

도시림의 여름 대기온도 저감효과*

- 서울시를 대상으로 -

조용현 · 신수영

서울시정개발연구원 도시환경연구부

The Effects of Urban Forest on Summer Air Temperature in Seoul, Korea

Cho, Yong-Hyeon · Shin, Su-Yung

Dept. of Urban Environment, Seoul Development Institute

ABSTRACT

The main purpose of this study was to estimate a new regression model to explain the relationship between urban forest and air temperature in summer, 2001. This study consists of two parts: correlation coefficient analysis and regression analysis.

According to correlation coefficient analysis, thermal infra-red radiations of the major land use categories found significant difference in each category. However there were no significant relationship between the data (thermal infra-red radiation and NDVI) derived from Landsat-7 ETM+ image and air temperature at Automatic Weather Stations(AWSs).

After estimating various regression models for summer air temperature, the final models were chosen. The final regression models consisted of two variables such as forest area and traffic facilities area. The regression models explained over 78% of the variability in air temperatures. The regression models with variables of forest area and traffic facilities area showed that the coefficient of the first variable was even more significant than the second one. However, the negative impact of the traffic facilities area was slightly greater than the positive impact of the forest area.

Consequently, the effects of forest area and traffic facilities area were apparent to explain summer air temperature in Seoul. Therefore two policies have the most important implications to mitigate the summer air temperature in Seoul: to expand and to conserve the urban forest; and to change the traffic facilities' characteristics.

* : 이 논문은 2001년도 서울특별시 지원 연구비에 의한 연구의 일부임

The results from this study are expected to be useful not merely in informing the public that urban forest mitigates summer air temperature, but in urging the necessity of budgets for trees and managing urban forests.

It is recommended that field survey of summer air temperature be performed for the validation of the models.

Key Words : Urban Forest, Traffic Facilities, Heat Island, Regression Model, Landsat-7 ETM+

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

최근에 자연환경을 훼손하는 도시의 과도한 확장, 환경오염의 증대, 도시열섬의 심화 등 도시환경악화는 야외 여가활동의 증가, 환경에 대한 사회적 관심의 증대 등 사회적 여건의 변화와 함께 도시생활의 질을 추구하고 시민의 입장에서 해결해야 할 중요한 문제로 부각되고 있다. 도시지역의 환경문제 해결을 위해서는 다각적인 접근방법이 요구되고 있는데, 도시 도처에 산재해 있는 도시림의 효율적인 조성 및 관리는 그 방법중 하나이다. 이와 관련하여 도시림의 환경보전 효과에 대한 재조명과 정량화가 중요한 연구 주제로 부각되고 있다.

도시림은 환경보전, 심리적, 방재, 이용 효과를 가지는데, 이중 환경보전효과에는 도시형태 규제·유도, 생태계 보전, 미기후 조절, 공해방지·완충, 시선유도·차단 등이 포함된다. 이 중 특히 미기후 조절효과의 일부로서 여름철 기온저감효과는 지구온난화와 도시열섬 강화추세 속에서 대체 수단을 찾기 어려운 소중한 기능으로서, 환경보전적 도시림 관리정책을 위해서는 도시림의 열섬저감효과 측정과 같은 학술적 연구의 뒷받침이 시급히 요청된다고 하겠다.

따라서 본 연구목적은 환경보전적 도시관리정책의 기초자료로 활용하기 위하여 정책적으로 통제가능변수인 각종 지표면 정보와 대기온도 측정자료간의 상관분석을 통해 대기온도 추정 회귀모형을 도출하고, 도시림의 여름 대기온도 저감효과를 정량화하는 것이다. 또한 적절한 회귀모형을 이용해 서울시 전지역에 대한 대기온도분포도를 제작하고, 이를 통해 토지이용 및 도시녹

지 정책의 시사점을 찾는 것이었다. 이 연구에서 도시림은 도시계획 구역 내의 각종 숲을 총칭하는 개념으로 사용하고자 한다.

2. 연구의 방법

연구는 다섯 단계를 거쳐 수행되었으며, 각 단계별로 적용된 방법은 다음과 같다.

첫째, 기초자료를 취득 및 생성하였다. 이 과정에서는 기상청 자동기상관측망(Automatic Weather Station : AWS, 이하 'AWS'라 한다.)의 위치를 측량하였고, AWS 시간별 기상자료를 취득하였다. 또한 분석목적에 가장 근접하는 위성영상을 구입하여 기하보정하였고, 이를 이용하여 서울시 토지피복을 분류하고 검증하였으며, 기타 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index : NDVI) 등 위성영상 수치를 산출하였다.

둘째, ERDAS Imagine 8.5(ERDAS Inc., 2002)를 이용하여 자료를 가공하였다. 일차자료로부터 산출된 Landsat-7 ETM+ 위성영상의 band 6 열적외선 및 정규식생지수(NDVI) 등에 대해 공간해상도를 변환하였고, 또한 각 지점별 격자상 토지피복 분류 자료와 정규식생지수 자료의 공간 통계자료를 생성하였다.

셋째, SAS Ver. 8e(SAS Institute Inc., 1999)를 이용하여 자동기상관측망 기온자료, Landsat-7 ETM+ 위성영상의 band 6 열적외선 수치, 각종 토지피복자료와의 상관분석을 실시하였다. 먼저, Landsat-7 ETM+ 위성영상의 band 6 열적외선 수치와 토지이용 유형, 비오톱 유형 등의 토지피복자료와의 상관분석을 실시하였고, 이어 자동기상관측망 기온자료와 열적외선 수치, 토지피복자료 등과의 상관분석을 실시하였다.

넷째, 다양한 여름 기온 추정 회귀모형을 검토하고 검증하였다.

다섯째, 여름 기온 추정 회귀모형을 적용하여 서울시 기온 분포도와 기온 단면도를 작성하였다.

3. 선행연구의 고찰

Landsberg(1981)는 도시화의 진전에 따라 도시 기후를 결정하는 주된 영향인자인 기온의 수평분포는 도시와 주변지역간 변이도가 더욱 심화되는 경향을 나타내며 이러한 도시지역의 고온화 현상을 한정하여 열섬효과(Heat Island Effects)로서 정의하였다. 도시의 열섬현상에 관한 연구는 영국 Howard(1833; 1851)의 발견이후 많은 연구가 이루어졌으며, 지금까지 도시열섬에 대해서는 주로 기온 관측에 의한 열섬의 존재에 관한 연구, 열섬 형성원인을 규명하려는 연구, 도시열섬 저감효과에 관한 연구, 그리고 열섬의 모델링에 관한 연구가 수행되고 있다.

이중 외국의 도시열섬 저감효과에 관한 연구는 도시 녹지의 저감효과(Akbari *et al.*, 1992; Simpson *et al.*, 1995; 大江榮三 *et al.*, 1996; 山田宏大, 1996; 尹龍漢 *et al.*, 1998)가 주를 이룬다. 국내에서도 과거에는 주로 서울과 부산과 같은 대도시에서 기온관측에 의한 열섬의 존재 연구가 주를 이루었으나, 최근에는 도시녹지에 의한 도시열섬 저감효과에 관한 연구(조현길과 안태원, 1999; 윤용한과 송태갑, 2000; 윤용한, 2000)가 주를 이룬다.

II. 자료의 처리

1. 위치측량과 기상자료 처리

기상청 AWS의 정확한 좌표를 추출하기 위하여 위치 측정시스템(Global Positioning System : GPS) 측량을 실시하였다. 서울시뿐만 아니라 외곽지역과의 비교를 위하여 6개의 경기지역 AWS도 포함시켜 측량하였다.

측량장비로는 Trimble Geo-Explorer를 사용하였고,

소프트웨어로는 Pathfinder office V2.1 (Trimble Navigation Ltd., 1999)를 이용하여 결과를 추출하였다. GPS 측량장비는 기본적으로 경위도 좌표 값을 가지므로 소프트웨어를 이용해서 TM 좌표로 변환하였다. 정확한 좌표 값 산출을 위해 국립지리원이 제공하는 GPS 상시관측자료를 이용하여 Differential Global Positioning System(DGPS)을 적용하였다.

본 연구에서는 2001년 여름에 가장 가까운 맑은 영상에 대한 검토를 거쳐 6월 3일의 Landsat-7 ETM+ 위성영상을 구입하여 이용하였다. 기온자료는 위 영상에 해당하는 날짜를 포함하여 6, 7, 8월의 AWS 시간별 자료를 기상청에서 구입하여 사용하였으며, 시간별 기온자료를 가공하여 분석에 사용하였다.

2. 위성영상의 기하보정

지상기준점을 이용하여 Path 116, Row 34의 2001년 6월 3일 Landsat-7 ETM+ 위성영상 중 서울지역에 대하여 기하보정을 실시하였다. 서울시 수치지형도의 도로데이터를 참고자료로 이용하였으며, 포장 면과 같이 계절에 따른 변화가 거의 없는 지형지물의 모서리 점을 대상으로 지상기준점을 선정하여 보정한 결과, 평균 제곱근 오차(RMS error)는 0.73으로 산출되었다.

3. 위성영상에 의한 토지피복분류

위 영상에 대해서 토지피복분류를 실시하였고, 분류체계는 U.S. Geological Survey(USGS)의 지피 및 토지 이용 분류체계를 참고하여 7가지 유형으로 구분하였다. 분류방법은 혼성 분류기법을 사용하여, 먼저 무감독 분류를 실시한 후, 다시 고해상도인 IKONOS 영상을 참조하여 감독 분류하였다. 분류결과는 Figure 1과 같다.

한편 토지피복분류 결과에 대해서 임의표본을 뽑아 IKONOS 영상을 이용하여 오차검증을 실시하였으며, 분류오차 검증 표본 수는 유형별 면적비율을 참고하여 결정하였다. 표본 수와 검증결과는 Table 1과 같으며, 분류정확도는 84%로서 적절한 것으로 판단되었다.

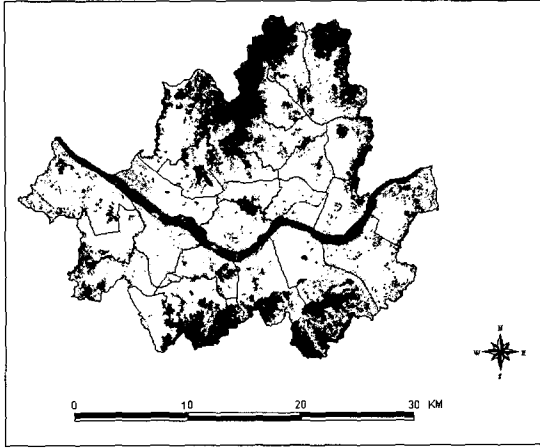


Figure 1. Land cover map classified from Landsat-7 ETM+ data (Jun. 3, 2001)

Legend: : Urbanized area: : Crop field:
 : Grass land: : Forest:
 : Water body: : Wetland:
 : Denuded area

Table 1. Error matrix of land cover classification

Reference \ Land cover.	1	2	3	4	5	6	7	Sum	Correctness (%)
1. Urbanized area	17	1	1				1	20	85.0
2. Crop field	1	11	1	1			1	15	73.3
3. Grass land		1	13	1				15	86.6
4. Forest		1	2	12				15	80.0
5. Water body		1			13	1		15	86.6
6. Wetland						4	1	5	80.0
7. Denuded area	1						14	15	93.3
Sum	19	15	17	14	13	5	17	100	84.0

4. 위성영상 수치 산출

지표면에 있어서 흙, 물, 식생 등 물체의 표면온도는 거의 27°C이고, 대부분이 파장 7~14nm 범위에 분포하며, 최대복사는 9.7nm에서 일어난다. 이 영역은 대기의 창 내에 있으나, 육안으로 볼 수 없으므로 이를 감지하기 위해서 열주사계의 일종인 Landsat-7 ETM+ 위성영상의 6번 밴드로부터 지표면의 온도를 구할 수 있다 (박인환 등, 1999). 같은 목적으로 좌표가 보정된 위성영상의 6번 밴드에 대한 DN(digital number)값을 추출하였는데, 이는 열적외선 수치로서 지표면의 온도를 대변한다.

같은 위성영상에 대해서 박종화 등(1996)의 방법에 따라 식 1과 같이 수정 정규식생지수를 산출하였다.

$$\text{수정 NDVI} = ((\text{band4} - \text{band3}) / (\text{band4} + \text{band3}) + 1) \times 128 \text{ (식 1)}$$

5. 자료의 가공

1) 위성영상 열적외선의 공간해상도 변환

본 연구에서 이용한 Landsat-7 ETM+ 위성영상의 band 6 열적외선 수치 값은 공간해상도가 60m×60m이다. 그런데, 지표면의 열적외선 방사치 값은 불완전한 전달모델, 불확실한 대기의 수직적 압력-습도 분포, 대기-표면에서의 온도 불연속성, 표층과 전체 층과의 온도 차이, 표면에서의 복사와 반사와 같은 요인에 의한 추정 오차가 발생할 수 있다. 따라서 이를 감안하여 해당 셀의 방사치 외에 주변 셀과의 관계를 반영한 값을 추가로 생성하였다.

이를 위해 필터링을 이용하였는데, 주변 셀 수를 3×3, 5×5, 11×11, 15×15개 등 네 가지의 커널(kernel)을 사용하여 각각 그 중간값을 해당 셀에 적용하도록 하였다. 한 셀의 공간해상도가 60m이므로, 이들은 각각 180m, 300m, 660m, 900m의 범위에 해당한다.

2) 토지피복 벡터자료의 가공

AWS 지점의 기온과 주변의 토지이용 및 피복상태와의 상관성을 파악하기 위하여 김운수와 김학열(2001)은 서울시(2000) 비오톱 현황자료 중 토지이용 자료를 이용하여 AWS 지점으로부터 반경 500m 범위 내의 토지이용면적을 추출하였다. 그 결과 교통시설지면적이 넓을수록 기온이 높은 반면, 녹지면적의 증가는 이와 반대의 현상을 나타냄을 알아냈다. 그러나 AWS 지점으로부터 반경 500m라는 범위가 과연 적절한 범위인지에 대한 연구가 부족하였다.

따라서 본 연구에서는 김운수와 김학열(2001)의 연구결과를 바탕으로 하되, 상관성을 설명할 수 있는 범위를 AWS 각 지점으로부터 100m, 200m, 300m, 500m로 더 세분하여 비교 할 목적으로 토지이용자료를 가공하여 AWS 지점으로부터 반경 100m, 200m, 300m, 500m 내의 토지피복 유형별 면적비율을 산출하였다.

3) 토지이용자료의 격자형 변환

서울시 도시생태현황도의 원 자료는 벡터형태의 자료인데, 이를 격자형 자료로 변환하였다. 위성영상 자료와의 비교를 위해 도시생태현황도의 토지이용자료에서 추출한 자료를 11개의 중분류(서울시, 2000)를 기준으로 가공하여 격자좌표를 NDVI와 일치시키고, 30m×30m의 격자 크기를 가지도록 변환하였다. 아울러 도시생태현황도의 비오톱 유형 자료 역시 재분류한 후 격자좌표를 NDVI와 일치시키고 30m×30m의 격자 크기를 가지는 격자상 자료로 변환하였다.

4) 격자형 토지피복분류 자료와 정규식생지수의 공간통계자료 생성

먼저 서울시(2000) 도시생태현황도의 토지이용도와 2001년 위성영상의 정규식생지수 자료 각각에 대해서 커널을 설정하여 면적비율을 산출하였다. 즉, 앞에서 격자상 자료로 가공된 토지이용도와 비오톱 유형도에 대해서는 가로 × 세로 각 930m(30m 규격의 격자가 가로 × 세로 각 31개로 구성됨) 범위 내의 면적비율을 구하였다. 그리고 정규식생지수 값에 대해서는 같은 규격인 가로 × 세로 각 930m 범위 내의 평균값을 구하였다. 격자 규격을 가로, 세로 31개로 구성한 이유는 앞에서 검토한 반경 변화에 따른 민감도 분석을 실시한 결과 가장 상관성이 높은 규격이 반경 500m이었기 때문이다. 이는 박인환 등(2000)의 “공원의 온도완화거리가 167~260m”라는 연구결과와 다소 차이를 보이는 분석이라고 할 수 있으나, 본 연구의 결론이 온도완화거리에 대한 결론이 아니므로 직접비교는 무리라고 판단된다.

5) 위성영상 열적외선 수치를 이용한 서울시 지표면 온도 추정

인공위성에 의하여 측정된 자료는 현장 자료와 대비시켜 얻어진 실험식이나 이론적 모델식에 적용하여 지표온도를 추정할 수 있다(양인태 등, 1995). Landsat-7 ETM+ 영상자료를 지표온도로 변환하는 NASA에서 제시한 공식이 있다(Landsat Project Science Office, 1998).

$$K = 1282.71 / \ln[(666.09/L) + 1] \quad (\text{식 } 2)$$

$$L = [(12.65 - 3.2)(DN - 1) / 254] + 3.2 \quad (\text{식 } 3)$$

여기서, K = 절대온도

L = 분광휘도

DN = band 6 열적외선 수치

이들은 절대온도로 산출되기 때문에 섭씨온도로 변환하기 위해서는 273.15를 감해줘야 한다.

이 변환식에 의해서 2001년 6월 3일 위성영상에 대해 산출된 서울시 지표면 온도 분포도는 Figure 2와 같다. 참고로 2000년 6월 3일의 기상청 관측 평균기온은 최고 23.8℃, 최고 31.2℃, 최저 17.0℃이었다.

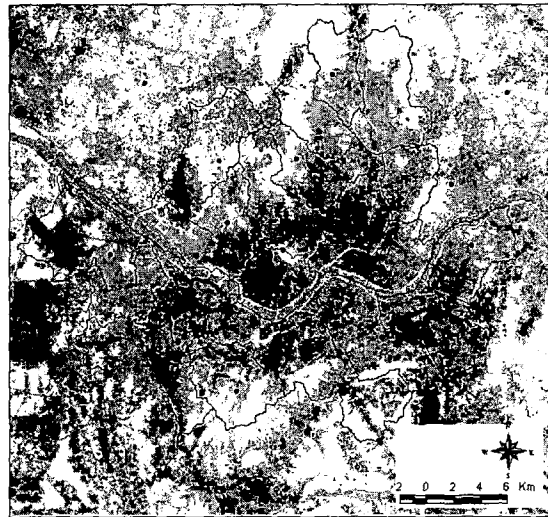


Figure 2. Surface temperature using NASA formula (Jun. 3, 2001)

Legend:
 ■ : 5~10: ■ : 10~15: ■ : 15~20:
 □ : 20~25: ■ : 25~30: ■ : 30~35:
 ■ : 35~40: ■ : 40~45: ■ : 45~50:
 • : AWS

III. 결과 및 고찰

1. 자료간 상관관계

1) 위성영상 열적외선 수치와 비오톱자료의 상관관계
 Landsat-7 ETM+ 위성영상의 열적외선 수치(지표면 온도)를 결정하는 주요 변인을 찾기 위해 서울시 전역을 대상으로 비오톱 유형별 지표면 온도의 상관관계를 분석하였으며, 설정된 가설은 다음과 같다.

• 가설: “비오톱 유형에 따라 지표면 온도가 차이가 있으며, 인간의 이용강도가 높을수록 지표면 온도가 높다. 즉, 교통시설지비오톱이나 상업지비오톱의 지표면 온도는 높고, 녹지비오톱이나 하천비오톱의 지표면 온도는 낮다.”

검증 방법은 서울시(2000) 도시생태현황도의 비오톱 유형을 통합하여 유형을 재분류하고, GRID 자료를 생성하였다. 비오톱 유형과 위성영상 Landsat-7 ETM+ band 6의 열적외선 수치간 분산분석을 실시하였다. 표본수가 불균형한 점을 감안하여 Unbalanced ANOVA를 실시하였다.

분석 결과 모든 비오톱 유형별 열적외선 수치(지표면 온도)의 차이는 통계적으로 유의했으며, 예상과 일치하였다. Table 2에서 보듯이 가장 높은 지표면 온도를 보이는 비오톱 유형은 교통시설비오톱이고, 이어 상업지, 단독주택지, 공동주택지, 공공용지, 공원녹지(경작지 포함), 산림, 하천 및 습지 순이어서, 산림과 하천 및 습지가 지표면 온도가 가장 낮게 나타났다.

한편, 도시생태현황도의 비오톱 유형 세분류 자료에 대해서도 같은 분석방법을 적용한 결과에 의하면 비오톱 유형이 총 65개로서 지나치게 세분되어 집단간 차이가 미세하여 분별력이 떨어졌다.

2) 평균 표고와 열적외선 수치의 상관관계

서울시 일부지역(약 1/4면적)을 대상으로 실시한 평

균 표고와 열적외선 수치와의 상관분석결과 상관계수가 -0.64433(p<0.0001)이고, R² 값은 0.6066으로서 회귀식의 설명력도 로그모형을 취할 경우 상당히 높은 것으로 나타났다.

3) 정규식생지수와 열적외선 수치의 상관관계

정규식생지수와 열적외선 수치와의 상관관계 분석결과 상관계수는 -0.8665(p<0.0001)이고, R² 값이 0.7509로서 설명력도 가장 높은 것으로 나타났다.

4) 자동기상관측망 기온과 지표면 온도 추정치와의 상관관계

AWS 기온과 NASA 모델을 적용하여 산출된 지표면 온도 또는 열적외선 수치(3x3셀 중간값) 사이에는 유의한 상관관계를 확인할 수 없었다.

5) 자동기상관측망 기온과 열적외선 수치, 토지피복 자료 등의 상관관계

이상 측정 또는 가공된 자료를 중심으로 다양한 변수들간의 상관관계를 분석하였다.

여름(6, 7, 8월) 전체 평균기온과 상관분석 결과 유의한 상관을 보이는 변수로는 표고, 교통시설지, 시가지, 숲, 녹지, NDVI(31), 열적외선 수치 등이었다. 이들 변수들로 구성된 단항 선형 회귀모형의 R²가 0.5이상인 변수로는 숲(R²=0.69), NDVI(31)(R²=0.65), 5x5 셀 중간값 열적외선 수치(R²=0.64), 11x11 셀 중간값 열

Table 2. Grouping of major categories of biotope types based on Landsat-7 ETM+, band 6 data

Biotope type	No. of samples	Mean ± S.D.	F value	Tukey Grouping								Estimated surface temperature (°C) ^b		
				A	B	C	D	E	F	G	H			
Transportation facilities biotope	17,620	178.27 ± 10.42	17448.9 ^a	•									44.91	
Commercial or business area biotope & Industrial area biotope	34,954	177.34 ± 9.86			•									44.50
Detached houses biotope	18,423	175.25 ± 9.98					•							43.57
Urban infrastructure facilities area biotope	17,304	174.83 ± 10.77						•						43.20
Apartment houses biotope	14,162	174.42 ± 7.20							•					43.39
Landscaped green area biotope & Farmland biotope	11,916	169.78 ± 11.01								•				41.11
Forest biotope	42,526	157.26 ± 11.32									•			35.32
Stream or wetland biotope	11,778	153.96 ± 15.33											•	33.76
Sum	168,683													

^a: p<0,001

^b: The surface temperature using NASA formula

적외선 수치($R^2=0.61$), 15×15 셀 중간값 열적외선 수치($R^2=0.62$) 등이었다. 여기서 숲 면적 백분율의 설명력($R^2=0.69$)이 숲과 초지를 포함하는 녹지면적 백분율의 설명력($R^2=0.66$)보다 높은 것으로 나타났다. 한편 6월과 8월 평균기온과의 상관분석에서는 이들 외에도 교통시설지의 R^2 가 각각 0.52와 0.50으로 나타났다.

2. 여름 기온 추정 회귀식 도출

모형구축과정에서 다수의 모형을 추정하였다. 그 과정에서 본 모형의 구축에 사용된 표본의 수가 크지 않기 때문에 이상치(outlier)로 인하여 모형추정에 큰 변화가 발생할 수도 있으므로, 이상치를 통계학적 방법으로 확인하였다. 표준화 잔차, 제외 잔차, 표준화 제외 잔차를 이용하여 이상치들의 영향력을 분석하였고, 표준화 제외 잔차가 큰 경우에는 통계적으로 검증이 가능한 표준화 제외 잔차의 유의성 검증을 위해 Bonferroni t-test의 임계값을 구하였다(Neter, 1996).

분석결과 통계적으로 유의한 이상치는 존재하지 않았지만, 8월 평균기온 모형에서 전농2동 관측소의 관찰이 DFFITS가 1 이상이어서 삭제하였다(Neter, 1996). 특기사항으로는 어느 하천변 측점도 이상치로 작용하지 않는 것으로 확인되었다. 이는 박인환 등(2000)의 하천에 의한 온도완화 거리가 315m라는 연구결과와는 다소 차이를 보이는 결과라 할 수도 있으나, 최종판단은 더 많은 표본에 대한 연구 이후에 가능할 것이다.

최종 선정된 6월, 8월, 그리고 여름(6, 7, 8월) 평균기온의 회귀모형식은 각각 식 4, 5, 6과 같다. 이 모형들은 R^2 값이 각각 0.8400, 0.8043, 0.7834로서 지상 대기온도 변이의 78% 이상을 설명하고, F-값은 각각 47.24($P<0.0001$), 39.05($P<0.0001$), 35.82($P<0.0001$)로서 모든 회귀식이 유의수준 0.01에서도 유의함이 인정되었으며, 각 변수의 부호는 예상했던 결과를 나타냈고, 변수에 관한 t 검정값도 모두 유의수준 0.01에서 유의하였다(Table 3, 4, 5 참조).

모든 모형에서 평균기온의 회귀분석의 결과, 교통시설지 면적 백분율이 클수록 기온이 높아지는 반면, 숲 면적의 증가는 이와 반대의 현상을 나타냈다. 여름 회귀식(식 6 참조)에 의하면 예를 들어 현재 서울시 전체

의 숲 면적 백분율 평균이 32.0%인데, 이를 42%로 10% 증가시킬 경우 서울시 여름 평균 온도는 0.13°C 낮아지게 된다. 반대로 현재 교통시설면적 백분율 평균이 9.8%인데, 이를 19.8%로 10% 증가시킬 경우 서울시 여름 평균 기온은 0.14°C가 올라가게 된다. 이처럼 설명변수 중 교통시설지의 단위면적 변화로 인한 영향력이 숲의 단위면적 변화로 인한 영향력보다 약간 더 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 도시 기온 상승을 억제하기 위해서는 근본적으로 숲의 양을 증가시킴으로써 대기의 냉각효과를 높여야 할 것이고, 아울러 교통시설 관련 인자들에 대한 적절한 정책적 수단도 함께 필요한 것으로 판단되었다. 최종 회귀식에 도입된 변수들은 회귀식에 포함되어 있지 않은 많은 인자들의 대리변수일 수 있으므로 모델 결과를 해석하는 데는 다각적인 이해가 필요하다 하겠다.

$$Y_{6k} = 25.51347 - 0.18794\sqrt{F_k} + 0.19125\sqrt{T_k} \quad (\text{식 4})$$

$$Y_{8k} = 26.05117 - 0.14138\sqrt{F_k} + 0.40100\sqrt{T_k} \quad (\text{식 5})$$

$$Y_{678k} = 22.80239 - 0.01291 \cdot F_k + 0.41549 \cdot \log(T_k + 1) \quad (\text{식 6})$$

여기서, Y_{6k} = k 지점 6월 평균 기온

Y_{8k} = k 지점 8월 평균 기온

Y_{678k} = k 지점 여름(6, 7, 8월) 평균 기온

F_k = k 지점 930m x 930m 숲 면적 백분율

T_k = k 지점 930m x 930m 교통시설지 면적 백분율

Table 3. Estimates of the regression model for average air temperature in Jun., 2001

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t-value	Pr> t
Intercept	1	25.51347	0.41644	61.27	<.0001
$\sqrt{F_k}$	1	-0.18794	0.03866	-4.86	0.0001
$\sqrt{T_k}$	1	0.19125	0.08058	2.37	0.0290

Table 4. Estimates of the regression model for average air temperature in Aug. 2001

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t-value	Pr> t
Intercept	1	26.05117	0.42863	60.78	<.0001
$\sqrt{F_k}$	1	-0.14138	0.03610	-3.92	0.0009
$\sqrt{T_k}$	1	0.40100	0.09839	4.08	0.0006

Table 5. Estimates of the regression model for average air temperature in summer, 2001

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t-value	Pr> t
Intercept	1	22.80239	0.40461	54.46	<0.0001
F _k	1	-0.01291	0.00343	-3.76	0.0012
log(T _k +1)	1	0.41549	0.14265	2.91	0.0086

3. 서울시 기온 분포도 작성

앞에서 도출된 회귀모형을 적용하여 2001년 여름(6, 7, 8월) 평균기온의 분포도를 작성한 결과는 Figure 3 과 같고, 이를 근거로 하여 서울시를 가로질러 나타나는 기온분포를 단면도 형식으로 작성한 결과는 Figure 4와 같다. 이를 통해 서울시 여름의 기온은 도심으로 갈수록 높아지고, 숲이 주로 도시외곽에 분포하기 때문에 도시외곽으로 갈수록 낮아지는 전형적인 도시열섬 현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 기온은 여름평균을 기준으로 최저 21.5°C에서 최고 24.7°C에 걸쳐 최대 3.2°C의 차이를 보였다. 이러한 도시림의 온도저감효과 분석을 통해 숲의 적극적 조성, 그리고 특히 도심의 집중 녹화 필요성이 제기되었다.

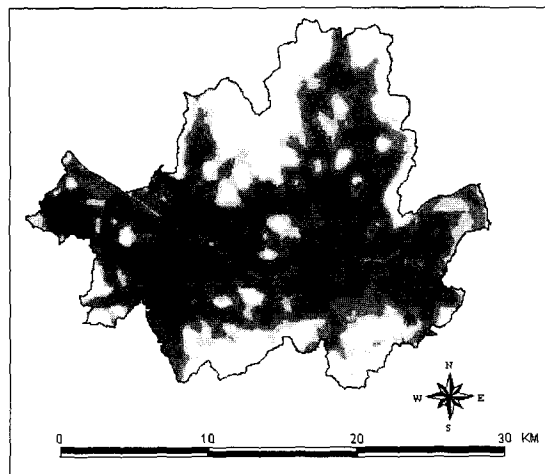


Figure 3. The interpolated average summer air temperature in 2001

Legend:
 [Lightest Gray] : 21.5~22.0; [Light Gray] : 22.0~22.5;
 [Medium-Light Gray] : 22.5~23.0; [Medium Gray] : 23.0~23.5;
 [Medium-Dark Gray] : 23.5~24.0; [Dark Gray] : 24.0~24.5;
 [Black] : 24.5~25.0

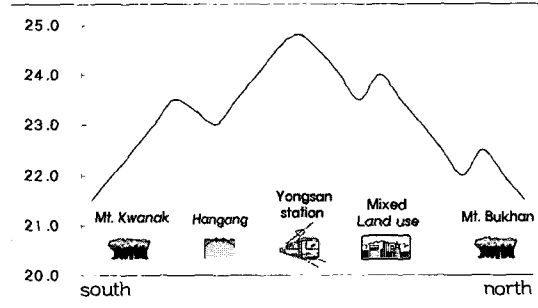


Figure 4. Section of the interpolated average summer air temperature in 2001

IV. 결론

본 연구에서는 도시림을 포함한 다양한 토지피복 유형별 여름철 기온 저감효과를 분석하였다. 먼저 토지피복과 위성영상 수치의 상관관계를 분석하기 위하여 각종 토지정보를 확보하였다. 2001년 6월 3일자 Landsat-7 ETM+ 위성영상을 이용하여 총분류정확도 84%로 토지피복분류를 실시하였으며, 기타 NDVI, 열적외선 수치 등의 자료를 생성 또는 변환하였다.

지표면 온도를 결정하는 주요 변인을 찾기 위해 상관분석을 실시하였다. 그 결과로 서울시 비오톱 유형별로 열적외선 수치에 유의한 차이가 있는 것으로 밝혀졌다. 서울시 일부지역을 대상으로 실시한 평균 표고와 열적외선 수치사이에는 상관성이 높았고, 회귀식의 설명력도 로그모형을 취할 경우 상당히 높았다. 그리고 정규식생지수와 열적외선 수치 사이에 상관성이 매우 높았고, 설명력은 가장 높았다.

도시림의 기온 저감효과 추정을 위해서 서울시 23개 소와 서울 인접 6개소의 AWS 위치를 DGPS로 측량한 후, 2001년 6월 3일자 Landsat-7 ETM+ 위성영상과 이에 맞추어 선택한 AWS의 기온자료, 그리고 각종 토지피복자료 사이의 회귀식을 도출하고자 다양한 설명모형을 검증하였다.

설명변수의 선택과정과 이상치 등의 제거과정을 통하여 다중회귀분석을 수행한 결과 종속변수로서 2001년 6월 평균기온과 8월 평균기온, 그리고 여름 평균기온에 대해서 지금까지 발표된 회귀모형보다 설명력이

월등히 높은 회귀모형들을 구할 수 있었다. 회귀모형을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

회귀모형에서 두 독립변수, 즉 위성영상에서 도출된 숲 면적 백분율과 도시생태현황도에서 도출된 교통시설지 면적 백분율이 중요한 것으로 확인되었다. 두 변수 중 숲 면적 백분율의 설명력이 훨씬 높았으나, 숲 면적 백분율의 기온 저감효과는 교통시설지 면적 백분율의 기온 상승효과보다 약간 적은 것으로 확인되었다. 이로써 도시림에 의한 여름 기온 저감효과가 입증되었고, 아울러 도시림 확충의 중요성과 개발압력에 대한 도시림 보존의 필요성도 입증되었다.

기온 저감효과 측정에서 위성영상의 활용을 검토하였다. 자동기상측정망 기온 자료와 위성영상 수치와의 상관분석 및 회귀식 검토 결과에 의하면, 기온에 대한 위성영상 열적외선 수치의 설명력이 높지 않은 것으로 밝혀졌다. 반면에 도시관리 행위의 직접적 결과인 지표면 유형별 지표면 온도추정에서는 위성영상 열적외선 수치와 NDVI가 매우 유용한 것으로 밝혀졌다.

이상의 연구결과로부터 도출된 주요 정책적 함의는 도시림의 기온 저감효과는 탁월하므로 이를 유지하기 위해서는 도시림의 훼손 억제, 식재의 양 증대, 교목식재, 생장률 높은 수종 식재, 도시림 부족지역의 우선 녹화 등이 중요하다는 것이다. 도시의 여름 기온 저감을 위해서는 이밖에도 교통시설지에 대한 복사에너지 저감대책으로서 녹화, 밝은 색 처리, 그늘 조성 등이 매우 중요하다는 것이다.

인용문헌

1. 김운수, 김학열(2001) 서울시 기상특성을 고려한 도시계획기법 연구(Ⅱ). 서울시정개발연구원.
2. 박인환 장갑수, 김중용(1999) 추이대를 중심으로 한 경상북도 3개 도시의 열섬 평가. 환경영향평가 8(2): 73-82.
3. 박인환 장갑수, 김중용(2000) 대도시에 있어 냉섬의 유형별 온도완화효과: 대구광역시의 사례 연구. 한국조경학회지 28(1): 11-18.
4. 박종화, 서동조, 서창원(1996) TM 영상추출 NDVI를 이용한 수도권 그린벨트의 평가. 대한원격탐사학회지 12(3): 245-256.
5. 서울특별시(2000) 서울시 도시생태현황도.
6. 양인태, 김만덕, 윤법한, 김연준(1995) Landsat TM 영상에 의한 난지도 매립지의 발생열 분포해석. 환경영향평가학회지 4(2): 59-63.
7. 윤용한(2000) 공원에 의한 고온성 저감효과에 관한 연구. 한국정원학회지 18(1): 83-90.
8. 윤용한, 송태갑(2000) 도시공원의 기온에 영향을 미치는 요인. 한국조경학회지 28(2): 39-48.
9. 조현길, 안태원(1999) 도시녹지에 의한 미기후 개선의 기능. 한국조경학회지 27(4): 23-28.
10. 大江榮三 外(1996) 小規模樹林による微気象調節機能に関する研究. 日本造園學會 59(5): 69-72.
11. 山田宏之(1996) 各種溫熱環境指數を用いた夏季綠陰の溫熱環境評價. 日本造園學會 59(5): 65-68.
12. 尹龍漢 外(1998) 都市における公園内外の氣溫分布特性について. 日本造園學會 61(5): 769-772.
13. Akbari, H., S. Davis, S. Dorsano, J. Huang, S. Winnett(1992) Cooling Our Communities: A Guidebook On Tree Planting And Light-Colored Surfacing. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
14. Haward, L.(1833) The Climate of London Deduced from Meteorological Observations (2nd ed.). London: J. A. Arch. Cornhill. Longman and Co.
15. Haward, L.(1851) A Companion to the thermometer for the Climate of London. Folio Broadside, reprinting a statement, dated 8 May 1820. Holborn Hill: Darton & Co.
16. Landsat Project Science Office(1998) The Landsat-7 Science Data User's Handbook.
17. Landsberg, H.E.(1981) The Urban Climate. Academic Press.
18. Neter, J., M.H. Kunter, C.J. Nachtsheim, W. Wasserman(1996) Applied Linear Statistical Models(4th ed.). USA: IRWIN.
19. Simpson, J.R., E.G. McPherson, K.I. Scott, and D.G. Levitt (1995) Effects of Vegetative Cover on Urban Microclimate in Southern California. Final Report. Davis, CA: USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station.

원고접수: 2002년 08월 29일

최종수정본 접수: 2002년 09월 24일

3인의명 심사필