관한 모델명, 기관, 수평 분해능 그리고 본 연구에서 사용된 앙상블 멤버 개수는 Table 2에 제시되어있다. 과거기후 모의실험은 화산의 영향으로 인한 에어로졸, 태양 강제력, CO₂를 포함하고 인류에 의한 에어로졸의 방출 등 대기 구성성분을 포함하는 관측된 대기와 동일하게 변화한다는 조건으로 시행되었다. RCP 4.5는 2100년까지 복사강제력이 증가하다가 그 이후에 약 4.5 Wm⁻²으로 안정될 것이라고 가정된 실험으로 CMIP5에서 “중간단계”의 시나리오를 선택하였다(Taylor et al., 2012).

서로 다른 해상도를 가진 모델들을 동일한 해상도

로 변환하기 위해 각각의 모델들을 2.5도 × 2.5도의 격자로 내삽(interpolation)하여 모의하였다. 또한 모델들 간에 등압면의 간격이 다르므로 동일하게 10개 레벨(1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 100 hPa)에서의 온도(T), 바람(u , v , ω), 비습(q), 그리고 지위 고도를 사용하였다. 또한, 지상 변수로 증발량을 사용하였다. 각 변수들은 일평균 자료들을 이용하였다. 본 연구에서는 선행논문인 Moon et al. (2014)에 따라서 현재 기후를 잘 모의하는 모델을 선정하기 위해 여름철과 겨울철의 SAT와 강수에 대한 PCC (Pattern Correlation Coefficient)와 정규화된 표준편차(Normalized Standard Deviation, NSTD)를 이용하였다. 계절별 SAT와 강수의 각 모델의 결과를 고려하여 SAT는 겨울철에 PCC가 0.95 이상, NSTD가 1 ± 0.25 , 여름철에 PCC가 0.90 이상, NSTD가 1 ± 0.25 이고, 강수는 겨울철에 0.85 이상, NSTD는 1 ± 0.3 , 여름철에 PCC가 0.6 이상, NSTD가 1 ± 0.47 의 조건을 모두 만족하는 모델들로 선정되었다. 이러한 조건에 의해 선정한 Best 모델인 ACCESS1-0, GISS-E2-R, INM-CM4, IPSL-CM5A-LR 그리고 IPSL-CM5A-MR의 MME (Best five models' MME, B5MME)를 사용하여 20개 모델의 MME와 비교하였다. MME와 B5MME의 분석 기간은 현재 기후(1979~2005), 단기 미래(2025~2049), 그리고 장기 미래(2075~2099)로 선정하여 미래 변화를 분석하였다.

본 연구는 미래 기후 변화에 있어서 열역학적, 역학적 효과를 살펴보기 위해 다음과 같이 수증기 수지 방정식을 이용하였다(Seager et al., 2010; Seager and Naik, 2012).

$$\delta P = \frac{1}{\rho_w g} \int_0^{p_s} [\delta MFC] dp + \delta E, \quad (1)$$

$$\delta MFC = \delta DY + \delta TH + \delta TE + Res, \quad (2)$$

$$\delta MFC = -\delta(\nabla \cdot \overline{Vq}), \quad (3)$$

$$\delta DY = -\nabla \cdot ([\delta V] \overline{q_{his}}), \quad (4)$$

$$\delta TH = -\nabla \cdot (\overline{V_{his}} [\delta q]), \quad (5)$$

$$\delta TE = -\delta(\nabla \cdot \overline{V'q'}), \quad (6)$$

$$\delta = \overline{(\)}_{fu} - \overline{(\)}_{his}. \quad (7)$$

위 식에서 $\overline{(\)}$ 는 현재 또는 미래의 climatology를 의미하며, δ 는 미래와 현재의 차이를 의미한다. P 는 강수량, E 는 증발량, MFC 는 수분 플럭스 수렴(moisture flux convergence)를 의미하며 ρ_w 는 물의 밀도, g 는 중력 가속도, p_s 는 지표면 기압을 의미한다. (2) 식에서 나타내었듯이 δMFC 는 4가지 항으로 구분을 할 수 있

다. δDY 는 수평 바람 성분의 변화로 인한 수분 플럭스 수렴, δTH 은 수증기량의 변화로 인한 수분 플럭스 수렴, δTE 은 에디 플럭스 수렴의 변화이다. Res 는 δDY , δTH , δTE 를 제외한 잔류되어 나오는 항을 의미한다. Res 는 앞의 세 항들에 비해 크기가 매우 작기 때문에 본 연구에서는 나타내지 않았다. V 는 수평 바람 성분, q 는 비습을 의미한다. δDY 과 δTH 은 각각 순환의 변화와 수증기량의 변화에 의한 영향을 나타내는 항이므로 미래 강수 변화에 있어서 역학적, 열역학적 변화를 나타내는 항으로 정의할 수 있다(Seager et al., 2010; Seager and Naik, 2012; Endo and Kitoh, 2014). 수증기 수지 방정식에서 강수는 수증기 수송, 수렴만이 아니라 증발량에도 영향을 받는다. 증발량은 온난화로 인해 전 지구적으로 증가하여 강수량을 증가시킨다(그림 미제시). Endo and Kitoh (2014)는 강수의 증가에 있어서 몬순 지역별로 증발에 의한 효과도 있으나 열역학적 및 역학적 효과로 인한 차이가 강수의 증가와 감소에 영향을 주는 것을 보였다. 그래서 본 연구에서는 증발량의 변화와 MFC의 변화에 초점을 맞추어 분석하고자 한다.

3. 겨울철 미래 기후 변화

Moon et al. (2014)은 겨울철 강수의 단기 미래와 장기 미래에서 MME와 B5MME 둘 다 해양에서 강수 감소와 육지에서 강수 증가를 전망하는 것을 보였다. 강수의 증가와 감소에 영향을 주는 증발량의 단기와 장기 미래의 변화를 살펴보면 동아시아 전반적으로 증가하는 모습을 보여주고 있다(Fig. 1). 저위도에 비해 고위도에서 증발량의 증가가 크게 나타나며 해양보다 내륙에서 증발량의 증가가 더 크게 나타난다. 즉, 내륙에서 강수의 증가는 증발량의 증가의 영향인 것으로 추측할 수 있다. 하지만, 증발량의 증가는 강수의 증가를 의미하므로 해양에서 나타나는 강수 감소에 대한 원인으로 보기에는 어렵다. 그러므로 겨울철 해양에서 강수의 감소는 증발량이 아닌 다른 원인에 의해 감소한 것이다. 2장에서 언급하였듯이 강수는 증발량뿐만이 아니라 MFC에도 영향을 받기 때문에 이들의 변화를 살펴볼 필요가 있다.

Figures 2와 3은 겨울철 850 hPa에서 단기 및 장기 미래에 MFC의 변화를 나타낸다. MFC의 변화는 수증기가 상대적으로 많은 대기의 하층에서 가장 크게 일어나므로 대기 하층에서의 변화를 살펴보았다. 단기 미래에서 MME와 B5MME는 MFC의 변화가 증발량의 변화와 달리 강수를 감소시키는 것으로 전망하였다. 특히, 해양에서의 감소가 뚜렷하게 나타난다(Figs. 2a, e). 이러한 강수의 감소에 있어서 δTH 의 영향이 전반적으로 나타나는 것을 보여준다(Figs. 2c, g).

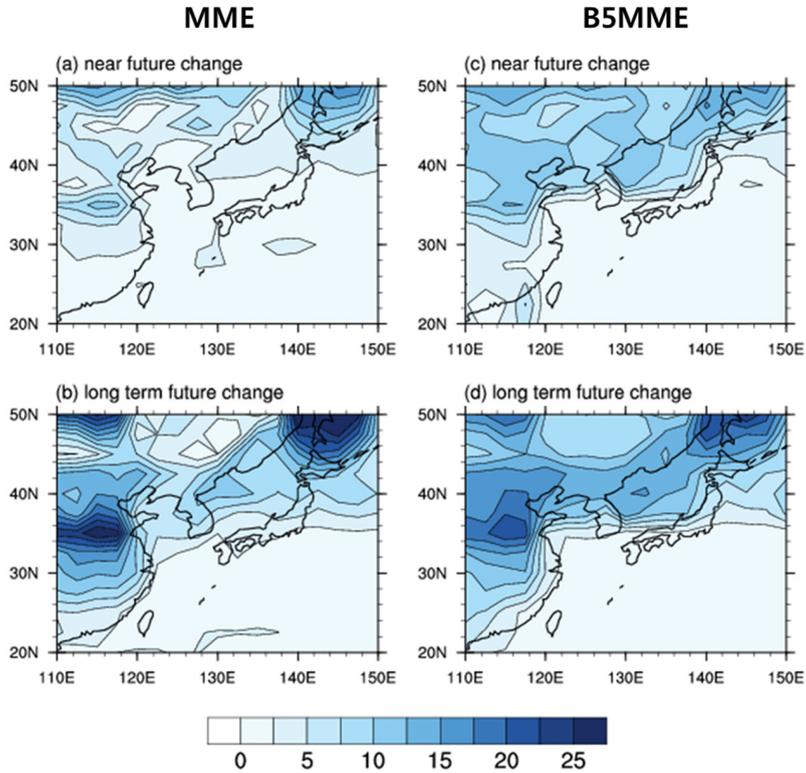


Fig. 1. The spatial distribution of fractional percentage change (%) for evaporation in MME (left panels) and B5MME (right panels) over East Asia (20°N~50°N, 110°E~150°E) during DJF. The top and bottom panels indicate near future change (2025~2049) and long term future change (2075~2099), respectively.

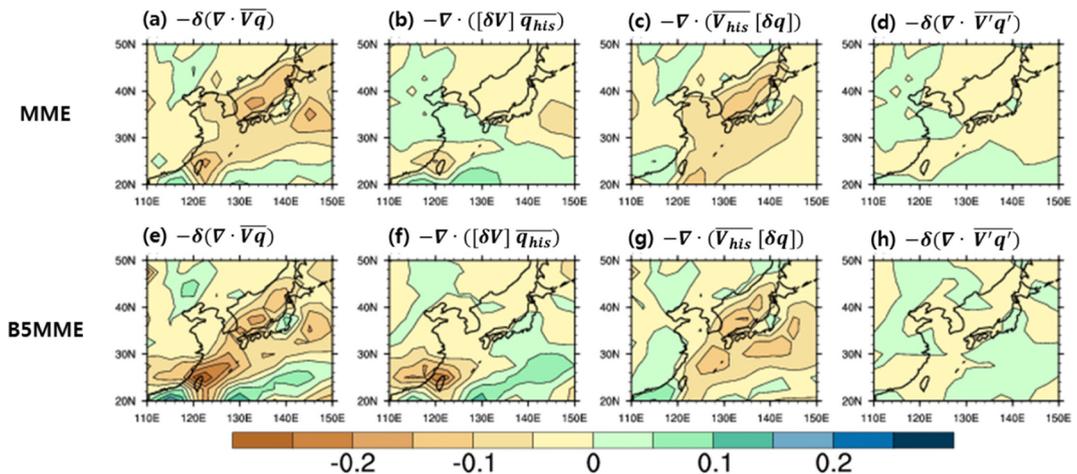


Fig. 2. (a), (e) Difference in moisture flux convergence (10^{-8} s^{-1}) at 850 hPa between the simulation of near future climate (2025~2049) and present climate (1979~2005) during DJF over East Asia (20°N~50°N, 110°E~150°E). The contributions of (b), (f) the dynamic terms (10^{-8} s^{-1}), (c), (g) the thermodynamic terms (10^{-8} s^{-1}), and (d), (h) the transient eddy fluxes (10^{-8} s^{-1}) are denoted in respect of the moisture flux convergence difference. Upper panels and bottom panels indicate MME and B5MME, respectively.

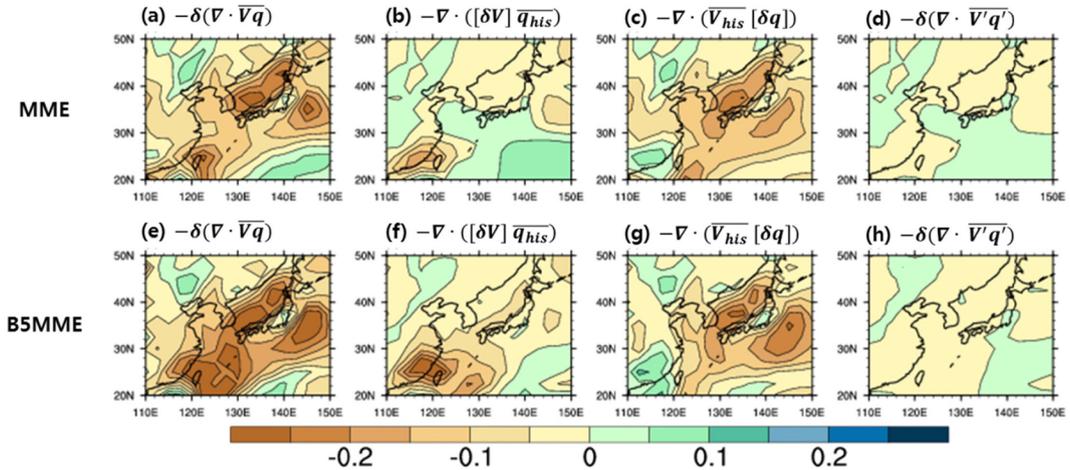


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for the difference between the simulation of long term future climate (2075~2099) and present climate (1979~2005) during DJF.

Table 3. The fractional percentage of near and long term future change (%) for evaporation in MME and B5MME over East Asia (20°N~50°N, 110°E~150°E) during DJF and JJA.

	DJF		JJA	
	Near future (2025~2049)	Long term future (2075~2099)	Near future (2025~2049)	Long term future (2075~2099)
MME	5.16%	12.37%	5.79%	8.97%
B5MME	5.42%	7.42%	2.31%	4.54%

이는 강수가 동아시아 지역에서 열역학적 요소에 의해 감소한다는 것을 의미한다. 하지만 MME와 B5MME 사이에 강수 감소에 있어서 뚜렷한 차이가 나타나는 중국의 남동쪽 해안 지역은 δDY 에 의한 영향이 뚜렷하다(Figs. 2b, f). 즉, 동아시아 남쪽 해안(20°N~30°N)에서는 역학적 요소의 영향이 MME와 B5MME의 강수 감소에 열역학적 요소에 의한 영향보다 더 크게 나타난다. δTE 의 영향은 상대적으로 두 항에 비해 적게 나타난다(Figs. 2d, h). 장기 미래는 단기 미래보다 육지와 해양에서 강수의 증가와 감소가 더 강화되는 것으로 전망하였다(Moon et al., 2014). 이는 MFC의 감소가 단기 미래보다 장기 미래에 더 강화되어 해양에서 강수 감소가 더 강하게 나타나는 원인이 될 수 있다(Figs. 3a, e). 그리고 MFC의 감소는 주로 열역학적 요인에 의해 감소한다(Figs. 3c, g). 그러므로 겨울철 내륙에서 강수 증가는 증발량의 증가로 인해 증가하고 해양에서 강수 감소는 MFC의 감소로 인하여 강수가 감소하게 나타나는 것이다. 또한 MFC의 감소는 주로 열역학적 요인으로부터 기인하였다.

Moon et al. (2014)에서 동아시아 지역을 영역 평균하여 MME와 B5MME를 비교한 결과 동아시아 강수

증가량이 B5MME에서 MME보다 작게 나타난다. 증발량을 동아시아 지역에 대하여 영역 평균하였을 때 단기 미래에서 MME는 5.16%, B5MME는 5.42% 증가하였으며 장기 미래에서 MME는 12.37%, B5MME는 7.42% 증가하였다(Table 3). 강수와 마찬가지로 MME가 B5MME보다 증발량이 더 많이 증가할 것으로 전망하였다. MFC를 동아시아 지역에 대해 영역 평균한 결과 MFC는 감소하여 강수 감소에 기여를 하며 MFC의 감소는 δDY 와 δTH 의 혼합으로 인해 나타나지만 주로 δTH 이 δDY 보다 크게 기여한다(Fig. 4). MME와 B5MME를 비교하였을 때 B5MME의 MFC 감소가 더 크게 나타나는 데 이로 인하여 B5MME의 증발량이 더 많이 증가함에도 불구하고 MFC의 감소가 MME보다 더 강하게 나타나 결과적으로 B5MME의 강수 증가율이 MME보다 더 약하게 나타나는 것으로 보인다. B5MME의 MFC의 감소가 MME보다 더 크게 나타나는 원인은 δTH 의 차이는 거의 나타나지 않고 δDY 로 인한 감소가 B5MME에서 더 강한 것으로 보인다. 그러므로 MME와 B5MME의 MFC의 차이는 역학적 요인에서 나타난다.

한반도 지역에 대하여 영역 평균을 한 결과 δTH 가

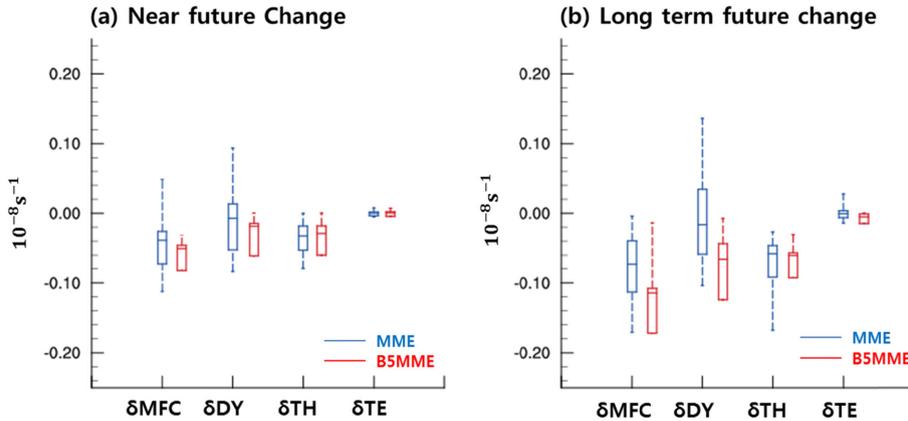


Fig. 4. The changes of (a) near future (2025~2049) and (b) long term future (2075~2099) of moisture flux convergence (MFC), dynamic (DY), thermodynamic (TH), and transient eddy (TE) terms during DJF over East Asia (20°N~50°N, 110°E~150°E). The bar indicates spread of models, the box indicates at a 25~75% performance of 20 models (blue) and the best five models (red).

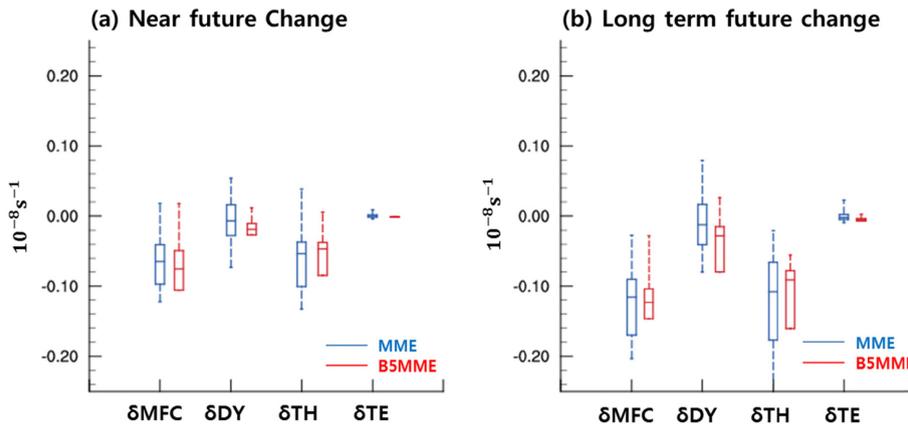


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for the Korean Peninsula (33°N~43°N, 124°E~131°E).

MFC감소에 영향을 뚜렷하게 준다 (Fig. 5). MME가 B5MME보다 δTH 가 더 감소하지만 B5MME의 δDY 감소가 MME의 δDY 보다 더 크게 감소하므로 결과적으로 δMFC 의 감소는 B5MME가 약간 더 크다. 장기 미래는 단기 미래보다 더 MFC가 감소하게 되는데 이는 δTH 가 단기 미래보다 더 많이 감소하기 때문이다 (Fig. 5b). 장기 미래에 δDY 는 단기 미래와 비교했을 때 MME와 B5MME 모두 뚜렷한 변화가 나타나지 않는다. 즉, 겨울철 한반도에서 MFC의 감소는 열역학적 요소로 인한 영향이 크게 작용한다.

4. 여름철 미래 기후 변화

Moon et al. (2014)는 여름철에 MME와 B5MME는

단기 미래와 장기 미래에 동아시아 전반적으로 강수가 증가하는 것으로 전망하였다. MME는 한반도 북쪽과 일본 남쪽 해상에서 강수가 크게 증가할 것으로 전망하였고 B5MME는 한반도 부근의 장마지역에서 뚜렷한 증가가 존재할 것으로 전망하였다. 증발량의 변화를 살펴보았을 때 MME와 B5MME는 미래에 전반적으로 증발이 증가하는 것으로 전망하였다. 그리고 강수와 마찬가지로 MME와 B5MME의 증발량 증가 패턴에는 차이가 나타났다. MME는 한반도 동해안을 제외하고 전반적인 증발량의 증가를 전망하는 반면에 B5MME는 한반도 부근 장마 지역에서의 증발량 증가가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 6).

여름철에 MFC의 변화를 살펴보았을 때, 단기 미래에 MME와 B5MME는 전반적으로 MFC가 증가하며

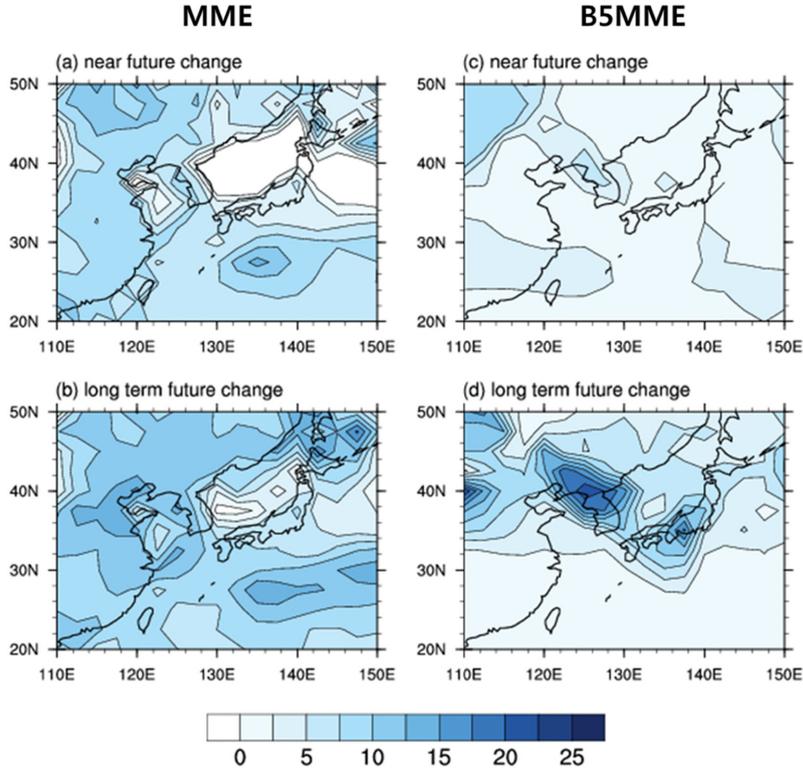


Fig. 6. Same as Fig. 1 except for JJA.

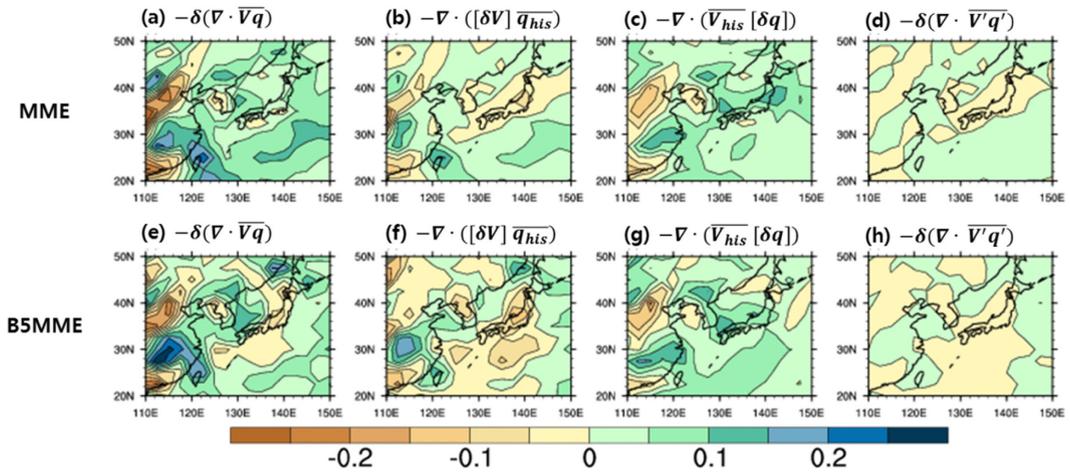


Fig. 7. Same as Fig. 2 except for JJA.

주로 동중국 내륙에서 감소와 증가가 뚜렷하게 나타난다(Figs. 7a, e). 이 지역에서 MFC의 변화는 열역학적 요인과 역학적 요인이 혼합되어 나타난다(Figs. 7b, c, f, and g). δDY 에서 MME와 B5MME는 동아시아 남쪽 해양에서 서로 다른 값을 가진다. MME에서는

역학적 요소가 MFC를 증가시키는 반면에 B5MME에서는 감소를 유도한다(Figs. 7b, f). 그 이유는 MME에서는 북태평양 고기압의 강화로 인하여 남쪽으로부터 수증기 수송이 더 강해지는 반면 B5MME에서는 일본의 남동쪽 해양에 저기압성 순환 아노말리로 인

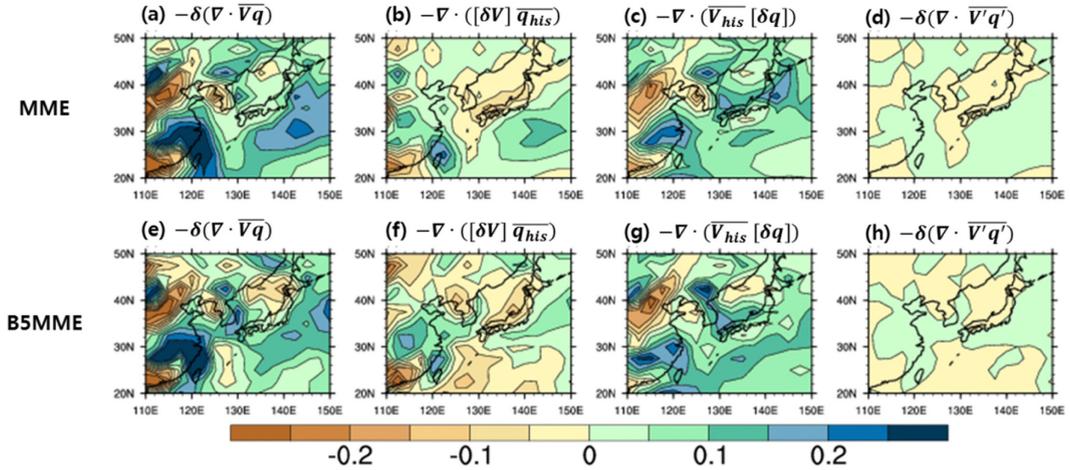


Fig. 8. Same as Fig. 3 except for JJA.

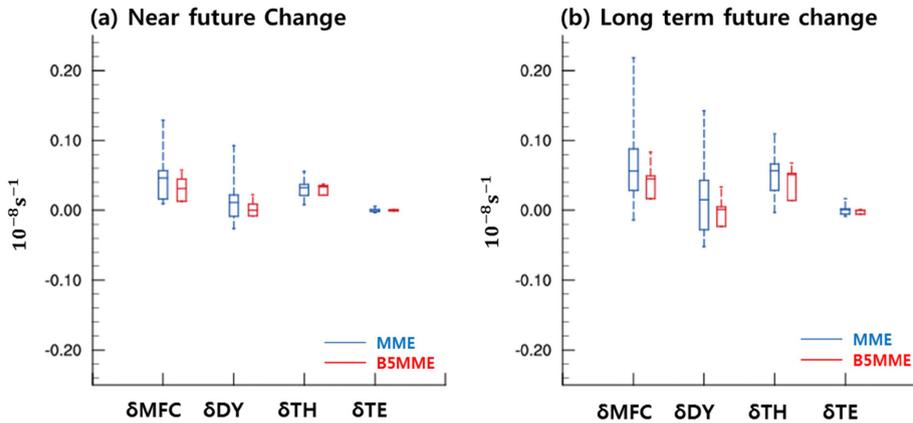


Fig. 9. Same as Fig. 4 except for JJA.

하여 북태평양 고기압에 의해 남쪽으로부터 수송되는 수증기를 방해하기 때문이다(그림 미제시). δTH 에서는 MME와 B5MME의 뚜렷한 차이가 나타나지 않는다(Figs. 7c, g). 장기 미래에서 MME와 B5MME는 더 강한 수분 수렴이 나타난다(Figs. 8a, e). MME와 B5MME는 동중국 남쪽 내륙에서 강한 MFC의 증가를 나타내며 이 증가는 그 지역에서 δTH 가 더 증가하였기 때문으로 보인다(Figs. 8c, g). δDY 는 단기 미래와 비교했을 때 그 지역에서 뚜렷한 차이가 나타나지 않는다(Figs. 8b, f). 그러므로 장기 미래에서도 강수의 증가는 열역학적 요소로 인하여 증가하는 것으로 보인다.

Moon et al. (2014)은 여름철 동아시아 지역에 대하여 영역평균을 하여 강수의 변화를 살펴보았을 때 MME가 B5MME보다 강수 증가율이 더 크게 나타났

다. 마찬가지로 증발량을 동아시아 지역에 영역 평균을 한 결과 단기 미래에 MME는 5.79%, B5MME는 2.31% 증가하였고 장기 미래에 MME는 8.97%, B5MME는 4.54% 증가한 것으로 나타났다(Table 3). 그리고 MFC의 각 항들을 영역 평균하였을 때, 동아시아에서 MFC의 증가는 δTH 의 영향이 뚜렷하게 보인다(Fig. 9). δDY 는 δTH 에 비해 크기도 작으며 장기 미래에 단기 미래보다 약간 증가한다. MME와 B5MME를 비교하였을 때 δTH 는 뚜렷한 차이가 단기 및 장기 미래에서 나타나지 않는 반면 δDY 가 차이가 있는 것으로 보아 겨울철과 마찬가지로 δDY 의 차이로 인하여 B5MME의 강수 증가 경향이 작게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 한반도 지역에 대해 증발량을 영역 평균을 했을 때 단기 미래에서 MME는 3.55%, B5MME는 1.41% 증가하였고 장기 미래에 MME는

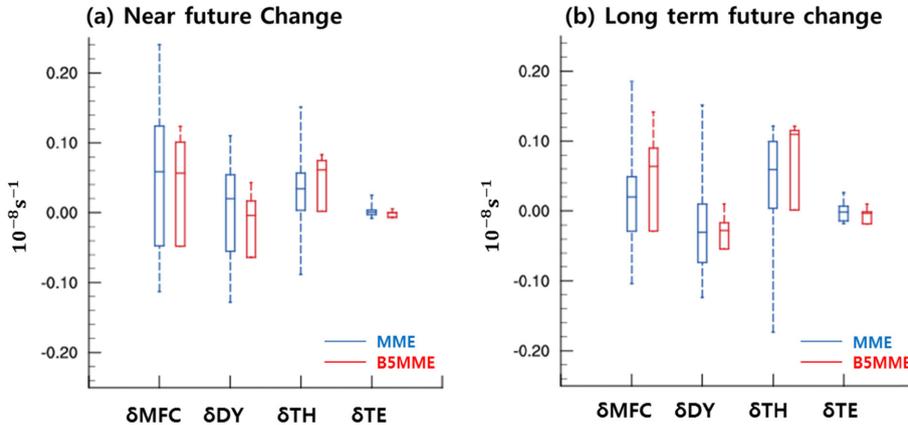


Fig. 10. Same as Fig. 5 except for JJA.

8.47%, B5MME는 7.77% 증가하는 것으로 전망하였다. 하지만 Moon et al. (2014)에서는 한반도 지역에 대해 B5MME가 MME보다 강수의 증가율이 더 높게 나타나는 것을 보였다. MFC의 각 항들을 한반도 지역에 대해 영역평균하여 분석한 결과, 장기 미래에 B5MME MFC의 증가가 MME보다 크게 나타났고 그 원인은 δTH 에 의한 것으로 밝혀졌다(Fig. 10). 그러므로 한반도 지역에서 여름철에 B5MME가 MME보다 강수 증가율이 더 높게 나타난 이유는 열역학적 요인에 의한 것으로 밝혀졌다. 한반도 지역에서 B5MME가 MME에 비해 열역학적 요인이 뚜렷하게 나타나는 원인은 여름철 850 hPa 온위의 변화를 살펴보았을 때 B5MME는 한반도 지역을 포함하는 영역에서 강한 온위의 증가를 전망하고 MME는 한반도보다 고위도의 지역에서 강한 증가를 전망하는 차이가 나타난다(그림 미제시). 이러한 차이로 인하여 여름철 한반도 강수의 증가에 B5MME가 MME보다 δTH 의 영향을 더 많이 받는 원인이 될 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Moon et al. (2014)의 MME와 B5MME가 동아시아와 한반도 지역에서의 미래 전망 차이에 대한 원인 분석을 위하여 열역학적, 역학적 측면에서 계절별로 분석하였다.

겨울철에 강수는 육지에서 증가하고 해양에서 감소하는 것으로 MME와 B5MME가 전망하였다(Moon et al., 2014). 증발량의 변화를 살펴보았을 때, 증발량은 해양보다 육지에서 증가율이 더 뚜렷하게 나타난 것으로 보아 육지에서 강수의 증가는 증발량의 증가가 한 가지 원인으로 추측할 수 있다. MFC의 변화를 살펴보았을 때 전반적으로 강수를 감소를 시켰으며 특

히, 해양에서 강수의 감소에 영향을 크게 미쳤다. MFC의 감소는 주로 열역학적 요인에 의해 감소를 하였으므로 해양에서 강수의 감소는 열역학적 요인에 의해 감소한 것이다.

동아시아 지역을 영역 평균하였을 때 강수 증가율은 MME가 B5MME보다 크게 나타났다(Moon et al., 2014). 증발량 또한 강수와 마찬가지로 MME가 B5MME보다 더 증가하는 것으로 나타났다. 그에 반해 MFC는 증발에 의한 강수의 증가를 방해한다. MFC의 변화는 B5MME가 MME보다 더 크게 나타나는데 그 이유는 B5MME가 MME보다 δDY 의 감소가 더 크게 나타났기 때문이므로 역학적 요인이 원인이다. 한반도 지역에 대하여 영역 평균하였을 때도 마찬가지로 MFC는 강수의 감소에 영향을 주며 주로 열역학적 원인에 의해 MFC는 감소한다. 한반도에서도 B5MME의 MFC가 MME보다 약간 더 감소하는데 δDY 가 B5MME에서 MME보다 더 감소하였기 때문이다.

여름철에는 MME와 B5MME가 전반적인 강수의 증가를 전망하지만 MME는 한반도 북쪽과 일본 남쪽 해상에서 강수가 크게 증가할 것으로 전망하였고 B5MME는 한반도 부근 장마 지역에서 뚜렷한 강수의 증가를 전망하였다(Moon et al., 2014). 여름철에 증발량의 미래 변화에서도 MME와 B5MME는 전반적으로 증가가 나타날 것으로 전망하였으며 강수와 마찬가지로 MME는 한반도 동해안을 제외하고 전반적인 증발량의 증가를 전망하였고 B5MME는 한반도 부근 장마 지역에서 증발량의 증가가 뚜렷하게 나타났다. MFC의 변화를 살펴 보았을 때, MME와 B5MME는 전반적으로 MFC의 증가가 나타날 것으로 전망하였고 주로 열역학적 요인에 의해 증가하는 것으로 나타났다. 특히 동중국 내륙에서 MFC의 뚜렷한 감소와

증가가 나타났다. 동아시아 지역에서 MFC의 변화는 열역학적, 역학적 요인이 혼합되어 나타나는 것을 알 수 있었다. MFC의 변화에서는 강수 증가 패턴과 달리 MME와 B5MME의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

여름철에 동아시아 지역에 대하여 영역평균을 했을 때, MME는 B5MME보다 강수 증가율이 더 크게 나타났다(Moon et al., 2014). 증발량과 MFC 또한 강수와 마찬가지로 MME가 B5MME보다 증가율이 더 크게 나타났으며 MFC의 증가는 열역학적 요소가 원인인 것으로 밝혀졌다. 하지만 동아시아 지역에서 강수 증가율이 MME보다 B5MME가 작게 나타난 것은 상대적으로 MFC의 열역학적 요소보다 역학적 요소의 차이로 인해 나타난 것으로 보인다. 한반도 영역에 대하여 영역평균을 하였을 때, Moon et al. (2014)는 B5MME가 MME보다 증가율이 더 크게 나타나는 것을 보였다. 한반도 영역에서 증발량의 증가율은 MME가 B5MME보다 약간 더 크게 나타났다. 이럼에도 불구하고 B5MME의 강수 증가율이 더 크게 나타난 원인은 MFC의 증가가 B5MME에서 MME보다 크게 나타났기 때문이다. B5MME에서 MFC의 증가가 더 크게 나타난 원인은 MME보다 열역학적 요인이 더 크게 증가하였기 때문인 것으로 밝혀졌다.

본 연구에서는 선행 연구(Moon et al., 2014)의 후속 연구로써 단일모델 결과가 아닌 CMIP5에 참여한 모델들을 이용한 앙상블 결과와 동아시아 기후를 잘 모의하는 Best 모델들의 결과를 이용하여 미래 기후 전망에 있어서 서로 다른 결과를 나타내는 것에 대해 원인을 밝히고자 수증기 수지 분석을 통하여 열역학적, 역학적 측면에서 분석을 하였다. 동아시아 지역과 한반도 지역에서 강수의 증가와 감소는 주로 열역학적 요인에 의한 영향이 뚜렷하게 나타나는 것이 밝혀졌으며 MME와 B5MME의 미래 기후 전망 차이는 동아시아 지역에서는 겨울철과 여름철에 역학적 요인으로 인해 차이가 나타나고 한반도 지역에서는 겨울철에는 역학적 요인에 의해 여름철에는 열역학적 요인에 의해 차이가 나타나는 것을 밝혔다. 동아시아 지역에서 각 모델들의 열역학적 및 역학적 요소의 현재 기후 모의 성능을 살펴보았을 때, best로 선정된 5개의 모델들이 상대적으로 다른 모델에 비해 역학적 요소를 잘 모의하였다(그림 미제시). 이로 미루어 볼 때 동아시아 지역에서 강수량의 모의 성능을 높이는 데 있어서 역학적 요소를 보다 잘 모의할수록 성능이 더 나아질 것으로 기대할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에

의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- Cherchi, A., A. Alessandri, S. Masina, and A. Navarra, 2011: Effects of increased CO₂ levels on monsoons. *Clim. Dynam.*, **37**, 83-101
- Chou, C., J. D. Neelin, C. A. Chen, and J. Y. Tu, 2009: Evaluating the “rich-get-richer” mechanism in tropical precipitation change under global warming. *J. Climate*, **22**, 1982-2005
- Endo, H., and A. Kitoh, 2014: Thermodynamic and dynamic effects on regional monsoon rainfall changes in a warmer climate. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1704-1710.
- Frierson, D. M. W., J. Lu, and G. Chen, 2007: Width of the Hadley cell in simple and comprehensive general circulation models. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L18804, doi:10.1029/2007GL031115.
- Held, I. M., and B. J. Soden, 2006: Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J. Climate*, **19**, 5686-5699.
- Hsu, P. C., T. Li, J. J. Luo, H. Murakami, A. Kitoh, and M. Zhao, 2012: Increase of global monsoon area and precipitation under global warming: A robust signal?. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L06701.
- Lee, E.-J., K.-J. Ha, and J.-G. Jhun, 2014a: Interdecadal changes in interannual variability of the global monsoon precipitation and interrelationships among its subcomponents. *Clim. Dynam.*, **42**, 2585-2601, doi:10.1007/s00382-013-1762-4.
- Lee, J.-Y., and B. Wang, 2014: Future change of global monsoon in the CMIP5. *Clim. Dynam.*, **42**, 101-119.
- _____, B. Wang, K.-H. Seo, J.-S. Kug, Y.-S. Choi, Y. Kosaka, and K.-J. Ha, 2014b: Future change of Northern Hemisphere summer tropical-extratropical teleconnection in CMIP5 models. *J. Climate*, **27**, 3643-3664, doi:10.1175/JCLI-D-13-00261.1.
- Lim, E.-P., and I. Simmonds, 2009: Effect of tropospheric temperature change on the zonal mean circulation and SH winter extratropical cyclones. *Clim. Dynam.*, **33**, 19-32, doi:10.1007/s00382-008-0444-0.
- Lu, J., G. A. Vecchi, and T. Reichler, 2007: Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L06805, doi:10.1029/2006GL028443.
- Moon, H., B.-H. Kim, H. Oh, J.-Y. Lee, and K.-J. Ha, 2014: Future change using the CMIP5 MME and best models: I. Near and long term future change of temperature and precipitation over East Asia. *Atmo-*

- sphere*, **24**, 403-417, doi:10.14191/Atmos.2014.24.3.403 (in Korean with English abstract).
- Oh, H., and K.-J. Ha, 2014: Thermodynamic characteristics and responses to ENSO of dominant intraseasonal modes in the East Asian summer monsoon. *Clim. Dynam.*, doi:10.1007/s00382-014-2268-4.
- Seager, R., and N. Naik, 2012: A mechanisms-based approach to detecting recent anthropogenic hydroclimate change. *J. Climate*, **25**, 236-261, doi:10.1175/jcli-d-11-00056.1.
- _____, _____, and G. A. Vecchi, 2010: Thermodynamic and dynamic mechanisms for large-scale changes in the hydrological cycle in response to global warming. *J. Climate*, **23**, 4651-4668.
- Seo, K.-H., J. Ok, J.-H. Son, and D.-H. Cha, 2013: Assessing future changes in the East Asian summer monsoon using CMIP5 coupled models. *J. Climate*, **26**, 7662-7675.
- 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.
- Vecchi, G. A., and B. J. Soden, 2007: Global warming and the weakening of the tropical circulation. *J. Climate*, **20**, 4316-4340.
- Yun, K.-S., S.-H. Shin, K.-J. Ha, A. Kitoh, and S. Kusunoki, 2008: East Asian precipitation change in the global warming climate simulated by a 20-km mesh AGCM. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **44**, 233-247.
- Zhou, T. J., and R. C. Yu, 2005: Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China. *J. Geophys. Res.*, **110**, D08104, doi:10.1029/2004JD005413.