

도시기온에 작용하는 입체적 토지피복의 영향[†]

조현길 · 안태원

강원대학교 산림경영 · 조경학부

Impacts of Three-dimensional Land Cover on Urban Air Temperatures

Jo, Hyun-Kil · Ahn, Tae-Won

Division of Forest Management and Landscape Architecture, Kangwon National University

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the impacts of three-dimensional land cover on changing urban air temperatures and to explore some strategies of urban landscaping towards mitigation of heat build-up. This study located study spaces within a diameter of 300m around 24 Automatic Weather Stations(AWS) in Seoul, and collected data of diverse variables which could affect summer energy budgets and air temperatures. The study also selected reflecting study objectives 6 smaller-scale spaces with a diameter of 30m in Chuncheon, and measured summer air temperatures and three-dimensional land cover to compare their relationships with results from Seoul's AWS.

Linear regression models derived from data of Seoul's AWS revealed that vegetation volume, greenspace area, building volume, building area, population density, and pavement area contributed to a statistically significant change in summer air temperatures. Of these variables, vegetation and building volume indicated the highest accountability for total variability of changes in the air temperatures. Multiple regression models derived from combinations of the significant variables also showed that both vegetation and building volume generated a model with the best fitness. Based on this multiple regression model, a 10% increase of vegetation volume decreased the air temperatures by approximately 0.14%, while a 10% increase of building volume raised them by 0.26%.

Relationships between Chuncheon's summer air temperatures and land cover distribution for the smaller-scale spaces also disclosed that the air temperatures were negatively correlated to vegetation volume and greenspace area, while they were positively correlated to hardscape area. Similarly to the case of Seoul's AWS, the air temperatures for the smaller-scale spaces decreased by 0.32% (0.08℃) as vegetation volume increased by 10%, based on the most appropriate linear model.

Thus, urban landscaping for the reduction of summer air temperatures requires strategies to improve vegetation volume and simultaneously to decrease building volume. For Seoul's AWS, the impact of building volume on changing the air temperatures was about 2 times greater than that of vegetation volume. Wall and rooftop greening for shading and evapotranspiration is suggested to control atmospheric heating by three-dimensional building surfaces, enlarging vegetation volume through multilayered plantings on soil surfaces.

Key Words: Energy Budget, Heat Island, Regression Model, Urban Landscaping, Strategy

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

Corresponding author: Hyun-Kil Jo, Division of Forest Management and Landscape Architecture, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea, Tel.: +82-33-250-8345, E-mail: jhk@kangwon.ac.kr

국문초록

본 연구의 목적은 토지피복의 입체적 분포가 도시기온의 변화에 작용하는 영향을 구명하여 열섬현상 완화에 기여할 도시조경의 전략을 모색하는 것이다. 연구대상지는 서울시 24개 AWS 지점별 직경 300m 공간이었고, 대상공간의 여름철 에너지 수지 및 기온에 영향을 미칠 수 있는 다양한 변수의 자료를 구축하였다. 또한, 춘천시에서 연구목적에 고려한 6개 지점을 선정하여 기온을 실측하고, 기온변화에 더 민감하게 반응할 30m 소공간의 지점별 토지피복을 실시하여 서울시의 경우와 비교하였다.

서울시 AWS 지점의 여름철 기온을 추정하는 단순회귀모델을 도출한 결과, 식생체적, 녹지면적, 건물체적, 건물면적, 인구밀도, 포장로면적 등의 변수가 통계적으로 유의하게 여름철 기온변화에 기여하는 것으로 나타났다. 이들 중 기온변화의 설명력이 가장 높은 변수는 식생체적과 건물체적이었다. 기온변화에 유의한 변수들을 조합하여 유도한 다중회귀모델에서도 식생체적과 건물체적의 양 변수가 통계적으로 가장 적합한 모델을 생성하였다. 이 다중회귀모델에 따르면 식생체적의 10% 증가는 기온을 약 0.14% 감소시킨 반면, 건물체적의 10% 증가는 기온을 0.26% 증가시켰다.

소공간스케일에서 실측한 춘천시의 여름철 기온과 토지피복 간의 상관성 역시, 기온은 식생체적, 녹지면적 등의 증가에 따라 감소하는 반면 하드스케이프 면적의 증가에 비례하여 상승하는 경향이 있었다. 식생체적 변수를 적용하여 가장 적합한 단순회귀모델을 도출한 결과, 소공간스케일의 여름철 기온은 서울시 AWS 지점의 단순회귀모델과 유사하게 식생체적을 10% 증가시킴에 따라 0.32%(0.08℃)씩 감소하였다.

본 연구에 근거하면, 여름철 기온저감을 지향하는 도시조경은 식생체적을 증가시키면서 동시에 건물체적을 감소시키는 전략이 요구된다. 서울시 AWS 지점의 기온변화에 기여하는 건물체적의 영향력은 식생체적보다 약 2배 큰 것으로 분석된다. 따라서, 자연지반에서는 다층식재를 추진하여 식생체적을 확충하되, 건물의 입체적 표면에 의한 대기 가열을 제어하기 위해 벽면과 옥상의 녹화로 식물의 차양 및 증발산 효과를 증진해야 한다.

주제어: 에너지 수지, 열섬현상, 회귀모델, 도시조경, 전략

1. 서론

도시환경에서는 인간과 인공구조물이 우점하며 이들이 에너지 소비 및 폐열 발생을 포함한 에너지 흐름을 좌우한다. 도시의 에너지 수지(budget)를 해석하면, 태양에너지와 인공열을 합한 것은 증발산에 의한 잠열(latent heat), 대기를 가열하는 현열(sensible heat) 및 표면재료의 저장열을 합한 것과 같다(Grimmond *et al.*, 1994). 도시의 기온은 토지피복의 종류와 분포, 인공열 방출, 증발산 여부, 대기오염물질, 바람 등 에너지 수지를 좌우하는 여러 인자들에 의한 상호작용의 결과로 형성된다(Akbari *et al.*, 1992; Lee, 1993; Givoni, 1998; 조현길과 안태원, 1999; 김학열과 김운수, 2003).

도시에서는 교외나 농촌에 비하여 인공열 발생이 많은 반면 잠열이 적어, 결과적으로 현열과 저장열이 많은 일반적 특징을 보인다. 즉, 도시환경에 유입된 태양에너지는 녹지의 증발산 기능이 상대적으로 제한된 상황에서, 건물이나 포장도로에 의한 열축적 및 장파방사에 의해 폐열로 대기에 잔존하게 된다. 또한, 공장가동, 건물 냉난방, 자동차 운행 등의 필요로 도시에 도입된 화석연료의 소비는 폐열 배출을 수반한다. 화석연료 소비에 따른 대기오염 물질의 배출은 온실효과의 기작과 유사하게

장파방사의 대기운집에 기여하고, 고층건물 등에 의한 통풍의 방해는 대기 중 오염물질과 폐열의 확산을 제한한다.

폐열 축적은 무더운 여름철 도시의 기온을 높혀 열섬현상에 일조하고 냉방에너지 소비를 가중시키는 악순환을 초래하고 있다. Ackerman(1985)에 의하면, 미국 시카고(Chicago)시의 온도는 주변 농촌지역보다 여름철 맑은 날 오후에 3℃ 더 높았고, 흐리고 바람 부는 시간대에는 1℃ 더 높았다. Akbari *et al.*(1992)은 미국 세인트루이스(St. Louis) 도심의 온도는 교외 지역보다 1~4.5℃ 더 높았으며, 온도 1℃ 상승은 미국 전체의 최대 냉방전력 요구를 약 4% 증가시킴을 보고한 바 있다.

토지피복과 도시기온 간의 상관성 연구는 소규모 공간의 실측연구(조현길과 안태원, 1999; 2006; 윤용환과 송태갑, 2000)와 대규모 공간의 위성영상자료 이용연구(Lee, 1993; 박인환 등, 2000)로 대분할 수 있다. 전자는 시민의 체감온도나 냉방에너지 소비에 직접적으로 작용하는 소규모 공간의 토지피복 영향을 실측에 근거하여 파악한 장점을 보유했다. 후자는 실측 비교가 쉽지 않은 도시 전체 또는 일정 지역의 대규모 공간을 대상으로 토지피복 등과 기온변화 간의 인과관계를 위성영상을 통해 해석한 특성을 지닌다.

그런데, 상기한 양측 연구는 토지피복 유형의 평면적 분포에

따른 기온변화의 해석에 초점을 두었고 토지피복의 입체적 효과를 반영하는데는 한계성을 보이고 있다. 입체적 효과를 분석하더라도 기온에 관여하는 다양한 변수 중 녹지체적에 국한하였다(조현길과 안태원, 2006). 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(Automatic Weather Stations: AWS) 지점에서 측정된 기상자료와 측정위치 및 고도를 기상청으로부터 구입하였다(그림 1 참조). 2006년과 2007년의 2개년에 걸친 6~8월의 여름철 기상자료를 구입하여, 매일의 시간별 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 비오희지도와 1/1,000 수치지형도 및 위성영상자료(<http://earth.google.com>)를 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 작도하

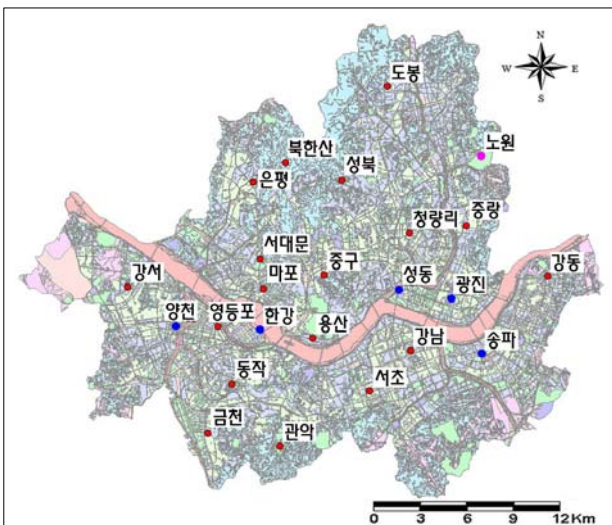


그림 1. 서울시 연구대상 AWS 지점의 분포도

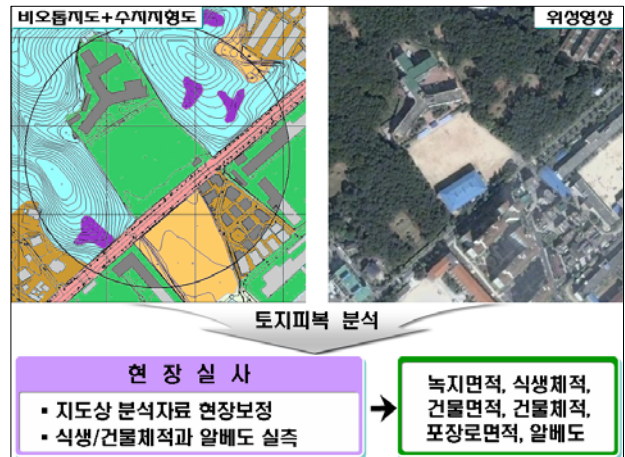


그림 2. 서울시 AWS 지점별 토지피복 조사 및 분석방법도

범례:
 ■ 경작지 비오희톱 ■ 공업지 및 도시기반 시설지
 ■ 교통시설 비오희톱 ■ 산림지 비오희톱
 ■ 조경녹지 비오희톱 ■ 주거지 비오희톱

였다. 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 하드스케이프(hardscape)의 재료별 알베도(albedo)를 전천복사계(pyranometer: LI-COR의 LI-200SA)로 측정하였다(그림 2 참조). 현장보정 과정에서, 현존 비오희지도는 학교와 운동장을 공업지 및 도시기반시설지로 구분하였거나, 기존 농경지의 주거지 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(서울특별시, 2008)로부터 파악하였다.

반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여 가장 적합한 회귀모델과 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 온도완화 영향거리 315m(박인환 등, 2000)

를 근거로, AWS 지점의 반경 300m 이내에 하천, 호수 등 수변에 인접한 5개 지점은 회귀모델 분석대상에서 제외하였다. 또한, 일반인의 출입 통제로 현장 실사가 불가능했던 노원 지점도 함께 배제하였다.

4. 소공간스케일의 기온 및 토지피복 실측

기온변화에 더 민감하게 반응할 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 회피하였고, 활엽수와 침엽수의 기온저감 차이를 고려하여 모두 활엽수가 우점하는 지점을 선정하였다.

각 선정지점의 지상 3m 높이에 자동기상측정기(HOBO의 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, 풍속 등을 6개 지점에서 동시에 측정하였다. 기간 간 온도 및 습도의 실측결과는 실측 직전 동일 환경조건 하에서 24시간 동안 측정된 자료를 비교하여, 식생체적 1m³ 지점의 설치 기기를 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 설치 위치는 소수의 산림지를 제외하면 대부분 옥상이었다. 2006~2007년의 2년간 강우일을 제외한 6~8월 여름철의 평균 기온은 지점에 따라 최저 22.3℃(북한산), 최대 26.8℃(영등포)이었다(표 1 참조). 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 타풍향에 비해 상대적으로 높은 빈도를 보였다.

2. 기온추정 단순회귀모델과 토지피복 해석

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

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

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

전체 변이량의 63%, 건물체적은 50%, 인구밀도는 46%, 포장로면적은 44%, 건물면적은 40%를 각각 설명하였다. 녹지면적 회귀모델의 설명력은 32%이었고, 풍속의 경우는 15%에 불과하였다(표 2 참조). 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 부합하는 변수는 아니다. 실제로 고도와 식생체적 및 녹지면적 간의 상관계수는 각각 0.7741, 0.6386으로서 1% 수준에서 유의한 정의 상관을 나타냈다. 입체적 공간재료의 알베도는 태양복

표 2. 서울시 여름철 기온추정(Y) 단순회귀모델과 통계분석

독립변수	회귀모델	F값	R ²
X ₁ : 녹지면적(m ²)	lnY=3.2743-1.7521×10 ⁻⁶ X ₁	7.61**	0.32
X ₂ : 식생체적(m ³)	lnY=3.2656-2.3660×10 ⁻⁷ X ₂	27.31*	0.63
X ₃ : 건물면적(m ²)	lnY=2.8581+4.0163×10 ⁻² lnX ₃	10.49*	0.40
X ₄ : 건물체적(m ³)	lnY=2.7922+3.6920×10 ⁻² lnX ₄	16.26*	0.50
X ₅ : 포장로면적(m ²)	lnY=2.6625+5.5385×10 ⁻² lnX ₅	12.39*	0.44
X ₆ : 알베도	Y=24.1290+5.4038 X ₆	0.38	0.02
X ₇ : 인구밀도(인/km ²)	lnY=2.8934+3.6295×10 ⁻² lnX ₇	13.59*	0.46
X ₈ : 풍속(%)	Y=23.5702+ 1.1439 X ₈	2.87	0.15
X ₉ : 고도(m)	lnY=3.2680-3.5753×10 ⁻⁴ X ₉	34.41*	0.68

*: 유의수준 1%, **: 유의수준 5%

사의 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 없었기 때문인 것으로 분석된다.

3. 기온추정 다중회귀모델과 토지피복 해석

단순회귀모델 중 통계적으로 유의한 변수를 대상으로 변수 상호조합에 의한 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여 다중회귀모델을 유도하였다. 그 결과 식생체적과 건물체적의 양변수를 투입한 다중회귀모델이 통계적으로 가장 적합한 것으로 나타났다(식 1 참조).

$$\ln Y = 3.0596 - 1.3677 \times 10^{-2} \ln X_2 + 2.7186 \times 10^{-2} \ln X_4 \quad (\text{식 } 1)$$

이 모델의 F값은 13.26으로서 1% 수준에서 유의하고 기온 전체 변이량의 64%(R²)를 설명하였다. Y절편 및 건물체적 회귀계수는 t 검정 결과 모두 1% 수준에서, 그리고 식생체적은 5% 수준에서 유의성을 보였다(표 3 참조). 이 모델 외에, 식생체적, 건물체적 및 인구밀도의 3개 변수로 구성된 다중회귀모델이 유의한 F값과 양호한 설명력을 보였으나, 인구밀도의 회

표 3. 서울시 여름철 기온추정 다중회귀모델 통계분석

변수	표준오차	t-값	유의확률
Y절편	0.1491	20.5217	0.0000
X ₂	5.7820×10 ⁻³	-2.3655	0.0319
X ₄	9.0579×10 ⁻³	3.0013	0.0089

귀계수가 10% 수준에서도 유의하지 않은 것으로 나타났다.

이와 같이, 식생체적과 건물체적이라는 2종의 입체적 토지피복 변수가 서울시 대상공간의 여름철 기온증가에 가장 큰 영향을 발휘하는 것으로 분석된다. 본 다중회귀모델을 적용하면 식생체적의 10% 증가는 기온을 약 0.14% 감소시키고, 건물체적의 10% 증가는 기온을 0.26% 증가시킨다. 한편, 서울시 AWS 지점의 기온변화에 관한 타연구(김학열과 김운수, 2003)는 기온상승을 저지하기 위해 통계적으로 유의한 평면적 변수로서, 교통시설지 면적을 억제하고 녹지면적을 증가시킬 정책마련을 제안하였다. 본 연구의 단순회귀모델에서는 교통시설지에 해당하는 포장로면적이 기온변화에 유의한 설명력을 보였으나, 다중회귀모델의 경우 유의한 변수에 포함되지는 않았다. 이러한 차이는 기존 결과가 본 연구와 달리 1998~1999년의 기상자료를 활용하였고, AWS 지점별 반경 500m의 공간규모를 대상으로, 비오톱지도 상의 과거 토지이용 자료를 적용한 것 등에 연유한다고 사료된다.

본 연구의 다중회귀모델에 근거하면, 기온저감을 지향하는 도시조경은 가급적 식생체적을 증가시키면서 아울러 건물체적을 감소시키는 전략이 요구된다. 기온변화에 기여하는 건물체적의 영향력은 식생체적보다 약 2배 큰 것으로 분석된다. 건물의 수평적 및 수직적 분포는 태양복사열의 저장과 장파방사를 통해 대기를 가열한다. 옥상의 가을철 하루 열유입량은 불투수면 366kJ/m², 녹화면 0~29kJ/m²로서 현저한 차이를 보였고(Wong *et al.*, 2003), 콘크리트 표면의 여름철 온도는 잔디면보다 최대 8℃ 높은 것으로 보고된다(조현길과 안태원, 1999). 따라서, 불가피한 건물체적의 저장열 및 현열 발생에 따른 기온상승을 제어하기 위해서는 벽면과 옥상의 녹화를 추진하여 식물의 차양 및 증발산 효과를 증진함이 바람직하다.

4. 소공간스케일의 토지피복과 기온차 고찰

직경 30m의 소공간스케일에서 실측한 춘천시 토지피복과 여름철 기온(5회 실측일의 24시간 평균치) 간의 변화는 표 4 및 그림 3과 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 변이 폭이 좁으며 증감의 경향도 일정하지 않아 기온변화와 연관시키는데 한계가 있었다.

서울시 AWS 지점의 기온추정 회귀모델의 독립변수 중, 유의성이 인정된 식생체적(X₂)을 적용하여 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 설명

표 4. 춘천시 소공간스케일의 토지피복에 따른 여름철 기온변화

녹지면적 (m ²)	식생체적 (m ³)	수목피도 (%)	건물체적 (m ³)	건물/포장 면적 (%)	알베도	기온(°C)
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

하였다. Y절편 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°C)씩 감소하는 것으로 나타났다. 이는 식생체적을 독립변수로 서울시 AWS 지점의 기온을 추정하는 단순회귀모델의 적용결과와 거의 같은 경향이다.

식생체적은 수목의 수직적 높이와 수평적 넓이를 함께 나타내는 입체적 변수로서, 수목의 차양 및 증산에 따른 기온저감 효과를 계량화하는 측면에서 평면적 변수인 식생피도보다 바람직한 지표이다. 이는 초본, 관목, 교목 간의 식재피도가 동일한 경우라도 수관고를 고려한 체적에는 차이가 있으며, 그에 따른 차양 및 증산효과는 상이하기 때문이다. 도시환경에서 흉고직경이 약 15cm인 느티나무나 단풍나무의 수관체적은 약 35m³/주인데(조현길과 野島義照, 2000), 식생체적 약 1m³인 공간에 비해 1.2°C 저온을 나타낸 식생체적 339m³의 공간에는 이 크기의 수목이 약 1.5주/100m² 분포하는 것에 해당한다.

기존의 관련연구(조현길과 안태원, 2006)에 따르면, 여름철 기온은 수목피도 10% 증가에 따라 평균 0.55°C씩 낮아졌다. 본 실측의 경우, 수목피도 10% 증가는 여름철 기온을 기존 연구 결과의 약 1/2 수준인 평균 0.30°C씩 저감하였다. 이러한 차이는 측정일의 운량, 습도, 풍속 등을 비롯한 측정환경의 변이에 기인할 수 있다. 습도가 높고 풍속이 매우 느리면, 식물의 증산 작용이 상대적으로 감소되어 잠열에 의한 기온저감의 효과가 낮아진다. 실제로 본 실측일의 상대습도는 지점에 따라 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.

IV. 결론

본 연구는 토지피복의 입체적 공간분포가 도시기온에 작용하는 영향을 파악하여 열섬현상 완화에 기여할 도시조경의 방향을 모색하였다. 연구대상지는 서울시 24개 AWS 지점별 직경 300m 공간이었고, 대상공간의 에너지 수치 및 기온에 영향을 미칠 수 있는 녹지면적, 식생체적, 건물면적, 건물체적, 포장면적, 하드스케이프 알베도, 인구밀도, 풍속 등을 파악하여 여름철 기온변화에 작용하는 효과를 분석하였다. 또한, 춘천시에서 연구목적에 고려한 6개 지점을 선정하여 기온을 실측하고, 기온변화에 더 민감하게 반응할 30m 소공간의 지점별 토지피복을 실사하여 서울시의 경우와 비교하였다.

서울시 AWS 지점의 기온을 추정하는 단순회귀모델을 도출

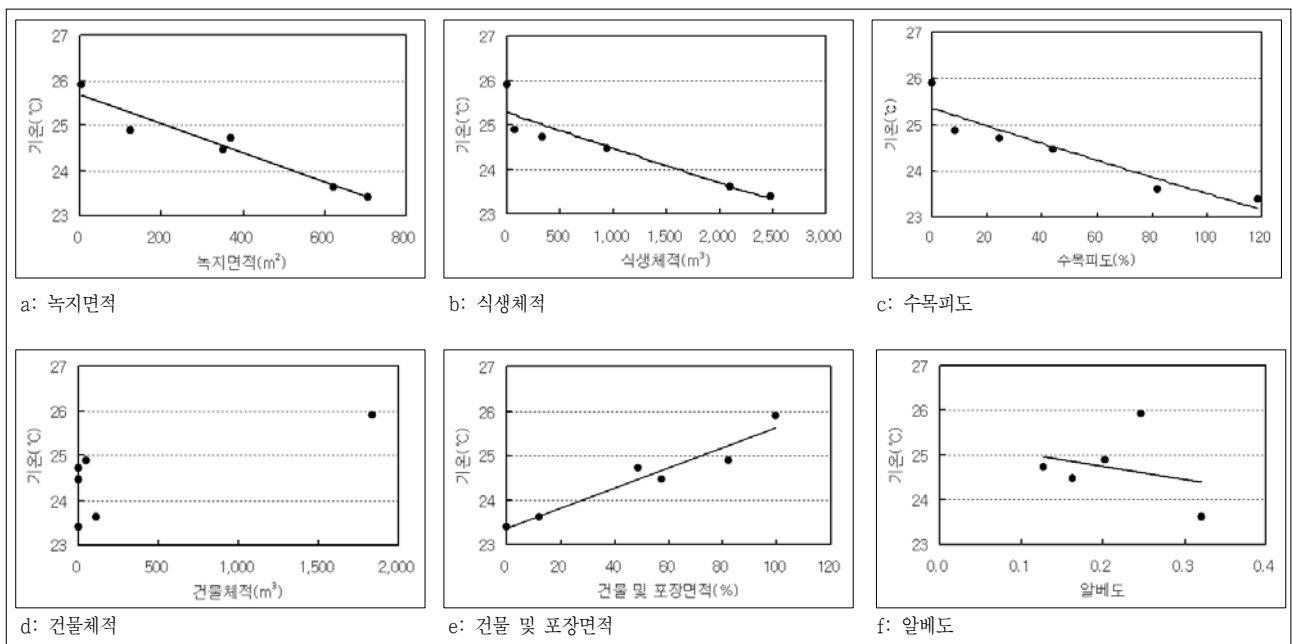


그림 3. 춘천시 소공간스케일의 토지피복 변수별 여름철 기온변화

한 결과, 식생체적, 녹지면적, 건물체적, 건물면적, 인구밀도, 포장로면적 등의 변수가 통계적으로 유의하게 여름철 기온변화에 작용하는 것으로 나타났다. 이들 중 기온변화의 설명력이 상대적으로 가장 높은 변수는 식생체적과 건물체적이었다. 기온변화에 유의한 변수들을 조합하여 유도한 다중회귀모델에서도 식생체적과 건물체적의 양 변수가 통계적으로 가장 적합한 모델을 생성하였다. 이 다중회귀모델에 따르면 식생체적의 10% 증가는 기온을 약 0.14% 감소시키고, 건물체적의 10% 증가는 기온을 0.26% 증가시켰다.

소공간스케일에서 실측한 춘천시의 여름철 기온과 토지피복 간의 상관성 역시, 기온은 식생체적, 녹지면적 등의 증가에 따라 감소하는 반면 건물 및 포장면적의 증가에 비례하여 상승하는 경향이였다. 다만, 건물은 실측공간 내의 모든 지점에 분포하지 않고 하드스케이프 알베도는 변이 폭이 좁아 기온변화와 적절히 연관시키는데 한계가 있었다. 이는 자동기상측정기의 가용수가 제한되어 측정지점 간 모든 변수의 변이를 반영하기가 곤란하였기 때문이다. 식생체적 변수를 적용하여 가장 적합한 단순회귀모델을 도출한 결과, 소공간스케일의 여름철 기온은 서울시 AWS 지점의 단순회귀모델과 유사하게 식생체적의 10% 증가시킴에 따라 0.32%(0.08℃)씩 감소하였다.

본 연구에 근거하면, 여름철 기온저감을 지향하는 도시조경은 가급적 식생체적을 증가시키면서 아울러 건물체적을 감소시키는 전략이 요구된다. 서울시 AWS 지점의 기온변화에 기여하는 건물체적의 영향력은 식생체적보다 약 2배 큰 것으로 분석된다. 도시에서 불가피한 건물의 축조는 수평적 및 수직적 표면에 의한 태양복사열의 저장과 현열 발생을 통해 대기를 가열한다. 따라서, 자연지반에서는 초본, 관목 및 교목으로 구성되는 다층식재로 식생체적을 확충하면서, 건물체적에 의한 기온상승을 제어하기 위해 벽면과 옥상의 녹화로 식물의 차양 및 증발산 효과를 증진할 필요가 있다.

본 연구의 의의는 선행연구에서 간과해 온 토지피복의 입체적 변수에 따른 기온변화를 분석하는데 초점을 둔 것이다. 다만, 본 연구에서는 도시기온에 영향을 미치는 입체적 공간재료의 알베도와 화석연료 소비에 따른 인공열 발생량을 적절히 반영하지 못하였다. 하드스케이프의 재료와 색채를 고려한 입체적 알베도는 연구에의 반영을 시도하였으나 대상공간별

기온에 유의한 변화를 초래할 만큼 큰 차이가 없었다. 인공열의 주 발생원은 차량운행, 건물 냉난방, 공장가동 등으로서, 도시의 에너지 수지 및 기온 상승에 기여하므로 추후 관련 연구를 필요로 한다. 한편, 소공간스케일의 춘천시 기온은 상대 습도가 비교적 높고 풍속이 매우 느린 여름철에 측정하게 된 결과로서, 식물의 증산에 의한 지점 간 기온차가 적은 것으로 나타나 해당 토지피복에 따른 기온변화를 해석하는데 참고를 요구한다.

인용문헌

1. 김학열, 김운수(2003) 서울시 도시기온 변화에 관한 모델 연구. 한국조경학회지 31(3): 74-82.
2. 박인환, 장갑수, 김종용, 박중화, 서동조(2000) 대도시에 있어 냉섬의 유형별 온도완화 효과 -대구광역시 사례연구. 한국조경학회지 28(1): 11-18.
3. 서울특별시(2008) 서울통계연보.
4. 윤용한, 송태갑(2000) 도시공원의 기온에 영향을 미치는 요인. 한국조경학회지 28(2): 39-48.
5. 조현길, 안태원(1999) 도시녹지에 의한 미기후 개선의 기능. 한국조경학회지 27(4): 23-28.
6. 조현길, 안태원(2006) 도시 수목식재와 미기후 개선의 상관성 구명. 한국조경학회지 34(5): 70-75.
7. 조현길, 野島義照(2000) 도시녹지의 미기후 개선, CO₂ 흡수 및 화재방지의 효과. 한국자원식물학회지 13(3): 162-170.
8. Ackerman, B.(1985) Temporal march of the Chicago heat island. Journal of Climate and Applied Meteorology 24(6): 547-554.
9. 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.
10. Givoni, B.(1998) Climate Considerations in Building and Urban Design. New York: Van Nostrand Reinhold.
11. Grimmond, S., C. Souch, R. Grant, and G. Heisler(1994) Local scale energy and water exchanges in a Chicago neighborhood. In E. G. McPherson, D. J. Nowak, and R. A. Rowntree, eds., Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. General Technical Report NE-186. Radnor, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, pp. 41-61.
12. Lee, H.-Y.(1993) An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of urban heat islands. Atmospheric Environment 27B(1): 1-13.
13. Wong, N. H., Y. Chen, C. L. Ong, and A. Sia(2003) Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. Building and Environment 38: 261-270.
14. <http://earth.google.com/index.html>

원 고 접 수 일: 2009년 5월 7일

심 사 일: 2009년 6월 11일

게 재 확 정 일: 2009년 6월 18일

3인익명 심사필