

수도권지역 미래 도시성장에 따른 기온변화 추정

김유근 · 김현수* · 정주희 · 송상근

부산대학교 지구환경시스템학부

(2009년 11월 10일 접수; 2009년 12월 23일 수정; 2010년 1월 14일 채택)

Estimation of Air Temperature Changes due to Future Urban Growth in the Seoul Metropolitan Area

Yoo-Keun Kim, Hyunsu Kim*, Ju-Hee Jeong, Sang-Keun Song

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Manuscript received 10 November, 2009; revised 23 December, 2009; accepted 14 January, 2010)

Abstract

The relationship between air temperatures and the fraction of urban areas (FUA) and their linear regression equation were estimated using land-use data provided by the water management information system (WAMIS) and air temperatures by the Korea Meteorology Administration (KMA) in the Seoul metropolitan area (SMA) during 1975 through 2000. The future FUA in the SMA (from 2000 to 2030) was also predicted by the urban growth model (i.e., SLEUTH) in conjunction with several dataset (e.g., urban, roads, etc.) in the WAMIS. The estimated future FUA was then used as input data for the linear regression equation to estimate an annual mean minimum air temperature in the future (e.g., 2025 and 2030). The FUA in the SMA in 2000 simulated by the SLEUTH showed good agreement with the observations (a high accuracy (73%) between them). The urban growth in the SMA was predicted to increase by 16% of the total areas in 2025 and by 24% in 2030. From the linear regression equation, the annual mean minimum air temperature in the SMA increased about $0.02^{\circ}\text{C}/\text{yr}$ and it was expected to increase up to 8.3°C in 2025 and 8.7°C in 2030.

Key Words : Land-use, Urban growth model (SLEUTH), Annual mean minimum air temperature

1. 서론

우리나라는 1900년도 초 근대적인 기상관측이 시작된 이래, 100년 동안 약 1.5°C 정도의 평균기온 상승을 보였으며 이것은 전 지구적인 온난화 추세($0.74^{\circ}\text{C}/\text{yr}$)의 약 2배정도 수준이다(기상연구소, 2004; IPCC, 2007). 전 지구적 혹은 지역적인 기온상승은 자연적인 요인뿐만 아니라 도시성장에 따른 인공열과

인구증가, 산업발달로 인한 온실가스과 에어로졸 방출 등 인위적인 요인에 의해 그 변동성이 더욱 크게 나타나며(Stott 등, 2003; Tett 등, 1999), 이러한 인위적 활동은 대부분의 도시규모 영역에서 활발히 이루어지고 있다.

도시지역은 건물의 고층화, 콘크리트로 피복된 지표, 인공열의 대기 중 방출, 그리고 다양한 오염물질의 영향으로 주변 교외지역과는 다른 기상학적 혹은 기후학적 특성이 나타난다(Changnon, 1992; Landsburg, 1981). 그 중에서도 토지피복은 도시 기온에 영향을 주는 주요 요소로 알려져 있으며, 그 영향과 중요성에 관한 많은 연구들이 수행되었다. 미국 NCDC (National

*Corresponding Author : Hyunsu Kim, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Phone: +82-51-583-2652

E-mail: hyunsu@pusan.ac.kr

Climatic Data Center)가 실시한 조사에서는 HCN(Historical Climatology Network) 관측지점의 기온 일변화(DTR: Diurnal Temperature Range)에 미치는 토지피복의 영향반경은 최대 10 km에 달한다고 하였다(Gallo 등, 1996). 또한 김(2007)은 일본 동경과 태국 방콕을 대상으로 Mellor-Yamada 난류모델을 이용하여 도시 확장에 따른 온열변화를 분석하였고, 그 결과 연안지역으로의 도시 확장은 도시 기온을 상승시키고 이로 인해 대기유동장 변화를 일으킨다고 하였다. Bacci와 Maugeri(1992)는 도시성장에 따른 열섬효과를 분석하기 위하여 이탈리아 Milan 지역의 과거 150년간 기온변화를 분석하였으며 Milan 지역의 열섬현상이 도시성장과 높은 상관성이 있음을 보이기도 하였다.

이처럼 도시성장 혹은 토지피복 변화가 도시 기온 변화에 미치는 영향이 크다는 점을 고려할 때 보다 현실적이고 정확한 도시 기온변화를 예측하는데 미래 토지피복 변화가 중요한 역할을 할 것이라 생각된다. 정 등(2001)은 셀룰라 오토메타 이론을 적용하여 도시성장 추세와 물리적 요소를 고려하여 수도권의 도시성장을 예측하였으며, 김 등(2007)은 도시계획 및 도시성장관리정책 개념을 예측모형에 통합하여 도시성장 유형을 구분하는 시나리오별 분석을 시도하기도 하였다. 그러나 이와 같은 미래 토지피복 변화와 도시성장 예측에 관한 연구는 대부분 도시 계획적 측면에서 중요하게 다루어져 왔으며, 그 결과가 도시 환경적 혹은 기상학적 측면에서 응용 및 활용된 연구는 매우 부족하였다.

따라서 본 연구에서는 미래에도 지속적인 도시성장이 이뤄진다는 가정 하에서 도시계획 분야에서 널리 사용되고 있는 도시성장모델을 이용하여 수도권 지역의 미래 도시성장(2000~2030년)을 예측하였으며, 그 결과를 과거(1975~2000년) 토지피복 변화와 기온 분석을 통해 유도한 두 변수간의 선형관계식에 적용하여 수도권지역의 미래 도시 기온을 추정하였다. 비록 선형관계식에 의해 추정된 기온 변화값이 미래의 기온변화를 완벽히 반영할 수는 없겠지만 적어도 지속적인 개발이 이뤄졌을 때의 기온변동 가능성을 제시하여 준다는 점에서 사회 각 분야의 기후 변화 대응 측면에서 의미가 있다고 생각되며 이를 바탕으

로 각종 모델을 이용한 미래 기후예측에 도시성장 예측결과를 활용한다면 향후에는 현재보다 더욱 상세한 기후예측 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 자료 및 방법

2.1. 자료 및 연구방법

대상지역인 수도권은 1970년대 이후 인구 과밀화로 도시영역의 급속한 확장이 이루어졌으며 이로 인해 한반도에서 토지피복 변화가 가장 뚜렷하게 나타난 지역이다. 또한 2009년 3월 국토해양부 및 수도권을 구성하는 3개 지자체(서울광역시, 인천광역시, 경기도)에서 발표한 2020년 수도권 광역도시계획 변경안(국토해양부 등, 2009)의 개발제한구역조정 등에 관한 자료와 보고서를 참고하면 향후 10여 년간 지속적인 도시성장이 예상되는 지역이기도 하다. 이를 토대로 Fig. 1과 같이 도메인을 설정하였다.

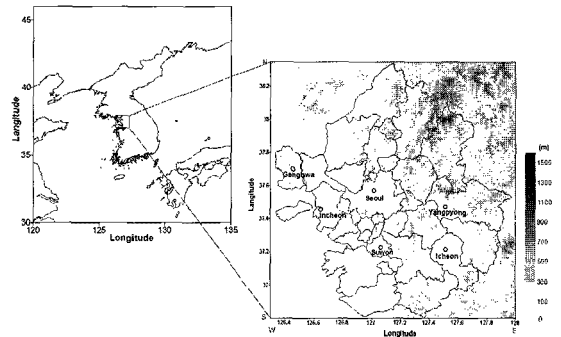


Fig. 1. Topographic map of the Seoul metropolitan area and the locations of meteorologic monitoring site in the urban (Seoul, Incheon, and Suwon) and rural (Yangpyeong, Ganghwa, and Icheon) areas.

도시성장을 예측하기 위해 사용한 자료는 국가 수자원관리정보 시스템(WAMIS: Water Management Information System)(WAMIS, 2009) 토지피복 자료와 개발제한구역(상수원보호구역도/국립공원도) 자료, 지능형 교통체계 표준노드링크관리시스템(ITS-SNL: Intelligent Transportation Systems - Standard Nodes Link)(ITS-SNL, 2009)의 도로망(전국 시도, 지방도, 일반국도, 고속도로 등) 자료와 국토지리정보원(NGII: National Geographic Information Institute)

(NGII, 2009)에서 1:5,000 수치지형도를 통해 작성한 공간해상도 30 m의 Digital Elevation Model data (DEM) 자료이며, 자세한 내용은 Table 1에 제시하였다. 도시성장 예측과 관련하여 가장 중요한 자료인 WAMIS 토지피복 자료는 Landsat 자료에 근거하여 구축되었으며, 공간해상도는 1975~1980년의 기간은 60 m, 1985~2000년의 기간은 30 m이다. 1975년부터 2000년까지 5년 주기의 자료가 존재하며, 환경부 대분류 토지피복 분류 기준에 의해 수역, 시가지지역, 나지, 습지, 초지, 산림, 농경지의 7개 항목으로 분류되었다. 도시성장모델은 도로분포도와 도시분포도는 4개 이상, 토지피복자료는 2개의 입력 자료를 받아들여므로 Table 1과 같이 입력 자료의 개수가 다르다. 또한 도시성장모델에 입력되는 자료의 해상도가 각각 다르게 설정되어 있으므로 본 연구에서는 ArcGIS의 Data Management Tools를 이용하여 가장 낮은 해상도에 해당되는 60 m로 입력 자료를 재격자화 하였다. 도시성장과 기온과의 상관관계 분석을 위해 사용된 기상자료는 20년 이상의 장기관측 자료가 존재하는 6개 지점(서울, 인천, 수원, 강화, 양평, 이천)의 기상청 자료이며, 관측지점의 위치는 Fig. 1에 제시하였다.

Table 1. Characteristics of input dataset for urban growth model

Input data	Data types*	Years
Urban	Landsat MSS, TM, ETM	1975, 1980, 1985, 1990, 1995
Land-use	Landsat MSS, TM, ETM	1975, 1995
Roads	Shapefiles (ITS-SNL)	1975, 1980, 1985, 1990, 1995
Excluded	Shapefiles (WAMIS)	
Slope	NGII DEM	
Hillshade	NGII DEM	

* MSS: Multispectral Scanner; TM: Thematic Mapper; ETM: Enhanced Thematic Mapper; ITS-SNL: Intelligent Transportation Systems - Standard Nodes Link; WAMIS: Water Management Information System; NGII: National Geographic Information Institute

본 연구에서는 수도권 도시성장에 따른 미래 기온변화를 추정하기 위하여 우선 과거 수도권의 토지피복 분포와 기온 변화를 분석하여 두 변수간의 상관관

계를 도출하였다. 수도권 토지피복 분석은 1975년부터 2000년까지 Landsat 자료를 토대로 5년 간격으로 수행하였으며, 같은 기간 관측된 기상자료를 도시지역(서울, 인천, 수원)과 교외지역(강화, 양평, 이천)으로 분류하여 지역특성에 따른 기온의 차이를 분석하고 도시성장과 기온의 상관관계도 비교하였다. 미래 도시성장 예측은 도시성장모델을 통해 2000~2030년까지 수행하였으며, 예측된 수도권 도시성장 결과에 대해 과거자료를 통해 도출된 도시성장과 기온 변화간의 상관관계를 반영하여 미래 수도권의 기온변화를 추정하였다.

2.2. 모델개요

도시성장모델인 SLEUTH 모델(Project GIGALOPOLIS, 2009)은 미국 산타바바라 대학의 Clarke 교수가 개발한 UGM(Urban Growth Model)을 확장하고 개선한 모델이며(Clarke와 Gaydos, 1997), 샌프란시스코, 워싱턴, 뉴욕과 같은 미국의 주요 대도시와 포르투갈의 리스본, 호주의 시드니 등에서 효과적으로 수행되어 각종 정책입안 및 도시계획, 환경변화 등의 연구에 활용되었다(Jantz 등, 2004).

SLEUTH 모델은 입력 자료로 쓰이는 Slope, Land-use, Excluded, Urban, Transportation, Hillshade의 첫머리를 연결하여 지어진 이름이며, 셀룰라 오토메타(CA: Cellular Automata)를 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. 셀룰라 오토메타는 시계열적 처리가 가능할 뿐만 아니라 공간을 단순화하지 않고 모델링 가능하여 공간성(Spatiality)을 유지할 수 있다(정 등, 2001). 또한 래스터 지리정보 시스템, 원격탐사 등과의 호환성이 뛰어나고, 다양한 시나리오를 가정하여 모델링을 할 수 있다는 장점이 있다.

Table 2. Urban growth types and controlling coefficients in the SLEUTH model

Growth type	Controlling coefficients	Description
Spontaneous Growth	Dispersion	The random selection of potential new growth cells
New Spreading Center Growth	Breed	Growing urban centers from spontaneous growth
Edge Growth	Spread	The additional growth of old or new urban centers
Road-influenced Growth	Road-gravity dispersion, Breed	The growth of newly urbanized cell along transportation network

도시가 성장해 나가는 유형을 SLEUTH 모델은 Spontaneous, New spreading center, Edge, Road-influenced의 4가지로 구분하고 있는데 각 성장유형에 대한 자세한 설명은 Table 2에 제시하였다. 이러한 성장에 영향을 주는 성장계수로는 도시가 전체적으로 퍼지는 정도를 의미하는 산포계수(diffusion), 새롭게 발생된 도시가 자체적으로 성장할 가능성을 나타내는 증식계수(breed), 유기적 성장 정도를 나타내는 확산계수(spread), 개발 가능 경사도를 나타내는 경사저항계수(slope), 도시가 도로를 따라 성장하는 성향을 통제하는데 사용되는 도로중요도 계수(road gravity)가 있다. 모델의 입력 자료는 연구 대상지역에 대한 각 시기별 경사도(slope), 토지피복(land-use), 개발제한구역(excluded), 도시영역(urban), 도로망 정보(transportation), 음영기복(hillshade) 등이며, GIF 이미지 자료로 구축된다. 모든 입력 자료는 동일한 해상도로 구성되어야 하며, 각 cell 값이 '0'이면 null value를 의미하며 '0 < x < 255'의 범위이면 값이 존재하는 것을 의미한다.

3. 결과 및 토의

3.1. 과거 도시성장 및 기온변화 분석

수도권 도시성장 분석을 위하여 1975~2000년

WAMIS Landsat 자료를 이용하여 토지피복 변화비율과 토지피복의 공간분포 변화를 분석하였다. Table 3은 토지피복 변화비율을 나타낸 것으로 수도권 전역과 서울을 구분하여 5년 단위로 제시한 결과이고, Fig. 2는 토지피복의 공간분포 변화가 뚜렷했던 1975, 1985, 2000년의 도시성장 분포를 나타낸다.

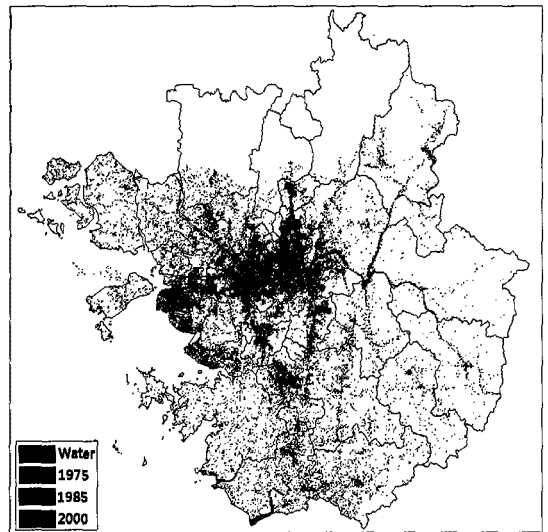


Fig. 2. The spatial distributions of urban growth in the Seoul metropolitan area provided by WAMIS (Landsat) in 1975, 1985, and 2000.

Table 3. The frequency distribution (%) of land-use changes in the Seoul metropolitan area (including Seoul) during 1975 through 2000

	Water	Urban	Barren	Wetland	Grass	Forest	Agri-land
1975	2.0(4.1)	3.9(27.9)	0.7(2.6)	3.0(1.7)	2.5(4.5)	53.3(26.9)	34.7(32.3)
1980	2.1(5.2)	5.7(40.0)	1.4(4.2)	2.4(0.5)	3.4(5.9)	51.0(24.9)	34.1(19.2)
1985	2.6(4.4)	6.8(48.0)	1.5(3.5)	1.6(0.2)	2.6(2.4)	53.2(28.7)	31.7(12.8)
1990	2.3(4.4)	8.8(51.4)	2.8(5.4)	0.8(0.1)	3.2(2.1)	51.5(27.1)	30.6(9.6)
1995	2.3(4.5)	11.0(57.0)	2.2(3.1)	0.6(0.0)	3.5(2.8)	51.3(25.9)	29.0(6.7)
2000	1.9(4.7)	12.7(57.4)	2.5(2.1)	0.7(0.0)	4.6(2.9)	49.4(24.9)	28.2(8.0)

*Numbers in the parenthesis denote the distribution of land-use in Seoul

1975년은 도시성장 초기단계로 수도권 전체 면적에서 시가화지역 비율이 3.9%에 불과하였으나 서울은 전체 면적의 27.9%로 수도권 시가화지역은 서울을 중심으로 분포하고 있다. 1980~1990년은 본격적인 산업화 및 수도권 집중이 이루어지면서 시가화지역 비율은 매 5년마다 수도권 전체 면적에서 약 1~2%의 비율로 증가하였으며, 특히 서울은 1990년 시가화지역 비율이 전체의 51.4%를 나타내고 있다. 이는 1975년 대비 두 배 가까이 늘어난 것이며, 이 기간 동안 수도권의 도시성장은 서울을 중심으로 집중적으로 이루어졌음을 알 수 있다. 또한 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 서울 인근지역 개발이 이루어지면서 성남과 수원, 용인과 같은 위성도시가 발달하였고 해안가를 중심으로 간척사업 등에 의해 습지가 시가화지역으로 바뀌면서 인천의 시역이 뚜렷하게 확장한 것도 확인할 수 있다. 1995~2000년은 이미 구축되어있는 도시 내의 주요 도로 및 산업단지를 중심으로 기존 시가화지역이 세밀화 되고 시흥·안산과 같은 서해안 지역과 고양·안산 등의 뉴타운 개발에 의해 수도권의 도시성장이 현저하게 나타났다. 수도권의 도로가 연장되어 동일 생활권이 되면서 그 밖의 교외지역으로도 소규모의 국지적인 시가화지역 분포가 나타났다(시가화지역: 8.8% → 12.4%). 반면, 삼림과 농지의 면적은 시가화지역 인근의 일부 개발제한구역 해제 등으로 인해 1990년을 기점으로 큰 폭으로 감소하고 있어 도시성장의 대부분이 삼림과 농지면적의 감소로 인해 이루어졌다고 할 수 있다.

이러한 과거 수도권의 도시비율에 따라 기온변화가 어떻게 이뤄져 왔는지를 알아보기 위하여 같은 기간 동안(1975~2000년) 수도권 내 6개 장기 기상관측 지점의 기온자료를 이용하여 각 지점별 연 평균 최저기온에 대한 시계열분포를 분석하였다. 전체 기간 중 1982-3년을 전후로 연 평균 최저기온의 경향성이 달라지는데 이러한 경향성의 변동 또한 기후적인 요인에 해당된다. 본 연구에서는 이러한 과거 25년(1975~2000)의 기후의 선형적인 변동경향이 미래 30년(2000~2030)에도 동일하게 반영된다는 가정 하에 수도권 전체의 최저기온 평균에 대한 선형추세분석(Linear trend analysis)을 수행하였다(Fig. 3). 최저기온을 분석한 이유는 최근의 지구온난화로 각 대륙의 많은 지역에서 최고기온의 증가가 아닌 최저기온의

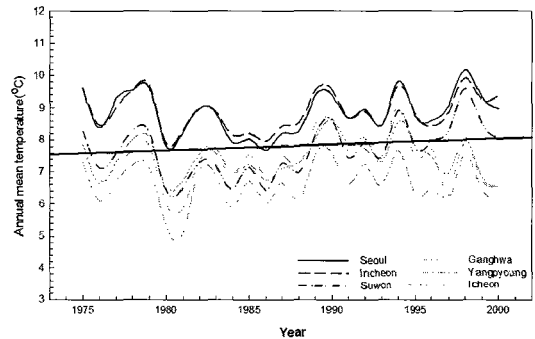


Fig. 3. Temporal variations of the annual mean minimum air temperature and its linear regression observed at the meteorological monitoring sites in the urban (Seoul, Incheon, and Suwon) and rural (Yangpyong, Ganghwa, and Icheon) areas.

급상승으로 인해 DTR이 크게 감소하는 것을 보여주었고(Easterling 등, 1997; Zhai 등, 1999), 최저기온의 변화가 도시화의 영향을 분석하는데 더 뚜렷한 특징을 나타내기 때문이다(Mitchell, 1961).

기온의 시계열분포를 분석한 결과, 26년의 장기관측 기간 동안 6개 지점 모두가 전 지구적인 기온변화에 따른 주기성을 잘 반영하고 있고 도시와 교외의 기온 절대값을 비교해 보았을 때, 토지피복 특성에 따른 기온의 차이가 뚜렷하게 나타나 도시가 교외보다 대체로 1~2°C 가량 높게 나타남을 알 수 있다. 특히, 수원은 1985년 이전에는 교외와 유사한 기온분포를 보였으나 이후 기온 상승폭이 커져 서울, 인천과 같은 대도시와 유사한 기온분포를 나타내고 있다. 이러한 기온변화 경향은 Fig. 2에 나타난 수원지역의 도시성장 분포와 깊은 상관성이 있을 것으로 사료된다.

기온에 대한 선형추세분석을 위하여 시간 t 에 대하여 반응변수인 연 평균기온을 y_t 라고 두었을 때 추세모형은 다음과 같이 정의하였다.

$$y_t = b_0 + b_1t + \epsilon_t \quad (1)$$

여기서 ϵ_t 는 서로 독립이며 평균 0과 분산 σ^2 을 갖는 정규분포를 따른다고 가정한다. 오차항의 분산 σ^2 은 기후변동의 크기로 간주될 수 있다. 이렇게 정의한 추세모형을 바탕으로 수도권 내 6개 지점의 전체, 도시(서울·인천·수원)와 교외(양평·강화·이천)로 구분하였을 때, 각각의 평균 최저기온에 대한 선형추

세모형을 구한 결과는 Table 4와 같다. 또한 이러한 선형추세모형에 의해 유도된 25년간의 평균적인 최저기온의 증가율은 수도권 전체는 0.45°C, 도시지역은 0.70°C, 교외지역은 0.03°C로 도시지역 기온이 교외지역보다 높은 기온상승경향을 나타내고 있음을 보여준다.

Table 4. Linear regression equations of the annual mean minimum air temperature and its variation for three categories (urban, rural, and total areas) during 1975 through 2000 (25 years)

	Linear regression equation	ΔT_{\min}
Urban	$y = 8.06 + 2.8 \times 10^{-2}x$	0.70
Rural	$y = 7.05 + 1.5 \times 10^{-3}x$	0.03
Total	$y = 7.54 + 1.8 \times 10^{-2}x$	0.45

이러한 결과를 바탕으로 본 연구의 대상지역인 수도권 도시성장과 연 평균 최저기온과의 상관관계를 알아보기 위하여 Table 3에 제시된 WAMIS Landsat 자료의 연도별 시가지지역 면적 비율과 Table 4의 수도권 6개 전체 지점의 25년간의 평균최저기온에 대한 선형추세식으로 구한 연도별 최저기온과의 상관관계식을 유도하였다. 시가지지역 면적은 5년 단위로 자료가 제공되므로 연도별 면적은 일정한 비율로 내·외삽하여 산정하였다. 그 결과 수도권 도시비율과 연도별 최저기온의 상관관계식은 $y = 0.054 \times x + 7.4027$ 와 같이 유도되었다. 여기서 x 는 수도권 내의 urban 비율, y 는 수도권의 평균 최저기온을 의미한다.

3.2. 도시성장예측 및 기온변화 추정

수도권지역의 도시성장 예측은 1975~1995년까지 20년 자료를 이용하여 2000년부터 2030년까지 30년 기간에 대해 1년 단위로 수행하였다. WAMIS 토지피복도 중에서 가장 최근 자료인 2000년 자료는 SLEUTH 모델링 기간과 일치하는 연도로서 모델결과 검증에 의해 사용되었다. SLEUTH 모델결과 검증을 위해 사용한 방법은 크게 두 가지로서 하나는 대상영역 내에서 각 토지피복이 차지하는 비율을 비교하는 방법이고 다른 하나는 실제 관측에 의한 토지피복과 모델에 의해 예측된 토지피복간 위치의 일치도를 분석하는 방법이다.

Fig. 4는 수도권지역 각 토지피복이 차지하는 비율

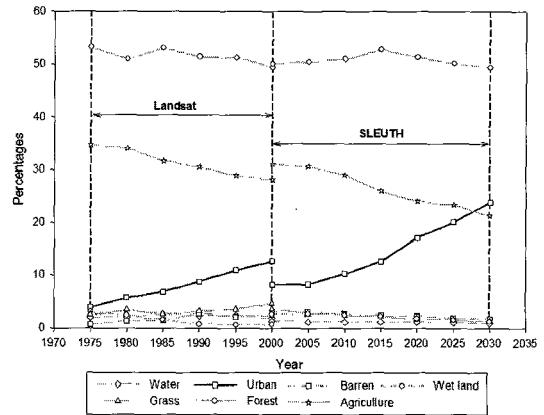


Fig. 4. Temporal variations of the fraction for each land-use category in the Seoul metropolitan area between the Landsat (1975~2000) and SLEUTH (2000~2030).

을 분석한 결과이며, 전체 기간 중 1975~2000년 (Landsat)은 관측값에 해당되는 WAMIS 토지피복 비율이며, 2000~2030년은 모델값에 해당되는 SLEUTH 모델이 예측한 토지피복 비율이다. 전체 기간 (1975~2030년)에서 가장 큰 비율을 차지하는 것은 산림으로, 1971년 도시계획법 개정에 따른 개발제한구역의 신설과 지속적인 산림증대 정책으로 인하여 50% 내외의 비율을 꾸준히 유지하고 있다. 한편, 상대적으로 경사도가 낮아 도시화가 되기 쉬운 농지의 경우는 1975년 이후 꾸준한 면적 감소가 나타나 25년 기간 동안 6.3%의 감소를 보였으며 이와 반대로 시가지지역의 비율은 지속적인 상승경향을 보이면서 8.5%의 증가를 보였다. 이러한 토지피복의 증감 경향은 SLEUTH 모델링 기간에도 비교적 잘 반영되고 있는 것을 알 수 있다. 특히, 시가지지역 면적의 경우는 비교·검증 연도에 해당되는 2000년 관측값보다 모델값이 다소 과소 모의되었으나 관측 기간 동안에 나타나는 상승추세는 SLEUTH 예측 기간 동안에도 비교적 잘 나타나고 있다. SLEUTH 모델은 2020년 이후부터 도시성장이 가속화되면서 2030년에는 수도권 내의 농지면적보다 시가지지역 면적이 더 큰 비율을 차지할 것으로 예측하였다.

모델 예측값이 실제 관측값과 얼마나 일치하는지를 알아보기 위하여 비교·검증 연도에 해당되는 2000년에 대하여 모델값과 관측값의 위치 일치도를

Table 5. 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)

WAMIS \ SLEUTH	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

분석하였다. Table 5는 입력 자료로 사용된 Landsat 토지피복 자료가 모델 예측값에 어떤 토지피복 상태로 변화되었는지를 분석할 수 있다. 관측과 모델의 토지피복이 일치하는 비율은 음영표시를 한 대각선의 값으로 일치하는 시가화지역 비율은 전체의 6.1%이다. 2000년의 수도권 전체 비율 중에 도시성장모델이 예측한 시가화지역의 비율은 8.3%이므로 모델이 예측한 시가화지역 전체 비율 중 관측값과 일치하는 비

율은 72.9%로 비교적 높은 정확도로 수도권지역의 도시성장을 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 시가화지역, 산림 및 농지를 제외한 수역·나지·습지·초지의 경우 일치율이 낮은 것을 알 수 있는데 이러한 일치율이 낮은 토지 피복이 수도권에서 차지하는 비율이 적으므로 기온변화에 미치는 영향이 적은 것으로 가정하였다.

Fig. 5는 SLEUTH 모델에 의해 예측된 수도권의

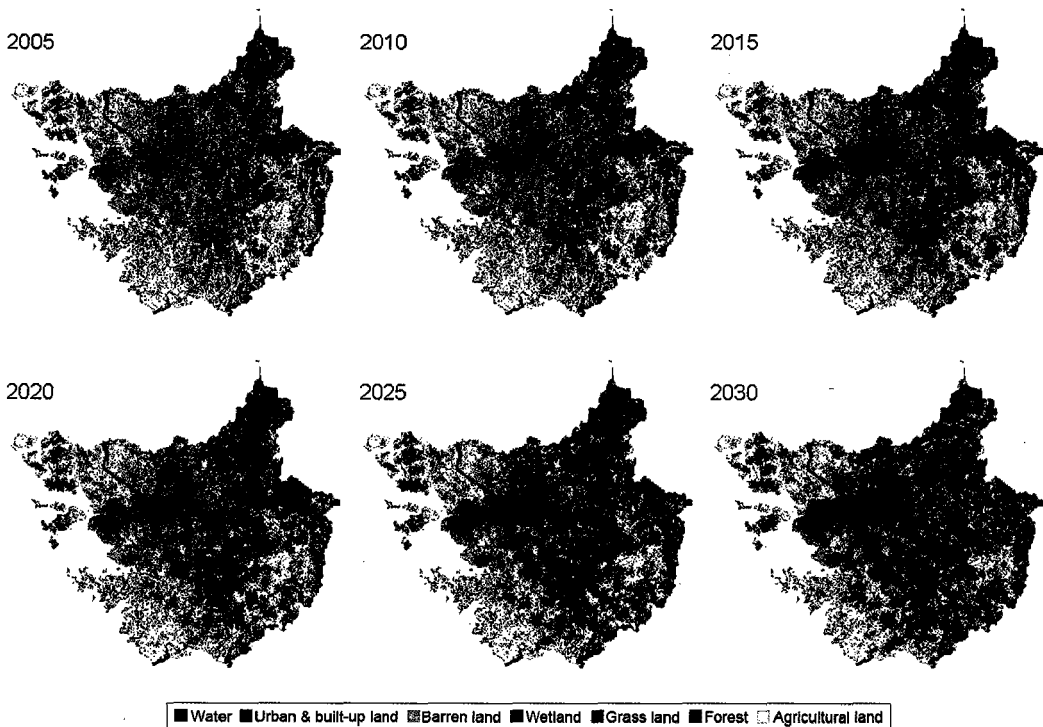


Fig. 5. The spatial distributions in the Seoul Metropolitan area simulated by the SLEUTH during 2005 through 2030.

연도별 토지피복 공간분포를 나타낸 것이다. 2005~2015년은 기존 도시영역 내부의 비 시가화지역의 개발과 도시 가장자리의 확장에 의해 도시성장이 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 서울 북서쪽에 위치한 일산 지역과 남동쪽에 위치한 분당 지역, 서울 인근의 군포, 안양, 수원 지역의 도시성장이 뚜렷하였으며, 이는 현재 수도권지역의 도시 분포와 유사한 결과이다. 2020년부터는 경사도가 낮고 도로가 지나는 경기도의 주요 거점도시를 중심으로 도시화가 가속화되는 경향을 보인다. 대표적인 지역으로는 용인·오산지역과 시흥·안산이며 이후 도시가 점차 확장되면서 2000년대의 서울-인천 구간처럼 서울-용인구간의 도시 확장이 두드러질 것으로 예상하였다. 이러한 도시영역의 확장에 따라 2030년에는 전체 수도권 면적에서 시가화지역이 차지하는 비율이 23.9%까지 증가하여 전체 농지면적보다 시가화지역의 면적이 더 클 것으로 예측하였다. 이러한 도시성장은 수도권의 기온변화에도 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 3.1절에서 유도한 도시성장률과 연 평균 최저기온과의 선형추세식에서 2020년 수도권의 연 평균 최저기온은 8.3℃, 2030년에는 8.7℃까지 오를 것으로 예상된다. 이것은 2000~2030년의 30년 동안 0.65℃, 연 평균 0.02℃만큼 도시성장에 의한 기온 상승효과가 있음을 의미한다. 이것은 산술적으로 비교하였을 때, 2000~2030년의 기온상승률은 지난 100년간 한반도 기온상승률(약 1.5℃/100yr)의 약 2.2배에 달하는 수치로서 시사하는 바가 크다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 1975~2000년의 기간에 대해 수도권지역의 기온과 토지피복자료를 이용하여 연 평균 최저기온의 변화와 과거 도시성장의 변화경향을 분석하였고 이를 통해 도시성장률과 연 평균 최저기온과의 관계식을 유도하였다. 또한 도시성장모형(SLEUTH)을 이용하여 예측된 미래 도시성장 결과를 관계식에 적용함으로써 도시성장에 따른 미래 평균 최저기온의 변화를 추정해보았다.

도시화·산업화의 초기 단계인 1975년부터 2000년까지 수도권 전체의 도시영역(또는 시가화지역) 비

율은 3.9%에서 12.7%로 8.8% 증가하였고, 같은 기간 동안 수도권지역 연 평균 최저기온의 선형추세선을 구한 결과 26년간 약 0.45℃만큼 기온이 상승한 것으로 나타났다. SLEUTH 도시성장모형을 이용하여 2000~2030년의 기간에 대해 수도권 도시성장을 예측하였으며, Landsat 위성에서 관측된 2000년 자료를 토대로 검증한 결과 도시성장 경향을 비교적 잘 반영하여 시가화지역의 일치 비율이 72.9%로 비교적 높은 정확도의 예측능력을 보였다. 2025년에는 전체 면적의 16.2%, 2030년에는 전체 면적의 23.9%까지 도시가 성장할 것으로 예측하였다.

과거 도시성장률과 기온과의 상관관계를 통해 계산된 선형추세선을 이용하여 SLEUTH 모형이 예측한 수도권 도시성장에 따른 연 평균 최저기온을 추정하였다. 수도권의 연 평균 최저기온은 2025년에는 8.3℃, 2030년에는 8.7℃까지 상승할 것으로 예상되었으며 이것은 연 평균 0.02℃만큼의 도시성장에 따른 기온상승효과가 있음을 의미한다. 또한 이러한 비율로 도시성장이 지속될 경우 2000~2030년의 기온상승률은 지난 100년간 한반도 기온상승률의 약 2.2배에 달할 것으로 예상되었다. 하지만 이러한 수치는 본 연구에서 모의된 도시성장률에 따른 결과에 따라 변동성을 내포하고 있다. 본 연구에서 사용된 SLEUTH 모형과 같은 CA기반 도시성장모형은 시간의 경과에 따른 도시성장률과 시나리오별 도시성장유형에 맞는 모의실험이 가능하다는 장점이 있으나 미래에 일어날 수 있는 실제 도시계획 및 정책을 반영하는데 제한이 따른다는 단점이 있다. 따라서 향후 도시계획 및 정책적인 요소를 고려할 수 있는 도시성장모형의 사용으로 도시성장률 예측 정확성을 더욱 현실화하는 연구가 필요할 것으로 생각되며 더 나아가 이러한 예측결과를 현업에서 사용 중인 기상예측모형에 적용하여 더욱 상세한 미래 지역규모 기후예측에 활용될 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

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

참고문헌

- 국가수자원관리정보시스템(WAMIS: Water Management Information System), 2009, <http://www.wamis.go.kr>.
- 국토지리정보원(NGII: National Geographic Information Institute), 2009, <http://www.ngii.go.kr>.
- 국토해양부, 서울특별시, 인천광역시, 경기도, 2009, 2020년 수도권 광역도시계획 -'09.4. 변경사항 반영 -
- 기상연구소, 2004, 기후변화협약대응 지역기후 시나리오 산출기술개발(III), 기상연구소 연구보고서 MR040C03, 510.
- 김상진, 2007, 도시 확장에 따른 온열환경의 변화, 한국태양에너지학회, 27(2), 95-101.
- 김재익, 황국웅, 여창환, 정현욱, 2007, 도시성장모형의 개발과 활용 : 통합적 접근방법, 대한국토·도시계획학회지 「국토계획」, 42(2), 31-48.
- 정재준, 한동엽, 김용일, 이재원, 2001, 셀룰라 오토마타를 이용한 수도권의 도시성장 예측, 한국 GIS학회, 9(3), 34-48.
- 지능형 교통체계 표준노드링크관리시스템(ITS-SNL: Intelligent Transportation Systems-Standard Nodes Link), 2009, <http://nodelink.its.go.kr>.
- Bacci, P., Maugeri, M., 1992, The urban heat island of Milan, *Il Nuovo Cimento C*, 15(4), 417-424.
- Changnon, S. A., 1992, Inadvertent weather modification in urban areas: Lessons for global climate change, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 619-627.
- Clarke, K. C., Gaydos, L., 1997, A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 247-261.
- Easterling, D. R., Horton, B., Jones, P. D., Peterson, T. C., Karl, T. R., Parker, D. E., Salinger, M. J., Razuvayev, V., Plummer, N., Jamason, P., Folland, C. K., 1997, Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe, *Science*, 277(5324), 364-367.
- Gallo, K. P., Easterling, D. R., Peterson, T. C., 1996, The Influence of Land Use/Land Cover on Climatological Values of the Diurnal Temperature Range, *J. Climate*, 9, 2941-2944.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds.)], 104.
- Jantz, C. A., Goetz, S. J., Shelley, M. K., 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: Planning and Design*, 31(2), 251-271.
- Landsburg, H. E., 1981, *The Urban Climate*, Academic Press, 275.
- Mitchell, J. M., 1961, Recent secular changes of global temperature, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 95, 235-250.
- Project GIGALOPOLIS, 2009, <http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig>.
- Stott, P. A., Stone, D. A., Allen, M. R., 2004, Human contribution to the European heatwave of 2003, *Nature*, 432, 610-614.
- Tett, S. F. B., Stott, P. A., Allen, M. R., Ingram, W. J., Mitchell, J. F. B., 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: Nonlinear Phenomena*, 10, 1-35.
- Zhai, P., Sun, A., Ren, F., Liu, X., Gao, B., Zhang, Q., 1999, Changes of climate extremes in China, *Climatic Change*, 42, 203-218.