

## 대기질 예측을 위한 기후·대기환경 통합모델링시스템(ICAMS)의 기온 및 강수량 예측 능력 평가

### Evaluation of Temperature and Precipitation on Integrated Climate and Air Quality Modeling System(ICAMS) for Air Quality Prediction

최진영 · 김승연 · 홍성철 · 이재범\* · 송창근 · 이현주 · 이석조  
국립환경과학원 기후대기연구부 기후변화연구과  
(2012년 6월 25일 접수, 2012년 8월 23일 수정, 2012년 11월 9일 채택)

Jin-Young Choi, Seung-Yeon Kim, Sung-Chul Hong, Jae-Bum Lee\*,  
Chang-Keun Song, Hyun-Ju Lee and Suk-Jo Lee  
*Climate Change Research Division, Climate and Air Quality Research Department,  
National Institute of Environmental Research*

(Received 25 June 2012, revised 23 August 2012, accepted 9 November 2012)

#### Abstract

This study provides an evaluation for capability of Integrated Climate and Air quality Modeling System (ICAMS) on future regional scale climate projection.

Temperature and precipitation are compared between ground-level observation data and results of regional models (MM5) for the past 30 years over the Korean peninsula. The ICAMS successfully simulates the local-scale spatial/seasonal variation of the temperature and precipitation. The probability distribution of simulated daily mean and minimum temperature agree well with the observed patterns and trends, although mean temperature shows a little cold bias about 1°C compared to observations. It seems that a systematic cold bias is mostly due to an underestimation of maximum temperature. In the case of precipitation, the rainfall in winter and light rainfall are remarkably simulated well, but summer precipitation is underestimated in the heavy rainfall phenomena of exceeding 20 mm/day. The ICAMS shows a tendency to overestimate the number of washout days about 7%. Those results of this study indicate that the performance of ICAMS is reasonable regarding to air quality predication over the Korean peninsula.

**Key words** : ICAMS, Climate change, Air quality, Regional climate model, Temperature and precipitation

---

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)32-560-7312, E-mail : [gercljb@korea.kr](mailto:gercljb@korea.kr)

## 1. 서 론

최근 기후변화와 밀접한 연관성을 갖는 대기환경 변화는 전 세계적인 이슈 중에 하나이다. 기후, 식생, 지표피복 변화 등에 따른 지구적인 변화는 대기환경을 변화시켜 인간과 생태 환경에 부정적 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다(Bell *et al.*, 2007; Campbell-Lendrum and Corvalán, 2007; Knowlton *et al.*, 2004). 이로 인하여 기후변화와 연관된 대기질의 예측과 영향에 관한 많은 연구들이 수행되어지고 있다. 특히 미래 대기질의 예측과 영향 평가를 위해서는 기후와 대기환경이 통합적으로 고려된 예측 기법 및 모델들의 사용이 필수적으로 요구되어진다.

국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, NIER)과 서울대학교(Seoul National University, SNU)는 공동으로 동아시아 및 한반도 지역에 대한 대기환경 예측과 미래 전망을 연구하기 위해 기후·대기환경 통합모델링시스템(Integrated Climate and Air quality Modeling System, ICAMS/NIER-SNU)을 구축하였으며, 운영 중에 있다(NIER, 2010). ICAMS는 전 지구규모의 기후예측을 수행하는 CCSM3(Community Climate System Model version 3)과 전 지구규모 대기화학모델인 GEOS-Chem(Bey *et al.*, 2001), 지역규모 기후예측을 수행하는 MM5(Grell *et al.*, 1995),

미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서 개발한 지역규모 대기질 모델인 Model-3/CMAQ(Models-3/Community Multi-scale Air Quality, CMAQ)로 구성된다. 또한 각 모델 간 연결방안과 동아시아/한반도 규모에 초점을 맞추기 위한 전 지구규모에서 지역규모로의 역학적 상세화 기법들이 적용되어 있다(그림 1).

많은 사전 연구들에서 기온과 강수는 대기오염에 직·간접적으로 영향을 미치는 주요 요소임을 언급하고 있다. 기온 증가는 오존 생성에 직접적인 양의 피드백을 가지며(Sillman and Samson, 1995), PAN(peroxyacetyl nitrate)의 분해를 증가시켜 NO<sub>x</sub>에 의한 오존 생성을 증가시키는 간접적인 영향이 있음을 제시하고 있다(Steiner *et al.*, 2006). Camalier *et al.*(2007)은 미국 동부지역의 고농도 오존의 80% 이상이 온도와 양의 상관관계가 있음을 밝히고 있으며, Lin *et al.*(2001)은 온도 3°C 증가 시 오존 기준치를 초과할 가능성이 2배로 증가함을 제시하고 있다. 또한 기후변화로 인한 온난화로 북미 지역의 고농도 오존 발생 확률이 2020년대에 10~30%, 2050년대에 약 50% 증가할 것으로 제시하고 있다(Lin *et al.*, 2008). 강수는 구름 속에서 에어로졸의 응결핵이 되어 제거되는 효과(rainout)와 구름 밑면 이하에서 강수에 의해 직접적으로 제거(washout)되는 세정작용을 통해 대기질에 직·간접적으로 영향을 미친다. 기

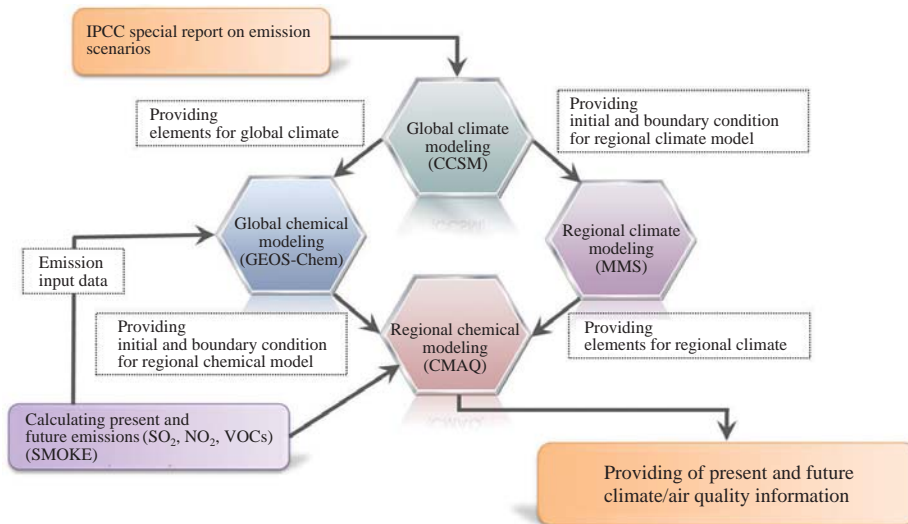


Fig. 1. Schematic diagram of ICAMS (source: NIER, 2010).

후변화로 인한 강수의 시·공간적 특성 및 발생 빈도와 강수량의 변화가 대기오염물질의 농도와 체류 시간에 영향을 미치기 때문에 대기질 예측에 있어 강수의 예측은 매우 중요한 요소이다(Liao *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2009; Giorgi and Meleux, 2007; Leung and Gustafson, 2005).

우리나라에서 관측된 기온 변화는 1900년대 대비 현재 약 1.5°C 상승하여 전 지구적인 온난화 추세를 상회하고 있다. 강수의 경우에도 최근 10년(1996~2005년)의 연평균 강수량이 1485.7mm로 평년에 비해 약 10% 증가하였으며, 강수일수는 감소하였지만 강우 강도는 증가하는 추세를 보이고 있다(KMA, 2008). 한반도 지역을 대상으로는 20세기말(1971~2000년) 대비 21세기말(2071~2100년)에 약 4°C, 강수는 약 17% 증가할 것으로 전망되고 있다(NIMR, 2008). 이처럼 현재와 미래의 기온과 강수량 변화에도 불구하고 이와 연관된 한반도 대기질의 변화에 관한 연구는 미비한 실정이며, 모델링을 이용한 대기질 예측을 위해서는, 주요 요소인 기온과 강수량에 대한 기후 모의능력에 대한 평가가 필요하다.

본 연구에서는 과거 기간에 대한 ICAMS의 기온과 강수량 모의 결과 능력을 평가하여, ICAMS의 미래 대기질 예측 결과의 활용을 위한 기반자료를 제시하는데 목적을 두고 있다. 이를 위해 ICAMS의 기온과 강수량 결과들을 관측을 처방한 모델실험 결과와 지상관측자료를 이용하여 평가하였다. 2장에서는 ICAMS의 개요 및 예측성 평가에 사용된 자료와 연구방법에 대해 기술하였고, 3장에는 예측성 평가를 위한 20세기 기후모의에 대한 예측성 평가 결과를 제시하였으며, 4장에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

## 2. ICAMS 개요 및 연구 방법

### 2.1 기후·대기환경 통합모델링시스템(ICAMS)의 개요

전 지구 규모의 기후 및 대기화학모델은 성긴 공간 분해능(100~500 km)과 물리 모수화 과정의 섬세함의 부족으로 인해 중위도 고기압 시스템의 이동과 같은 중규모 이하의 지역·도시규모 기후 및 대기질을 예측하는데 한계를 지니고 있다. 우리나라는

아시아대륙의 동쪽 가장자리에 위치하여 대륙성 기후와 해양성 기후가 공존하고, 면적이 좁기 때문에 전구 기후모델을 이용한 한반도 예측은 수평해상도의 영향으로 정확도를 현저하게 떨어뜨릴 수 있는 불확실성이 존재한다. 또한 대기질은 황사와 같은 장거리 수송에서부터, 점·선·면 오염원과 같은 매우 지역적인 규모까지 다양한 예측영역이 요구되기 때문에 동아시아와 한반도 지역에 적합한 고해상도의 입력 자료를 필요로 한다. ICAMS에서는 미래 대기질의 예측을 위해 우선적으로 장기 기후 모의(CCSM3)를 통해 전 지구 기후변화 시나리오 자료를 생산하며, 이 자료를 동아시아와 한반도 영역에 대한 상세한 자료를 생산하기 위하여 MM5를 이용한 지역 규모에 대한 기후 모의가 수행된다. 이 과정에서 다중 등지격 자기법으로 생산된 고해상도의 한반도 기후 자료를 산출할 수 있게 되며, 이 결과가 CMAQ에 적용되어 동아시아와 한반도의 상세한 대기질 예측을 생산하게 된다.

ICAMS의 CCSM3은 중·장기 적인 기후 예측을 수행하여 그 결과를 전구 대기화학모델(GEOS-Chem)과 지역규모 기후모델(MM5)의 입력 및 경계 자료로 제공한다. CCSM3은 2007년에 발표된 IPCC 4차보고서의 WG1의 미래기후 예측 시나리오를 적용하여 미래 기후변화 영향평가, 적응 및 취약성 평가의 기초자료들을 제공하는 등 국제적으로 성능이 입증된 모델이다(Collins *et al.*, 2006). Meeth *et al.* (2006)은 CCSM3를 이용한 20C 실험에서 산업혁명 이전 대비 지구 온난화 경향은 0.7°C(1980~1999)로 동일한 기간의 관측 자료에서 나타난 0.6°C(Folland *et al.*, 2001)와 매우 유사한 예측 성능을 제시하고 있다. 그 밖에도 ICAMS에 구축된 CCSM3와 동일한 해상도(대기, 지면모형 T85, 해양, 해빙모형 1°)를 갖는 8개 앙상블 실험 결과, CCSM3의 각 성분모델들 역시 과거 기후 재현 능력에 대한 예측성을 검증 받고 있다(Meehl *et al.*, 2004; Broccoli *et al.*, 2003; Stott *et al.*, 2000).

MM5는 중규모 대기 순환을 모의하기 위해 고안되었으며, 국내·외 기상관련 연구 분야에서 널리 사용되고 있다. ICAMS에서의 MM5의 역할과 유사하게, 상세한 지역 기후정보를 산출하기 위하여 전구 기후모델결과를 역학적인 규모축소(down-scaling)하거나(NIMR, 2008; Boo *et al.*, 2004; Oh *et al.*, 2004) 대

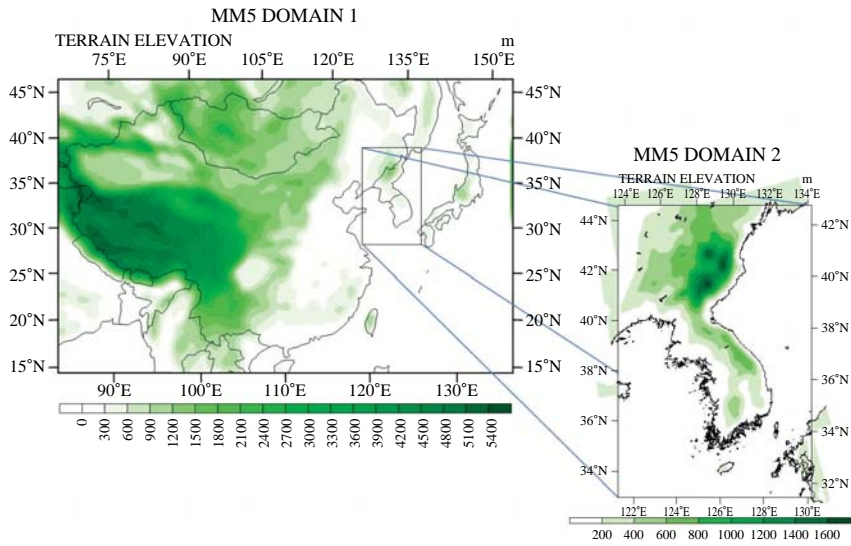


Fig. 2. Domains and topography (m) for the mother (54 km grid spacing) and nested (18 km) simulations.

기환경 예측에 필요한 기상입력 자료를 제공하는 역할로 사용되어지고 있다(Lam *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2009; Liao *et al.*, 2009; Cheng *et al.*, 2007; Gustafson and Leung, 2007; Mickley *et al.*, 2004).

본 연구의 지역규모 기후 예측은 첫 번째 영역인 수평해상도 54 km (115 × 75)인 모격자 영역 (mother domain)의 예측이 수행된다. 모격자의 초기시각 후 단방향 동지격자 방법 (1-way double nesting)으로 수평해상도 18 km (49 × 73)인 한반도 영역 (nested domain) 예측이 수행된다(그림 2). 두 영역 모두 연직으로 23개 층의 sigma level을 가지고 있으며, 대기 꼭대기는 50 hPa로 설정하였다. 모델의 중심 위·경도는 110°N, 33°E이며 모격자 영역은 360초의 적분 시간간격으로 과거 30년 (1971~2000)에 대해 월별 time slice run을 수행하였다. 동지격자 영역 또한 동일한 적분시간 간격과 기간에 대해 예측을 수행하였다.

## 2.2 실험 방법 및 자료

동아시아 및 한반도 지역에 대한 ICAMS의 기후 예측성 평가를 위하여 과거 30년(1971년~2000년)에 대한 두 가지 실험을 수행하였다. 두 실험은 지역기후를 모의하는 MM5 모델에 초기장과 경계조건을 공급

하는 방법에 따라 구분된다. 실험 1 (NMM5)은 기준 실험으로서 2.5° × 2.5° NCEP 재분석자료 (NCEP/NCAR Reanalysis data; NRA)를 이용하여 초기장과 경계조건을 처방한 실험이며, 실험 2 (CMM5)는 ICAMS의 예측성 검증을 위한 실험으로 ICAMS의 전구 기후 예측을 수행하는 CCSM3 결과를 처방한 실험이다. NRA 자료와 CCSM3 결과는 위도, 경도, 연직의 좌표 변환과 모델간의 변수 일치화 등을 수행하는 역학적 상세화 기법을 통해 MM5에 처방되었다(Choi *et al.*, 2011).

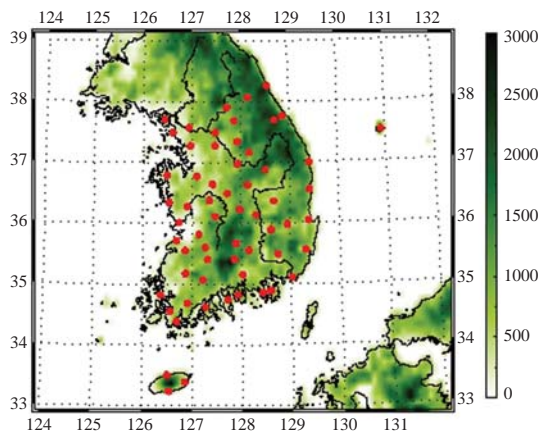
표 1은 두 실험결과 검증을 위해 사용된 관측 자료로서 공간 해상도 및 사용기간을 나타내고 있다. 기온 검증을 위해 사용된 자료는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Interim Reanalysis Data (ERA)와 NRA 자료이며, 강수량 검증을 위해 사용된 자료는 NRA와 CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation)이다. 또한 한반도 지역의 기후 검증을 위해서는 고해상도의 관측 자료를 필요로 하기 때문에, 기상청에서 제공하는 정규기상관측소의 ASOS (Automatic Synoptic Observation System) 관측 자료를 추가적으로 사용하였다. 본 연구에서 사용된 ASOS 자료는 과거 30년 동안 지속적으로 존재하는 61개 지상 관측소(그림 3) 자료만을 대상으로 하였으며 일평균, 일 최고, 일 최저기온 및 일 강수를 검증

**Table 1. Observational dataset used to compare the results of model.**

Variable	OBS data name	Spatial resolution	Period of record
Temperature	ERA-Intrim	1.25° × 1.25°	1979 ~ 2000 (22yr)
	NRA	2.5° × 2.5°	1971 ~ 2000 (30yr)
	ASOS	61 station	1973 ~ 2002 (30yr)
Precipitation	CMAP	2.5° × 2.5°	1979 ~ 2000 (22yr)
	NRA	2.5° × 2.5°	1971 ~ 2000 (30yr)
	ASOS	61 station	1973 ~ 2002 (30yr)

**Table 2. Definition of the indices based on temperature and precipitation index used in this study.**

Variable	Category	Definition
Temperature index	Tmax ≥ 23°C days	Number of days with Tmax above 23°C
	Hot days	Number of days with Tmax above 30°C
	Frost days	Number of days with Tmax below 0°C
Precipitation index	Precipitation days	Number of days with Precipitation above 1 mm/day
	Washout precipitation	Number of days with Precipitation above 10 mm/day
	Heavy precipitation	Number of days with Precipitation above 20 mm/day



**Fig. 3. The geographical location of 61 ASOS stations and topography (m) used for the assessment of the model performance over South Korea.**

자료로 사용하였다.

추가적으로, 대기질 관련하여 중요하게 고려되는 기온과 강수 관련 지표들에 대해서도 검증을 수행하였다. 표 2는 본 연구에서 수행된 지표들에 대한 정의를 나타낸 것이다. 일 최고기온 23°C 이상인 날은 고농도 오존 생성의 임계 온도(NIER, 2008)로서 선택한 지수이며, 30°C는 고온 발생일수에 대한 평가를 위한 지표이다. 0°C 이하는 대기 및 지표 생작물

의 응결과 연관되는 서리발생일수의 기준을 적용하였다. 일 강수량은 대기오염물질의 세정 작용을 판단할 수 있는 중요한 지표로서, 강수에 의한 세정효과는 1 mm 이상의 강수량과 지속시간에 영향을 받는다는 결과를 참고하여 설정하였다(Lim *et al.*, 2002). 10 mm/day와 20 mm/day 이상 일수는 ICAMS의 다강수 영역 및 강우강도 평가를 위해 설정한 지표이다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 기온

ICAMS의 기온 검증을 위하여 ERA 자료와 한반도 ASOS 자료를 이용하여 지상의 평균 기온, 최고 기온, 그리고 최저 기온에 대한 분석을 수행하였다.

그림 4에 MM5의 동아시아(Mother Domain) 지역에서의 22년간의 연평균 기온에 대하여 두 실험에서 사용된 배경장과 이를 이용한 MM5 모델링 결과를 ERA와 각각의 편차로 나타내었다. 배경장 기온의 공간적 차이는 규모 축소된 MM5의 편차 분포와 유사하게 나타났다. 중국의 서남쪽과 서북쪽 지역에서는 다소 큰 warm bias를 보였으며, 이외의 지역에서는 약한 cold bias를 보였다. 두 실험에 사용된 배경장 자료는 ERA 기온에 비해 모두 cold bias를 가지는 것



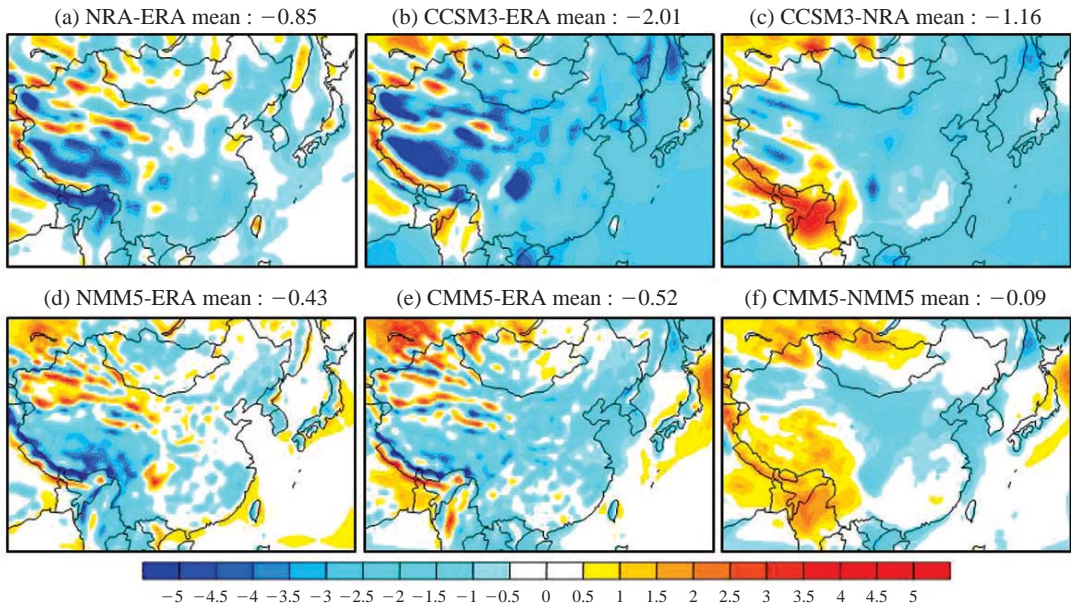


Fig. 4. (a) NRA-ERA, (b) CCSM3-ERA, (c) CCSM3-NRA, (d) NMM5-ERA, (e) CMM5-ERA and (f) CMM5-NMM5 indicate the difference of averaged 2 m surface air temperature from 1979 to 2000 (Units °C).

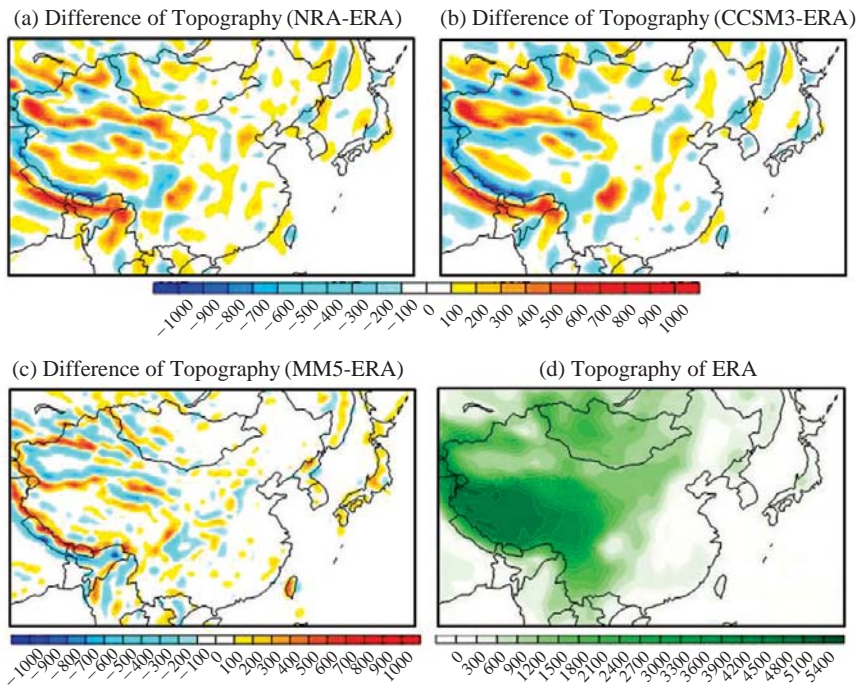


Fig. 5. (a) NRA-ERA, (b) CCSM3-ERA and (c) MM5-ERA are difference of topography. (d) is topography of ERA. Units are in meter.

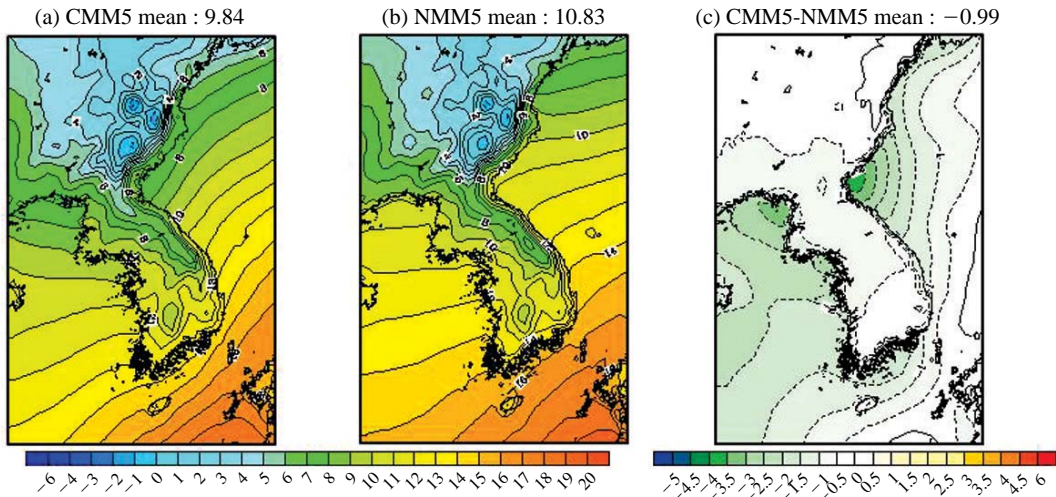


Fig. 6. Spatial distribution of 2 m surface air temperature over the Korean peninsula (nested Domain) for (a) CMM5 and (b) NMM5 for the 22-year period. Panel (c) is difference between CMM5 and NMM5 (Units °C).

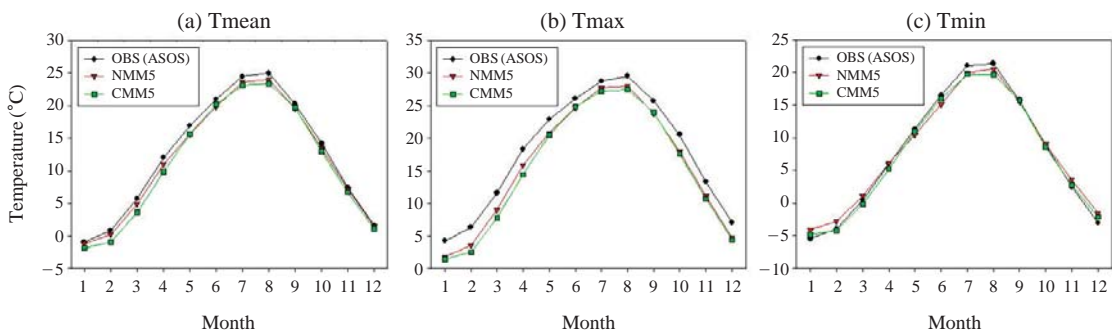
으로 나타났으며, NRA는 ERA 기온에 비해  $-0.9^{\circ}\text{C}$ , CCSM3는  $-2.0^{\circ}\text{C}$ 의 cold bias를 보였다. 두 실험과 ERA와 기온 차이를 보이는 지역은 중국 서쪽에 위치한 고지대 지역인 티베트 고원과 히말라야 산맥 지역인 것으로 나타났다. 이들 지역의 기온 차이는 두 실험에 사용된 배경장의 지형학적 고도와 ERA 지형학적 고도의 차이에 주로 기인한 것으로 나타났다. 두 배경장의 지형학적 고도가 ERA 고도보다 높은 곳에서는 cold bias를 보이며, 고도가 낮은 곳에서는 warm bias를 보이는 것으로 나타났다(그림 4, 5). 두 배경장을 사용하여 MM5를 통해 모의된 기온은 배경장의 기온보다 cold bias가 작아져 기온에 대한 모의가 향상된 것으로 나타났다. NMM5는 ERA 기온에 비해  $-0.4^{\circ}\text{C}$ , CMM5는  $-0.5^{\circ}\text{C}$ 의 cold bias를 보였으며, CCSM3와 NRA 배경장을 이용하여 역학적 규모 축소된 NMM5 실험과 CMM5 실험의 기온 차이는  $-0.1^{\circ}\text{C}$ 로서 두 배경장(CCSM3와 NRA 배경장)의 차이( $-1.1^{\circ}\text{C}$ )보다 크게 감소한 것으로 나타났다. 이러한 기온 편차의 감소는 MM5로 규모 축소됨에 따라 MM5의 지형이 배경장의 지형보다 상세화됨에 따른 것으로 분석되었다. 규모 축소된 MM5 기온의 공간 분포는 사용된 배경장에 의해 크게 좌우되는 것으로 분석되었으며 기온의 크기는 지형학적 고도에 좌우되는 것으로 나타났다.

그림 6은 한반도 영역(Nested Domain)에서의 22년 간의 기준 실험과 CMM5 실험에 대한 연평균 기온에 대한 공간적 분포를 나타낸 것이다. CMM5 실험의 기온의 공간적 분포는 기준 실험의 공간적 분포와 매우 유사하게 나타났다. 또한 성긴 분해능으로 인해 모격자에서 모의되지 않는 백두산과 태백산맥 등 고지대에서 나타나는 저온을 잘 모사하였으며 기준 실험과 CMM5 실험간 평균 기온의 차이는 약  $-1.0^{\circ}\text{C}$ 로서 CMM5 실험은 기준 실험에 비해 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 CMM5 실험은 기준 실험에 비해 해수온도(SST)에서 cold bias가 나타나는 모습을 보였다. 이는 CCSM3 배경장으로부터 처방된 해수면 온도가 NRA의 해수면 온도에 비해 낮음에 기인하는 것으로 분석되었다. 대기질 예측에 있어, 대기오염물질의 배출원이 주로 내륙지역에 존재하는 것을 감안하면, CMM5 실험 결과의 기온 모의는 대기질 예측에 사용함에 있어 유의한 수준으로 판단된다.

남한지역에 대한 기온 예측능력을 보다 정량적으로 평가하기 위하여 30년 동안의 ASOS 자료와 비교 검증한 결과를 표 3에 나타내었다. 연평균 기온은 CMM5의 경우  $11.1^{\circ}\text{C}$ 로서 관측( $12.4^{\circ}\text{C}$ )과 NMM5( $11.6^{\circ}\text{C}$ )보다 과소 모의하였으나, 기온의 차이는 크지 않았다. 일 최고기온은  $15.2^{\circ}\text{C}$ 으로, 관측( $17.9^{\circ}\text{C}$ )보다 낮게 모의되어, 다소 차이를 보였으나 NMM5

**Table 3. Annual and seasonal temperature for the simulated results and ASOS observation data of the surface air temperature on Tmean, Tmax and Tmin from 1971 to 2000 (Units °C).**

		Annual	MAM	JJA	SON	DJF
Tmean	OBS	12.4	11.6	23.5	14.0	0.5
	NMM5	11.6(-0.8)	10.5(-1.1)	22.5(-1.0)	13.4(-0.6)	0.1(-0.4)
	CMM5	11.1(-1.3)	9.7(-1.9)	22.3(-1.2)	13.1(-0.9)	-0.5(-1.0)
Tmax	OBS	17.9	17.6	28.1	19.9	5.9
	NMM5	15.8(-2.1)	15.3(-2.3)	26.8(-1.3)	17.7(-2.2)	3.4(-2.5)
	CMM5	15.2(-2.7)	14.2(-3.4)	26.5(-1.6)	17.4(-2.5)	2.8(-3.1)
Tmin	OBS	7.6	5.9	19.6	9.0	-4.2
	NMM5	7.7(+0.1)	5.9(0.0)	18.5(-1.1)	9.4(+0.4)	-2.8(+1.4)
	CMM5	7.3(-0.3)	5.4(-0.5)	18.5(-1.1)	9.0(0.0)	-3.7(+0.5)

**Fig. 7. Annual cycle of monthly-average surface air temperature (°C) in South Korea from 1971 to 2000. (a), (b) and (c) is mean, maximum and minimum value, respectively.**

(15.8°C) 실험과는 큰 차이를 나타내지 않았다. 일 최저기온은 7.3°C로, 관측(7.6°C)과 NMM5(7.7°C)와 유사한 결과를 보였다. 계절별로는 평균기온과 최고기온의 경우 관측에 비해 모두 과소 모의하고 있으나 그 차이는 크지 않았다. 최고기온의 cold bias는 봄철이 가장 크고, 여름철에 가장 작게 나타났다. 그림 7은 30년 기간에 대한 평균, 최고 그리고 최저 기온의 연 변동을 나타낸 것이다. NMM5와 CMM5 실험 모두 연 변화 특성이 관측과 유사하게 모의하고 있으며, 두 실험은 서로 매우 유사한 기온 분포를 보이고 있다. 그러나 최고온도에서는 모든 월에 대해 관측에 비해 과소 모의하는 경향이 나타났다. MM5 실험에서 예측된 기온의 cold bias는 주로 고온의 과소 모의에 기인하는 것으로 나타났다. NMM5 실험과 CMM5 실험의 기온 모의의 유사성을 고려하면, 이는 입력 자료의 영향 보다는 MM5의 고온 모의의 대한 과소모의 경향에 의한 것으로 판단된다.

30년 추세분석 결과를 살펴본 결과, CMM5의 평균기온 상승률(0.20°C/10yr)은 관측 및 기준 실험의 상승률(0.26°C/10yr)과 유사하게 나타났으며, 최저기온에 대해서도 CMM5는 0.26°C/10yr의 증가율을 보여 관측(0.25°C/10yr)과 유사하였다. 그러나 최고기온의 경우 관측 자료의 증가율은 0.33°C/10yr, 기준 실험은 0.35°C/10yr 이었으며, CMM5 실험은 이보다 낮은 증가율을 보였다(0.15°C/10yr). 관측에 비해 NMM5와 CMM5 모두 최고기온의 과소모의가 존재하지만, NMM5가 관측이 반영된 배경장을 사용함에 따라 연 변화경향에서는 CMM5보다 관측과 유사한 결과를 보인 것으로 판단된다.

특정 온도의 발생빈도는 오존을 포함한 대기오염 물질의 생성 및 소멸 조건이 영향을 줄 수 있기 때문에, 특정 기온별 빈도 변화를 확률밀도 함수 분포를 통해 살펴보았다(그림 8). 평균기온의 경우 관측 및 기준 실험의 결과와 비교해 CMM5는 23°C 부근



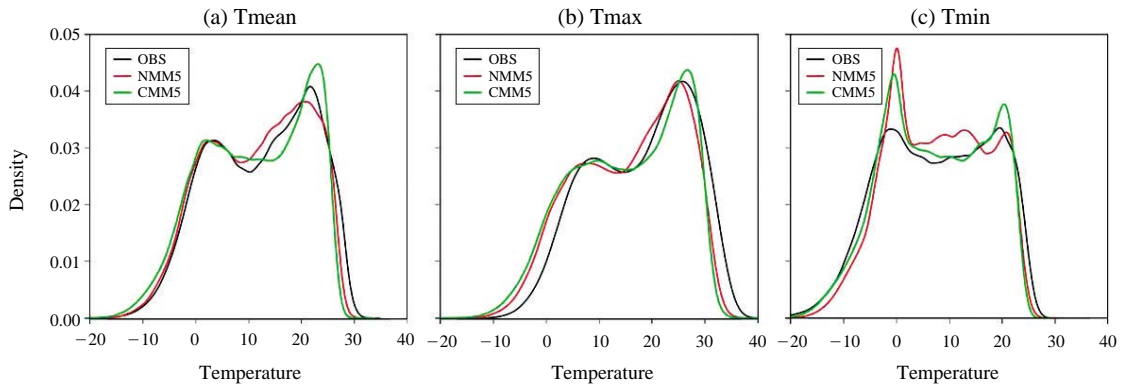


Fig. 8. Probability density function of frequency distribution for the daily (a) mean, (b) maximum, and (c) minimum temperature (°C) from 1971 to 2000.

의 확률이 높게 나타났으며, 25°C 이상에서는 과소모의, 0°C 이하에서는 과대모의 하였다. 최고기온은 두 모델 결과 모두 관측의 확률밀도함수와 비교하여 왼쪽으로 치우쳐져 cold bias를 보였으며, 특히 CMM5는 29°C 이상에서는 과소모의 경향, 6.5°C 이하에서는 과대모의 경향을 보였다. 최저기온의 경우, 두 모델 결과는 0°C 부근에서 관측보다 높은 확률을 보였으나, 전체적으로 관측과 유사한 분포를 나타내었다. 특히 CMM5는 0°C와 20°C 부근에서 관측보다 확률이 높게 나타났으며, 22°C 이상에서는 과소모의 하였다.

### 3. 2 강수

ICAMS의 강수 모의능력을 살펴보기 위하여 CMAP 자료와 한반도 ASOS 자료를 이용하여 분석을 수행하였다. 한반도지역에 대한 강수모의 능력을 검증하기 앞서, 여름철과 겨울철에 대하여 관측 자료(CMAP)와 두 실험에 사용한 배경장과 이를 이용한 MM5 모델링 결과(동아시아 영역)를 그림 9와 10에 나타내었다. 22년(1979~2000년) 기간에 대한 CMAP의 동아시아지역 여름철 강수량 공간분포를 살펴보면(그림 9(a)) 중국 남부지역에서부터 일본까지 강수대가 동서로 위치하고 있으며 위도가 증가할수록 강수량이 작아지는 분포를 보였다. 또한 한반도 근해에서 남북으로 강한 강수대가 분포하며, 히말라야산맥 남쪽의 수렴역에서 강한 강수대를 확인할 수 있다. 배경장인 NRA(그림 9(b))와 CCSM3(그림 9(c))에서

도 전반적인 강수 분포는 CMAP의 강수 공간분포와 유사하게 나타났다. 그러나 NRA의 경우 중국 화남지역과 북만주 지역에서 관측에 비해 강한 강수를 보이고 있으며, 한반도 근해의 강수대가 약하게 나타나고 있다. CCSM3의 경우에는 해양과 중국 남부 내륙지역에서 강수량이 관측에 비해 과소모의 되는 경향이 나타났다. CMAP에 나타난 동아시아지역 평균 여름철 강수량(156.6 mm)에 비해 NRA는 약 8 mm의 wet bias를 보이는 반면, CCSM3은 약 26 mm의 dry bias가 나타났다. 대부분의 지구 모델들은 한반도와 일본을 포함하는 동아시아에서의 강수량을 과소 모의하는 경향을 보이며, 특히 여름몬순의 강도와 계절성은 모델마다 모의성능에 큰 차이가 나타난다는 결과가 선행연구들에서 제시되고 있다(Shin *et al.*, 2010; Kripalani *et al.*, 2006). CCSM3에서도 선행연구와 같이 과소모의경향이 나타나고 있으나, 그 크기는 유의할만한 수준으로 판단된다.

동아시아 영역(그림 9(d, e))의 전반적인 강수 분포도 각 실험에 처방된 배경장의 분포와 유사한 특성을 유지하고 있으나 강수량은 감소하는 경향을 보이고 있다. 티벳고원의 남쪽을 포함한 배경장의 다우지역은 모격자 결과에서 보다 강화되는 특성이 나타났지만, 내륙 평야지역과 해양에서는 배경장보다 감소하는 분포가 뚜렷하게 나타났다. NMM5 실험과 CMM5 두 실험결과에서 동일하게 여름철 강수의 과소모의가 나타난 것을 고려하면, 여름철의 강수의 과소모의는 MM5 자체의 과소모의 경향에 따른 것으

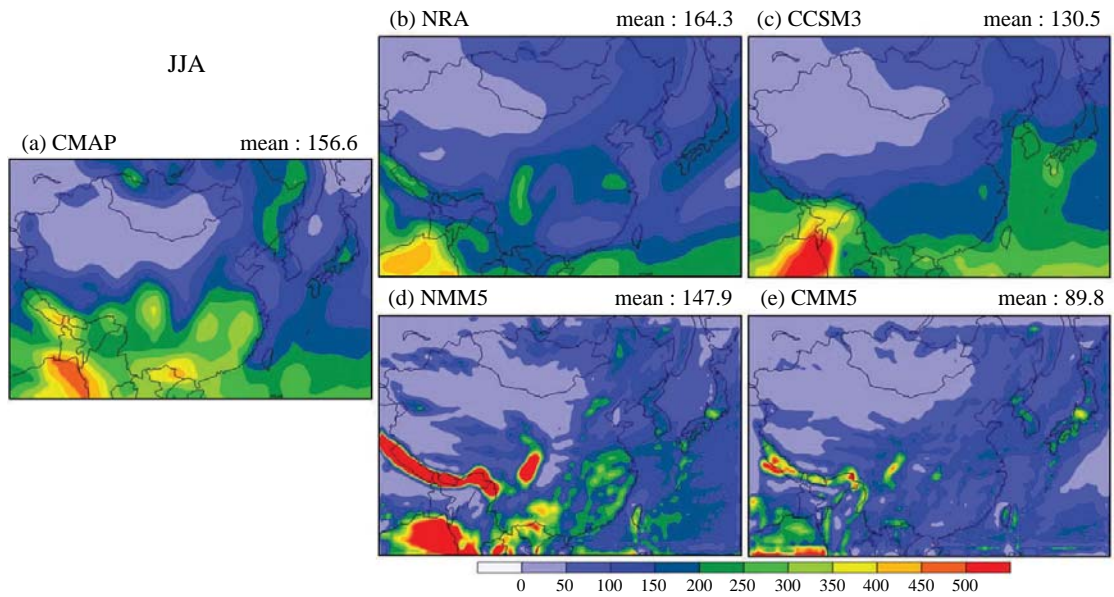


Fig. 9. (a) CMAP, (b) NRA, (c) CCSM3, (d) NMM5 and (e) CMM5 indicate spatial distribution of simulated results and observation in summer (JJA) for precipitation amount (mm/month) over East Asia (mother domain) from 1979 to 2000.

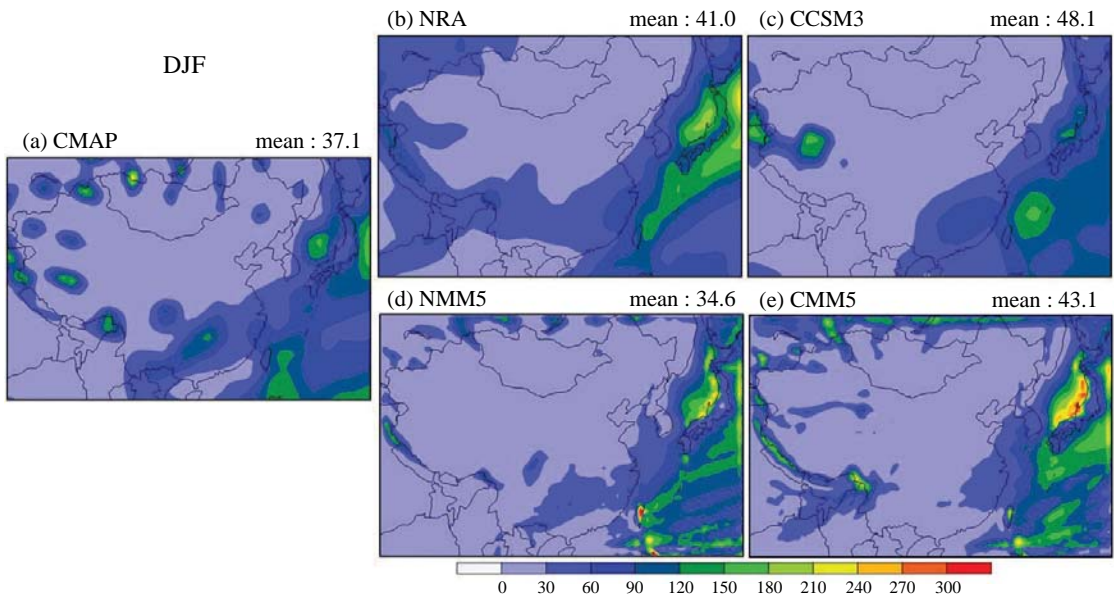


Fig. 10. Same as Fig. 9, except for DJF.

로 보인다. 또한 배경장 영향으로 CMM5에서 과소 모의 경향이 커지는 것을 확인할 수 있었다.

겨울철 동아시아지역의 전형적인 강수 분포는 내

륙지역은 시베리아 고기압의 영향권에 놓이고 동쪽으로는 알류산 저기압의 영향을 받기 때문에 강수대 역시 내륙 고기압의 가장자리에서부터 저기압이 위

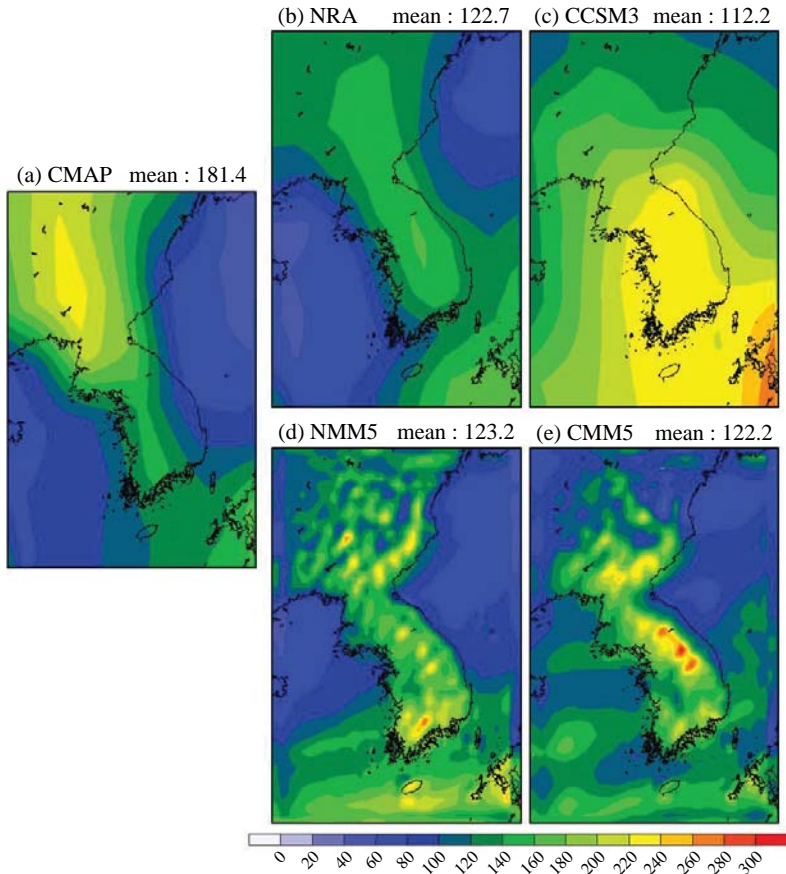


Fig. 11. Same as Fig. 9, except for nested domain.

치한 해양지역에 강수대가 위치한다(그림 10(a)). NRA와 CCSM3의 강수 모의는 여름철과 다르게 관측과 같이 강수대 위치와 양도 적절하게 모의하고 있음을 확인할 수 있었다. 동아시아 평균 강수량은 NRA와 CCSM3 모두 약 10 mm 내외의 wet bias를 보이고 있으나 유의할만한 수준이다. Mother Domain에서도 관측 자료에서 나타난 겨울철 강수 분포와 양을 잘 모의하고 있음을 확인할 수 있었으나 배경장에서 나타나는 강수대가 보다 강화되는 특징이 나타났다.

그림 11과 12는 한반도영역의 22년 기간의 여름철 및 겨울철 평균 강수량 분포를 나타낸 것이다. 약 250 km의 저해상도 관측(CMAP)자료와 18 km 고해상도 MM5 결과와의 비교는 절대적인 강수량 비교에 한계가 있으나 전체적인 공간 패턴은 살펴볼 수

있다. 동아시아 영역(mother domain) 결과와 배경장에서 확인하기 어려운 한반도지역의 강수 분포가 고해상도로 모의되는 과정에서 지형적으로 상세화 된 분포를 산출하고 있으며, 산악지역과 관련된 강수대의 분포가 잘 모의되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 동아시아 영역(mother domain)에서 나타나던 관측과 배경장에 대한 dry bias가 한반도영역에서는 나타나지 않았다. ICAMS의 한반도 영역의 강수 모의는 여름철과 겨울철 모두에서 동아시아영역보다 분포와 양적인 측면 모두 유의할만한 결과를 제시하고 있음을 확인할 수 있다.

정량적인 강수 비교를 위해 남한지역에 대한 ASOS 자료를 이용하여 강수 예측능력을 살펴보았다. 그림 13은 30년 기간의 ASOS 자료와 동일한 지점을 추출하여 NMM5와 CMM5에 대해 연 강수량

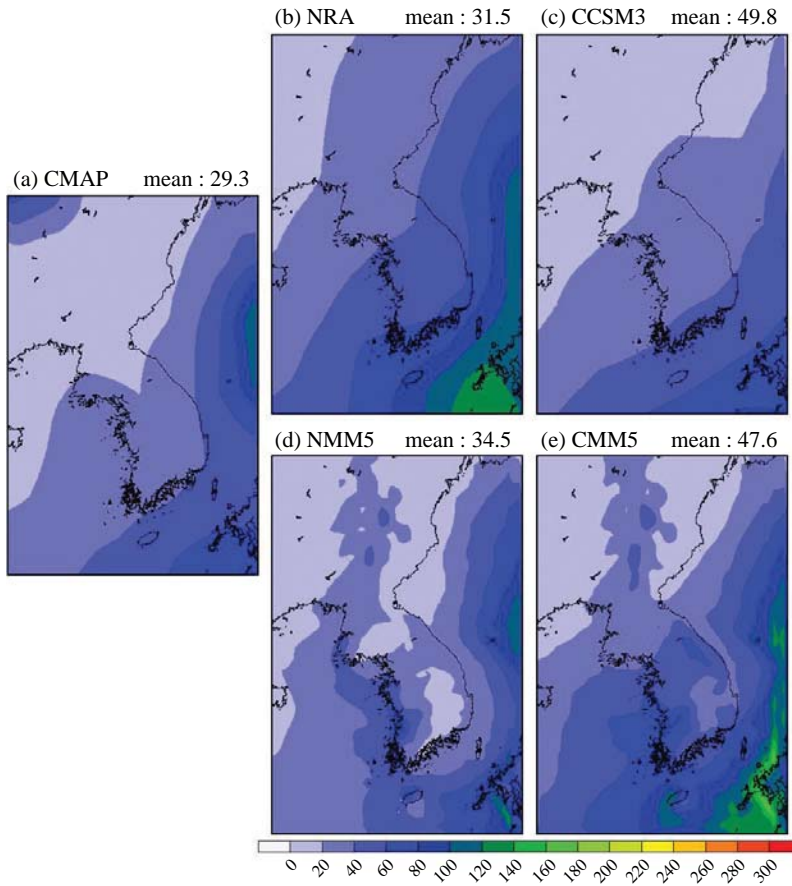


Fig. 12. Same as Fig. 9, except for DJF and nested domain.

을 공간분포로 나타낸 것이다. ASOS에서는 중부 및 강원 영서지역, 남부지역의 다 강수와 경상북도의 적은 강수가 분포하는 패턴을 보였다. NMM5에서는 중부 지역을 포함하여 전체적인 강수 분포와 양이 관측과 큰 차이를 보이고 있다. CMM5 실험에서는 충청도지역의 과소모의와 강원 영서지역의 최다지역의 위치에서 편차가 나타나지만 전반적으로 NMM5 보다 양적인 측면과 공간적으로 ASOS 관측 자료와 비슷한 분포를 보인다. 또한, 그림 11과 12에서 확인되었던 산맥 풍상측의 다 강수 지역의 분포 및 지형적으로 세밀화 된 강수 분포가 ASOS와 비교에서도 그 분포와 양을 잘 모의하고 있음을 확인할 수 있다. 관측에서 측정된 남한지역 연 평균 강수량은 1,309 mm로 NMM5 실험(984 mm)에 비해 CMM5는 1,213 mm로 보다 좋은 결과를 보였다(표 4). 모델-관측 간

편차를 계절별로 살펴보면, CMM5는 여름과 가을은 과소모의 하고 있었으며, 특히 여름철은 관측에 비해 NMM5와 CMM5 모두 약 200 mm 차이를 보였다. 이에 반해 봄과 겨울은 과대모의의 경향이 나타났다. NMM5와 CMM5의 여름철 일 강수량이 20 mm 이상인 날의 누적 강수량을 살펴본 결과, 관측과 각각 -248.5 mm, -255.5 mm 차이가 나타나 여름철 강수량의 dry bias는 일 강수 20 mm 이상의 다 강수 영역에서 기인하는 것으로 나타났다. 20 mm 미만인 날의 강수량은 각각 63 mm, 49 mm의 차이를 보여 관측(136.9 mm)보다 과대모의의 하고 있었다.

관측에서는 강수의 최대일은 7월과 8월인 것에 반해, CMM5 결과는 6월과 7월에 극대가 나타나는 차이를 보였다(그림 14). 그러나 여름철의 강수 최대기를 제외하면, 계절 및 월별 변동성은 관측과 유사한



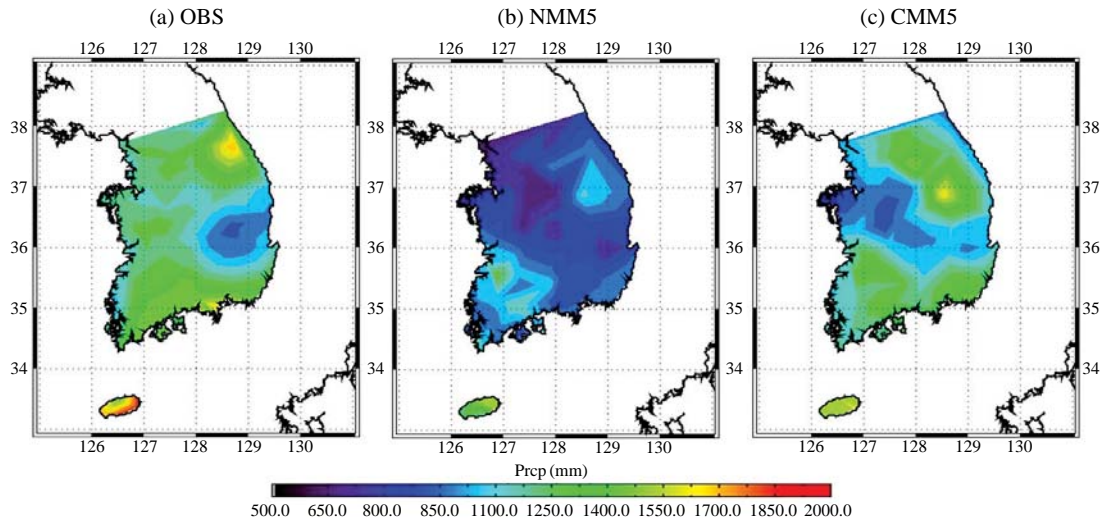


Fig. 13. Spatial distributions of annual total precipitation over South Korea during 30 years. (a) OBS shows the results of ASOS from 1973 to 2002. (b) NMM5 and (c) CMM5 are the results of model simulation from 1971 to 2000.

Table 4. Annual and seasonal mean value of ASOS observation and simulated results for the precipitation amount from 1971 to 2000. ( ) indicates the difference between observation and simulated results. Units are in millimeter.

Precipitation	Annual	DJF	MAM	JJA	SON
OBS	1,308.9	101.6	255.9	694.7	256.7
NMM5	983.8	114.4	170.5	512.7	186.2
	(-325.1)	(+12.8)	(-85.4)	(-182.0)	(-70.5)
CMM5	1,212.7	155.8	358.5	491.5	206.9
	(-96.2)	(+54.2)	(+102.6)	(-203.2)	(-49.8)

패턴을 보였다. 30년 추세를 조사한 결과, NMM5의 증가율이 10년당 31 mm로 관측(56 mm/10yr)에 비해 매우 낮은 반면, CMM5의 증가율은 63 mm/10yr로 관측과 유사한 증가율을 보였다. 양적인 관점과 증가율을 고려할 경우, 미래 전망에 적용할 CMM5의 강수량 모의 결과는 대기질 예측에 필요한 강수량 자료를 제공함에 있어 유의할 만한 수준인 것으로 판단된다.

그림 15는 월 강수 및 여름과 겨울철의 일 강수량을 확률밀도함수로 나타내었다. 월 강수량 200 mm 이하에서의 강수 발생확률은 두 실험 모두 관측과 유사하게 모의하고 있었으나 그 이상의 영역에서는 과소 모의하는 경향이 뚜렷하게 나타났다(그림 15

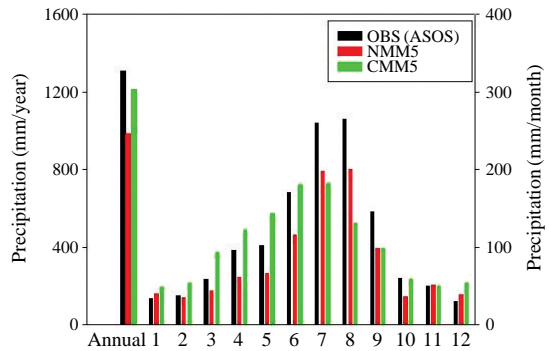


Fig. 14. Annual amount and monthly variation of precipitation from 1971 to 2000 for observations (OBS: black) and MM5 simulations (NMM5: red and CMM5: green).

(a)). 특히 CMM5는 400 mm/month 이상의 강수에서 NMM5보다 관측에 더 가까운 발생 확률을 보였다. 일 강수량의 경우, 여름철(그림 15(b))에 약 50 mm 이하의 약한 강수 영역에서 관측과 유사한 분포를 보이지만 그 이상의 영역에서는 NMM5와 CMM5 모두 과소모의 하는 특성이 나타나고 있다. 반면, 겨울철에는 CMM5의 강수 예측성이 관측과 매우 유사한 강수 확률을 보였다(그림 15(c)). CMM5는 월강수량 및 일 강수량 모두 다 강수 구간에 대한 발생

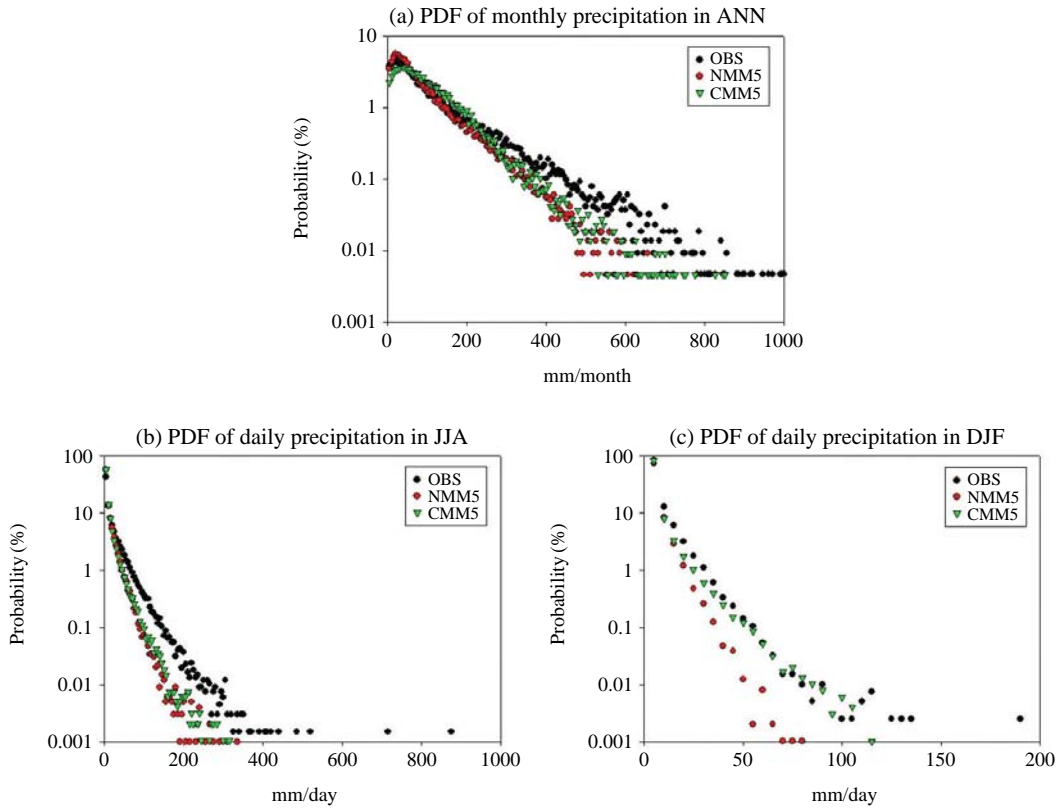


Fig. 15. PDF of the distribution for precipitation in South Korea from 1971 to 2000 for (a) monthly precipitation amount and daily precipitation ((b): summer and (c): winter).

확률은 과소 모의하는 특성을 보이고 있으나, 약한 강수 구간의 모의 능력과 NMM5의 강수 발생 확률 결과를 고려하면, CMM5의 강수 모의는 유의한 수준인 것으로 판단된다.

### 3.3 대기질과 관련된 기온과 강수일수 비교

앞 절과 마찬가지로 기온과 강수량의 양적·공간적 평가 결과는 대기질과 관련된 지표에서도 그 특성이 나타나고 있었다(표 5). CMM5의 기온 cold bias와 일 최고기온의 과소모의 특성으로 인해 오존 생성 임계온도인 일 최고기온이 23°C 이상인 날의 발생일수는 111일로 관측에서 나타난 138일보다 과소모의 되었다. 그러나 그 추세는 2.3 day/10yr의 증가율을 나타내어 관측 자료의 증가율인 2.4 day/10yr과 유사하였다. 기준실험인 NMM5는 3.7 day/10yr로 관측에 비해 큰 증가율을 보였다. CMM5의 고온 발생일수

(일 최고기온 30°C 이상)는 10일로, 관측일수(34일)에 비해 과소모의 되었으며, 추세는 관측의 1.6 day/10yr의 증가율에 비해 CMM5는 0.6 day/10yr로 낮은 증가율을 보였다. 기준실험인 NMM5는 0.9 day/10yr로 관측에 비해 낮은 증가율을 보였다. 예측성이 좋았던 최저 기온과 관련 있는 응결 관련(일 최저기온 0°C 이하) 지표는 CMM5가 90일로 94일의 관측값과 유사하게 나타났다.

강수와 관련된 일수들을 관측과 비교한 결과 ICAMS의 강수 발생 빈도 예측은 유의한 수준임을 확인할 수 있었다. 세정일수(일 강수 1 mm 이상)는 CMM5와 NMM5 각각 99일, 92일로 관측값(75일)에 비해 다소 과대모의 하고 있어, 연중 세정일수의 측면에서 CMM5는 약 7% 정도 과대모의 하는 경향이 나타났다. 다 강수일수(일 강수 10 mm, 20 mm 이상)의 CMM5의 모의 결과는 각각 35일과 18일로 기준

**Table 5. Comparison between observation and model result on the 30-year averaging (a) occurrence frequency (day) based on temperature and precipitation over South Korea. (b) indicates the growth rate. Units are in day/10yr.**

		Tmax ≥ 23°C	Hot days (Tmax ≥ 30°C)	Frost days (Tmin ≤ 0°C)	Prcp ≥ 1 mm/day	Prcp ≥ 10 mm/day	Prcp ≥ 20 mm/day
OBS	(a)	138	34	94	75	33	20
	(b)	(2.4)	(1.6)	(-2.3)	(-0.7)	(0.4)	(0.7)
NMM5	(a)	112	14	87	92	29	11
	(b)	(3.7)	(0.9)	(-2.8)	(-2.1)	(0.5)	(0.7)
CMM5	(a)	111	10	90	99	35	18
	(b)	(2.3)	(0.6)	(-3.1)	(3.5)	(1.4)	(1.0)

실험보다 관측일수(33일, 20일)에 더 유사한 결과를 보였다. CMM5는 20 mm/day 이상의 발생일수는 관측과 유사하나, 20 mm/day 이상인 날 영역에서 강수량의 차이가 약 255 mm로서 여름철 강수량의 차이의 주요 요인인 것으로 분석되어, 다 강수에 대한 모의의 한계성을 지니는 것으로 나타났다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 미래 기후 및 대기질 예측을 위해 구축된 ICAMS의 기후와 대기질 예측 결과의 활용에 대한 기반 정보를 제공하고자 과거 30년 기간을 대상으로 ICAMS의 기온과 강수량 예측성능을 평가하였다.

배경장으로 사용된 재분석자료(NRA)와 ICAMS의 전구모델(CCSM3) 결과는 저 분해능으로 인해, 한반도 지역의 상세한 기후변화 정보 제공에 한계를 지니는 반면, 역학적 규모축소를 거친 ICAMS의 지역규모 모의는 고분해능에 따른 지형의 상세화와 중규모 물리과정이 반영되어 지역적으로 상세화 된 정보를 생산하는 것으로 확인되었다.

ICAMS의 지역규모 실험인 CMM5 실험을 통해 기온에 대한 예측성을 평가한 결과, 관측과 유사한 기온 분포 및 추세를 보였다. 평균기온은 약 1°C 정도의 cold bias를 보였으며, 일 최고기온에서 다소 큰 cold bias(-2.7°C)가 나타났다. 이는 기준 실험(NMM5 실험)에서도 나타나는 현상으로 MM5가 고온 예측에 있어 과소 모의 경향이 있는 것으로 분석되었다. Cold bias로 인해 고농도 오존 생성과 관련된 임계온도 발생 일수가 약 20% 적게 나타나며 고온 발생일수 또한 관측에 비해 과소모의 하였다. 기온에 대한

ICAMS의 예측성능은 기후시나리오와 평균적인 온도자료 제공에 있어 매우 좋은 성능을 보였으나, 오존과 같이 고온과 관련된 대기질 요소의 모의 결과 해석 시에는 cold bias에 대한 고려가 필요한 것으로 분석되었다.

ICAMS의 강수 예측성은 배경장의 영향이 지역규모로 전파되는 경향이 뚜렷하게 나타났으나, 역학적 상세화로 인해 지역적으로 세밀한 강수 분포를 생산하였다. 그러나 배경장에서 나타난 과소모의 특성이 MM5의 과소모의 경향과 더해져 관측과의 편차가 보다 커짐을 알 수 있었으며, CMM5와 NMM5 모두 내륙지역 강수 모의가 매우 약한 것을 확인할 수 있었다. 연 강수량에서는 CMM5가 기준 실험보다 유의한 결과를 보였으나, 여름철 7월과 8월의 강수 최대 구간이 6월과 7월로 편이 되는 경향이 나타났다. 또한 여름철 강수량이 약 200 mm 과소 모의되는 특성을 보였다. 여름철 강수의 과소모의는 20 mm/day 이상의 다 강수 모의에서 주로 나타났으며, 세정일수는 관측에 비해 약 7% 과대 모의하는 경향이 나타났다. 대기 오염물질의 세정효과는 1 mm 이상의 영역의 발생 빈도가 중요함을 고려할 때, ICAMS의 강수 발생 빈도 측면에서 좋은 성능을 보여 평균적인 대기질 예측 관점에서는 유의할만한 결과인 것으로 판단된다.

ICAMS의 기후모의 능력은 기준 실험과 비교하여 전반적으로 좋은 예측성능을 보였으며, 관측 자료와 비교에서도 신뢰할 만한 예측성능을 확인할 수 있었다. 그러나 최고기온의 cold bias와 다 강수영역에서의 dry bias의 경향성들은 미래 지역규모 기후 모의와 대기질 예측 결과를 활용함에 있어, 유의해야 할 부분인 것으로 평가되었다.

## 참 고 문 헌

- Bell, M.L., R. Goldberg, C. Hogrefe, P.L. Kinney, K. Knowlton, B. Lynn, J. Rosenthal, C. Rosenzweig, and J.A. Patz (2007) Climate change, ambient ozone, and health in 50 U.S. cities, *Clim. Change*, 82, 61-76.
- Bey, I., D.J. Jacob, R.M. Yantosca, J.A. Logan, B.D. Field, A.M. Fiore, Q. Li, H.Y. Liu, L.J. Mickley, and M.G. Schultz (2001) Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation, *J. Geophys. Res.*, 106(D19), 23073-23095.
- Boo, K.O., W.T. Kwon, J.H. Oh, and H.J. Back (2004) Change in the regional surface climate over Korea due to global warming in a MM5 down-scaling simulation, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L21206 10.1029/2004GL021171.
- Broccoli, A.J., K.W. Dixon, T.L. Delworth, T.R. Knutson, R.K. Stouffer, and F. Zeng (2003) Twentieth-century temperature and precipitation trends in ensemble climate simulations including natural and anthropogenic forcing, *Geophys. Res. Lett.*, 108, 4798, doi:10.1029/2003JD003812.
- Camalier, L., W. Cox, and P. Dolwick (2007) The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends, *Atmos. Environ.*, 41, 7127-7137.
- Campbell-Lendrum, D. and C. Corvalán (2007) Climate change and developing-country cities : Implications for environmental health and equity, *J. Urban Health*, 84, 109-117.
- Chen, J., J. Avise, B. Lamb, E. Salathé, C. Mass, A. Guenther, C. Wiedinmyer, J.-F. Kamarque, S. O'Neill, D. McKenzie, and N. Larkin (2009) The effects of global changes upon regional ozone pollution in the United States, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1125-1141.
- Cheng, C.S., M. Campbell, Q. Li, G. Li, H. Auld, N. Day, D. Pengelly, S. Gingrich, and D. Yap (2007) A synoptic climatological approach to access climatic impact on air quality in south central Canada. Part I: Historical analysis. *Water, Air, & Soil Pollution*, 182, 131-148, DOI:10.1007/s11270-006-9326-4.
- Choi, J.Y., C.K. Song, J.B. Lee, S.C. Hong, and C.H. Bang (2011) Development of a dynamic downscaling method using a general circulation model (CCSM3) of the regional climate model (MM5), *Climate change research*, 2(2), 79-91. (in Korean with English abstract)
- Collins, W.D., C.M. Bitz, M. Blackmon, G.B. Bonan, C.S. Bretherton, J.A. Carton, P. Chang, S. Doney, J.J. Hack, T. Henderson, G.T. Kiehl, W.G. Large, D. McKenna, B.D. Santer, and R. Smith (2006) The Community System Model Version 3 CCSM3, *J. Climate*, 19, 2122-2143.
- Folland, C.K., N.A. Rayner, S.J. Brown, T.M. Smith, S.S.P. Shen, D.E. Parker, I. Macadam, P.D. Jones, R.N. Jones, N. Nicholls, and D.M.H. Sexton (2001) Global temperature change and its uncertainties since 1861, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2621-2624.
- Giorgi, F. and F. Meleux (2007) Modelling the regional effects of climate change on air quality, *C. R. Geoscience*, 339, 721-733.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer (1995) Introduction to special section: Regional climate modeling revisited, *J. Geophys. Res.*, 104, 6335-6352.
- Gustafson, W.I. and L.R. Leung (2007) Regional downscaling for air quality assessment, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 88, 1215-1227JD.
- Knowlton, K., J.E. Rosenthal, C. Horegfe, B. Kynn, S. Gaffin, R. Goldberg, C. Rosenzweig, K. Civerolo, J.Y. Ku, and P.L. Kinney (2004) Assessing ozone-related health impacts under changing climate, *Environ. Health Persp.*, 112, 1557-1563.
- Korea Meteorological Administration (2008) Understanding of climate change and take advantage of climate change scenarios (I), 44pp.
- Kripalani, R.H., J.H. OH, and H.S. Chaudhari (2006) Response of the East Asian summer monsoon to doubled atmospheric CO<sub>2</sub> : Coupled climate model simulations and projections under IPCC AR4, *Theo. Appl. Climate.*, 87, 1-28.
- Lam, Y.F., J.S. Fu, S. Wu, and L.K. Mickley (2011) Impacts of future climate change and effects of biogenic emissions on surface ozone and particulate matter concentrations in US, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11, 2183-2231.
- Leung, L.R. and W.I. Gustafson (2005) Potential regional climate change and implications to U.S. air quality, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16711.
- Liao, K.J., E. Tagaris, K. Manomaiphiboon, C. Wang, J.-H. Woo, P. Amar, S. He, and A.G. Russell (2009) Quantification of the impact of climate uncertainty on regional air quality, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 865-878.
- Lim, D.Y., J.S. Heo, and D.S. Kim (2002) Washout removal efficiencies of major air pollutants by precipitation,



- J. KOSAE., 18 (E2), 97-106.
- Lin, C.Y.C., D.J. Jacob, and A.M. Fiore (2001) Trends in exceedances of the ozone air quality standard in the continental United States 1980-1998, *Atmos. Environ.*, 35, 3217-3228.
- Lin, J.T., K.O. Patten, X.-Z. Liang, and D.J. Wuebbles (2008) Effects of intercontinental transport on surface ozone over the United States at the present and future, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L0285.
- Meehl, G.A. and W.M. Washington (2006) Climate change projections for the twenty-first century and climate change commitment in the CCSM3, *J. Climate*, 19, 2597-2616.
- Meehl, G.A., W.M. Washington, C. Ammann, J.M. Arblaster, T.M.L. Wigley, and C. Tebaldi (2004) Combinations of natural and anthropogenic forcings and 20th century climate, *J. Climate*, 17, 3721-3727.
- Mickley, L.J., D.J. Jacob, B.D. Field, and D. Rind (2004) Effects of future climate change on regional air pollution episodes in the United States, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24103, doi:10.1029/2004GL021216.
- National Institute of Environmental Research (2008) Air Quality : Climate change impacts and adaptation inventory research (I), NIER NO.2008-60-1010, pp.145. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research (2010) Development and operation of the integrated system on climate and air quality (III), NIER NO.2010-21-1196, pp.33. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Meteorological Research (2006) The application of regional climate change scenario for the national climate change report (II), MR060C42, pp. 256. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Meteorological Research (2008) The application of regional climate change scenario for the national climate change report (VI), NIMR, 11-1360395-000068-01, pp.365. (in Korean with English abstract)
- Oh, J.H., M.T. Kim, S.H. Lee, S.K. Min, and W.T. Kwon (2004) Regional climate simulation for Korea using dynamic downscaling and statistical adjustment, *J. Meteor. Soc., Japan*, 82, 1629-1643.
- Shin, J.H., H.-S. Lee, M.J. Kim, and W.T. Kwon (2010) An uncertainty assessment for annual variability of precipitation simulated by AOGCMs over east asia, *Atmosphere*, 20(2), 111-130.
- Sillman, S. and F.J. Samson (1995) Impact of temperature on oxidant photochemistry in urban, polluted rural and remote environments, *J. Geophys. Res.*, 100, 11497-11508.
- Stott, P.A., S.F.B. Tett, G.S. Jones, M.-R. Allen, J.E.B. Mitchell, and G.J. Jenkins (2000) External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings, *Science*, 290, 2133-2137.
- Steiner, A.L., S. Tonse, R.C. Cohen, A.H. Goldstein, and R.A. Harley (2006) Unfluence of future climate and emissions on regional air quality in California, *J. Geophys. Res.*, 111, D18393, doi:10.1029/2005JD006935.