

옥상녹화 및 토양피복 변화가 단독주택지 외부 열환경에 미치는 영향 분석

김정호·윤용한*

Effect of Thermal Environment by Green Roof and Land Cover Change
in Detached Housing Area

Jeong-Ho Kim and Yong-Han Yoon

건국대학교 산림과학과(Dept. of Forest Science, Konkuk University)

제 출 : 2010년 7월 29일 수 정 : 2010년 9월 27일 승 인 : 2011년 3월 17일

국문요약

단독주택지의 도시환경보전 및 개선을 위해 서울시 강남구 수서동 일원의 단독주택지 밀집지역을 대상으로 생태면적을 개념을 적용한 비오톱 유형화와 도시열환경 예측 시뮬레이션을 실시하였다. 생태면적을 개념을 적용하여 비오톱 유형 분류 결과 총 7개 유형으로 구분되었고 옥상녹화 미적용 건폐지비오톱(48.16%) > 불투수비건폐포장비오톱(39.75%) > 전면투수녹지비오톱(6.23%) > 틈새투수비건폐포장비오톱(3.26%) > 전면투수비건폐포장지비오톱(2.51%) > 부분투수비건폐포장지비오톱(0.04%) 순이었다. 단독주택지 외부 열환경 특성 및 변화 예측을 실시한 결과, 비오톱 유형별 지표면 온도값은 불투수비건폐포장지비오톱 > 옥상녹화미적용건폐지비오톱 > 전면투수녹지비오톱 > 투수포장지비오톱이 순이었다. 옥상녹화 100% 적용을 가정한 case 2의 경우 최대 33.58℃, 최소 23.85℃, 평균 27.74℃로서 옥상녹화 전에 비해 약 5.19℃ 감소한 것으로 예측되었다. 평균 외기온도는 case 2가 case 1보다 약 0.18℃ 낮게 분석되었다.

■ 주제어 ■ 비오톱, 생태면적률, 외기온도, 시뮬레이션

Abstract

Used as foundation resources for environment improvement and preservation of single-housing residential area by practicing classification of biotope with the concept of ecological area rate applied and performing urban thermal environment prediction simulation. Biotope is classified as seven types according to classification of biotope which is carried out with the concept of ecological area rate applied. The classification is listed below in descending order: building biotope(48.16%), impervious pavement biotope(39.75%), greenspace biotope(6.23%), crack permeable pavement biotope(3.26%), whole surface permeable pavement biotope(2.51%), parts permeable pavement biotope(0.04%). As a result

* 교신저자: yonghan7204@kku.ac.kr

** 본 논문은 2010학년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문입니다.

of analysing prediction of variation and characteristics of thermal environment of single-housing residential area, land surface temperature per types of biotope are evaluated as listed below in descending temperature order: impervious pavement biotope > building biotope > greenspace biotope > permeable pavement biotope. In case 2 where vegetated roof hypothetically covers 100% of the roof area, temperature is predicted to be 33.58°C Max, 23.85°C Min, and 27.74°C Avg. which is Approximately 5.19°C lower than a non-vegetated roof. Average outdoor temperature for case 2 is studied to be 0.18°C lower than case 1.

■ **Keywords** ■ Biotope, Ecological Area Rate, Outdoor Temperature, Simulation

I. 서론

우리나라 이미 1990년대 도시거주율이 75%를 넘었고 현재는 80% 이상으로 제시되고 있다(박주문, 1995). 이렇게 인구가 집중된 도시지역의 기후여건과 대기질은 인간의 생활과 건강에 큰 영향을 끼쳤을 뿐만 아니라 이상 도시기후현상은 도시환경문제의 대표적 관심사이다. 도시기후는 독특한 기후요소가 주변지역과 다르게 존재한다는 것(남중우, 2008)을 의미하며 최근 관측 및 예측 기술로 도시기후의 존재는 구체적으로 확인되고 있다. 일반적으로 특정 도심지역이 그 주변에 비해 고온대가 형성되어 지도 상에 등온선으로 표현되어 도시 중심부가 폐쇄된 등온선으로 뚜렷하게 나타나고 있는 것을 도시열섬으로 정의(서응철, 2007)하고 있다

도시열섬현상 완화 대책 수립의 중요성이 인식되는 가운데 도시 고온화 저감방안으로 옥상녹화 및 건축물 녹화(김상옥 등, 2009), 녹지율의 증가(남중우, 2008), 바람길을 고려한 건축물 배치(남중우, 2008) 등이 있으며 최근 생태면적률 확보와 같은 자연토지 회복 조성이 제도적으로 권장되고 있다. 특히 토지회복은 나지, 수면, 수목과 같은 다양한 종류의 회복으로 구성되며 각 토지회복형태에 따라 다르게 나타나므로(김상옥 등, 2009) 생태면적 조성 시 적용될 수 있는 자연회복의 종류와 회복비율의 적정조합이 필요하다. 토양회복유형에 의한 영향은 국소적인 도시 열환경에 직접적으로 작용하여 생활환경을 악화시키고 있다(류남형과 유병림, 2006). 따라서 도시지역 환경을 개선하기 위해서는 도시 열환경을 포함한 관측 및 예측 시뮬레이션 검토 후 이를 반영하여야 한다(남중우, 2008).

도시열섬현상 규명 및 완화를 위해 국제적 관심이 고조되고 있는 가운데 국내에서도

도시열섬과 건축물 외부공간(김주수 등, 2010), 도시열섬과 토양피복(조성모 등, 2009)에 관한 기초적인 연구가 부분적으로 시도되고 있으나, 주로 실측에 의한 변화 예측 정도로 한정하고 있다. 최근 시뮬레이션을 활용하여 도시열환경 예측이 활발히 이루어지고 있는데(남중우, 2008; 박필원, 2009), 건축물의 배치에 따른 열환경 변화 예측(고은아, 2010; 남중우, 2008), 토양피복과 도시 고온화의 영향 연구(윤성환과 김성하, 2008; 류남형과 유병림, 2006), 신재생에너지가 도시열수지에 미치는 영향 연구(손원득 등, 2009) 등이 있다.

시뮬레이션을 통한 예측은 모의실험에 의해 얻어진 값과 유사한 경향을 나타내는 연구가 지속적으로 진행되어 최근에는 모의실험과 실측보다 시뮬레이션에 의한 값을 통한 영향 분석 및 대안 수립에 많이 활용되고 있다. 옥외 열환경평가 관련 시뮬레이션 중 도시~도시블록 스케일의 도시기후 시뮬레이션으로서는 村上(1997), 김상진과 서승직(2002) 등은 Meller-Yamada 대기난류모델을 이용하여 도시레벨의 풍속 분포, 온도 분포 등 국지적인 기후해석을 행하였다. 이러한 기상모델에서는 일반적으로 수십km를 해석범위로 하여 건물 상공의 기후를 예측하는 데 그 한계가 있다. 도시~블록건물 스케일을 다루는 수치해석 연구로는 吉田 등(2000), 김태연 등(1998)에 의해 수행된 대류·방사·습기연성해석을 통해 종래의 표준 k-ε모델에 비하여 보다 정밀한 풍속·기온분포 예측을 가능하게 하였지만, CFD 모델의 계산부하를 고려하면 다수의 케이스를 신속히 계산할 수 없는 단점이 지적되고 있다(고은아, 2010). 이런 문제점을 해결하고 도시열섬의 원인별 정량화를 구현하기 위해 기존 시가지 공간 내의 온열성상의 6년간 실측(손원득과 이성, 2004a)과 1차원 도시 Canopy 모델을 통한 검증(손원득과 이성, 2004b)을 제시하여 1차원 도시 Canopy 모델인 AUSSSM의 효용성을 입증한 바 있다(谷本 등, 1998). AUSSSM은 도시기후모델이면서 건물의 단열상태, 구조, 공조시스템 등의 건축적 요소들을 입력조건으로 반영하고 있다는 점이 가장 큰 특징이다.

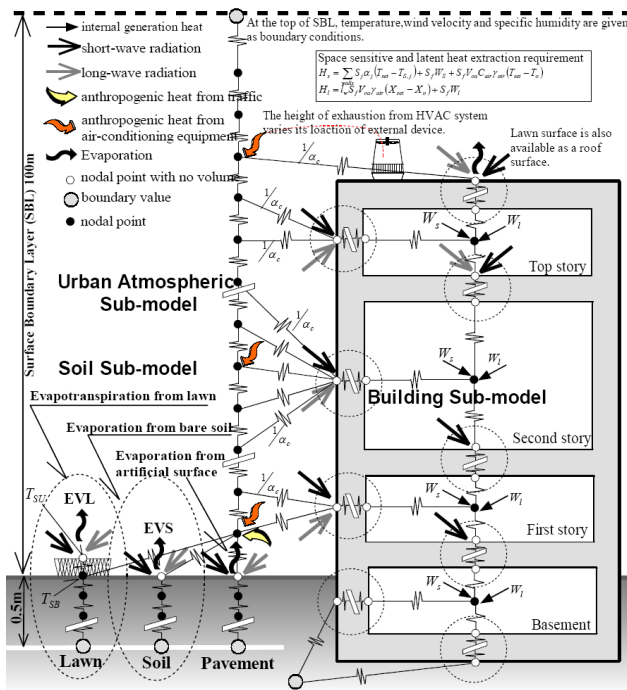
본 연구는 서울시 강남구 수서동 일원의 단독주택 밀집지역을 대상으로 지표면 상태를 정밀 분석하기 위해 생태면적을 고려한 정밀 비오톱 유형화를 실시하였으며 아울러 1차원 도시 Canopy 모델인 AUSSSM을 활용하여 토지피복유형의 변화가 외부 열환경에 미치는 영향을 정량·예측하여 향후 도심지 내 단독주택지의 환경 개선을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 1차원 도시 캐노피 모델의 개요

AUSSSM(Architerture-Urban-Soil Simultaneous Simulation Model)은 도시대기, 토양, 건물의 3개의 서브모델로 구성되어 있으며 전체를 완전연성계로서 취급하고 있다. 도시고온화 요인의 정량화 즉, 도시고온화 억제 수법의 정량적 평가를 목적으로 하는 수치해석모델이며(Aya Hagishima et al., 2001; 손원득 등, 2009; 손원득과 이성, 2004b) AUSSSM의 개요는 <그림 1>과 같다.

그림 1 건축-도시-토양 연성계 모델인 AUSSSM의 모식도(Aya Hagishima et al., 2001)



건축물 모델은 건축물 열부하 계산을 기초로 하여 벽체 및 창으로 구성된 직방체 건축물을 설정하였다. 외벽 및 옥상벽면내에 대해서는 1차원 열전도방정식에 기초하였으며 표면에서는 방위에 따른 일사, 장파방사 및 일사의 1차 반사와 대류에 의한 열전달을 고려하였다. 창을 통한 투과일사는 실내 벽체에 흡수된 후 실온 상승에 기여한다

고 가정하였다. 실내 벽면간의 장파복사는 실온에 의해 실의 벽면온도가 거의 동일하다고 가정하여 고려하지 않았다. 도로면 및 토양에 대해서는 지중 0.5m 지점을 온도지정 경계층으로 하는 1차원 열전도방정식에 의해 계산하였다. 지표면에 대해서도 일사, 장파, 복사 및 일사의 1차반사와 대류에 의한 열전달을 고려하였다. 도로공간은 일반적으로 복잡한 기하학적 공간이나, 주변의 건축물을 동일한 직방체로 단순화하여 다음과 같이 가정하였다. 첫째, 도로공간 내부 및 각층의 상부대기는 온도분포가 없으며 각 공간의 온도는 일정하다. 둘째, 도로공간의 길이는 남북방향으로 무한하며 동서방향으로는 동일한 형태의 공간이 연속된다. 셋째, 건물군으로부터의 공조배열은 옥상에서 배출된다. 넷째, 잠열의 영향은 작다고 가정하고 현열만을 고려하였다. 이를 종합하면, AUSSSM에서는 동일형상의 직방체 건물이 등간격으로 무한히 존재하는 이상적인 도시를 가정하여 대기층에 수직 1차원 모델을 적용하였으며, 토양에 관한 서브모델 및 건축 서브모델은 1차원 열전도방정식을 기본으로 하고 있다고 요약할 수 있다. 상정하는 도시의 가로형상은 <그림 2>에, 대기 서브모델에 관한 기초식은 <표 1>에 나타내었다. AUSSSM은 이미 일본에서 시뮬레이션 결과치와 실측치의 비교를 통해 타당성이 검증된 바 있고, 실측치와 시뮬레이션의 기온차는 1℃ 이내이므로(尹聖皖과 足永靖信, 2004) 이후 고찰에는 문제가 없는 것으로 간주하였다.

그림 2 AUSSSM에서 적용하는 건물 및 가로 구획 패턴

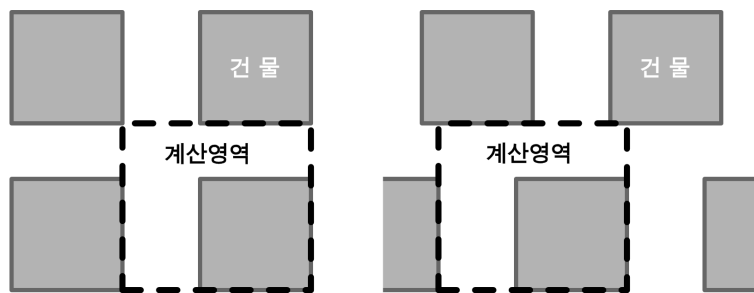


표 1 도시대기 서브모델에 관한 기초식

수송방정식 (Transport equation)	$m \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial(K_m \cdot m \frac{\partial u}{\partial z})}{\partial z} - \frac{1}{2}ca u ^2$ (1)	$m \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial(K_h \cdot m \frac{\partial \theta}{\partial z})}{\partial z} + H$ (2)	$m \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial(K_v \cdot m \frac{\partial q}{\partial z})}{\partial z} + W$ (3)	
난류 확산계수 (Turbulent diffusion coefficient)	$R_f < R_{fc}; K_m = l^2 \left \frac{\partial u}{\partial z} \right \frac{S_M^{3/2}}{\sqrt{C}} (1 - R_f)^{1/2}$ (4)	$K_h = K_v = l^2 \left \frac{\partial u}{\partial z} \right \frac{S_M^{1/2}}{\sqrt{C}} S_H (1 - R_f)^{1/2}$ (5)	$S_M = \frac{1 - C_2}{C_1^2} \left(\frac{HB}{G} \right) \left(\frac{R_{f1} - R_f}{R_{f2} - R_f} \right) \left(\frac{R_{f3} - R_f}{1 - R_f} \right)$ (6)	$S_H = \frac{B}{CC_1 C_{1T}} \left(\frac{R_{f1} - R_f}{1 - R_f} \right)$ (7)
	$R_f < R_{fc}; K_m = K_h = K_v = l^2 \left \frac{\partial u}{\partial z} \right $ (8)			
스케일 (Scale of turbulent length)	$z < H_{conv}; l = 2k^3 \frac{1}{ca} \{1 - \exp(-k\eta)\}$ (9)	$\eta = ca \frac{z}{2k^3}$ (10)		
	$z \geq H_{conv}; l \propto kz$ (11)			

2. 연구대상지 및 분석방법

1) 연구대상지

토지이용형태별 기온분포는 상업업무지역, 주거지역, 녹지지역의 순으로 높았으며 (윤용한 등, 2007), 이 중 주거지역은 아파트 등의 고층주거단지와 저층의 단독주택지역으로 구분할 수 있다. 최근 서울시와 같은 도시지역에서는 기존 단독주택지역을 고층의 주거나 상업업무지역으로 개발하고 있어 단독주택지역의 보전 및 개선방안이 지속적으로 요구되고 있으므로 단독주택지의 특성 및 변화 예측에 대한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구는 서울특별시 강남구 일원동에 위치하는 단독주택 밀집지역을 선정하여 생태면적을 고려한 비오톱 유형화 및 열환경 변화를 예측하였다. 연구대상지의 면적은 173,886m²이다(그림 3).

그림 3 연구대상지 위치도



2) 분석방법

(1) 비오톱 유형 구분

비오톱은 지형적, 기후적으로 어느 일정공간을 갖는 생물의 서식공간(환경부, 1996)으로 정의할 수 있으며 확대된 의미에서 비오톱은 수면 또는 식생지뿐만 아니라 건물이 서 있는 주거지도 포함될 수 있다(이무춘, 1996).

비오톱 유형은 생태면적을 개념을 도입한 비오톱 유형화를 구분하고자 하였다. 이를 위해 서울시 비오톱 유형화 구분 기준(서울특별시, 2000)을 토대로 토양의 투수적 특성을 고려하여 재분류하였다. 즉, 투수특성에는 불투수포장면, 부분투수, 틈새투수, 전면투수를 고려하였다.

(2) 도시 온열환경 특성 분석

본 연구는 도시온열성상 분석을 위해 개량·건축-도시-토양연성계 모델(AUSSSM)을 사용하였다. 도시환경(열섬 등) 특성 및 변화를 분석하기 위해 수치지형도를 이용하여 평균 건물군 높이는 8m, 도로폭은 8m, 건물군 폭은 12m로 선정하였다. 건물군의 창면적 비율은 30%로 설정하였으며 실내 발열 및 환기에 대해서는 바닥면적을 기준으로 산정하였다. <그림 4>는 계산 대상물, <표 2>는 계산을 위한 시뮬레이션 조건을 제시한 것이다.

옥상녹화 및 토양피복의 변화에 따른 외부 열환경 변화를 살펴보기 위해 생태면적을

고려하여 산출된 비오름 유형화 결과값을 case 1로 가정하였고 case 2는 녹지면적의 70%로 확대, 연구대상지내 건물 상부 옥상녹화 100% 적용을 가정하였다.

그림 4 해석을 위한 모델링 구조 설정

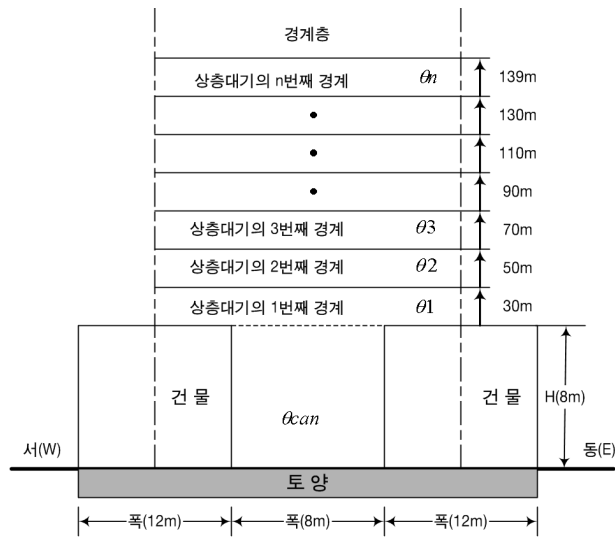


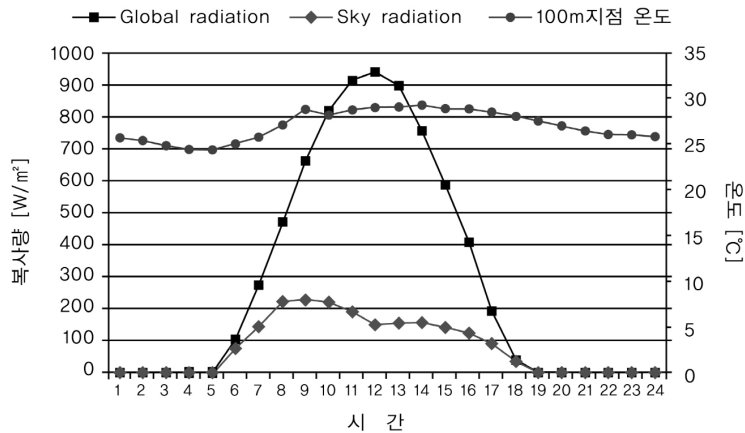
표 2 도시환경분석 시뮬레이션 조건

구 분	시뮬레이션 조건
건물높이	8m
바닥면적	396m ²
기준층 면적	96m ²
층수	2
1인당 거주면적	0.2m ²
공조면적비율	65%
내부 발열조건	사람 조명
	1인당 116W 20W/m ²
자연환기를 위한 공기요구량	1인당 30m ³ /h
내부 설정온도	26℃
공조 스케줄	Continuous
공조시스템의 COP	3
1.0m지점에서 토양온도	31.7℃

기상데이터는 서울지역 8월 평년값을 사용하였으며 청천일이 계속되고 기온의 일변화가 안정된 기간을 설정하였다. 일사량의 데이터는 수평면 직달일사량을 Udagawa *et al.*에 의한 직산 분리식을 이용하여 법선면 직달일사량과 수평면 확산일사량으로 분리하였다.

계산 대상기간의 태양고도와 태양방위각으로부터 산출한 도로공간의 일향률(ω : 직달일사량이 벽면에 입사하는 면적비)을 도로공간의 지표면, 동측 및 서측 벽면에 대해 각각 계산하고 그 결과를 <그림 5>에 나타내었다.

그림 5 경계조건



Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 생태면적을 고려한 단독주택지 비오톱 유형화

본 연구대상지의 비오톱 유형은 토양피복 유형을 토대로 분류하였으며 크게 건폐지와 비건폐지로 구분하였고 비건폐지는 다시 전면투수비오톱, 부분투수비오톱, 틈새투수비오톱, 불투수포장비오톱, 그리고 기타비오톱으로 구분하여 제시하였다.

비오톱의 유형화는 도시공간의 생태적 특성을 고려한 환경친화적 도시관리의 측면에서 유용하게 이용되고 있다(Freeman and buck, 2003; Löfvernhaff *et al.*, 2004). 비오톱 유형화는 주로 토지이용과 녹지율로 구분하고 있으나(Freeman, 1999; 김정호와 한봉호, 2006; 권전오, 2003), 토지이용별 정밀한 비오톱 유형화 구분에 대한 연구는 거의

이루어진 적이 없다. 이후 도시지역내 물순환 측면을 고려한 비오톱 유형화를 위해 불투수포장률, 생태면적률을 도시관리지표로 일부 이용하는 연구가 진행되어 왔으나, 비오톱 유형화에 생태면적률의 개념을 적용한 사례는 전무하였다. 특히 토양피복률을 등간격으로 구분하거나 분포빈도로 분류하고 있어(Berlekmap and Pranzas, 1986) 토양의 생태적 특성에 따른 구분이 이루어졌다고는 보기 어려웠다.

본 연구에서 분류한 토양피복을 고려한 비오톱 유형은 생태면적률에서 제시하고 있는 공간유형을 고려한 것으로 전면투수비오톱은 녹지, 나지, 수공간 등이며, 부분투수비오톱은 자연지반과 연속성을 가지며 공기와 물이 투과되는 포장면으로 50% 이상 식재면적을 가진 잔디블록, 식생블록 등이 이에 포함된다. 틈새투수비오톱은 포장재의 틈새를 통해 공기와 물이 투과되는 포장면을 가진 비오톱 유형으로 틈새를 시공한 바닥포장 즉, 대부분의 소형고압블록포장이 이에 포함된다.

연구대상지의 생태면적률 개념을 고려한 비오톱 유형별 면적 및 비율을 산정한 결과(표 3), 옥상녹화 미적용 건폐지비오톱이 48.16%로 가장 넓었으며 불투수비건폐포장지비오톱이 69,118㎡(38.75%)로 넓은 면적을 차지하고 있었다. 투수 가능한 비건폐포장지비오톱 유형은 세가지 유형으로 구분하였는데, 유형별 면적은 전면투수 2.51%(4,366㎡), 틈새투수 0.04%(77㎡), 불투수 3.26%(5,670㎡)이었다.

서울시 강동구 전체지역을 대상으로 생태면적률을 조사한 홍석환과 이경재(2008)는 생태면적률의 증가가 도시온도 변화와 정의 상관관계를 보인다고 제시하였는데, 즉 생태면적률 20%지역은 평균온도 약 25℃, 생태면적률 20~40%는 평균온도 약 24.3℃, 생태면적률 40% 이상은 23.5℃로 분석되는 결과를 도출하였다. 즉, 투수성 포장재료의 증가는 도시기온의 긍정적 효과에 큰 영향을 미치는 것으로 사료되었다.

표 3 생태면적을 고려한 비오톱 유형별 면적 및 비율

비오톱 유형	면적(㎡)	비율(%)
옥상녹화 미적용 건폐지비오톱	83,736	48.16
전면투수비건폐포장지비오톱	4,366	2.51
부분투수비건폐포장지비오톱	77	0.04
틈새투수비건폐포장지비오톱	5,670	3.26
불투수비건폐포장지비오톱	69,118	39.75
전면투수녹지비오톱	10,827	6.23
기타비오톱	92	0.05
합 계	173,886	100.00

2. 단독주택지 외부 열환경 특성 및 변화 예측

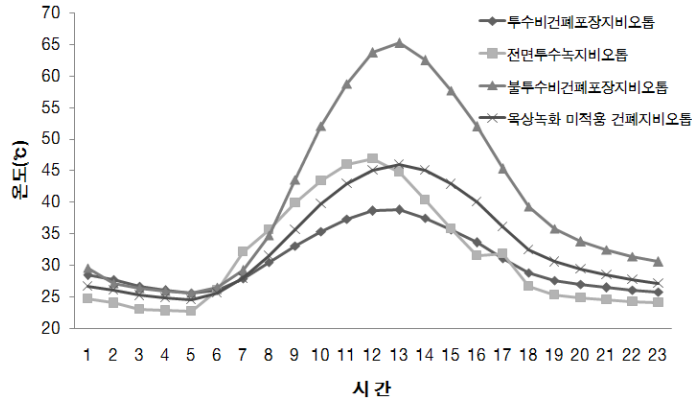
1) 부위별 지표면 온도 특성

연구대상지의 토지이용 패턴별 지표면 온도 특성을 예측하였다. 시뮬레이션 결과, 투수비건폐포장지비오톱의 온도분포 특성은 최대 38.82℃, 최소 25.65℃로서 평균 30.37℃였고 전면투수녹지비오톱은 최대 46.96℃, 최소 22.79℃로서 평균 31.13℃ 값을 보이고 있었다. 아스팔트 등의 불투수비건폐포장지비오톱은 다른 유형들보다 매우 높은 지표면 온도값을 보이고 있었는데, 최대 65.31℃, 최소 25.73℃로서 평균 40.03℃였다. 즉 녹지비오톱과 투수비건폐포장지비오톱보다 불투수비건폐포장지비오톱은 약 10℃ 정도 온도가 높은 것으로 예측되었는데, 이는 여름철 공동주택지 외부공간 실측과 시뮬레이션을 통한 온도비교차를 제시한 남중우(2008)의 연구결과와 동일한 경향이 있었다. 아울러 도로포장 재질이 토양이나 콘크리트보다도 아스팔트일 경우 지표면 온도가 높고 방출되는 에너지량도 매우 크다는 연구결과(Asaeda and Wake, 1996)와도 유사하였다.

일반적으로 포장표면온도를 저감시키기 위해서는 포장재료의 알베도와 열용량을 높이고 포장표면에서의 증발량을 높이는 방안이 가장 현실적이라고 제시한 류남형과 유병림(2006)의 연구결과처럼 도시지역내 녹지 이외의 포장재료는 투수성 포장재료를 사용하여 증발량을 높이는 방안이 최적의 방안이며, 木内와 小林祝明(1999)과 Asaeda and Ca(2000)는 열과 수분의 동시 이동을 고려한 시뮬레이션을 통해 투수성 포장재료가 도시기온 및 지표면 온도저감에 효과가 있음을 검증하였다.

연구대상지 생태면적을 고려한 비오톱 조사 결과, 옥상녹화 조성률은 0%였으며 현재 옥상면의 지표온도값은 최대 46.06℃, 최소 24.62℃로서 평균 32.93℃로서 녹지의 시간대별 온도분포 변화값과 유사하였지만, 녹지는 오전 7시부터 온도가 상승하기 시작하여 12시를 정점으로 온도가 낮아지고 있는 반면, 옥상녹화가 되어 있지 않은 건물 상부의 경우 13시에 최대값을 보이면서 오후시간대에 완만하게 온도가 낮아지고 있어 도시 열환경을 악화시키는 주요 요인으로 작용함을 알 수 있다.

그림 6 비오름 유형을 고려한 토지이용 유형별 시간대별 온도 분포

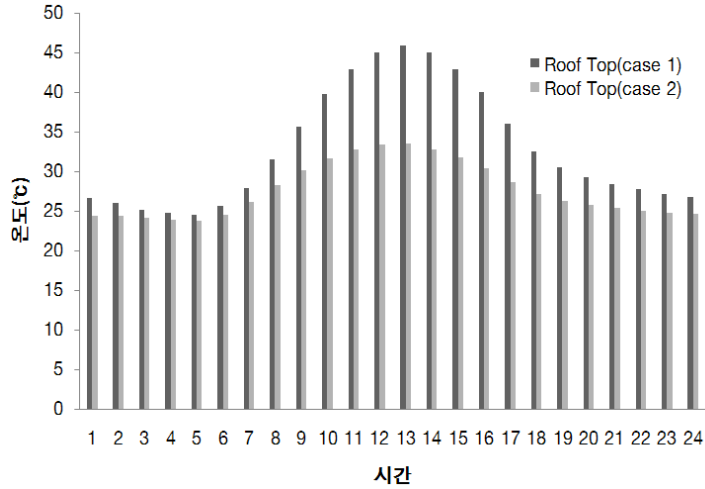


본 연구에서는 대부분 2층으로 구성된 단독주택지 상부 옥상녹화에 의한 외부 온도 저감 효과를 검증하기 위하여 비오름 유형화에서 분석된 건폐지 83,736m²를 전체 옥상 녹화했을 경우를 가정하였다. case 2는 옥상녹화뿐 아니라 녹지율 증가를 함께 고려하였지만, 이 중 옥상녹화에 의한 지표면온도값 변화를 살펴보기 위해 우선 옥상녹화 적용과 미적용에 대해서만 우선 예측하였다.

현 건축물 옥상녹화율 0%를 옥상녹화 100% 적용으로 설정하여 옥상면 표면온도를 예측한 것이 <그림 7>이다. 건폐지 옥상녹화를 100% 적용한 경우 하루 중 최대 온도값은 33.58℃, 최소 온도값은 23.85℃로서 평균 온도값 27.74℃였다. 이는 녹화 전보다 평균 5.19℃ 온도가 낮아진 것으로 예측된 결과값으로서 단독주택지내 녹지 83,736m² 추가 확보 시 지표면 온도를 5.19℃ 낮출 수 있는 효과로 이해할 수 있다. 이는 일본 도쿄를 대상으로 도쿄 전체지역의 옥상녹화를 했을 경우 도심온도 자체의 온도가 약 1.4℃에서 5.6℃까지 낮아질 수 있다는 연구결과와도 유사하였다(최윤희, 2005).

본 시뮬레이션을 통해 분석대상 건축물 상부 전체를 옥상녹화 시 적용 전보다 지표면 온도가 약 5℃ 낮아지는 환경 개선 효과를 예측할 수 있었는데, 옥상녹화는 지표면 온도저감뿐 아니라 외기 온도저감, 다양한 야생조류 및 곤충류 유입 등의 효과, 에너지 절감효과(박필원, 2009) 등이 있으므로 옥상녹화에 의한 단독주택지의 도시환경 개선 효과는 매우 클 것으로 예측되었다.

그림 7 옥상녹화 조성 전(0%)과 조성 후(100%)의 옥상 표면 온도값 변화 예측



2) 외기온도 변화

본 시뮬레이션에서는 연구대상면적 173,886㎡ 중 현재의 비오뜰 유형 결과를 고려하여 case 1을 투수포장면적률 12%, 녹지율 13%, 건폐지를 포함한 불투수포장면적률 75%로 설정하였고 녹지 및 토양피복의 변화 시 도시환경 변화를 예측하기 위해 case 2는 투수포장면적률 12%, 녹지율 75%, 건폐지를 포함한 불투수포장면적률 13%로 가정하였다.

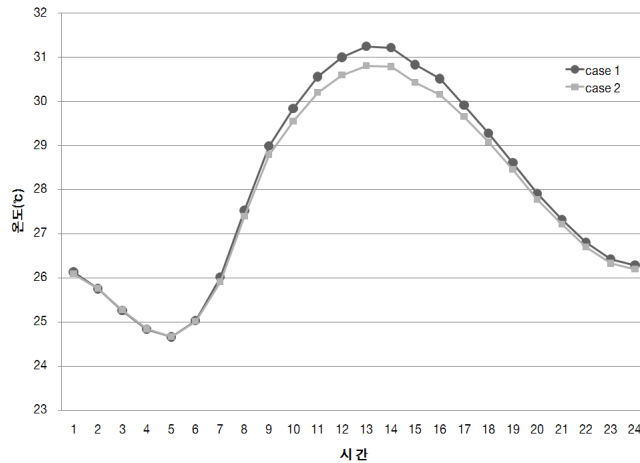
case별 연구대상지의 외기온도 변화를 예측한 것이 <그림 8>이다. 온도분포곡선은 새벽 5시에 case 1과 case 2는 최소값인 24.66℃였고 이후 점차 온도가 증가하여 13시에 case 1은 31.24℃, case 2는 30.81℃였다. 최고점 대비 case 1과 case 2의 온도차이는 0.43℃였고 하루 평균 온도값은 case 1은 28℃, case 2는 27.82℃로서 0.18℃의 온도차이를 보이고 있었다. 특히 하루 중 축열이 가장 높은 12시부터 15시까지는 평균온도의 경우 case 1은 31.07℃, case 2는 30.65℃로 0.42℃ 낮았다. 즉 불투수포장면적 107,809.32㎡를 녹지로 변환 시 도시 외기온도는 평균 0.18℃를 낮출 수 있고, 축열이 가장 심한 12시부터 15시까지는 0.42℃ 저감할 수 있는 것으로 예측되었다.

도시의 온도 즉 기후는 에너지와 밀접한 관련이 있다. 특히 여름철에 기온이 상승하면 에너지의 소비량이 증가하는 것은 당연한 일이며, 이 에너지의 대부분이 에어컨 등에 의한 것이다. 또한 에너지 소비가 늘어난다는 것은 화석연료 사용 증가를 의미한다.

도시지역에서 0.6℃ 이상 온도가 올라갈 때마다 냉방소비전력이 1.5~2% 상승한다(남중우, 2008)는 연구결과를 고려할 때, 녹지의 추가확보를 통해 온도저감뿐 아니라 연간 냉방소비전력의 0.45~0.6%를 저감할 수 있을 것으로 예측되었다.

도시의 지표재료별 지온 및 기온차이를 연구한 이은엽 등(1996)은 녹지면적이 10% 증가하면 평균최고기온은 0.9℃, 평균최저지온은 2.3℃ 감소하는 것으로 보고하고 있으나, 본 연구에서는 녹지율을 기존보다 62% 증가 시 평균 0.18℃(최고 0.43℃)가 공기 온도 저감값으로 예측되었는데, 이는 기존 연구는 건축물에서 발생하는 에너지를 고려하지 않고 단순히 녹지면적만을 대상으로 온도값을 예측한 것이고 본 연구에서는 건축물의 축열, 발열 등을 고려한 값이므로 온도 변화값은 기존 연구결과보다 낮게 예측되었다. 향후에도 건축물에 의한 열수지를 반영하여 외부온도를 예측해야 정확한 값을 제시할 수 있을 것이다.

그림 8 옥상녹화 및 토지피복 변화에 따른 온도 변화 예측



시뮬레이션과 실측을 통해 예측한 일본 도쿄도 녹화율 변화에 따른 연구에서도 전체 면적대비 녹지율을 약 50% 증가 시 0.11℃의 기온저감효과가 있다는 보고(山田, 1992)와 비교해 볼 때, 본 연구의 외부온도 저감값과 유사하였다. 이는 일반적으로 녹지가 풍부한 교외지역보다 하드스케이프(Hardscape)가 우점하는 도시지역에서는 일정 수준 이상의 녹지면적 증대에 따라 도시기온저감효과가 현저할 수 있다(조현길과 안원태, 2006; 조성모 등, 2009)는 이론과도 일치함을 알 수 있다. 즉, 도심지 단독주택지의

온도 저감을 위해서는 녹지의 면적 증대가 반드시 선행되어야 함을 알 수 있다. 아울러 녹지의 면적증대뿐 아니라 다층구조로 하여 수목의 체적을 나타내는 녹적량의 증가 시 상대습도의 변화(윤용한, 2003)로 인해 온도저감률은 더 높을 것으로 판단되었다. 본 시뮬레이션은 녹적량(수목의 체적)의 변화에 따른 온도값 변화는 산정이 불가능하여 녹지의 면적 변화에 대해서만 예측하였으므로 추후 수목 체적을 고려할 수 있는 CFD 시뮬레이션 등과 연계하여야 할 것이다.

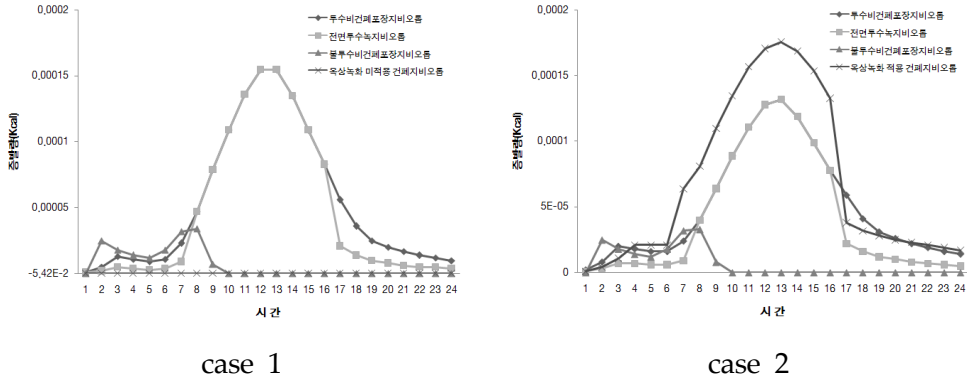
3) 증발량

일본의 도시화와 열섬현상 연구에서 겨울철과 여름철 모두 지표면의 물증발에 수반되는 잠열(潛熱)의 이동과 난류열의 교환이 지표면 열수지에서 가장 중요한 역할을 하고 있다고 밝혔다. 이들의 증발면적, 거칠기 길이 변화가 지표면 열수지에 주는 효과가 가장 큼을 수치모델결과에 근거하여 지적하였다. 그 중에서도 지표면 고도에서의 도시 열섬현상의 주요 원인은 증발잠열의 감소라고 하였다. 따라서 도시기후의 완화를 위해서는 도시에 산림, 초지, 공원, 하천, 호수 등의 증발면적을 적극적으로 확보해야 한다 (한국환경과학회, 2009).

춘천시의 토지이용 및 식재수종에 의한 증발량을 연구한 조현길과 안원태(1999)는 양버즘이나 단풍나무 한 그루의 8월 하루 증산량이 약 5,100kcal/h(15평형)로 냉방능력을 가진 냉방기 2대를 약 13시간 가동하는 것과 같은 효과를 준다고 하였다. 이런 결과를 바탕으로 춘천시의 경우 도시지역 내 수목피도 10% 증가는 여름철 온도를 0.5~1℃ 감소시킴을 증명하였다.

<그림 9>는 case 1과 case 2의 단독주택지역 부위별 증발량이다. 외기온도 변화에 영향을 미치는 부위별 증발량 변화와 증발량 예측을 통해 녹지 조성 우선순위를 파악하고자 하였다. 부위별 증발량은 도시 기온의 변화와 상관성이 크며 case 1의 경우 나지와 녹지지역의 증발량이 높았고 시간대별로는 7시부터 증발량이 증가하여 12시와 13시까지가 증발량이 가장 높았다. case 2의 경우 옥상녹화면적의 증대, 녹피율의 증대에 따라 case 1과는 다른 분포곡선을 나타내었는데, 증발량은 옥상녹화를 실시한 건폐지가 가장 높았다. 녹지지역, 토양지역, 불투수포장지역은 case 1과 동일한 경향이였다. 이는 건축물 상부의 녹화가 도시열섬 완화의 가장 중요한 요인임을 알 수 있다. 향후 단독주택지뿐 아니라 도심지내 녹지의 확보 시 옥상녹화를 가장 먼저 시행하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

그림 9 부위별 증발산량 변화 추이



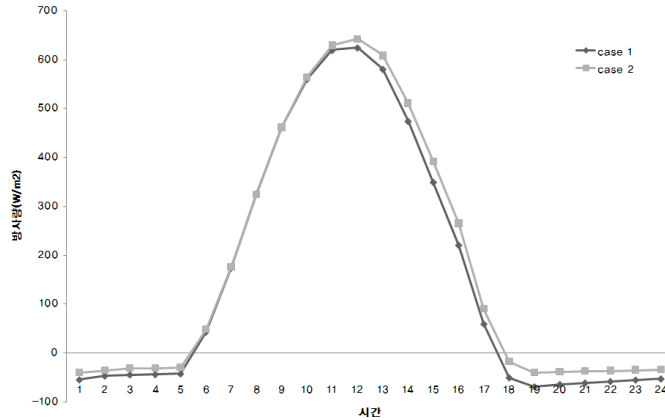
4) 방사량

<그림 10>은 연구대상지인 단독주택지역의 방사량의 시간대별 추이와 변화를 제시한 것이다. 일반적으로 수목은 일사를 차폐하면서 2차적인 방사도 적기 때문에 건물의 일사 차폐용으로 이용된다(최원기, 2005). 그러나 수목 등이 위치한 녹지의 표면에 의한 방사는 색깔에 의해 좌우되기 때문에 건물 및 포장면의 색채보다 밝은 경우 더 높은 방사량을 보일 수 있다.

대상지의 경우에도 case 1과 case 2를 비교한 결과, 녹지의 면적을 증가시킬 경우 기존의 아스팔트 등이 녹지로 변화하였기 때문에 대상지 전체 방사량의 추이가 다소 증가하였다. 즉, case 1의 경우 최대방사량 $613W/m^2$, 최소방사량 $-66.97W/m^2$, 평균방사량 $158.17W/m^2$ 이었고 case 2의 경우에는 최대방사량 $619.16W/m^2$, 최소방사량 $-41.18W/m^2$, 평균방사량 $172.07W/m^2$ 로서 case 1보다 높았다. 시간대별 방사량 추이를 살펴보면, 새벽 5시까지의 방사량이 음의 값을 보이다가 6시 이후 점차 방사량이 증가하여 12시경에 최대 방사값을 보이면서 이후 점차 감소하는 추세이었다.

도시에서는 지표면이나 건축물이 대부분 아스팔트, 콘크리트, 벽돌 등으로 이루어져 있고 이런 표면들은 반사율이 낮아 태양에너지를 일부 반사하는 대신에 일부는 흡수·저장하며, 이로 인해 도시는 주변의 외곽보다 온도가 높아지므로(한국환경과학회, 2009) 녹지와 같은 밝은색의 마감재를 사용하는 것이 도시열섬을 완화시키는 데 도움이 되므로 녹지의 조성뿐 아니라 마감재 선정 시 방사량이 높은 마감재로 변환해야 할 것이다.

그림 10 시간대별 방사량 변화 추이



IV. 결 론

본 연구는 서울특별시 강남구 일원동 일원의 단독주택지역을 대상으로 생태면적률 개념을 적용한 바이오톱 유형화와 도시 열환경 예측 시뮬레이션을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 생태면적률 개념을 적용하여 바이오톱 유형 분류 결과 총 7개 유형으로 구분되었으며 옥상녹화 미적용 건폐지바이오톱이 48.16% > 불투수비건폐포장지바이오톱 39.75% > 전면투수녹지바이오톱 6.23% > 틈새투수비건폐포장지바이오톱 3.26% > 전면투수비건폐포장지바이오톱 2.51% > 부분투수비건폐포장지바이오톱 0.04% 순이었다.
2. 단독주택지 외부 열환경 특성 및 변화 예측을 위해 분석한 부위별 지표면 온도특성의 경우 투수포장지바이오톱은 최대 38.82℃, 최소 25.65℃, 평균 30.37℃, 전면투수녹지바이오톱은 최대 46.96℃, 최소 22.79℃이었으며 평균 31.13℃, 불투수비건폐포장지는 최대 65.31℃, 최소 25.73℃, 평균 40.03℃로서 매우 높은 온도값으로 분석되었다. 옥상녹화미적용건폐지바이오톱은 최대 46.06℃, 최소 24.62℃로서 평균 32.93℃이었다. 즉, 바이오톱 유형별 지표면 온도값은 불투수비건폐포장지바이오톱 > 옥상녹화미적용건폐지바이오톱 > 전면투수녹지바이오톱 > 투수포장지바이오톱이 순이었다.

3. 옥상녹화미적용건폐지비오톱을 전체 녹화 시(100% 적용) 최대 온도값 33.58℃, 최소 온도값 23.85℃, 평균 온도값 27.74℃로서 건폐지 옥상녹화 전(0%)에 비해 표면 온도값이 약 5.19℃ 감소한 것으로 예측되었다.
4. case 1과 case 2의 공기온도 변화를 비교 예측한 결과, 최고온도값은 case 1이 31.24℃, case 2가 30.81℃로서 최고점 대비 약 0.43℃의 온도차이가, 평균온도값은 case 1이 28.00℃, case 2가 27.82℃로서 약 0.18℃의 온도차이가 발생하는 것으로 예측되었다. 이는 기존 연구결과와 미루어 볼 때 녹지율의 증가에 따른 온도저감률이 다소 낮은 것을 알 수 있는데, 본 시뮬레이션에서는 건축물의 공조에 따른 열수지가 반영되었기 때문으로 건축물의 열수지를 반영하지 않고 단순 녹지 변화에 따른 온도 변화 예측값보다는 더 정확한 온도 변화 예측이 가능하였다.
5. 증발량 변화 예측은 case 1과 case 2가 유사한 경향을 보이고 있었으나, 옥상녹화가 적용된 건폐지비오톱의 증발량이 매우 증가한 것으로 예측되었으므로 향후 도시환경 개선 시 옥상녹화를 선행해야 될 것으로 판단되었다.
6. 방사량 변화의 경우 녹지가 적용된 case 2가 case 1보다 평균 172.07W/m² 높게 나타나므로 향후 녹지의 증대 및 방사량값이 높은 마감재 적용을 통해 도시 온도저감 및 열섬완화를 구현해야 할 것이다.

본 연구는 기 검증된 도시 캐노피 모델인 AUSSSM을 활용하여 서울과 같은 대도시심의 단독주택지의 토양 패턴 변화에 대한 정량화 및 예측결과를 제시한 논문으로 그 의의는 있지만 단일 시뮬레이션 모델을 활용한 결과값만을 제시한 연구의 한계가 있으므로 향후 실측과 다양한 검증작업을 통해 보완연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- 고은아. 2010. 「Envi-met에 의한 바람길 해석 및 건물배치 계획」. 한밭대학교 대학원 박사학위논문, p.74.
- 권전오. 2003. 「환경친화적 택지개발계획 수립을 위한 환경생태평가기법 활용에 관한 연구」. 서울시립대학교 대학원 박사학위논문, p.84.
- 김상욱, 여인애, 한경민, 이정재, 윤성환. 2009. “토지피복 변화가 도시열수지에 미치는 영향에 관한 수치 시뮬레이션”. 『한국태양에너지학회 학술대회발표논문집』 29(1): 176-179.
- 김상진, 서승직. 2002. “Mellor-Yamada 모델을 이용한 도시기후의 수치해석”. 『대한건축학회논문집』 18(10): 251-258.
- 김정호, 한봉호. 2006. “도시생태계 구조를 고려한 비오톱 유형 구분”. 『한국조경학회지』 34(2): 1-17.
- 김주수, 박화란, 박병용, 김태연, 승복. 2010. “하절기 아파트단지의 열환경 실측과 CFD를 이용한 해석방법 검증에 관한 연구”. 『대한건축학회지』 26(5): 335-342.
- 김태연, 김정태, 노지웅. 2000. “간이 대류 · 복사 · 열관류 연성 시뮬레이션에 의한 대류 열전달량 해석”. 『대한건축학회지』 18(1): 469-474.
- 남중우. 2008. 「친환경 단지 실측 및 CFD시뮬레이션 검증을 통한 아파트 단지내 열환경 개선방안」. 연세대학교 대학원 석사학위논문, p.63.
- 류남형, 유병림. 2006. “투 · 보수성 시멘트 콘크리트 포장의 열물성 및 수분보유 특성이 표면온도에 미치는 영향”. 『한국조경학회지』 31(4): 21-36.
- 박주문. 1995. “도시화의 특징과 불평등도 분석”. 『한국인구학회지』 18(2): 98-114.
- 박필원. 2009. 「공동주택 외부공간의 지표면 특성이 단지내 열환경에 미치는 영향」. 성균관대학교 대학원 석사학위논문, p.82.
- 서울특별시. 2000. 「도시생태 개념의 도시계획에의 적용을 위한 서울시 비오톱 현황조사 및 생태도시 수립 지침」.
- 서응철. 2007. “도시열섬 완화를 위한 제도 개선”. 『한국생태환경건축학회지』 7(2): 17-23.
- 손원득, 이성. 2004a. “도심지의 온열성상에 관한 연구 -도심지 온열환경 예측모델을 위한 실측조사-”. 『대한설비공학회』 16(10): 984-989.
- 손원득, 이성. 2004b. “도심지의 온열성상에 관한 연구 -공조배열량의 감소에 따른 도심지 온열환경의 변화-”. 『대한설비공학회』 16(12): 1190-1196.

- 손원득, 박정환, 박경순. 2009. “신재생에너지 적용이 도시열섬방지에 미치는 기여도 분석”. 『대한설비공학회 학술대회발표논문집』 508-513.
- 윤성환, 김성하. 2008. “부산시 해운대구의 하기 도시 고온화 현상과 토지피복 구성과의 상관관계”. 『한국태양에너지학회』 28(2): 19-27.
- 윤용한. 2003. “수립의 계층구조가 녹지내의 기온 및 습도에 미치는 영향”. 『한국환경생물학회지』 21(2): 120-125.
- 윤용한, 배병호, 김원태, 박봉주, 조성모, 조현수. 2007. “토지이용형태가 도시열섬현상에 미치는 영향 -충주시를 사례로-”. 『한국환경과학회지』 16(9): 1063-1069.
- 이무춘. 1996. “도시에서의 비오톱조사에 관한 기초 연구”. 『대한국토도시계획학회지』 31(6): 197-211.
- 이은엽, 문석기, 심상렬. 1996. “도시녹지의 기온 및 지온 완화효과에 관한 연구”. 『한국조경학회지』 24(1): 65-78.
- 조성모, 윤용한, 류을렬, 박봉주, 김원태. 2009. “도시내 용도지역의 토지피복형태가 열섬 현상에 미치는 영향”. 『한국환경과학회지』 18(2): 169-176.
- 조현길, 안원태. 1999. “도시녹지에 의한 미기후 개선의 기능”. 『한국조경학회지』 27(4): 23-28.
- 조현길, 안원태. 2006. “도시수목식재와 미기후 개선의 상관성 규명”. 『한국조경학회지』 34(5): 70-75.
- 최원기. 2005. 『자연에너지의 효과적인 이용을 위한 독립된 외부 음영장치의 응용』. 인하대학교 박사학위논문, p.233.
- 한국환경과학회. 2009. 『그린조경학』. 문운당. p.212.
- 환경부. 1996. 『생태도시 조성기본계획 수립을 위한 연구』.
- 홍석환, 이경재. 2008. “시가화지역 생태적 유형구분을 위한 관련지표 특성 연구 -서울시 강동구를 사례로-”. 『한국조경학회지』 36(2): 24-31.
- 吉田伸治, 大岡龍三, 持田燈, 富永偵秀, 村上周二. 2000. “樹木モデルを組み込んだ対流・放射・濕氣 輸連成解析にとる樹木の屋外熱環境緩和効果の検討”. 『日本建築學會計劃系』 536: 87-94.
- 谷本潤, 林徹夫, 片山忠久, 大濱淳司, 笠間幹雄. 1998. “建築-都市-土壤連成系モデルによる都市高温度要因の定量的比較に関する研究第1報理論構成手法と基本解”. 『日本建築學會計劃系』 504: 87-93.
- 木内, 小林祝明. 1999. “快適な都市環境創造のための舗装の高温度化制策に関する検討”. 『土木學會論文集』 622(VII-11): 23-33.

- 山田 朋重. 1992. 「ベランダ原藝・室内原藝」. 學習研究社.
- 尹聖皖, 足永靖信. 2004. “地方沿岸都市における緑化による夏季熱環境緩和効果に関する数値シミュによる夏季熱環境緩和効果に関する数値シミュレーション-逗子市におけるケーススタディ-”. 「日本建築學會計劃系」 Vol. 577.
- 村上周上. 1997. “關東地方における土地利用状況の変化と流れ場・溫度場の關係Mellor-Yamada型の都市氣候モデルによる局地氣象解析”. 「日本建築學會計劃系」 491: 31-39.
- Asaeda T, A. and Wake. 1996. “Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere”. *Atmosphere environment*, 30(3): 413-427.
- Asaeda, T. and V.T. Ca. 2000. “Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment”. *Building and Environment*, 35: 363-375.
- Aya Hagishima, Jun Tanimoto, Tadahisa Katayama and Kenji Ohara. 2001. “An Organic Analysis for Quantitative Estimation of Heat Island by the Revised Architecture-Urban-Soil-Simultaneous Simulation Model, AUSSSM-Part.1 theoretical Frame of the Model and Results of Standard Solution”. *Journal of SHASEJ*, 12(5): 1051-1057.
- Berlekamp, L. R. and N. Pranzas. 1986. “Methode zur Erfassung der Bondenversiegelung von städtischen Wohngebieten”. *Natur und Landschaft*, 61(3): 92-95.
- Freeman, C. and O. Buck. 2003. “Development of an ecological mapping methodology for urban areas in New Zealand”. *Landscape and Urban Planning*, 40: 21-30.
- Freeman, C. 1999. “Geographic information systems and the conservation of urban biodiversity”. *Urban Policy Res*, 17(1): 51-61.
- Löfvernhaft, K., S. Runborg and P. Sjögren-Gulve. 2004. “Biotope patterns and amphibian distribution as assessment tools in urban landscape planning”. *Landscape and Urban Planning*, 68: 403-427.