

## 대기-해양-지면-해빙 접합 대순환 모형으로 모의된 이산화탄소 배증시 한반도 농업기후지수 변화 분석

안중배<sup>1</sup> · 홍자영<sup>1\*</sup> · 심교문<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>2</sup>국립농업과학원

(2009년 11월 18일 접수; 2010년 3월 26일 수정; 2010년 3월 26일 수락)

### Agro-Climatic Indices Changes over the Korean Peninsula in CO<sub>2</sub> Doubled Climate Induced by Atmosphere-Ocean-Land-Ice Coupled General Circulation Model

Joong-Bae Ahn<sup>1</sup>, Ja-Young Hong<sup>1\*</sup> and Kyo-Moon Shim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Earth Environmental System, Pusan National Univ., Jangjeon 2-dong, Geumjeong-gu, Busan, 609-735

<sup>2</sup>National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, 441-707

(Received November 18, 2009; Revised March 26, 2010; Accepted March 26, 2010)

#### ABSTRACT

According to IPCC 4th Assessment Report, concentration of carbon dioxide has been increasing by 30% since Industrial Revolution. Most of IPCC CO<sub>2</sub> emission scenarios estimate that the concentration will reach up to double of its present level within 100-year if the current tendency continues. The global warming has resulted in the agro-climate change over the Korean Peninsula as well. Accordingly, it is necessary to understand the future agro-climate induced by the increase of greenhouse gases in terms of the agro-climatic indices in the Korean peninsula. In this study, the future climate is simulated by an atmosphere/ocean/land surface/sea ice coupled general circulation climate model, Pusan National University Coupled General Circulation Model(hereafter, PNU CGCM), and by a regional weather prediction model, Weather Research and Forecasting Model(hereafter, WRF) for the purpose of a dynamical downscaling. The changes of the vegetable period and the crop growth period, defined as the total number of days of a year exceeding daily mean temperature of 5 and 10, respectively, have been analyzed. Our results estimate that the beginning date of vegetable and crop growth periods get earlier by 3.7 and 17 days, respectively, in spring under the CO<sub>2</sub>-doubled climate. In most of the Korean peninsula, the predicted frost days in spring decrease by 10 days. Climatic production index (CPI), which closely represent the productivity of rice, tends to increase in the double CO<sub>2</sub> climate. Thus, it is suggested that the future CO<sub>2</sub> doubled climate might be favorable for crops due to the decrease of frost days in spring, and increased temperature and insolation during the heading date as we expect from the increased CPI.

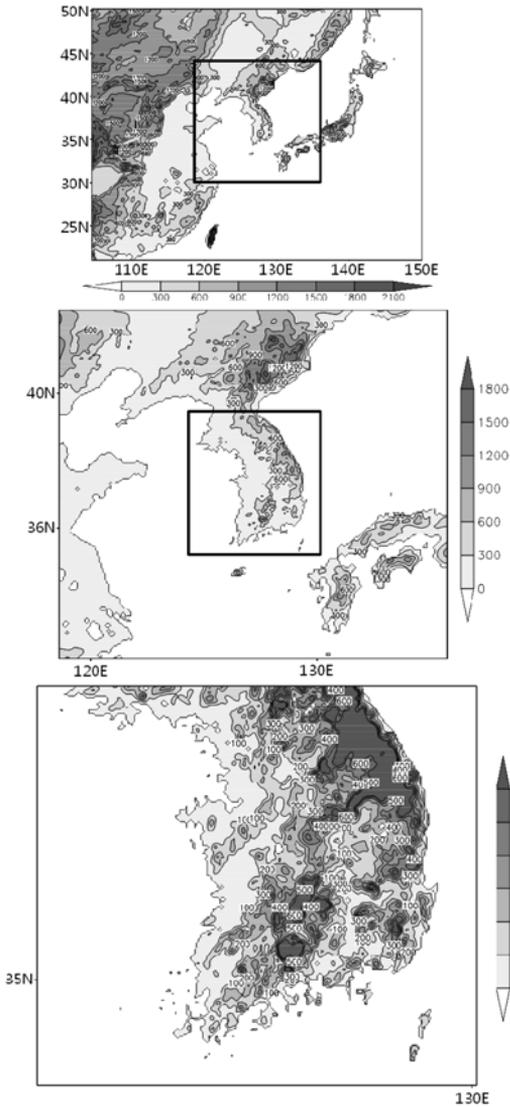
**Key words** : Climate change, Carbon dioxide, Dynamical downscaling, Vegetable period index, Frost, Climatic production index

#### I. 서 론

현재 대기 중의 CO<sub>2</sub>의 농도는 산업화 이전 시기보

다 약 100ppm(36%) 정도 전구적으로 증가되었다. 처음 50ppm은 1970년까지 200년 동안 증가한 반면, 이후 50ppm의 증가는 최근 30년 동안에 이루어졌

\* Corresponding Author : Ja-young Hong(hongja0627@pusan.ac.kr)



**Fig. 1.** WRF domain and topography (shading, unit is m) for Domain 1 (upper panel, 27km spacing), Domain 2 (middle panel, 9km spacing), and Domain 3 (lower panel, 3km spacing). Shading indicates areas where the differences are statistically significant at the 90% confidence level.

다(IPCC, 2007). IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) SRES(Special Report on Emissions Scenarios) 중 A1F1, A1B, A2 시나리오는 CO<sub>2</sub>의 농도가 이러한 추세로 계속 증가할 경우에는 100년 이내에 현재 농도의 두 배 정도가 될 것으로 추정하고 있다.

CO<sub>2</sub>와 같은 온실기체의 증가로 인해 전지구 평균 기온은 지난 100년(1906년~2005년) 동안 약 0.74°C 였고, 1960년대 이후 급격하게 온난화(전구 평균 0.55°C)가 진행되고 있는 것으로 IPCC는 추정하고 있다. 이처럼 인위적으로 증가한 CO<sub>2</sub>의 영향을 받은 기상과 기후의 변화는 농업을 포함하는 생태계에도 많은 영향을 미친다. 이에 따라 온난화에 따른 농업 기후에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

Meehl *et al.*(2004)은 전지구 접합모형을 이용하여 21세기에는 서리 일수가 감소할 것으로 예상하였으며, Bonsal *et al.*(2001)과 Heino *et al.*(1999)도 캐나다와 북유럽 지역에서도 유사한 결과가 나타남을 제시했다. 그리고 Frich *et al.*(2002)은 식물의 성장기를 일 평균 기온이 5°C 보다 큰 날로 정의하고, 식물의 성장기가 증가하고 있다고 주장하였다. Shim *et al.*(2008)은 한반도의 농업기후지수를 이용하여, 1969년부터 2006년까지의 기상청 관측 자료를 두 기간으로 나누어 분석함으로써 식물 및 작물 기간이 증가함을 보였다.

본 연구에서는 이산화탄소 배증 후 평형된 기후와 현재의 기후와의 차이를 살펴봄으로써 기후변화에 따른 한반도 농업기후의 변화를 농업기후지수를 중심으로 살펴보고자 하였다. 농업기후지수는 기후 자원을 농업 생산의 관점에서 평가할 수 있으며(Shim *et al.*, 2008), 농업기후자원의 특성을 한 눈에 알 수 있는 장점이 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 최근 기후변화 연구에 활용되고 있는 대기-해양-해빙-지면-생태계 접합 대순환 모형(Coupled General Circulation Model,

**Table 1.** The WRF physical schemes and references used in this study

Physics	Schemes	References
Microphysics	WSM6	Lin <i>et al.</i> (1983)
Longwave	RRTM	Mlawer <i>et al.</i> (1997)
Shortwave	Dudhia	Dudhia (1989)
Land Surface	Noah	Chen and Dudhia (2001)
Planetary Boundary Layer	YSU PBL	Hong and Lim (2006)
Cumulus	Kain-Fritsch	Kain (2004)

이하 CGCM)을 이용하여 CO<sub>2</sub>가 배증된 장기 평형 기후를 생산하였다. 또한 한반도와 같이 지리적으로 복잡하고 좁은 지역의 기후를 모사하기 위하여 CGCM으로 생산된 대기 기후 자료를 경계 및 초기조건으로 사용하여 역학적 규모축소법으로 3km까지 수평 해상도를 높여 CO<sub>2</sub> 배증에 따른 한반도 상세 기후를 생산하였다. 모형이 모사하는 한반도 상세 기후 예측 자료를 토대로 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 배증에 따른 농업기후지수 변화를 살펴보고자 하였다.

## II. 모형 개요 및 실험 방법

### 2.1. 모형 개요

본 연구에서는 지구를 구성하는 대기와 해양, 해빙, 지면 및 생권의 변화와 이들 간의 상호작용을 고려하는 접합대순환 모형을 이용하여 이산화탄소가 배증된 기후를 예측하였으며 그 결과를 분석함으로써 기후의 변화를 살펴보았다. 본 연구에서 사용한 접합 대순환 모형은 전지구 장기 기상예측과 엘니뇨/라니냐의 장기 예측을 위해 사용되어 예측성이 증명된 PNU CGCM(Pusan National University Coupled General Circulation Model)으로써(Jeong and Ahn, 2007) 이 모형은 전구 규모의 대기 대순환 모형 NCAR/CCM3(National Center for Atmospheric Research/Community Climate Model Version3) AGCM (Atmospheric General Circulation Model)과 전구 규모 해양 대순환 모형인 MOM3(Modular Ocean Model Version3) OGCM(Oceanic General Circulation Model), Ahn and Lee(2001)가 개발한 열역학/역학 해빙 모형으로 구성되어 있다(Jeong and Ahn, 2007; Ahn and Hwang, 2005). CCM3의 수평 해상도는 T42(위경도 간격이 약 2.8125°인 가우시안 격자)이다. 연직층 개수는 18층이며, 대기 최상층은 2.917hPa로 성층권을 포함한다. 모형에 대한 더 자세한 설명은 Park and Ahn(2004)에 제시되어 있다.

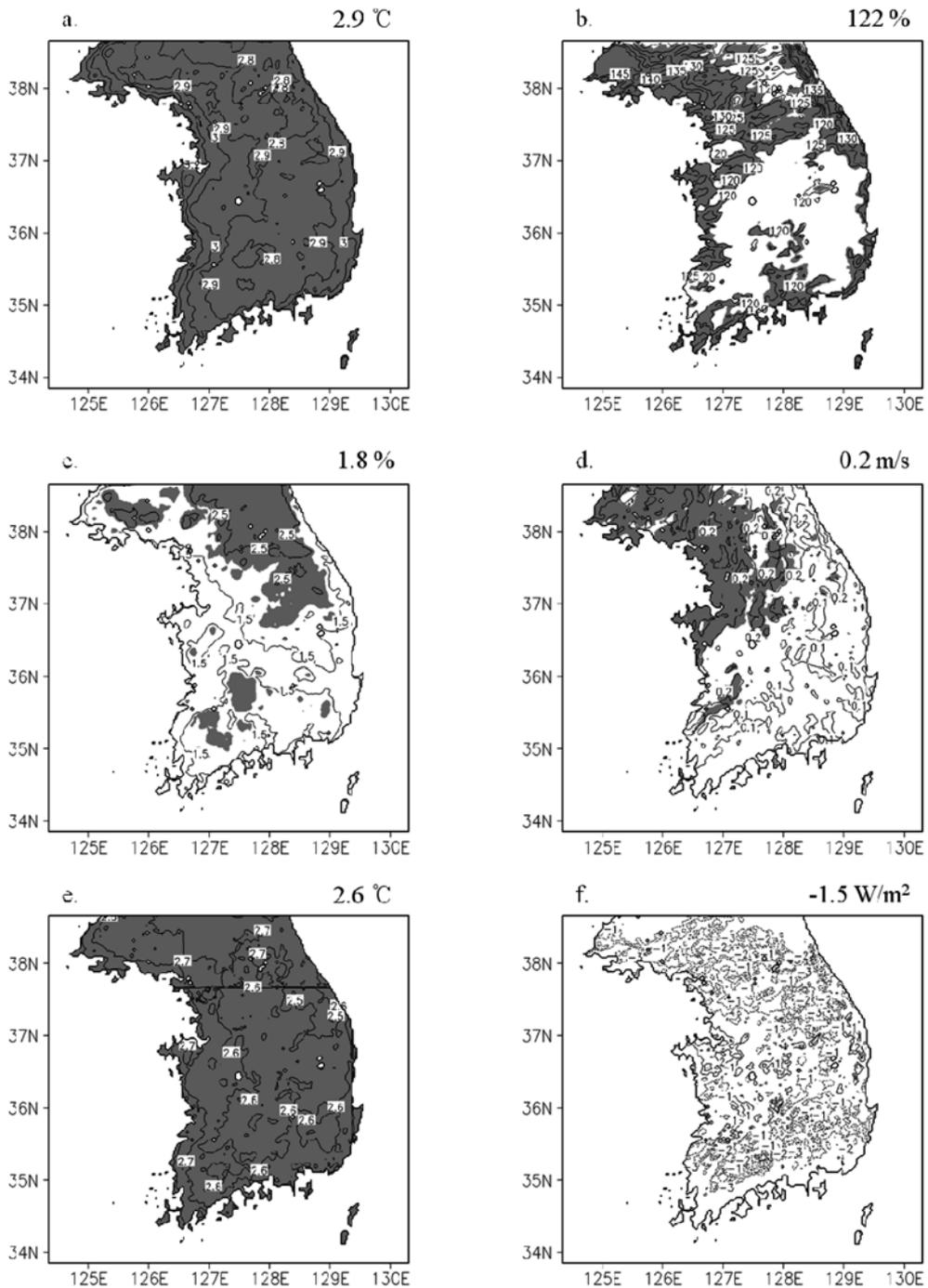
또한 전구규모의 접합대순환 모형으로부터 얻어진 결과를 바탕으로 한반도 영역(Fig. 1)에 대하여 역학적 규모축소를 실시하기 위해서는 중규모 예보 모형으로 사용되는 WRF(Weather Research and Forecasting Version3, Skamarock *et al.*, 2008)를 사용하였다. WRF는 완전 압축, 비정수계 모형이다. 연직좌표는 지형을 따르는 정수계 기압 좌표이며 Arakawa C 격자

를 사용한다. 그리고 고차 수치계를 사용하며 2차와 3차 Runge-Kutta 시간 적분법을 포함한다. 이류항에 대해서는 수평과 연직 방향 모두 2차에서 6차까지의 차분법을 도입한다. 또한 플럭스 형태의 진단 방정식을 사용하여 질량, 운동량, 엔트로피, 스칼라 양을 보존한다. 이 실험에서 사용한 물리적 방법은 Table 1에 제시하였으며, 물리적 방법은 모든 도메인에 대하여 동일하게 적용하였다. Fig. 1은 WRF의 적분 영역을 나타낸 그림으로 영역 1(D01)은 동아시아 지역이며, 영역 2(D02)는 한반도 전체를 포함한 지역이다. 그리고 영역 3(D03)은 한반도 남한 지역으로 설정하였다. 규모축소를 위한 WRF의 D01, D02, D03의 수평 격자 간격(개수)은 각각 27(189×152)km, 9(213×201)km, 3(222×222)km로써 Im *et al.*(2008(a), 2008(b))의 20km 간격의 격자보다 한층 조밀하다. 그리고 연직층 개수는 28층이고 대기 최상층은 50hPa이다.

### 2.2. 실험 방법

AGCM의 실험의 경우에는 1970년 11월부터 2005년 10월까지 36년간 관측된 월평균 해수면 온도를 경계 조건으로 두고, NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction /National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료를 초기 조건으로 두었다. 1979년부터 2005년까지 매해 9월 1일을 초기조건으로 한 달 스핀업을 하여 매해 10월 1일 초기장을 생성하였다. OGCM의 장기 스핀업 실험을 위하여 1979년부터 1997년까지 19년 평균된 각 월평균 관측 해수면 온도를 경계조건으로 AGCM을 먼저 적분하였다. 이 실험으로 생성된 AGCM 최하층에서의 대기 상태 변수를 19년간 월평균 하여 OGCM을 적분하기 위한 경계 자료를 생산하여 OGCM을 100년간 스핀업을 하였다. 그리고 AGCM과 동일한 기간에 대하여 OGCM을 적분하여 매해 10월 1일 초기장을 생성하였다. 구체적인 실험 방식은 Park and Ahn (2004)을 따랐다. CGCM의 실험은 매해 10월 1일 초기장으로 1979년부터 2005년까지 27년간 12개월씩 적분하였다. 이 때 매해 매달의 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub> 농도는 CDIAC(Carbon Dioxide Information Analysis Center)에서 제공하는 값을 처방하여 적분하였다.

이러한 방법으로 생산된 2006년 10월 1일 초기장을 두 가지의 경우로 나누어 실험하였다. 첫 번째 실험(1×CO<sub>2</sub>)은 표준실험으로써 2006년 10월에 해당하는



**Fig. 2.** Differences in climate variables ( $2\times\text{CO}_2$  minus  $1\times\text{CO}_2$ ) averaged from March to September for a. air temperature( $^{\circ}\text{C}$ ), b. precipitation(%), c. relative humidity (%), d. wind speed(m/s), e. soil temperature( $^{\circ}\text{C}$ ), and f. solar radiation( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$\text{CO}_2$  농도(376.7ppm)를 처방하고, 두 번째 실험( $2\times\text{CO}_2$ )은 배증실험으로써 두 배의  $\text{CO}_2$  농도(753.4ppm)를 처방하여 각각을 60년간 장기 적분하였다. 이 실험에

의해 산출된 1시간 간격 자료를 WRF의 초기 및 경계 자료로 사용하여 매 월 3일 전부터 매월 말일까지 적분을 시행하였다. 이 때, 지면의 수분과 온도는 접

합 모형의 결과값을 사용하였다. 집합 모형의 결과를 WRF의 경계조건과 초기조건으로 사용한 기간은 2057년부터 2061년까지 5년 동안의 3월에서 9월의 자료이다. 역학적 규모축소법을 위하여 등지화(nesting) 방법은 모든 영역에 대하여 피드백을 고려하여 좀 더 신뢰도 높은 결과를 얻기 위해 양방향 이동지격자계를 적용하였다.

### III. 결 과

#### 3.1. 기후 변수의 변화

Fig. 2는 3월에서부터 9월까지의 D03의 기상 및 토양 변수의 5년간 (2057-2061) 평균 변화를 나타냈으며, 값은  $2\times\text{CO}_2$ 와  $1\times\text{CO}_2$  차이로 나타내었다. 그리고 10% 유의 수준인 영역에 대하여 음영으로 나타내었다. 기온(Fig. 2a)의 변화를 먼저 살펴보면, 한반도 평균적으로  $2.9^\circ\text{C}$  상승을 보이며, 이 값은 IPCC AR4에서 제시된 2080~2099년 사이의 동아시아 ( $3.3^\circ\text{C}$ )에서의 평균 온난화(IPCC, 2007)와 유사하다. 지역적으로 서해안을 따라서 기온 차이가 가장 크게 나타나고 있다. 강수(Fig. 2b)는 평균적으로  $1\times\text{CO}_2$ 일 때보다 22% 정도 증가하는 것으로 보아 총 강수량은  $1\times\text{CO}_2$ 와 비슷한 양을 모사하고 있으며, 황해도 지역에 강수가 가장 많이 증가할 것으로 보인다. 상대습도(Fig. 2c)는 강원도 일대에서 가장 큰 차이를 보이며, 전체적으로 1.8% 증가한 것을 볼 수 있다. 풍속(Fig. 2d)은 큰 증감을 보이지 않으나, 우리나라 중서부 지역에서 다소 더 증가한 것을 알 수 있으며, 평균적으로  $0.2\text{m/s}$  증가를 나타낸다. 토양온도(Fig. 2e)는 지표면에서 1m 깊이까지의 온도이다. 대부분의 지역에서 고르게 상승하는 모습이며 평균값은  $2.6^\circ\text{C}$ 이다. 일사량(Fig. 2f)은 다소 감소할 것으로 예상된다. 이러한 변화의 원인 분석 위하여 D01에서의 해면기압의 변화(Fig. 3)를 제시하였다. 이 값은 Fig. 2와 동일한 기간에 대하여  $2\times\text{CO}_2$ 와  $1\times\text{CO}_2$  차이로 나타내었다. 한반도 서쪽 주변에는 해면기압의 감소가 있으며, 동쪽에서는 증가가 있을 것으로 나타난다. 이로 인해  $1\times\text{CO}_2$ 일 때보다  $2\times\text{CO}_2$ 일 때, 황해도 지역에 저기압이 발달하여 강수가 증가할 것이라는 것을 알 수 있다. 또한, 한반도 평균적으로는 해면기압의 차이가 거의 없을 것으로 보이는데, 이것으로 한반도 평균 강수량의 변화는 큰 차이가 없을 것이라는 것을 알 수 있다.

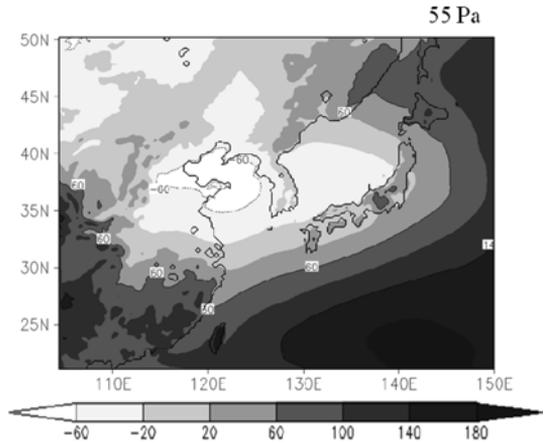


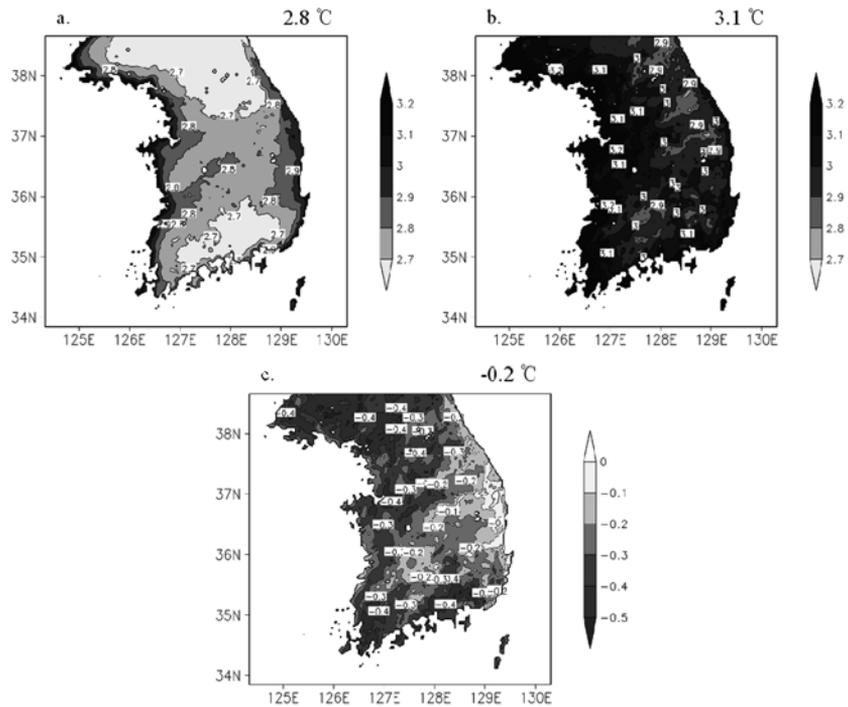
Fig. 3. Differences in sea level pressure (Pa) for Domain 1 ( $2\times\text{CO}_2$  minus  $1\times\text{CO}_2$ ) averaged from March to September.

#### 3.2. 최고기온 및 최저기온의 변화

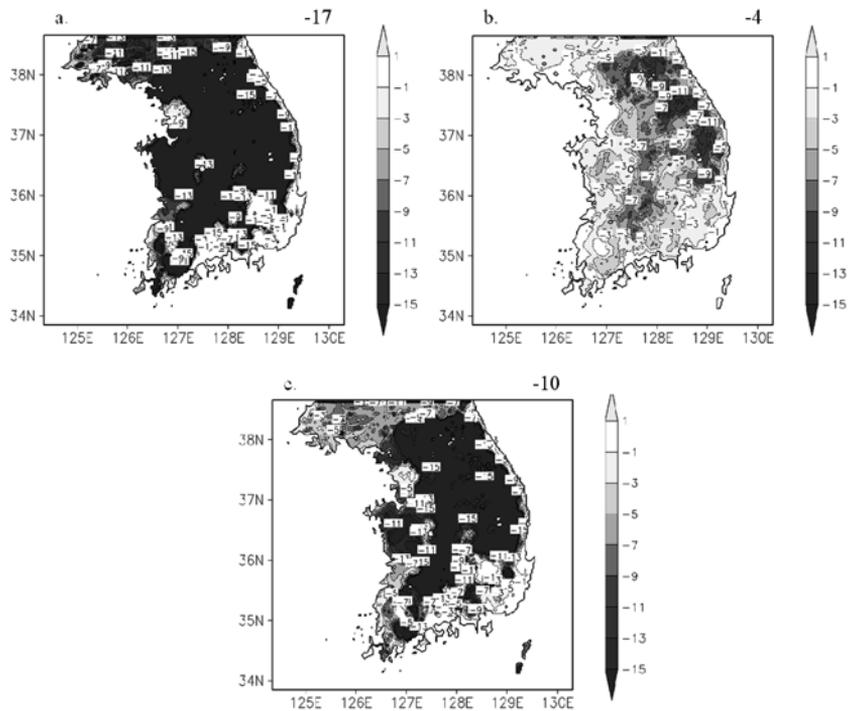
최고기온(Fig. 4a)은 동해안과 서해안에서 가장 큰 차이를 보이며 평균값은  $2.8^\circ\text{C}$ 이다. 최저기온(Fig. 4b)은 평균적으로  $3.1^\circ\text{C}$  상승한 것으로 나타나며 서해안 지역에서 가장 큰 변화를 보인다. 최고기온보다 최저기온의 상승폭이 다소 큰 것으로 나타나며 이로 인해 일교차는 약간 감소하는 것으로 모의되었다. 한반도 평균적으로 일교차(Fig. 4c)는  $0.2^\circ\text{C}$ 의 감소를 보인다.

#### 3.3. 봄철 서리의 변화

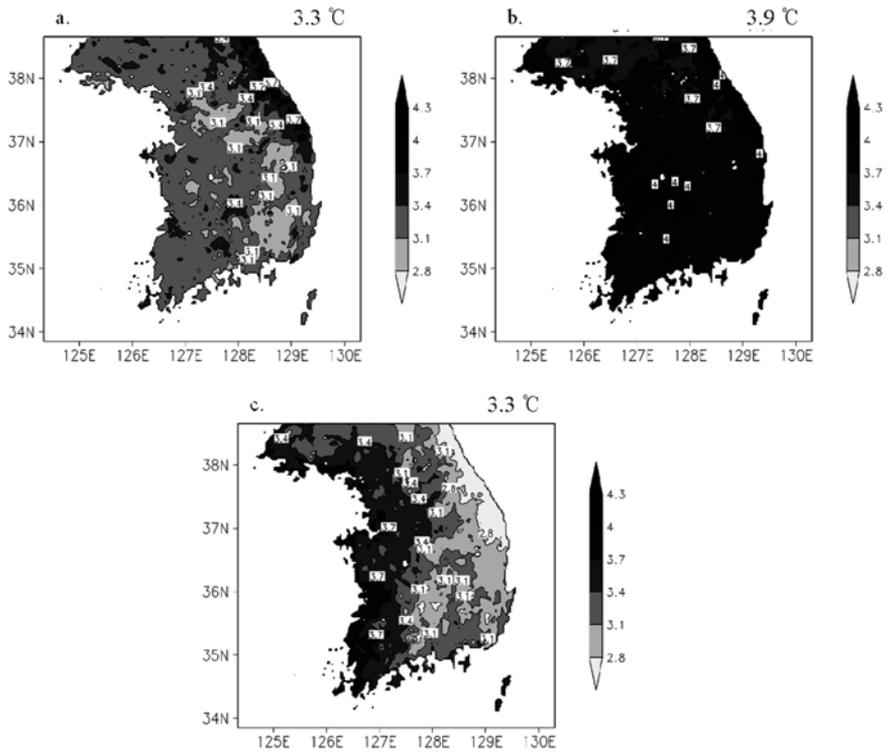
봄철 서리는 밤시간 동안의 기온이  $0^\circ\text{C}$  이하일 때 발생하는 것으로 정의하였으며(Moonen *et al.*, 2002), 3월~5월의 최저기온 자료를 이용하여 분석하였다. Fig. 5는 봄철(3월~4월) 동안의 평균 서리일수의 차이를 나타낸 것이며, Ahn *et al.*(2001)에서 제시한 방법으로 기상청 관측소와 AWS 자료를 이용하여 오차를 보정한 값이다. 오차보정은 절대적인 기준값을 이용하여 값을 구하는 농업지수에서만 적용하였다. 그리고 분석 결과 5월에는  $1\times\text{CO}_2$ 와  $2\times\text{CO}_2$  모두 서리일수가 나타나지 않았기 때문에 그림에 나타내지는 않았다. 먼저, 서리일수는 모든 지역에서 감소하였으며, 증가한 곳은 없었다. 3월(Fig. 5a)에는 한반도 대부분 지역에서 서리일수가 17일 정도 감소할 것으로 보이며, 특히 내륙 지역에서 큰 감소가 발생할 것으로 예측된다. 그리고 봄철 평균적(Fig. 4c)으로 약 10일 감소할 것으로 예상된다. Fig. 6은 봄철 최저기온의 차이를 나타낸 값



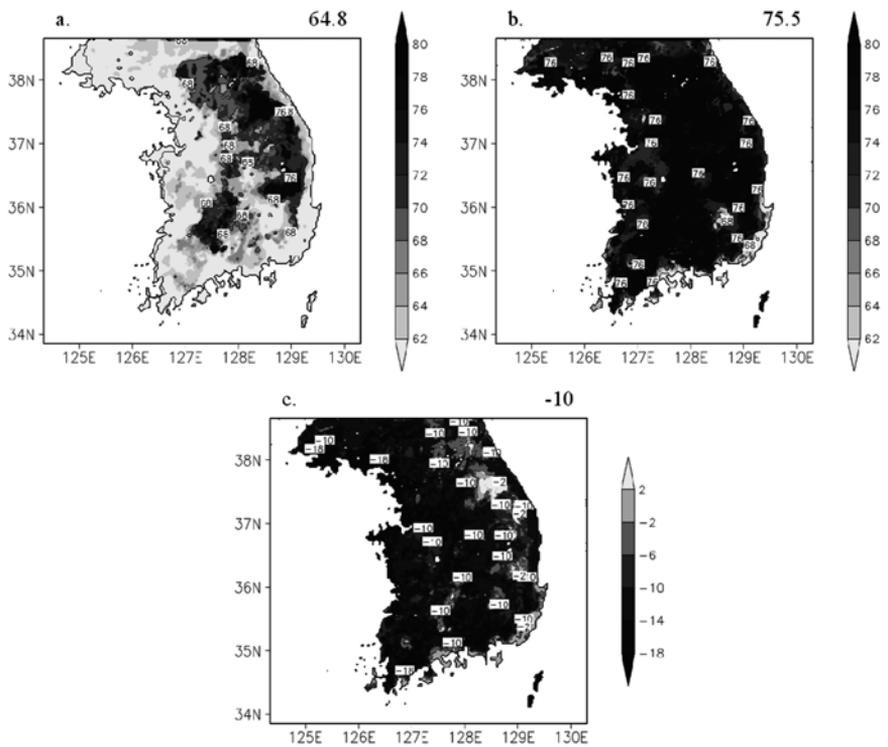
**Fig. 4.** Differences in temperature ( $2\times\text{CO}_2$  minus  $1\times\text{CO}_2$ ) averaged from March to September for a. maximum temperature( $^{\circ}\text{C}$ ), b. minimum temperature( $^{\circ}\text{C}$ ) and c. diurnal temperature range( $^{\circ}\text{C}$ ).



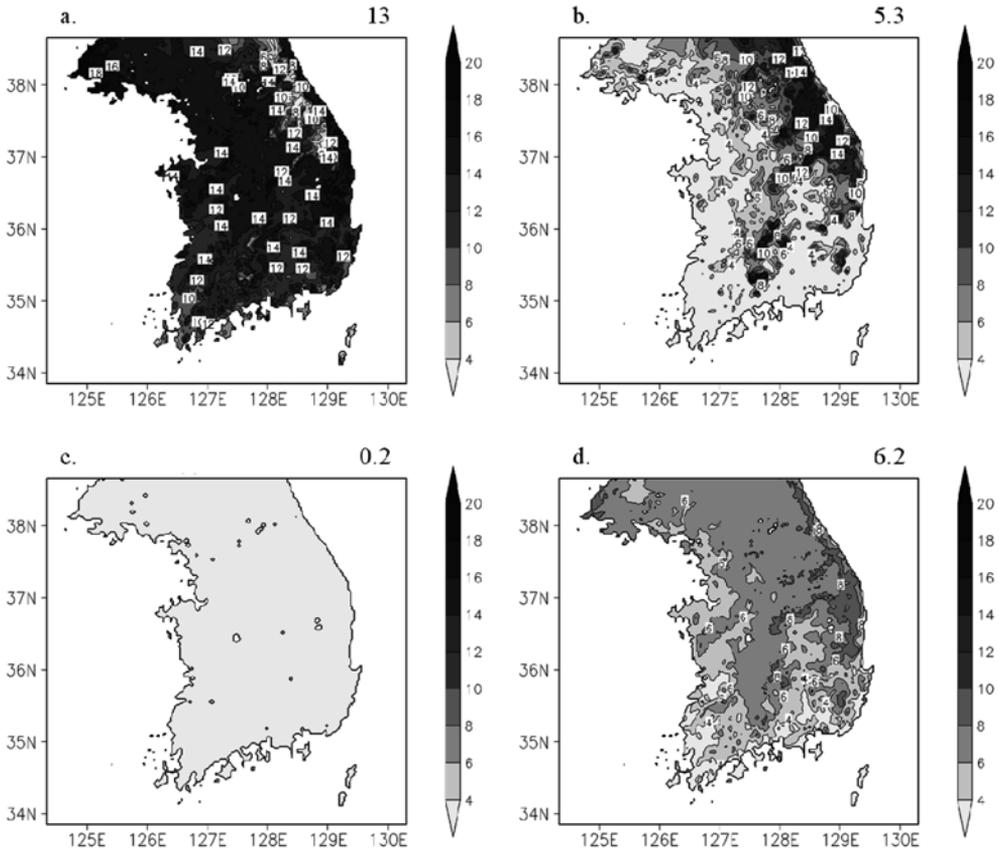
**Fig. 5.** Differences in frost days ( $2\times\text{CO}_2$  minus  $1\times\text{CO}_2$ ) for a. March(days), b. April(days) and c. averaged March to April(days).



**Fig. 6.** Differences in minimum temperature (2xCO<sub>2</sub> minus 1xCO<sub>2</sub>) in spring for a. March(°C), b. April(°C), and c. May(°C).



**Fig. 7.** Last frost date in spring for a. 2xCO<sub>2</sub> (days), b. 1xCO<sub>2</sub> (days), and c. 2xCO<sub>2</sub> minus 1xCO<sub>2</sub>.

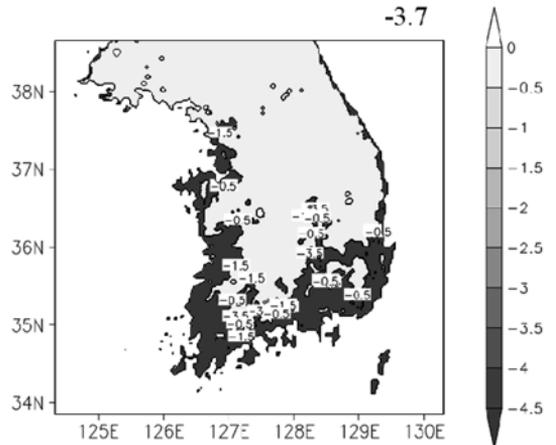


**Fig. 8.** Differences in days over 5°C, 2×CO<sub>2</sub> minus 1×CO<sub>2</sub> in spring for a. March (days), b. April (days), c. May (days), and d. spring averaged (°C).

으로 Fig. 4b와 비교해 보았을 때, 봄에 최저기온의 상승이 더 크게 발생할 것으로 예상된다. 서리일수가 감소하는 반면에 봄철 최저기온은 3°C 이상 증가할 것으로 예상된다. Fig. 7은 서리가 마지막으로 발생한 날짜를 줄리안 데이로 나타낸 것이며, 서리일수와 동일한 방법으로 관측을 이용하여 오차를 보정한 값이다. 2×CO<sub>2</sub>는 한반도 평균적으로 64.8일에 서리가 마지막으로 발생하고, 1×CO<sub>2</sub>는 75.5일에 마지막으로 서리가 발생하여 2×CO<sub>2</sub>인 경우에 약 10일 정도 빨리 서리가 종료될 것으로 보인다.

**3.4. 식물온도의 변화**

식물기간은 일 평균기온이 5°C 이상인 일수를 나타내는 지수로서 영년생 작물의 재배관리에 지표가 되는 값이다(Shim *et al.*, 2008). Fig. 8은 봄철 동안 일 평균기온이 5°C 이상 되는 일수의 차이를 나타낸 그림이다. 2×CO<sub>2</sub>일 때 봄철 평균적으로 6.2일 정도 증



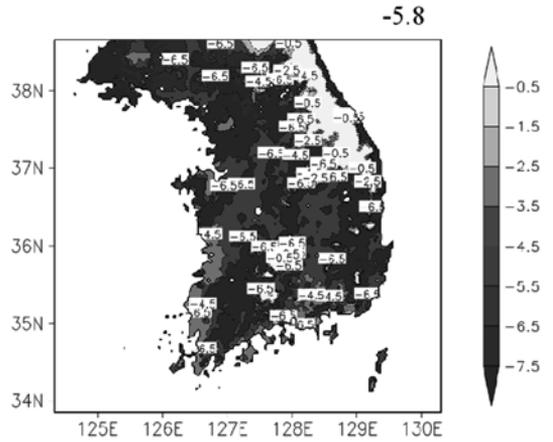
**Fig. 9.** Difference in first date of 5°C in spring, 2×CO<sub>2</sub> minus 1×CO<sub>2</sub>.

가하는 것을 알 수 있으며, 3월에 가장 큰 차이를 보인다. Fig. 9는 식물온도의 평균 출현초일의 차이를 나타낸 그림으로, 이산화탄소가 배증된 기후에서 평균

식물온도의 출현초일이 3.7일 정도 빨라지는 것을 알 수 있다. 그리고 한반도 중부지역보다 남부지역에서 출현초일이 앞당겨질 것으로 예상된다.

**3.5. 작물온도의 변화**

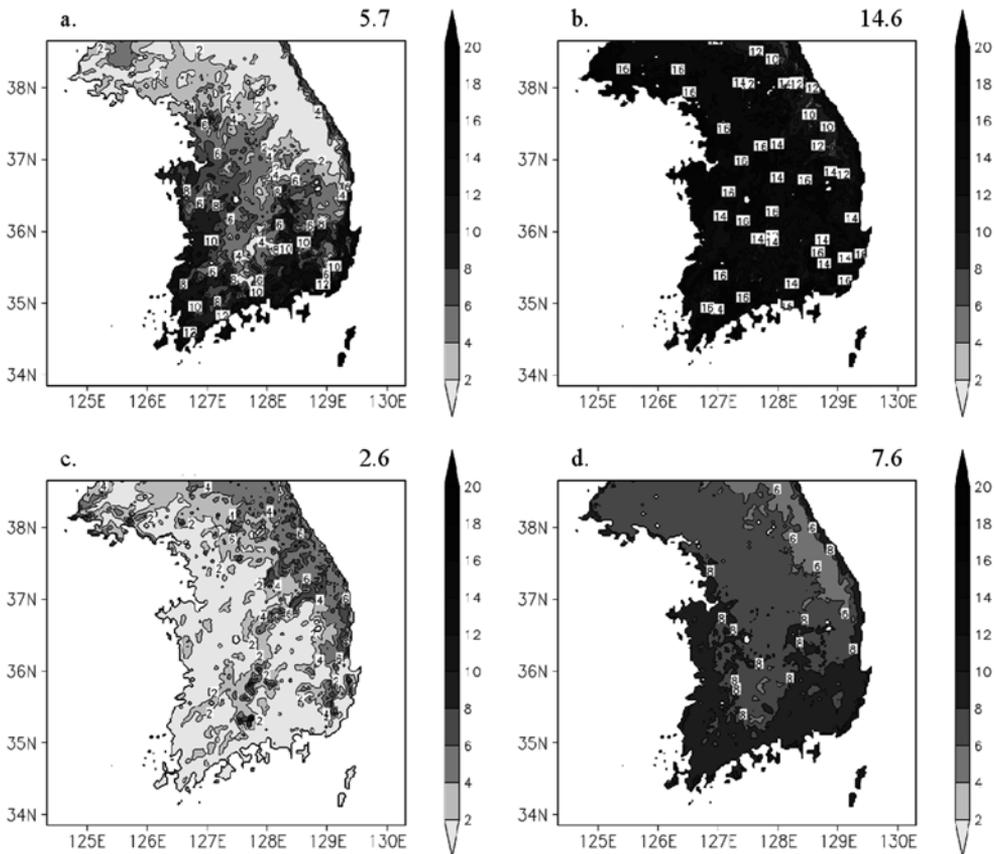
과수재배에서 중요시 되는 작물 온도는 일 평균기온이 10°C 이상일 때를 가리키며, 여름작물은 생육이 시작되고 월동작물은 발육이 진행되는 환경조건이 된다(Shim *et al.*, 2008). Fig. 10은 3월, 4월, 5월의 평균 일 평균기온이 10°C 이상인 날 수를 2×CO<sub>2</sub>와 1×CO<sub>2</sub> 차이로 나타낸 값이다. 지역적으로 남해안 지역이 동해안 지역보다 큰 증가가 있을 것으로 보이며, 한반도 평균적으로 7.6일 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 작물온도의 평균 출현초일의 차이를 나타낸 값으로 평균적으로 약 5.8일 빨라지는 것으로 예상되며, 강원도 산맥지역에서는 작물온도의 출현초일이 비슷할 것으로 예상된다.



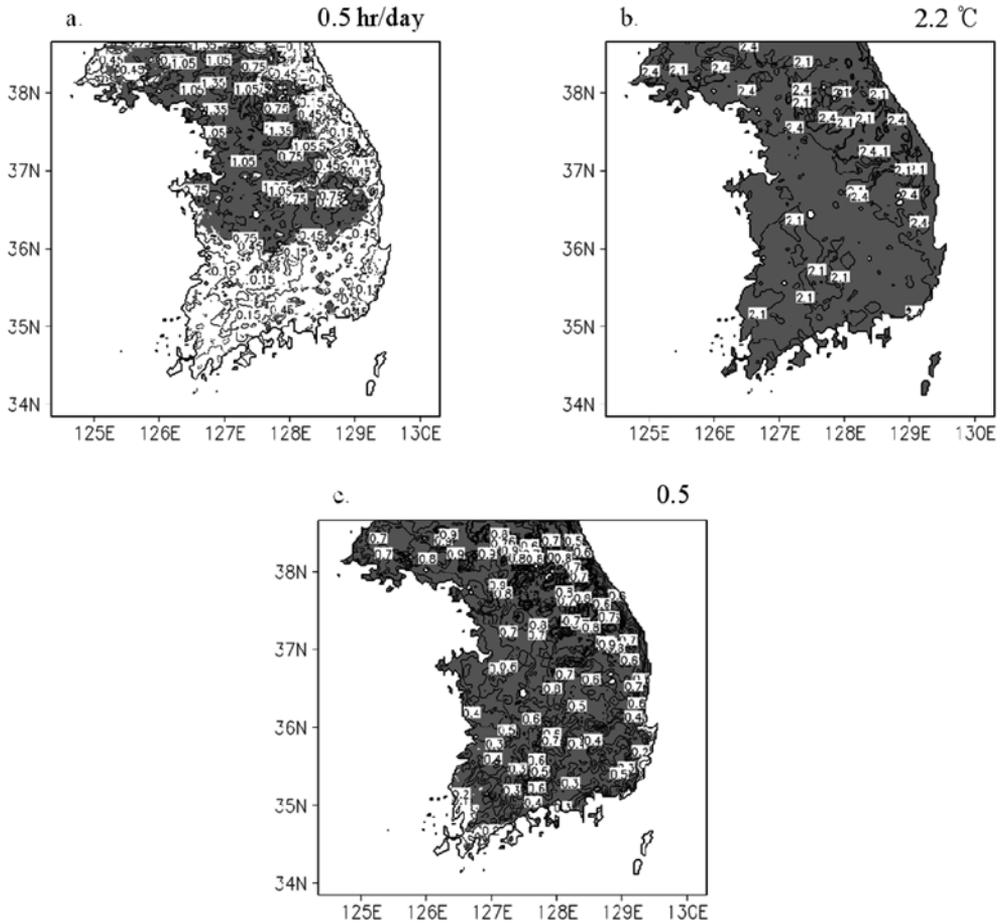
**Fig. 11.** Difference in first date of 10°C in spring, 2×CO<sub>2</sub> minus 1×CO<sub>2</sub>.

**3.6. 기후생산력 지수의 변화**

출수기부터 출수기간 40일간의 평균기온(Ta)과 일조시간(DS)으로 기후생산력지수(Climatic Production



**Fig. 10.** Differences in days over 10°C (2×CO<sub>2</sub> minus 1×CO<sub>2</sub>) in spring. a. March (days) b. April (days), and c. May (days), and d. spring averaged (°C).



**Fig. 12.** Difference in a. duration of sunshine (hr), b. temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), and c. climatic productivity index ( $2\times\text{CO}_2$  minus  $1\times\text{CO}_2$ ) for 40 days after heading date. Shading indicates areas where the differences are statistically significant at the 90% confidence level.

(Shim *et al.*, 2008).

$$\text{CPI} = \text{DS}(0.187 - 0.0034(\text{Ta} - 22.7)^2) \quad (1)$$

10% 유의 수준인 영역에 대하여 음영으로 나타내었으며, 출수 후 40일 간의 평균 일조시간(Fig. 12a)을 보면, 한반도 평균적으로 0.5 hr/40day 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 지역적으로 중북부(경기도와 강원도 내륙) 지역에서 1 hr/day 이상 증가하고 그에 비해 남해안 지역에서는 0.1 hr/40day 정도 감소하는 것으로 보인다. 평균 기온(Fig. 12b)는 한반도 평균적으로 약  $2.2^{\circ}\text{C}$  정도 증가할 것으로 보인다. 그로 인해 기후생산력지수(Fig. 12c)는 한반도 평균적으로 0.5 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이 값은 Shim *et al.* (2008)의 연구 분석에서 남해안 지역에서 약 1.0,

산간 고랭지(강원도)에서 약 0.6의 값을 가지는 것과 비교하면, 상당한 증가라고 볼 수 있다. 지역적으로 중북부 지역에서 남부지역보다 큰 증가가 발생할 것으로 예상된다.

## 적 요

본 연구에서는 지구온난화에 따른 식물기간과 작물기간 등과 관련된 농업기후지수의 변화를 살펴보기 위하여 집합 대순환 모형인 PNU CGCM에 의해 모의된  $\text{CO}_2$  배증 실험 결과를 지역기후 모형인 WRF에 two-way double nesting 방법을 이용하여 역학적 규모 축소법을 적용 후, 그 결과를 분석하였다. 분석 기간은 배증 실험 시작 후 51년부터 55년까지 5년 동안

의 3월~9월이다. 분석 결과 기온은 뚜렷하게 상승하는 모습을 볼 수 있었으며, 강수는 지역별로 차이를 보였으나 전반적으로 증가할 것으로 예상되었다. 상대습도와 토양온도도 증가하였으나 일사는 감소할 것으로 보인다. 풍속은 지역별로 큰 차이 없이 다소 상승할 것으로 모의되었다. 최저기온은 최고기온보다 상승폭이 커서 일교차는 줄어들 것으로 예상된다. 봄철 서리일수는 감소하고, 마지막 서리일은 빨라질 것으로 나타난다. 일 평균기온이 5 이상인 일수는 3월에 가장 큰 증가가 있을 것으로 보이며, 식물온도의 평균 출현초일은 한반도 평균적으로 3.7일 정도 빨라지는 것을 알 수 있었다. 그리고 한반도 북부지역보다 남부지역에서 출현초일이 앞당겨질 것으로 예상된다. 일 평균 기온이 10 이상 출현 지속 기간인 작물온도의 평균 출현초일은 평균적으로 17일 빨라질 것으로 보이며 지역적으로 분석하였을 때, 강원도 산맥지역에서는 작물온도의 출현초일에 큰 변화가 없을 것으로 예상된다. 그리고 기후생산력 지수는 출수 후 40일간의 평균 일조시간과 기온의 상승으로 인해 증가할 것으로 예상된다. 따라서 CO<sub>2</sub> 배증에 의해 변화된 한반도 기후는 식물 및 작물의 성장과 벼 성장에 좋은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 지구 온난화에 따라 예상되는 한반도 기후변화에 적합한 작부체계의 개선이 향후 필요할 것으로 생각한다. 그리고 본 연구는 하나의 시나리오를 적용한 결과이므로 보다 다양한 시나리오를 적용하여 그에 따른 농업기후지수 변화를 살펴보는 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: 200806A01036056과 200901OFT072454094)에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Ahn, J. B., C. K. Park, and E. S. Im, 2001: Reproduction of regional scale surface air temperature by estimating systematic bias of mesoscale numerical model. *Journal of the Korean Meteorological Society* **38**(1), 69-80. (in Korean with English abstract)
- Ahn, J. B., and J. A. Lee, 2001: Numerical study on the role of sea-ice using ocean general circulation model. *The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography* **6**(4), 225-233. (in Korean with English abstract)
- Ahn, J. B., and Y. J. Hwang, 2005: A study of predictability of CME/PNU CGCM for East Asia winter temperature. *Journal of the Korean Meteorological Society* **41**(6), 943-954. (in Korean with English abstract)
- Bonsal, B. R., X. Zhang, L. A. Vincent, and W. D. Hogg, 2001: Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada. *Journal of Climate* **14**(9), 1959-1976.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Monthly Weather Review* **129**(4), 569-585.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences* **46**(20), 3077-3107.
- Frich, P., L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M.G. Klein Tank, and T. Peterson, 2002: Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research* **19**, 193-212.
- Heino, R., R. Brázdil, E. Førland, H. Tuomenvirta, H. Alexandersson, M. Beniston, C. Pfister, M. Rebetez, G. Rosenhagen, S. Rösner, and J. Wibig, 1999: Progress in the study of climate extremes in northern and central Europe. *Climatic Change* **42**(1), 151-181.
- Hong, S. Y., and J. O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society* **42**(2), 129-151.
- Im, E. S., J. B. Ahn, W. T. Kwon, and F. Giorgi, 2008: Multi-decadal scenario simulation over Korea using a one-way double-nested regional climate model system. Part 2: future climate projection (2021-2050). *Climate Dynamics* **30**(2/3), 239-254.
- Im, E. S., J. B. Ahn, A. R. Remedio, and W. T. Kwon, 2008: Sensitivity of the regional climate of East/Southeast Asia to convective parameterizations in the RegCM3 modelling system. Part I: Focus on the Korean peninsula. *International Journal of Climatology* **28**(14), 1861-1877.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Jeong, H. I., and J. B. Ahn, 2007: Long-term Predictability for El Nino/La Nina using PNU/CME CGCM. *The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography* **12**(3), 170-177. (in Korean with English abstract)
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization:

- An update. *Journal of Applied Meteorology* **43**(1), 170-181.
- Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology* **22**(6), 1065-1092.
- Meehl, G. A., C. Tebaldi, and D. Nychka, 2004: Changes in frost days in simulations of twentyfirst century climate. *Climate Dynamics* **23**(5), 495-511.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **102**(D14), 16663-16682.
- Moonen, A. C., L. Ercoli, M. Mariotti, A. Masoni, 2002: Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agricultural and Forest Meteorology* **111**(1), 13-27.
- Park H. S., and J. B. Ahn, 2004: Development of a new CGCM and ENSO hindcast experiment using the CGCM(I). *Journal of the Korean Meteorological Society* **40**(2), 135-146. (in Korean with English abstract)
- Shim, K. M., G. Y. Kim, K. A. Roh, H. C. Jeong, and D. B. Lee, 2008: Evaluation of Agro-Climatic Indices under Climate Change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(4), 113-120. (in Korean with English abstract)
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF, version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 125 pp.