

미래 도시성장 시나리오에 따른 수도권 기후변화 예측 변동성 분석

Analysis of Climate Variability under Various Scenarios for Future Urban Growth in Seoul Metropolitan Area (SMA), Korea

김 현 수 · 정 주 희 · 김 유 근*
부산대학교 지구환경시스템학부

(2011년 11월 9일 접수, 2012년 3월 8일 수정, 2012년 4월 6일 채택)

Hyunsu Kim, Ju-Hee Jeong and Yoo-Keun Kim*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea

(Received 9 November 2011, revised 8 March 2012, accepted 6 April 2012)

Abstract

In this study, climate variability was predicted by the Weather Research and Forecasting (WRF) model under two different scenarios (current trends scenario; SC1 and managed scenario; SC2) for future urban growth over the Seoul metropolitan area (SMA). We used the urban growth model, SLEUTH (Slope, Land-use, Excluded, Urban, Transportation, Hill-Shade) to predict the future urban growth in SMA. As a result, the difference of urban ratio between two scenarios was the maximum up to 2.2% during 50 years (2000 ~ 2050). Also, the results of SLEUTH like this were adjusted in the Weather Research and Forecasting (WRF) model to analysis the difference of the future climate for the future urbanization effect. By scenarios of urban growth, we knew that the significant differences of surface temperature with a maximum of about 4 K and PBL height with a maximum of about 200 m appeared locally in newly urbanized area. However, wind speeds are not sensitive for the future urban growth in SMA. These results show that we need to consider the future land-use changes or future urban extension in the study for the prediction of future climate changes.

Key words : Urban climate changes, Urban Growth model, Urban growth scenarios, WRF, SLEUTH

1. 서 론

기후변화가 사회 전 분야에 걸쳐 주요 이슈로 부각

되면서 미래 기후예측자료에 대한 관심과 요구가 높아지고 있으며 학계에서는 이러한 기후예측자료를 활용하여 기후변화의 영향과 적응에 관한 다양한 학제간 연구를 진행 중에 있다(Pryor and Barthelmie, 2010; Stöckle *et al.*, 2010; Cheung *et al.*, 2009; Lafferty, 2009; Parry *et al.*, 2009). 수치예보 연구자들은 다양한 분야

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-510-2282, E-mail : kimyk@pusan.ac.kr

의 미래 기후예측자료에 대한 수요 증가에 따라 더욱 높은 정확도와 해상도의 결과를 도출해야 할 필요를 느끼고 있으며 그 방면으로 현재보다 더욱 향상된 물리식의 개발(Cavallo *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2008; Hong and Lim, 2006), 모델링 기법의 향상(Lin *et al.*, 2008; Rockel and Woth, 2007) 그리고 고해상도 초기 입력장 및 배경장의 구축(Jeong and Kim, 2009)과 같은 다양한 방법을 모색하고 있다. 하지만 많은 연구자들의 이러한 노력에도 불구하고 미래 기후예측을 함에 있어 미래의 토지피복이 어떻게 변화될 것인가에 관한 사항은 고려되지 못하고 있는 실정이다. 토지피복의 변화에 따라 반사도, 수분량, 거칠기 길이 등의 물리적 성질이 다르게 나타나 열 환경 구조와 바람장 변화 모의에 기여하는 효과도 달라지는 것을 감안하였을 때(Kim, 2007; Kim *et al.*, 2002; Gallo *et al.*, 1996), 미래 기후예측에는 미래 토지피복의 변화 또한 고려되어야 할 필요가 있다.

이미 국외에서는 미래 토지피복변화를 기후예측에 적용함으로써 예측 결과를 향상시키기 위한 노력이 진행되어 왔으며(Hartranft *et al.*, 2003; Jantz *et al.*, 2003) 도시성장 시나리오의 도입을 통해 다양한 도시성장의 가능성을 반영하기도 하였다(Solecki and Oliveri, 2004).

국내에서도 도시성장모델을 통해 미래 도시성장을 예측하고 그 결과를 기후예측 모델링에 적용하여 미래 도시화 효과에 따른 기후예측의 불확실성을 줄이고자 한 연구가 있었다(Kim *et al.*, 2010). 하지만 도시성장이 과거의 도시성장 패턴에 따라 미래에도 진행된다는 획일적인 가정 하에 한가지의 도시성장만을 예측하였으므로 실제 다양한 발전 가능성이 있는 도시성장에 대한 적응력은 떨어지는 한계를 내포하고 있다.

이에 본 연구에서는 다양한 도시성장 시나리오를 구축하고 적용하여 도시성장모델을 수행하였으며 그러한 시나리오에 따라 예측된 미래 도시성장 결과를 지역규모 모델링에 적용함으로써 미래 도시성장 시나리오에 따라 미래 기후변화 예측값이 어떠한 변동성을 가질 수 있는지, 그리고 그러한 변동성에 따른 예측값의 오차가 미래 기후예측 자료를 활용하는 다양한 학제간 연구에 어떻게 영향을 미칠지를 알아보고자 한다.

2. 모델구성 및 연구방법

2.1 모델 구성

본 연구의 수행을 위해 사용된 모델은 크게 두 가지로 구분된다. 우선 도시성장예측을 위해 사용된 SLEUTH (Slope, Land-use, Excluded, Urban, Transportation, Hill-shade) 도시성장모델은 미국 산타바바라 대학의 Clarke 교수가 개발한 UGM (Urban Growth Model)을 확장하고 개선한 모델이며(Clarke *et al.*, 1997), 샌프란시스코, 워싱턴, 뉴욕과 같은 미국의 주요 대도시와 포르투갈의 리스본, 호주의 시드니 등에서 효과적으로 수행되어 각종 정책입안 및 도시계획, 환경변화 등의 연구에 활용되었다(Jantz *et al.*, 2004). SLEUTH는 셀룰라 오토메타를 이용한 도시성장 모델로 도시의 확장과 토지이용변화에 중점을 둔다. 셀룰라 오토메타란 수학적 방법을 통해 복잡한 자연계의 현상을 모델링하는 방법으로, 임의의 시점에서 임의의 개체가 정해진 공간 내에서 주변 셀의 상태와 규칙에 따라 다음 시점의 상태로 변화하는 연산을 반복적으로 수행하는 방법이다(Wolfram, 1984). SLEUTH 모델은 과거의 입력자료를 측정(calibration)하여 최적의 5가지 성장계수(controlling coefficients; dispersion, breed, spread, slope, road-gravity)를 도출하고 구해진 성장계수에 따라 4가지의 성장유형(Growth types; Spontaneous, New spreading center, Edge, Road-influenced)을 가정하여 미래 도시성장을 예측한다(Jantz *et al.*, 2010; Silva and Clarke, 2002; Clarke *et al.*, 1997). Kim *et al.* (2010)은 SLEUTH 모델을 통해 수도권 지역의 미래 도시성장을 과거 25년(1975~2000년) 동안의 도시성장 패턴만을 고려하여 단편적으로 예측한 바 있다. 본 연구에서는 대상지역인 수도권에 대해 그림 1과 같이 모델 영역을 설정하였고 Kim *et al.* (2010)의 연구에서 도출된 성장계수를 동일하게 적용하였다. 입력자료는 표 1과 같이 구축하였으며 해상도는 선행 연구의 400m에서 30m로 개선하였다. 또한 「2020 수도권 광역도시개발계획」(국토해양부 등, 2009)을 반영한 도시성장 시나리오를 추가하여 도시성장모델링을 수행함으로써 도시성장의 여러 가능성을 함께 고려하였다.

미래 도시성장 시나리오에 따른 수도권 기후변화 예측 변동성을 분석하기 위해 사용된 모델인 WRF (Weather Research and Forecasting)는 완전 압축성 비

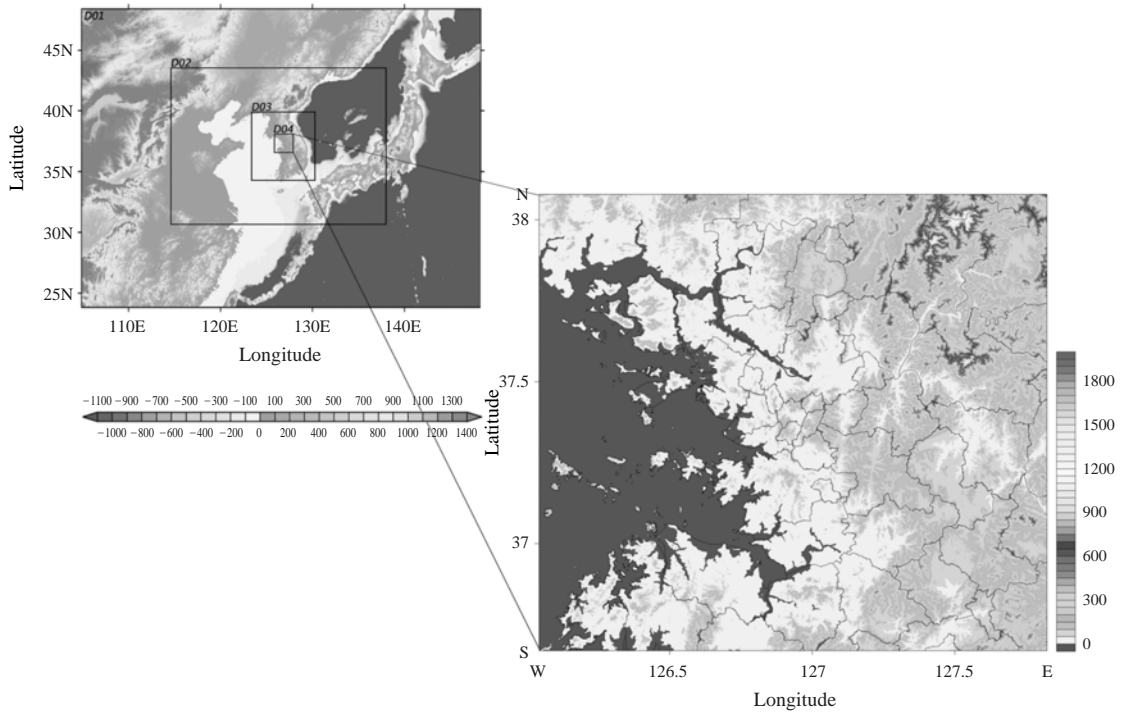


Fig. 1. Map showing some grid nests (domains 1~4) used for WRF (left side) and SLEUTH (right side) modeling.

Table 1. Details of input dataset for SLEUTH model.

Type of input data	Source of data	Years
Slope	NGII DEM file	2001
Land-use	Landsat data	1975, 1995
Excluded	WAMIS Shape file	2001
Urban	Landsat data	1975, 1980, 1985, 1990, 1995
Transportation	ITS-SNL Shape file	1975, 1980, 1985, 1990, 1995
Hill-shade	NGII DEM file	2001

NGII: National Geographic Information Institute, ITS-SNL: Intelligent Transportation Systems-Standard Nodes Link, WAMIS: Water Management Information System

Table 2. Details of the grids and the physics options used in the WRF model.

	D01	D02	D03	D04
Horizontal grid	31 × 27	55 × 43	52 × 52	40 × 40
Resolution (km)	108	36	12	4
Vertical grid	28 Layers			
Microphysics	WRF Single-Moment 6-class			
Cumulus	Kain-Fritsch	None	None	None
Boundary layer	YSU			
Land surface layer	Thermal diffusion			
Short-wave radiation	Dudhia			
Long-wave radiation	RRTM			

정수계 (fully compressible non-hydrostatic) 방정식을 사용하고 수평 격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하며 연직 격자는 높기와 지형에 근거하여 새로 추가된 Eulerian 질량 좌표계 (mass-based terrain following coordinate)를 사용한다 (ARW, 2008). 모델링 수행을 위한 도메인 정보와 물리식은 표 2에 제시하였으며, 기상장은 1° × 1°를 갖는 NCEP/NCAR의 FNL

(Global Final Analysis) 6시간 재분석 자료와 독일 막스플랑크 연구소 (MPI, Max Plank Institute for meteorology) 대기-해양접합 모델인 ECHAM5/MPI-OM1 A1B 시나리오에 대한 6시간 단위 기후예측 전구자료를 사용하였다. 대기 대순환 모델인 ECHAM5는 T63 (약 1.875°)의 수평해상도와 L31의 연직층을 가지며 해양 대순환 모델인 MPI-OM1은 중위도에서 2.5°, 고위도에서 10~50 km의 가변적인 남북방향 해상도를

가지며 동서로는 2.5°, 연직으로는 L23층을 가진다 (Müller and Roeckner, 2008; Roeckner *et al.*, 2003).

2. 2 연구방법

그림 2는 본 연구에 사용된 모델 및 시나리오를 구조화한 것으로 크게 두 가지 주요 연구분야로 나뉜다. 우선 미래 기후예측 모델에 적용할 미래 도시 성장을 예측하기 위해 SLEUTH 도시성장 모델을 활용하여 시나리오에 따른 미래 도시성장의 변화(Scenario 1과 2)를 예측하였다.

시나리오 1(SC1; Scenario 1)은 과거의 도시성장

패턴이 미래에도 동일하게 진행될 것이라는 시나리오, 시나리오 2(SC2; Scenario 2)는 표 3의 「2020 수도권 광역도시개발계획」의 주요 내용을 반영한 시나리오로서 SLEUTH 모델을 통해 예측된 미래 시나리오 결과와 현재의 토지피복과의 차이를 알아보기 위해 환경부 공간정보서비스의 중분류 토지피복자료(EGIS, Environmental Geographic Information System)를 비교 대상으로 선정하여 기후예측모델인 WRF의 초기 입력장으로 선정하였다. 이렇게 선정된 3가지의 토지피복(EGIS, SC1, SC2)을 바탕으로 모델의 역학적 규모축소능력을 검증하고 현재와 미래의 기후가

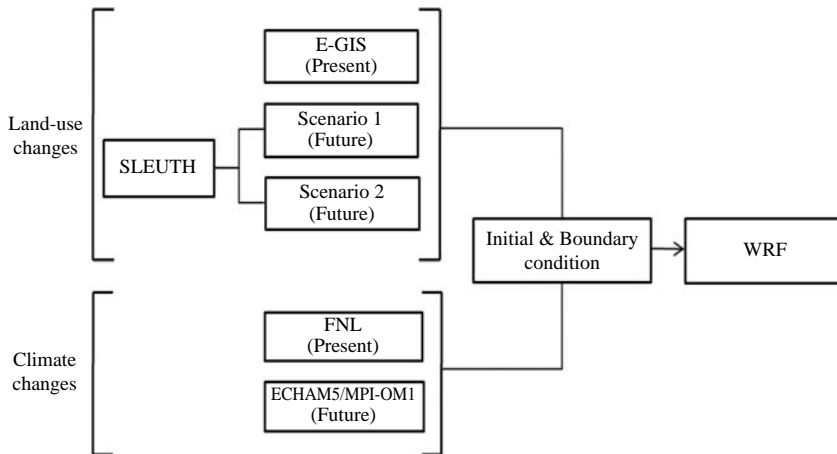


Fig. 2. A process diagram for SLEUTH model and WRF model with different scenarios.

Table 3. Goal of regional development and summary of limited development district by 「The 2020 plan of City Development in Seoul Metropolitan area」.

Regions	Brief summaries
Central region	<ul style="list-style-type: none"> · The preservation of Han River waterfront and the city's main green space. · The plan for the low-carbon green residential complex in Gwacheon. · The enhancement of the function for the logistics, The arrangement of the region around Han river in Hanam.
Eastern region	<ul style="list-style-type: none"> · The enhancement of the function of the art, culture, residential for the intellectual. · Low-density and eco-friendly development of the restricted area in Namyangju. · The enhancement of the function of the logistics and flow in Gwangju and Icheon.
Western region	<ul style="list-style-type: none"> · The management of the green space through the Incheon. · The prevention of the urban sprawl in Incheon, Gimpo and Siheung. · The prevention of the urbanization in the restricted area in Siheung.
Southern region	<ul style="list-style-type: none"> · The control of the residential development and the management of the old town in Suwon. · The urban growth management for the water quality in Pyeongtaek, Hwaseong, and Ansan. · The prevention of the urban sprawl in eastern Suwon and western Yongin. · The prevention of the urban sprawl in Hwaseong and Pyeongtaek.

얼마나 차이가 있는지를 알아보기 위해 배경장으로 FNL (Global Final Analysis) 재분석 자료를 현재의 기상장으로 선정하였고 ECHAM5/MPI-OM1의 기후예측 전구자료를 미래의 기상장으로 사용하여 향상된 지역규모의 미래 기후변화를 예측하고자 하였다. 앞서 설명한 두 가지 주요 요소(land-use changes, climate changes)를 기준으로 수도권의 도시성장 시나리오에 따른 미래 기후변화의 변동성을 알아보기 위해 표 4와 같이 기후예측 모델링 실험을 설계하였다. EXP1은 현재 기상장(2006~2010)과 현재 토지피복(2005)을 적용한 것으로 EXP2~4의 각 조건에 따라 기후변화가 어떻게 진행되었는지 분석 가능한 비교실험이다. EXP2는 미래기상장(2046~2050)과 현재 토지피복을 적용한 것으로 기후변화 예측에 미래 도시성장 변화가 고려되지 않은 실험이다. EXP3과 EXP4는 미래 기상장과 미래 도시성장(2050)이 적용된 것으로 EXP3은 SC1에 의해 예측된 토지피복 결과, EXP4는 SC2에 의해 예측된 토지피복 결과를 적용한 실험이다. 모델링 기간은 종관적으로 비교적 안정한 일수가 많아 도시화 효과가 뚜렷하게 나타나고 토지피복에 따른 기온 및 PBL Height의 변화 같은 기후변동성을 파악하기 좋은 10월을 대상으로 하였으며 실험의 각 연도에 대해 독립적으로 한 달씩 장기적분을 수행하여 그 결과를 5년 평균하였으며 spin-up time은 한 달이라는 장기적분을 고려하여 10일로 설정하였다.

3. 시나리오별 도시성장 예측

3.1 도시성장 시나리오 구성

다양한 도시성장의 가능성을 미래 도시성장 예측에 반영하기 위해 본 연구에서는 표 5와 같이 미래 도시 성장에 관한 두 가지 시나리오를 설정하였다. SC1은 과거의 도시성장 패턴이 미래에도 지속된다는 가정에 의해 설정된 시나리오로서 도시 성장계수를 비롯한 모든 모델 입력자료는 Kim *et al.* (2010)의 연구와 동일하게 설정하였다. SC1에서 사용된 도시 성장계수는 SLEUTH 모델에 입력되는 자료 6가지(Slope, Land-use, Excluded, Urban, Transportation, Hill-shade)를 이용하여 세 번의 Calibration (Coarse, Fine, Final)을 순차적으로 실행하여 성장계수의 범위를 설정하였으며 각 Calibration 과정에서 설정되는 값의 범위

Table 4. Experiments design based on the initial and boundary conditions (land-use and climate data type).

Experiments	Climate data	Land-use data
EXP1	NCEP/FNL (2006~2010)	2005 (Present, EGIS)
EXP2	ECHAM5/MPI-OM1 (2046~2050)	2005 (Present, EGIS)
EXP3	ECHAM5/MPI-OM1 (2046~2050)	2050 (Scenario 1, SC1)
EXP4	ECHAM5/MPI-OM1 (2046~2050)	2050 (Scenario 2, SC2)

는 OSM (Optimum SLEUTH Metric)을 통해 구한 통계값을 이용해 선정되었다(표 6).

SC2는 사회·정책적인 측면이 고려된 미래 도시성장 예측 시나리오로서 수도권 지역의 미래 도시정책 중 가장 대표적인 계획이라고 할 수 있는 「2020 수도권 광역도시개발계획」을 반영하여 미래 도시성장을 예측한 것이다. 「2020 수도권 광역도시개발계획」은 수도권을 구성하는 주요 3개 지자체(서울광역시, 인천광역시, 경기도) 및 국토해양부가 함께 추진하고 있는 계획으로서 수도권을 권역별로 나누어 가까운 미래에 쾌적하고 효율적인 수도권 개발을 유도하는 것을 목표로 하고 있다. 특히, 도시가 밀집되어있는 서울시는 중부권역으로 분류하여 한강 수변 및 도시 내 주요 녹지를 보전하고 서울시 인근의 과천은 저탄소 녹색 주거단지로 개발하는 등 각 권역의 주요 도시간의 연담화 방지 및 특정 관리지역 설정을 통한 저밀도 친환경개발을 유도하고 있다. 「2020 수도권 광역도시개발계획」에는 파주와 양주를 비롯한 북부권역도 포함하고 있으나 군사적인 요인으로 토지피복 자료 수집이 어려워 도시성장 모델링에서 제외하였고 그 밖의 지역은 각 권역별 개발 계획을 바탕으로 개발제한구역의 재설정과 같은 방법을 통해 SLEUTH 모델에 들어가는 입력자료를 수정하여 도시성장모델링을 수행하였다.

3.2 도시성장예측 결과 및 분석

3.1에서 설정한 시나리오를 바탕으로 SLEUTH 도시성장 모델을 이용하여 시나리오별 미래 수도권의 도시성장을 예측하였으며 연도 및 시나리오에 따른 도시성장의 차이를 비교하기 위해 현재의 도시분포

(붉은색, 2005년)와 미래의 도시성장에 의해 확장된 지역의 분포(흰색, 2050년)를 제시하였다(그림 3(a)와 (b)). 그림 3(c)는 SC1과 SC2의 시가화 지역의 차이를 공간적인 분포로 나타낸 것으로 붉게 나타난 영역은 SC2보다 SC1에서 도시가 더 성장하고 시나리오의 영향을 많이 받은 지역에 해당된다. 지역별로 분석하였을 때, 대부분이 시가화지역인 서울과 인근의 과천, 하남 등이 위치한 수도권 중부권역의 경우는 2000년 현재, 이미 도시화가 상당부분 진행된 곳이 많아 전체 권역에서 연도별, 시나리오별 도시성장 차이가 적었으나 일부 도시 내부의 나지, 습지 등이 도시화가 되어 토지피복이 변경되었다. 반면, 인천과

시흥, 김포 등이 위치한 수도권 서부권역은 내륙의 녹지축 보존 및 관리, 두 개 이상의 도시가 확장함에 따라 인접도시가 연결되어 하나의 거대도시가 형성되는 연담화 방지, 개발제한구역의 도시적 토지이용 차단과 같은 정책적 효과에 의해 도시 성장이 영향을 받은 것을 알 수 있다. 또한 수원과 용인, 평택과 화성 등이 위치한 수도권 남부권역 또한 「2020 수도권 광역도시개발계획」의 영향을 받아 시나리오에 따른 도시성장이 뚜렷하게 차이가 남을 알 수 있다. 마지막으로 남양주, 이천, 광주 등이 위치한 수도권 동부권역은 산악지역이 많고 경사도 등이 커서 도시성장에 제약이 따르므로 연도 및 시나리오별 도시성장의 차이가 뚜렷하지 않다. 그림 4는 모델링 영역에 대한 도시의 비율을 통해 연도별 시나리오에 따른 도시성장을 비교한 것으로 모델링 시작 연도인 2000년부터 2050년까지 도시의 비율은 2배 이상 증가하였으며 SC2보다 SC1의 도시비율이 뚜렷하게 큰 것으로 나타났다. 하지만 이러한 시나리오에 따른 도시비율의 차이는 2000년부터 계속 증가하다가 2030년 이후부터 전체 면적의 약 2%로 꾸준하게 유지되었으며

Table 5. Summary of future urban growth scenarios in SMA.

Scenarios (SC)	Featured contents
SC1	Future urban growth adjusting urban growth ratios during last 25 years
SC2	Future urban growth adjusting 「The 2020 plan of City Development in Seoul Metropolitan area」

Table 6. Calibration results summary.

	Growth parameter				
	Dispersion	Breed	Spread	Slope	Road-gravity
Coarse Calibration					
Range	1 ~ 100	1 ~ 100	1 ~ 100	1 ~ 100	1 ~ 100
Step	25	25	25	25	25
Monte Carlo iterations=5					
Total number of simulations=3119					
Compare statistic=0.35					
Population statistic (r ²)=0.98					
Fine Calibration					
Range	50 ~ 75	25 ~ 100	25 ~ 50	0 ~ 25	0 ~ 100
Step	5	15	5	5	20
Monte Carlo iterations=8					
Total number of simulations=7775					
Compare statistic=0.73					
Population statistic (r ²)=0.98					
Final Calibration					
Range	65 ~ 85	40 ~ 55	30 ~ 50	0 ~ 10	20 ~ 60
Step	4	3	4	2	8
Monte Carlo iterations=10					
Total number of simulations=6479					
Compare statistic=0.93					
Population statistic (r ²)=0.98					
Final coefficient values	79	48	36	10	21

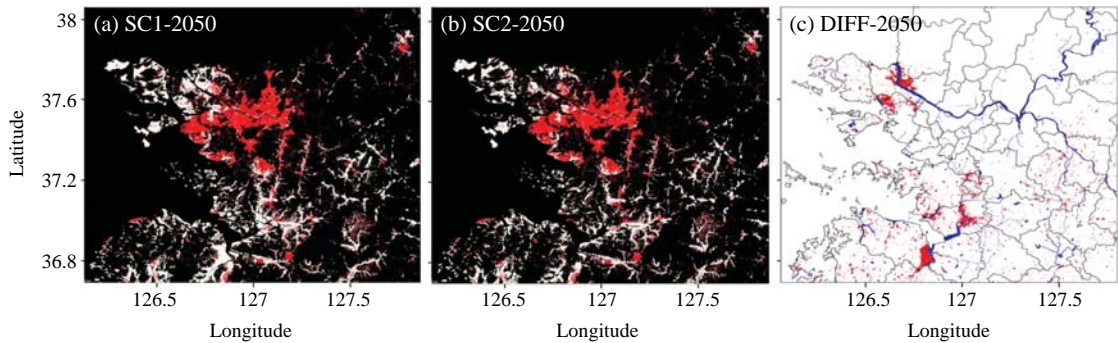


Fig. 3. Spatial distributions of urban (red) in 2000 and urban expansions (white) in 2050 simulated by the SLEUTH under two different scenarios (SC1; Scenario 1 (first panels), SC2; Scenario 2 (second panels)) and spatial difference (DIFF) between two different scenarios in the Seoul Metropolitan area.

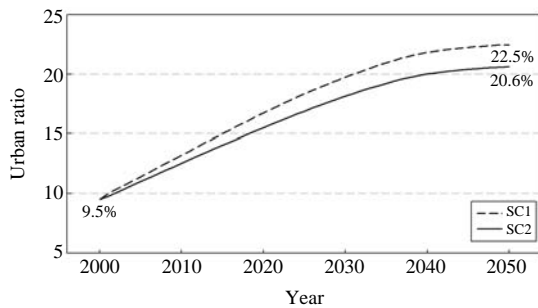


Fig. 4. Timely variations in urban ratio during 50 years (2000~2050) under two different scenarios (SC1 and SC2).

2040년을 기점으로 전체 면적에 대한 도시비율의 증가가 둔화되었다. 이를 통해 과거 35년(1975~2000년)의 패턴으로 도시가 지속적으로 성장할 때와 정책적인 요소가 반영되었을 때의 도시성장이크게 차이를 알 수 있었고 이러한 시나리오에 따른 도시 성장의 차이는 미래기후예측 결과에 큰 영향을 줄 것으로 사료된다.

4. 지역기후 모형을 통한 도시성장예 따른 기후변동성 분석

4.1 지역기후모형의 검증

시나리오에 따른 도시성장 모델 결과를 적용한 미래 기후예측결과를 도출하기에 앞서 예측 도구로 사

용된 지역기후모형의 역학적 규모축소 능력에 대한 평가를 실시하였다. 그림 5는 표 4의 EXP1에 해당되는 것으로 각 도메인에 대하여 850 hPa 바람 벡터(wind vector)와 500 hPa의 지오폠펜설 고도(GPH; Geo-Potential Height)를 2006년 10월 한 달간 시간 평균한 것이다. 일반적으로 하위 도메인으로 내려갈수록 지형적인 영향에 의한 변수의 지역적인 변화가 더 커지므로 지형의 영향을 비교적 덜 받고 종관적인 영향을 잘 나타낼 수 있는 변수인 850 hPa의 wind vector와 500 hPa의 GPH를 분석하였다. 850 hPa wind vector를 보았을 때, Domain 1에서 한반도 주변의 평균 바람장은 경기도를 비롯한 중부지역은 북서계열이, 전라도를 비롯한 남부지역은 북북서 계열이 우세하며 이러한 경향은 Domain 2와 3에서도 나타난다. 특히 연구 대상지역인 수도권은 Domain 1~4까지 전 영역에서 북서계열의 평균 바람장이 나타나 WRF 모델의 역학적 규모축소가 잘 되고 있음을 알 수 있다. 500 hPa의 GPH는 한반도와 연구 대상지역을 중심으로 표기를 하여 값의 분포가 일관되게 나타나는지를 알아보았다. Domain 1에서 한반도는 5,780~5,600 m의 범위에 위치해 있으며 특히 연구대상지역인 수도권은 5,720~5,700 m의 범위에 있다. 따라서 GPH의 분포는 Domain 2~4에 걸쳐서 균일하게 나타나며 하위 도메인으로 갈수록 더욱 상세하게 나타나는 경향을 보이고 있다.

또한 각 도메인에 대하여 Domain 4 영역에 대한 평균 해면기압(SLP; Sea Level Pressure) 값을 시계열로 분석하고 각각의 결과에 대한 통계값을 분석하였다

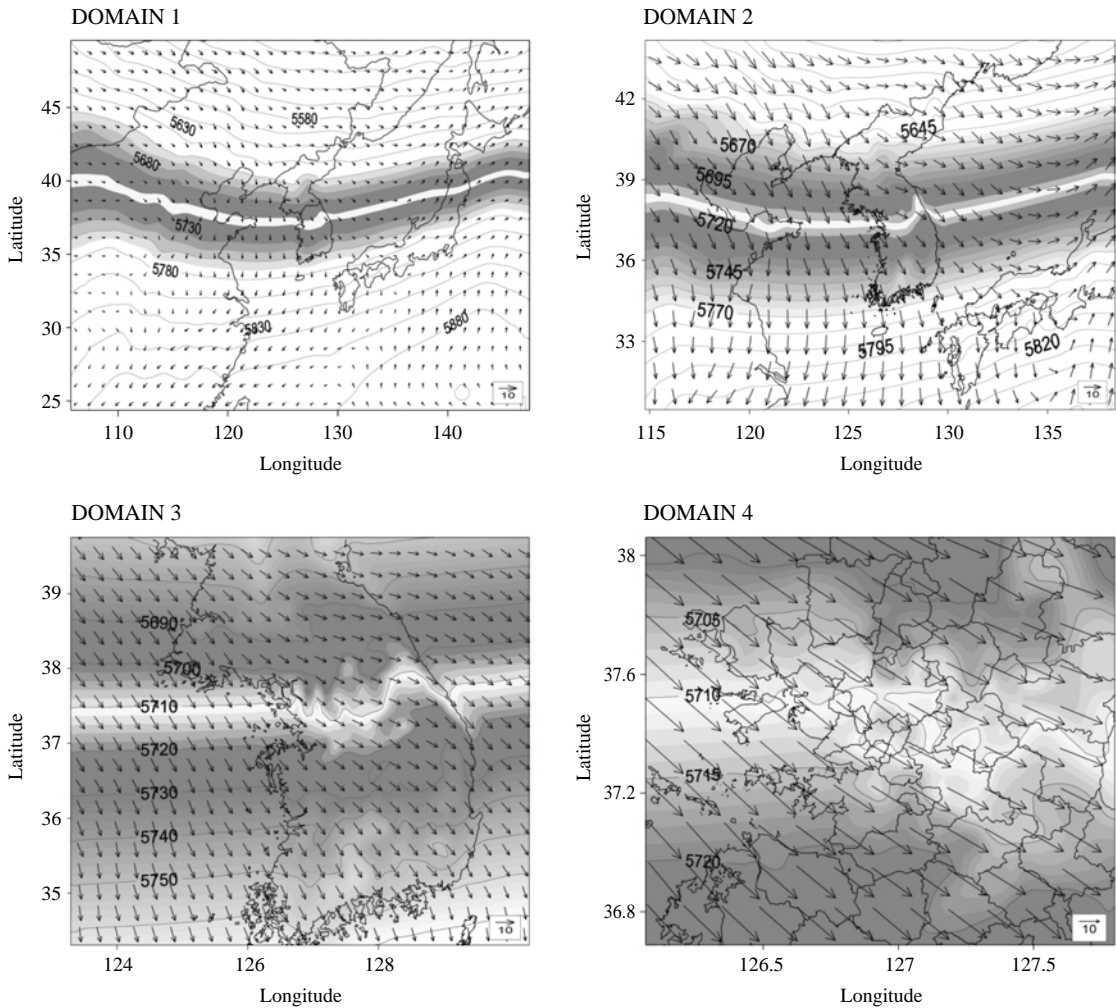


Fig. 5. Spatial distributions of 850 hPa winds ($m s^{-1}$; vectors) and 500 hPa geopotential heights (m; contour) in four domains to evaluate dynamic downscaling performance of WRF model.

(그림 6). 시계열에서 각 도메인에 대한 SLP는 10월 한 달에 대하여 특정일을 제외하고 대체로 패턴이 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있으며 통계값을 분석해 보았을 때, 도메인 간의 SLP는 R값이 0.75에서 0.93으로 비교적 높은 양의 상관관계를 갖고 있으며 R^2 의 경우도 약 0.6 이상의 값을 보이고 있어 WRF 모형의 역학적 규모 축소 능력이 우수하다는 사실을 뒷받침해주고 있다.

4.2 도시성장에 따른 기후변동성 분석

4.1에서 검증된 WRF 모형의 역학적인 규모축소

능력을 바탕으로 ECHAM5/MPI-OM1 초기장을 이용하여 수도권 지역의 미래 기후를 분석하였으며 (EXP2~EXP4) 도시성장 시나리오가 미래기후에 미치는 변동성, 즉, 도시성장 정도에 따른 도시화 효과를 분석하기 위해 각 실험간의 공간적인 차이를 알아보았다(DIFF1~DIFF3). DIFF1은 EXP3과 EXP2의 차이로서 현재와 동일한 패턴으로 2050년까지 도시가 성장하였을 때의 기후변동성을 의미하며, DIFF2는 EXP4와 EXP2의 차이로서 「2020 수도권 광역도시개발계획」이 반영되어 2050년까지 도시가 성장하였을 때의 기후변동성을 의미한다. 마지막으로

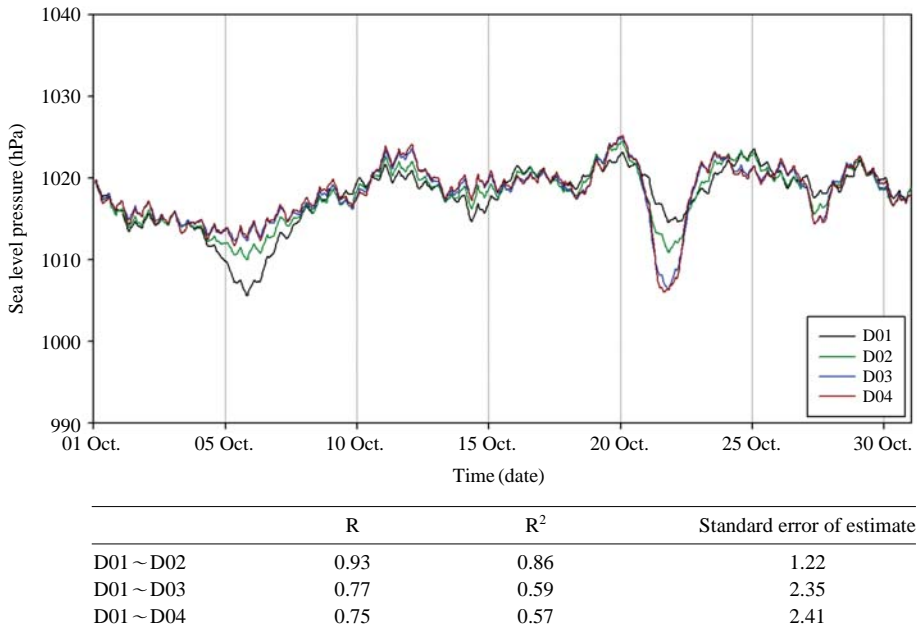


Fig. 6. Time series graph of the spatially averaged values of sea level pressure for last domain (D04) area on each domain.

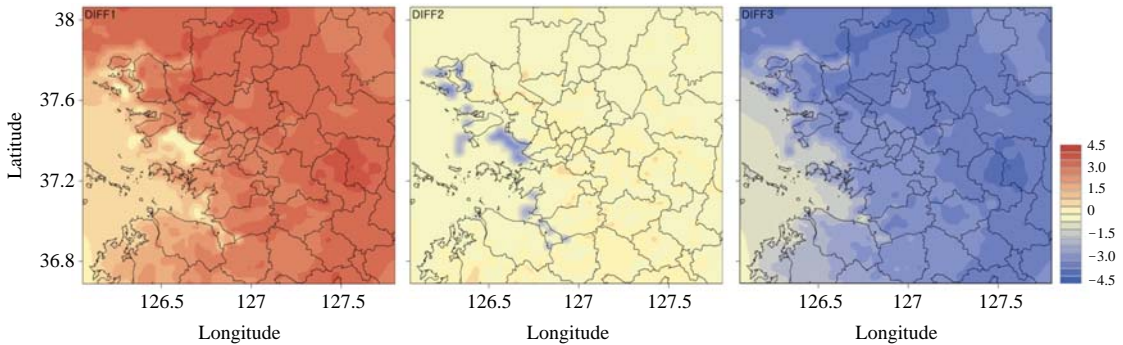


Fig. 7. Differences of Surface Temperature (K) among the three different scenarios; DIFF1 (Scenario 1-Present case), DIFF2 (Scenario 2-Present case), DIFF3 (Scenario 2-Scenario 1).

DIFF3은 EXP4와 EXP3의 차이이며 도시성장을 효율적으로 관리하였을 때와 무분별하게 발전하도록 방치하였을 때의 기후변동성 차이 즉, 도시성장 차이가 기후변동성에 미치는 차이를 나타낸 것이다(그림 7~9). 그림 7은 지표 기온의 변화를 나타낸 것으로 DIFF1의 경우 해안가 인근 특정지역을 제외하고 수도권 전역에서 기온이 크게 상승하는 것으로 나타났

으며 지역에 따라 최대 4°C 이상의 기온차가 발생하는 것으로 나타났다. 도시가 확장된 지역으로 기온의 증가가 두드러졌고 특히, 농경지와 녹지가 많은 교외 지역의 도시성장은 기존 도시지역의 도시성장보다 평균기온의 차이를 증가시켰다. 이는 기존 도시지역보다 교외지역이 도시성장에 더 민감하게 반응하는 것으로 사료된다. 반면, DIFF2의 경우 기온 상승폭이

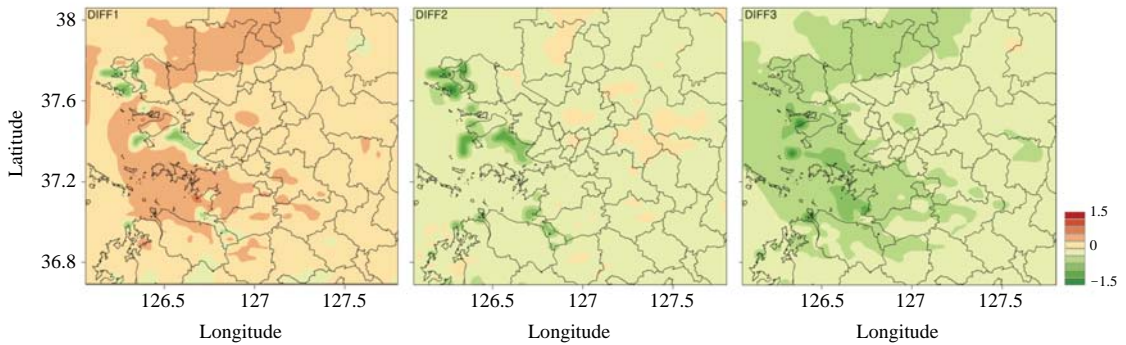


Fig. 8. Same as in Fig. 7, but for the Wind Speed ($m s^{-1}$).

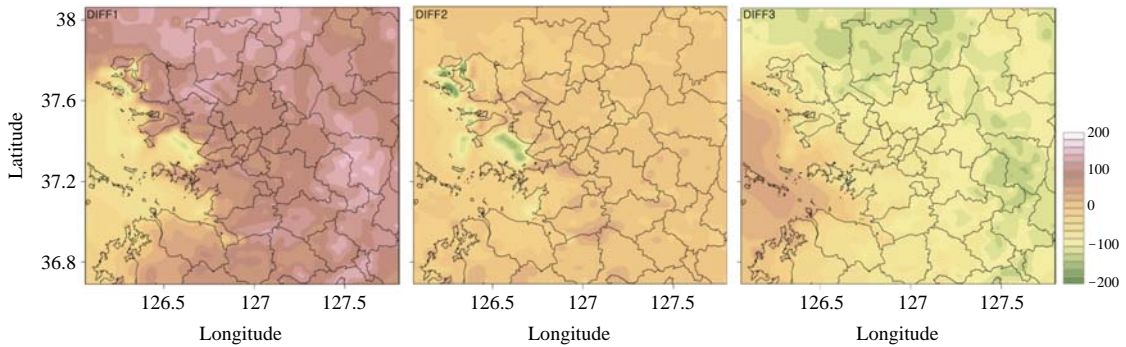


Fig. 9. Same as in Fig. 7, but for the PBL Height (m).

0.0~1.0°C로서 DIFF1에 비하여 크지 않았으며 일부 해안가 지역은 -2.5°C까지 기온이 하락하는 것으로 분석되었다. DIFF3은 도시성장 차이에 따른 변동성을 알아보기 위한 것으로 미래 도시성장을 제어할 경우 수도권 지역의 기온의 감소가 뚜렷한 것을 알 수 있었으며 그 차이는 최대 3.5°C를 보였다. 그림 8은 수도권 풍속의 공간분포 차이를 나타낸 것으로 DIFF1과 DIFF2 모두 도시성장에 따른 풍속의 변화가 뚜렷하지 않았다. 또한 DIFF3에서는 공간적으로 0~0.5 $m s^{-1}$ 의 풍속 감소가 나타났지만 풍속 감소가 나타나는 지역이 도시가 성장한 지역과 일치하는 경향이 낮고 오히려 해안가 지역의 풍속 감소가 크게 나타나 풍속은 도시성장에 의한 민감도가 낮음을 알 수 있다.

그림 9는 대기경계층 고도(PBL Height)의 차이로서 DIFF1과 DIFF2 모두 도시성장에 따른 PBL Height의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 또한 그림 7과 같이

교외지역의 PBL Height의 증가가 기존의 도시지역보다 더 크게 나타나 교외지역이 도시성장에 대한 민감도가 더욱 뚜렷함을 알 수 있으며 도시성장을 제어할 경우 평균 PBL Height의 차이가 100~200 m 가량 낮게 나타나 도시성장이 어떻게 진행되는가에 따라 지역규모의 대기 순환에 주는 영향이 차이가 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 SLEUTH 도시성장 모델을 이용하여 미래 수도권의 도시성장을 시나리오 별로 예측하였으며 그 결과를 WRF 지역기후모형에 적용하여 도시성장에 따른 미래 기후예측의 변동성을 분석하였다. 도시성장 시나리오는 도시성장패턴이 지속적인 경

우(SC1)와 사회·정책적 측면이 고려된 경우(SC2)로 구분하였으며 도시성장 예측 결과, 시가화 지역이 밀집되어있는 수도권 중부권역과 산악지형에 의해 경사도가 큰 동부권역은 시나리오에 따른 도시성장 차이가 적었다. 하지만 농경지 등 평야가 많아 성장 가능성이 높은 남부권역과 서부권역은 녹지축 보존 및 관리, 각 도시의 연담화 방지, 개발제한구역의 도시적 토지이용 차단과 같은 정책적 효과 반영에 따른 도시성장 차이가 나타났으며 전체 면적에 대한 도시의 비율도 최대 2.2%까지 차이가 났다.

시나리오별 예측된 미래 도시성장을 적용하기 위한 지역기후모형은 WRF 모델이며 초기입력자료는 ECHAM5/MPI-OM1 미래 기상장(2046~2050년)이 사용되었다. 850 hPa wind vector와 500 hPa의 GPH, 그리고 공간 평균된 SLP 값의 비교분석을 통해 모델의 규모축소 능력을 검증하였다. 이를 바탕으로 시나리오별 미래 도시성장을 변수로 두고 실험을 설계하여 도시성장에 따른 기후 변동성을 분석하였다. 그 결과, 기온과 PBL height는 도시가 성장한 지역을 중심으로 값의 변화가 뚜렷하였고 도시성장 시나리오에 따라 기온은 최대 4°C 이상, PBL height는 최대 200 m 가량 차이가 나타나 도시성장에 대한 민감도가 큰 것으로 나타났다. 하지만 풍속은 도시성장에 따른 풍속의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않아 도시성장에 대한 민감도가 낮은 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 무분별한 도시성장과 계획된 도시성장 간의 차이가 지역규모의 기후변화 특히, 기온의 상승에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 하지만 사용된 초기 입력장의 해상도가 낮다는 점과 10월 한 달에 대해서만 분석하였다는 점은 본 연구의 한계라 할 수 있다. 향후에 보다 더 나은 해상도의 초기 입력장의 적용과 장기적분을 통해 한계를 보완한다면 현재보다 더욱 향상된 미래 상세기후 예측 결과를 도출할 수 있을 것으로 생각되며 지역규모 기후자료를 사용하는 타 분야의 학문에도 현재보다 더 나은 기후예측 결과를 제공할 수 있을 것이라 사료된다. 또한 수도권 광역도시개발계획과 무관하게 진행될 수 있는 돌발적인 신도시 개발 및 구 시가지 개발과 같은 사업계획은 단순히 도시개발의 측면에서만 바라볼 것이 아니라 기후변화 영향이라는 중·장기적인 측면에서도 함께 고려될 필요가 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2012-0002992).

참 고 문 헌

국토해양부, 서울특별시, 인천광역시, 경기도 (2009) 2020년 수도권 광역도시계획 - '09. 6. 변경사항 반영-, 129pp.

ARW (2008) Weather Research & Forecasting Version 3 Modeling System user's Guide, Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research.

Cavallo, S.M., J. Dudhia, and C. Snyder (2011) A multilayer upper-boundary condition for longwave radiative flux to correct temperature biases in a mesoscale model, *Monthly Weather Review*, 139, 1952-1959.

Cheung, W.W.L., W.Y.L. Vicky, L.S. Jorge, K. Kelly, W. Reg, and P. Daniel (2009) Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios, *Fish and Fisheries*, 10(3), 235-251.

Clarke, K.C., S. Hoppen, and L. Gaydos (1997) A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area, *Environment and Planning B: Planning and Design.*, 31(2), 251-271.

Gallo, K.P., D.R. Easterling, and T.C. Peterson (1996) The influence of land use/land cover on climatological values of the diurnal temperature range, *Journal of Climate*, 9, 2941-2944.

Hartranft, S.T.A., T.N. Carlson, and K.C. Clarke (2003) Satellite and ground-based microclimate and hydrologic analyses coupled with a regional urban growth model, *Urban Remote Sensing*, 86(3), 385-400.

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.

Jantz, C.A., S.J. Goetz, and M.K. Shelley (2004) Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore/Washington metropolitan area, *Environment and Planning B*, 31, 251-271.

- Jantz, C.A., S.J. Goetz, D. Donato, and P. Claggett (2010) Designing and implement a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model, *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, 1-16.
- Jeong, J.H. and Y.K. Kim (2009) The application of high-resolution land cover and its effects on near-surface meteorological fields in two different coastal areas, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(5), 432-449. (in Korean with English abstract)
- Jiang, X.Y., C. Wiedinmyer, F. Chen, Z.-L. Yang, and J.C.F. Lo (2008) Predicted impacts of climate and land-use change on surface ozone in the Houston Area, *J. Geophys. Res.*, 113, D20312, doi: 10.1029/2008 JD 009820.
- Kim, H., J.H. Jeong, I.B. Oh, and Y.K. Kim (2010) Prediction of future climate change using an urban growth model in the Seoul metropolitan area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(4), 367-379. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.J. (2007) Effects of various conditions for numerical analysis on urban climate, *J. of Architectural Institute of Korea*, 6, 297-304. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.K., Y.S. Moon, I.B. Oh, and Y.K. Lim (2002) A numerical simulation for thermal environments by the modification of land-use in Busan, *Journal of Korean Society of Atmospheric Environment*, 18(6), 453-463. (in Korean with English abstract)
- Lafferty, K.D. (2009) The ecology of climate change and infectious diseases, *Ecology*, 90(4), 888-900.
- Lin, C.-Y., F. Chen, J.C. Huang, W.-C. Chen, Y.-A. Liou, W.-N. Chen, and S. Liu (2008) Urban Heat Island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan, *Atmospheric Environment*, 42, 5635-5649.
- Müller, W.A. and E. Roeckner (2008) ENSO teleconnections in projections of future climate in ECHAM5/MPI-OM, *Climate Dynamics*, 31(5), 533-549, DOI: 10.1007/s00382-007-0357-3.
- Parry, M.L., A. Nigel, B. Pam, D. David, F. Samuel, H. Chris, K. Sari, N. Robert, S. David, T. Richard, and W. Tim (2009) Assessing the costs of adaptation to climate change: a review of the UNFCCC and other recent estimates, IIED, UK, 100pp.
- Pryor, S.C. and R.J. Barthelmie (2010) Climate change impacts on wind energy: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 430-437.
- Rockel, B. and K. Woth (2007) Extremes of near-surface wind speed over Europe and their future changes as estimated from an ensemble of RCM simulations, *Climatic Change*, 81, 267-280.
- Roeckner, E., G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornblueh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida, and A. Tompkins (2003) The atmospheric general circulation model ECHAM5-Part 1: Model description., Max-Planck-Institute for Meteorology, Germany.
- Silva, E.A. and K.C. Clarke (2002) Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal, *Computers, Environment and Urban Systems*, 26, 525-552.
- Solecki, W.D. and C. Oliveri (2004) Downscaling climate change scenarios in an urban land use change model, *J. Environ. Management*, 72(1-2), 105-115.
- Stöckle, C.O., L.N. Roger, H. Stewart, B. Jay, G. Gary, B. Rick, W. Mathew, and K. Chad (2010) Assessment of climate change impact on Eastern Washington agriculture, *Climate Change*, 102, 77-102.
- Wolfram, S. (1984) Universality and complexity in cellular automata, *PhysicaD*, 10, 1-35.