

서울시 도시기온 변화에 관한 모델 연구

김학열 · 김운수

서경대학교 도시공학과 · 서울시정개발연구원 도시환경연구부

Statistical Models of Air Temperatures in Seoul

Kim, Hag-Yeol* · Kim, Woon-Soo**

*Dept. of Urban Engineering, Seokyeong University

** Dept. of Urban Environment, Seoul Development Institute

ABSTRACT

Under the assumption that the temperature of one location is closely related to land use characteristics around that location, this study is carried out to assess the impact of urban land use patterns on air temperature. In order to investigate the relationship, GIS techniques and statistical analyses are utilized, after spatially connecting urban land use data in Seoul Metropolitan Area with atmospheric data observed at Automatic Weather Stations (AWS). The research method is as follows: (1) To find out important land use factors on temperature, simple linear regressions for a specific time period (pilot study) are conducted with urban land use characteristics, (2) To make a final model, multiple regressions are carried out with those factors and, (3) To verify that the final model could be applied to explain temperature variations beyond the period, the model is extensively used for 5 different time periods: 1999 as a whole; summer in 1999; 1998 as a whole; summer in 1998; August in 1998.

The results of simple linear regression models in the pilot study show that transportation facilities and open space area are very influential on urban air temperature variations, which explain 66 and 61 percent of the variations, respectively. However, the other land use variables (residential, commercial, and mixed land use) are found to have weak or insignificant relationship to the air temperatures. Multiple linear regression with the two important variables in the pilot study is estimated, which shows that the model explains 75 percent of the variability in air temperatures with correct signs of regression coefficients. Thus, it is empirically shown that an increase in open space and a decrease in transportation facilities area can leads to the decrease in air temperature.

[†]Corresponding Author : Hag-Yeol Kim, Dept. of Urban Engineering, Seokyeong University, Seoul 136-704, Korea. Tel. : +82-2-940-7492, E-mail : hagkim@skuniv.ac.kr

After the final model is extensively applied to the 5 different time periods, the estimated models explain 68 ~ 75 percent of the variations in the temperatures with significant regression coefficients for all explanatory variables. This result provides a possibility that one air temperature model for a specific time period could be a good model for other time periods near to the period. The important implications of this result to lessen high air temperature are: (1) to expand and to conserve open space and (2) to control transportation-related factors such as transportation facilities area, road pavement and traffic congestion.

Key Words : Air Temperature, Land Use, GIS, Open Space

1. 서론

도시화 과정은 한 지역내의 시설물 공급을 통한 인공환경의 변화와 그에 따라 발생된 급격한 자연환경 변화를 양산해왔으며 이러한 변화들은 도시화 이전의 기후와 대별되는 '도시기후'라는 새로운 기후 형태를 낳게 되었다(Landsberg, 1981; Oke, 1987; Atkinson, 1985, Oke *et al.*, 1992). 이러한 도시기후의 가장 두드러진 특성으로는 도시내부 온도가 도시외곽의 온도보다 높은 도시열섬현상을 들 수 있으며, 이 현상은 도시 규모가 확장될수록 더욱 집약적인 현상으로 자리잡게 되는 것으로 보고되고 있다. 특히 도시열섬을 형성하는 특수한 도시기후 범역의 형성은 지역내 에너지 평형을 왜곡시키는 현상을 낳게 되고, 에너지 평형을 보전하기 위한 에너지의 추가적 소비에 의해 대기오염도는 더욱 점증하는 악순환을 낳게 된다. 또한 도시열섬 현상은 지역내 기온상승·통풍불량 등의 환경악화를 유발하여 시민 건강의 위해 가능성은 물론, 도시 자체의 신진대사과정에 영향을 미쳐 도시의 점진적 지속성이 확보되지 못하게 한다.

도시열섬현상에 관한 연구는 도시 내·외부의 등온도 분포곡선을 추정하여 지도화함으로써 도시온도의 공간적 분포현상이 토지이용과 높은 상관관계가 있음을 보여주었다(Oke 1987; Wanner and Hertig, 1984; Carnahan and Larson, 1990; Moreno-Garcia, 1994). 특히 Oke(1987)과 Moreno-Garcia(1994)는 도시 녹지 지역의 온도가 다른 도심부의 온도와 비교하여 현저히 낮게 관측됨을 통하여 녹지의 기온저감효과를 나타냄으로써 토지의 피복상태와 대기온도는 높은 상관관계

가 있음을 보여주었다.

이러한 도시온도와 토지피복에 관한 선행연구는 그 온도 측정방법에 따라 크게 실측온도를 바탕으로 한 것과 원격탐사자료를 활용한 것으로 나뉘어지며 이러한 분류는 대체로 분석 대상지역의 규모와 관련성이 있다. 소규모 지역을 대상으로 한 연구는 실측온도를 바탕으로 연구가 수행되며 녹지나 아스팔트 등 특정한 토지피복에 관한 지표온도 및 대기온도분석에 관한 연구가 주를 이룬다. 반면, 대규모 지역을 대상으로 한 연구의 경우는 원격탐사자료의 열밴드를 활용하여 지표온도를 추정하고 토지피복자료를 추출하여 토지피복에 따른 대기온도변화를 분석한 것이 그 대부분을 차지한다.

소규모 지역을 대상으로 한 논문으로는, 일본 Tama New Town의 중앙공원을 포함하는 지역(1.44 km²)의 토지피복에 따른 온도변화를 측정·분석하여 중앙공원에 의한 냉방비 절감 효과를 분석한 연구가 있다(Ca *et al.*, 1998). 또한, Shashua-Bar와 Hoffmann(2000)은 다양한 형태의 도시녹지공간의 기온저감효과를 분석하기 위하여 Tel-Aviv 대도시내부의 공원 및 식재지역 등 11개 지역의 기온을 측정하고 측정지점의 주변온도, 수목에 의한 그늘의 면적 등을 이용한 회귀모델을 추정하여 그늘효과의 중요성을 분석하였다. 특히 이 연구는 60m 폭 정도의 공원으로부터 발생된 찬공기는 그 공원 경계로부터 100m 떨어진 지역까지 영향을 미침을 보여주었다. 윤용한(2001)은 공원 및 주변지역(22.8ha)의 온도와 풍향, 풍속, 녹지율, 수목분수 등에 관한 회귀식을 도출하여 녹지의 특성과 바람에 의한 기온저감효과를 설명하였다.

대규모 지역의 위성영상자료를 이용한 열섬현상 분석에 있어서는, 박인환 등(1999)이 식생지수, 지역기후

조건과 도시열섬현상의 관계를 대구·경주·포항의 3개 도시의 추이대를 대상으로 분석하였으며, Lee (1993)는 위성영상의 열적외선 자료(밴드 6)와 대기온도간에 선형회귀식을 구축하고 열섬현상에 영향을 미치는 주요 인자들로 농경지, 산림, 공원 등의 토지이용비율과 인구관련인자들을 도출하였다. Aniello(1995)는 Landsat TM 자료를 분석하여 미국 달라스시의 도시열섬 분포지도를 작성하면서 열섬현상의 주요 발생이 나지, 주차장, 상업지, 아파트지구, 대규모 상가 등과 같이 녹지가 부족한 지역과 높은 상관관계가 있음을 보여주었다. Saaroni *et al.*(2000)은 Tel-Aviv시 전체를 대상으로 다양한 높이에서 실측된 대기온도와 TVR (Thermal Video Radiometer) 자료를 활용하여 시간대별 상관관계를 분석함으로써 도시내부와 외곽과의 온도차이, 측정높이에 따른 온도변화 등을 평가하였다. 이처럼 녹지의 기온에 대한 영향력을 설명하려는 다양한 연구가 수행되어왔으나, 녹지 이외에 다른 토지이용과 관련하여 대기온도를 분석한 사례가 극히 적으며, 자료구축에 있어서는 공간분석단위에 대한 체계적인 고려가 부족한 경우가 많았다. 또한 모델 구축과정에 관한 충분한 설명이 이루어지지 못하고, 구축된 모델에 관한 추가적인 검증작업이 미흡한 경우가 대부분이었다.

이에 서울시를 대상지역으로 수행된 본 연구는 선행 연구와 달리 원형구조의 공간분석단위를 기초로 하여 여러 시기에 적용가능한 대기온도모델을 토지이용과 연계하여 도출함으로써, 대기온도에 관한 토지이용의 영향력을 파악하고 대기온도 저감을 위한 정책적 시사점을 제시하는데 그 목적이 있다.

II. 연구방법

1. 분석방법

도시내 한 지점의 대기온도는 그 지점 주변의 토지이용, 지형, 주변온도, 기후조건과 밀접한 관계가 있다는 가정에 기초하여, 서울시내에 위치한 자동기상측정망(AWS) 23개 지점(그림 1 참조)의 온도와 그 주변 일정거리 내의 토지이용유형별 면적을 추출하였다. 온도에 영향을 미치는 공간규모에 대한 확실한 경계가 밝혀지지 않는 않지만, 일정한 규모 이상의 공원으로로부터



그림 1. 서울시 AWS 위치

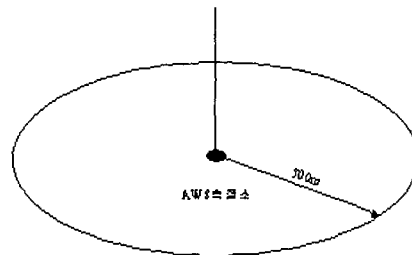


그림 2. AWS 주변지역의 토지이용추출방법

온도가 완화되는 거리는 대기온도에 따라 250m~300m 정도이며(윤용환, 2000), 0.6 km의 공원은 풍향에 따라 1km까지 영향을(Ca *et al.*, 1998) 미친다고 분석되고 있다. 본 분석에서는 서울시내부의 각 AWS지점으로부터 반경 500m의 원형지역(0.79 km²)을 추출하고(그림 2 참조), 각 원형지역 내부의 토지이용면적 및 기타 주요 영향인자들을 추출한 후, 다음과 같은 초기 모형식을 이용하여 그 관계를 설명하고자 하였다.

$$T_k = f(T_{bk}, E_k, WS_k, LU_{ik}, M_k) \quad (식 1)$$

여기서,

T_k = AWS k지점의 온도

T_{bk} = AWS k지점 주변(background)온도

E_k = AWS k지점 지역의 평균고도

WS_k = AWS k지점 풍속

LU_{ik} = AWS k지점 지역의 토지이용 i 의 면적
(i = 녹지, 주거지 등)

M_k = 기타 인자(건물의 용적률, 건축재료, 포장률, 교통량, 에너지사용량, 기상인자, 인구

및 기타 사회경제학적 인자 등)

2. 자료

토지이용에 관해서는 1999년에 조사된 서울시 비오 톱 현황자료를 사용하였다. 이 비오톱 자료는 실제 토 지이용형태를 조사하여 구축된 자료로서 11개의 중분 류 토지이용으로 구성되어 있다(표 1 참조). 본 연구에 서는 서울시에 위치한 전체 AWS지점(23개 지점)으로 부터 반경 500m의 원형지역을 추출하여 토지이용자료 로 활용하였으며 표본지역내에 걸쳐지가 많은 몇몇 토 지이용(표 1 참조)에 대해서는 단순회귀식의 추정을 통하여 설명변수로서의 활용가능성을 검증하였다.

표고자료는 서울시 1:1000 수치지형도의 등고자료로 부터 생성된 삼각망(TIN) 자료에서 원형지역을 추출 하여평균 표고를 산출하였다.

어떤 한 지점의 AWS의 온도는 그 주변의 온도로부터 영항이 있을 것으로 예상됨에 따라, 한 측정지점의 주변 온도를 얻기 위하여 GIS를 활용하여 각 AWS에 서 가장 가까운 AWS지점을 확인하여 설명변수로 활 용하였다. 또한 바람의 영항으로 인하여 온도증감이 발

생할 수 있으므로 각 AWS지점별로 풍속자료를 추출 하여 사용하였다.

종속변수로 사용되어질 AWS자료는 기장청이 1995 년부터 국지규모의 방재기상정보 생산을 위하여 설 치·운영되어온 자동기상측정망(Automatic Weather Station)으로부터 획득된 자료이며, 관측요소로는 매 10분 간격의 기온, 강수량, 풍속, 풍향, 습도이다. 이 중 서울시내에 설치된 AWS의 1999년 및 1998년 시간별 평균자료를 이용하여 여름철(7, 8, 9월), 8월 평균, 연평 균치를 계산하여 회귀모형에 사용하였다(표 2 참조). 8 월 평균은 대기온도가 가장 높은 시기에 대한 시사점을 제시할 수 있을 것으로 예상되어 선택되었으며, 여름철 및 연평균자료도 여름철뿐만 아니라 연중 전체적인

표 1. 서울시 비오톱자료의 토지이용분류

중분류	내용	결측 빈도
주택	X1 단독주택지, 공동주택지, 농촌형 취락지	2
상업 및 업무시설지	X2 상업업무 시설지	6
혼합지	X3 주거·상업 혼합지	5
공업지	X4 공업지	21
공공 용도지	X5 교육시설, 행정기관, 병원 및 요양기관, 연구기관, 대규모 운동시설	0
교통 시설지	X6 철도 및 관련시설, 도로 및 관련시설, 공항 및 관련시설	1
도시부양 시설지	X7 하수처리장, 유수지, 배수지, 쓰레기 매립장 등	18
나지	X8 건설현장지역, 건설현장이 아닌 나지	9
특수지	X9 군사시설, 묘지, 골프장, 식물원	19
하천및습지	X10 연못, 하천, 습지	17
녹지 및 오픈스페이스	X11 녹지 및 오픈스페이스	0

표 2. 서울시 AWS 지점별 1시간 평균온도

지점 번호	측정소	1999년		
		8월 평균	여름평균	연평균
400	강남	26.18	25.46	13.82
401	서초	26.62	25.70	14.08
402	강동	25.99	25.11	13.06
403	송파	26.50	25.51	13.96
404	강서	25.68	24.31	13.69
405	양천	27.27	25.98	14.00
406	도봉	25.34	24.43	12.62
407	노원	24.66	23.84	12.07
408	청량리	26.47	25.59	13.95
409	중랑	26.13	25.31	13.62
410	동작	25.70	24.69	14.00
411	마포	26.93	25.74	14.21
412	서대문	25.10	23.97	12.55
413	상동	26.07	25.29	13.65
414	성북	25.09	23.92	12.39
415	용산	26.53	25.44	13.75
416	은평	25.72	24.47	12.99
417	금천	24.48	23.29	12.82
418	한강	26.11	25.09	13.56
419	중구	24.89	23.84	11.98
420	북한산	23.37	24.44	12.75
509	관악	24.77	23.74	11.92
510	영등포	27.33	26.03	14.19
평균		25.78	24.83	13.29

대기온도설명에 기여할 수 있다고 판단되어 활용되었다.

이 밖에도 (식 1)의 M_k 변수에서 제시된 것처럼 대기온도를 체계적으로 설명하기 위해서는 다양한 인자들이 필요로 하나, 현재까지 관련자료가 구축되어 있지 않거나 특정 몇몇 지역에 한정되어 구축되어있어서 본 분석의 활용 변수에서 제외시켰다¹⁾.

III. 회귀 모형 설정 및 평가 과정

1. 단순회귀식의 분석

8월 평균, 여름철 평균, 연평균 기온에 관한 모형식을 도출하기 위해서, 먼저 하나의 시점을 기준으로 설명모형을 추정한 다음(파일럿 연구), 나머지 시점에 적용하여 추정된 모델의 설명력 및 적합성을 비교·평가하였다. 파일럿 연구에는 AWS의 1999년 8월 평균의 자료를 이용했으며, 사용되어진 표본수는 1999년 8월 현재의 자동기상측정지점의 모집단 수와 동일한 23개였다.

다중회귀모형에 투입될 변수를 선정하기 위하여 각 설명변수별 단순회귀모델을 추정하여 모델의 유의성(F-검정)을 검정하였으며 각 회귀식의 설명력과 회귀계수 부호의 적정성을 판단하였다. 비록 회귀식이 1% 유의수준에서 유의성이 인정되지 않더라도 토지이용형태가 비슷한 변수들을 통합하여 유의성 여부를 확인하였다.

1999년 8월 기온의 분석결과, 교통시설지(X6), 녹지 및 오픈스페이스(X11), 평균표고(E)에 관한 모형식은 전체 모델에 관한 F검정과 설명변수의 회귀계수에서 모두 1% 유의수준의 유의성이 인정되었다. 즉 교통시설지의 회귀식은 대기온도의 전체 변이량의 65.7%정도를, 녹지및오픈스페이스는 61.4%를, 그리고 평균표고는 57% 정도를 설명하고 있음이 확인되었다.

여기서 평균표고에 관한 해석은 좀 더 주의를 기울일 필요가 있다. 평균표고가 높을수록 대기온도가 낮은 것은 일반적인 자연현상에 기인한다고 말할 수 있으며 대체로 고도가 높은 지역은 구릉지 및 산지일 경우가 많아 녹지변수(X11)와 상당한 상관관계가 있을 것으로 판단된다. 두 변수의 상관계수를 산출한 결과 0.7014로

나타나 두 변수간의 상관성을 판단할 수 있었다.

이밖에 F검정을 통하여 10% 유의수준에서 유의성이 인정된 회귀식은 상업및업무시설지(X2)와 공공용도지(X3)에 관한 회귀식이었다. 비록 이 회귀식들의 설명력은 21%정도로 낮았지만 각 설명변수의 계수가 예상된 부호를 나타냈으며, 회귀계수에 관한 t검정에서 각각 10%, 5%에서 그 유의성이 인정되었다.

변수간 통합이 시도된 주택지(X1), 상업 및 업무시설지(X2), 혼합지(X3)의 회귀식에서는 X2와 X3을 합한 변수가 기존의 단순회귀식의 모형보다 그 설명력이 우수한 것으로 나타나(표 3 참조) '상업 및 업무시설지'(X2)와 '혼합지'(X3)를 '주상혼합지'로 통합하여 다중회귀분석의 경우에 설명변수로 활용하였다.

본 연구의 다중회귀모형에 투입될 변수의 내용과 기초통계량은 아래의 표 4와 표 5에 제시되었다.

표 3. 독립변수별 단순회귀식(99년 8월 온도)

독립변수	상수항	회귀계수	결정계수 (R ²)	F-점수	
주택	X1	25.84***	1.71×10^{-7}	0.010	0.01
상업및업무시설지	X2	25.85***	4.00×10^{-6}	0.219	3.93*
혼합지	X3	25.70***	2.54×10^{-6}	0.106	1.53
공업지	X4	결측치 과다(Not fully ranked)			
공공용도지	X5	26.31***	-2.16×10^{-6}	0.205	4.04*
교통시설지	X6	25.18***	8.66×10^{-7}	0.657	34.42***
도시부양시설지	X7	26.81***	-1.23×10^{-5}	0.268	1.10
나지	X8	25.90***	1.05×10^{-5}	0.152	1.97
특수지	X9	25.30***	8.65×10^{-6}	0.358	0.56
하천및습지	X10	26.42***	-4.25×10^{-7}	0.006	0.02
녹지및오픈스페이스	X11	26.82***	-2.67×10^{-6}	0.614	28.66***
T_{ik}		20.85***	0.20	0.085	1.67
E_i		26.84***	-0.0212 ***	0.570	23.86***
WS_i		25.03***	0.0571	0.142	2.98
X1+X2		25.45***	2.63×10^{-6}	0.159	3.41*
X2+X3		25.14***	3.26×10^{-6}	0.333	8.98***
X1+X2+X3		25.36***	1.99×10^{-6}	0.209	4.75**

*유의수준 10%, **유의수준 5%, ***유의수준 1%

표 4. 다중회귀분석에 도입된 변수내용

구분	변수	단위	설명
종속	T	℃	AWS 온도
토지이용	TC	m ²	상업지, 주상혼합지 면적
	TR	m ²	교통시설지면적 (도로, 터미널 등)
	G	m ²	녹지, 오픈스페이스 및 공공용지
자연환경	E	m	평균고도

표 5. 변수의 기초통계량

변수	평균	표준편차	최소	최대
T**	25.78	0.96	23.37	27.33
RC	320077	186754	0	644684
TR	95653	71523	0	253528
G	291823	240426	6419	781186
E	55.78	88.58	10	444.72

*1999년 8월 온도

2. 다중회귀식의 설정

투입될 변수들과 관계식(식 1)과 단순회귀식의 결과를 토대로 다음과 같은 다중선형회귀식의 초기모형을 구축하였다.

$$T_k = b_0 + b_1 E_k + b_2 TR_k + b_3 G_k + b_4 RC_k + b_5 TR_k G_k + b_6 G_k RC_k + b_7 TR_k RC_k + b_8 TR_k G_k RC_k \quad (식 2)$$

여기서,

T_k = AWS k지점의 온도

E_k = AWS k지점 지역의 평균고도

TR_k = AWS k지역내 교통시설지 면적

G_k = AWS k지역내 녹지와 공공용지 면적

RC_k = AWS k지역내 주거·상업지 면적

상기 회귀식에는 토지이용의 상호작용으로 인하여 발생할 수 있는 다양한 효과(상승작용, 상쇄작용 등)를 포함시키기 위해서 $TR_k G_k$, $G_k RC_k$, $TR_k RC_k$ 및 $TR_k G_k RC_k$ 변수가 도입되었다.

회귀모형식(식 2) 추정결과, 각 변수의 회귀계수는 t 검정값에서 유의수준 0.05에서 모두 유의하지 않음이 확인되었고 다중공선성의 판정을 위한 분산팽창계수(VIF: Variation Inflation Factor) 수치결과도 상당히 높아 변수의 다중공선성의 위험성이 존재함을 알 수 있었다. 이러한 결과가 모델 특정화(model specification)의 오류로 발생되었을 경우를 감안하여 이중로그함수, 역세미로그함수 및 세미로그함수를 이용하여 추정하였으나, 선형회귀함수보다 그 결과가 향상되지 않음을 확인할 수 있었다.

따라서, 다중공선성의 제거와 유의한 t 검정값을 얻기 위하여 회귀식(식 2)에 도입된 변수들 중에서 R² 선택법, 수정 R² 선택법, 증감법 등을 이용하여 변수들을 선택하여 1999년 8월의 대기온도에 대해 다음과 같은 회귀모형이 최종적으로 구축되었다²⁾.

$$T_k = b_0 + b_1 TR_k + b_2 G_k \quad (식 3)$$

영향관측점(influential observation)으로 인하여 모형추정에 큰 변화가 발생할 수 있으므로, 잔차, PRESS, Cook's 거리, DFFIT 등의 방법으로 영향관측점을 확인하여 해당 관측치를 제거하였다(표 6 참조).

금천, 중구, 북한산의 Cook's 거리에 대한 F분포 = F(3, 23)의 백분위수(percentile)는 각각 14, 14, 24로써 회귀식에 영향가능성이 나타났다. 또한, 이 관측점들에 대한 DFFIT 값들이 임계치인 0.59 보다 큰 것으로 확인되어 이 관측점들이 회귀모형에 영향을 미침을 알 수 있었다(Neter et. al., 1996). 따라서, 금천, 중구, 북한산의 평균치는 본 분석에서 제외시켰다.

3. 초기 모델결과 및 확대적용

설명변수의 선택과정과 주영향관측점들의 제거과정을 통하여 다중회귀분석을 수행한 결과, 1999년 8월에 대하여 다음과 같은 추정식을 얻었다.

$$T_k = 25.924 + 5.51 * 10^{-6} TR_k - 1.51 * 10^{-6} G_k$$

t-value (79.68) (3.12) (-2.60)

F = 26.088 p-value = 0.0001

R² = 0.7542 (식 4)

표 6. 주영향 관측점 분석(1999년 8월 모형)

지점	잔차	PRESS*	Cook's 거리**	DFFIT***
강남	0.32	0.38	0.01	0.20
서초	0.48	0.53	0.01	0.20
강동	0.53	0.56	0.01	0.18
송파	0.03	0.03	0.00	0.01
강서	0.17	0.19	0.00	0.10
양천	0.44	0.68	0.10	0.55
도봉	0.23	0.25	0.00	0.10
노원	-0.29	-0.33	0.01	-0.15
청량리	-0.59	-0.82	0.12	-0.59
중랑	-0.07	-0.08	0.00	-0.04
동작	0.07	0.07	0.00	0.02
마포	0.93	0.98	0.03	0.30
서대문	0.06	0.06	0.00	0.03
성동	0.73	0.81	0.04	0.35
성북	-0.13	-0.14	0.00	-0.05
용산	0.62	0.68	0.02	0.27
은평	-0.02	-0.03	0.00	-0.01
금천	-1.61	-1.83	0.25	-0.98
한강	0.43	0.47	0.01	0.19
중구	-1.69	-1.90	0.25	-1.00
북한산	-1.28	-1.67	0.40	-1.19
관악	-0.08	-0.11	0.00	-0.07
영등포	0.74	0.87	0.07	0.47

* i번째 관찰치가 없을 때의 회귀모형 추정결과와의 잔차

** Cook's 영향관측치

*** 예측치에 대한 관찰치의 표준화된 영향정도

이 모형은 대기온도 변이의 총 75.4%를 설명하고 있고, F 검정의 결과, 회귀식의 유의수준 0.01에서도 유의함이 인정되었으며, 각 변수의 부호는 예상했던 결과를 나타냈다. 변수에 관한 t 검정값도 모두 유의수준 0.05에서 유의하였다.

1999년 8월의 회귀분석의 결과, 교통시설지 면적이 넓을수록 대기온도가 높은 반면, 녹지 면적의 증가는 이와 반대의 현상을 나타냈다. 계수의 크기를 보면, 설명변수 중 교통시설지의 단위면적 변화로 인한 영향력이 녹지의 변화로 인한 영향보다 더 크다는 것을 알 수 있어, 도시대기온도 상승을 억제하기 위해서는 교통관련 인자들에 대한 적절한 정책적 수단과 아울러 녹지 면적을 증가시킬 수 있는 정책마련으로 온도저감효과를 증대시키는데 활용하여야 한다고 판단된다. 최종 모

형에 도입된 두 변수들은 본 모형식에 포함되어있지 않은 많은 인자들(차량, 통행량, 건물규모, 인구, 경제활동 등)의 대리변수일 수 있으므로 모델결과를 해석하는데 있어서 다각적인 이해가 필요하다고 판단된다.

상기 모델추정결과가 다른 기온측정시점에 확대적용 가능한지를 확인하기 위하여, 1999년의 여름평균(7, 8, 9월), 연평균과 1998년 8월, 여름평균, 연평균에 대하여 회귀모형(식 3)을 적용하여 회귀계수를 추정하였다. 1998년도의 회귀모형 추정에 있어서는 1998년 토지이용현황 자료가 있어야 하나, 1999년의 토지이용형태가 1998년과 비교하여 큰 변화가 없었다는 가정 하에 1999년 자료를 사용하였다.

표 7과 표 8에 제시된 바와 같이 추정된 회귀모형식 모두 F값 검증으로부터 회귀식의 유의함이 인정되었으며, 설명력은 67.6(1998년 8월)~75.4%(1999년 8월)를 나타내어, 본 분석에 사용된 모집단의 수와 횡단면분석이라는 점을 고려해 볼 때 각 모형의 설명력이 우수한 것으로 나타났다.

1999년과 1998년의 8월 및 여름철에 관한 회귀식의 모든 계수는 유의수준 0.05에서 유의하였다. 대기온도에 가장 큰 영향을 미치는 상수항은 '주변온도효과'(background effect)라고 설명될 수 있다. '통시설지'(TR)의 회귀계수는 $4.01 \times 10^{-6} \sim 5.51 \times 10^{-6}$ 에 분포하고, '녹지및오픈스페이스(G)' 변수의 계수는 $-1.51 \times 10^{-6} \sim -1.60 \times 10^{-6}$ 사이에 분포함이 확인되었다. 따라서 TR의 면적 증가는 대기온도의 상승에 기여하는 반면, G의 면적증가는 기온저감에 기여함

표 7. 1999년도 분석시기별 회귀모델추정결과

년도	구분	8월평균 모형	여름평균 모형	99년 전체 모형
'99	F	26.09***	23.12***	20.53***
	R ²	0.754	0.731	0.707
	정수항	25.92 (79.68***)	24.98 (75.11***)	13.81 (40.58***)
	TR	5.51×10^{-6} (3.12***)	4.89×10^{-6} (2.71**)	2.51×10^{-6} (1.36)
	G	-1.51×10^{-6} (-2.60**)	-1.60×10^{-6} (-2.68**)	-2.21×10^{-6} (-3.62***)

*유의수준 10%, **유의수준 5%, ***유의수준 1%

주: 괄호안은 각 계수의 t-value임

표 8. 1998년 분석시기별 회귀모델추정결과

년도	구분	8월평균 모델	여름평균 모델	98년 전체 모델
'98	F	17.732***	25.942***	22.41
	R ²	0.676	0.753	0.725
	정수항	25.33 (71.12***)	24.14 (84.95***)	14.17 (50.93***)
	TR	4.31×10 ⁻⁶ (2.23**)	4.02×10 ⁻⁶ (2.60**)	3.04×10 ⁻⁶ (2.01*)
	G	-1.58×10 ⁻⁶ (-2.49**)	-1.58×10 ⁻⁶ (-3.10***)	-1.62×10 ⁻⁶ (-3.26***)

*유의수준 10%, **유의수준 5%, ***유의수준 1%

주: 괄호안은 각 계수의 t-value임

이 확인되었다. 또한 TR의 단위면적당 증가로 인한 기온의 절대적 영향이 G의 단위면적증가의 영향보다 2~3배 가량 큰 것으로 확인되었다.

1999년과 1998년의 연평균에 관한 회귀식의 결과를 살펴보면, 두 회귀식 모두가 F값 검증으로부터 유의성이 인정되었고, 각각 70.7%, 72.5%의 설명력을 나타냈다. 비록 99년 평균에 있어서 TR의 회귀계수가 유의성은 인정되지 못했으나, 98년 평균에 있어서는 유의수준 0.1%에서 유의성이 확인되어 연평균모델로써도 활용가능성을 보여주었다. TR의 회귀계수의 크기 및 그 유의성은 분석시기가 길어질수록(8월, 여름, 연평균) 2개 연도 모두 점차로 감소한 반면, G의 회귀계수는 그 크기 및 유의성에서 증가추세를 나타내고 있다.

각 설명변수의 1% 증가에 따른 대기온도의 % 변화를 평가하기 위해 각 변수의 평균에 있어서의 탄력성을 계산하였다(표 9 참조). 설명변수의 평균에서 TR 면적의 1% 증가는 대기온도의 0.016~0.021% 증가에 영향을 미치고, G 면적의 1% 증가는 대기온도 0.017~0.046%의 감소에 영향을 미침을 알 수 있다. 특히 98년, 99년평균에 관한 회귀식에서의 G의 탄력성은 그 크기가

표 9. 설명변수별 표본평균에서의 탄력성

변수	1999년			1998년		
	8월평균 탄력성	여름평균 탄력성	연평균 탄력성	8월평균 탄력성	여름평균 탄력성	연평균 탄력성
TR	0.0204	0.0212	-	0.0164	0.0172	0.0199
G	-0.0171	-0.0178	-0.0461	-0.0184	-0.0193	-0.0327

각 년도 8월에 비교하여 1.7~2.7배 가량 큰 것으로 분석되어 녹지의 역할이 여름보다는 연평균 전체에 더 큰 영향력을 나타냄을 알 수 있었다. TR 면적의 탄력성은 1998년에 비교하여 1999년에 더 커진 것으로 나타났는데, 이는 차량의 증가, 교통체증 등으로 인하여 단위교통시설면적 당 열발생이 증가함에 기인한 것으로 생각된다. 따라서 교통시설지 및 교통관련 인자들(교통량, 정체, 신호체계 등)의 효율적인 관리와 도시녹지 확충을 통한 도시대기온도 저감정책이 필요하다고 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 도시의 실제적 토지이용과 여름철 대기온도의 상관관계를 분석하고 모델을 개발하여 도시대기온도에 영향을 미치는 인자의 분석으로 대도시 대기온도 저감을 위한 실증적 자료를 제공하며, 모델의 결과를 이용하여 정책적 시사점을 제공하는데 목적이 있다. 이를 위해서 GIS 기술을 활용하여 토지이용자료와 자동기상측정망자료를 연계시켜 관련 자료를 추출하였고 회귀식 도출과정 및 모델 확대적용작업을 통하여 구축된 모델을 검증하였다.

1999년 8월 자료를 이용하여 추정된 회귀모델을 다른 시기(99년 여름철 및 연평균; 98년 8월, 여름철 및 연평균)에 확대적용하여 회귀계수를 추정한 결과, 교통시설지와 녹지 및 오픈스페이스 면적이 서울시 대기온도를 설명하는데 통계적으로 유의미함이 확인되었다. 이 모델의 설명력은 시기에 따라 67.6 ~ 75.4%로 나타나, 적은 수의 모집단의 이용과 횡단면 분석이라는 점을 고려해 볼 때 상당히 우수한 것으로 나타났다.

500m 반경내의 교통시설지 면적의 1% 증가는 그 공간의 온도를 0.016~0.021% 증가시키는 것으로 나타났으며, 녹지 및 오픈스페이스의 1%의 증가는 그 공간의 대기온도를 0.017~0.046%정도 감소시킴이 확인되었다. 따라서, 도시 기온저감 및 쾌적한 도시환경을 조성하기 위해서는 녹지확충정책과 교통관리정책을 동시에 수립함이 바람직하나, 녹지면적을 크게 증가시키기 어려운 서울의 상황을 고려해 볼 때, 교통관련 인자들을 대기오염차원에서뿐만 아니라 대기온도 저감차원까지도 고려할 수 있는 정책마련이 필요하다. 아울러, 근린

생활공간에 지속적인 식재사업과 벽면녹화, 옥상정원 조성 등에 관해 인센티브를 제공할 수 있는 제도적 장치가 필요하다고 판단된다.

비록 본 연구가 쾌적한 도시환경조성과 토지이용계획에 활용가능한 의미가 있는 결과를 도출하였으나 여러 가지 측면에서 한계점이 존재하며, 이에 향후 연구 과제에서는 다음과 같은 내용들이 중점적으로 고려되어야 할 것이다. 첫째, 대기온도를 설명하는데 보다 다양하면서도 적절한 자료가 활용되어야 한다. 모형식 (1)의 M_k 변수에서 예시된 중요한 영향인자가 자료 획득가능으로 인하여 고려되지 못했다. 따라서 향후 연구에 있어서는 건축물, 교통, 토지이용관련 상세자료가 활용되어 보다 설명력이 높은 대기온도모델이 연구되어야 할 것이다. 또한 자연환경(지형, 기상·기후조건 등) 및 사회경제학적 변수에 관하여 보다 체계적인 변수도입이 필요하다고 판단된다. 둘째, 모델특정화 작업에 있어서 도입된 변수들간의 발생가능한 상호작용이 체계적으로 연구되어야 하며 비선형 및 시계열 모형 추정 등 다양한 모델특정화작업이 수행되어야 한다. 마지막으로, 향후 구축되는 모델은 어느 특정시기에 적용되기보다는 보다 장기적으로 적용가능한 모델로 구축되어야 할 것이다. 이를 위해서는 관련설명변수 및 종속변수의 시계열적 자료를 충분히 활용해야하고, 설명모델이 아닌 예측모델의 가능성이 검증되어야 할 것이다.

주 1. 활용될 변수 외에도 다양한 변수들이 대기온도와 밀접한 관련이 있다. 건축물은 대기온도를 상승시키는데 주요한 역할을 하며 특히, 건축물의 용적률, 건축자재 및 외관재료는 기온과의 상관성이 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 현재 건축물에 관한 상세자료는 서울시도시계획정보관리시스템이 구축되지 않아 자료획득이 불가능하며, 토지이용에 관한 상세정보(예: 단독주택지, 공동주택지 등)도 공급되지 않는 상황이다. 아울러 교통변수에 관한 자세한 정보도 주요 교차로에 대해서만 집계되어 있거나 교통영향평가가 이루어졌던 구역에 대해서만 한정되어 있어 본 연구에서 활용되기가 어려운 실정이다.

주 2. 회귀식 (2)의 추정 결과, 상승효과 혹은 상쇄효과를 나타내는 변수들은 본래의 독립변수의(X6, X11) 존재에 따라 그 유의미성이 급격히 떨어질 뿐만 아니라, 다른 변수들과 다중공선성을 발생시키는 것으로 확인되었다. 따라서 이러한 상승/상쇄효과는 향후 보다 체계적인 연구가 필요하다고 판단된다. 회귀식 (3) 이외에도, 모델전체와 각 회귀계수가 유의미한 모델이 다수 도출되었으나, 정책적 시사점이 더 큰 변수를 최종모델에 포함시키기 위하여 회귀식 (3)에 포함된 설명변수를 선택하게 되었다.

인용문헌

1. 박인환, 장갑수, 김종용(1999) 추이대를 중심으로 한 경상북도 3개 도시의 열섬평가. 환경영향평가 8(2) : 73-82.
2. 윤용한(2000) 공원에 의한 고온성 저감효과에 관한 연구. 한국정원학회지 18(1): 83-90.
3. 윤용한(2001) 녹지에 의한 열섬현상의 저감효과에 관한 연구 -풍속과의 관련성에 관해서-. 국토계획 36(2): 187-196.
4. Aniello, C.(1995) Mapping micro-urban heat islands using Landsat TM and a GIS. Computer & Geosciences 21(8): 1-13.
5. Atkinson, B. J.(1985) The Urban Atmosphere. Cambridge University Press, Cambridge.
6. Ca, V. T., T. Asaeda, and E. M. Abu(1998) Reductins in air conditionio energy caused by a nearby park. Energy and Buildings, 29 : 83-92.
7. Carnahan, W. H. and R. C. Larson(1990) An analysis of an urban heat sink. Remote Sensing of Environment 33: 65-71.
8. Landsberg, H. E.(1981) The Urban Climate. Academic Press, New York.
9. Lee, H.(1993) An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of urban heat islands. Atmospheric Environment 27(1): 1-13.
10. Moreno-Garcia, M. C.(1994) Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. International Journal of Climatology 14: 705-710.
11. Neter J., C. J. Kutner, W. Nachtsheim, and M. H. Wasserman(1996) Applied Linear Statistical Models, 4th ed. IRWIN, USA.
12. Oke, T. R.(1987) Boundary Layer Climates. Routledge, London.
13. Oke, T. R., G. Zeuner and E. Jauregue(1992) The surface energy balance in Mexico City. Atmospheric Environment, 26B, 433-444.
14. Saaroni, H., E. Ben-Dor, A. Bitan, and O. Potchter (2000) ' Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel'. Landscape and Urban Planning, 48, 1-18.
15. Shashua-Bar, L. and M. E. Hoffman(2000) Vegetation as a climatic component in the design of an urban street (An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees). Energy and Buildings 31: 221-235.
16. Wanner, H. and J. Hertig(1984) Studies of urban climates and air pollution in Switzerland. Journal of Climate and Applied Meteorology 23(12):1614-1625.

원 고 접 수 : 2003년 6월 25일
 최종수정본 접수 : 2003년 7월 24일
 3인익명 심사필