

# 도시성장모델을 적용한 수도권 미래 기후변화 예측

## Prediction of Future Climate Change Using an Urban Growth Model in the Seoul Metropolitan Area

김현수 · 정주희 · 오인보<sup>1)</sup> · 김유근\*

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>울산대학교 환경보건센터

(2010년 4월 29일 접수, 2010년 7월 21일 수정, 2010년 8월 11일 채택)

Hyunsu Kim, Ju-Hee Jeong, In-Bo Oh<sup>1)</sup> and Yoo-Keun Kim\*

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

<sup>1)</sup>*Environmental Health Center, University of Ulsan, Korea*

(Received 29 April 2010, revised 21 July 2010, accepted 11 August 2010)

### Abstract

Future climate changes over the Seoul metropolitan area (SMA) were predicted by the Weather Research and Forecasting (WRF) model using future land-use data from the urban growth model (SLEUTH) and forecast fields from ECHAM5/MPI-OM1 GCM (IPCC scenario A1B). Simulations from the SLEUTH model with GIS information (slope, urban, hill-shade, etc.) derived from the water management information system (WAMIS) and the intelligent transportation systems-standard nodes link (ITS-SNL) showed that considerable increase by 17.1% in the fraction of urban areas (FUA) was found within the SMA in 2020. To identify the effects of the urban growth on the temperature and wind variations in the future, WRF simulations by considering urban growth were performed for two seasons (summer and winter) in 2020s (2018~2022) and they were compared with those in the present (2003~2007). Comparisons of model results showed that significant changes in surface temperature (2-meter) were found in an area with high urban growth. On average in model domain, positive increases of 0.31°C and 0.10°C were predicted during summer and winter, respectively. These were higher than contributions forced by climate changes. The changes in surface temperature, however, were very small expect for some areas. This results suggested that surface temperature in metropolitan areas like the SMA can be significantly increased only by the urban growth during several decades.

**Key words** : Climate change, Urban growth model, IPCC, Seoul metropolitan area, SLEUTH

### 1. 서 론

지난 100년(1906~2005)년간 전 지구적인 평균기

온의 선형적인 상승경향은  $0.74 \pm 0.18^\circ\text{C}$ 였으며, 최근 50년(1956~2005)의 기온 상승경향은 지난 100년의 거의 두 배에 달했다(IPCC, 2007). 특히 우리나라는 1900년대 초 근대적인 기상관측이 시작된 이래, 100년 동안 약  $1.5^\circ\text{C}$ 의 높은 평균기온 상승을 보였으며

\*Corresponding author.

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

이러한 추세는 전 지구적인 기온상승 추세의 약 두 배에 달하는 것이다(기상연구소, 2004). 이처럼 지구 온난화는 기정사실화된 것으로서 이미 사회 각 분야에서 이와 같은 변화에 얼마나 능동적으로 대처하는가 하는 문제를 주요 관심사로 여기고 있으며 기후 변화 정도를 정량적으로 알기 위해 다양한 연구를 진행해 왔다(Hansen *et al.*, 2006; Folland *et al.*, 2001). 그러한 과정에서 기후예측모델이 전구규모 혹은 중 규모규모의 미래 기후변화에 대해 신뢰할만한 예측 결과를 제공하는 하나의 유용한 수단이 될 수 있다는 것을 제시하였다(Dickinson *et al.*, 2004; Jones *et al.*, 1995).

하지만 이러한 전구규모 대기대순환 모형은 수백 km에 이르는 낮은 공간해상도로 인해 우리가 주로 생활하는 영역인 도시규모의 기후를 예측하는 데 한계가 있다. 공간해상도와 관련된 문제는 근본적으로 컴퓨팅 능력이 뒷받침되어야 하는 부분이기도 하지만 궁극적인 원인은 모델이 대기 내의 수많은 작은 규모의 과정들을 명시적으로 표현하지 못하고 근사적으로 모의되기 때문이다(Leung *et al.*, 2003; Giorgi and Marinucci, 1996). 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위하여 대기대순환 모형의 결과를 중규모 기상 모델의 초기 배경장 및 경계조건으로 적용하는 역학적 규모축소 기법을 통해 공간해상도를 높이고 대기 내의 상세 물리과정을 모사함으로써 지역 또는 도시규모 기후변화를 예측하고자 하는 노력이 다각적으로 시도되고 있다(Ahn and Cha, 2005; Solecki and Oliveri, 2004).

지역/도시규모의 기후변화는 자연적인 요인뿐만 아니라 도시성장에 따른 인공열과 인구증가, 산업발달로 인한 온실가스과 에어로솔의 방출과 같은 인위적인 요인 및 지형적인 영향에 의해 그 변동성이 더욱 크게 나타난다(Choi *et al.*, 2007; Stott *et al.*, 2004; Tett *et al.*, 1999). 특히 도시성장에 의한 토지피복의 변화는 지역/도시규모의 기후에 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나로서 토지피복 상태에 따라 반사도, 수분량, 거칠기 길이, 단위용적당 지표면 열적 관성 등의 물리적 성질이 다르게 나타나며 열환경 구조와 바람장 변화 모의에 기여하는 효과도 다른 것으로 알려져 있으며(Jeong and Kim, 2009) 이와 관련하여 기후변화에 미치는 영향과 중요성에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다(Kim, 2007; Kim *et al.*, 2002; Gal-

lo *et al.*, 1996; Bacci and Maugeri, 1992). 하지만 지역/도시규모 기후변화 예측에 있어 미래의 토지피복변화에 따른 변동성을 고려하는 것은 중요한 부분임에도 미래 토지피복변화를 예측하는 데 어려움이 존재하여 그동안 충분한 연구가 수행되지 못하였다.

일반적으로 미래 토지피복변화 예측은 도시성장모델(urban growth model)과 같은 수치연산 도구를 이용하여 이루어지며 도시성장 예측결과는 도시계획 및 도시정책 입안 등에 사용된다. Jeong *et al.* (2001)은 도시성장모델에 도시성장 추세와 물리적 요소를 함께 고려하여 수도권 지역의 도시성장을 예측하였으며, Kim *et al.* (2004)은 의사결정트리 기법을 적용하여 도시성장 패턴을 찾아낸 후, 이를 셀룰라 오토메타(CA, Cellular Automata) 기법을 이용하는 도시성장 모델에 적용하여 인천광역시 지역의 도시성장을 예측하였다. 또한 Kim *et al.* (2007)은 도시계획 및 도시성장 관리정책 개념을 예측모형에 통합하는 도시성장에측 방법을 제시하고 개발된 모형을 바탕으로 도시성장 유형을 구분하는 시나리오별 분석을 시도하기도 하였다.

본 연구에서는 이와 같이 미래 토지피복 변화와 도시성장 예측에 관한 연구가 대부분 도시계획적 측면에서만 중요하게 다루어져 기상학적 측면에서 활용된 연구가 매우 부족하다는 점과 선행 연구를 통해 알려진 토지피복(특히, 도시성장)의 분포가 도시규모 기상 및 기후에 미치는 영향이 크다는 점을 바탕으로 도시성장모델을 이용하여 수도권 지역의 미래 도시성장을 예측하고, 그 결과를 지역기후모델에 적용함으로써 미래 도시성장에 따른 변동성을 고려한 수도권 지역의 기후변화를 예측하였다.

## 2. 모델개요 및 연구방법

### 2.1 도시성장모델

SLEUTH 도시성장모델은 미국 캘리포니아 주립대학(Santa Barbara)의 Clarke 교수가 개발한 UGM(urban growth model)을 확장하고 개선한 모델이며(Clarke and Gaydos, 1997), 미국의 주요 대도시와 포르투갈의 리스본, 호주의 시드니 등에서 효과적으로 수행되어 각종 정책 입안 및 도시계획, 환경변화 등의 연구에 활용되었다(Jantz *et al.*, 2003). SLEUTH

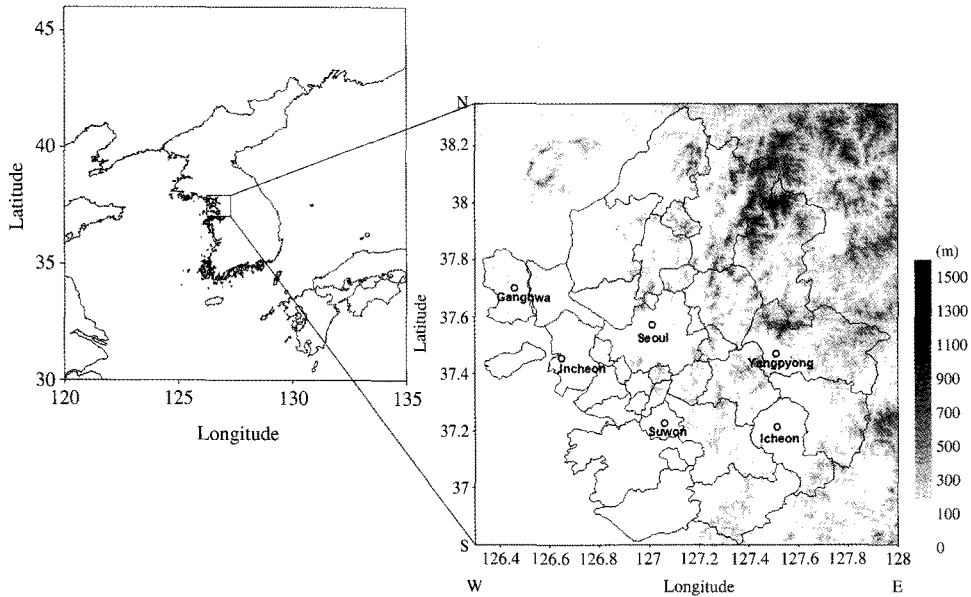


Fig. 1. Map showing 6- and 2 km grid nests (domains 3~4) used for WRF modeling. The contours and open circles (right panel) indicate the altitude (m) of terrain and meteorological stations within the SMA, respectively.

모델은 입력 자료로 쓰이는 Slope, Land-use, Excluded, Urban, Transportation, Hillshade의 첫 글자를 연결하여 지어진 이름이며, 셀룰라 오토메타를 이용한 도시성장모델로 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). 초기에는 임의의 개체 주변에서만 국지적인 변화가 나타나지만 이러한 과정을 무수히 반복(Monte Carlo Iteration)하게 되면 전체적 차원의 모습을 구성하게 된다(Jeong *et al.*, 2001). SLEUTH 모델은 도시가 성장해 나가는 유형을 Spontaneous Growth (SG, 자발적 성장), New spreading center Growth (NG, 확산형 성장), Edge Growth (EG, 도시주변 성장), Road-influenced Growth (RG, 도로유발 성장)의 4가지로 구분하고 각 단계별 과정을 순차적으로 거쳐 도시성장을 예측하며 성장계수(controlling coefficient; dispersion, breed, spread, road-gravity dispersion)의 영향을 받는다. 모델의 입력자료는 동일한 해상도의 Gray-scale GIF 이미지 형태로 구성되며 각 cell 값이 '0'이

면 해당 값이 없는 것을 의미하며 '0 < x < 255' 범위의 값이면 해당 값이 존재하는 것을 의미한다(Kim *et al.*, 2010).

도시성장모델을 적용한 수도권은 1970년대 이후 본격적인 산업화와 도시화로 인해 한반도에서 토지 피복변화가 가장 뚜렷한 지역 중 하나이며 2009년 3월 국토해양부 및 수도권을 구성하는 3개 지자체에서 발표한 '2020 수도권 광역도시계획 변경안'의 개발제한구역 조정 등에 관한 내용(국토해양부, 서울특별시, 인천광역시, 경기도, 2009)에서 향후에도 10여 년간 도시성장에 의한 지속적인 토지피복 변화가 예상되는 지역이다. 연구 대상지역은 그림 1과 같으며 수도권 지역의 도시성장 변화만을 기후모델에 적용하기 위해 도시성장모델에서는 수도권 이외 지역(강원도 및 충청도 일부)은 제외하였으며, 표 1과 같이 각각의 자료를 0.4 km 격자간격으로 재격자화하여 SLEUTH 모델의 입력자료로 구축하였다. 토지피복도, 도시 분포도 자료는 USGS(U.S. Geological Survey)와 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 Landsat 프로젝트에 의해 관측된 자료를 바탕으로 구성된 국토해양부 국가 수자원관리정보 시스템(WAMIS; Water Management Information System)

Table 1. Characteristics of input dataset for SLEUTH model.

Input data	Data types*	Years
Slope	NGII DEM	2001
Land-use	Landsat MSS, TM, ETM	1975, 1995
Excluded	WAMIS Shape file	2001
Urban	Landsat MSS, TM, ETM	1975, 1980, 1985, 1990, 1995
Transportation	ITS-SNL Shape file	1975, 1980, 1985, 1990, 1995
Hillshade	NGII DEM	2001

\*MSS: Multispectral Scanner; TM: Thematic Mapper; ETM: Enhanced Thematic Mapper

Table 2. Matrix of the probability (out of 100) that land-use of WAMIS in 2000 (top row) would change to another land-use class of SLEUTH in 2000 (left column).

SLEUTH	WAMIS							
	Water	Urban	Barren	Wetland	Grass	Forest	Agri-land	Total
Water	1.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.3	0.4	2.1
Urban	0.3	6.1	0.2	0.0	0.2	0.9	0.6	8.3
Barren	0.1	0.8	0.1	0.0	0.1	0.8	0.8	2.7
Wetland	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1	0.9	0.9	2.5
Grass	0.0	0.7	0.2	0.1	0.2	1.5	1.3	4.0
Forest	0.1	2.5	0.8	0.2	2.4	33.0	10.7	49.7
Agri-land	0.3	2.1	1.0	0.2	1.6	12.0	13.5	30.6
Total	1.9	12.7	2.5	0.7	4.6	49.4	28.2	100.0

의 5년 주기 대분류 토지피복도 자료를 사용하였다. 개발제한구역도는 WAMIS에서 제공하는 상수원 보호구역도와 국립공원도 자료를 이용하였으며, 음영기복도와 경사도는 국토지리정보원(NGII; National Geographic Information Institute)이 1:5,000 수치지형도를 바탕으로 작성한 DEM(Digital Elevation Model) 자료를 사용하였다. 개발제한구역도, 음영기복도, 경사도는 10년 마다 구축되어지는 자료의 한계로 부득이 2001년 자료를 사용하였다. 도로분포도는 지능형 교통체계 표준노드링크 관리시스템(ITS-SNL; Intelligent Transportation Systems-Standard Nodes Link)에서 1:50,000으로 구축된 전국 시도, 지방도, 일반국도, 고속도로 자료를 이용하여 5년 단위 자료로 생성하였다.

일반적으로 SLEUTH 모델은 4개 이상의 도시분포도 및 도로분포도, 2개의 토지피복도 자료를 입력자료로 받아들이며 그 외의 자료는 하나의 자료만 필요로 하므로 자료의 개수가 각각 다르다. 따라서 본 연구에서는 불연속적인 과거 20년(1975~1995)의 입력자료를 이용하여 미래 30년(2000~2030)에 대해 1년 주기로 수도권의 토지피복변화를 예측하였다.

도시성장모델 결과의 예측 정확도 평가를 위해 2000년의 WAMIS 자료는 입력자료로 사용하지 않고 검증자료로 활용하였으며, 두 자료의 위치 일치도 분석을 수행하였다. 표 2는 모델 입력자료인 WAMIS 토지피복자료가 도시성장모델에 의해 어떤 토지피복상태로 변화되었는지를 보여주는 위치 일치도 분석이다. 토지피복 중 도시의 경우 관측값은 12.7%, 모델값은 8.3%를 나타내어 모델이 도시영역을 다소 과소평가하였다. 하지만 두 자료가 일치하는 비율은 6.1%로서 비교적 높은 정확도(72.9%)로 수도권지역의 도시성장을 예측하는 것으로 평가되었다. 산림과 농지의 경우는 비교적 유의한 수준의 예측결과를 보여주었으나 수역·나지·습지·초지의 경우는 상대적으로 일치율이 낮게 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 기존의 토지피복(도시를 제외한 나머지 토지피복)은 유지한 상태에서 미래 도시성장분포만을 수정하여 지역기후모델에 적용하였다.

## 2.2 지역기후모델

수도권 기후변화를 예측하기 위하여 사용된 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델은 완전 합

**Table 3. Details of the grids and the physics options used in the WRF model.**

	D01	D02	D03	D04
Horizontal grid Resolution (km)	65 × 65	76 × 76	91 × 91	61 × 61
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			

**Table 4. Experiment designs according to different land-use and initial condition.**

Experiment No.	Land-use	Initial condition
EXP1	2005 (present)	2005s (2003~2007)
EXP2	2005 (present)	2020s (2018~2022)
EXP3	2020 (urban growth)	2020s (2018~2022)

축성 비정수계 (fully compressible non-hydrostatic) 방정식을 사용하며, 수평 격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하고 연직 격자로는 높이와 지형에 근거하여 새로 추가된 Eulerian 질량 좌표계 (mass-based terrain following coordinate)를 사용한다 (ARW, 2008). 모델링 수행을 위한 도메인 정보와 물리식은 표 3에 제시하였으며, 초기 및 경계조건은 독일 막스플랑크 연구소 (MPI, Max Plank Institute for meteorology) 대기-해양접합 모델의 결과인 ECHAM5/MPI-OM1 A1B 시나리오의 6시간 단위 기후예측 전구자료를 사용하였다. 대기 대순환 모델인 ECHAM5는 T63 (1.875°)의 수평해상도와 L31의 연직층을 가지며 해양 대순환 모델인 MPI-OM1는 중위도에서 2.5°, 고위도에서는 10~50 km의 가변적인 남북방향 해상도를 가지며 동서로는 2.5°, 연직으로는 L23 층을 가진다.

수도권의 미래 기후변화를 추정하고 도시성장예에 의한 효과를 분석하기 위하여 초기장과 토지피복 분포를 기준으로 표 4와 같이 실험을 설계하였다. EXP1은 현재 기상장 (2003~2007년)과 현재 토지피복도 (2005년)를 적용한 실험이고 미래 기후변화 정도를 비교·분석하기 위하여 설계하였다. EXP2는 미래 기상장 (2018~2022년)과 현재 토지피복도를 적용한 실험으로 기후변화 예측에 미래 도시성장 변화가 고려되지 않은 방법이라 할 수 있다. EXP3는 미래 기

상장과 미래 토지피복도 (2020년)가 적용된 경우로서 미래 도시성장을 고려한 수도권 기후 예측 실험에 해당한다. 즉 EXP3와 EXP1의 차이는 전 지구적인 기후변화와 도시성장 효과가 복합된 결과이고, EXP2와 EXP1의 차이는 전 지구적인 기후변화, EXP3와 EXP2의 차이는 도시성장이 미래 기후변화에 미치는 영향으로 추정할 수 있다. 모델링 기간은 여름과 겨울을 대표하고 최한기와 최서기의 도시화효과를 잘 파악할 수 있는 1월과 8월을 선정하였으며 실험의 각 연도에 대해 독립적으로 한 달씩 장기적분을 수행하여 그 결과를 5년 평균함으로써 평균적인 기후값을 제시하였다.

지역기후모형을 이용하여 기상이나 기후를 예측하는 것은 초기 배경장인 대순환 모델의 결과에 크게 의존하므로 (Palmer, 1999) 우선 본 연구에서는 ECHAM5/MPI-OM1 A1B 예측자료의 적합성과 특성을 판단하기 위하여 과거 5년 (2003~2007년)의 1월과 8월에 대하여 NCEP/NCAR의 FNL (Global Final Analysis) 6시간 재분석 자료와 기상청에서 관측하는 기상대 (70개)와 자동기상관측 (345개) 자료의 지상 2 m 기온에 대해 공간분포를 비교·분석하였다 (그림 2). 1월의 ECHAM5 예측자료 (J-ECHAM)는 FNL 분석자료 (J-FNL)에 비해 자료의 해상도가 낮으므로 기온의 분포가 선형적으로 나타나 J-FNL이 1월의 관측값 (J-OBS)을 상대적으로 잘 반영하고 있다. 두 초기장의 차이를 정량적으로 분석해 보았을 때, 한반도 동부 내륙은 최대 10.8°C 과대 모의하였고, 서해안 일부 지역은 최대 6.3°C 과소 모의하는 것으로 나타났다. 8월의 경우 ECHAM5 예측자료 (A-ECHAM)와 FNL 분석자료 (A-FNL) 모두 실제 관측값 (A-OBS)보다 4~6°C 가량 높게 나타나 실제 관측값과 차이를 보였다. 두 배경장의 정량적인 차이를 분석해 보았을 때, 내륙지역은 A-ECHAM5가 A-FNL보다 약 1°C 과대 모사하고 있으며 해양은 반대로 약 1°C 과소 모사하고 있다. 이처럼 1월과 8월의 초기장분석을 통해 예측장인 ECHAM5 자료가 분석장인 FNL, 관측자료와 다소 차이를 보임을 확인하였다. 하지만 수평해상도가 1.875°인 ECHAM5 자료가 1°의 수평해상도를 갖고 있는 FNL보다 낮다는 점과 이러한 낮은 해상도로 인해 ECHAM5 모델에 한반도 지형이 제대로 반영되지 못한 점 그리고 FNL과 달리 관측자료가 반영되지 않았다는 점 등을 복합적으로 고려

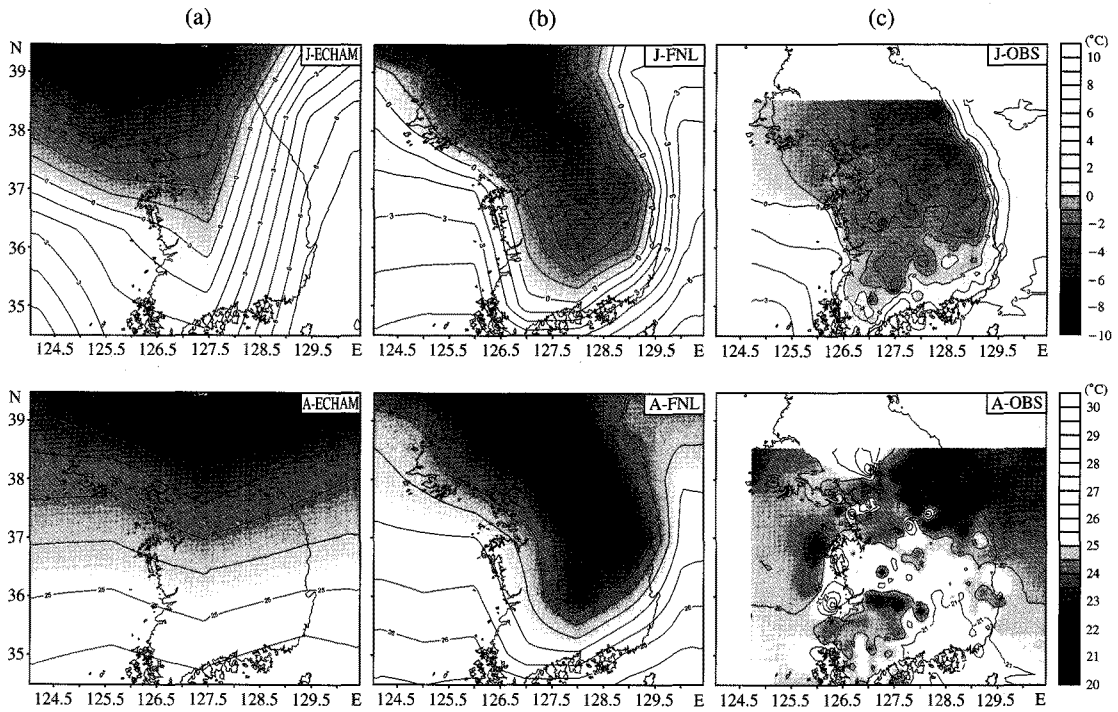


Fig. 2. Spatial distributions of average temperature (2 m AGL) in January (top panels) and August (bottom panels) during 5 years (2003~2007) produced by (a) ECHAM5/MPI-OM, (b) FNL and (c) ASOS/AWS.

해 보았을 때, ECHAM5 모델이 기온 분포를 비교적 잘 예측하고 있다고 사료되며 역확적인 규모축소 연구에 ECHAM5 모델 결과가 초기장으로 유효하다고 판단된다.

지역기후모델의 규모축소 능력에 대한 연구는 다양하게 진행되어 왔으며, 완벽한 측면 경계조건이 주어진다 하더라도 모델의 규모축소 능력에 따라 각 변수의 변질이 나타난다는 선행연구가 있다(Xue *et al.*, 2007). 따라서 본 연구에서는 기온 분포가 모델의 규모축소에 따라 실제 지역기후모델에서 어떤 수준으로 발생하는지를 알아보기 위하여 도메인 간의 이동성을 분석하였다. 다년간의 결과를 평균할 경우, 연간 이동 성향이 평이하게 되어 특정 패턴을 잡기가 힘들어지므로 하나의 연도를 선정하여 분석하였다. 그림 3은 2003년 1월 한 달의 지상 2m 기온을 평균한 것으로 Domain 1에서 한반도의 기온은 해륙분포에 따른 비열의 차이로 인해 동일 위도상의 타 지역보다 2~4°C 가량 낮게 나타나며 전남 일부지역과 경북 동해안은 -2°C 등온선, 경기도는 -4°C 등온선

이 지나고 있다. Domain 2와 3에서도 Domain 1에서의 기온 분포 특성이 잘 나타나고 있으며 하위영역으로 갈수록 지형이 상세하게 적용됨에 따라 상위영역보다 상세한 기온 분포 특성이 나타남을 알 수 있다. 이처럼 기온의 분포 특성이 상위영역에서 하위영역까지 비교적 잘 묘사되고 있어 지역기후모델의 규모축소능력이 비교적 우수한 것을 알 수 있다. 이상과 같은 초기장 특성과 규모축소 능력 검증을 통해 지역기후모델이 상세 기후예측에 적합하게 구축되었음을 확인하였고, 미래 도시성장을 고려하여 모델링을 수행하고 결과를 분석하였다.

### 3. 미래 도시성장 예측 및 기후변화 추정

도시성장모델에 의해 예측된 수도권 미래 토지 피복의 공간분포 변화를 그림 4에 제시하였다. 2005~2015년은 기존 도시 영역 내부의 개발 및 도시 외

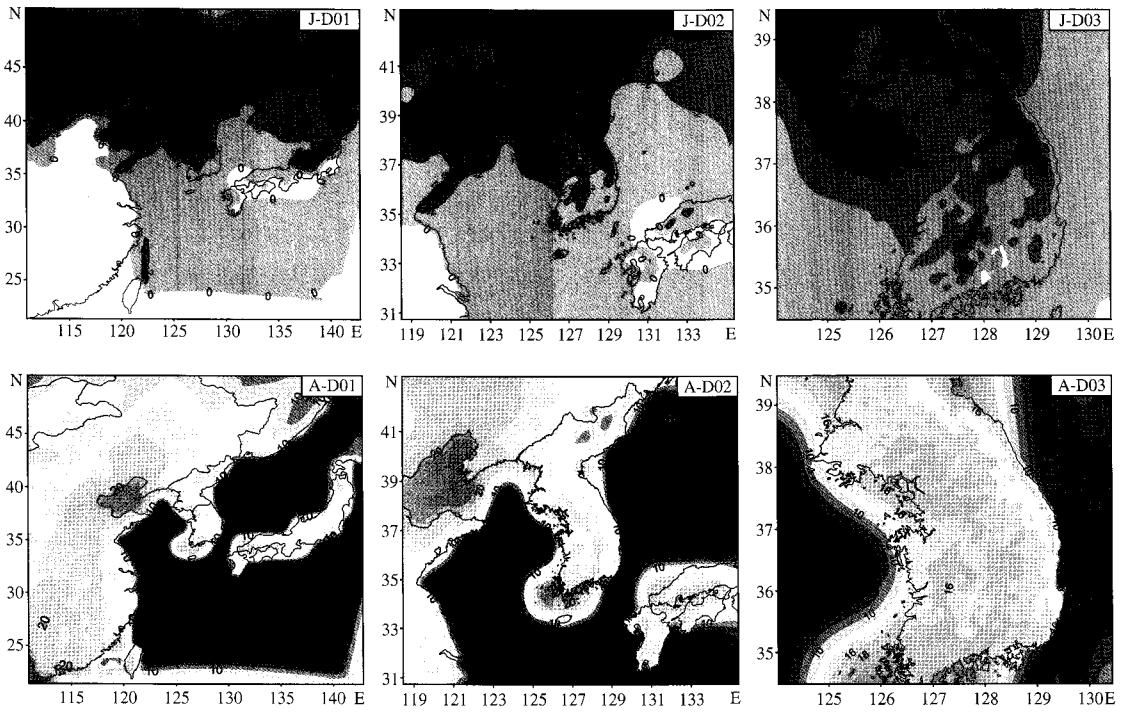


Fig. 3. Spatial distributions of average temperature (2 m AGL) in three domains on January (top panels) and August (bottom panels) in 2003.

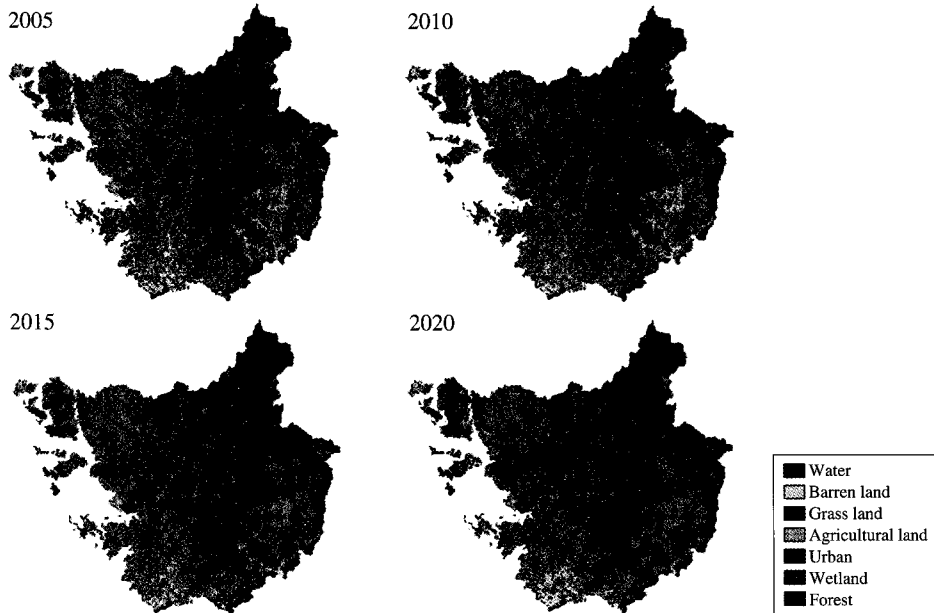


Fig. 4. Spatial distributions of land-use in the Seoul Metropolitan area (SMA) simulated by the SLEUTH during 2005 through 2020.

곽의 확장에 의해 도시성장이 나타날 가능성이 있음을 보여준다. 특히 서울 북서쪽에 위치한 일산과 남동쪽에 위치한 성남, 서울 인근의 군포, 안양, 수원 지역의 도시성장이 뚜렷할 것으로 예측되었다. 2020년부터는 경사도가 낮고 주요 도로가 지나는 경기도의 주요 거점도시를 중심으로 도시화가 가속화되는 경향을 보인다. 대표적인 지역은 용인-오산 구간이며 이 지역들은 이후 도시가 점차 확장되면서 1990년대의 서울-인천 구간이 하나의 광역도시로 확장된 것처럼 서울-용인 구간의 도시 확장이 두드러질 것으로 예상하였다. 또한 시흥·안산 지역도 뚜렷한 도시의 성장이 예상되었는데 이러한 결과 역시 모델링 과정에서 이 지역의 경사도가 낮고 도로망이 잘 분포해 있어 나타난 결과라 생각된다. 이처럼 도시가 꾸준히 확장되면서 서울시를 중심으로 주변 외곽도시가 하나의 거대도시로 확대될 가능성이 있을 것으로 예측되었다.

도시성장모델에 의해 예측된 미래 수도권지역의 도시성장 결과(그림 4)를 지역기후모델에 적용하여 모델링한 평균 기온과 UV 벡터값을 이용하여 구한 풍속을 평균한 결과를 분석하였다. 그림 5는 1월 평균 기온과 풍속에 대해 각 실험의 공간분포를 나타낸 결과로서 EXP1의 고온역은 그림 4의 도시분포와 상당한 일치도를 보이며 주로 서울 도심지역과 수원, 성남 지역을 중심으로 나타난다. EXP2에서는 기후변화 효과로 EXP1에 비해 기온이 높게 나타나며, EXP3에서는 도시가 확장함에 따라 고온역의 분포도 EXP1보다 확장되어 서울 북서쪽의 일산, 서해안 인근의 인천과 시흥, 안산까지 나타났으며 기존의 도시지역인 수원, 용인의 경우는 EXP1보다 기온이 높게 나타났다. 1월 풍속에 대한 각 실험의 공간분포를 나타낸 결과를 보았을 때도 도시지역과 풍속이 낮은 지역이 일치하는 것을 알 수 있으며 미래 예측 결과인 EXP2와 EXP3의 결과는 EXP1보다 풍속이 높게 나타났다. 동일한 미래 기상장이 입력된 EXP2와 EXP3을 비교해 보면 EXP2보다 EXP3의 풍속이 더 낮게 나타났다는데 이것은 도시성장 효과가 주요 원인으로 판단된다.

그림 6은 각 실험 간의 차를 구한 것으로 공간적인 기온과 풍속의 증감을 좀더 상세히 알아보기 위한 것이다. TDIF1(EXP2-EXP1)은 기후변화 효과로 현재보다 미래에는 서해안 인근 지역의 기온이 상대적

으로 증가폭이 클 것으로 예측되었다. TDIF2(EXP3-EXP1)는 기후변화와 미래 도시성장으로 인해 기온 증가 지역이 TDIF1보다 내륙으로 확장된 것을 보여주었다. TDIF3(EXP3-EXP2)을 통해서는 미래 도시성장 효과를 좀 더 분명히 알 수 있는데 도시화로 인해 수도권 대부분의 지역에서 기온 증가가 예측되었고 특히 도시가 확장된 지역으로 기온 증가폭이 더 크게 나타났다. 도시성장에 따른 풍속 증감의 분포차이 또한 Difference 분석을 통해 좀 더 상세하게 알 수 있는데 WDIF3(EXP3-EXP2)은 동일한 미래 기상장이 적용되었을 때, 미래 도시화에 의한 효과를 보여주는 분포로 수도권 대부분의 지역에서 도시가 성장에 따른 풍속의 감소효과가 나타나는 것을 알 수 있었다. Domain 4에 대하여 1월 기온에 대한 결과를 공간 평균하여 정량적으로 나타낸 결과, 수도권의 평균 기온은 EXP1이  $-4.49^{\circ}\text{C}$ 였으나 EXP2는  $-4.42^{\circ}\text{C}$ 로 기후 변화에 의한 기온의 증가는  $0.07^{\circ}\text{C}$ 였다. 하지만 EXP3는  $-4.32^{\circ}\text{C}$ 로 기후변화와 도시성장을 함께 고려하면  $0.17^{\circ}\text{C}$ 만큼 기온이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 미래 도시화효과로 인해 15년간  $0.1^{\circ}\text{C}$ 의 추가적인 기온상승이 나타날 수 있음을 의미한다. 평균 풍속은 EXP1의 경우  $3.15\text{ m/s}$ 였으나 EXP2는  $3.47\text{ m/s}$ 로 기후변화에 의해 풍속이 다소 증가할 것으로 예측되었다. 하지만 미래 도시성장을 고려할 경우, EXP3의 풍속은  $3.29\text{ m/s}$ 로 도시화로 인해 EXP2보다  $0.18\text{ m/s}$ 의 풍속 감소가 나타났다. 따라서 미래 도시성장의 적용여부에 따라 기후예측 결과는 평균적으로 기온이 상승하거나 풍속이 감소하는 등의 추가적인 변동이 있을 수 있음을 보여준다.

그림 7은 수도권의 8월 평균 기온과 풍속의 공간분포를 나타낸 것으로 평균 기온의 경우 1월보다 도시성장 효과가 더 뚜렷하게 나타난다. 1월과 유사하게 도시지역은 고온역이 나타나 다른 지역보다 기온이 비교적 높게 나타난다. EXP2는 EXP1보다 기온이 낮게 나타나는데 이는 연구대상 시기인 2020년대에 ECHAM5 모델이 장기적인 추세에서 전 지구적으로 평균 기온이 하강하는 것으로 예측하여 나타난 결과로 사료된다. EXP3은 미래 도시성장이 적용된 결과로서 EXP2와 비교했을 때 고온역이 더 확장하고 기온도 높게 나타나 도시성장이 기후예측 결과에 미치는 영향이 큰 것을 보여준다. 수도권의 8월 풍속에 대한 각 실험의 공간분포를 나타낸 그림에서 EXP1



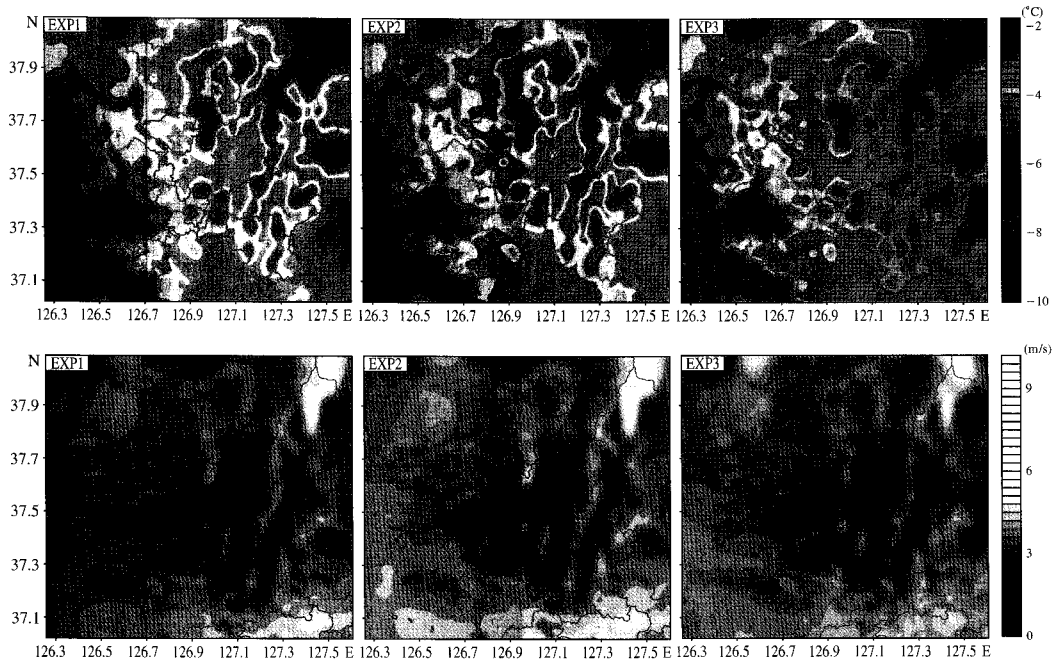


Fig. 5. Spatial distributions of average temperature (2 m AGL) (top panels) and wind speed (10 m AGL) (bottom panels) in January produced by three experimental designs (EXP1 ~ EXP3).

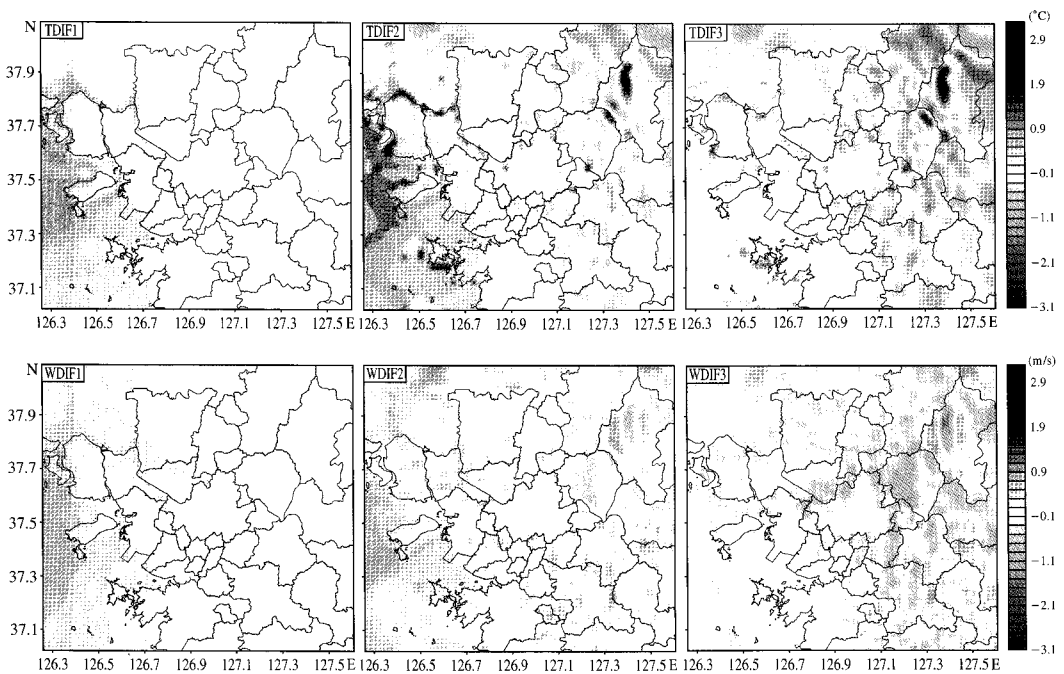


Fig. 6. Spatial distributions (DIF1 ~ DIF3) of average temperature (2 m AGL) (top panels) and wind speed (10 m AGL) (bottom panels) in January.

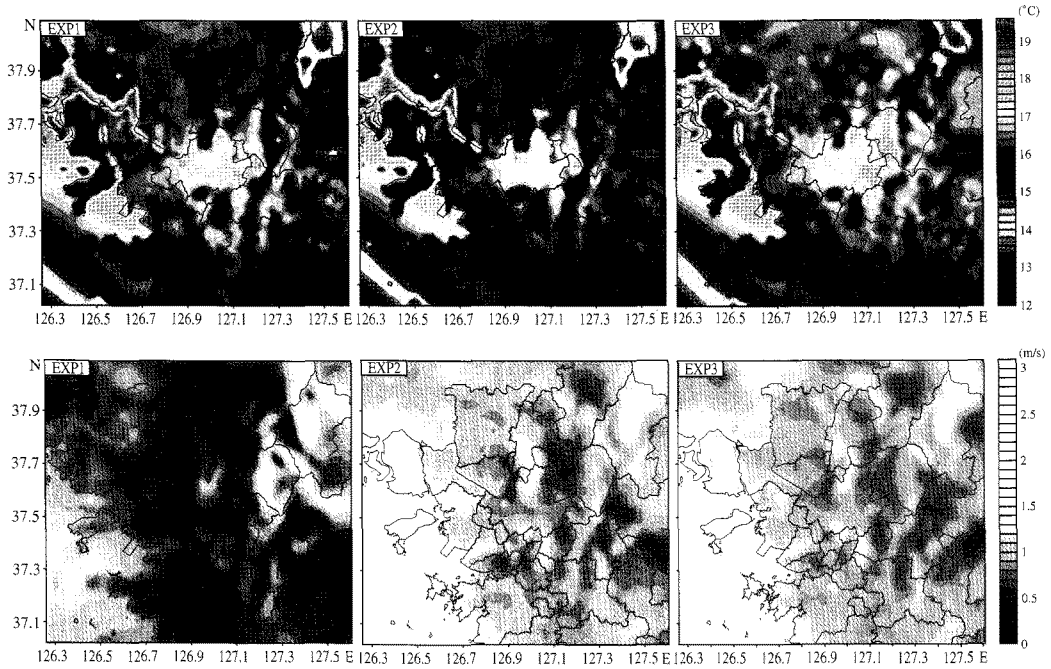


Fig. 7. Spatial distributions of average temperature (2 m AGL) (top panels) and wind speed (10 m AGL) (bottom panels) in August produced by three experimental designs (EXP1 ~ EXP3).

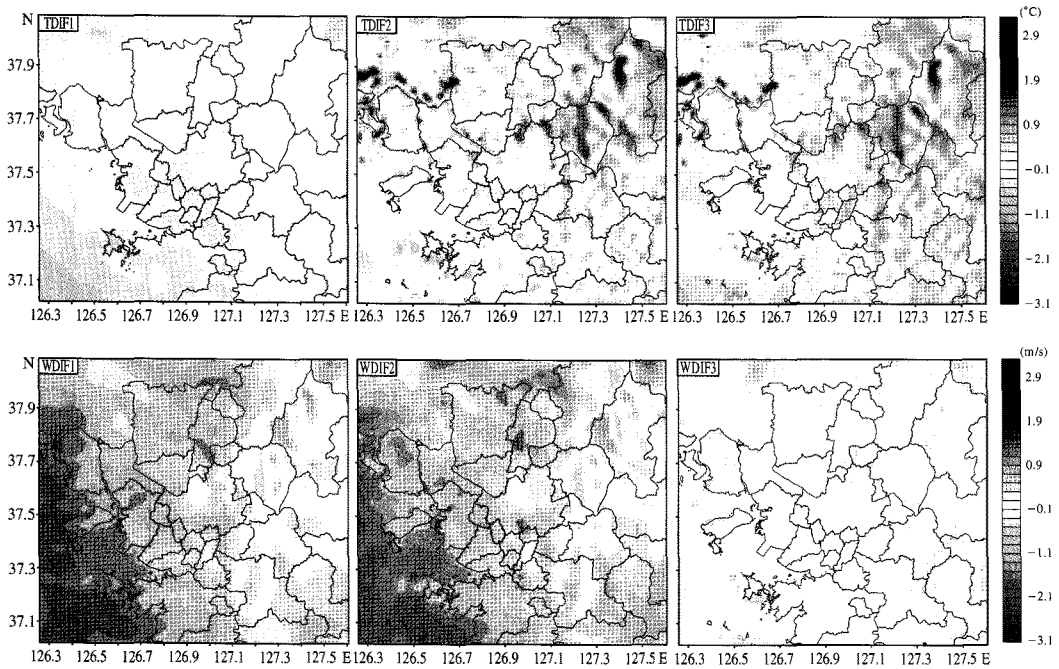


Fig. 8. Spatial differences (DIF1 ~ DIF3) of average temperature (2 m AGL) (top panels) and wind speed (10 m AGL) (bottom panels) in August.

과 EXP2를 비교했을 때, 미래에는 평균 풍속이 증가하는 것으로 예측되며 이것은 앞서 8월의 기온변화처럼 모델의 입력 초기장의 영향, 즉 장기적인 기후변화의 효과라 사료된다. EXP3은 미래 도시성장이 적용된 결과로서 EXP2와 공간적으로 뚜렷한 차이가 나타나지 않았는데 공간적인 분포차이가 어떻게 나타나는지를 알아보기 위해 그림 8을 제시하였다.

그림 8의 TDIF2(EXP3-EXP1)는 기후변화와 도시성장이 모두 적용된 경우로서 TDIF1보다 내륙의 기온이 높게 나타났다. TDIF3(EXP3-EXP2)는 TDIF1과 TDIF2의 차이로서 미래 도시성장 효과로 인해 수도권 전역에서 기온의 증가가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히, 미래 도시성장이 뚜렷한 지역인 일산과 남양주 등의 지역에서 증가폭이 크다. 풍속의 경우, WDIF1(EXP2-EXP1)과 WDIF2(EXP3-EXP1)에서 볼 수 있듯이 수도권 대부분의 지역에서 풍속 증가가 나타났다. 하지만 두 경우의 공간적인 분포차이는 확연하게 나타나지 않아 미래 도시성장이 풍속에 미치는 영향을 쉽게 파악하기는 힘들다. 하지만 WDIF3(EXP3-EXP2)을 보았을 때, 도시성장효과에 의한 풍속의 감소효과가 나타나는 것을 확인할 수 있으며 특히, 도시가 분포해 있는 지역으로 절대적인 값의 크기는 적지만 풍속의 감소가 나타났다.

위와 같은 8월 기온과 풍속에 대한 결과를 공간 평균하여 정량적으로 계산한 결과, 기온은 EXP1이 16.07°C를, EXP2가 15.89°C를 나타내어 기후변화에 의해 기온이 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 EXP3은 16.20°C로서 기존의 기온 하강추세는 도시성장에 의해 오히려 기온이 0.13°C만큼 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 미래 도시성장이 0.31°C의 추가적인 기온 상승을 가져올 수 있다는 결과이며 이는 미래 도시성장이 장기적인 기후변화 예측에 중요한 요소로 작용함을 보여준다. 풍속은 EXP1이 0.71 m/s였으나 EXP2와 EXP3은 1.18 m/s로 증가할 것으로 예측하였다. 풍속의 경우는 도시성장을 적용하였을 때와 하지 않았을 때의 수도권 전체 평균값에 큰 차이가 나타나지 않았으나 공간분포 비교를 통해 도시성장에 따른 풍속 감소효과가 나타났다.

이처럼 지역규모의 기후 예측에 있어 미래 도시성장의 적용 여부는 기후 예측 결과에 상당한 차이를 보여준다. 특히, 기온의 경우 서론에서 언급한 것처럼 지난 100년간의 전 지구적인 기온 상승이 0.74°C였

고 우리나라의 기온 상승이 1.5°C였다는 것을 상기할 때, 15년간의 미래 도시성장에 의해 1월에는 0.1°C, 8월에는 0.31°C의 추가적인 기온 상승이 예측된 본 연구의 결과는 중요한 의미를 가진다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 도시성장모델(SLEUTH)을 이용하여 수도권 지역의 미래(2018~2022년) 도시성장을 예측하고 그 결과를 지역기후모형에 적용하여 보다 현실적이고 정확한 수도권지역의 기후변화(평균 기온과 평균 풍속)를 예측하였다. 도시성장 예측 결과, 서울시를 비롯한 경기도의 주요 거점도시와 서해안 지역으로 도시가 성장해 2030년에는 수도권 전역이 거대 도시화되고 수도권 전체 면적에서 도시가 차지하는 비율이 23.9%까지 증가하여 농지면적을 앞지를 가능성이 있을 것으로 예측하였다. 본 연구는 '2020 수도권 광역개발계획'을 기초로 전체 도시성장 예측기간(2000~2030년) 중 2020년의 결과를 지역기후모형에 적용하였다.

수도권 기후 예측을 위해 사용된 지역기후모형은 WRF로서 초기입력자료는 ECHAM5 미래 기상장이 사용되었다. 초기입력자료와 모형의 적합성을 확인한 후, 모델링 기간과 토지피복 적용 방법을 기준으로 세 가지의 실험(EXP1~EXP3)을 수행하여 수도권 지역의 상세기후 예측값을 비교·분석하였다. 그 결과, 1월의 경우, 미래 기상장(2018~2022)만 적용하였을 때, 기온의 전체 공간 평균값은 -4.42°C였으나 미래 기상장과 도시성장을 함께 적용하였을 경우에는 -4.32°C로, 도시성장에 의해 15년간 0.1°C의 추가적인 평균기온 상승이 나타났다. 풍속은 3.47 m/s에서 3.29 m/s로 감소하는 것으로 예측되었다. 8월의 경우, 미래 기상장만 적용하였을 때, 수도권 전체 공간 평균기온은 15.89°C였으나, 미래 기상장(2018~2022)과 도시성장을 함께 적용할 경우에는 평균 기온이 16.20°C로 나타나 기온 하강시점이었던 2020년대가 오히려 상승 추세로 바뀌었으며 도시성장에 의한 효과로 15년간 0.31°C의 추가적인 평균기온 상승이 있을 수 있음을 예측하였다. 이것은 도시성장의 적용 여부에 따라 장기적인 기후예측 결과 및 변동 추세가 바뀔 수 있음을 보여준다.

역학적 규모축소법을 활용한 미래 기후예측은 대 기대순환 모형의 결과를 초기입력장으로 지역기후모 형에 적용하여 더 상세한 결과를 도출하기 위한 방법 으로 활용되어왔다. 하지만 도시성장 혹은 토지피복 변화가 지역기후에 미치는 영향이 크다는 점을 고려 할 때, 보다 현실적이고 정확한 도시 및 지역기후 예 측을 위해서는 미래 토지피복 변화를 함께 고려하는 것이 중요할 것으로 사료된다. 본 연구는 도시성장모 델을 사용하여 미래 토지피복변화를 예측하였고 그 결과를 지역기후모형에 적용하여 기후예측 결과를 비교·분석하였다. 이를 통해, 미래 토지피복 변화를 적용한 기후예측 결과가 미래 토지피복 변화를 적용 하지 않은 기존의 기후예측 결과에 대해 도시성장에 의한 변동성을 내포하고 있음을 알 수 있었다. 하지만 본 연구에 사용된 ECHAM5 초기입력장의 낮은 해상도는 역학적인 규모축소 기법을 이용한 지역 규 모 기후예측에 불확실성을 증가시킬 수 있을 것으로 생각된다. 향후에 이러한 본 연구의 한계를 잘 고려 하여 초기 입력장의 해상도 개선 및 규모축소 기법의 향상과 같은 기상학적 측면과 신도시 건설계획, 도시 녹지화 사업 등의 정책적이고 사회·문화적인 요소 를 고려한 도시성장모델의 개발과 같은 도시계획적 측면의 기술향상이 뒷받침된다면 현재보다 더욱 향 상된 미래 상세기후예측 결과를 도출할 수 있을 것 으로 생각되며 열섬과 강수량과 같은 도시 내부의 토 지피복 분포에 따라 변동성이 큰 요소에 관한 패턴 분석 및 예측 연구에도 도움을 줄 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진개발사업 (CATER 2009-3308)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

국토해양부, 서울특별시, 인천광역시, 경기도 (2009) 2020년 수도권 광역도시계획-'09. 6. 변경사항 반영-, 129pp.  
 기상연구소 (2004) 기후변화협약대응 지역기후 시나리오 산 출기술개발(III), 기상연구소 연구보고서 MR040-C03, 510pp.

Ahn, J.B. and Y.M. Cha (2005) A comparison study of cor- rections using artificial neural network and multi- ple linear regression for dynamically downscaled winter temperature over South Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 41(3), 401-413. (in Korean with English abstract)  
 ARW (2008) Weather Research & Forecasting Version 3 Mo- deling System user's Guide, Mesoscale & Micro- scale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research.  
 Bacci, P. and M. Maugeri (1992) The urban heat island of Milan. *Il Nuovo Cimento*, 15C, 417-424.  
 Choi, B.C., J.Y. Kim, D.G. Lee, and K. Jan (2007) Long-term trends of daily maximum and minimum tempera- tures for the major cities of South Korea and their implications on human health, *Atmosphere*, 17(2), 171-183. (in Korean with English abstract)  
 Clarke, K.C. 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*.  
 Dickinson, R.E., M.E. Ronald, G. Filippo, and T.B. Gary (2004) A regional climate model for the western United States, *Climate Change*, 15(3), 383-422.  
 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) Glo- bal temperature change and its uncertainties since 1861, *Geophys. Res. Lett.*, 28(13), 2621-2624.  
 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.  
 Giorgi, F. and M.R. Marinucci (1996) An investigation of the sensitivity of simulated precipitation to model reso- lution and its implications for climate studies, *Mon. Weather Rev.*, 124, 148-156.  
 Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, K. LO, D.W. Lea, and M. Medina-Elizade (2006) Global temperature change, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 103(39), 14288-14293.  
 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribu- tion of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, Edited by R.K. Pachauri and A. Reisinger, 104pp.  
 Jantz, C.A., S.J. Goetz, and M.K. Shelley (2003) Using the SLEUTH urban growth model to simulate the im-

- pacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore/Washington metropolitan area, *Environment and Planning B*, 31, 251-271.
- 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, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(5), 432-449. (in Korean with English abstract)
- Jeong, J.J., D.Y. Han, Y.I. Kim, and J.W. Lee (2001) Cellular automata based urban growth prediction for Seoul metropolitan area, *Journal of Geographic Information System Association of Korea*, 9(3), 34-48. (in Korean with English abstract)
- Jones, R.G., J.M. Murphy, and M. Noguer (1995) Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121(526), 1413-1449.
- Kim, J.I., G.W. Hwang, C.H. Yeo, and H.W. Chung (2007) Modeling future urban growth and its application: The integrated approach, *Journal of the Korea Planners Association*, 42(2), 31-48. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.Y., S.K. Lee, and S.H. Park (2004) Urban growth simulation modeling using a decision tree method for Incheon metropolitan area, *Journal of the Korea Planners Association*, 39(4), 31-44. (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., H. Kim, J.H. Jeong, and S.K. Song (2010) Estimation of air temperature changes due to future urban growth in the Seoul metropolitan area, *Journal of the Environmental Sciences*, 19(2), 237-245. (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, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 18(6), 453-463. (in Korean with English abstract)
- Leung, L.R., Y. Qian, J. Han, and J.O. Roads (2003) Intercomparison of global reanalysis and regional simulations of cold season water budgets in the Western United States, *J. Hydrometeorol.*, 4, 1067-1087.
- Palmer, T.N. (1999) A nonlinear dynamical perspective on climate prediction, *Journal of Climate*, 12, 575-591.
- Solecki, W.D. and C. Oliveri (2004) Downscaling climate change scenarios in an urban land use change model, *Journal of Environmental management*, 72, 105-115.
- Stott, P.A., D.A. Stone, and M.R. Allen (2004) Human contribution to the European heatwave of 2003, *Nature*, 432, 610-614.
- Tett, S.F.B., P.A. Stott, M.R. Allen, W.J. Ingram, and J.F.B. Mitchell (1999) Causes of twentieth century temperature change near the Earth's surface, *Nature*, 399, 569-572.
- Wolfram, S. (1984) Universality and complexity in cellular automata, *PhysicaD*, 10, 1-35.
- Xue, Y., R. Vasic, Z. Janjic, F. Mesinger, and K.E. Mitchell (2007) Assessment of dynamic downscaling of the continental U.S. regional climate using the Eta/SSiB regional climate model, *Journal of Climate*, 20, 4172-4193.