

# 입체적 토지피복 유형에 따른 기온변화 연구<sup>†</sup>

조현길\* · 이관규\* · 안태원\* · 정응호\*\*

\*강원대학교 산림경영 · 조경학부 · \*\*계명대학교 에너지환경계획학과

## I. 서론

도시생태계는 인간과 인공구조물이 우점하며 이들이 에너지 소비 및 폐열 발생을 포함한 에너지흐름을 좌우한다. 도시생태계의 에너지수지(energy budget)가 불균형을 이룰 경우 열섬 현상을 비롯한 미기후상의 문제점을 야기한다. 도시의 여름철 온도는 열섬현상에 기인하여 교외의 농촌이나 자연지에서보다 더욱 높다. 이 현상은 무더운 여름철 시민의 더위 스트레스를 증가시키고, 냉방에너지 소비의 가중을 초래하는 악순환으로 이어진다. Ackerman(1985)에 의하면, 미국 Chicago시의 온도는 주변 농촌지역보다 여름철 맑은 날 오후에 3°C 더 높았고, 흐리고 바람부는 시간대에는 1°C 더 높았다. Akbari *et al.* (1992)은 미국 St. Louis 도심의 온도는 교외지역보다 1~4.5°C 더 높았으며, 온도 1°C 상승은 미국 전체의 최대 냉방전력 요구를 약 4% 증가시킴을 보고하였다.

도시의 미기후는 토지피복의 종류와 분포, 인공열 방출, 증발산 여부, 대기오염물질, 바람 등 여러 인자들의 상호작용의 결과로 형성된다. 토지피복과 도시기온 간의 상관성 연구는 소규모 지역의 실측연구(조현길과 안태원, 1999; 2006; 윤용환과 송태갑, 2000)와 대규모 지역의 위성영상자료 이용연구(Lee, 1993; 박인환 등, 2000)로 대부분할 수 있다. 그런데, 이들 연구는 평면적 토지피복과 기온 간의 해석에 비중을 두었고, 입체적 효과를 분석하더라도 기온에 관여하는 다양한 변수 중 녹지체적에 국한하였다. 도시기온은 다양한 토지피복의 면적에 부가하여 체적변화와 연관할 수 있으므로, 미기후 개선 및 열섬현상 완화를 향한 생활환경의 조성은 토지피복의 입체적 영향에 대한 연구를 필요로 한다. 따라서, 본 연구의 목적은 토지피복의 입체적 변화가 도시기온에 작용하는 영향을 구명하여 열섬현상 완화에 기여할 도시조경계획 및 설계의 기반정보를 구축하는 것이다.

## II. 연구내용 및 방법

### 1. 기상자료 구입 및 분석

서울시에 위치하는 24개 자동기상관측망(AWS) 지점에서 측정된 기상자료와 측정위치 및 고도를 기상청으로부터 구입하였다. 2006년과 2007년의 2개년에 걸친 6~8월의 여름철 기상자료를 구입하여, 매일 24시간의 기온, 강수량, 풍속 및 풍향에 대한 측정치를 통계 분석하였다. 연구의 목적 상 어느 한 측정지점에서 강우량을 보인 날은 모든 지점을 대상으로 동일하게 기상분석에서 제외하였다.

### 2. 토지피복 조사 및 분석

서울시의 비오톱지도와 1/1,000 수치지형도 및 위성영상자료를 활용하여 AWS 지점의 토지피복을 분석하였다. 도시에서 일정규모 이상 녹지를 형성하고 있는 공원의 온도완화 거리는 167~260m이므로(박인환 등, 2000), AWS 지점을 중심으로 지도 상에 반경 150m의 공간을 작도하였다. 그리고, 이 공간규모 내에 분포하는 식생, 나지, 건물, 포장 등의 면적을 분석하였다.

한편, AWS 지점별 연구대상 공간을 실사하여 지도 상의 분석자료를 현장 보정하면서, 지도에서 파악 곤란한 식생 및 건물체적을 실측하고 하드스케이프의 재료별 알베도(albedo)를 Pyranometer(LI-COR의 LI-200SA)로 측정하였다. 현장보정 과정에서, 현존 비오톱지도는 학교와 운동장을 공업지 및 도시기반 시설지로 구분했거나, 기존 농경지의 주거지로의 용도변경, 신축건물의 면적변화 등을 반영하지 않은 오류를 발견할 수 있었다.

### 3. 회귀모델 도출 및 분석

AWS 지점의 강우일을 제외한 여름철 평균 기온을 종속변수(Y)로 하고, 녹지면적( $X_1$ , 나지 포함), 식생체적( $X_2$ ), 건물면적( $X_3$ ), 건물체적( $X_4$ ), 포장로면적( $X_5$ ), 하드스케이프 알베도( $X_6$ ), 인구밀도( $X_7$ ), 풍속( $X_8$ ), 고도( $X_9$ ) 등을 독립변수로 하여 회귀모델을 도출하였다. 여기에서, 하드스케이프 알베도는 녹지와 창문의 면적을 제외한 표면재료의 색채별 알베도에 입체적 해당 면적비를 반영하여 산출한 평균치이다. 인구밀도는 AWS 지점의 해당 동별 통계연보(2007)로부터 파악하였다.

†: 본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2008년도 첨단도시개발사업(과제번호: 08도시재생B04)의 지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드림.

반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여 가장 적합한 회귀 모델과 독립변수를 최종 선정하였다. 독립변수별 단순회귀모델을 유도하여 모델의  $F$  검정, 회귀계수의  $t$  검정,  $r^2$  분석 등을 통해 통계적으로 유의한 변수를 선정하고, 이들 변수를 투입하여 적합도가 가장 높은 다중회귀모델을 유도하였다. 본 연구에서는 소수의 AWS 지점에 해당하는 수면의 영향을 배제하기 위해, 하천에 의한 온도 완화 영향거리 315m(박인환 등, 2000)를 근거로, AWS 지점의 반경 300m 이내에 하천, 호수 등 수면에 인접한 5개 지점은 회귀모델 분석대상에서 제외하였다. 또한, 일반인의 출입 통제로 현장 실사가 불가능했던 노원 지점도 함께 배제하였다.

#### 4. 소공간 스케일의 기온 및 토지피복 실측

옥외활동이 기온변화에 더 민감한 소규모 공간스케일에서 기온과 토지피복을 실측하여, 대상 공간규모가 더 큰 서울시 AWS 지점의 연구결과와 비교하였다. 춘천시에서 녹지면적 및 체적 차이를 토대로 6개의 측정지점을 선정하였다. 수면에 의한 영향을 고려하여 상기한 거리 내에 하천, 호수 등이 분포하는 지점은 배제하였다. 그리고, 활엽수와 침엽수의 기온저감 차이를 고려하여 모두 활엽수가 우점하는 지점을 선정하였다.

각 선정지점의 지상 3m 높이에 자동기상측정기(HOBO H08-032-08)를 설치하였다. 그리고 7월 중순 및 하순, 8월 초순 및 하순, 9월 초순 등 5회에 걸쳐 맑은 날 하루 24시간 동안 기온을 비롯한 습도 등을 6개 지점에서 동시에 측정하였다. 기기 간 온도 및 습도의 실측결과는 실측 직전 동일 환경조건 하에서 24시간 동안 측정된 자료를 비교하여, 식생체적 1m<sup>3</sup> 지점의 설치기기를 기준으로 편차를 산출하여 보정하였다. 측정지점을 실사하여 직경 30m의 공간 내에 분포하는 녹지면적, 식생체적, 수목피도, 건물체적, 포장면적, 하드스케이프 알베도 등을 실측하였다.

### III. 연구결과

#### 1. 서울시 AWS 지점의 위치와 기온

서울시 24개 AWS 지점의 측정고도는 5~460m이며, 설치위치는 소수 산립지를 제외하면 대부분 옥상이었다. 2006~2007년의 2년간 강우일을 제외한 6~8월 여름철의 평균 기온은 지점에 따라 최저 22.3℃(북한산), 최대 26.8℃(영등포)이었다. 즉, 지점 간 최대 온도차는 4.5℃인 것으로 나타났다. 여름철 평균 풍속은 0.8~2.2m/s이고, 주풍향은 지점에 따라 다양하였다. 대체로 남서향, 서향, 북서향 등이 타 풍향에 비해 상대적으로 높은 빈도를 보였다.

표 1. 서울시 AWS 지점의 위치와 여름철 기온\*

지점명	위치	고도(m)	풍속(m/s)	기온(℃)
강남	북위 37°31', 동경 127°03'	85	1.5	26.2
서초	북위 37°28', 동경 127°01'	43	1.3	26.5
강동	북위 37°33', 동경 127°09'	67	1.2	25.8
송파	북위 37°31', 동경 127°07'	60	1.5	26.3
강서	북위 37°33', 동경 126°51'	86	1.5	25.4
양천	북위 37°31', 동경 126°53'	14	1.5	26.6
도봉	북위 37°37', 동경 127°02'	75	0.8	25.4
노원	북위 37°38', 동경 127°07'	37	1.4	25.1
청량리	북위 37°34', 동경 127°03'	35	1.9	26.6
중랑	북위 37°34', 동경 127°06'	87	2.2	26.4
동작	북위 37°29', 동경 126°56'	34	1.2	25.6
마포	북위 37°32', 동경 126°56'	24	1.9	26.1
서대문	북위 37°34', 동경 126°57'	55	1.2	24.9
광진	북위 37°32', 동경 127°05'	25	2.0	26.5
성북	북위 37°36', 동경 127°00'	96	1.6	25.4
용산	북위 37°32', 동경 126°58'	17	1.6	26.6
은평	북위 37°37', 동경 126°56'	53	1.1	25.2
금천	북위 37°29', 동경 126°53'	22	1.9	24.9
한강	북위 37°31', 동경 126°57'	5	2.1	25.9
중구	북위 37°32', 동경 126°59'	262	1.5	24.2
북한산	북위 37°38', 동경 126°58'	460	1.5	22.3
성동	북위 37°32', 동경 127°02'	38	2.1	26.3
관악	북위 37°28', 동경 126°57'	120	1.7	23.8
영등포	북위 37°31', 동경 126°54'	10	1.6	26.8

\*: 강우일을 제외한 2006~2007년의 6~8월 평균 기온(이하 표 2~3 동일)

#### 2. 기온추정 단순회귀모델과 토지피복해석

서울시 AWS 지점의 여름철 기온을 추정하는 단순회귀모델을 도출하여 F 검정을 실시한 결과, 총 9개의 독립변수 중 식생체적, 건물체적, 인구밀도, 포장로면적, 건물면적, 고도 등 6개의 변수가 1% 수준에서 유의한 것으로 나타났다. 녹지면적은 5% 수준에서 유의하였으며, 하드스케이프 알베도와 풍속은 각각 유의수준 10% 미만이었다. 식생체적의 회귀모델은 기온 전체 변이량의 63%, 건물체적은 50%, 인구밀도는 46%, 포장로면적은 44%, 건물면적은 40%를 각각 설명하였다. 녹지면적 회귀모델의 설명력은 32%이었고, 풍속의 경우는 15%에 불과하였다. 식생체적 및 건물체적의 단순회귀모델에 따르면 식생체적 10% 증가는 기온을 0.30%씩 저감시키고, 건물체적 10% 증가는 기온을 0.35% 증가시킨다.

고도를 독립변수로 한 회귀모델은 9개 변수 중 비중이 가장 높은 68%의 설명력을 보였다. 그러나, 고도가 높은 AWS 지점은 북한산 등 산지로서 녹지 관련 변수와 상관이 있고, 고도가 높을수록 기온이 낮아지는 자연현상 때문에 본 연구의 취지에

표 2. 서울시 여름철 기온추정(Y) 단순회귀모델과 통계분석

독립변수	회귀모델	$r^2$	Fa
녹지면적(m <sup>2</sup> )	$X_1$ $\ln Y = 3.2743 - 1.7521 \times 10^{-6} X_1$	0.32	7.61*
식생체적(m <sup>3</sup> )	$X_2$ $\ln Y = 3.2656 - 2.3660 \times 10^{-7} X_2$	0.63	27.31**
건물면적(m <sup>2</sup> )	$X_3$ $\ln Y = 2.8581 + 4.0163 \times 10^{-2} \ln X_3$	0.40	10.49**
건물체적(m <sup>3</sup> )	$X_4$ $\ln Y = 2.7922 + 3.6920 \times 10^{-2} \ln X_4$	0.50	16.26**
포장로면적(m <sup>2</sup> )	$X_5$ $\ln Y = 2.6625 + 5.5385 \times 10^{-2} \ln X_5$	0.44	12.39**
알베도	$X_6$ $Y = 24.1290 + 5.4038 X_6$	0.02	0.38
인구밀도(인/km <sup>2</sup> )	$X_7$ $\ln Y = 2.8934 + 3.6295 \times 10^{-2} \ln X_7$	0.46	13.59**
풍속(%)	$X_8$ $Y = 23.5702 + 1.1439 X_8$	0.15	2.87
고도(m)	$X_9$ $\ln Y = 3.2680 - 3.5753 \times 10^{-4} X_9$	0.68	34.41**

\*: 유의수준 5%, \*\*: 유의수준 1%

부합하는 변수는 아니다. 실제로 고도와 식생체적 및 녹지면적 간의 상관계수는 각각 0.7741, 0.6386으로서 1% 수준에서 유의한 정의 상관을 나타냈다. 입체적 공간재료의 알베도는 태양복사의 반사, 흡수, 전도, 대류 등 에너지 수지에 관여하므로, 도시조경에서 어떤 종류와 색채를 선정하느냐가 중요하다. 본 연구에서 알베도의 설명력은 극히 미미하여 유의성이 없었는데, 이는 AWS 지점 간 연구공간규모 내에 분포하는 하드스케이프의 알베도가 최소 0.19~최대 0.29로서 기온에 유의한 변화를 초래할 만큼 큰 차이가 없기 때문인 것으로 분석된다.

### 3. 기온추정 다중회귀모델과 토지피복해석

단순회귀모델 중 통계적으로 유의한 변수를 대상으로 변수 상호조합에 의한 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여 다중회귀모델을 유도하였다. 그 결과, 식생체적과 건물체적의 양 변수를 투입한 다중회귀모델이 가장 높은 적합도를 나타냈다. 이 모델의 F값은 13.26으로서 1% 수준에서 유의하고 기온 전체 변이량의 64%를 설명하였다. Y 절편 및 건물체적 회귀계수는 t 검정 결과 모두 1% 수준에서, 그리고 식생체적은 5% 수준에서 유의성을 보였다.

이와 같이, 식생체적과 건물체적이라는 2종의 입체적 토지피복 변수가 서울시 여름철 기온의 증감에 가장 큰 영향을 발휘하는 것으로 분석된다. 기온저감을 지향하는 도시조경은 가급적 식생체적을 증가시키면서 건물체적을 감소시키는 전략이 요구된다. 본 다중회귀모델을 적용하면 식생체적 10% 증가는 기온을 약 0.14%, 그리고 건물체적 10% 감소는 기온을 0.29% 저감시킬 수 있다. 서울시 AWS 지점의 기온변화에 관한 타 연구(김학열과 김운수, 2003)는 기온 상승을 저지하기 위해 통계적으로 유의한 평면적 변수로서, 교통시설지 면적을 억제하고 녹지면적을 증가시킬 정책마련을 제안하였다.

표 3. 서울시 여름철 기온추정(Y) 다중회귀모델과 통계분석

독립변수	회귀모델	$r^2$	F(p)
식생체적(m <sup>3</sup> , X <sub>2</sub> ) + 건물체적(m <sup>3</sup> , X <sub>4</sub> )	$\ln Y = 3.0596 - 1.3677 \times 10^{-2} \ln X_2 + 2.7186 \times 10^{-2} \ln X_4$	0.64	13.26 (0.0005)
	계수 표준오차	t	p
Y절편	0.1491	20.5217	0.0000
X <sub>2</sub>	$5.7820 \times 10^{-3}$	-2.3655	0.0319
X <sub>4</sub>	$9.0579 \times 10^{-3}$	3.0013	0.0089

### 4. 소공간 스케일의 토지피복과 기온차 고찰

직경 30m의 소공간 스케일에서 실측한 춘천시 토지피복과 여름철 기온(5회 실측일의 24시간 평균치) 간의 변화는 표 4와 같다. 기온은 녹지면적, 식생체적, 수목피도 등의 증가에 따라 감소하는 반면, 건물 및 포장면적의 증가에 비례하여 상승하는 경향이였다. 건물체적은 실측대상공간 내의 모든 지점에 분포하지 않고 하드스케이프의 알베도는 변이폭이 좁고 증감의 경향도 일정하지 않아 기온변화와 연관시키는데 한계가 있다.

서울시 AWS 지점의 기온추정 회귀모델의 독립변수 중, 유의성이 인정된 식생체적(X<sub>2</sub>)을 선정하여 단순회귀모델을 도출하였다. 그 결과 여름철 기온은  $Y = 3.2300 - 3.2407 \times 10^{-5} X_2$ 의 모델에서 가장 높은 적합도를 보였다. 이 모델의 F값은 25.45로서 1% 수준에서 유의하고 기온 전체 변이량의 86%를 설명하였다. Y 절편 및 식생체적의 회귀계수는 t 검정 결과 역시 모두 1% 수준에서 유의하였다. 본 회귀모델에 근거하면, 소공간 스케일의 여름철 기온은 식생체적을 10% 증가시킴에 따라 0.32%(0.08℃)씩 감소하는 것으로 나타났다. 이는 식생체적을 독립변수로 서울시 AWS 지점의 기온을 추정하는 단순회귀모델의 적용결과와 거의 같은 경향이다.

기존의 관련연구(조현길과 안태원, 2006)에 따르면, 여름철 기온은 수목피도 10% 증가에 따라 평균 0.55℃씩 낮아진다. 본 실측의 경우, 수목피도 10% 증가는 여름철 기온을 기존 연구 결과의 약 1/2 수준인 평균 0.30℃씩 저감하였다. 이러한 차이는 측정일의 운량, 습도, 풍속 등을 비롯한 측정환경의 변이에 기인할 수 있다. 실제로 본 실측일의 상대습도는 지점에 따라

표 4. 소공간 스케일의 토지피복에 따른 춘천시 여름철 기온 변화

녹지면적(m <sup>2</sup> )	식생체적(m <sup>3</sup> )	수목피도(%)	건물체적(m <sup>3</sup> )	건물/포장면적(%)	알베도	기온(℃)
3	1	0.2	1,836	99.5	0.25	25.9
126	71	8.2	47	82.2	0.20	24.9
370	339	24.5	0	48.5	0.13	24.7
353	939	43.8	0	57.4	0.16	24.5
621	2,089	82.0	108	12.1	0.32	23.6
707	2,476	118.7	0	0.0	-	23.4

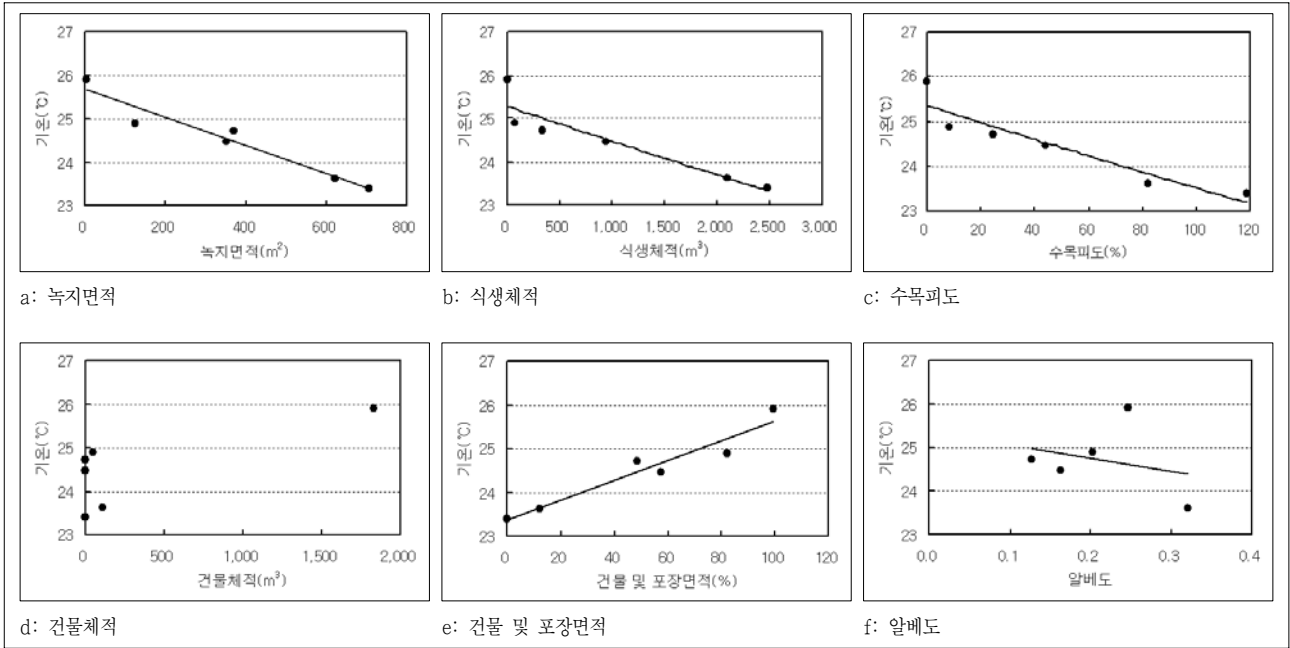


그림 1. 소공간 스케일의 토지피복 변수별 춘천시 여름철 기온변화도

평균 79~85%로서 기존연구의 46~67%보다 높았고, 평균 풍속은 기존 연구의 0.4~0.6m/s보다 느린 0.1~0.2m/s로서, 이들 인자가 더 낮은 기온차에 기여한 것으로 분석된다.

독립변수로 한 단순회귀모델의 도출 결과, 서울시 AWS 지점의 경우와 유사하게 식생체적을 10% 증가시킴에 따라 0.32 % (0.08°C)씩 감소하는 것으로 나타났다.

## IV. 결론

본 연구의 의의는 선행연구에서 간과해 온 토지피복의 입체적 공간분포에 따른 기온변화를 구명하여, 열섬현상 완화에 기여할 도시조경계획 및 설계의 기반정보를 마련한데 있다. 연구대상지는 서울시 24개 AWS 지점의 직경 300m 공간과 춘천시에서 선정한 6개 실측지점의 직경 30m 소공간이었다. 대상공간의 녹지면적, 식생체적, 건물면적, 건물체적, 포장로면적, 하드스케이프 알베도, 인구밀도, 풍속, 고도 등을 파악하여 여름철 기온 변화에 작용하는 효과를 분석하였다.

회귀모델의 유도 및 분석 결과, 여름철 기온의 증감에 기여하는 유의한 독립변수는 식생체적과 건물체적인 것으로 나타났다. 기온저감을 지향하는 도시조경은 가급적 식생체적을 증가시키면서 건물체적을 감소시키는 전략이 요구된다. 다중회귀모델에 따르면, 식생체적 10% 증가는 기온을 약 0.14%, 그리고 건물체적 10% 감소는 기온을 0.29% 저감시킬 수 있다. 소공간 스케일에서 실측한 춘천시의 여름철 기온은 식생체적을

## 인용문헌

1. 김학열, 김운수(2003) 서울시 도시기온 변화에 관한 모델 연구. 한국조경학회지 31(3): 74-82.
2. 박인환, 장갑수, 김종용, 박종화, 서동조(2000) 대도시에서 있어 냉섬의 유형별 온도완화효과-대구광역시의 사례 연구. 한국조경학회지 28(1): 11-18.
3. 윤용한, 송태갑(2000) 도시공원의 기온에 영향을 미치는 요인. 한국조경학회지 28(2): 39-48.
4. 조현길, 안태원(1999) 도시녹지에 의한 미기후개선의 기능. 한국조경학회지 27(4): 23-28.
5. 조현길, 안태원(2006) 도시 수목식재와 미기후 개선의 상관성 구명. 한국조경학회지 34(5): 70-75.
6. Ackerman, B.(1985) Temporal march of the Chicago heat island. Journal of Climate and Applied Meteorology 24(6): 547-554.
7. Akbari, H., S. Davis, J. Huang, P. Liu and H. Taha(1992) The urban heat island: causes and impacts. In H. Akbari, S. Davis, S. Dorsano, J. Huang and S. Winnett, eds., Cooling Our Communities. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, pp. 5-26.
8. Lee, H.-Y.(1993) An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of urban heat islands. Atmospheric Environment 27B(1): 1-13.