

이 학 석 사 학 위 논 문

RCM들을 이용한 지역기후모의
: GCM의 Boundary Forcing에 대한
의존성

2006년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 대 기 과 학 과

김 진 영

이 학 석 사 학 위 논 문

RCM들을 이용한 지역기후모의
: GCM의 Boundary Forcing에 대한 의존성

지도교수 오 재 호

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.

2006년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 대 기 과 학 과

김 진 영

김진영의 이학석사 학위논문을 인준함.

2006년 2월 24일

주 심 이 학 박 사 변 회 룡 (인)

위 원 이 학 박 사 Kripalani Ramesh Hiranand (인)

위 원 이 학 박 사 오 재 호 (인)

목 차

그림목차	ii
표 목차	IV
Abstract	1
1. 서론	4
2. 자료 및 연구방법	8
2. 1. 모형의 개요	8
2. 1. 1. MM5	8
2. 1. 2. RegCM3	9
2. 2. 초기 및 측면 경계자료	11
2. 3. 연구방법	15
3. 지역 기후 모델들의 결과 분석	19
3. 1. MM5와 RegCM3의 기후 모의 특징	19
3. 2. MM5와 RegCM3의 미래 기후 변화	23
4. 결론 및 토의	31
참고문헌	33
감사의 글	40

그림 목차

Figure 1. Temporal evolution of surface air temperature change in East Asia relative to the period (1961 to 1990) in the IPCC A2 simulation. Units are degree Celsius	13
Figure 2. The model domain and terrain height (125 × 105 grid points, 27 km mesh).	18
Figure 3. Horizontal distributions of the surface air temperature simulated by (a) MM5; (b) RegCM3 at 04 UTC 1 January; (c) MM5; (d) RegCM3 at 04 UTC 1 July in 1991. Units are degree Celsius, and shaded color interval 2 °C.	20
Figure 4. Area - averaged monthly surface air temperature for the MM5 (solid line) and RegCM3 (dotted line) in the (a) 1991 to 2000 and (b) 2091 to 2100 over the East Asia. Units are degrees Celsius.	22
Figure 5. Regional climate warming in the (a) MM5; (b) RegCM3. Units are degree Celsius, and shaded color interval 0.5 °C.	23
Figure 6. Surface air temperature change for MM5 run in all season. (a) Winter (DJF); (b) Spring (MAM); (c) Summer (JJA); (d) Autumn (SOC). Units are degree Celsius, and shaded color interval 0.5 °C	25
Figure 7. Surface air temperature change for RegCM3 run in all season. (a) Winter (DJF); (b) Spring (MAM); (c) Summer (JJA); (d)	

Autumn (SOC). Units are degree Celsius, and shaded color interval 0.5 °C 26

Figure 8. Area - averaged temperature change simulated by the MM5 (solid line) and RegCM3 (dotted line) over the East Asia. (a) monthly; (b) Winter; (c) Spring; (d) Summer; and (e) Autumn temperature change. Units are degrees Celsius. 28

표 목 차

Table 1. The Emissions Scenarios on IPCC Special Report on Emission Scenarios, SRES (IPCC, 2001)	14
Table 2. Summary of the model configuration and experiments design used in this study	17
Table 3. Surface air temperature results taken from the 10-year seasonal mean field over East Asia for the present-day and the future simulations in winter (DJF), spring (MAM), summer (JJA), autumn (SON), and winter. The standard deviation represent spatial variation over the seasonal mean field. The Correlation shows the similarty between MM5 and RegCM3. Units are degrees Celsius.	30

Simulation of Regional Climate Models : Dependency on Boundary Forcing of GCM

Jin-Young Kim

The Department of Environmental Atmospheric Sciences,
The Graduate school
Pukyong National University

Abstract

Two continuous 10-year-long simulation over Eastern Asia, one for past-day climate and one for future climate are completed with regional climate models (RCMs). RCMs are the Fifth-Generation PSU/NCAR Mesoscale Modeling (MM5) and the Third-Generation Regional Climate Model (RegCM3) nested, in a one-way mode, within the future projection by a general

circulation model (GCM). The main goal of this study is to figure out the dependency in the future regional climate projected by different RCMs based on the same global projection on future climate by GCM under IPCC SRES A2 scenario. The model domain approximately encompasses the regions 23 °N - 51 °N, 101 °E - 150 °E with a grid point spacing of 27 km using Lambert conformal projection. The terrain height and landuse data are generated from a global data set produced by the United States Geographical Survey (USGS) at 5 minute resolution. The initial and lateral boundary conditions necessary to run the RCMs were obtained from the ECHAM4/HOPE-G A2 scenario data of the Special Report on Emission Scenarios (SRES), which is available at 4-h interval with a resolution of T30L19.

The important results from this study are (1) two RCMs reproduced similar change of surface air temperature at the point of approximate pattern because of forcing in the same lateral boundary condition (2) the regional warming in the range of 4 -

8 °C is simulated, greater in winter than in summer and increasing toward high latitudes at the both models. Although the simulation period is short, the information supplied by the RCMs depend on the boundary condition of the GCM.

1. 서론

지역적 중규모 기후 (Leung *et al.* 2003; Curry and Lynch 2002; Liston and Pielke 2001)와 기상현상 (Warner *et al.*, 1997; Pielke 2002)의 성공적인 모의 덕분에 지역 모델들의 이용이 최근 10년 동안에 급속히 확대되었다. 미국 국립 기상 연구 센터 (The National Center for Atmospheric Research, NCAR)와 전력 사업 연구소 센터 (The Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI)가 기후 변화 연구에 이용하기 위해서 동아시아 지역에 대한 지역기후 모델을 개발하고자 협력하여 왔다 (Hirakuchi *et al.*, 1995). 그리고 미국의 상호비교 지역 기후 모의 (Intercomparison Regional Climate Simulation, PIRCS, Takle *et al.*, 1999); 유럽의 지역기후를 이해하고 에러를 줄이는 모델링 (Modeling European Regional Climate, Understanding and Reducing Errors, MERCURE, Marchenhaur *et al.*, 1998); 그리고 아시아의 지역모델 상호 비교 프로젝트 (Regional Model Intercomparison Project, 이하 RMIP, Fu *et al.*, 1993)와 같은 세계 곳곳의 지역기후모델을 이용하는 상호 비교 프로젝트들이 진행되어

왔다.

특히, 현재 몬순 기후와 지역 기후 모델을 평가하고 향상시키기 위해서 아시아 지역에 대한 지역 기후 모델의 상호 비교 프로젝트인 RMIP은 10개국(호주, 중국, 일본, 남한, 미국, 인도, 이탈리아, 몽골, 북한 그리고 러시아)의 연구 그룹을 중심으로 수행되고 있는 대규모 프로젝트이다 (Fu *et al.*, 2005). 이런 노력들은 지역 기후 모델링 기술, 즉 대상 영역에 대해 고해상도 지역기후모델 (Regional Climate Models, 이하 RCMs)이 단방향 모드에서 전지구 순환 모델 (General Circulation Model, 이하 GCM) 안으로 동지격자화 하는 기술 개발에서 시작되었다 (Giorgi, 1990). 그리고 이 기술을 이용하는 지역기후모델들은 경계조건에 의해 유도되도록 만들어졌다 (IPCC, 2001). 따라서 RCMs의 모의 결과는 GCM의 모의 결과나 전지구 분석으로부터 유도되는 자료의 현실성에 의존하므로 유도되는 자료의 어떤 bias들이 지역기후로 운반될 수 있다.

한편 Fu *et al.* (2005)은 지역 기후 모델 향상을 위한 과학적 기반을 다지고 21세기 기후 변화 시나리오 제공을 목표로 한다. 그들은 연구에서 RCMs (RIEMS, DARLAM, CCAM, JSM_BAIM, RegCM, RegCM2a, RegCM2b, ALT. MM5/LSM, SNU RCM)의

모의 결과, 평균 온도와 강수 bias들이 모델들 간에 차이가 있음을 보였다. 이런 bias들에 대해서 그들은 “(1) 강수가 대류 과정, 측면 경계 처리, 토양 수분 초기화, 강수의 미세 물리 과정들에 관계되어 문제가 있는가? (2) 구름 모의, 장파 복사 모의, 지표 과정, 또는 눈과 해빙처리와 관계된 지역에 cold 또는 warm bias가 있는가? 라는 의문에서 bias의 원인이 지역 기후 모델내의 물리적 모수화 방법에 기인한다고 추정하였다. 이러한 추정은 Fu et al(2005) 뿐만이 아니라 많은 연구 그룹들에 의해 진행되고 있으며 아직까지는 많은 의견들이 난립된 채, 통일된 방향이 제시되지 않았다.

물론 RCM들이 각각의 목적에 따른 역학 및 물리적 모수화 방법으로 구성되므로 모의된 결과들 사이에 다른 특징이 나타나는 것은 당연하다. 하지만 21세기 기후 변화 시나리오 제공을 위한 cold와 warm bias의 원인에 대한 진단측면에서는 앞의 원인이 다소 무리가 따른다. 왜냐하면 현재까지 보고된 모델결과의 수행기간은 단지 18개월이다. 더구나 이전 연구에서 장기 모의의 결과는 시간에 따라 제공되는 측면 경계조건의 강제가 중요함을 입증하였고 RCM에서의 주요 bias는 유도되는 GCM자료에 있다는 것을 보였었다. (Wu et al., 2005, Andre et al., 2004)

따라서 본 연구에서는 각기 다른 RCM들에서 생산되는 21세기 기후 변화 시나리오 자료에서의 bias들의 원인이 어디에 있으며 얼마나 의존하는지 알아보고자 한다. 그리고 GCM에서 제공되는 측면 경계 조건이 동일하게 주어진다면 RCM들 간에 모의되는 지역 기후 변화는 비슷할 것이라는 것을 가정한다. 따라서 만약 본 가정이 옳다면, 각기 다른 RCM일지라도 동일한 GCM의 강제에 의해 지역 기후변화가 비슷할 것이라는 것을 포함한다.

이를 확인하기 위해서 MM5와 RegCM3의 지역기후모델을 이용하여 현재 기후에 대한 10년 (1991년 - 2000년, 이하 1990년대)과 미래 기후에 대한 10년 (2091년 - 2100년, 이하 2090년대)의 각기 다른 모델에 대해서 각각 10년 모의를 수행하였다. 2장에서 보다 구체적인 모델들과 장기 기후모의를 가능하게 해주는 21세기 시나리오에 대한 설명과 실험 방법을 정리하였으며, 이를 바탕으로 3장에서 모든 동아시아 지역에 대한 지역 기후 모의 결과에 대한 분석은 MM5와 RegCM의 결과의 상호 비교에 초점을 두고 분석하였다. 마지막으로 4장에서 분석된 결과를 요약하고 결론을 정리하였다.

2. 자료 및 연구방법

2. 1. 모형의 개요

2. 1. 1. MM5

본 연구는 펜실베이니아 주립대학과 미국 국립 연구 센터에서 공동 개발한 Fifth - Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model (이하 MM5) 버전 3.5를 이용하였다 (Grell *et al.*, 1995). MM5는 현재 버전은 향상된 물리적 특징을 포함하는 비정역학 중 규모 대기모델로, 다양한 응용에 적합하여 대기 모델링 분야에 폭 넓게 즉, 수치 기상 예보에서 지역 기후 모델에 이르는 넓은 범위에서 이용되고 있다 (Mass and Kuo, 1998; Lynch *et al.*, 2003). 그리고 Chen과 Dudhia (2001a)는 지표 - 수문 모델 (land surface - hydrology model)의 결합으로 이 모델을 향상시켰다. 이 결합은 계절 모의와 장기 모의에서 지표과정이 중요하기 때문에 지역 기후 연구에 이용하기 위해서 중요하다. 이 결합 모델은 지표 에너지 수지와 경계층의 재현을 향상시켰다 (Chen and Dudhia 2001b). 본 모델에 이용된 물리 과정은 Grell 주요 대류 모수화 (Grell *et al.*

1994), 중기 예보 (MRF) 행성 경계층 체계 (Hong and Pan 1996), 그리고 Reisner의 명시적 구름 미세물리 모수화 (Reisner *et al.* 1998)를 포함한다. 복사 수송 모델 (Rapid Radiation Transform Model, 이하 RRTM; Mlawer *et al.* 1997)은 장파 복사를 계산하기 위해서 선택되었고 Delta - Eddington 근사 (Briegleb, 1992)를 연구에서 태양복사를 계산하기 위해 이용되었다. 그리고 선형완화법 (linear relaxation scheme, Davies, 1983)이 측면 경계 영역에서 적용된다. 경계 기술은 5 지점 폭의 경계 지대의 경계에서 시작하여 거리에 따라 증가하는 비중을 주어 선형적으로 결합된다. 이런 공식은 경계 지역의 해에서 bias들을 감소시키기 위해서 이용할 수 있다 (Davies, 1976, 1983).

2. 1. 2 RegCM3

Dickinson *et al.*(1989), Giorgi와 Bates (1989), 그리고 Giorgi (1990)에 의해 개발된 미국 국립 연구 센터의 Third - Generation Regional Climate Model (이하 RegCM3; Giorgi *et al.*, 1993a, b)은 본래 MM4에 기초하여 구성되었었다 (Anthes *et al.*, 1987). MM4는 기본 방정식, σ 연직 좌표, 압축성과 정역학적 균형을 이루는 격자 지점 제한 지역

모델이다. 현재는 MM5의 정역학 버전과 균형을 이룬다. 게다가 기후 연구의 적용을 위해서, RegCM3은 다양한 물리 모수화가 그 모델 내에 결합되었다. 본 모델은 최신 지표 물리 패킷 (Biosphere - Atmosphere Transfer Scheme package, 이하 BATS; Dickinson *et al.*, 1993), 그리고 명시적 행성경계층 공식 (Holtslag *et al.*, 1990), 상세한 대기 복사 연산 패킷 (Briegleb, 1992)을 포함한다.

BATS는 운동량, 열, 그리고 수분이 지표와 대기에서 교환되어 상호작용하는 토양 수분과 식생의 영향을 설명한다. 10-cm 깊이의 표면 토양층과 1-m 깊이의 사각지대의 완전한 수문학적 순환 즉 강수, snow-pack 형식과 melting, water interception 그리고 여과에서 심토로 적하되는 것 등의 영향을 계산하여 재현된다. 행성 경계층의 연직 수송은 Holtslag *et al.* (1990)의 비지역적인 공식과 특히 CO₂, O₃, H₂O, O₂ 그리고 구름의 효과를 고려하는 NCAR CCM (CCM3)의 모델 복사 수송 패킷을 통하여 설명된다. 복사 수송 연산에서 이용되는 구름은 지역 상대 습도의 함수로써 계산된다. (Giorgi *et al.*, 1993a).

2. 2. 초기 및 측면 경계자료

지역 기후 정보를 얻기 위해서 사용된 초기치 및 경계 자료는 독일 막스 플랑크 기상연구소 (Max Planck institute, 이하 MPI)의 대기 - 해양 접합 모델 (Atmosphere - Ocean General Circulation Model, AOGCM)인 ECHAM4/ HOPE - G (이하, ECHO)를 기상연구소에서 도입하여 생산된 자료이다 (과학기술부, 2003). ECHO는 대기 대순환 모델인 ECHAM4와 해양모델인 HOPE-G의 접합 모델이다. 대기 모델인 ECHAM4는 유럽 중기 예보 센터 (European Centre for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF)의 예보 모델을 기본으로 독일 Hamburg MPI에서 기후 변화 모의에 적합하도록 수정 · 개발 (Roeckner *et al.*, 1996)한 모델로 해상도는 T30L19이다; 수평 해상도는 약 300 km 정도이고 연직 좌표는 hybrid sigma - pressure (Simmons and Burridge, 1981)를 사용하며, 지표에서 10 hPa까지 연직으로 19개 층으로 나누어져 있다. 해양모델인 HOPE-G는 해빙모델을 포함하고 있으며 해상도는 T42L20이다.

기후분석을 위해 ECHO를 통해 생산되어 사용된 자료는 배출 시나리오에 따른 IPCC 특별 보고서 (Special Report on Emission

Scenarios, SRES)의 A2 시나리오이다 (Table 1). SRES 대표 시나리오에 대하여 대기 중 2100년의 이산화탄소 농도는 540 - 970 ppm (1750년의 농도 280 ppm에 비하여 90 - 250 %)에 도달할 것으로 전망하였다 (IPCC, 2001). A2 시나리오는 다른 시나리오와 함께 여러 기후 변화 모델을 이용한 미래 기후 예측을 위한 연구에 많이 사용되고 있는 시나리오이다. Figure 1은 동아시아 지역에서 2100년까지 뚜렷한 온도 증가를 보임을 안다. IPCC SRES A2 온실가스 증가 시나리오는 전 지구 4시간 간격 예보자료이고 3.75 °간격, 위도는 Gaussian 격자 간격으로 96 (동서) × 48 (남북)로 구성되어 있다. 지역기후 기후 모의를 위해 RCMs의 초기 및 경계 자료로 모델 격자점에 맞게 위·경도로부터 공간적으로 bi-linearly (Accadia *et al.*, 2003) 내삽하고 4시간 간격으로 매월마다 초기화하여 사용한다. 그리고 원시 자료의 수평 해상도는 모델의 내삽설정으로 각각 동서, 남북 방향으로 27 km이며, 연직으로는 지표면과 아래로 4 층의 토양 모형 자료 그리고 1000 hPa 면에서 50 hPa까지의 18 개의 대기층으로 구성되어 있는 수평 바람장 (u/v-wind, m/s), 온도장 (temperature, K), 수분장 (specific humidity, kg/kg), 고도장 (geopotential height, m), 해면 기압장 (sea-level pressure, Pa), 해

면 온도장 (sea surface temperature, K) 등을 사용한다.

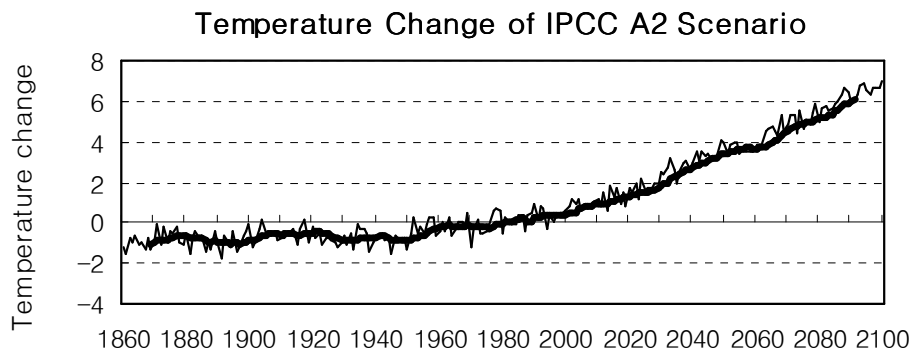


Figure 1. Temporal evolution of surface air temperature change in East Asia relative to the period (1961 to 1990) in the IPCC A2 simulation. Units are degree Celsius.

Table 1. The Emissions Scenarios on IPCC Special Report on Emission Scenarios, SRES (IPCC, 2001)

A1. A1 구상 방안(storyline)과 시나리오 군(群, family)은 미래의 세계가 매우 급격한 경제성장, 전지구 인구는 이번 세기 중반에 최정점에 이르렀다가 그 후 감소하는 추세, 새롭고 좀 더 효율적인 기술의 급격한 도입 등으로 표현된다. 주요한 근본적 주제들은 1인당 소득의 지역별 격차를 근본적으로 줄이면서 지역 간의 수렴, 능력 함양, 문화적·사회적 상호작용의 증대를 들 수 있다. A1 시나리오군은 에너지 체계에 있어서 기술 변화의 대체 방향을 기술하는 방식에 따라 3개의 그룹으로 전개된다. 3개의 A1 그룹은 그들의 공학적 특성에 의해 구분된다. 즉, 화석연료 의존형(A1FI, fossil intensive), 비화석연료 에너지원(A1T), 모든 에너지원 간의 균형(A1B) (여기서 균형이란 말은 유사한 개선 비율이 모든 에너지 공급 및 최종 사용 기술에 적용된다는 가정 위에 하나의 특정 에너지에 너무 편중되게 의존하지 않는다는 것을 말한다).

A2. A2 구상 방안과 시나리오 군은 매우 균질하지 않은 세계로 표현된다. 근본적인 주제는 자기 의존성과 지역적 정체성의 보존이다. 지역 전체의 출생률 양상은 매우 느리게 수렴하고 있으며 이는 지속적인 인구 증가를 낳게 된다. 경제 성장은 주로 지역적으로 편중되어 있으며 개인당 경제 성장 및 기술 변화는 더욱 깨어지는 양상을 보이며 구상 방안에 비해 느리다.

B1. B1 구상 방안과 시나리오 군은 동일한 세계 인구를 가진 수렴된 세계로 표현되며 A1 구상방안과 마찬가지로 금세기 중반에 최정점을 보이다가 그 이후에 감소하지만 서비스 및 정보 경제로 급격하게 경제 구조가 변화하고 육체적 강도가 감소하고 청정 및 자원 효율적인 기술의 도입이 이루어진다. 부가적인 기후 이니셔티브(initiatives)가 없이 개선된 형평성을 포함하여 경제적·사회적·환경적 지속 가능성에 대한 전지구적 해결에 강조점을 두고 있다.

B2. B2 구상 방안과 시나리오 군은 경제적·사회적·환경적 지속 가능성에 대한 지역적 해결에 강조점을 두고 있는 세계를 표현하고 있다. 이는 A2보다 낮은 비율로 지속적으로 증가하는 인구를 가지고 중간적 수준의 경제 성장, B1 및 A2 방안에서보다 덜 급격하고 훨씬 다양한 기술 변화를 가진 세계이다. 이 시나리오 역시 환경 보전과 사회적 형평성에 편중되어 있기는 하나 국지적 및 지역적 수준에 초점이 모아져 있다.

2. 3. 연구방법

지역 기후 모의에서 MM5와 RegCM의 두 모델 사이에 실험 구성은 Table 2와 같다. 특히 경계조건은 시간에 따라 동일하게 주어지도록 구성하여 가정 (식 (1))과 같이 모델들 간의 기후변화가 비슷할 것이라는 것을 알아보고자 한다.

$$\frac{\partial \varphi_M}{\partial t} \approx \frac{\partial \varphi_R}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 φ_M 의 첨자 M 은 MM5 모델을 가리키고 φ_M 는 MM5에 의해 모의된 지역기후를 의미한다. 그리고 φ_R 의 첨자 R 은 RegCM3 모델을 가리키고 φ_R 는 RegCM3에 의해 모의된 지역기후를 의미한다.

Figure 2는 MM5와 RegCM3에 선택된 모의 영역으로 27 km의 수평 격자 간격을 가지고 38 °N, 125 °E에서 중심을 둔 동아시아와 북서 태평양으로 포함한다. 중위도의 투영에 적합한 람베르트 투영법 (Lambert Confomal projection)을 이용하고 모델에서 이용된 현재 수평 해상도에서 해안선과 고립된 산들의 복잡한 지형적 특징이

잘 확인된다. 이것은 미국의 국립 지리 조사원 (U.S. Geological Survey, USGS)에서 제작한 전 지구 5분 간격의 지형자료 (Row *et al.*, 1995)의 효과도 나타났기 때문이다. 원래 동아시아 지역의 복잡한 지형을 고려하기 위해서는 고해상도의 지역기후 모델의 수평 해상도에 알맞은 지형자료와 지표 특성자료가 필수적이다. 그리고 동아시아 지역의 복잡한 지역적인 지형효과에 따라 대기 순환이 변하며, 이는 기상 및 기후 요소를 변화시키는 요인이 된다.

초기 및 측면 경계 조건을 얻는 방법은 Giorgi와 Bates (1989)와 같이 바람, 온도, 수증기, 지표 기압, 그리고 해수면 온도에 대한 시간에 따른 측면 경계 조건은 ECHAM4/HOPE-G 결과로부터 내삽된다. 그리고 Anthes *et al.* (1987)에 의해 설명되고 Giorgi *et al.* (1993b)에 수정된 완화법 (relaxation method)과 비교하여 모델로 제공된다. 4-h 간격의 ECHAM4/HOPE-G A2 시나리오 자료를 이용하여 장기 적분을 위하여 재분석 자료를 한 달 간격으로 RCMs에 초기화시켰으며, 측면 경계 자료는 4시간 간격으로 입력하였다.

모델 수행 기간은 ECHO의 240년 (1860년 ~ 2100년) 모의 자료 중에서 현재 기후에 대한 1991년 ~ 2000년 (이하, 1990년대) 그리고 미래 기후에 대한 2091년 ~ 2100년 (이하, 2090년대) 까지 수행하였다. 여기

서 중규모 기상모델인 MM5는 기후모의에 이용하기 위해 구상된 방법으로, Qlan *et al.* (2003)의 초기화 방법에 따른 기후모의 결과 분석에 근거하였다. 이와 동시에 기후 모형인 RegCM도 실험을 동일하게 수행하기 위해 월마다 초기화하여 사용한다. 한 달 간격으로 초기화 시킬 때 스핀업 (Spin-up) 시간을 고려하여 총 모의기간 하루 전부터 모델을 수행하고, 스핀업 시간인 첫 하루는 분석에서 제외하였다. 즉, 1991년 1월을 모의하기 위해선 1990년 12월 31일 00 UTC부터 1991년 2월 1일 00 UTC까지 모델을 수행하고, 분석은 1991년 1월 1일 00 UTC부터 1991년 2월 1일 00 UTC까지로 하였다.

Table 2. Summary of the model configuration and experiments design used in this study

	MM5	RegCM3
Map Projection	Lambert Conformal	
Resolution	27 km	
No. grid	105 × 125	
Vertical layer	18 layers (model top: 50 hPa)	
Cumulus	Grell	
Explicit moisture	Mixed-Phase (Reisner)	
Topography data	USGS (Global 5 minutes)	
Initial & Lateral boundary	ECHAM4/HOPE-G A2 Scenario	
Time interval	75s	

Model domain

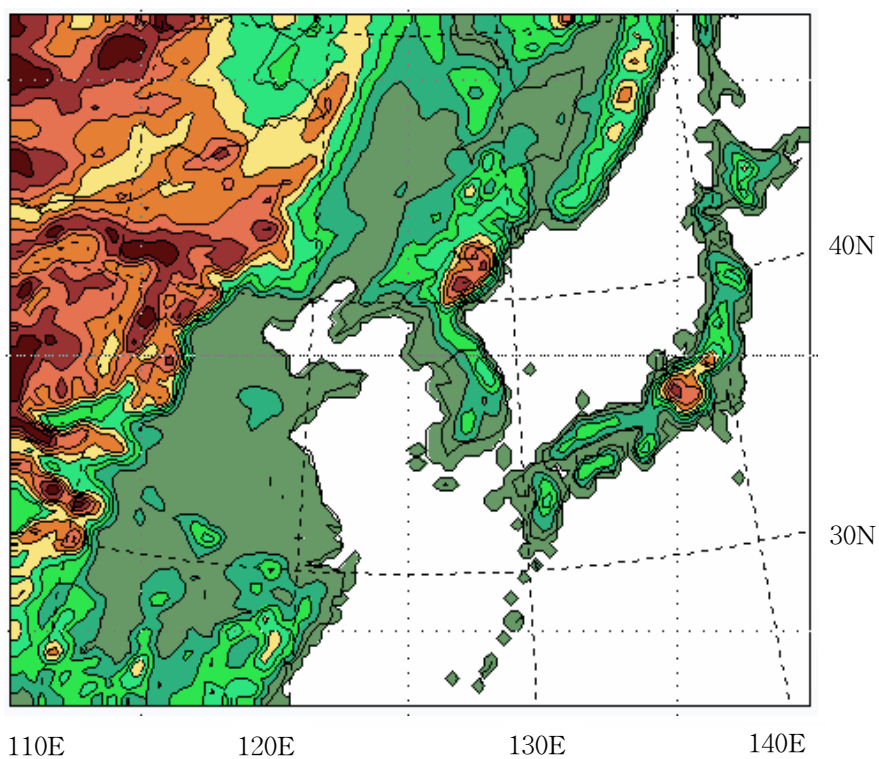


Figure 2. Model domain and representation of East Asia topography. (125×105 grid points, 27 km mesh).

3. 지역 기후 모델들의 결과 분석

3. 1. MM5와 RegCM3의 기후 모의 특징

지표 기온은 지형에 아주 민감한 변수이므로 고해상도 지형에 따른 지역기후 변화를 잘 나타내는 특징을 가지고 있다. Machenhauer *et al.* (1998)은 10년간의 지역기후 모의 분석에서 전 영역에 대해 평균된 지표 기온 반응이 통계적 의미가 있었다고 하였다. 따라서 본 연구는 기후 분석의 대표장인 2 - m 지표 온도를 중심으로 분석한다.

Figure 3a - 3d MM5와 RegCM3의 각 모델에서 모의된 지표 기온이 동아시아 지역에서 공간적으로 어떤 분포를 하였는지 살펴 보기 위해서 각 시점의 지표 기온을 분석하였다. (a)는 MM5, (b)는 RegCM3으로 1991년 1월 1일 04 UTC에 해당하고, (c)는 MM5, 그리고 (d)는 RegCM3로 1991년 7월 1일 04 UTC에 해당한다. 다른 지역에 비해 중국의 대부분의 지역과 연해주 인근해역에서 (b)와 (d)의 RegCM3이 (a)와 (c)의 MM5의 모의 결과보다 최대 10 °C까지 차이로 낮다. 그리고 (a)와 (b)의 1월 1일의 04 UTC 보다 (c)와 (d)의 7월 1일 04 UTC에서 보다 더 뚜렷한 지표기온의 공간적 분포

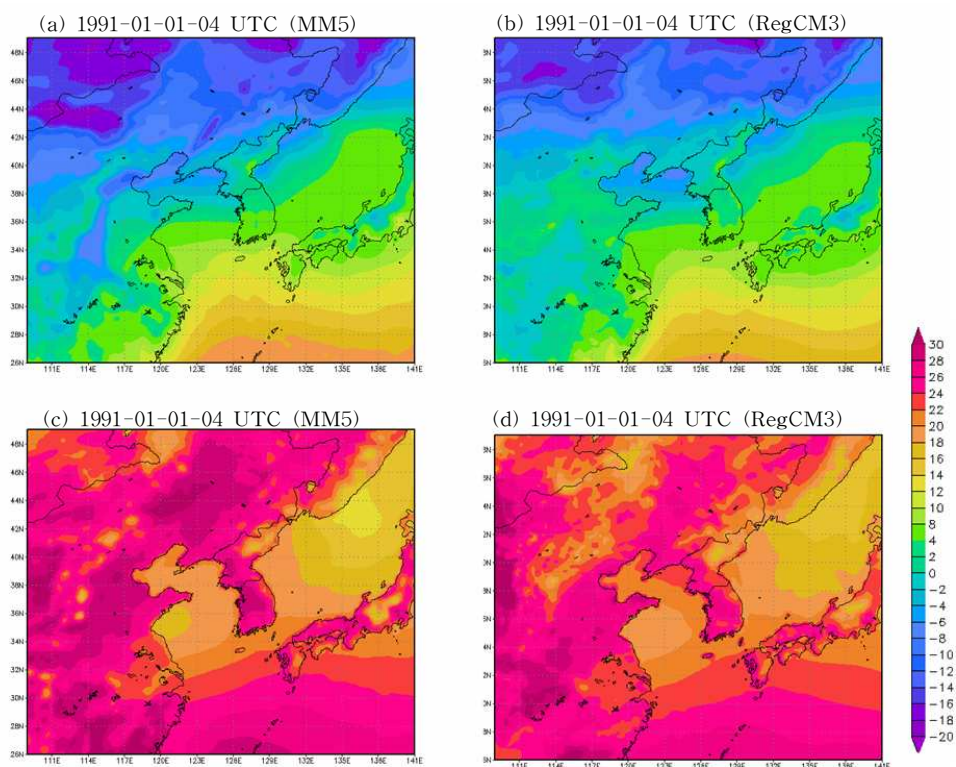


Figure 3. Horizontal distributions of the surface air temperature simulated by (a) MM5; (b) RegCM3 at 04 UTC 1 January; (c) MM5; (d) RegCM3 at 04 UTC 1 July in 1991. Units are degree Celsius, and shaded color interval 2 °C.

에 차이가 있다. 그리고 시간에 따른 지표 기온의 특징은 어떤지 알아보기 위해서 Figure 4에서는 모의 영역에 대하여 지역 평균한 지표 온도의 월평균한 시계열로 나타내었다. (a)는 1991년 1월부터 2000년 12월까지의 월평균 시계열이고 (b)는 2091년 1월부터 2100년 12월까지의 월평균 시계열로 표현하였다. (a)와 (b)의 패널에서 RegCM3가 MM5에 비해 약 0 - 3 °C 정도 낮게 모의한다.

Figure 3과 4에서의 MM5와 RegCM3의 지표기온 모의에 차이가 있는 것은 각 모델 내의 목적에 따른 모수화 scheme 방법의 차이에서 기인한다. MM5는 하루 중 온도를 상호 비교하여 일 최고기온을 최고온도로 결정하며 일 최저기온을 최저온도로 계산한다. 반면에 RegCM3은 최고기온과 최저기온이 시간에 고정된 값이기 때문에 MM5와 RegCM3 모의 사이에 온도차이가 난다. 단, 여기서 RegCM의 최고 및 최저 온도의 계산과정의 별도의 수정 없이 본래의 모듈을 그대로 이용하였다. 두 모델들 간에 지표 기온의 모의 정도의 차이를 보임에도 불구하고 1990년대와 2090년대의 각 10년의 모의 동안에 지표 기온의 모델간의 온도 차이는 비슷하게 유지되었다. 그리고 이는 향후 이루어질 기후 변화 분석에 따라 측면 경계 조건에 의해 나타난 특징인지 판단할 수 있는 것으로 보인다.

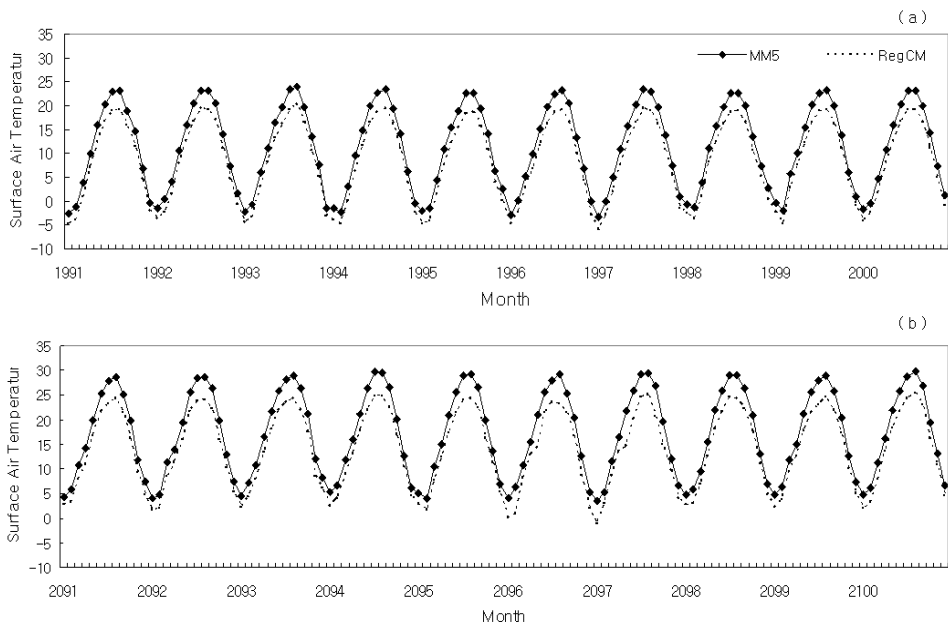


Figure 4. Area - averaged monthly surface air temperature for the MM5 (solid line) and RegCM3 (dotted line) in the (a) 1991 to 2000 and (b) 2091 to 2100 over the East Asia. Units are degrees Celsius.

3. 2. MM5와 RegCM3의 미래 기후 변화

Figure 5a - 5b, Figure 6a - 6d, 그리고 Figure 7a - 7d는 MM5와 RegCM에 의해 생산된 2090년대 모의와 1990년대 모의의 년과 계절에 대한 지표기온 차를 각각 보인다. 간단하게, 이후로 지표기온의 차를 “온도 변화” 또는 “온난화”라고 부를 것이다. 미래 시나리오를 가진 기후 변화는 작은 규모의 변동이며 아래의 모든 그림의 간격은 0.5 °C 이다.

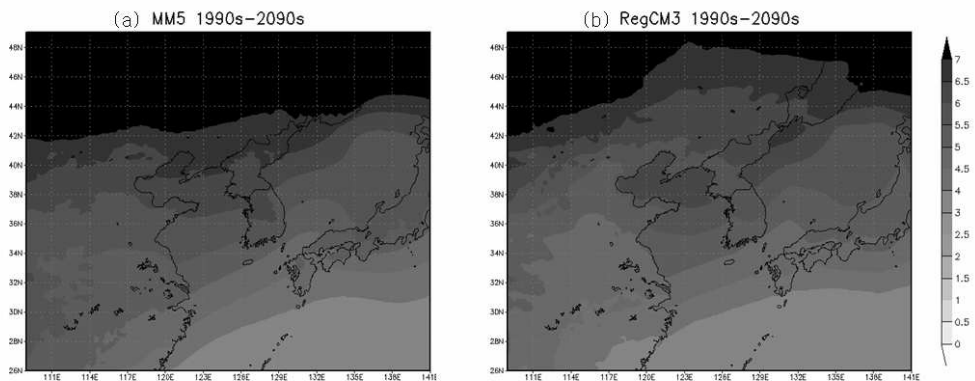


Figure 5. Regional climate warming in the (a) MM5; (b) RegCM3. Units are degree Celsius, and shaded color interval 0.5 °C.

Figure 5a - 5b는 1990년에 대한 2090년의 110 년 동안의 MM5와 RegCM3의 지역적인 기후 온난화의 공간적 분포를 나타낸다. (a)와 (b)에서 두 모델 모두 비슷한 지역적 온도 변화를 모의한다는 것을 보여준다. 지형적 특징과 관련하여 해안선과 육지에서 지표 기온의 온난화 특징이 자세하게 표현된다. 그리고 두 모델 모두, 최대 온난화는 북중국에서 발견된다. 중국의 일부지역에서 RegCM3에서 모의된 지역적 온난화가 MM5에서 모의된 지역적 온난화 보다 다소 작지만 그 외 대상 영역의 전역에 걸쳐 MM5와 RegCM의 모델 사이에 2090년대에 대한 1990년대의 온난화의 큰 규모의 패턴이 상당히 유사함을 보았다.

구체적으로 계절별 (겨울, 봄, 여름, 그리고 가을) 온난화를 알아보기 위해서 각 모델들 사이에서의 계절에 대한 지표 기온의 공간 분포에 대한 변화를 나타내었다 (Figure 6a - 6d와 Figure 7a - 7d). 두 모델에서 여름철의 동중국과 북중국의 일부지방은 MM5와 RegCM3 사이에 다소 차이를 보이는 채 지역기후를 모의하지만 그 외 계절 (봄, 가을, 그리고 특히 겨울)은 비슷한 기온 패턴의 분포를 보인다. Figure 5, 6, 그리고 7에서 CO₂에 따른 온난화 패턴인 이전 연구의 결과 즉, 고위도에서 온난화가 일반적으로 증가하고

여름보다는 겨울에 더 큰 온난화의 비슷한 특징 (Schlesinger and Mitchell, 1987)이 확인된다.

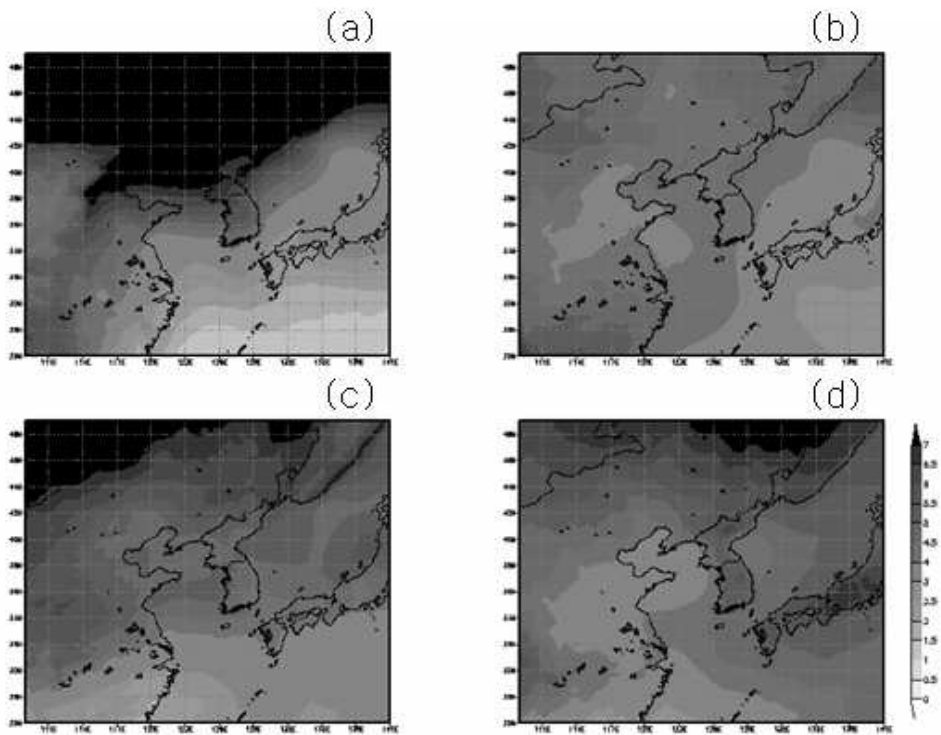


Figure 6. Surface air temperature change for MM5 run in all season. (a) Winter (DJF); (b) Spring (MAM); (c) Summer (JJA); (d) Autumn (SOC). Units are degree Celsius, and shaded color interval 0.5 °C

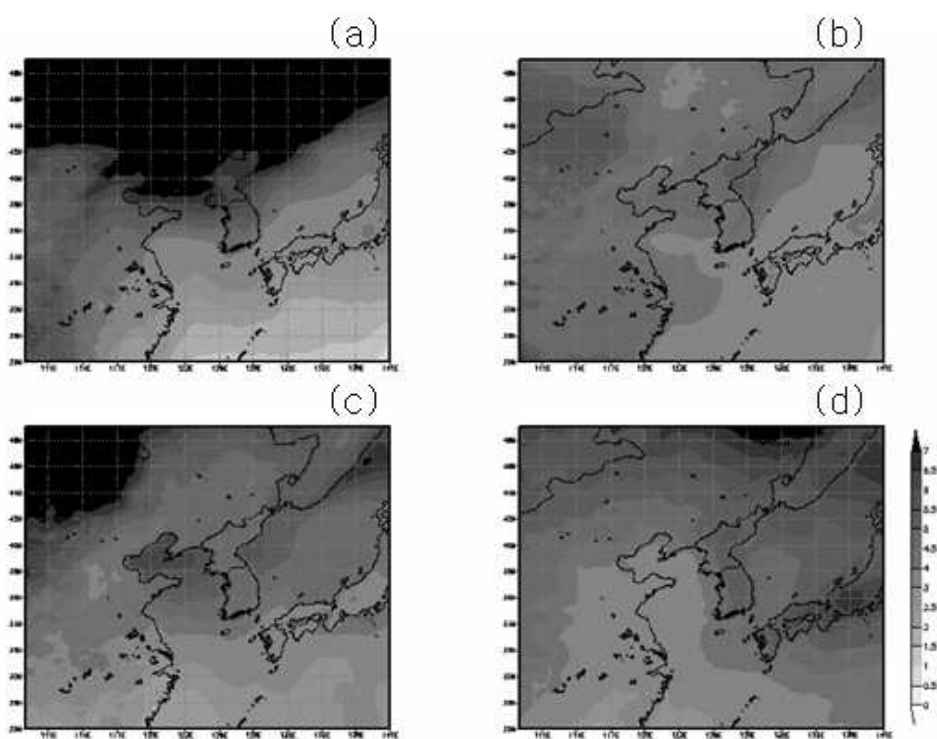


Figure 7. Surface air temperature change for RegCM3 run in all season. (a) Winter (DJF); (b) Spring (MAM); (c) Summer (JJA); (d) Autumn (SOC). Units are degree Celsius, and shaded color interval 0.5 °C.

Figure 8a - 8e는 동아시아 전 지역에 대해 110년 동안의 MM5와 RegCM3의 월과 계절의 평균 온난화에 대한 시계열이다. (a)는 월평균 온난화이고 MM5가 RegCM3 보다 크며 3월, 4월을 제외하고 1 °C 내외 범위로 거의 일정하다. 그리고 (b), (c), (d), 그리고 (e)는 겨울, 봄, 여름, 그리고 가을의 계절별 평균 온난화를 나타낸다. 각 시계열 그림의 가로축 1은 1991년부터 2091년까지를 의미하고, 2는 1992년부터 2092년까지를 의미한다. 그래서 2000년까지 10년 동안의 시간에 따른 계절별 평균 온난화를 알 수 있다. 특히 (a), (b) 그리고 (e)에서 MM5와 RegCM3 사이에 대한 온난화와 상당히 유사함을 알 수 있다. 다소 차이를 보이는 1996년과 1997년을 제외하고, 모델들 사이에 월별 온난화와 계절별 온난화 중에서 계절별 온난화가 더욱 의미 있음을 알 수 있었다.

그리고 Table 3은 1990 년대와 2090 년대의 각 10년간 계절 평균장에서 지표 기온에 대한 평균 (Mean) 온난화와 표준편차 (Std dev), 그리고 상관계수 (Corr.)로 정량적인 비교를 가능하게 한다. MM5는 겨울 (DJF), 봄 (MAM), 여름 (JJA), 그리고 가을 (SON)의 표준편차가 각각 0.84 °C, 0.71 °C, 0.49 °C, 그리고 0.44 °C이고 RegCM3은 1.08 °C, 0.76 °C, 0.49 °C 그리고 0.69 °C이다. MM5와

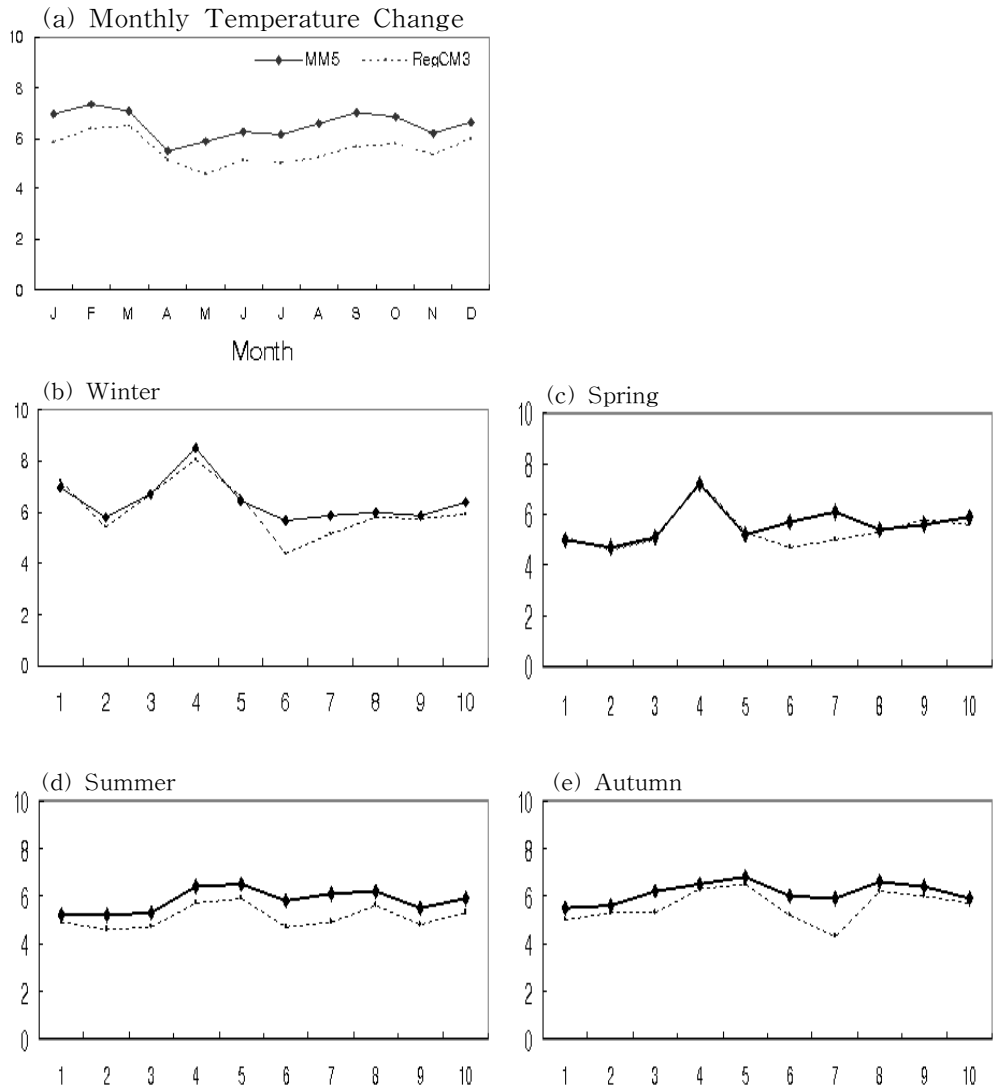


Figure 8. Area - averaged temperature change simulated by the MM5 (solid line) and RegCM3 (dotted line) over the East Asia. (a) monthly; (b) Winter; (c) Spring; (d) Summer; and (e) Autumn temperature change. Units are degrees Celsius.

RegCM3은 상당히 비슷한 표준편차를 보인다. MM5와 RegCM3 모두 겨울에 온난화가 평균 6°C 이상으로 제일 크고 그 다음으로 가을이 크다. 또 110년 동안의 MM5의 온난화는 5.99°C 이고 RegCM3의 온난화는 5.54°C 이다. 게다가 MM5와 RegCM3 사이에 겨울 (DJF), 봄 (MAM), 여름 (JJA), 가을 (SON), 그리고 1991년부터 2000년에 대한 110년 동안의 온난화의 상관계수는 0.91°C , 0.82°C , 0.89°C , 그리고 0.79°C 로 아주 높다. 그러므로 MM5와 RegCM3은 지역 온난화를 비슷하게 모의한다. 그리고 이는 앞서 분석했던 MM5와 RegCM3 사이의 기후 변화 일정한 차이를 유지하는 특징이 시간에 따라 강제되는 측면 경계 조건이 동일하게 주어졌기 때문임을 뒷받침한다.

Table 3. Surface air temperature results taken from the 10-year seasonal mean field over East Asia for the present-day and the future simulations in winter (DJF), spring (MAM), summer (JJA), autumn (SON), and winter. The standard deviation represent spatial variation over the seasonal mean field. The Correlation shows the similarity between MM5 and RegCM3. Units are degrees Celsius

		Winter	Spring	Summer	Autumn	Annual
MM5	Mean	6.42	5.59	5.81	6.13	5.94
	Std dev	0.84	0.71	0.49	0.44	
RegCM	Mean	6.10	5.37	5.12	5.57	5.53
	Std dev	1.08	0.76	0.49	0.69	
	Corr.	0.91	0.82	0.89	0.79	0.79

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 27-km 해상도에서 동아시아와 북서 태평양을 포함하는 지역에 관하여, GCM으로 동지격자화되는 MM5와 RegCM3를 1990년대와 2090년대에 수행한 결과인 각각 10년간 지역기후를 분석하였다. 그리고 두 모델은 2091년부터 2100년까지에 대한 모의를 위하여 고해상도 시나리오 자료를 이용하여 4시간 간격으로 강제되었다. 현재 기후 중 1991년 1월 1일 04 UTC와 1991년 7월 1일 04 UTC의 단기 모의 후 모델들 사이에 상호비교 결과, 각 모델에서 얻어진 동아시아에 대한 지역기후는 각 모델내의 모수화 방법에 따라 지역적, 양적 차이가 다소 존재하였다. 그리고 1990년대와 2090년대에 대한 월평균 기온 변동에 대한 분석결과, MM5와 RegCM 모델 사이에 차이가 뚜렷이 존재하였다.

그럼에도 불구하고 장기 기후 모델링에 의한 2090년대에 대한 1990년대의 온난화 증가는 MM5의 경우 5.97 °C이고 RegCM의 경우 5.54 °C이다. 이는 IPCC (2001)에서 전지구 모델에 따른 지역적 분석에서 1.5 °C - 7.9 °C의 범위로 보고하였던 것과 비교하여 볼 때, 두 모델의 온난화 증가율은 상당히 비슷하다. 그리고 실제

MM5와 RegCM3 사이의 계절별 및 1991년부터 2000년에 대한 2090년부터 2100년의 약 100년 동안 온난화에 대한 상관은 평균 85%로 상당히 높다. 이는 곧 MM5와 RegCM의 기후 변화 예측이 비슷하다고 말할 수 있다. 물론 두 종류의 지역기후 모델을 이용한 모델들 사이의 비교에서 일반적인 결론을 내리기엔 다소 무리가 있지만, 실험 이전에 설정하였던 가정에 부합된 결과로 판단된다. 그러므로 중요한 역할을 하는 측면 경계에 대한 강제가 장기 기후 모델링에 의한 지역기후변화는 모델 자체보다는 전지구 모형에서 나온 경계 조건에 크게 영향을 받을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 동일한 경계 조건하에서는 지역기후 모델의 종류 (적어도 MM5와 RegCM3)에 상관없이 지역기후 모델들에서 얻은 지역기후변화에 대한 정보라도 신뢰할 가능성이 있음을 보였다. 역학 및 물리적 구성이 다소 차이가 나는 RCM 모델을 추가하여 보다 심도 깊게 분석한다면, 앞으로 지역기후모델의 개선과 연구에 도움을 줄 것이다.

참고문헌

- 과학기술부, 2003: 온실가스 증가로 인한 한반도 주변의 기후 변화 탐지. 온실가스저감기술사업 2단계 최종 보고서, 400pp.
- Accadia, C., S. Mariani, M. Casaioli, A. Lavagnini and A. Speranza. 2003: Sensitivity of Precipitation Forecast Skill Scores to Bilinear Interpolation and a Simple Nearest-Neighbor Average Method on High-Resolution Verification Grids. *Wea. and For.*: **18**, 918-932.
- Anthes, R. A., E. Y. Hsie, and Y. H. Kuo, 1987: Description of the Penn State/NCAR mesoscale model version 4 (MM5). NCAR *Tech Note*, NCAR/TN-282+STR.
- Briegleb, B. P., 1992: Delta-Eddington approximation for solar radiation in the NCAR Community Climate Model. *J. Geophys. Res.*, **97**, 7603-7612.
- Chen, F. and J. Dudhia, 2001a: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585.
- Chen, F. and J. Dudhia, 2001b: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part II: Preliminary model variation. *Mon.*

- Wea. Rev.*, **129**, 587–585.
- Curry, J. A., and A. H. Lynch, 2002: Comparing Arctic regional climate models. *Eos, Trans, Amer. Geophys. Union*, **83**, 87.
- Davies, H. C., 1976: A lateral boundary formulation for multi level prediction models. *Quart.. J. Roy. Meteorol. Soc*, **102**, 405–418.
- Davies, H. C., 1983: Limitations of some common lateral boundary chemes used in regional NWP models. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 1002–1012.
- Dickinson, R. E., R. M. Errico, F. Giorgi and G. T. Bates, 1989: A regional climate model for western United States. *Clim. Change*, **15**, 383–422.
- Dickinson, R. E., A. Henderson–Sellers, and P. J. Kennedy, 1993: Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as couped to the NCAR Community Climate Model. *Tech. Note NCAR/TN–387 +STR*, 72pp.
- Fu, C., S. Wang, Z. Xiong, W. J. Gutowski, D. –K Lee, J. L. McGregor, Y. Sato, H. Kato, J. –W. Kim, and M. –S Suh, 2005: Regional Climate Model Intercomparison Project for Asia. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 257–266.
- Giorgi, F., and G. T. Bates, 1989: The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Mon. Wea. Res.*, **117**, 2325–2347.

- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, **3**, 941–963.
- Giorgi, F., M. R. Marinucci, and G. T. Bates, 1993a: Development of a second generation regional climate model (RegCM2), I, Boundary layer and radiative transfer processes. *Mon. Weather Rev.*, **121**, 2794–2813.
- Giorgi, F., M. R. Marinucci, G. De Canio, and G. T. Bates, 1993b: Development of a second generation regional climate model (RegCM2), II, Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Weather Rev.*, **121**, 2814–2832.
- Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). *NCAR Technical Note*, NCAR/TN-398+STR, 117pp.
- Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer, 1995: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). *NCAR Technical Note*, NCAR/TN-398+STR, 122pp.
- Hirakuchi, H. and F. Giorgi, 1995: Multiyear present-day and $2\times\text{CO}_2$ simulations of monsoon climate over eastern Asia and Japan with a regional climate model nested in a general

- circulation model. *J. Geophys. Res.*, **100**, 21105 – 21125.
- Holtstag, A. A. M., E. I. F. Debruijin, and H. L. Pan, 1990: A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1561–1575.
- Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322–2339.
- Houghton, J. T., Y. Dina, D. J. Johnson, N. Noquer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson (Eds., 2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp881.
- Hudson, D. A. and R. G. Jones, 2002: Simulation of Present-Day and Future Climate Over Southern Africa using HadAM3H, *Hadley Centre Technical Note*, 33pp.
- Leung, L. R., L. O. Mearns, F. Giorgi, and R. L. Wilby, 2003: Regional climate research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**, 89–95
- Liston, G. E., and R. A. Pielke, 2001: A climate version of regional atmospheric modeling system, *Theor. Appl. Climatol.*, **68**, 155–173

- Lynch, A. H., E. N. Cassano, J. J. Cassano, and L. R. Lestak, 2003: Case studies of high wind events in Barrow, Alaska: Climatological context and development processes, *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 719–732
- Marchenhauer, B. and Coauthors, 1998: Validation and Analysis of Regional Present-day Climate and Climate Change Simulations over Europe, MPI for Meteorology Report No. 275, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany. 87pp
- Mass, C. F., and Y. -H. Kuo, 1998: Regional real-time numerical weather prediction: Current status and future potential, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 253–263
- Mlawer, E. J., S. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave., *J. Geophys. Res.*, **102**, 16,663–16,682
- Pielke, R. A., 2002: *Mesoscale Meteorological Modeling*. Academic Press, 676 pp.
- Reisner, J. R., M. Rasmussen, and R. T. Brientjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 1071–1107.

- Roeckner, E., K. Arpe, L. Bengtsson, M. Christoph, M. Claussen, L. Dumenil, M. Esch, M. Girogetta, U. Schlese, and Schulzweida, 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate, Max-Planck-Institute for Meteorology Report No. 218.
- Row, L. W., D. A. Hastings, and P. K. Dunbar, 1995: Terrain Base Worldwide Digital Terrain Data-Documentation Manual, CD-ROM Release 1.0. National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado.
- Schlesinger, M. E. and J. F. B. Mitchell, 1987: Climate model simulations of the equilibrium climatic response to increasing carbon dioxide. *Rev. Geophys.*, **25**, 760-798.
- Simmons, A. J. and D. M. Burridge, 1981: An energy and angular-momentum conserving finite-difference scheme and hybrid coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 758-766.
- Takle, E. S., and Coauthors, 1999: Project to intercompare regional climate simulation (PIRCS): Description and initial results. *J. Geophys. Res.*, **104**, 19443-19462.
- Warner, T. T., R. A. Peterson, and R. E. Treadon, 1997: A tutorial on lateral boundary conditions as a basic and potentially serious limitation to regional numerical weather prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2599-2617.

Wu, W., A. H. Lynch, and A. Rivers, 2005: Estimating the Uncertainty in a Regional Climate Model Related to Initial and Lateral Boundary Conditions. *J. Climate*. **18**, 917–933.

감사의 글

아쉬움은 많이 남지만 지난 2년간의 석사학위과정을 마무리 하려고 합니다. 주변의 수많은 분들의 도움과 격려가 없었다면 힘든 과정이었기에 그 기쁨이 더욱 큼니다. 이 시점에서 돌이켜 보면 주어진 환경에 비해 나 자신이 얼마나 작았나 하는 생각에 고개가 절로 숙여집니다. 무엇보다도 지도 교수님을 비롯하여 논문이 완성되기까지 많은 도움을 주신 분들께 깊은 감사를 뜻을 전합니다.

학부 2학년 겨울방학을 앞두고 우연히 두드린 지구기후시스템모델링 (ICSyM)연구실 문을 통해 오재호 교수님께서서는 저의 지도 교수님이 되셨습니다. 언제나 우물 안 개구리인 저를 밖으로 인도해주신데 대해 깊이 감사드립니다. 때로는 교수님의 호된 질책과 꾸짖음에 눈물과 함께 좌절하기도 했었지만, 시간이 흐른 지금에야 그것이 저의 삶에 있어 크나 큰 초석이 되고 있음을 깨닫습니다. 이제야 교수님의 가르침이 무엇이었는데를 몸소 느끼게 되었습니다. 그리고 바쁘신 와중에도 논문 심사를 비롯하여 많은 조언과 가르침을 주신 변희룡 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 또 학부과정부터 지난 2년간의 대학원 과정에서 환경대기과학의 전반의 지식을 전달해주시고 그 깊이를 더해주시는 정형빈 교수님, 이동인 교수님, 옥곤 교수님, 권병혁 교수님께도 깊이 감사드립니다. 교수님들의 학문에 대한 열정과 사랑은 저에게 있어 많

은 귀감이 되었습니다. 그리고 타국에서 연구하느라 고생하셨던 GYAN PRAKASH SINGH 박사님, 만남의 인연과 더불어 논문까지 함께 발표하게 되어 영광입니다. 그리고 언제나 친절히 도와주시고 길을 안내해주셨던 KRIPALANI RAMESH HIRANAND 박사님께도 감사하는 말을 전하고 싶습니다.

제가 여기에 이르기까지는 지구기후시스템모델링 (ICSyM) 연구실원들이 있었기에 가능한 일이었습니다. 이 글을 통해 비로소 실험실 선배님들과 후배님들에게도 감사의 말씀을 전합니다. 항상 많은 가르침을 주고자 신경써주시는 김태국 선배님께 고마움을 전합니다. 실험실에 관심을 갖게 보여주신 선배님의 크나 큰 열정의 의미를 비로소 깨닫고 있습니다. 그리고 밖에 계시면서도 언제 실험실 올타리 안에서 따뜻한 손길로 안내해 주셔서 주저앉았다가도 다시 제자리로 올 수 있었던 것 같습니다. 그리고 언제나 살아남을 수 있는 길을 안내해 주셨던 김태훈 선배님과 취직해서도 매일 연구실에 나오셔서 등을 두드려 주셨던 이한세 선배님께도 진심으로 고마움을 전합니다. 그리고 실험실에서 가고 역할을 훌륭히 해내시고 늘 저에게도 많은 의지가 되었으며, 언제나 도움을 청하면 언제든지 들어주는 ICSyM 방장 이경민 선배님과 친절한 조민호 선배님, 그리고 H. S. Chaudhari에게도 진심으로 감사의 말씀을 전합니다. 지금은 함께 할 수 없지만 실험실 초년생 일 때 생활을 함께한 강정훈 선배님, 나의 LAPS 사수이시던 문보영 선배님, 언제나

따뜻한 손으로 감싸주셨고 늘 멀리서 걱정해주셨던 김정희 선배님과 가끔씩 논문 잘 마무리해라고 힘주던 동기 신미란 양, 늘 잘 할 수 있다고 격려해주는 예쁜 한새롬 양, 현재 타지에서 고생하는 강다연 양, 항상 곁에서 같이 고심하며 많은 도움을 주는 배은주 양, 같은 방향이라고 동고동락하는 느낌의 우수민 양에게도 고맙다는 말과 함께 좋은 결실이 있기를 바랍니다. 인생의 상담자와 같이 늘 믿음이 가고 신뢰가 가는 멋진 김옥연 선배님, 너무 고맙습니다. 늘 감싸주려고 하셨던 발전하라고 독려해 주셨으며 무엇이든지 챙겨주려 하신 데에 대해 감사드립니다. 미국 잘 갔다 오세요! ICSyM원 중에서 제일 예쁘신 민영미 선배님께도 늘 도와주시고 챙겨주셔서 정말 감사했습니다. 친 동생처럼 예뻐해 주고 밤샘을 하면 힘이 되는 정(精)을 전달해주는 오빠 이상성 군과 김상훈 군에게도 고맙다는 말과 함께 좋은 일들이 많기를 바랍니다. 옆에 있다는 이유로 다른 이들이 모르는 투정 다 받아주고 언제나 웃게 해주는 박성욱 군은 너무 많은 힘이 되었으며 앞으로도 서로서로 아껴주며 잘 지내자고 전하고 싶습니다. 여러 모로 부족한 나를 조용히 잘 따라와 주고, 때로는 많은 도움을 주고 있는 후배 박재영 군, 동기 최재원 군, 이주현 군, 실험실의 막내로서 나름대로 많은 보탬이 되고 있는 후배 고아라 양, 신입의 배민 군과 김현지 양에게도 깊은 감사의 뜻을 전하며, 앞으로 작은 힘이나마 보탬이 될 수 있도록 노력하겠습니다. 그리고 짧은 시간이었지만 실험실 후배로서

저를 잘 따라준 이수미 양과 황인경 양, 허인아 양에게도 감사의 말씀을 전하며 바라는 바대로 좋은 결실이 있기를 바랍니다.

바쁜 일과 때문에 소홀해지기도 하지만 변함없이 어릴 때부터 저와 함께 하는 친구 조송희, 정희윤, 최준화, 이강빈 양, 그리고 멀리서나마 따뜻한 위로와 격려를 아낌없이 보내주는 노해미와 김현지, 이정민, 최미영 양, 그리고 이종걸 군에게도 감사의 뜻을 전합니다. 아울러 마주칠 때마다 격려해주신 김동수 선배님과 권인혁 선배님, 김도우 선배님, 동기 정보라 양, 이영임 양에게도 감사드립니다.

마지막으로 항상 저를 믿고 아껴주시며 마음고생 하시는 세상에서 가장 사랑하는 아버지와 어머니께 진심으로 감사드립니다. 밤이면 가끔 데리러 오가고, 언제나 인생의 선배가 되는 하나뿐인 든든한 오빠에게도 마음 속 깊이 진심으로 감사드립니다. 언제나 참고 안쓰럽게 지켜봐 주시는 아버지, 어머니께 남부끄럽지 않은 멋진 딸이 되도록 노력하겠습니다. 정말 사랑합니다. 두 분께 이 논문을 받칩니다.