

## CMIP5 모델에서 모의되는 지구온난화에 따른 21세기 말 저위도 대기 순환의 변화

정유림<sup>1),\*</sup> · 최다희<sup>2)</sup> · 백희정<sup>1)</sup> · 조천호<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>국립기상연구소 기후연구과, <sup>2)</sup>기상청 기후예측과

(접수: 2013년 5월 27일, 수정: 2013년 8월 14일, 개재확정일: 2013년 9월 27일)

### Changes in the Low Latitude Atmospheric Circulation at the End of the 21<sup>st</sup> Century Simulated by CMIP5 Models under Global Warming

Yoo-Rim Jung<sup>1),\*</sup>, Da-Hee Choi<sup>2)</sup>, Hee-Jeong Baek<sup>1)</sup>, and Chunho Cho<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Climate Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, KMA

<sup>2)</sup>Climate Prediction Division, Korea Meteorological Administration

**Abstract** Projections of changes in the low latitude atmospheric circulation under global warming are investigated using the results of the CMIP5 ensemble mean. For this purpose, 30-yr periods for the present day (1971~2000) and the end of the 21<sup>st</sup> century (2071~2100) according to the RCP emission scenarios are compared. The wintertime subtropical jet is projected to strengthen on the upper side of the jet due to increase in meridional temperature gradient induced by warming in the tropical upper-troposphere and cooling in the stratosphere except for the RCP2.6. It is also found that a strengthening of the upper side of the wintertime subtropical jet in the RCP2.6 due to tropical upper-tropospheric warmings. Model-based projection shows a weakening of the mean intensity of the Hadley cell, an upward shift of cell, and poleward shift of the Hadley circulation for the winter cell in both hemispheres. A weakening of the Walker circulation, which is one of the most robust atmospheric responses to global warming, is also projected. These results are consistent with findings in the previous studies based on CMIP3 data sets. A weakening of the Walker circulation is accompanied with decrease (increase) in precipitation over the Indo-Pacific warm pool region (the equatorial central and east Pacific). In addition, model simulation shows a decrease in precipitation over subtropical regions where the descending branch of the winter Hadley cell in both hemispheres is strengthened.

**Key words:** Low latitude atmospheric circulation, global warming, RCP, CMIP5

### 1. 서 론

온실가스 증가로 인한 대기 열적 구조의 변화는 대규모 대기 순환의 변화를 야기시킨다. Lim and Simmonds(2009)는 GCM(General Circulation Model)을 이용하여 CO<sub>2</sub>가 증가함에 따라 열대 대류권 상층

및 고위도 대류권 하층의 기온 상승이 겨울철 해들리셀을 약화시키고, 아열대 제트는 강화, 중·고위도 제트는 약화시킨다고 하였다. 또한, Butler *et al.*(2010)은 열대 대류권 상층 가열에 의해 해들리 순환 및 제트가 극향 이동하는 것을 AGCM(Atmospheric GCM)을 이용한 수치 모의 실험에서 증명한 바 있다.

특히, 해들리 순환의 극향 이동은 아열대 사막의 확장과 같은 주요 아열대 건조 지역의 위치를 결정하는데 막대한 영향을 끼칠 수 있기 때문에(Frierson *et al.*, 2007; Lu *et al.*, 2007) GCM을 이용한 해들리 순환의 극향 이동 메커니즘에 대한 연구는 지속적으로 다양

\*Corresponding Author: Yoo-Rim Jung, Climate Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration 61 16-gil Yeouidaebang-ro, Dongjak-gu, Seoul 156-720, Korea.  
Phone : +82-70-7850-6666, Fax : +82-2-834-5922  
E-mail : yrjung@korea.kr

한 관점에서 시도되어왔다. 온실가스 증가로 인하여 대류권 상층이 가열되고 중·고위도 성층권이 냉각되어 나타나는 온대지방 대류권계면 고도 상승이 해들리 셀을 극 방향으로 확장시킬 것으로 보는 반면 (Lorenz and DeWeaver, 2007; Lu *et al.*, 2008), 아열대 및 중위도의 정적 안정도 증가에 따른 경압 불안정 지역의 극향 이동을 주요 메커니즘으로 언급한 바 있다(Frierson *et al.*, 2007; Lu *et al.*, 2008). 반면, 성층권 오존 감소로 유발되는 성층권 및 고위도 대류권 상층의 냉각은 극지방과 온대지방의 대류권 남북온도 정도를 강화시킴으로써 남반구 여름철 해들리 셀의 남쪽 경계를 극 방향으로 확장시킨다는 연구도 있다 (Son *et al.*, 2009; Polvani *et al.*, 2011).

CMIP3(the third phase of the Coupled Model Intercomparison Project) 참여 모델에서 생산된 모의 결과로부터 지구온난화로 인한 해들리 셀 확장과 함께 제트 극향 이동 또한 전망되었다. CO<sub>2</sub> 농도가 21세기 말에 약 800 ppm에 도달하는 고배출 시나리오인 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) A2 시나리오 모의에서 남반구 여름철 해들리 순환의 확장과 중위도 제트의 극향 이동이 매우 높은 상관관계를 가짐을 제시한 바 있다(Lu *et al.*, 2008; Kang and Polvani, 2011). 반면, 최근 연구(Eyring *et al.*, 2013)에 의하면 CMIP5(the phase five of the Coupled Model Intercomparison Project) 다중 모델 양상을 평균 결과로부터 21세기 중반(2006~2050)에 고농도 시나리오인 RCP8.5에서는 남반구 여름철 온대제트가 극향 이동하는 반면, 상대적으로 온실가스에 의한 대류권 기운 상승이 낮은 저농도 시나리오인 RCP2.6에서는 성층권 오존이 회복됨에 따라 적도방향으로 이동할 것으로 전망되었다. CMIP5 참여 모델 중 하나인 CCSM4 (the fourth version of the Community Climate System Model)을 이용한 단일모델 모의 실험에서도 위와 동일한 결과를 보였다(Meehl *et al.*, 2012).

또한, CMIP3 참여 모델의 모의 결과에서 지구온난화가 진행됨에 따라 위커 순환도 약화될 것으로 전망되었으며, 위커 순환의 약화 정도(5~10% K<sup>-1</sup>; Vecchi and Soden, 2007)는 해들리 순환(4% K<sup>-1</sup>; Gastineau *et al.*, 2008)보다 더 강할 것으로 나타났다. 위커 순환이 약화되는 메커니즘을 태평양 해수면 온도 패턴 변화에 따른 대기 반응의 결과로써 이야기하는 반면(Vecchi and Soden, 2007), 해수면 온도의 동서 또는 남북 경도 변화 없이 균일한 값을 쳐방한 수치 모의 실험에서는 온난화된 기후 하에서 열대지방의 정적 안정도가 증가함에 따라 위커 순환이 약화됨을 밝혔다(Gastineau *et al.*, 2009).

저위도 지역에서 대규모 대기 순환의 구조 및 강도의 변화는 열대지방을 비롯한 세계 곳곳의 기후 변화

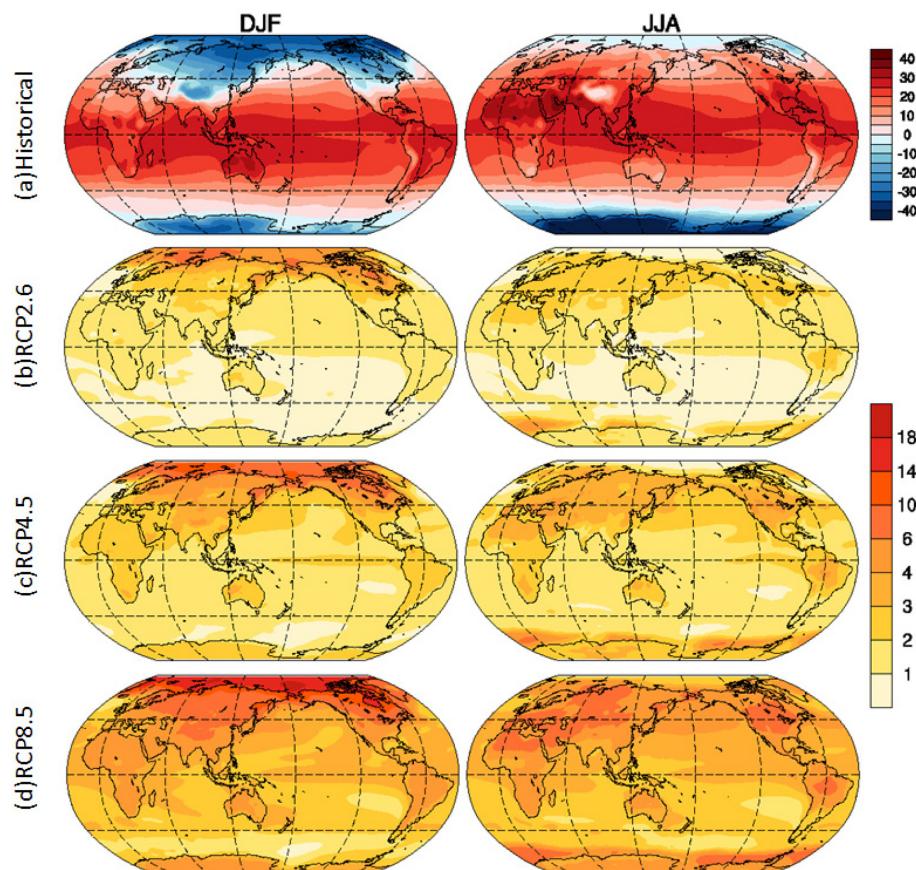
를 일으키는 중요한 요소로써, 지구온난화에 따른 미래 저위도 대기 순환의 변화와 이에 동반되는 기후 변화 전망은 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가보고서(5<sup>th</sup> Assessment Report: AR5)를 위한 새로운 온실가스 시나리오인 대표 농도 경로(Representative Concentration Pathway: RCP)에서 나타나는 21세기 말(2071~2100) 주요 저위도 대기 순환의 변화 및 이에 따른 전지구 강수 구조 변화를 전망하였다. 특히, 북반구(남반구) 겨울철(여름철)에 해당하는 DJF(December-February)와 그 반대인 JJA(June-August)로 나누어 계절별 변화를 중점적으로 살펴보았다. 2장에서는 사용한 모델 자료와 분석 방법에 대해 설명하였고, 3장에서는 CMIP5 참여 모델을 이용한 미래 대기 순환 전망 결과를, 4장에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

## 2. 자료 및 분석 방법

본 연구에서는 PCMDI(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison; <http://pcmdi9.llnl.gov>)에서 제공하는 CMIP5 참여 모델의 과거기후 모의실험(Historical run)과 최저농도(RCP2.6), 저농도(RCP4.5), 고농도(RCP8.5)의 RCP시나리오 3종에 대한 미래 전망 실험 자료를 이용하여 21세기 말 저위도 대기 순환 변화를 전망하였다. 국립기상연구소에서 활용 중인 HadGEM2-AO를 포함한 총 7개의 모델 모의 결과 자료를 사용하였으며, 사용모델, 기관, 대기/해양 변수의 수평 분해능에 대한 설명은 Table 1과 같다. CMIP5 참여 모델 중에서 과거기후 모의실험 및 RCP시나리오 3종별 분석에 필요한 변수들이 모두 포함되어 있는 모델을 선정하였으며, 7개 모델 모두 현재기후(1971~2000)에서 나타나는 동서평균 저위도 대기 순환의 공간 분포에서 특정 노이즈를 보이지 않았다(not shown). 모델별 수평해상도가 다르기 때문에 2차원(3차원) 대기변수의 경우 경도 및 위도를 192 × 145 (192 × 144) 분해능으로, 해양변수의 경우 360 × 216분해능으로 내삽하여 모든 모델의 격자 체계를 통일시켰다. 또한, 모델이 내포하는 각기 다른 격자 체계 및 역학 과정, 물리적 매개변수화 등에 의한 예측결과의 불확실성을 줄이고자 다중 모델 양상을(Multiple-Model Ensemble, MME)을 구성하여(Lambert and Boer, 2001) 양상을 평균한 값을 사용하였다. 대기 순환 변화에 미치는 대기 열적 구조의 영향을 알아보기 위하여 지상 2 m 온도와 연직 온도 자료를 사용하였으며, 제트는 동서바람(u)을 동서평균하여 위도-고도의 2차원 구조를 살펴보았다. 적도 서태평양, 남동아시아, 북호주 상에서의 상승기류와 적도 동태평양에서의 하강기류로

**Table 1.** Description of CMIP5 models used in this study.

Model	Institute	Spatial Resolution lon.xlat.(levels)	
		Atm.	Ocn.
BCC-CSM1-1	BCC (Beijing Climate Center), CMA (China Meteorological Administration), China	128 × 64(L26)	360 × 232
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE (Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence), Australia	192 × 96(L18)	192 × 189
HadGEM2-AO	NIMR (National Institute of Meteorological Research), KMA (Korea Meteorological Administration), Korea AORI (Atmosphere and Ocean Research Institute), JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology), and NIES (National Institute for Environmental Studies), Japan	192 × 144(L38)	360 × 216
MIROC-ESM	AORI, JAMSTEC, and NIES, Japan	128 × 64(L80)	-
MIROC-ESM-CHEM	AORI, JAMSTEC, and NIES, Japan	128 × 64(L80)	-
MIROC5	AORI, JAMSTEC, and NIES, Japan	256 × 128(L40)	256 × 224
MRI-CGCM3	MRI (Meteorological Research Institute), Japan	320 × 160(L48)	360 × 368

**Fig. 1.** Spatial distribution of surface air temperature simulated by CMIP5 models for the (a) present day (1971~2000) and changes for the 30-yr period 2071~2100 minus 1971~2000 for the (b) RCP2.6, (c) RCP4.5, and (d) RCP8.5. The left (right) panels indicate boreal winter (summer). Units are °C.

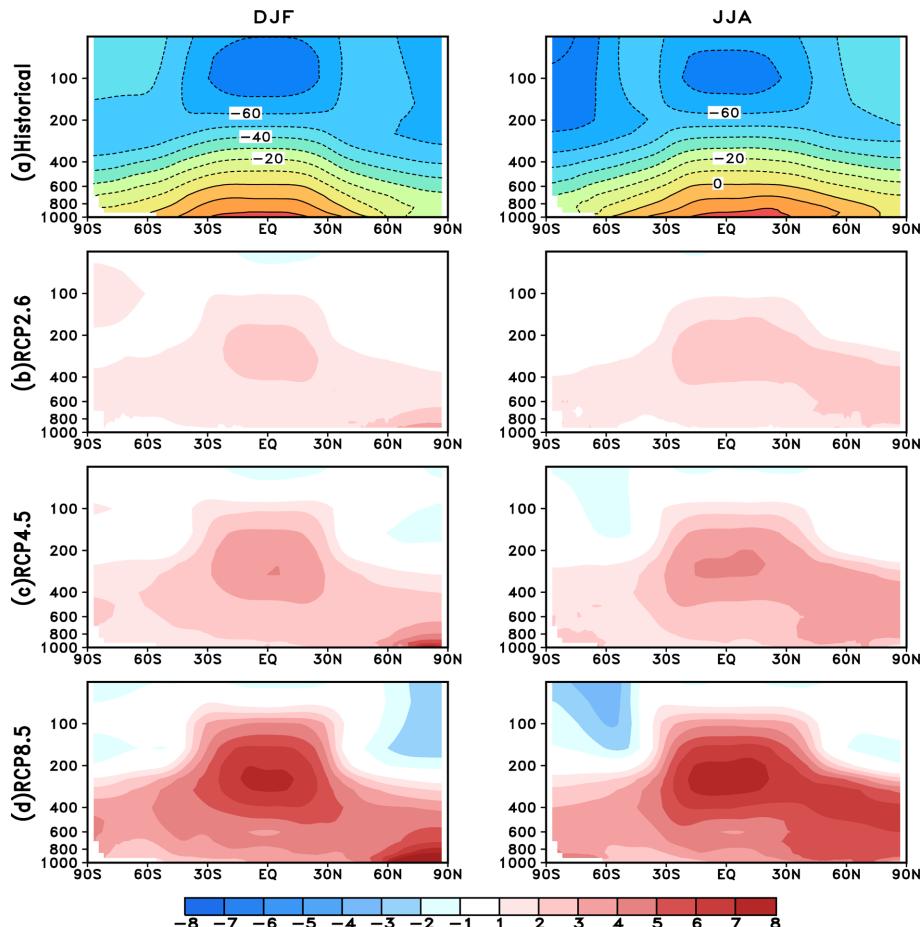
특징지을 수 있는 위커 순환(Gill, 1982)의 경우 연직 바람( $\omega$ )을 남북방향으로 남위 5도에서 북위 5도까지 평균한 값으로 나타내었고, 해들리 순환은 Oort and Yienger(1996)에서 제시한 방법을 토대로 동서평균 남북바람( $v$ ) 및 연직바람( $\omega$ ) 값으로 유선함수( $\Psi$ )를 산출하고 동서평균 유선함수로 해들리 순환을 정의하여 이들의 변화를 살펴보았다. 또한, 대기 순환의 변화와 적도 태평양의 해수면 온도, 전지구 강수 변화와의 관계를 살펴보고자 해수면 온도 및 강수량 자료도 사용하였다. 해수면 온도의 경우 자료가 누락된 MIROC-ESM과 MIROC-ESM-CHEM을 제외한 5개 모델의 자료를 사용하였다. 본 연구에서 현재기후는 1971~2000년의 30년 평균한 값으로, 현재기후 대비 21세기 말의 변화는 2071~2100년 평균값과 1971~2000년 평균값의 차이로 나타내었으며, 계절별 (DJF 및 JJA) 변

화를 살펴보았다.

### 3. 21세기 말 저위도 대기 순환 전망

#### 3.1 수평 및 연직 기온의 변화

Figure 1은 지상 기온의 현재기후(1971~2000) 분포 및 RCP시나리오별 양상을 평균 전망된 21세기 말(2071~2100)의 계절(DJF 및 JJA) 변화를 보여준다. 21세기 말 두 계절 모두 전지구 대부분의 지역에서 기온이 상승하며 해양에 비해 육지에서 기온 상승이 클 것으로 전망되었다. 마찬가지로 남반구보다 육지 면적 비율이 더 높은 북반구에서 기온이 더 크게 상승할 것으로 나타났는데, 이는 해양보다 육지에서 온난화에 의한 반응 시간이 훨씬 더 짧기 때문이다(Hegerl *et al.*, 2007). 또한, 전구 영역 평균한 값을 비교하면



**Fig. 2.** Zonal mean of atmospheric temperature simulated by CMIP5 models for the (a) present day (1971~2000) and changes for the 30-yr period 2071~2100 minus 1971~2000 for the (b) RCP2.6, (c) RCP4.5, and (d) RCP8.5, shown as cross section. The left (right) panels indicate boreal winter (summer). Units are in  $^{\circ}\text{C}$ .

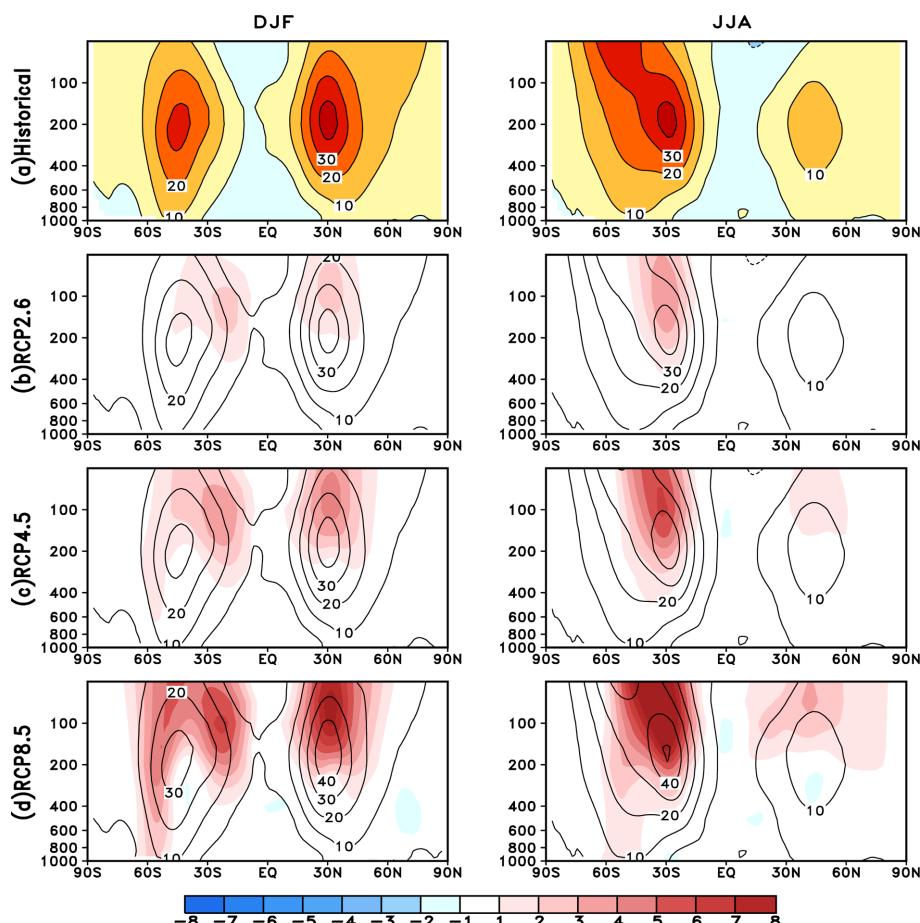
북반구 여름철(JJA)에 비해 북반구 겨울철(DJF)에 기온 상승폭이 크며, 특히 겨울반구 극지방에서 기온 상승이 크게 나타나고 있다. 이러한 전지구적 기온 상승 전망은 IPCC AR4(4<sup>th</sup> Assessment Report)에서도 보여진다(Meehl *et al.*, 2007).

21세기 말 동서평균된 연직 기온의 위도별 공간 분포를 살펴보면(Figs. 2b~d), 두 계절 모두에서 열대지방 대류권 상층과 극지방 대류권 하층(특히, 북반구)에서 기온이 크게 상승할 것으로 전망되었다. 이러한 기온 상승의 변화강도는 온실가스 강제력이 강화될수록 더 크게 나타나고 있으며, 열대지방 대류권 상층의 기온 상승은 현재기후의 대류권계면 부근에서 최대값을 보였다. 열대지방 대류권 상층의 기온 상승은 DJF와 JJA에 모두 크게 나타나고 있는 반면, 극지방의 경우 겨울반구의 대류권 하층에서, 여름반구의 대류권 중층에서 기온이 크게 상승할 것으로 전망되었

다. 온난화가 진행되면서 열대지방의 습윤단열감을 감소하는 기온감을 음의 피드백(negative lapse rate feedback) 효과로 인해 열대지방 대류권 상층의 기온이 상승할 것이라는 가능성이 제시된 바 있다(Randall *et al.*, 2007). 반면, 극지방 대류권 하층에서 나타나는 기온 상승은 그 지역의 빙하가 녹음에 따라 알베도가 감소하여 태양 복사 흡수량이 늘어나는 열음-알베도 피드백 효과에 의한 것으로 알려져 있다(Houghton *et al.*, 2001). 또한, 대류권의 기온 상승과는 반대로 RCP4.5와 RCP8.5에서 성층권의 기온이 하강할 것으로 나타났는데, 여름반구에 비해 겨울반구에서 더 큰 폭으로 하강할 것으로 전망되었다.

### 3.2 아열대 제트의 변화

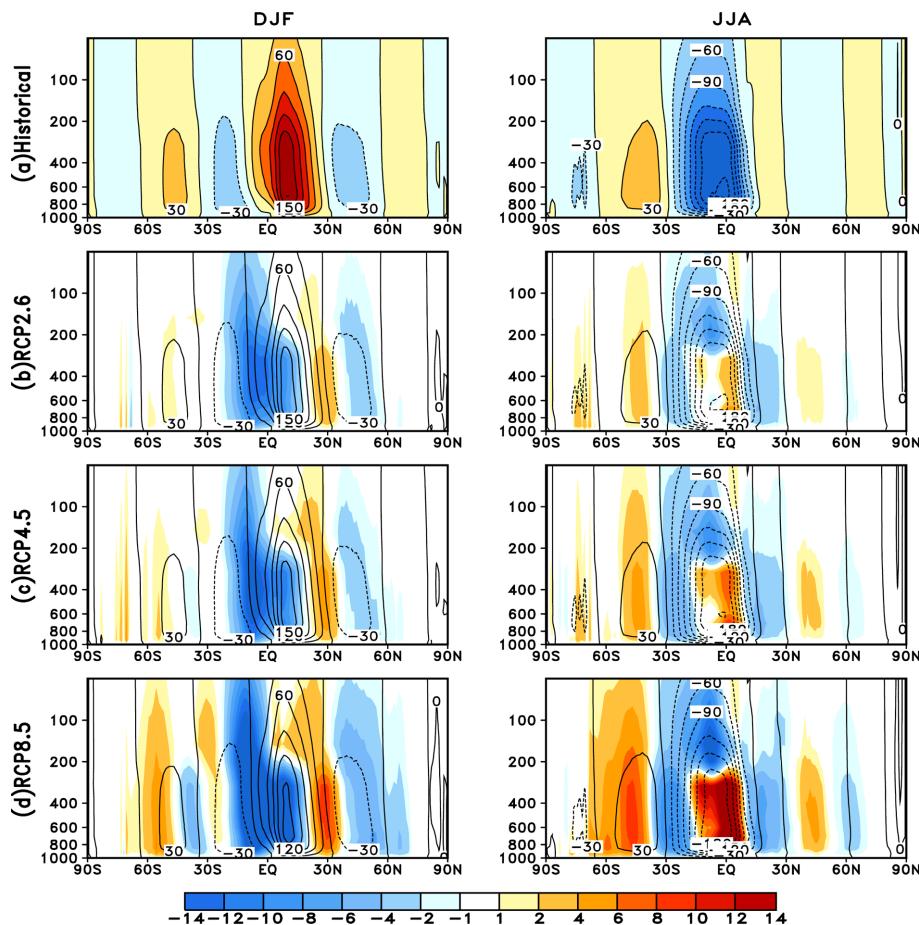
연직 기온(Fig. 2)과 동일한 기간 동안의 현재기후 아열대 제트 분포 및 21세기 말 아열대 제트의 계절



**Fig. 3.** Same as Fig. 2, but for zonal wind. The values for the end of the 21<sup>st</sup> century (b~d) are shown in contour. The positive (negative) values indicate westerly (easterly) winds. Units are  $\text{m s}^{-1}$ .

(DJF 및 JJA) 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 실선으로 표현되는 값은 현재기후(1971~2000) 및 미래기후(2071~2100) 값으로 양의 값은 서풍을, 음의 값은 동풍을 의미하며, Figs. 3b~d에서 음영 값은 현재기후 대비 21세기 말 RCP시나리오의 변화를 가리킨다. 현재기후 (Fig. 3a)에서 겨울반구의 약 30도 부근에 아열대 제트의 중심이 위치하는 것을 볼 수 있는데, 21세기 말 (Figs. 3b~d) 겨울반구 아열대 제트는 제트 중심부터 상부까지 양의 아노말리를 가지면서 제트의 평균 풍속은 증가하고 제트 중심의 위치는 상승할 것으로 전망되었다. 이는 3.1절에서 제시된 연직 기온의 변화 (Figs. 2b~d)와 일관된 특성을 보이고 있다. 제트가 발생하는 곳의 연직 방향 바람의 크기는 그 곳의 수평 기온 분포와 관련이 있다. RCP2.6 시나리오에서 열대 지방 대류권 상층 기온이 상승함에 따라 중위도 지역과 남북온도경도 차이가 더욱 증가하여 겨울반구 아

열대 제트의 평균 풍속이 증가하는 것으로 나타났다. RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오의 경우 겨울반구에서 열대지방 대류권 상층의 기온 상승뿐만 아니라 중·고위도 성층권 기온 하강에 의한 남북온도경도가 훨씬 더 크게 나타났는데, 이러한 현상은 특히 RCP8.5에서 겨울반구 상층 제트의 풍속이 현저하게 증가되는 메커니즘으로 설명될 수 있다. 또한, RCP4.5와 RCP8.5에서 보이는 여름반구 제트도 상층으로 강화될 것으로 보이나 변화 강도는 겨울반구 제트에 비해서 약할 것으로(특히, JJA) 전망되었다. 한편, RCP4.5와 RCP8.5에서 DJF 동안 남반구 여름철 제트의 극 방향 기류가 강화될 것으로 전망되었는데, RCP2.6에서는 나타나고 있지 않다. 이는 21세기 말 RCP4.5와 RCP8.5에서 중·고위도의 성층권 기온이 하강할 것이라는 전망과 다르게 RCP2.6에서는 남반구 여름철(DJF)에 성층권 기온이 상승하여 오히려 남북온도경도가 작아짐



**Fig. 4.** Same as Fig. 2, but for meridional streamfunction. The value for the end of the 21<sup>st</sup> century (b~d) are shown in contour. The positive (negative) values indicate anti-cyclonic (cyclonic) circulations. Units are  $10^9 \text{ kg s}^{-1}$ .

에 따라 나타나는 현상으로 짐작된다.

### 3.3 해들리 순환 및 워커 순환의 변화

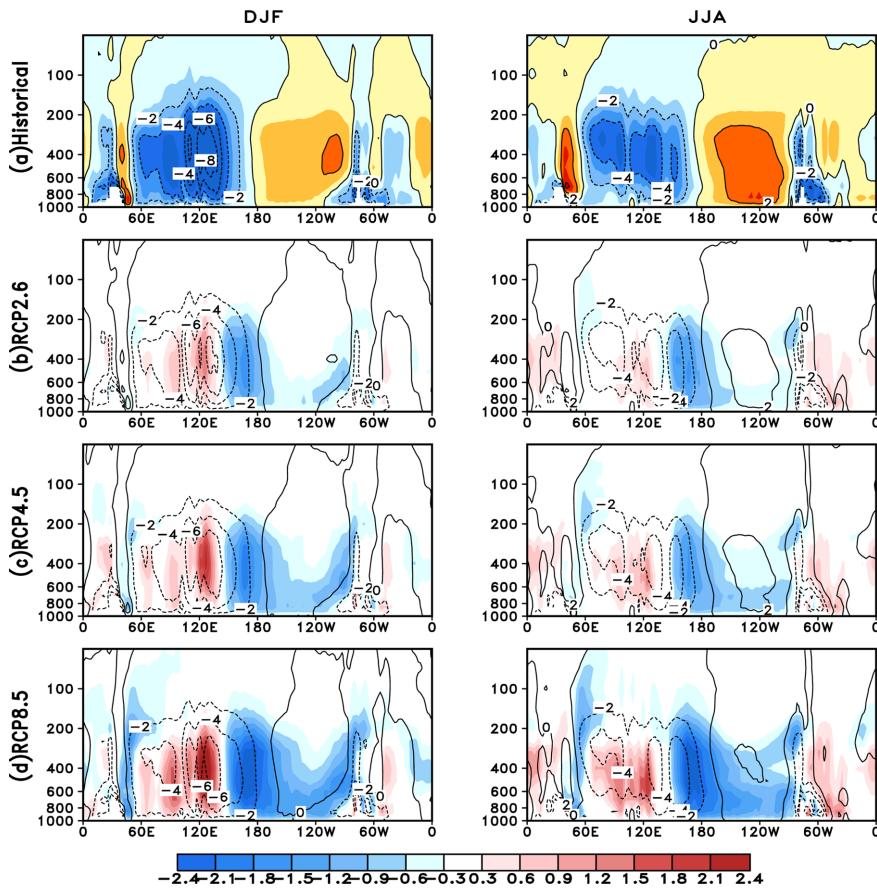
Figure 4는 동서평균된 유선함수의 현재기후(1971~2000) 분포 및 현재기후 대비 RCP시나리오에서 나타나는 21세기 말(2071~2100)의 계절(DJF 및 JJA) 변화를 보여준다. 여기서 실선으로 표현되는 유선함수의 양의 값은 시계방향 순환을, 음의 값은 반시계방향 순환을 의미한다. 그러므로 현재기후와 미래기후의 차 이를 나타내는 음영 값은(Figs. 4b~d) 북반구 겨울철(DJF) 해들리 셀의 경우 양의 값이, 남반구 겨울철(JJA) 해들리 셀의 경우 음의 값이 해들리 셀의 강화를 가리킨다. 현재기후(Fig. 4a)에서 DJF에 남위 10도 부근에서 공기가 상승하여 북위 30도 부근으로 하강하고, JJA에 반대로 북위 10도 부근에서 상승하여 남위 30도 부근으로 하강하는 겨울철 해들리 순환의 계절적 특성이 나타나고 있다. 21세기 말 해들리 셀의 강도 변화를 살펴보고자, 900 hPa에서 200 hPa 사이의 동서평균 유선함수의 최대값을 연직평균한 값으로부터 해들리 셀의 평균 강도를 정의하였다(Nguyen *et al.*, 2012). 연평균 북반구(NH) 해들리 셀 및 북반구 겨울철(DJF) 해들리 셀의 경우 동서평균 유선함수의 최대값으로, 남반구 겨울철(JJA)의 경우 동서평균 유선함수의 최소값을 연직평균 하였으며, 현재기후(1971~2000) 및 미래기후(2071~2100) 각각의 30년 평균값을 Table 2에 제시하였다. RCP2.6 시나리오의 남반구 겨울철(JJA) 해들리 셀을 제외하고 고농도 시나리오로 갈수록 DJF 및 JJA 모두에서 겨울철 해들리 셀 평균 강도가 약화되는 경향을 보이고 있으며, 특히 JJA에 비해 DJF에서 겨울철 해들리 셀이 더 큰 폭으로 약화될 것으로 전망되었다. 연평균 자료에서 두드러지게 나타나는 북반구(NH) 해들리 셀도 마찬가지로 모든 RCP시나리오에서 21세기 말에 약화될 것으로 전망되었다. Mitas and Clement(2006)는 20C3M(the 20<sup>th</sup> century coupled simulations) 기후모델 양상별 자료를 이용하여 20세기 후반(1979~2000)에 열대 대류권 중

**Table 2.** CMIP5 ensemble-mean intensity of the Hadley cells in terms of vertically (900~200 hPa) averaged maximum value of  $\Psi$  over 30 years for the present day (1971~2000) and for RCPs (2071~2100). Northern Hemispheric, boreal winter, and boreal summer indicate NH, DJF, and JJA, respectively. Units are in  $10^9 \text{ kg s}^{-1}$ .

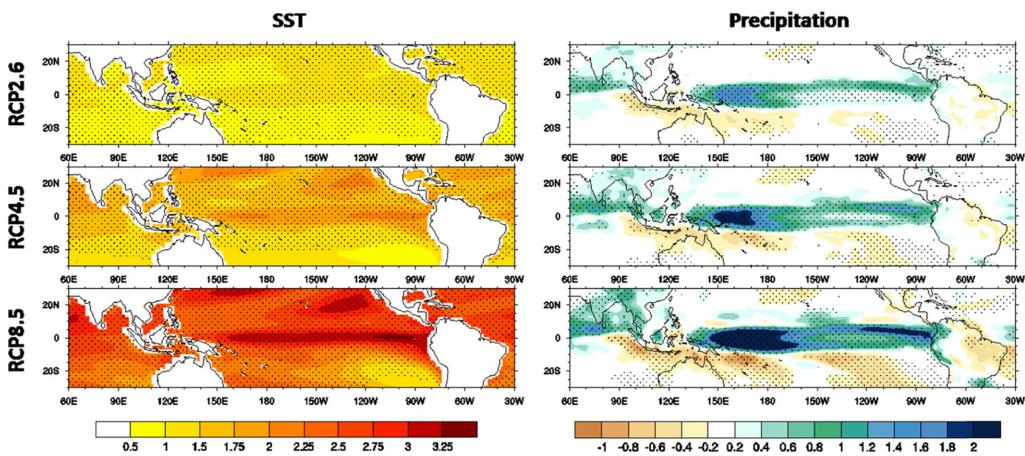
	Annual (NH)	DJF	JJA
Historical	195	156	-184
RCP2.6	191	150	-184
RCP4.5	188	148	-183
RCP8.5	181	141	-177

층 기온이 상승하고 정적 안정도가 증가함에 따라 북반구 겨울철 해들리 순환이 약화됨을 밝힌 바 있다. 반면, 겨울철 해들리 셀의 상부(200 hPa 이상)는 DJF (JJA)에서 양(음)의 아노말리를 가지면서 상층으로 강화될 것으로 전망되었는데, 이는 지구온난화로 인한 대류권계면 고도 상승과 관련이 있는 것으로 보인다 (Santer *et al.*, 2003). 따라서 CMIP5 다중 모델 양상을 평균 결과에서 나타나는 열대 대류권 상층의 기온 상승(Figs. 2b~d)은 겨울철 해들리 셀 평균 강도의 약화와 해들리 셀 상부의 강화에 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 한편, 해들리 셀의 경계에서 나타나는 디폴(dipole)에 의해 해들리 셀의 이동이 결정될 수 있는데(Gastineau *et al.*, 2008), DJF(JJA)동안 겨울철 해들리 셀의 하강기류 부근에서 양(음)의 아노말리가, 그보다 북쪽(남쪽)에서는 음(양)의 아노말리가 나타나면서 겨울철 해들리 셀이 극향 이동할 것으로 전망되었다. 이러한 겨울철 해들리 셀의 극향 이동은 온실가스 강제력이 강화될수록 더욱 더 뚜렷하게 나타났다. 이전 연구들(Gastineau *et al.*, 2008; Kang and Lu, 2012)에서도 대기-해양 결합 모델을 이용한 모의 결과로부터 지구 온난화에 따른 DJF 및 JJA 겨울철 해들리 셀의 극향 이동을 보여준 바 있다. 또한, 연평균 북반구 (NH) 해들리 셀의 경우 북반구 겨울철(DJF) 해들리 셀과 비슷한 양상으로 극향 이동할 것으로 전망되었는데, 해들리 셀의 강도 변화에서도 알 수 있듯이 남반구 겨울철(JJA) 해들리 순환보다 북반구 겨울철(DJF) 해들리 순환이 더 지배적임을 제시하고 있다(not shown).

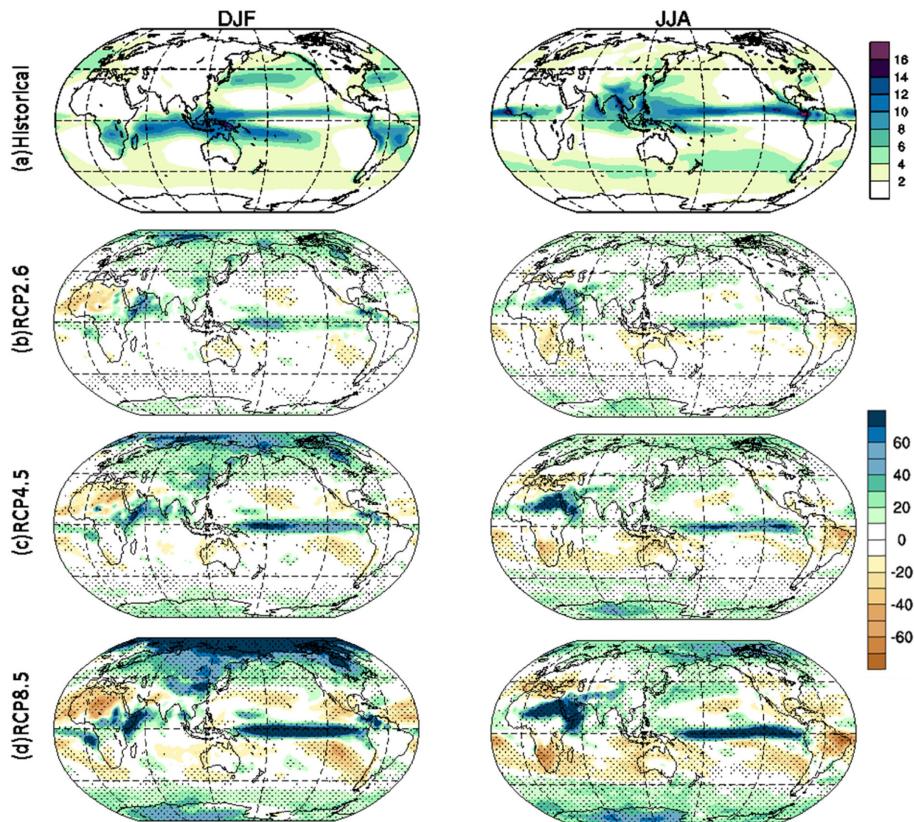
저위도 지역의 중요한 동서방향 대기 순환 중 하나인 워커 순환의 변화(Fig. 5)도 해들리 순환(Fig. 4)과 같은 기간 동안 살펴보았다. Figures 5a~d에서 실선은 현재기후 및 미래기후의 30년 평균값을 보여주는데, 양의 값은 하강기류, 음의 값은 상승기류를 의미한다. 현재기후 대비 21세기 말 전망값의 차이를 살펴보면 (Figs. 5b~d), 워커 순환의 상승기류가 위치하는 인도-서태평양 부근에서 양의 아노말리를, 워커 순환의 하강기류가 위치하는 적도 동중앙 태평양 부근에서 음의 아노말리를 가지면서 워커 순환이 약화될 것으로 전망되었다. 워커 순환은 적도 부근의 동서방향 순환이므로 구조 및 강도의 변화에 있어서 계절간(DJF 및 JJA) 뚜렷한 차이는 보이지 않는다. 반면, 워커 순환의 약화 정도는 온실가스 강제력이 커질수록 더 크게 나타나고 있다. 워커 순환을 약화시키는 메커니즘 중 하나로 해수면 온도 분포의 변화를 들 수 있다. IPCC AR4에 참여하는 대다수의 모델에서 지구온난화가 진행됨에 따라 엘니뇨와 유사한 패턴으로 열대 서태평양에 의해 동태평양 해수면 온도가 더 크게 상승할 것으로 전망된 바 있다(Collins *et al.*, 2005; Yamaguchi and Noda, 2006). 이와 상응하여 CMIP5 다중 모델 양



**Fig. 5.** Same as Fig. 2, but for equatorial vertical wind averaged  $5^{\circ}\text{S}$ - $5^{\circ}\text{N}$ . The values for the end of the 21<sup>st</sup> century (b-d) are shown in contour. The positive (negative) values indicate downward (upward) motions. Units are  $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ .



**Fig. 6.** Annual mean changes in (left) sea surface temperature and (right) precipitation for the 30-yr period 2071-2100 minus 1971-2000 for the (top) RCP2.6, (middle) RCP4.5, and (bottom) RCP8.5. The stippling shows changes in sea surface temperature and precipitation statistically significant at the 95% level. Units for sea surface temperature (precipitation) are  $^{\circ}\text{C}$  ( $\text{mm day}^{-1}$ ).



**Fig. 7.** Same as Fig. 1, but precipitation. The stippling for the end of the 21<sup>st</sup> century (b~d) shows precipitation changes statistically significant at the 95% level. Units for present-day climate (future changes) are mm day<sup>-1</sup> (%).

상블 평균 결과(Fig. 6)에서도 21세기 말 적도 동태평양 해수면 온도 상승이 상대적으로 서태평양보다 더 를 것으로 전망되었으며, Student-t 검정 결과 95% 이상의 신뢰수준을 보이며 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 이러한 적도 태평양 지역에서 해수면 온도의 수평 분포 차이가 서태평양의 상승기류 및 동태평양의 하강기류를 약화시켜 결과적으로 위커 순환의 약화를 초래하는 것으로 판단된다. 또한, 21세기 말 RCP시나리오에서 120°E 부근에서 양의 아노말리가, 180°E 부근에서 음의 아노말리가 나타나면서 위커 순환의 주요 상승기류 지점이 동쪽으로 이동할 것으로 전망되었다. 이러한 지구 온난화에 기인한 위커 순환의 약화와 대류의 동쪽방향 이동은 IPCC AR4 모델의 양상블 평균 자료를 토대로 한 Vecchi and Soden (2007)의 연구에서도 확인 할 수 있다.

#### 3.4 저위도 대기 순환과 강수 변화의 관련성

지구 온난화에 의한 21세기 말 해들리 순환의 변화는 전지구 강수의 남북방향 구조를 변화시킨다. 현재

기후(1971~2000)에서 강한 강수대가 DJF(JJA)에 해들리 셀의 상승기류가 존재하는 남위(북위) 5~10°도 부근에 위치하고 있는데(Fig. 7a), 이러한 강수의 계절적 특성과 해들리 순환의 계절적 특성(Fig. 4a)이 잘 일치하고 있다. Figures 7b~d는 현재기후 대비 21세기 말(2071~2100)의 강수 변화를 나타낸 것으로 Student-t 검정을 통해 신뢰수준 95% 이상의 통계적으로 유의한 변화는 점으로 표현하였다. 미래 RCP시나리오에서 21세기 말 북반구 겨울철(DJF) 해들리 셀의 상승기류가 약화(음의 아노말리)될 것으로 전망되었는데(Figs. 4b~d), 이와 연관되어 북반구 겨울철 해들리 셀의 상승기류 부근인 남태평양수렴대(South Pacific Convergence Zone; SPCZ) 지역에서 강수량이 감소될 것으로 나타났다. 또한, 21세기 말 북반구(남반구) 겨울철 해들리 셀의 하강기류 부근에서 양(음)의 아노말리를 가지면서 해들리 셀의 하강기류가 강화될 것으로 나타났는데(Figs. 4b~d), 이와 상응하여 겨울반구의 아열대 지역에서 강수량이 감소될 것으로 전망되었다. 즉, 해들리 셀의 하강기류가 위치하는 지역은

상대적으로 건조한 고압대인데 21세기 말에는 더 건조해질 것으로 보이며, 특히 고농도 시나리오로 갈수록 변화 강도는 커질 것으로 나타났다.

해들리 순환과 마찬가지로 위커 순환 역시 미래 강수 분포(특히, 적도 태평양 지역) 변화에 영향을 준다. 21세기 말 RCP시나리오의 양상을 평균 전망 결과로 부터 위커 순환의 상승기류가 약화되는 warm-pool 지역에서는 강수량이 감소할 것으로, 상대적으로 상승기류가 강화(하강기류 약화)되는 적도 동중앙 태평양에서는 강수량이 증가할 것으로 나타났다(Figs. 6과 7). 이는 앞서 언급한 바와 같이, 지구온난화에 의한 열대 동태평양 해수면 온도가 크게 상승함에 따라 적도 부근의 해면기압의 동서경도가 작아지고(즉, 위커 순환 약화), 열대 태평양 강수 분포를 동쪽으로 이동시키는 것으로 보인다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 CMIP5 참여 모델에서 산출된 과거 기후 모의실험(Historical run), RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 시나리오의 양상을 평균 자료를 이용하여 지구온난화에 의한 미래 저위도 주요 대기 순환의 변화를 계절(DJF 및 JJA)별로 살펴보았다. 미래 전망 분석은 현재기후(1971~2000) 대비 21세기 말(2071~2100)의 변화를 기준으로 수행하였다. 우선적으로 대기 순환 변화에 영향을 줄 수 있는 주 요인인 기온의 변화를 살펴보았다. 모든 RCP시나리오에서 21세기 말 전지구 대부분 지역의 기온이 상승하며 해양에 비해 육지에서 기온 상승이 클 것으로 전망되었다. 또한, JJA에 비해 DJF에 기온 상승폭이 크며 특히 겨울반구 극지방에서 기온이 크게 상승할 것으로 나타났다. 이러한 미래 기온 전망은 IPCC AR4(Meehl *et al.*, 2007)에서도 보고된 바 있다. 연직 기온 분포에서 적도 상층의 기온 상승은 두 계절 모두 뚜렷하게 나타나는 반면, 극지방의 기온 상승은 겨울반구의 대류권 하층에서, 여름반구의 대류권 중층에서 클 것으로 전망되었다. 반면, 성층권 기온은 RCP2.6 시나리오를 제외한 다른 RCP 시나리오에서 대류권의 기온 변화와 다르게 하강할 것으로 전망되었으며, 기온 하강폭은 여름반구에 비해 겨울반구에서 더 크게 나타났다. 따라서 RCP2.6 시나리오에서 나타나는 열대 대류권 상층 기온 상승과 중위도 지역과 남북온도경도가 커짐에 따라 겨울반구 아열대 제트는 원래 위치에서 상층으로 강화될 것으로 전망되었다. 또한, RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오에서 열대 대류권 상층 기온 상승뿐만 아니라 중·고위도 성층권 기온 하강에 의한 남북온도경도가 더 커짐에 따라 겨울반구 아열대 제트의 평균풍속이 더 강화될 것으로 나타났으며, 특히 RCP8.5

시나리오에서 변화 정도가 가장 큰 것을 볼 수 있다.

다음으로 대표적인 저위도 지역의 대규모 대기 순환 시스템인 해들리 순환 및 워커 순환의 변화를 살펴보았다. 온실가스 강제력이 강해짐에 따라 두 계절 모두에서 겨울철 해들리 셀의 평균 강도가 약화될 것으로 전망되었는데, 북반구 겨울철(DJF) 해들리 셀이 남반구 겨울철(JJA) 해들리 셀보다 더 큰 폭으로 약화될 것으로 나타났다. 반면, 200 hPa 이상의 겨울철 해들리 셀 상층의 극 방향 흐름은 상층으로 강화될 것으로, 해들리 셀의 하강기류 역시 강화될 것으로 전망되었다. 한편, 두 계절 모두에서 겨울철 해들리 셀이 극향 이동할 것으로 전망되었는데, 이 또한 고농도 시나리오로 갈수록 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이러한 지구온난화에 의한 겨울철 해들리 셀의 강도 및 위치의 변화는 IPCC AR4 AOGCM을 이용한 CO<sub>2</sub> 배증 실험 모의 결과(Gastineau *et al.*, 2008)와도 일치한다. 워커 순환의 경우, 모든 RCP시나리오에서 엘니뇨와 유사한 패턴으로 해수면 온도가 변화함에 따라 인도-서태평양의 상승기류와 적도 동중앙 태평양의 하강기류가 약화되고, 결과적으로 21세기 말 워커 순환이 약화될 것으로 전망되었다.

미래 RCP 시나리오에서 해들리 순환 및 워커 순환과 같은 저위도 대기 순환이 변함과 동시에 전지구 강수 분포도 변화하고 있다. 21세기 말 북반구 겨울철(DJF) 해들리 셀의 상승기류 약화가 나타나는 남태평양수렴대(SPCZ) 지역과 양반구 겨울철 해들리 셀의 하강기류 강화가 나타나는 아열대 지역에서 강수량이 감소될 것으로 전망되었다. 한편, 워커 순환의 상승기류가 약화되는 warm-pool 지역에서는 강수량이 감소할 것으로, 하강기류가 약화되는 적도 동중앙 태평양에서는 강수량이 증가할 것으로 나타났다.

본 연구에서는 단일모델 결과가 아닌 CMIP5 참여 모델의 다중 모델 양상을 결과를 이용함으로써 서로 다른 초기조건 및 모델 자체의 내부변동성으로부터 기인되는 예측 오차를 줄이고 좀 더 향상된 예측값을 바탕으로 RCP 시나리오에서 나타나는 지구온난화에 의한 21세기 말 저위도 대기 순환의 구조 및 강도, 이와 동반된 전지구 강수의 공간 분포 변화를 전망하였다. 그러나 향후 연구에서, 겨울철 해들리 셀 약화 및 극향 이동, 워커 순환 약화와 같은 미래 저위도 대기 순환의 변화를 일으키는 구체적인 발생 메커니즘에 관한 추가 분석이 이루어져야 할 것으로 보인다.

#### 감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 “NIMR-2012-B-2(기후변화 예측기술 지원 및 활용연구)”의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Butler, A. H., D. W. J. Thompson, and R. Heikes, 2010: The steady-state atmospheric circulation response to climate change-like thermal forcings in a simple general circulation model. *J. Climate*, **23**, 3474-3496.
- Collins, M., and Coauthors, 2005: El Niño- or La Niña-like climate change?. *Clim. Dynam.*, **24**, 89-104, doi: 10.1007/s00382-004-0478-x.
- Eyring, V., and Coauthors, 2013: Long-term ozone changes and associated climate impacts in CMIP5 simulations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, doi:10.1002/jgrd.50316 (Accepted).
- 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.
- Gastineau, G., H. L. Treut, and L. Li, 2008: Hadley circulation changes under global warming conditions indicated by coupled climate models. *Tellus*, **60A**, 863-884.
- \_\_\_\_\_, L. Li, and H. L. Treut, 2009: The Hadley and Walker circulation changes in global warming conditions described by idealized atmospheric simulations. *J. Climate*, **22**, 3993-4013.
- Gill, A. E., 1982: *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, 662 pp.
- Hegerl, G. C., and Coauthors, 2007: Understanding and attributing climate change, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. S. Solomon et al., Eds., Cambridge University Press, 663-745.
- Houghton, J. T., and Coauthors, 2001: *Climate Change 2001, The Scientific Basis*. Cambridge University Press, London, 881 pp.
- Kang, S. M., and L. M. Polvani, 2011: The interannual relationship between the latitude of the eddy-driven jet and the edge of the Hadley cell. *J. Climate*, **24**, 563-568.
- \_\_\_\_\_, and J. Lu, 2012: Expansion of the Hadley cell under global warming: winter versus summer. *J. Climate*, **25**, 8387-8393.
- Lambert, S. J., and G. J. Boer, 2001: CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. *Clim. Dynam.*, **17**, 83-106.
- 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.
- Lorenz, D. J., and E. T. DeWeaver, 2007: Tropopause height and zonal wind response to global warming in the IPCC scenario integrations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D10119, doi:10.1029/2006JD008087.
- 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.
- \_\_\_\_\_, G. Chen, and D. M. W. Frierson, 2008: Response of the zonal mean atmospheric circulation to El Niño versus global warming. *J. Climate*, **21**, 5835-5851.
- Meehl, G. A., and Coauthors, 2007: Global climate projections, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. S. Solomon et al., Eds., Cambridge University Press, 747-845.
- \_\_\_\_\_, G. A., and Coauthors, 2012: Climate system response to external forcings and climate change projections in CCSM4. *J. Climate*, **25**, 3661-3683.
- Mitas C. M., and A. Clement, 2006: Recent behavior of the Hadley cell and tropical thermodynamics in climate models and reanalysis. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L01810, doi:10.1029/2005GL024406.
- Nguyen, H., B. Timbal, A. Evans, C. Lucas, and I. Smith, 2012: The Hadley circulation in reanalysis: climatology, variability and change. *J. Climate*, doi:10.1175/JCLI-D-12-00224.1, in press.
- Oort, A. H., and J. J. Yienger, 1996: Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO. *J. Climate*, **9**, 2751-2767.
- Polvani, L. M., D. W. Waugh, G. J. P. Correa, and S.-W. Son, 2011: Stratospheric ozone depletion: the main driver of twentieth-century atmospheric circulation changes in the southern hemisphere. *J. Climate*, **24**, 795-812.
- Randall, D. A., and Coauthors, 2007: Climate models and their evaluation, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. S. Solomon et al., Eds., Cambridge University Press, 589-662.
- Santer, B. D., and Coauthors, 2003: Behavior of tropopause height and atmospheric temperature in models, reanalysis, and observations: decadal changes. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4002, doi:10.1029/2002JD002258.
- Son, S.-W., N. F. Tandon, L. M. Polvani, and D. W. Waugh, 2009: Ozone hole and Southern Hemisphere climate change. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L15705, doi:10.1029/2009GL038671.
- Vecchi, G. A., and B. J. Soden, 2007: Global warming and the weakening of the tropical circulation. *J. Climate*, **20**, 4316-4340.
- Yamaguchi, K., and A. Noda, 2006: Global warming patterns over the North Pacific: ENSO versus AO. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 225-241.