

공간 구조별 열쾌적성 평가와 열환경 개선방안[†]

이정아* · 정대영* · 전진형** · 이상문*** · 송영배***

*고려대학교 대학원 · **고려대학교 환경생태공학부 · ***협성대학교 도시공학과

An Evaluation of Human Thermal Comfort and Improvement of Thermal Environment by Spatial Structure

Lee, Jung-A* · Jung, Dae-Young* · Chon, Jin-Hyung** · Lee, Sang-Moon*** · Song, Young-Bae***

**Graduate School, Korea University

**Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

***Dept. of Urban Planning and Engineering, Hyupsung University

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate human thermal comfort by spatial structure and to explore solutions to improve the thermal environment of a small urban space. The study site was Korea University campus. Thermal conditions were measured to evaluate the quality of the thermal environment in each type of space within the study site. Micrometeorology measurements, analysis of space characteristics for using fish-eye lens photography, and thermal comfort modeling through the use of collected meteorological data, such as temperature and humidity, were performed.

Results showed that the level of thermal comfort for humans differs depending on the types of space within the study site. Thermal comfort is better in open spaces than enclosed in the aspect of radiative mean temperature, Predicted Mean Vote(PMV), and Physiologically Equivalent Temperature(PET). This fact is probably due to shadows or buildings or trees that may block solar radiation. Thus, it is necessary to consider the spatial arrangements of buildings and trees to enhance openness and ventilation in the space. Paving materials and exterior building materials should also be selected to lower the radiant temperature.

Given these results, a quantitative evaluation on human thermal comfort could propose a way to plan user comfortable small urban spaces. Study methods used and results provided in the study can promote a better way for urban space planning direction to improve environmental quality.

Key Words: Thermal Comfort Modeling, Openness, Ventilation, Radiant Temperature, Types of Campus Space

국문초록

본 연구는 도시 소공간의 열환경을 개선하기 위한 방안을 모색하고자 공간 구조별 열특성을 평가하여 분석하였다. 도심 내 위치한 고려대학교 캠퍼스를 연구 대상으로 선정하였으며, 대상지 내에 공간 유형을 대표하는 각각의 장소에서

[†]: 본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원(과제번호: PJ00742606)의 지원으로 작성되었습니다.

Corresponding author: Jin-Hyung Chon, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, College of Life Sciences, Korea University, Seoul 136-713, Korea, Tel.: +82-2-3290-3048, E-mail: jchon@korea.ac.kr

열환경을 조사하였다. 기상장비를 활용한 미기상 및 바이오 기상 측정, 어안렌즈 촬영사진(Fish-eye lens photography)를 활용한 공간구조 및 특성 분석, 그리고 온도나 습도와 같은 기상정보 및 이미지 정보를 활용한 열쾌적성 모델링의 순서로 공간의 열환경 및 인체 열쾌적성을 분석하였다.

열환경 평가 결과, 인체 열쾌적성의 정도는 캠퍼스 공간의 유형에 따라 차이가 나타났다. 건물이나 수목 등에 의해 위요된 폐쇄형 공간 유형에서 개방형 공간 유형에서 분석된 평균 복사온도, PMV, PET 지수보다 더 양호한 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 수목과 건물에 의한 태양복사열의 차단 및 그림자의 영향을 받기 때문이라고 할 수 있다. 그러므로 공간을 계획할 때 개방성이나 통풍성을 높이기 위한 수목의 배치를 고려하고 복사열을 차단할 수 있는 바닥포장이나 건물 외장재 종류를 선택할 필요가 있다.

본 연구는 도시 공간의 이용자가 실제적으로 느끼는 열쾌적성의 정도를 정량화하고 이를 평가함으로써 이용자를 고려한 공간계획 방안을 제안하였다. 인체 열쾌적성을 평가하는 정량적 평가 방법 및 그에 따른 연구결과는 향후 도시 공간의 쾌적한 환경을 조성하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: 열쾌적성 모델링, 개방성, 통풍성, 복사열, 캠퍼스 공간 유형

1. 서론

1. 연구 배경 및 목적

현대 도시는 도시 집중화와 과도한 도시 개발로 인하여 기온이 상승함에 따라 여름철 열대야와 폭염 현상 등과 같은 도시 미기후의 변화가 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 도시민의 쾌적한 환경에 대한 요구를 증대시키고 있으며, 도시의 공간 계획과정에서 열적으로 쾌적한 공간을 조성하기 위한 노력이 필요함을 부각시키고 있다. 도시 공간의 쾌적성을 높이기 위한 방안의 하나인 열환경을 개선하기 위한 노력은 도시민의 생활 환경의 질을 향상시키는데 매우 중요한 역할을 한다. 공간의 열환경은 온도뿐만 아니라 바람, 습도 등 인간의 감각과 행동에 영향을 미치는 여러 가지 인자들에 의해 형성된다(이은주, 2006). 주로 토지 이용의 형태, 건물의 높이, 건폐율, 토지 피복요소, 녹지, 하천 등이 공간의 열환경을 형성하는 주요 인자로 인식되고 있으며, 특히 도시 지역의 열환경은 토지이용 현황, 지형, 녹지 등의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다(오규식과 홍재주, 2005). 지금까지 도시 옥외 공간의 열환경에 관한 연구는 주로 도시 기후에 미치는 영향 인자에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 옥외 공간의 열환경 개선의 필요성을 부각시켜 바람길 조성 및 녹지 확충 등 개선 방안을 제안하는 정성적인 측면에서 주로 접근하고 있다(조현길과 안태원, 2006, 2009; 김학열과 김운수, 2003; 박인환 등, 2000; 송영배, 2007). 그러나 도시 공간의 열환경을 정량적으로 측정하여 평가하고, 에너지 절감이나 도시 내 환경 문제의 근원이 되는 CO₂를 감소시키기 위한 실제적인 방안에 관한 연구들은 부족한 실정이다.

일반적으로 도시 공간의 열환경을 평가하기 위해서는 증발

산에 의한 잠열, 대기를 가열하는 현열, 그리고 표면 재료의 저장열 등을 측정하여 바람과 습도 등 미기후를 형성하는 인자들과의 상호 관계성을 파악하여야 한다(Lee, 1993; Givoni, 1998; 조현길과 안태원, 2009). 공간 구조와 구성요소의 물리적 특성 상 교외나 농촌지역에 비해 인공열 발생이 많은 도시에는 잠열이 적어 현열과 저장열이 많은 특징을 보이는데, 이는 도시의 건물이나 포장 도로에 의한 열축적 및 장파 방사에 의한 폐열이 대기에 남아 있기 때문에 나타나는 결과라 할 수 있다(조현길과 안태원, 2009). 따라서, 도시 내 열쾌적성을 높이기 위해서는 폐열을 축소화 시키기 위한 노력이 필요하며, 동시에 도시녹지의 증발산 기능을 상대적으로 활성화시키고, 건물과 포장도로의 열축적을 최소화시키는 방안에 대한 고려가 필요하다. 이와 관련한 기존의 선행연구를 살펴보면, 몇몇 연구자들은 다양한 도시 공간에서의 토지 피복 형태와 기온의 관련성을 분석하여 녹지대를 이용한 일사 차폐 및 증발산 작용으로 인한 기온 저감 방안을 제안하기도 하였다(윤용환 등, 2008). 또한, 도시의 열환경의 변화는 건물의 층고, 건폐율 등에 의한 잠열 및외장재에 따른 표면 온도에 영향관계가 있다는 것을 밝히기 위하여 열환경을 측정하고, 공간 열특성을 파악하는 연구들이 진행되었다(여인에 등, 2009; 박사근 등, 2006; 송영배, 2007). 공간의 열특성을 정량적으로 접근하여 파악하기 위해서는 주로 기상관측장치를 이용한 온도, 바람, 습도의 측정과 적외선 복사온도계를 이용한 지표면의 온도를 측정하는 방법이 주로 이용되며, 건물의 표면 온도와 옥외 복사열 환경을 측정하기 위한적외선 카메라의 촬영이 열환경을 평가하고 예측하는 방법으로 사용되기도 한다(윤성환과 정선영, 2009; 조현길과 안태원, 2009). 그러나 이러한 방법은 공간의 물리적인 특성을 고려한 것에 불과하며, 인간의 감각과 행동에 영향을 주는 열환경 인자들과의 상호 연관성을 간과한 것이라 할 수 있다. 인체

와 환경조건 사이에 열손실과 열발생의 균형을 통해 인체의 온도를 유지할 수 있기 때문에 주변 열환경의 인자뿐만 아니라 공간에 존재하는 인간의 심리적, 생리적 인자를 동시에 고려해야만 인간의 열쾌적성 문제를 해결할 수 있다(주창훈, 2008). 또한, 열특성 평가 결과에 따라 쾌적한 도시 환경을 위한 도시 공간 계획 방안을 제안하기 위해서는 공간 구조의 특성을 함께 고려한 열환경 측정 및 평가 방안이 제안될 필요가 있다.

본 연구의 목적은 인체에 미치는 열쾌적성을 파악하여 공간 특성에 따른 열환경을 분석하고, 이를 바탕으로 도시 외부공간의 열환경을 개선하기 위한 방안을 제안하는 것이다. 도시 공간의 열환경을 객관적으로 측정하고, 평가·분석하기 위하여 바이오 기상 관측 및 천공사진 촬영을 수행하였다. 천공사진을 촬영하기 위해 사용한 어안렌즈는 주로 도시 경관의 구성 요소, 면적 및 출현율을 바탕으로 경관의 유형화를 통해 정량적으로 경관 평가를 수행하기 위해 사용하는 방법으로(한갑수 등, 2005), 경관분석뿐만 아니라 기상관측과 결부하여 공간의 열쾌적성을 평가하는 데에도 사용이 가능한 방법이다.

도시 환경에서 공간 구조별 열쾌적성 분석을 수행하기 위하여 서울 도심 내 위치한 대학 캠퍼스를 대상으로 공간 유형을 분류하고, 각 공간별 미기상 측정 및 공간 개방도(Sky View Factor: SVF)를 산출하였다. 측정된 결과는 열쾌적성 모델을 통해 열쾌적도(Predicted Mean Vote: PMV)와 생리적 등가 온도(Physiologically Equivalent Temperature: PET) 값을 산출하는 데 활용하였으며, 이를 바탕으로 공간구조에 따른 열쾌적성의 차이를 검증하고 결과를 토대로 생태적 공간계획 방안을 고려하여 보았다.

II. 연구내용 및 방법

1. 연구범위

1) 공간적 범위

본 연구는 도심 내 위치한 고려대학교 인문계 캠퍼스를 대상으로 캠퍼스 공간구조에 따른 인체 열쾌적성을 평가하였다. 21.35km²의 면적을 가진 고려대학교 인문계 캠퍼스는 주변의 개운산을 비롯한 도시 내 생태적 공간을 도심으로 연결하는 그린 네트워크의 거점 역할을 수행하며, 캠퍼스 건물과 조화를 이루는 녹지 공간의 배치로 주변의 고밀의 주거 및 상업지역의 열쾌적성을 개선하는데 기여하고 있다.

2) 내용적 범위

캠퍼스 공간구조에 따른 열쾌적성 평가는 다음과 같이 3가지의 단계로 구분하여 수행하였다. 첫째, 기상장비를 활용한 캠퍼스의 미기상 및 바이오 기상 측정, 둘째, 현장조사 및 도면을

활용한 캠퍼스 공간 구조 및 특성 분석, 셋째, 기상정보 및 이미지 정보를 활용한 열쾌적성 모델링하고, 그 결과를 분석하여 평가하였다.

2. 연구방법

1) 기상환경 측정

연구 대상지에서 인체 열쾌적성에 영향을 미치는 바이오 기상과 연구대상지의 전반적인 기후특성을 파악하기 위해 각각 지상 2m와 10m에 고정기상관측장치를 설치하였다. 고정기상관측은 Vantage Pro II 모델 AWS(Davis Inc., 2009)를 이용하여 온도, 습도, 기압, 자외선량, 일사량, 강우량, 풍향, 풍속을 측정하였다. 고정기상관측 지점은 외부요인에 대한 영향을 최소화하기 위하여 2m 지점으로 주변이 수고 10~15m의 혼합림이 존재하는 중앙광장에 설치하였으며, 10m 지점으로 옥상정원이 조성된 지상 5층의 법학 신관 옥상에 설치하였다.

또한, 캠퍼스 공간구조에 따른 기상요소와 미세규모의 환경 변화 차이를 분석하기 위하여 2009년 7월에 이동기상관측을 수행하였다.

캠퍼스 공간구조를 고려하여 20개의 이동기상관측 지점을 선정하고, 일출 후 기온의 변화가 발생하기 시작하는 오전 7시부터 일몰 후 지면이 냉각되는 오후 9시까지 2시간 간격으로 8회 이동기상관측을 수행하였으며, 측정장비는 직접 착용하였으며, 지상 2m에서 측정하였다. 1회 이동관측에 소요되는 시간은 시간변화에 따른 온도변화를 최소화하여 온도보정에 따른 오차를 줄이기 위해 30분 이내에 수행하였다. 이동관측 시 각 지점에서 1분 동안 온도와 습도를 측정된 값의 평균값을 기록하였다.

고정 기상 측정 및 이동 기상 측정에 이용한 측정 장비는 Vantage Pro II 모델 AWS로 작동온도-40~65°C로 풍속 센서, 풍향 센서, 강우량 센서, 온도 센서, 습도 센서 등이 설치되어 복

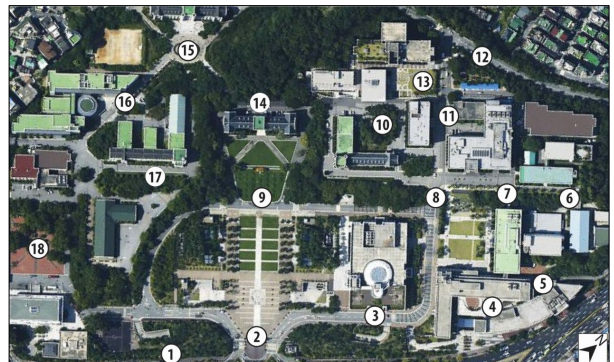


그림 1. 연구대상지역 및 이동기상관측 지점

자료: <http://map.naver.com>

합적인 기상측정이 가능하다.

본 연구에서는 이동관측 시 공간구조에 따른 온도 및 습도를 측정하였으며, 풍향, 풍속 등의 기상요소는 공간구조보다는 측정시 기상상태에 큰 영향을 받기 때문에 고정기상관측 데이터를 이용하였다.

2) 공간구조 분석

캠퍼스 내 공간구조 특성을 파악하기 위해 건물유형, 배치구조, 토지피복, 수목 조사를 수행하였다. 특히, 이동관측지점의 공간구조를 세밀하게 분석하기 위해 Canon 5D Sigma 8m F4 어안렌즈를 이용하여 SVF를 산출하였다. 캠퍼스 측정 지점별 공간특성을 파악하기 위해 공간구조(건물높이, 배치)와 인체 열환경에 영향을 미치는 높이인 지상 1.1m에서의 어안렌즈 촬영사진(Fish-eye lens photography)을 이용하여 SVF를 분석하였다. 촬영높이는 기상관측지점에 비해 외부요인에 대한 영향을 적게 받기 때문에 공간구조 특성을 최대한 반영할 수 있는 높이로 설정하였다. 공간구조는 평균복사온도의 형성에 영향을 미치는 건물과 토지피복 특성을 고려하였으며, SVF는 태양복사의 입사에 영향을 미치는 건물과 수목의 높이 및 개방정도를 측정 및 분석하였다.

3) 인체 열쾌적성 분석 및 평가

인체 열쾌적성과 관련한 열교환 메커니즘에 영향을 미치는 주요 인자는 대기 중 온도(TA), 증기압(VP), 풍속(V), 평균 복사온도(Tmrt)이며, 그림 2와 같다(Kusch et al., 2004). 인체 열쾌적성의 평가는 EN-ISO 7730(ISO, 2005)을 근거로 PMV와 PET지수를 이용하여 수행하였다. PMV와 PET 지수에 따라 예측이 가능한 인체 열쾌적성 상태 및 생리학적 스트레스 상태는 표 1과 같다.

인체 열쾌적성을 분석하기 위하여 RayMan 모델(Matzarakis, 2009)을 이용하였다. RayMan 모델 시뮬레이션은 기상요소를

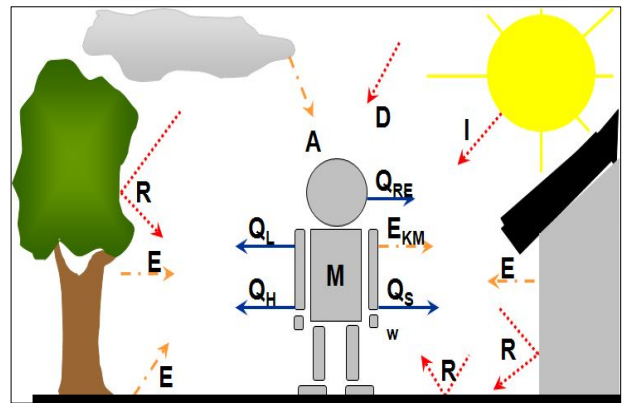


그림 2. 인체 열쾌적성에 영향을 미치는 인자

- 법례: M: 총에너지 변화
 Q_H: 감지 가능한 온열에 의한 대류 흐름
 Q_{SH}: 잠열의 대류흐름
 Q_L: 수증기 확산에 의한 잠열의 대류흐름
 Q_{RE}: 호흡에 의한 열 흐름
 I: 직달 일사량
 D: 산란 일사량
 R: 단파에 의한 반사복사
 A: 대기 중 열복사
 E: 표면열복사
 EKM: 인체열복사

자료: Gerd Jendritzky, 2002: 4

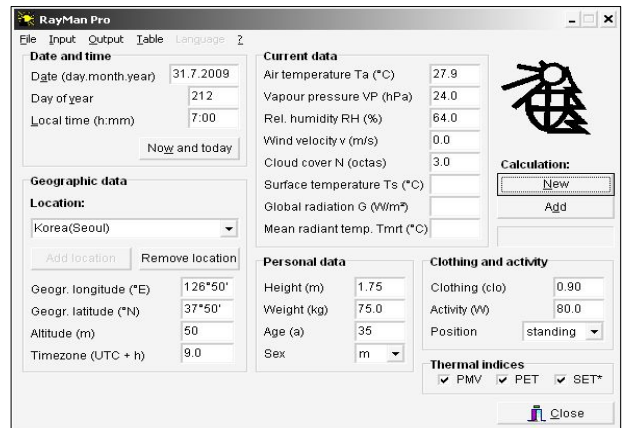


그림 3. RayMan 모델

표 1. 열쾌적성지수 범위

PMV	PET	열쾌적성	생리학적 스트레스 상태
-3.5	4℃	매우 추움	극심한 저온 스트레스
-2.5	8℃	추움	심한 저온 스트레스
-1.5	13℃	서늘함	중간정도 저온 스트레스
-0.5	18℃	약간 서늘함	약한 저온 스트레스
0.5	23℃	쾌적함	열적 스트레스 없음
1.5	29℃	약간 따뜻함	약한 고온 스트레스
2.5	35℃	따뜻함	중간정도 고온 스트레스
3.5	41℃	더움	심한 고온 스트레스
		매우 더움	극심한 고온 스트레스

자료: Matzarakis and Mayer, 1998: 140-143.

측정한 지점의 경위도, SVF와 측정된 물리적 기상요소인 온도, 습도, 풍속, 운량을 입력하여 인체 열쾌적성을 평가할 수 있는 PMV와 PET 지수의 산출이 가능하다(Matzarakis et al., 2006; Mayer et al., 2008). RayMan 모델을 이용하여 시뮬레이션을 돌리기 위하여 입력하는 측정 데이터는 그림 3과 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 캠퍼스 기상환경

고정형 및 이동형 기상 측정 장비를 이용하여 2009년 7월 31일, 캠퍼스 공간 구조별 20개 지점을 관측한 결과는 그림 4와 같다. 일출 후 온도가 상승하기 시작하는 오전 7시의 경우 최저

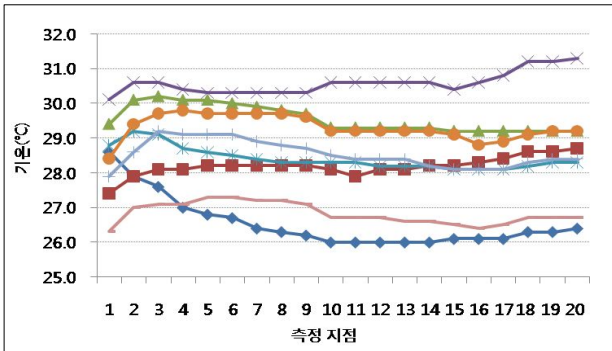


그림 4. 각 지점별 시간대별 온도분포

범례: 7:00 9:00 11:00 13:00
15:00 17:00 19:00 21:00

26.0°C, 최고 28.6°C, 평균 26.5°C의 온도분포를 보였으며, 각 지점별 온도 차가 최대 2.6°C까지 발생하였다. 이후 본격적으로 온도가 상승하기 시작되는 오전 9시와 11시의 경우 각각 최저 27.4°C, 최고 28.7°C, 평균 28.2°C의 분포를 보였다. 오전 7시의 각 지점별 온도분포와 비교하였을 때, 태양복사에너지가 증가됨에 따라 각 지점별 온도 차가 1°C 전후로 감소했다. 오후 1시의 경우 각 지점별로 최대 온도값(30.1~31.3°C, 평균 30.6°C)을 보였으며, 일몰 시간인 오후 7시를 기점으로 온도가 감소하기 시작해서 오후 9시경(26.3~27.3°C, 평균 26.8°C)에는 오전 7시와 유사한 온도분포를 보였다. 그림 4에서 오후 3시의 기온이 오전 11시와 오후 5시에 비해 낮은 값을 보인 이유는 강우에 의한 일시적 냉각효과 때문이다.

2. 공간특성 분석

캠퍼스 측정 지점별 공간특성을 파악하기 위해 건물 높이와 건물의 배치와 같은 공간 구조와 인체 열환경에 영향을 미치는 높이인 지상 1.1m에서의 SVF를 분석하였다.

공간구조는 평균복사온도의 형성에 영향을 미치는 건물과 토지피복 특성을 고려하였으며, SVF는 태양복사의 입사에 영향을 미치는 건물과 수목의 높이 및 개방정도를 측정 및 분석하였다. 그림 4는 20개의 관측지점을 공간구조에 따라 개방형, 반개방형, 폐쇄형 구분한 대표적인 지점으로 SVF의 계산을 위한 어안렌즈 촬영사진을 정리한 것이며, RayMan 모델을 이용해서 정량화된 SVF값을 계산하였다.

표 2는 공간구조에 따른 개방형, 반개방형, 폐쇄형의 유형에 피복 특성을 반영한 6가지 유형의 결과로 계산된 SVF 값과 함께 정리하면 표 2와 같다.

3. 열특성 평가

본 연구에서는 소규모 공간의 열특성과 사람에게 미치는 열

쾌적성이 공간유형, 개방도, 토지피복특성, 건물외피, 수목 및 수고 등에 의해 차이가 있다는 점에 초점을 맞추어 1차적으로 개방, 반개방, 폐쇄의 형태로 구분하여 평가하고, 2차적으로 개방형(2, 8번), 반개방형(10, 12번), 폐쇄형(11, 14번)의 특성을 가진 6개의 주요 지점을 도출하였다.

주요 지점에 대해 개방형의 경우 토지피복현황에 따라 초지, 나지, 포장지로 구분하여 평가하고, 반개방형 및 폐쇄형의 경우 공간을 위요하는 폐쇄물을 건물과 수목으로 구분하여 평가하였다. 열환경 모델을 이용하여 분석한 주요 지점별 평가결과는 다음과 같다.

공간특성에 차이를 보이는 주요 지점의 오전 7시부터 오후 9시까지 시간에 따른 평균복사온도 변화를 살펴보면, 광장인 2번 지점은 개방형으로 35.4°C(오전 11시: 55.5°C, 오후 9시: 20.1°C), 수목으로 폐쇄형 공간 구조의 특성을 보이는 14번 지점은 18.6°C(오후 1시: 44.4°C, 오후 9시: 25.8°C)의 차이를 보였다. 전체 측정지점에 대한 Tmrt의 분석 결과 SVF값이 폐쇄

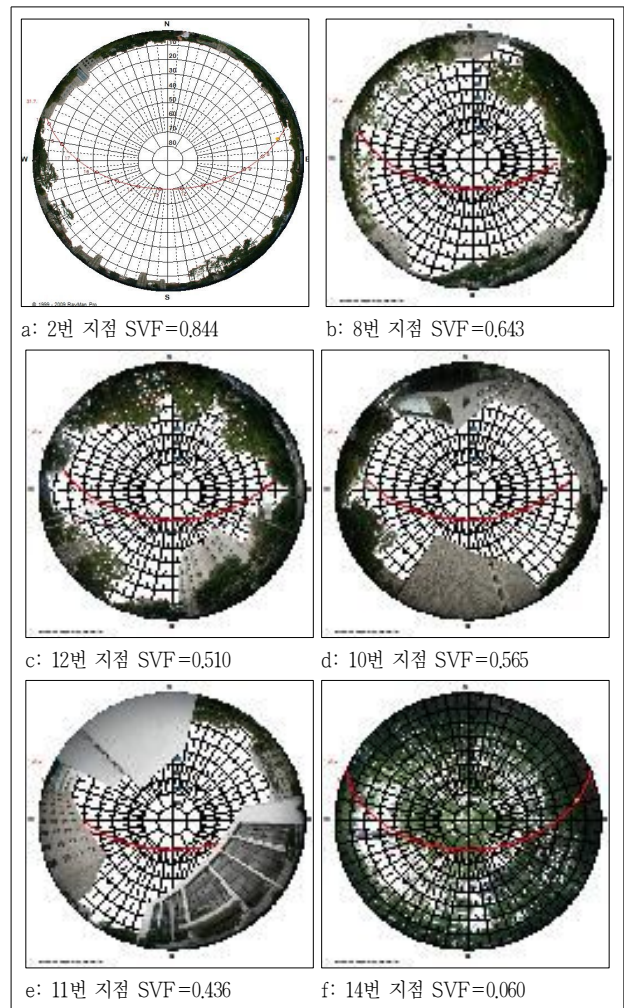


그림 5. SVF 계산을 위한 어안렌즈 촬영 결과

표 2. 공간특성 분석 결과

유형	토지 피복재	조경식재		SVF		해당 지점	
		수목	길이(m)	범위	평균		
개방 (open)	광장	초지/포장지 혼재	침엽수 활엽수	10~15m 3m	0.633~0.849	0.716	2, 9, 15, 18, 20
	건물 (1면 위요)	포장지	혼합림	6~18m	-	0.647	8
반개방 (semi-close)	도로	포장지	혼합림	4~5m	0.508~0.518	0.513	1, 3, 12, 19
	건물 (2면 위요)	포장지	혼합림 관목류	4~6m 2m	0.495~0.562	0.530	7, 10, 13, 16, 17
폐쇄 (close)	건물 (3면 이상 위요)	포장지	혼합림 관목류	4~6m 2m	0.334~0.378	0.361	4, 5, 6, 11
	수목	나지/포장지 혼재	혼합림	8~12m	-	0.160	14

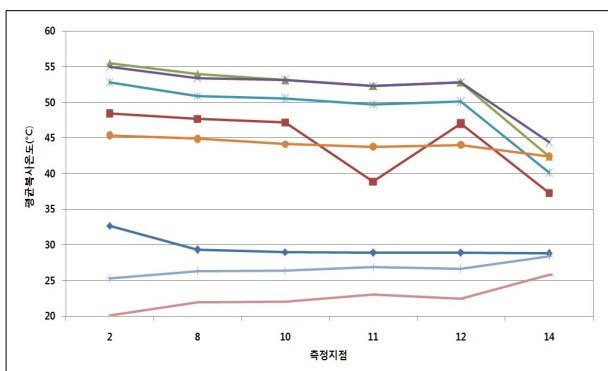


그림 6. 주요 지점별 평균복사온도

범례: 7:00, 9:00, 11:00, 13:00, 15:00, 17:00, 19:00, 21:00

형인 14번 지점의 온도가 개방형의 2번 지점에 비해 오전 11시에 최대 7.4℃ 낮은 것으로 나타났다(그림 6 참조). 이와 같은 결과는 수고 8~12m의 수목과 건물에 의한 태양복사열의 차단에 기인한다.

폐쇄형의 경우, 건물 벽면에 의해 위요된 11번 지점은 기온이 가장 높게 나타나는 오전 11시~오후 3시 사이에 49.7~52.3℃였으며, 반면 수목에 의해 직사광선이 차단되고 그늘이 만들어지는 14번 지점은 동일한 시간대에 40.1~44.4℃로 같은 폐쇄형의 유형이더라도 건물과 수목에 따라 차이가 있는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 수목이 태양 복사열을 차단하여 온도를 낮추는 반면 건축물에서 방출하는 장파복사열이 기온을 상승시키는 요인으로 작용하기 때문으로 분석된다. 또한, 알베도 값이 낮은 콘크리트나 아스팔트는 단파 복사열의 흡수가 높고 많

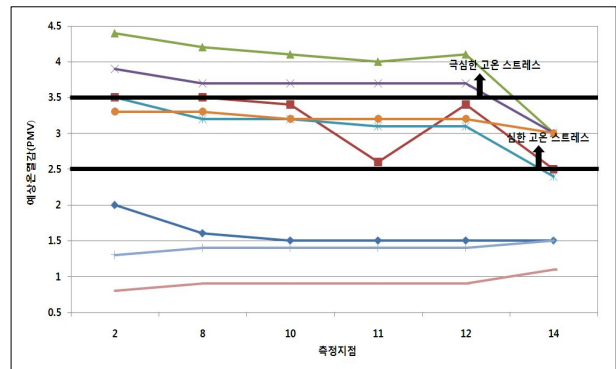


그림 7. 주요 지점별 열쾌적도 분석

범례: 7:00, 9:00, 11:00, 13:00, 15:00, 17:00, 19:00, 21:00

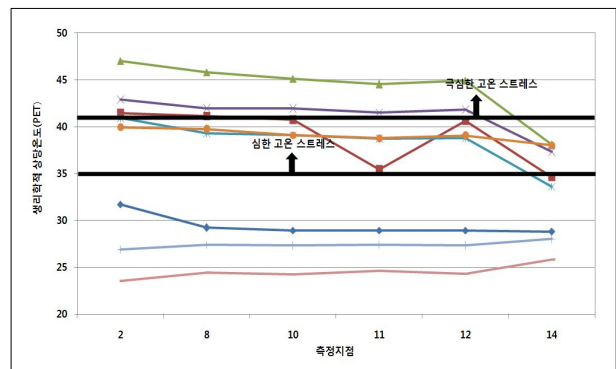


그림 8. 주요 지점별 생리적 등가온도

범례: 7:00, 9:00, 11:00, 13:00, 15:00, 17:00, 19:00, 21:00

은 열을 저장하는 성질을 지니고 있기 때문에(Tah et al., 1999), 수목에 의한 폐쇄형 공간의 기온이 건물에 의한 폐쇄형 공간의 기온보다 낮게 나타났다고 볼 수 있다.

각 공간 구조별 개방 정도에 따라 평균복사 온도의 차이가 발생하는 원인은 단파복사가 주요 원인이며, 2번 지점과 같은 개방형의 경우 태양복사량이 많은 주간에는 단파복사량이 많아 평균복사온도가 급격히 상승하고, 야간의 경우 주변에 식재된 수고 10~15m의 혼합림에 의해 쉽게 냉각되기 때문에 주야간에 따라 30℃ 이상의 온도 차를 보인다.

PMV 지수를 이용한 각 개별공간의 열쾌적도 분석 결과는 다음과 같다. 태양고도가 높아지는 오전 11시~오후 1시 사이에 폐쇄형인 14번 지점을 제외한 대부분의 공간이 열쾌적도 3.5 이상의 극심한 고온 스트레스를 발생시키는 것으로 분석되었다. 개방형인 2번 지점의 경우 PMV 4.4 정도의 높은 수치가 분석되었으며, 오전 9시, 오후 3~5시 사이에는 전 지역에서 PMV 2.5 이상의 심한 고온 스트레스를 발생시키는 것으로 분석되었다. 오전 7시와 오후 7시 이후에는 공간의 열적 스트레스 발생이 다소 해소되는 경향을 보였다.

2번 지점(개방형)의 경우, 기온이 가장 높게 나타나는 오전 11시~오후 3시 사이에 열특성은 PMV 3.5~4.4, PET 40.9~47.0℃로 극심한 고온스트레스를 발생시키는 것으로 분석되었다. 반면, 수목으로 우거진 14번 지점(폐쇄형)의 경우 동일한 시간대에 PMV 2.4~3.0, PET 33.6~38.1℃로 중간 정도 고온스트레스를 발생시키는 것으로 나타났다.

오전 11시~오후 1시 사이에 수목으로 폐쇄된 14번 지점을 제외하고, 전 지점에서 PET 41℃ 이상의 극심한 고온 스트레스가 발생하는 것으로 분석되었다. 광장인 2번 지점(개방형)의 경우 최대값인 PET 47℃의 높은 수치가 분석되었다. 이는 체온이 36.5℃임을 감안할 때, 이러한 공간에서 장기간 노출 및 활동을 할 경우 인체가 받는 열적 스트레스가 매우 높게 되고, 열탈진이나 일사병과 같은 현상을 유발할 수 있다. 2번과 9번 지점과 같이 개방된 공간의 경우 강렬한 태양복사로 인해 오전 9시에 이미 극심한 고온 스트레스 상태에 도달하는 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 공간의 경우에는 가능한 외부활동을 자제하고 직사광선의 차폐와 통풍을 원활하게 할 수 있는 조경설계가 필요하다. 2번 지점과 같은 개방형에 비해 10, 12번 지점과 같은 반개방형의 열특성은 양호한 것으로 분석되었으며, 이는 수목, 건물에 의한 태양복사열 차단에 영향을 받았기 때문이다. 즉, 개방형 공간의 경우 수공간 조성, 식생도입 등의 설계를 통해 열쾌적성을 개선할 수 있다. 캠퍼스 공간 구조 및 특성 유형에 따른 측정된 기온자료와 열쾌적성 평가 자료를 종합하면 표 3과 같다.

4. 공간의 열환경을 개선하기 위한 제언

연구 대상지의 열쾌적성을 평가한 결과를 바탕으로 공간의 열환경을 개선하기 위해 고려할 사항을 제안하면 다음과 같다.

1) 토지피복형태

토지피복현황이 다양한 도시공간에서는 토지피복형태와 기온의 관련성을 요인 분석하여 녹지대에 의한 일사차폐 및 증발

산 작용을 이용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다(윤용한 등, 2008). 열특성 평가결과로 볼 때, 공간의 유형이 같더라도 토지 피복특성에 따라 열쾌적성 지수인 PMV, PET값이 다르다는 점에서 토지피복에 대한 요인을 분석하여 조경설계에 반영하는 것은 매우 중요하다.

도시 내 캠퍼스 공간의 토지피복현황에 따라 기상요소를 분석하여 최고온역인 포장지와 최저온역인 식재지의 온도 차이가 3.9~4.1℃로 나타난 선행 연구의 결과(주창훈, 2008)와 옥외 공간에서는 태양 복사열에 따라 다르게 나타나는 표면의 온도가 열쾌적성에 큰 영향을 끼치는 선행 연구의 결과(조현길 등, 2009)도 있기에 토지의 피복 형태를 증발산이 가능한 초지, 잔디 등 자연재 포장을 유도할 필요가 있다. 또한, 복사열에 의한 공간 유형별 인체 에너지 수치를 비교한 결과, 수목으로 차양된 공간이 아스팔트, 콘크리트 등 인공재료로 구성된 공간에 비해 열쾌적성의 결과가 양호한 상태로 나타난 것을 고려할 때, 옥외 공간 계획시에는 바닥면의 인공 재료를 최소화하고 증발산이 가능한 차양 수목과 자연재 포장으로 공간을 설계하는 것이 좋다.

자연재 포장을 이용하여 공간을 계획하고 설계하는 것이 열쾌적성의 측면에서 가장 좋은 방법이지만, 공간을 계획시 고려해야 하는 여러 가지 요인들에 의해 인공재로 포장해야 하는 경우에는 이용자들에게 열환경으로 인한 불쾌감을 낮출 수 있는 방법을 적용하는 대안을 고려해야 한다. 인공재 포장은 지면으로부터의 장파복사 및 단파복사의 흡수율이 포장 표면의 온도에 영향을 주기 때문에 색채를 밝게 하여 알베도를 높이거나, 포장이나 골재에 열전도성 혹은 비열을 높이는 방법을 취하거나, 투수성이나 보수성을 높일 수 있는 재료를 활용하고 수목차양을 이용하여 입사량을 줄이는 방법 등으로 열쾌적성을 높일 수 있다. 또한, 투수성 잔디블럭 포장, 보수층을 가진 석재+잔디블럭 포장, 석재블럭포장, 목재블럭포장 등 열환경을 개선할 수 있는 인공재(한승호 등, 2006)를 개발하여 조경설계에 적용하는 대안도 고려해 볼 수 있다.

표 3. 공간유형별 열특성 평가 결과

유형	피복특성	SVF		기온			PMV(℃)			PET(℃)			해당 지점	
		범위	평균	최소	최대	평균	최소	최대	평균	최소	최대	평균		
개방 (open)	광장	초지/포장지 혼재	0.633~0.849	0.716	26.1	31.3	28.5	0.8	4.4	2.7	23.5	47.0	36.2	2, 9, 15, 18, 20
	건물 (1면 위요)	포장지	-	0.647	26.3	30.3	28.6	0.9	3.7	2.7	24.4	45.8	36.1	8
반개방 (semi-close)	도로	포장지	0.508~0.518	0.513	26.0	30.6	28.6	0.9	4.2	2.7	24.3	45.4	35.8	1, 3, 12, 19
	건물 (2면 위요)	포장지	0.495~0.562	0.53	26.0	30.8	28.3	0.8	4.2	2.6	23.9	45.4	35.4	7, 10, 13, 16, 17
폐쇄 (close)	건물 (3면 이상위요)	포장지	0.334~0.378	0.361	26.0	30.6	28.7	0.9	4.1	2.6	24.6	45.0	35.1	4, 5, 6, 11
	수목	나지/포장지 혼재	-	0.16	26.0	30.6	28.3	1.1	3.0	2.3	25.8	38.1	33.0	14

2) 녹지계획

캠퍼스 공간의 열쾌적성을 측정된 결과를 토대로 유추해 볼 때, 도시 공간에서 녹지의 배치와 식재 형태를 고려한 설계는 일사 차폐와 증발산 작용을 통한 기온 저감 효과를 가져올 수 있어 녹지가 공간의 열환경 조성에 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. 도시 전체의 미기후를 개선하기 위해서는 녹지확충은 필수요소이며, 이를 위해 수목의 식재뿐만 아니라 바닥면의 지 피식재, 건물의 벽면 및 옥상 등의 인공지반 녹화 등 생태적 설계 방안을 도입하고자 하는 노력들이 나타나고 있다. 그러나 현재의 도시 구조에서 대규모의 녹지를 증가시키는 대안은 비 현실적이기 때문에 과학적인 데이터를 근거로 하여 녹지를 분 산 배치하는 방법(윤용한 등, 2008)이 도시 열환경의 질을 높 이는 데에 긍정적인 역할을 할 수 있다.

도시 공간의 열쾌적성을 높이기 위한 녹지 계획의 거시적인 방법은 서울의 남산과 같이 거점적 역할을 할 수 있는 도시의 녹지대를 중심으로 도시 전체 그린네트워크 계획을 수립하는 것을 예로 들 수 있다. 미시적인 방법으로는 식재 계획 시 수목의 수고, 수관폭, 수관 밀도 등을 고려하여 복사 에너지에 의한 열쾌적성을 개선할 수 있는 방안을 고려하는 것을 제안할 수 있다. 수목의 잎은 태양복사열을 차단하고 증발산작용을 통해 기온을 저감시키는 냉각효과를 가져올 수 있으므로 교목을 식재할 때에는 수고 8m 이상의 수목을 식재하는 것이 바람직하며, 침엽수보다는 태양복사차단이 유리한 활엽수를 식재하도록 계획해야 한다. 또한, 건물의 서쪽 및 남쪽에는 차양수목을 식재하여 오후시간대의 태양복사를 최대한 차단하고, 북쪽으로는 활엽수와 침엽수의 다층 군락을 통해 증발산 작용을 증진시킬 수 있도록 식재하는 것이 바람직하다.

3) 통풍성

공간 구조는 건물 배치에 가장 큰 영향을 받으며, 건물이나 대교목 등에 의한 공간개방 정도에 따라 열환경에 차이가 있음을 연구 결과를 통해 확인하였다. 이는 공간개방 정도가 통풍 성에 영향을 미쳐 복사열 냉각효과의 차이를 가져오기 때문이다. 개방형 공간의 열환경은 바닥 포장에 의한 복사열에 영향을 많이 받는 반면, 통풍이 잘 되기 때문에 지표면의 포장재질을 고려하는 것이 더 중요하다.

폐쇄형공간일 경우, 복사열이 높은 한낮을 제외한 나머지 시간대에 그늘에 의한 냉각효과가 증대된다. 하지만 위요된 공간 특성상 통풍성이 저하되고, 풍속이 증가함에 따라 기류감이 증가하며 같은 기류일 경우, 식재지의 기류가 포장지의 기류보다 열쾌적성이 양호하다는 선행연구결과(주창훈, 2008)를 고려한다면 건물 배치 방법이나 수목의 분수, 수종, 수고의 조절을 통하여 바람길을 확보해 주는 것이 쾌적한 열환경을 위한 대안이 될 수 있다.

IV. 결론

도시의 외부 공간 계획은 도시민의 생활 환경의 질을 향상시키기 위한 노력을 반영하여 이루어져야 한다. 이상 기온으로 인한 여름철 폭염과 열섬 현상 등이 자주 일어나는 도시공간은 이를 감소시킬 수 있는 열환경 개선을 위한 노력이 절실하다. 이에 본 연구에서는 도시 소공간의 열환경 개선을 위한 방안으로 다양한 공간 구조를 가진 대학캠퍼스에서 공간의 열특성을 평가하고, 인체에 미치는 열쾌적성을 분석하였다. 본 연구의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 대상지의 공간을 구조별 개방정도에 따라 개방형, 반개방형, 폐쇄형으로 구분하여 평균복사온도를 측정된 결과, 태양복사량이 많은 주간에는 단과복사열에 의해 개방형이 폐쇄형에 비해 급격하게 상승하였으며, 주야간에 따라 최대 30°C의 차이를 보였다.

2. 건물과 수목이 구성하는 공간의 특성 및 유형에 따라 공간 이용자가 느끼는 열 쾌적도 및 열 스트레스에 차이가 있는 것으로 나타났다. 폐쇄형 공간은 개방형 공간에 비하여 열쾌적도가 낮은 것으로 평가되었으며, 수목에 의해 위요된 공간이 건물에 의해 위요된 공간보다 열환경이 더 쾌적한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 수목과 건물이 태양 복사열을 차단하기 때문인 것으로 이해할 수 있으며, 건물에 의해 폐쇄형으로 형성된 공간이 열쾌적도가 가장 좋지 않은 것으로 나타난 이유는 건물이 장파복사열을 방출하기 때문인 것으로 판단된다.

3. PMV 지수와 PET 지수를 이용한 각 개별공간의 열쾌적도를 분석한 결과, 개방형의 2번 지점과 폐쇄형의 14번 지점의 기온이 가장 높게 나타나는 오전 11시~오후 3시 사이에 최대 PMV 1.1~1.4, PET 6.3~8.9°C의 차이를 보이는 것으로 나타나, 개방된 공간에 비해 수목으로 차폐된 공간이 열쾌적성이 양호한 것으로 분석되었다.

4. 오전 11시~오후 1시 사이에 수목으로 차폐된 폐쇄형의 14번을 제외한 전 지점에서 PET 41°C 이상, 광장인 개방형의 2번 지점의 경우 최대값인 PET 47°C의 높은 수치가 나타나, 극심한 고온스트레스를 받는 것으로 분석되었다. 즉, 개방형 공간유형보다는 수목이 식재된 폐쇄형 공간구조에서 이용자가 더 쾌적감을 느낀다고 볼 수 있다.

본 연구의 결과를 고찰해 보면, 기존의 평가방식인 기온과 습도 등의 단순 기상 자료만을 이용할 경우 도시지역에서 국지적으로는 1~2°C 정도 온도 차이가 발생하지만, 전체적으로 비슷한 기온 분포를 나타내는 결과가 도출되는 반면, 이용자를 중심으로 둘러싼 물리적 환경요소와 생태적 환경요소를 종합적으로 고려하여 평가할 경우 그 결과는 매우 달라진다는 점을 시사해 준다. 이런 의미에서 인체 열쾌적성을 고려할 수 있는 설계지수인 PMV와 PET를 도입하여 측정된 것은 이용자가

도시 공간을 이용할 때 실제로 느끼는 열쾌적성이나 열적 스트레스를 정량적으로 평가하고, 그에 따른 공간계획 방안은 제안할 수 있는 가능성을 보여 준다고 하겠다.

기상자료와 공간분석 자료를 이용하여 인체 열쾌적성을 평가한 결과는 공간을 계획할 때, 열대건조기후대(hot dry climate region)의 건축공간특성을 반영할 경우 개방성이나 통풍성을 높이는 것도 중요하지만, 복사열을 차단할 수 있는 방안에 대한 고민이 우선적으로 수행되어야 한다. 이외는 달리 우리나라의 여름철 기후 특성은 온난다습기후대(warm humid climate region)와 유사하기 때문에 통풍을 고려한 개방형 공간구조가 열쾌적성을 높이는데 더욱 적합하며, 복사열을 차단하고 통풍을 고려해야 온도와 습도를 모두 낮출 수 있다.

비교적 자연지역보다 고온 건조한 미기후 특성을 가지는 도시에서는 건물과 수목을 적절하게 배치하여 그늘을 조성함으로써 근본적으로 태양복사의 입사를 차단하고 구조물에서 나오는 장파 복사열을 감소시킬 수 있도록 공간을 계획할 경우 이용자의 열적 쾌적성이 개선될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 공간 계획시, 공간 구조에 따른 태양 복사 에너지와 평균 복사 온도, 그리고 표면 온도에 영향을 끼치는 피복 유형, 알베도, 공간 개방도, 통풍성을 복합적으로 고려하는 것이 바람직하다.

본 연구에서 제시한 정량적인 열쾌적성 평가 방법과 연구결과는 탄소저감 및 열섬효과 완화를 위한 도시 공간 계획의 발전에 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 쾌적하고 생태적으로 지속가능한 도시 환경의 조성에 이바지할 수 있을 것으로 사료된다. 추후, 도시공간에서 이용자가 체감하는 외부공간의 열쾌적성 평가 결과를 조경계획에 반영하기 위한 지속적인 연구를 위해 본 연구를 토대로 실제 이용자의 심리적 열쾌적성 및 이용 행태를 통한 평가 방법에 관한 후속연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

인용문헌

- 김학열, 김운수(2003) 서울시 도시기온 변화에 관한 모델 연구. 한국조경학회지 31(3): 74-82.
- 박사근, 장길수, 송민정, 신훈(2006) 건축외장재의 일사표면온도와 흡수율에 관한 실험적 연구. 한국생태환경건축학회 학술발표대회 논문집 11: 81-86.
- 박인환, 장갑수, 김종용, 박종화, 서동조(2000) 대도시에 있어 냉섬의 유형별 온도 완화 효과: 대구광역시 사례연구. 한국조경학회지 28(1): 11-18.
- 송영배(2007) 바람통로 계획과 설계방법: 건강도시를 위한 기후환경계획. 서울: 도서출판 그린토마토.
- 여인애, 카마다 요코, 이정재, 윤성환(2009) 건물군 조건이 도시 열환경에 미치는 영향에 관한 정량적 검토. 한국태양에너지학회 춘계학술발표대회 논문집 29(1): 180-183.
- 오규식, 홍재주(2005) 도시공간 구성요소와 도시 열섬현상의 관련성 연구. 도시설계학회지 6(1): 47-63.
- 윤성환, 정선영(2009) 공동주택의 주동형상 및 배치유형에 따른 여름철 옥외 열환경 예측 평가. 대한건축학회 논문집 계획계 25(9): 321-328.
- 윤용환, 박봉주, 김원태, 박선영(2008) 공원녹지의 토지피복비율과 기온간의 요인분석. 한국환경과학회지 17(5): 485-491.
- 이은주(2006) 도시공간 구성요소와 열쾌적성과의 관련성 연구: 서울 사래지역을 중심으로. 한양대학교 도시대학원 석사학위논문.
- 조현길, 안태원(2006) 도시 수목식재와 미기후 개선의 상관성 구명. 한국조경학회지 27(4): 23-28.
- 조현길, 안태원(2009) 도시기온에 작용하는 입체적 토지피복의 영향. 한국조경학회지 37(3): 54-60.
- 조현길, 안태원, 김한수, 정응호(2009) 옥외공간 열쾌적성과 건물 에너지절약을 위한 녹지계획지표 연구. 2009 한국조경학회 추계학술발표대회 논문집: 10-13.
- 주창훈(2008) 도시녹지의 토지피복현황이 온열쾌적감과 감성이미지에 미치는 영향. 건국대학교 대학원 박사학위논문.
- 한갑수, 윤영환, 조현길(2005) 천공사진을 이용한 도시경관의 분석 및 평가. 한국조경학회지 33(4): 11-21.
- 한승호, 류남형, 강진형(2006) 조경용 투수성 블록 포장의 열환경 특성. 한국조경학회지 34(2): 18-25.
- Givoni, B.(1998) Climate Considerations in Building and Urban Desig. New York: Van Nostrand Reinhold.
- ISO(2005) EN-ISO 7730 Ergonomics of the Thermal Environment. Geneva: International Organization for Standardization.
- Kusch, Wolfgang, Fong, Hwang Young, Gerd Jendritzky and Ingo Jacobsen(2004) Guidelines on biometeorology and air quality forecasts, WMO, No. 1184, pp. 3-6.
- Lee, H.-Y.(1993) An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of urban heat islands. Atmospheric Environment 27B(1): 1-13.
- Matzarakis, A(2009) RayMan Pro. University of Freiburg.
- Matzarakis, A. and H. Mayer(1998) Investigations of urban climate's thermal component in Freiburg, Germany. 13th Conference on Biometeorology and Aerobiology. Albuquerque, USA: American Meteorology Society.
- Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer(2006) Modelling the thermal bioclimate in urban areas with the RayMan model. The 23th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland: Passive and Low Energy Architecture.
- Mayer, H., S. Kuppe, J. Holst, F. Imbary and A. Matzarakis(2008) Human thermal comfort below the canopy of street trees on a typical central European Summer Day, 5th Japanese & German Meeting on Urban Climatology. Freiburg, Germany: Meteorological Institute, Albert-Ludwigs-University of Freiburg.
- Taha, H., S. Konopacki and S. Gaberseck(1999) Impacts of large-scale surface modifications on meteorological conditions and energy use: A 10-region modeling study. Theoretical and Applied Climatology 62: 175-185.
- http://map.naver.com
- Gerd Jendritzky(2002)

원 고 접 수 일: 2010년 7월 29일
 심 사 일: 2010년 9월 30일(1차)
 2010년 11월 4일(2차)
 개 재 확 정 일: 2010년 11월 15일
 3 인 의 명 심 사 필