인간 열환경 지수를 이용한 생기후지도 작성 및 도시 · 조경계획 및 디자인에의 적용방안*

박수국

(주) GEO C&I 공간정보기술연구소

A Way for Creating Human Bioclimatic Maps using Human Thermal Sensation (Comfort) and Applying the Maps to Urban and Landscape Planning and Design

Park, Soo-Kuk

Spatial Information Technology Research Institute, GEO C&I

ABSTRACT

The purpose of this study is to find applicabilities of human bioclimatic maps, using human thermal sensation(comfort) in summer, with microclimatic *in situ* data and computer simulation results at the study site of downtown Daegu. This includes the central business district(CBD) area and two urban parks, the Debt Redemption Movement Memorial Park and the 2.28 Park, for urban and landscape planning and design. Climatic data and urban setting information for the analysis of human thermal sensation were obtained from *in situ* measurement and the geographic information system data.

As a result, the CBD had higher air temperature than the parks when the wind speed was low. Relative humidities were opposite to the air temperature. Especially, same directional streets with local wind direction had lower air temperature than streets perpendicular to the wind direction. The most important climatic variable of human thermal sensation in summer was direct beam solar radiation. Also, creating shadow areas would be the most relevant method for modifying hot thermal environments in urban areas. The most effective method of creating shadow patterns was making a tree shadow over a pergola, and the second best one was making a tree shadow on the front of north directional building walls. Moreover, how to plant trees for creating shadow patterns was important as well as what kind of trees should be planted. The results of human thermal sensation were warm to very hot at sunny areas and neutral to warm at shaded ones. At the sunny areas, wide, squared shape areas had a little bit higher thermal sensation than those of narrow streets. The albedo change of building walls 0.15 and ground surface 0.1 could change 1/6 of a sensation level at the shaded areas and 1/3 at the sunny ones. These microclimatic approaches will be useful to find appropriate methods for modifying thermal environments in urban areas.

Key Words: Human Thermal Comfort, Microclimate, Urban Climate, Park, Albedo

* : 이 논문은 대구경북연구원 2012년도 정책연구과제 지원 및 한국연구재단 기초연구사업 일반연구지원사업(과제번호: 2012R1A1A2043863)의 연구비 지원으로 수행되었다.

Corresponding author: Soo-Kuk Park, Spatial Information Technology Research Institute, GEO C&I, Daegu 701-804, Korea, Tel.: +82-53-857-7312, E-mail: sooland@gmail.com

국문초록

이 연구는 대구광역시에 위치한 중심상업지역을 포함한 국채보상운동공원과 2.28공원지역을 대상으로 미기후 실측과 컴퓨터 시뮬레이션을 이용해 여름철 인간 열환경 지수를 분석하고, 그 지수를 토대로 인간 생기후지도를 제작하여 향후 도시·조경계획 및 디자인에 이용할 방안을 모색하는데 목적을 두었다.

인간 열환경 지수를 분석하기 위해 필요한 자료들로서 기후자료(기온, 습도, 풍속, 태양 및 지구 복사에너지)와 도시공간 구성자료(건물의 위치와 높이; 수목의 위치와 높이; 수목의 종류와 건물 벽, 지표면의 재질; 태양 복사에너지 반사율과 지구 복사에너지 방사율)를 지리정보시스템 자료와 실측을 통해 구축하였다.

그 결과, 풍속이 약할수록 도시중심상업지역이 공원보다 높은 기온을 나타냈으며, 습도는 반대의 현상을 보였다. 특히, 주풍 방향의 길들은 지역풍의 영향으로 주풍과 직각방향의 길들보다 더 낮은 기온을 나타냈다.

여름철 열환경 지수에서 가장 큰 영향을 미치는 기후요소는 태양직사광선으로 나타났으며, 도시공간에서 그늘 조성이 가장 효과적인 열환경 개선 방법이었다. 그 방법 중 파고라에 수목그늘을 이중적으로 조성하는 방법이 가장 효과적이었으며, 북향의 건물 벽 앞에 수목그늘을 조성하는 것이 그 다음으로 효과적이었다. 또한, 수중 선택뿐만 아니라 식재방식에도 중점을 두어야 하는 것으로 나타났다. 양지의 열환경 지수는 따뜻한 정도(warm)에서 매우 더운 정도(very hot)로 나와, 음지의 중간(neutral)에서 따뜻한 정도(warm)에 비해 불쾌한 열환경이 조성되었다. 특히, 양지는 넓은 광장형태의 지역들이 좁은 길보다 더 불쾌한 결과를 보였다. 재질의 반사율을 건물 벽 0.15, 지표면 0.1 낮췄을 때, 열환경 지수가 음지에서는 한 단계 중 1/6만큼, 양지에서는 1/3만큼 감소됨을 알 수 있었다. 이와 같은 미기후적 접근방식이 도시 열환경 개선방안을 찾는 데 효과적일 것이다.

주제어: 인간 열쾌적성, 미기후, 도시기후, 공원, 반사율

1. 서론

1. 연구의 배경과 목적

UN 보고서에 따르면 도시가 세계의 75%의 에너지를 소비하고, 80%의 온실가스를 배출하고 있다고 하며(UNEP, 2008), OECD 국가 중에서는 건축물들이 총 에너지의 40% 이상을 소비하고 있으며, 30%의 온실가스를 배출하고 있는 것으로 나타났다(UNEP, 2006).

기후변화 대책으로서 현 정부는 녹색성장의 10대 정책 과제 중 자연에너지와 신재생에너지 분야로서의 천연자연에너지 공급원에 대한 연구와 일상생활 속에서 이산화탄소 저감방법을 모색하는 방법으로 실내공간에서 일어나는 에너지 소비 저감 대책에 대한 연구에 집중하고 있다. 그렇다면, 도시 공간에서 건축물을 제외한 도시옥외공간(outdoor urban area)에서의 에너지 저감대책과 온실가스 저감대책에 대한 연구는 어떻게 이루어지고 있는가를 생각해 보아야 할 것이다.

인간 생기후지도(human bioclimatic map)는 인간 열환경 지수(human thermal sensation)인 PMV(Perceived Mean Vote; Fanger, 1972; ISO 7730, 2005), PET(Physiological Equivalent Temperature; Höppe, 1993 and 1999), UTCI(Universal Thermal Climate Index; <http://www.utci.org>; Bröde *et al.*, 2011a and

2011b) 등을 적합한 공간적 분석단위(spatial resolution)를 기준으로 지도형태로 표현한 것으로(박수국, 2012), 선진국에서는 기후변화에 대비하여 도시옥외공간에서의 에너지 및 온실가스 저감대책, 여름철 폭염경보 및 겨울철 체감온도 시스템 구축, 국토·도시·조경계획 및 디자인 등의 목적으로 구축되는 기본 지도로서(Chen and Ng, 2011; Matzarakis *et al.*, 2005; Matzarakis, 2007), 두 가지 공간적 스케일로 접근되어진다. 첫째는 도시 전체를 하나의 공간으로 보고, 지역적(meso-climate or local climate)으로 크게 분석해 에너지 효율성과 인간 열환경 지수 및 쾌적성(human thermal sensation and comfort)에 문제가 있는 지역들을 기본적으로 파악하고자 하는 것이고, 둘째는 그 공간적 스케일을 미기후적인(micro-climate) 스케일로 낮춤으로써 디자인을 할 수 있는 수준으로 공간분석을 하고자 하는 것이다. 도시 전체적인 현황파악이나 기본적인 계획은 지역적 스케일로도 어느 정도는 가능하지만, 실제적인 도시의 디자인을 위해서는 옥외공간에 위치한 각각의 물체에 의해 유입·방출되는 에너지량을 파악할 수 있는 미기후 스케일로 분석되어야지만 가능하다.

이 연구는 미기후적 스케일로 인간 열환경 지수를 분석할 때 이용되는 미기후 자료인 기온, 습도, 풍속과 태양 및 지구 복사에너지와 그 지수를 이용해 작성된 생기후지도를 도시·조경계획 및 디자인에 활용하는 방안을 모색해 보고자 하였다.

2. 기존의 연구들

도시옥외공간을 미기후적인 스케일로 분석하는 기술은 전 세계적으로도 아직 발전하는 단계에 있다. 건축 밀도가 높은 유럽은 독일을 중심으로 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 1980년 중반부터 독일의 Berlin, Stuttgart, Dresden 시들은 지역적 스케일로 도시기후지도 및 인간 생기후지도를 만들었으며(http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/Climate_Booklet/kap_2/kap_2-6.htm), 오스트리아(Matzarakis *et al.*, 2005)와 그리스(Matzarakis, 2007)도 최근에 유사한 지도를 제작하였다. 아시아에서는 일본이 2002년부터 동경도 환경과학연구소가 동경도립대학과 함께 도시열섬(urban heat island) 현상에 중점을 둔 지역적 스케일의 동경시 기후지도를 만들었고(http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/en/other_issues/heat_island.html), 홍콩도 지역적 스케일로 바람길과 독일에서 개발된 열환경 지수인 PET를 이용한 인간 생기후지도를 제작해, 도시발전계획에 가이드라인으로 활용하고 있다(Ng, 2012).

위에서도 언급하였듯이 세계적인 수준이라는 독일의 경우나 최근에 연구결과를 내 놓고 있는 일본도 지역적인 스케일로만 도시기후지도 및 인간 생기후지도를 작성하였다. 그 이유로는 첫째, 3차원적인 도시 공간 안에서의 열환경 중 태양 및 지구 복사에너지 분석에 아직까지 만족할만한 기술적인 성취가 이루어지지 않았기 때문이다(Matzarakis, 2007). 기존의 연구들을 보면, 위성자료를 이용한 2차원적인 지표면 온도를 복사에너지 분석에 이용하는 경우가 있는데, 지표면 온도는 3차원의 도시 공간 안에서의 복사에너지 계산 중 지붕면이나 지표면에서 방출되는 지구 복사에너지 계산에 이용되어지는 것으로, 주변의 건물 높이에 대한 태양 및 지구 복사에너지 변동량을 나타낼 수 없으므로, 3차원인 도시 공간의 총 복사에너지양과 상관성이 높지 않다고 할 수 있다. 보통, 지역적 스케일에서 3차원적 도시 공간구성과 연관된 복사에너지에 대해서는 피복종류와 토지이용도에 따라 몇 종류로 정량화하여 적용하는 방법을 이용하고 있다. 물론 지역적 스케일에서는 분석단위의 크기가 수 십 미터에서 수 킬로미터에 이르므로 위와 같은 방법을 이용한 지도 제작이 최선책이라 할 수 있다. 둘째, 지도 제작 시 풍속에 대한 자료를 옥외공간에서 있는 사람들의 평균 가슴높이인 지표면에서 1~1.2 미터 높이에 맞춰 미기후적 스케일로 입력하고자 할 때, 3차원적으로 복잡한 도시 공간 구성(urban morphology)으로 인해 바람이 다양하게 변함으로서 신뢰성이 있는 적합한 풍속자료를 찾는 데 어려움이 있기 때문이다(Friedrich *et al.*, 2001). 그래서, 보통 지역적 스케일에서 이용되는 방법인 기상대나 자동기상관측망에서 측정된 풍속자료를 토대로 canopy layer climate(평균 건물높이)이나 boundary layer climate(평균 건물높이의 몇 배 위) 높이의 컴퓨터 시뮬

레이션 결과[예: MetPhoMod(the meteorology and atmospheric photochemistry mesoscale model: <http://www.giub.unibe.ch/klimet/metphomod>)]를 이용하여 높이에 따른 풍속차감계산방법으로 보행자 높이의 풍속자료를 구해 이용하는 경우가 많다. 그렇지만, 위의 방법을 이용해 구해진 보행자 높이의 풍속자료들은 스케일상의 문제로 신뢰도가 떨어진다고 할 수 있으며(Friedrich *et al.*, 2001), 이에 대한 비교연구나 신뢰도 검증에 대한 연구도 거의 전무한 상태다. 이처럼 지역적 스케일에서의 분석 방법은 어느 정도 정립되어 가고 있으나, 미기후적 스케일에서는 복잡한 도시구성 형태 때문에 아직 연구되어야 할 부분이 많다고 할 수 있겠다. 그래서, 보통 미기후적 스케일에서의 풍속자료는 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 현장에서 실측한 자료를 비교 분석한 뒤 보정하여 이용하고 있는 실정이다.

국내에서는 인간 생기후지도에 대한 연구는 아직 수행되지 않고 있으며, 인간을 제외한 도시기후지도에 대한 연구는 서울시정개발연구원 도시환경부에서 2006년부터 지역적 스케일의 서울시 기후지도제작 연구과제를 수행하였으며(김운수와 이석민, 2006; 김운수 등, 2007), 국립기상연구소 응용기상연구과에서 서울기후분석지도를 작성하였다(이채연 등, 2011). 미기후적으로는 2005년에 청계천·서울숲에 대한 연구과제(조용현과 김운수, 2005)가 수행되었다. 그러나, 국립기상연구소의 서울기후분석지도를 제외한 위의 세 가지 연구는 이론적 접근에 대한 이해가 부족했다고 할 수 있겠다. 미기후 분석 시 기온, 습도, 풍속, 태양 및 지구 복사에너지를 다 측정하여야 그 지점/지역에 대한 연구를 수행할 수 있는데, 위의 연구들은 태양 및 지구 복사에너지에 대한 측정을 하지 않았으며, 기후지도 제작 시 외국에 있는 기존 사례를 그대로 인용하고자 함으로써 토지이용이나 피복현황에 따른 한국형 지수들에 대한 연구가 없었다. 국립기상연구소의 서울기후분석지도도 독일의 모델에 한국의 특성을 반영하지 않고 적용하였으므로 실측 자료와의 비교분석을 통한 검정과정을 거쳐야 그 결과에 대한 신뢰성을 검증받을 수 있을 것이다.

II. 방법

1. 연구 대상지

연구 대상지는 도시지역 중 가장 복잡한 공간구성을 보이고 있는 중심상업지역과 그와 반대의 미기후적 효과를 나타낼 것으로 보이는 도심공원을 포함하는 지역을 선정하였다. 선정지역은 대구광역시 중구에 위치한 국채보상운동공원과 2.28공원을 포함하고 있는 중심상업지역으로, 그 크기는 705×450m이다(그림 1b 참조). 중심상업지역은 복잡한 도시공간구성으로 일률적인 주택지역이나 공업지역보다 다양한 열환경 현상을 보

여출 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 그 옆에 위치한 도심공원들은 수목과 피복형태의 영향으로 중심상업지역과는 뚜렷하게 다른 열환경 형태를 보일 것으로 생각된다.

풍속자료 구축을 위해 미기후 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met 3.1(<http://www.envi-met.com>)을 이용하였는데, 이 프로그램에서 최대 분석 가능한 픽셀사이즈인 250×250×30에 맞게 한 픽셀 당 3m를 기준으로 했을 때, 최대 가로 세로 750m가 입력자료로서 구축 가능하였다. 픽셀 당 크기는 중심상업지역에서는 최소 건물크기나 가로의 폭을 생각했을 때 3m보다 더 크게 할 수 있었으나, 도심공원에서는 수목의 크기나 산책로의 크기가 3m보다 작은 지역도 있으므로 최대 3m로 선정하였다. 복사에너지 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 HURES 모델(Human-Urban Radiation Exchange Simulation model; Park, 2011)과 ENVI-met 3.1을 위해 두 공원을 포함한 중심상업지역뿐만 아니라, 그 주변지역까지 포함하여 705×450m(235×150 픽셀)를 분석대상으로 정하였다. ENVI-met 3.1은 지표면 높이에 대한 입력기능이 없으므로, 대상지는 평지여야 한다는 단점이 있는데, 이 연구 대상지는 국채보상운동공원안의 농구장 북쪽에 위치한 산책로를 제외하고는 평지에 위치해 있어 문제가 되지 않았다. 그 산책로는 평지보다 1~2m 높은 마운드

모양으로 수목에 의해 완전히 덮여져 있는 형태여서, 지표면의 높이를 수목의 높이에 더해 자료를 구축하였다.

시간적 범위로는 도시 열환경이 가장 높게 나타나는 여름철 맑은 날 12:00~15:00를 기준으로 하였다. 실제 그 기준에 맞는 날들은 많지가 않았으며, 이번 연구에서는 자료 측정이 9월 2일에는 국채보상운동공원과 중심상업지역에서 이뤄졌으며(그림 1a 참조), 9월 6일에는 전 지역에서 이뤄졌다(그림 1b 참조).

자료측정 방법으로는 이동식 방법을 이용하여(그림 2 참조), 9월 2일에는 23지점을, 6일에는 47지점을(그림 1, 표 1 참조) 한 지점 당 1분30초~2분씩의 측정시간을 기준으로 미기후 자료(기온, 상대습도, 풍속, 태양 및 지구 복사에너지)를 모았다.

그림 2. 이동식 측정

표 1. 측정 지점

9월 2일 측정지점 번호	9월 6일	장소	지표면 재질	양지/음지
1	1	국채보상운동공원	화강암 (회색)	양지
2	2	국채보상운동공원	관석 (검은색 현무암)	양지
3	3	국채보상운동공원	벽돌 (붉은색)	양지
4	4	국채보상운동공원	관석 (검은색 현무암)	음지 (나무그늘)
5	5	국채보상운동공원	잔디	양지
6	6	국채보상운동공원	관석 (화강암)	양지
7	7	국채보상운동공원	벽돌 (붉은색)	양지
	7	국채보상운동공원	관석 (화강암)	양지
8	8	국채보상운동공원	관석 (검은색 현무암)	음지 (나무그늘)
9	9	국채보상운동공원	벽돌 (베이지색)	양지
	9	국채보상운동공원	벽돌 (붉은색)	양지
10	10	국채보상운동공원	관석 (검은색 현무암)	음지 (소나무그늘)
11	11	국채보상운동공원	관석 (검은색 현무암)	음지 (단풍나무그늘)
12	12	국채보상운동공원	벽돌 (붉은색)	음지 (단풍나무그늘)

그림 1. 연구 대상지

(표 1. 계속)

14	12	국채보상운동공원	판석 (자연석)	음지 (파고라 밑)
15	13	국채보상운동공원	잔디	양지
16		국채보상운동공원	벽돌 (붉은색)	양지
18	14	국채보상운동공원	화강암 (회색)	음지 (등나무 파고라와 나무그늘)
	15	국채보상운동공원	벽돌 (붉은색)	양지
13	16	국채보상운동공원	화강암	양지
17	17	국채보상운동공원	화강암	양지
19	18	중심상업지역	화강암	양지
20	19	중심상업지역	화강암	음지 (건물그늘)
21	20	중심상업지역	화강암	음지 (건물그늘)
	21	중심상업지역	화강암	양지
	22	중심상업지역	화강암	양지
	23	중심상업지역	화강암	음지 (건물그늘)
	24	중심상업지역	화강암	양지
	25	중심상업지역	벽돌	양지
	26	중심상업지역	벽돌	음지 (건물그늘)
	27	2.28공원	화강암	양지
	28	2.28공원	판석 (자연석)	양지
	29	2.28공원	판석 (검은색 화강암)	양지
	30	2.28공원	판석 (검은색 화강암)	음지 (나무그늘)
	31	2.28공원	벽돌	음지 (나무그늘)
	32	2.28공원	벽돌	양지
	33	2.28공원	화강암	양지
	34	2.28공원	나무	음지 (막구조 밑 그늘)
	35	2.28공원	나무	양지
	36	2.28공원	잔디	양지
	37	2.28공원	화강암	양지
	38	2.28공원	벽돌	양지
	39	2.28공원	화강암	양지
	40	보도	화강암	음지 (나무그늘)
	41	보도	화강암	음지 (건물그늘)
	42	보도	화강암	양지
	43	보도	화강암	음지 (참나무그늘)
22	44	보도	화강암	음지 (참나무그늘)
	45	국채보상운동공원	벽돌	양지
	46	국채보상운동공원	벽돌	음지 (단풍나무그늘)
23	47	국채보상운동공원	벽돌	음지 (단풍나무그늘)

2. 분석 방법

현장에서 측정된 미기후 자료는 기온, 상대습도, 풍속, 태양 및 지구 복사에너지, 지표면 온도이다. 이 중 태양 및 지구 복사에너지와 지표면 온도를 이용하여 도시 공간 구성 물질의 태양 복사에너지 반사율(albedo or reflectivity)과 지구 복사에너지 방사율(emissivity)을 산출하였다. 태양 및 지구 복사에너지를 이용한 평균복사온도(mean radiant temperature), 기온, 상대습도, 풍속 자료는 인간 열환경 지수(human thermal sensation)인 PMV와 UTCI를 계산하기 위한 입력 자료로서 사용되었다(박수국, 2012).

태양 및 지구 복사에너지는 CNR4 Net-radiometer와 CR1000 datalogger(Kipp & Zonen Inc. of Delft, The Netherlands: <http://www.kippzonen.com>)를 이용하여 지상 1.2m 높이에서 측정되었다(표 2 참조). 기온, 상대습도와 풍속은 Davis Pro(<http://www.davisnet.com>)를 이용하여 복사에너지와 같은 높이에서 측정되었다. 건물 벽 및 지표면 온도는 적외선 온도계(Infrared thermometer) Testo 830-T1(<http://www.testo.com>)을 이용하여 측정표면에서 20cm 정도 떨어져 측정하였다.

연구 대상지에서 측정된 미기후 자료들은 하루 중 가장 높은 열환경을 나타내는 12:00~15:00 사이에 이동식으로 획득되었으므로, 각 장소별 비교를 위해서는 동시간대의 자료로 보정하여야 한다. 처음 측정을 시작한 장소를 마지막에 다시 측정한 뒤, 재질별로 시간별 변화율이 동일하다고 가정한다. 보정비용은 식 1을 이용하여 찾아낸 후, 식 2를 이용하여 측정값들을 보정한다. 보정할 측정값들은 지표면 온도, 기온, 상대습도, 태양 및 지구 복사에너지이다.

$$\text{보정비용} = \left\{ \frac{(\text{마지막 측정값} - \text{처음 측정값})}{\text{마지막 측정값}} \right\} / (\text{마지막 측정시간} - \text{처음 측정시간}) \quad (\text{식 1})$$

$$\text{보정된 값} = \text{측정된 값} - \{ \text{측정된 값} \times (\text{측정된 시간} - \text{처음 측정 시간}) \times \text{보정비용} \} \quad (\text{식 2})$$

생기후지도 작성을 위한 인간 열환경 지수 분석을 위해서는 크게 기후자료와 도시공간자료가 필요하다. 기후자료는 기온,

표 2. 측정 장비

측정 자료	장비명
복사에너지(Wm^{-2})	CNR4 Net-radiometer CR1000 datalogger
기온($^{\circ}\text{C}$)과 상대습도(%)	Davis Pro
풍속(ms^{-1})	Davis Pro
건물 벽 및 지표면 온도($^{\circ}\text{C}$)	Testo 830-T1

(상대)습도, 풍속과 평균복사온도이다(ISO 7730, 2005; Bröde *et al.*, 2011a). 도시공간자료는 그 공간을 구성하고 있는 (1) 건물 벽, 지표면 및 수목의 종류와 색깔에 따른 태양 복사에너지 반사율이나 표면온도에 영향을 미치는 열 흡수율 및 전도를 그리고 수목의 태양 복사에너지 투과율(permeability)과, (2) 복사에너지와 풍속에 영향을 미치는 지표면 높이, 건물과 수목의 높이와 위치, 건물 벽의 방향에 따른 공간 배치를 들 수 있다. 도시공간자료는 대구광역시 지리정보시스템 자료와 항공사진을 이용하여 지표면 높이; 건물의 위치, 방향 및 높이; 수목의 위치와 크기에 대한 정보들을 획득하였고, 수목 높이에 대한 자료들은 직접 현장에서 줄자와 경사계(clinometer)를 이용하여 측정하였다. 위의 자료들을 이용하여 3차원 공간인 도시 옥외공간에서 그 공간을 이용하는 사람들에게 영향을 주는 태양 복사에너지(solar radiation), 지구 복사에너지(terrestrial radiation), 현열(sensible heat flux density) 및 잠열(latent heat flux density)을 시간대별로 정량화하여 그 공간을 이용하는 사람들이 열생리적(thermophysiological)으로(예: 매우 덥다, 덥다, 따뜻하다, 적당하다, 서늘하다, 춥다, 매우 춥다) 어떤 영향을 받는지를 수치화한 것이 인간 열환경 지수이다(박수국, 2012).

위의 지수를 이용하여 주변 공간에서 인체에 영향을 미치는 네 가지 (열)에너지들에 대해서 분석하게 되는데, 그 중 복잡한 도시공간구성에 의한 복사에너지 분석이 제일 중요한 과제로 떠오르고 있다(Matzarakis *et al.*, 2007; Thorsson *et al.*, 2007). 복사에너지 계산을 위해서는 컴퓨터 시뮬레이션 모델인 HURES 모델(Park, 2011; 박수국, 2012)을 이용하였으며, 모델 결과의 검증을 위해서 측정된 복사에너지와 비교 분석하였다. 기온과 습도자료는 연구대상지에서 Davis Pro를 이용해 측정된 자료를 이용하였으며, 풍속에 대한 자료는 ENVI-met 3.1을 이용하여 획득한 뒤, 현장에서 측정한 풍속자료와 비교 분석한 후 보정하여 사용하였다.

위의 자료들을 종합하여 가장 국제적으로 널리 사용되고 있는 열환경 지수인 PMV와 최근에 국제 생기상학회(International Society of Biometeorology; <http://biometeorology.org>)에서 개발한 UTCI를 이용하여 인간 생기후지도를 작성하였다. PMV와 UTCI 결과는 Fountain and Huizenga(1995)의 PMV 컴퓨터 코드와 UTCI 웹사이트에 나와 있는 공식을 Microsoft Visual Basic 2008을 이용하여 재코딩하여 Human Thermal Sensation Computer Program을 만들어 계산하였다(박수국, 2012).

III. 결과 및 토론

1. 기온과 습도

9월 2일에는 국채보상운동공원(그림 3a와 표 1 참조: 지점:

1~18, 22~23)과 중심상업지역(지점: 19~21)으로 나누어 비교해 볼 수 있는데, 기온은 중심상업지역(평균기온: 28.7°C)이 공원(27.4°C)보다 1.3°C 높게 나타났으며, 상대습도는 반대로 공원(평균: 62.5%)이 중심상업지역(57.9%)보다 4.5% 더 높게 나와 공원에 식재된 수목의 영향을 잘 보여주고 있다.

9월 6일에 측정된 대상지는 네 지역으로 나누어 비교해 볼 필요가 있는데, 그 지역들은 국채보상운동공원(그림 3b와 표 1 참조: 지점: 1~17, 45~47), 중심상업지역(18~26), 2.28공원(27~39)과 보도(40~44)다. 평균기온과 평균상대습도를 비교해 보면, 그 차이는 별로 나지 않는 것으로 나타났는데, 평균기온은 가장 높게 나온 중심상업지역과 2.28공원(27.2°C)이 다른 지역보다 최대 0.4°C 높게 나타났으며, 평균상대습도는 국채보상운동공원(35.8%)이 최저로 나온 보도(32.5%)보다 3.3% 높게 나온 정도였다. 평균값이 아닌 패턴의 형태를 보면 남-북 방향의 중심상업지역(지점: 18, 25~27)의 도로지역이 가장 높게 나타났으며, 같은 지역의 동-서 방향 도로지역에 비해 최대 0.5°C 높은 형태를 보였다. 이것은 지역풍인 서풍의 영향으로 풍속이 낮게 나온 남-북 방향의 도로지역이 지역풍의 영향을 받은 동-서 방향의 도로지역보다 기온이 높게 나온 현상을 보인 것이다. 가장 낮은 평균기온을 보인 지역은 보도지역과 보도 옆 단풍나무그늘 산책로(지점: 46~47)였다. 상대습도는 공원지역인 2.28공원과 국채보상운동공원이 높은 패턴을 잘 보여주고 있어 수목의 영향을 미루어 짐작할 수 있겠다. 가장 낮게 나온 지점(40)은 2.28공원 앞 버스 정류장 가로수 그늘 보도(29.0%)로 나타났으며, 가장 높게 나온 지점(11)은 국채보상운동공원 농

그림 3. 측정된 기온과 상대습도

범례: —●— Air temperature - - - - - Relative humidity

구장 옆 단풍나무 그늘 산책로(41.0%)로 나타나, 같은 수목의 그늘이라도 위치에 따라 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 특히, 버스 정류장은 교통수단에서 나오는 높은 인공열과 넓은 도로 옆에 위치해 바람에 의한 공기순환이 잘 이루어지는 곳이어서 가장 낮은 상대습도를 보였지만, 자세한 영향을 알기 위해서는 좀 더 깊은 연구가 요구된다.

2. 태양 및 지구복사에너지

9월 2일과 6일에 측정된 태양(K) 및 지구(L) 복사에너지와 지표면 온도(T_s)에 대한 결과는 그림 4에 나타나 있다. 하늘 반구(the sky hemisphere)에서 측정높이 1.2m에 미치는 태양 복사에너지($K\downarrow$)는 $800\sim1,000\text{Wm}^{-2}$ 로 가장 높은 값을 보였으며, 특히 태양 직사광선(direct beam solar radiation)의 유무에 따라 양지와 음지로 나뉜다. 그 차이가 9월 2일에는 749Wm^{-2} , 9월 6일에는 더 높은 843Wm^{-2} 로 나타났으며, 지표면 반구(the ground hemisphere)에서 오는 태양 복사에너지($K\uparrow$)도 양지와 음지의 차이가 $148\sim150\text{Wm}^{-2}$ 으로 나타났다(표 3 참조). 태양 복사에너지에서 보인 차이는 하늘 반구에서 온 지구 복사에너지($L\downarrow$)에서 보인 $-37\sim-39\text{Wm}^{-2}$ 보다, 지표면 반구에서 온 지구 복사에너지($L\uparrow$)에서 보인 $66\sim82\text{Wm}^{-2}$ 보다 훨씬 큰 차이를 보여 태양 복사에너지가 열환경에 더 강한 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 그 중 $L\downarrow$ 에서는 음지가 양지보다 더 높은 평균값을 보였는데, 그 이유는 수목이나 건물 벽의 표면 온도가 하늘보다는 더 높은 값을 가지기 때문에 방출되는 지구

표 3. 측정된 태양 및 지구 복사에너지 중 양지와 음지량 비교

날짜	9월 2일				9월 6일			
	$K\downarrow$	$K\uparrow$	$L\downarrow$	$L\uparrow$	$K\downarrow$	$K\uparrow$	$L\downarrow$	$L\uparrow$
양지 평균	820.0	158.8	421.4	532.6	892.1	153.7	402.3	533.0
음지 평균	71.0	9.0	460.2	467.1	48.9	5.8	439.4	451.5
차이	749.0	149.8	-38.8	65.5	843.2	147.9	-37.1	81.5

복사에너지양도 더 높았던 것이다.

음지도 다양한 형태로 구현될 수 있다. 건물에 의한, 수목에 의한, 건물과 수목의 복합적 형태로 나눌 수 있는데, 그 중 가장 $K\downarrow$ 의 양을 줄인 형태는 등나무 파고라에 나무그늘을 이중으로 조성한 형태로(9월 2일 지점 18과 9월 6일 지점 14), $K\downarrow$ 의 투과를 거의 막았으며 수평적으로도 태양분사광선(diffuse beam solar radiation)이 오는 하늘공간을 막음으로서 가장 효과적인 형태였다(그림 4 참조). 다음으로는 북향의 건물 벽 앞에 조성된 나무그늘로서(9월 2일 지점 4, 8과 9월 6일 지점 4, 30), 보통의 나무그늘효과에 건물 벽이 북향이라 태양직사광선이 직접 미치지 못함으로서 태양반사광선량도 줄이고 태양분사광선이 오는 하늘공간도 줄임으로서 이중적인 효과를 발휘하였다. 수목의 종류에 의한 그늘효과는 9월 2일에는 단풍나무 > 참나무 > 소나무 형태로 나타났지만, 9월 6일에는 세 수종 다 비슷한 결과를 나타냄으로서, 수종에 따른 효과보다는 어떻게 식재하느냐에 따라 그 효과가 달라질 수 있다는 것을 보여주었다. 여기서 비교된 세 수종의 그늘들은 햇빛 투과율(permeability)이 5% 미만의 높은 임관율폐도(canopy closure: 한 지점에서 보았을 때, 식생에 의해 가려지는 하늘 반구체의 비율, 임관밀도와 유사함)를 보였음을 밝혀둔다. 등나무를 이용한 파고라도 수목에 의한 그늘과 비슷한 차단효과를 나타내었다(9월 2일 지점 14와 9월 6일 지점 12). 건물에 의한 그늘효과는 보통 수목에 의한 효과보다 큰 것으로 나타났는데(9월 6일 지점 19, 20, 23, 26, 41), 건물은 태양직사광선을 100% 차단하며, 특히 측정 지점들이 중심상업지역에 위치해 있어서 주위 건물의 높이가 높아 태양분사광선이 미치는 양을 줄이는 효과도 보였기 때문이다. 9월 2일에 보인 건물에 의한 그늘(지점 20, 21)효과는 9월 6일에 비해 상당히 낮게 나타났는데, 측정지점들이 중심상업지역에 위치해 있어서 건물 유리창과 자동차에 의한 태양분사광선의 유입으로 이런 현상이 나타난 것으로 사료된다. 이 부분은 향후 연구가 더 필요할 것이다. 마지막으로, 2.28공원에 있는 공연을 위한 나무데크 위의 막구조(membrane structure)는 9월 6일 측정된 그늘지점의 자료 중 그늘효과가 가장 낮은 것으로 나타났다(지점 34).

지표면 재질에 따른 태양 반사 복사에너지($K\uparrow$)는 반사율에 의해 결정된다. 여기에서는 양지에서의 반사율만을 비교해 보았다. 단일 재질로서는 판석(0.08)이 가장 낮은 값을 나타냈지

그림 4. 측정된 복사에너지와 지표면 온도

범례: —■— $K\downarrow$ —△— $K\uparrow$ —○— $L\downarrow$ —◇— $L\uparrow$ —×— T_s

만, 9월 2일과 6일에는 지표면에서 1.2m 높이에서 측정되었고, 판석이 주로 좁은 산책로에 쓰였으므로 한 가지의 재질이 아닌 흙이나 잔디를 포함한 반사율 값을 가지게 되어 다소 높은 0.14 정도의 값을 갖게 되었다(표 4 참조). 화강암과 벽돌은 9월 2일에는 비슷한 값인 0.21의 값을 보였지만, 9월 6일에는 벽돌이 화강암보다 0.02 정도 더 높게 나타났다. 그러나, 그림 4에서 볼 수 있듯이 화강암과 벽돌은 다소 넓은 반사율 범위를 나타내었다. 화강암은 농구장 중앙(9월 2일 지점 13, 반사율: 0.33; 9월 6일 지점 16, 반사율: 0.31) > 국제보상운동공원 대중 앞(9월 2일 지점 1, 0.22; 9월 6일 지점 1, 0.24) > 2.28공원 입구와 공연광장(9월 6일 지점 27과 33, 둘 다 0.17) > 중심상업지역 보도(9월 2일 지점 19, 0.14; 9월 6일 지점 22와 24, 둘 다 0.11)로 표면 거칠기, 오염도, 색상에 따른 차이가 크게 나타났다. 벽돌도 0.16~0.27로 화강암과 같은 요인들로 다양한 값들을 나타내었다. 예외적으로 9월 6일 지점 25는 0.07로 가장 낮은 반사율을 보였는데, 그 원인으로는 측정지점이 건물 바로 옆이었으며, 그 건물 벽이 서북서(WNW)향으로 그늘져 있어서 1.2m의 측정 높이에 그 영향이 포함된 것으로 생각된다.

하늘 반구에서 오는 지구 복사에너지($L\downarrow$)는 하늘시계지수(sky view factor, SVF)와, 건물 벽과 수목과 같은 수직적인 도시공간 구성물질의 표면온도(T_g)에 의해 좌우된다고 할 수 있다. 도시공간 안에서는 건물과 수목 등 도시공간을 이루는 구성물질에 의해 다양한 SVF의 값들을 갖게 되는데, $L\downarrow$ 와의 상관성은 9월 2일에는 35.3%, 9월 6일에는 39.8%로 높게 나타나지 않았다(그림 5 참조). 그러므로, $L\downarrow$ 은 측정지점을 둘러싸고 있는 공간 구성물질의 평균표면온도와 상관성이 높을 것으로 생각되며, 건물 벽 재질과 수중에 따른 열 흡수율과 전달률이 다르므로 좀 더 깊이 있는 연구가 필요하다.

지표면 반구에서 오는 지구 복사에너지($L\uparrow$)는 지표면 온도(T_g)에 의해 가장 큰 영향을 받는다. 음지에서의 T_g 는 기온과 비슷하거나 조금 높게 나오므로 여기에서는 양지에서의 T_g 값에 대해 비교해 보았다(표 5 참조). 재질에 따른 T_g 의 값들은 판석과 화강암이 비슷한 결과를 보였으며, 벽돌보다는 9월 6일 최대 8°C 높은 결과를 보였는데, 이것은 $L\uparrow$ 로서 54Wm^{-2} 정도의 차이를 만드는 것이다. 조사된 지표면 재질 중 가장 높게 나타난 것은 나무 테크로서 2.28공원에 위치한 공연장에 설치되어 있으며, 9월 6일 61.4°C로 나타나 위의 4가지의 재질보다 거의 1.5배 높은 값을 보였으며, 창원대학교 캠퍼스에서 측정된

표 4. 지표면 태양 복사에너지 반사율

재질	9월 2일	9월 6일
회색 화강암	0.21±0.09	0.17±0.06
판석(+흙, 잔디)	0.14±0.01	0.14±0.02
벽돌	0.21±0.04	0.19±0.06

그림 5. 하늘시계지수(sky view factor, SVF)와 하늘반구(sky hemisphere)에서 오는 지구 복사에너지($L\downarrow$)와의 상관성 비교

범례: ◆ $L\downarrow$ vs SVF — Linear ($L\downarrow$ vs SVF)

표 5. 양지의 지표면 온도(T_g)

재질	9월 2일(°C)	9월 6일(°C)
화강암	44.2±2.9	43.4±2.6
판석	42.8±1.6	44.3±3.3
벽돌	39.2±1.8	37.6±4.1
잔디	37.6	34.1±1.1

결과와도 유사하였다. 잔디는 벽돌보다 9월 6일 3°C 정도 낮은 값을 보였다.

인간 생기후지도 제작을 위한 복사에너지 컴퓨터 시뮬레이션은 HURES 모델을 이용하였다. 입력자료로서 반사율과 방사율은 9월 2일과 6일 시뮬레이션을 위해 건물 벽(반사율: 양지 0.3, 음지 0.1; 방사율: 0.95), 수목(반사율: 양지 0.22, 음지 0.08; 방사율: 0.95), 지표면(반사율: 양지 0.2, 음지 0.1; 방사율: 0.95)의 값들을 양지와 음지로 나누어 적용하였다. 위의 값들은 2012년 5월 말에 창원대학교 캠퍼스에서 측정된 재질별 평균값들을 이용한 것이다.

HURES 모델 결과, $K\downarrow$ 는 측정된 복사에너지와 9월 2일에는 97.9%, 9월 6일에는 98.5%로 가장 높은 상관성을 나타냈다. $K\uparrow$ 와 $L\uparrow$ 는 70.0% 정도의 상관성을 보였으며, $L\downarrow$ 이 가장 낮은 30.0% 정도의 상관성을 보였다(그림 6 참조). 실제 그 차이량을 보면, 9월 6일에는 $K\downarrow$ 에서 가장 많은 차이를 보였으며

그림 6. 측정된 복사에너지양과 HURES 모델 결과 상관성 비교

범례: $\bullet$ $K_{\downarrow}$ $\times$ $K_{\uparrow}$ $\blacksquare$ $L_{\downarrow}$ $\bullet$ $L_{\uparrow}$
 — Linear ($K_{\downarrow}$) — Linear ($K_{\uparrow}$) - - - Linear ($L_{\downarrow}$) - - - Linear ($L_{\uparrow}$)

(평균 $41.0 \pm 43.4 \text{ Wm}^{-2}$), 대체적으로 좋은 모델링 결과치를 보였다(표 6 참조). 반면, 9월 2일 모델링 결과는 9월 6일에 비해 다소 큰 차이를 보였는데(평균 $89.7 \pm 77.8 \text{ Wm}^{-2}$), 9월 6일에 비해 9월 2일의 날씨가 구름이 다소 많았던 점과 대기 중 맑은 정도를 나타내는 Linke Turbidity factor (T_L)가 9월 6일의 4.5 보다 더 높았던 것으로 사료된다. 또한, 기존의 모델링 프로그램들이 가지고 있는 가장 큰 문제점인 수목에 의한 태양분사광선과 반사광선에서 오는 태양 복사에너지양 예측과 수목에서 방출되는 지구 복사에너지양 예측을 위한 수목 표면온도 계산식의 정확도도 영향을 미친 것으로 생각된다. HURES 모델도 이 부분은 계속 연구를 진행하여 정확도를 향상시켜야 할 것이다.

9월 2일과 6일 복사에너지를 기존의 값으로 나타낸 평균복사온도(mean radiant temperature, T_{mrt}) 결과를 그림 7에서 지도의 형태로 나타내어 보았다. T_{mrt} 은 인간 열환경 지수와 열쾌적성 모델(예: PMV, PET, UTCI)에 기온, 습도, 풍속과 함께 필수적인 입력자료다.

9월 2일과 6일의 T_{mrt} 은 크게 양지와 음지로 나뉘어지는데, 음지는 $15 \sim 37^\circ\text{C}$ 로 그늘진 건물 벽에 가까워 위치할수록 좁은

골목일수록 낮은 값을 보였다(그림 7a와 c 참조). 양지는 $45 \sim 63^\circ\text{C}$ 로 태양직사광선이 미치는 건물 벽에 가까울수록 SVF가 높을수록 높은 값을 보였다(그림 7b와 d 참조).

도시공간에서 복사에너지양에 큰 영향을 미치는 반사율의 영향을 검증해 보기 위해 기존의 HURES 모델 시뮬레이션에 이용했던 건물 벽과 지표면의 반사율을 반 값으로 줄여서 시험해 보았다[건물 벽(양지: 0.15, 음지: 0.05)과 지표면(양지: 0.1, 음지: 0.05)](그림 8 참조). 그 결과, 음지와 양지에서 공통적으로 최대 4°C 적은 값을 나타내었다. 이에 대한 열환경 지수의 영향은 '4. 인간 열환경 지수를 이용한 인간 생기후지도'에서 볼 수 있다.

그림 7. 평균복사온도(T_{mrt})

범례: 양지와 음지 14 39 63 ($^\circ\text{C}$)
 양지 42 52 63 ($^\circ\text{C}$)

그림 8. 9월 6일 낮은 반사율(albedo)값을 적용한 평균복사온도(T_{mrt}) 결과

범례: 양지와 음지 14 39 63 ($^\circ\text{C}$)
 양지 42 52 63 ($^\circ\text{C}$)

표 6. 측정된 복사에너지양과 HURES 모델 결과 비교

차이	9월 2일				9월 6일			
	$K_{\downarrow}$	$K_{\uparrow}$	$L_{\downarrow}$	$L_{\uparrow}$	$K_{\downarrow}$	$K_{\uparrow}$	$L_{\downarrow}$	$L_{\uparrow}$
양지 평균	120.7 $\pm$ 40.2	-16.9 $\pm$ 55.0	-24.4 $\pm$ 23.1	49.9 $\pm$ 23.2	42.8 $\pm$ 48.6	-8.7 $\pm$ 52.2	-17.7 $\pm$ 20.4	39.5 $\pm$ 25.0
전체 평균	89.7 $\pm$ 77.8	-10.1 $\pm$ 49.8	-30.9 $\pm$ 23.8	35.8 $\pm$ 35.7	41.0 $\pm$ 43.4	-2.6 $\pm$ 47.7	-22.0 $\pm$ 22.2	31.0 $\pm$ 27.9

그림 9. ENVI-met 풍속 결과

3. 풍속

인간 열환경 지수 예측을 위한 풍속 자료는 미기후 컴퓨터 시뮬레이션 모델인 ENVI-met 3.1을 이용하였다. ENVI-met은 전체적인 풍속에 대한 패턴을 보기에는 좋지만, 실제 측정된 값과는 차이가 나는 것으로 알려져 있어, 이 연구에서는 실제 한 값을 이용해 보정하여 인간 열환경 지수 분석에 이용하였다.

건물이 많은 중심상업지역은 보통 1.0ms^{-1} 이하였으며, 주 풍향이 남동풍인 9월 2일과 서풍인 9월 6일 모두 남-북 방향 도로보다는 동-서 방향 도로에서 좀 더 높은 풍속을 보였다(그림 9 참조). 풍속이 높게 나온 지역들은 동-서 방향의 큰 도로, 공원들(국채보상운동공원과 2.28공원)과 넓은 주차장 공간이었다. 최대 3.0ms^{-1} 이상의 풍속을 보였으며, 건물과 같은 불통 풍성 물질이 아닌 통풍성을 가진 수목에 의해 조성된 공원이 전체적으로 높은 값을 보였다.

그렇지만, ENVI-met의 풍속 결과는 실제 측정된 값들과 비교해 본 결과, 9월 2일에는 평균 $1.3 \pm 0.5\text{ms}^{-1}$, 9월 6일에는 평균 $0.81 \pm 0.83\text{ms}^{-1}$ 높게 나타났으며, 상관성도 아주 낮게 나왔다(그림 10 참조). 또한, 그 두 결과들의 차이값과 SVF를 비교해 보았지만, 그 상관성도 9월 2일에는 9.2%, 9월 6일에는

13.4%로 낮게 나타났다(그림 11 참조). 이 연구에서는 실제 측

그림 10. 측정된 풍속 자료와 ENVI-met 풍속 결과 비교

범례: ● Wind speed — Linear (Wind speed)

그림 11. 측정된 풍속 자료와 ENVI-met 풍속 결과의 차이값과 하늘 시계지수(Sky View Factor, SVF)와의 비교

범례: ● Sky view factor vs Wind speed difference — Linear (Sky view factor vs Wind speed difference)

정한 값과의 절대값 차이를 줄이는 것이 더 효과적이므로, 9월 2일에는 ENVI-met 결과에서 1.3ms^{-1} , 9월 6일에는 0.81ms^{-1} 의 값을 뺀 뒤 인간 열환경 지수 분석에 이용하였다.

4. 인간 열환경 지수를 이용한 인간 생기후지도

여기서는 인간 열환경 지수인 PMV와 UTCI를 이용해 작성된 인간 생기후지도를 분석해 보았다(그림 12 참조). 9월 2일 PMV는 음지(0.4~2.15)는 neutral(중간값, 답지도 춥지도 않은 상태)에서 warm(따뜻함) 정도의 결과를 보였으며, 양지(2.5~3.7)에서는 hot(더움)에서 very hot(매우 더움) 정도로 나타났다(그림 12a와 표 7 참조). 9월 6일에는 음지(-0.25~1.25)는 neutral에서 slightly warm(약간 따뜻함), 양지(1.75~2.75)는 warm에서 hot의 열환경 지수 결과를 보여 주어서(그림 12b 참조), 9월 6일이 2일에 비해 좀 덜 더운 열환경을 보였던 것으로 나타났다. 9월 2일이 6일에 비해 기온이 0.5°C 높았고, 그 영향으로 복사에너지양도 높아지게 되었으며, 습도도 27% 높아 인체에서 방출되는 잠열(latent heat flux density)을 감소시키는 효과를 나타내었고, 평균 풍속도 낮아(그림 10 참조) 인체에서 방출되는 잠열 및 현열(sensible heat flux density)을 감소시켜, 종합적으로 더 높은 열환경 지수를 보이게 된 것이다.

UTCI 결과도 PMV 결과와 거의 비슷한 경향을 보였다. 9월 2일 음지($25\sim 31^{\circ}\text{C}$)는 neutral~warm, 양지($33\sim 38^{\circ}\text{C}$)는 hot을 보였으며, 9월 6일 음지($22\sim 28^{\circ}\text{C}$)로 neutral~warm, 양지($31\sim 35^{\circ}\text{C}$)로 warm~hot의 결과를 보였다(그림 12c와 d 참조).

태양 복사에너지 반사율의 영향을 알아보기 위해 9월 6일의 자료를 이용하여 열환경 지수를 알아보았다(그림 13 참조). 그 결과, PMV는 음지(-0.35~1.1)에서는 최대 0.15 감소시키는 효과가 있었으며, 양지(1.45~2.6)에서는 최대 0.3 감소 효과를

그림 12. 인간 열환경 지수 PMV와 UTCI 결과를 이용한 인간 생기후지도

범례: PMV -1.0 0 1 2 3 3.7
UTCI 20 30 38 ($^{\circ}\text{C}$)

그림 13. 9월 6일 낮은 반사율(albedo)값을 적용한 인간 열환경 지수 결과

범례: PMV -1.0 0 1 2 3 3.7
UTCI 20 30 38 ($^{\circ}\text{C}$)

표 7. 인간 열환경 지수 PMV와 UTCI 지표(Fanger, 1972; Bröde *et al.*, 2011a)

PMV	UTCI ($^{\circ}\text{C}$)	Thermal perception	Grade of physiological stress	Interpretation
Standing (70Wm^{-2})	Walking (135Wm^{-2})			
< -3.5	< -40	Very cold	Extreme cold stress	
	-27 ~ -40		Very strong cold stress	
-2.5 ~ -3.5	-13 ~ -27	Cold	Strong cold stress	Would prefer to be much warmer
-1.5 ~ -2.5	0 ~ -13	Cool	Moderate cold stress	Would prefer to be warmer
-0.5 ~ -1.5	9 ~ 0	Slightly cool	Slight cold stress	
-0.5 ~ 0.5	9 ~ 26	Neutral	No thermal stress	Would prefer no change
0.5 ~ 1.5		Slightly warm	Slight heat stress	
1.5 ~ 2.5	26 ~ 32	Warm	Moderate heat stress	Would prefer to be cooler
2.5 ~ 3.5	32 ~ 38	Hot	Strong heat stress	Would prefer to be much cooler
	38 ~ 46		Very strong heat stress	
> 3.5	> 46	Very hot	Extreme heat stress	

나타났다. 특히, 양지에서는 넓은 광장(0.15 감소효과)보다는 골목길(0.3 감소효과)과 같이 낮은 PMV값을 나타내던 지역에서 더 높은 감소효과를 보였다. UTCI에서는 결과의 차이가 없는 것으로 나타남으로서 복사에너지에 대한 영향을 잘 반영하지 못하는 것으로 사료된다. 그러므로, 실제 건물 벽과 지표면 태양 복사에너지 반사율을 0.15와 0.1만큼 감소시켰을 때 음지보다는 양지에서 더 효과적이었으며, 최대 한 지표(예: warm과 hot 사이)의 1/3만큼 열환경 지수를 완화시키는 효과를 줄 수 있는 것으로 나타났다.

IV. 결론

이 연구는 대구광역시에 위치한 중심상업지역을 포함한 공원지역을 대상으로 미기후 실측과 컴퓨터 시뮬레이션을 이용해 여름철 인간 열환경 지수를 분석하고, 그 지수를 이용해 인간 생기후지도를 제작하여 도시·조경계획 및 디자인에 이용할 방법을 찾는 데 목적을 두었다.

연구결과로서, 첫째, 풍속이 낮았던 9월 2일에 중심상업지역이 공원보다 평균기온이 1.3℃ 높게 나왔으며, 상대습도는 반대로 공원이 4% 높게 나타났다. 풍속이 2일보다 높았던 9월 6일에는 지역별 평균기온과 평균상대습도의 차이는 최대 0.4℃와 3%로 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 주풍방향과 같은 방향의 도로(여기서는 동-서 방향)보다 직각의 방향(남-북)의 도로의 기온이 0.5℃ 높게 나타나, 지역풍의 영향을 적게 받는 지역이 좀 더 높은 열환경을 가지게 됨을 알 수 있었다.

둘째, 복사에너지에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 태양직사광선이었으며, 전체적으로 맑은 날에는 태양 복사에너지가 지구 복사에너지보다 열환경에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 특히, 태양직사광선을 막는 것이 여름철 더운 열환경을 줄이는데 가장 효과적이었으며, 그 방법으로는 건물, 수목, 건물과 수목을 이용하는 형태를 생각해 볼 수 있다. 그 중 가장 효과적인 방법은 등나무 파고라에 수목그늘을 만드는 방법이었으며, 다음으로는 북향의 건물 벽 앞에 조성된 나무그늘이 효과적이었다. 수목의 종류에 따른 효과만큼 식재방식에 따른 효과도 큰 것으로 나타났다.

셋째, 태양 복사에너지 반사율(albedo)은 판석이 0.14 정도로 화강암과 벽돌의 0.21보다 낮게 나왔지만, 같은 재질이더라도 표면거칠기, 오염도, 색상에 따라 차이가 났다. 반사율 조절효과로서 건물 벽 0.15와 지표면 0.1만큼 변화시켰을 때, 평균복사온도(T_{mrt})는 최대 4℃ 감소했다.

넷째, 인간 열환경 지수로서 음지는 중간(neutral)에서 따뜻함(warm) 정도로 나왔으며, 양지는 따뜻함(warm)에서 매우 더움(very hot)으로 나와 하늘시계지수(sky view factor, SVF)

가 높은 광장보다는 낮은 골목길에서 좀 더 나은 열환경을 보였다. 건물 벽 0.15와 지표면 0.1 반사율 변화 효과는 열환경 지수에서 음지에서는 한 지표의 1/6, 양지에서는 1/3 변화 효과가 있는 것으로 나타났다.

위의 결과를 이용한 여름철 높은 열환경 개선 방안으로는, 첫째, 그늘 효과를 이용하는 방법: 인간 열환경 지수를 봄과 가을을 포함한 여름기간 동안 계산해 본 뒤, 더움(hot) 이상으로 나오는 시간적인 범위에 맞춰 태양의 고도와 방위각을 계산하여 그들이 요구되는 지역에 맞춰 식재의 위치, 수관 폭, 높이, 식재방법을 결정한다(박수국, 2012).

둘째, 재질을 변경하는 방법: 건물 벽, 수목, 지표면 재질의 태양 복사에너지 반사율과 방사율을 미리 파악하여 낮은 반사율과 방사율을 가지는 재질로 변경한다. 특히, 화강암이나 벽돌보다는 판석이 훨씬 낮은 반사율을 가지는 것으로 나타났다.

셋째, 복사에너지를 감소시키는 방법: 여름철 열환경에 가장 큰 영향을 미치는 복사에너지 감소 방안으로서, 덩굴식물을 이용한 파고라에 수목의 그늘을 드리운 이중차단방법이 가장 효과적인 방법이고, 북향의 건물 벽 앞에 수목을 이용한 그늘을 조성하는 방법도 상당히 효과적이다. 수목을 이용한 그늘 조성 시 적합한 수종 선정도 중요하지만 식재방법을 더 고려하여야 할 것이다.

넷째, 인간 생기후지도를 활용하는 방법: 도시의 넓은 지역을 생기후지도를 이용해 분석해 본 후, 열환경이 열악한 지역을 파악하여 그 지역에 적합한 열저감 대책을 마련한다.

미기후적 접근방식의 도시공간 열환경 연구는 기후변화의 대응방안으로서 도시·조경계획뿐만 아니라, 실제 디자인 단계에서도 활용할 수 있어, 향후 여러 가지 스케일로도 다양한 비교연구가 진행될 수 있을 것이다. 특히, 인간 열환경 지수를 이용한 인간 생기후지도의 활용성은 컴퓨터 시뮬레이션 모델의 정확도 향상과 방법론 개선과 더불어 도시·조경 계획 및 디자인 분야뿐만 아니라, 도시열섬연구, 여름철 일사병 및 겨울철 체감온도 정보 시스템 등 다양한 분야로도 적용가능 할 것이다.

인용문헌

1. 김운수, 이석민(2006) 서울시 기후지도제작 (1차년도), 서울시정개발연구원 도시환경부.
2. 김운수, 이석민, 최유진(2007) 서울시 기후지도제작 2차년도 학술용역, 서울시정개발연구원 도시환경부.
3. 박수국(2012) 인간 열환경 지수(Human Thermal Sensation)를 이용한 조경계획 및 디자인 방법, 한국조경학회지 40(1): 1-11.
4. 이채연, 엄정희, 최영진, 김규량(2011) 토지이용도와 기상모델을 이용한 서울기후분석(CAS) 지도 개발, 한국지리정보학회지 14(1): 12-25.
5. 조용현, 김운수(2005) 청계천·서울숲 조성에 따른 미기후 및 생태변화 조사연구, 서울시정개발연구원 도시환경부.
6. Bröde, P., D. Fiala, K. Blazejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, B. Tinz and G. Havenith(2011a) Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI), International Journal of

- Biometeorology, doi: 10.1007/s00484-011-0454-1.
7. Bröde, P., E. L. Krüger, F. A. Rossi and D. Fiala(2011b) Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI-a case study in Southern Brazil, *International Journal of Biometeorology*, doi: 10.1007/s00484-011-0452-3.
 8. Chen, L. and E. Ng(2011) Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: A simulation approach using Hong Kong as a case study, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13: 586-594.
 9. Fanger, P. O.(1972) *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill, New York.
 10. Friedrich, M., A. Grätz and G. Jendritzky(2001) Further development of the urban bioclimate model BIKLIM, taking local wind systems into account, *Meteorologisches Zeitschrift* 10(4): 267-272.
 11. Fountain, M. and C. Huizenga(1995) *A Thermal Sensation Model for Use by the Engineering Profession*, Environmental Analytics, Piedmont.
 12. Friedrich, M., A. Grätz and G. Jendritzky(2001) Further development of the urban bioclimate model UBIKLIM, taking local wind systems into account, *Meteorologische Zeitschrift* 10(4): 267-272.
 13. Höppe, P. R.(1993) Heat balance modeling, *Experientia* 49: 741-746.
 14. Höppe, P. R.(1999) The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, *International Journal of Biometeorology* 43: 71-75.
 15. ISO 7730(2005) *Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*, International Organization for Standardization, Geneva.
 16. Matzarakis, A.(2007) Climate and bioclimate information for tourism - The example of Evros Prefecture, In: Matzarakis A, de Freitas CR, Scott D (eds.) *Developments in Tourism Climatology*, pp. 12-17.
 17. Matzarakis, A., E. Rudel, M. Zygmontowski and E. Koch(2005) Thermal human bioclimatic conditions for Austria and the Alps, *Croatian Meteorological Journal* 40: 190-193.
 18. Matzarakis, A.(2007) Climate and bioclimate information for tourism - The example of Evros Prefecture, In: Matzarakis A, de Freitas CR, Scott D (eds.) *Developments in Tourism Climatology*, pp. 12-17.
 19. Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer(2007) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments-application of the RayMan model, *International Journal of Biometeorology* 51: 323-334.
 20. Ng, E.(2012) Towards planning and practical understanding of the need for meteorological and climatic information in the design of high-density cities: a case-based study of Hong Kong, *International Journal of Climatology* 32(4): 582-598, DOI: 10.1002/joc.2292.
 21. Park, S.(2011) *Human-Urban Radiation Exchange Simulation Model*, Ph.D. Dissertation, University of Victoria, BC, Canada.
 22. Thorsson, S., F. Lindberg, I. Eliasson and B. Holmer(2007) Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting, *International Journal of Climatology* 27: 1983-1993.
 23. UNEP(2006) *Sustainable Building and Construction Initiative*, United Nations Environment Programme.
 24. UNEP(2008) *Kick the Habit-The Reduction Cycle*, United Nations Environment Programme.

원 고 접 수 일: 2012년 11월 25일
 심사 일: 2013년 1월 22일(1차)
 2013년 2월 13일(2차)
 게재 확정 일: 2013년 2월 14일
 3인익명 심사필