인간 열환경 지수(Human Thermal Sensation)를 이용한 조경계획 및 디자인 방법[†]

박수국

캐나다 빅토리아대학교 지리학과

Landscape Planning and Design Methods with Human Thermal Sensation

Park, Soo-Kuk

Dept. of Geography, University of Victoria, British Columbia, Canada

ABSTRACT

Human thermal sensation based on a human energy balance model was analyzed in the study areas, the Changwon and Nanaimo sites, on clear days during the summer of 2009. The climatic input data were air temperature, relative humidity, wind speed and solar and terrestrial radiation. The most effective factors for human thermal sensation were direct beam solar radiation, building view factor and wind speed. Shaded locations had much lower thermal sensation, slightly warm, than sunny locations, very hot. Also, narrow streets in the Nanaimo site had higher thermal sensation than open spaces because of greater reflected solar radiation and terrestrial radiation from their surrounding buildings. Calm wind speed also produced much higher thermal sensation, which reduced sensible and latent heat loss from the human body.

By adopting climatic factors into landscape architecture, the human thermal sensation analysis method promises to help create thermally comfortable outdoor areas. The method can also be used for urban heat island modification and climate change studies.

Key Words: Human Energy Balance Model, Human Thermal Comfort, Microclimate, Urban, Urban Climate

국문초록

이 연구는 인간 에너지 균형 모델에서 출발한 인간 열환경 지수 분석 방법을 이용하여 캐나다 BC주에 있는 나나이모시 상업지구안 좁은 길과 경상남도 창원시 중심상업지구에 있는 소공원을 연구 대상으로 2009년 여름철 열환경을 분석한 것이다. 기후 입력 자료는 기온, 상대습도, 풍속, 태양 및 지구 복사에너지이었으며, 그 결과 인간 열환경 지수에 가장 크게 영향을 미치는 요소들은 태양 직사광선, 건물시계지수 그리고 풍속이었다. 음지는 약간 더운 정도의 열환경을 조성하는 것으로 나타나 매우 덥게 나타난 양지에 비해 훨씬 좋은 열환경을 조성하는 것으로 나타났다. 나나이모 연구 대상지에 있는 좁은 길들은 주변의 넓은 장소들에 비해 주변 건축물에서 나오는 태양 반사광선과 지구 복사에너지들이 더 많이 영향을 미쳐 훨씬 덥게 나타났다. 낮은 풍속에 의해서 인체에서 방출되는 현열과 잠열의 양이 현저히 줄어들어서 더

[†]: 이 논문은 2011년 한국조경학회 추계학술대회에서 발표한 논문을 토대로 추가 보완하여 작성하였다.

Corresponding author: Soo-Kuk Park, Climate Lab., Department of Geography, University of Victoria, P.O. Box 3060 Stn CSC Victoria, B.C., Canada V8W 3R4, E-mail: sooland@gmail.com

더운 열환경이 조성되는 것으로 나타났다.

기후요소를 조경에 접목하기 위해서, 인간 열환경 지수 분석 방법을 이용하는 것은 열환경적으로 쾌적한 옥외 공간 조성에 영향을 미칠 것이며, 도시 열섬 완화와 기후변화 연구에도 잘 이용될 수 있을 것이다.

주제어: 인간 에너지 균형 모델, 인간 열쾌적성, 인간 생기후도, 미기후, 도시기후

1. 서론

좋은 디자인이란 기능적 효율성과 미적 아름다움이 함께 고려되어야 한다. 기존의 많은 연구들에서 기능적 효과들에 대한 정량화 작업이 활발히 이루어지고 있는데, 최근에는 기후를 접목하고자 하는 시도가 있다(문수영 등, 2010; 이채연 등, 2011). 이것은 기존에 이미 이용되고 있는 기후를 이용한 기본적인 디자인 개념(예: 태양의 위치를 고려하여 여름에 태양 직사광선을 막거나 겨울 북풍을 막기 위한 식재)이 아니라, 조경공간을 포함한 도시 옥외공간을 이용하는 사람들에게 미치는 미기후적(microclimatic) 에너지양인 태양 복사에너지(solar radiation), 지구 복사에너지(terrestrial radiation), 현열(sensible heat flux density) 및 잠열(latent heat flux density)을 이용시간대별로 정량화하여 그 공간을 이용하는 사람들에게 기후적으로 쾌적한 환경을 만들어 주고자 하는 것이다. 이에 대한 연구들은 인간 에너지 균형 모델(human energy balance model)을 기초로 하여 인간 열환경 지수(human thermal sensation)로서 predicted mean vote(PMV; Fanger, 1972), physiological equivalent temperature(PET; Höppe, 1993; 1999), universal thermal climate index(UTCI; Bröde *et al.*, 2011a; 2011b) 등 여러 가지 모델들로 발전되어 이용되고 있다(Matzarakis *et al.*, 1999; 2007; 2010; Bröde *et al.*, 2011a; 2011b; Fiala *et al.*, 2011). 조경분야에서는 Brown and Gillespie(1986; 1995)가 comfort formula(COMFA) 모델을 만들어 최초로 '미기후를 이용한 조경디자인(microclimatic landscape design)'이라는 개념을 소개하였다.

국내에서도 최근에 열환경에 대한 연구가 초기 단계 진행되고 있으나, 태양 및 지구 복사에너지를 제외한 기온, 습도와 풍속만으로 열환경을 분석한다든지(이은주, 2006), 평균복사온도(mean radiant temperature, T_{mrt})를 인체에 흡수되는 총 복사에너지양을 온도로 전환한 값이 아닌 건물 및 지표면의 평균 표면온도로 잘못 이해한 경우(이정아 등, 2010), 조경설계나 디자인된 미래의 공간이 아닌 실존하는 공간에서만 사용할 수 있는 지수인 wet bulb globe temperature(WBGT)를 분석에 이용한 경우(이춘석과 류남형, 2010), 건축물의 영향을 배제하고 단순히 지표면 재료와 수목의 영향만을 연구한 경우(조현길과 안태원, 2010)가 있었지만, 이 모든 연구들이 조경계획과 디자인에 인간 열환경 이론을 도입하여 좀 더 쾌적한 공간을 창출

하고자 하는 긍정적인 시도였다.

이 연구의 목적은 캐나다 BC주 Nanaimo시 상업지역에 위치한 Nanaimo site와 경상남도 창원시 중심상업지구의 소공원 Changwon site를 연구대상지로 하여, 열환경 지수에 대해 정성적인 개념과 이론을 도출하고자 하는 것이 아니라, 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 정량적 분석으로, 그 결과를 실제 조경계획 및 디자인에 직접적으로 적용하는 방법을 찾아보고자 한 것이다. 시뮬레이션 결과는 조경계획 및 디자인에 유용하게 사용될 수 있는 인간 생기후도(human bioclimatic map) 형태로 만들어졌다.

1. 이론적 고찰

현재까지 기상청과 조경 및 도시계획쪽에서 활용되는 지수와 모델들로는 Wind chill(체감온도; Siple and Passel, 1945; Environment Canada, 2001), Humidex(불쾌지수; Thom, 1959), Heat index(열지수; Steadman, 1979; Rothfus, 1990), WBGT(wet bulb global temperature; Yaglou and Minard, 1957), PMV, COMFA, PET, UTCI가 있는데, 이 지수들(Wind chill, Humidex, Heat index)은 인간의 열환경에 영향을 미치는 모든 기후요소들인 기온, 습도, 풍속, 태양 복사에너지, 지구 복사에너지를 분석에 모두 포함시키지는 않으므로 조경계획과 디자인에 적용하기에는 한계가 있다고 하겠다. Wind chill은 기온과 풍속 요소만을, Humidex는 기온과 습도만을, Heat index도 기온과 습도만을 이용하지만, 임의의 환경을 만들어 고정된 복사에너지양과 풍속을 토대로 만들어진 좀 더 진보된 지수라고 할 수 있다. 기존의 도시 건축공간에서 인간의 열환경 분석에 이용되고 있는 WBGT는 모든 기후요소를 분석에 이용하지만, 아직 건설되지 않은 미래의 공간에 대한 분석은 할 수 없으므로, 이 모델도 조경계획이나 디자인에는 적합하지 않다.

현재 조경계획이나 디자인에 이용가능한 모델로서는 위에서 언급한 바 있는 PMV, PET, UTCI가 있다. 1970년대에 만들어진 PMV는 여러 연구자들에 의해 지속적으로 개량 발전되어 왔으며(Gagge *et al.*, 1986; ISO 7730, 2005), PMV를 기준으로 표현 단위를 사람들이 인식하기 쉬운 기온의 단위(°C)로 변화시켜 발전되어온 PET와 최근에 발표되어 생기상 국제학술지(International Journal of Biometeorology)에 활발하게 발

표되고 있는 UTCI는 태양과 지구 복사에너지를 직접 계산하는 방식이 아니라 인간의 신체에 흡수되는 총 복사에너지량을 기온의 형태로 바꾼 mean radiant temperature(T_{mrt})을 이용한다.

3차원 공간인 조경 및 도시 공간에서 T_{mrt} 를 계산할 수 있는 컴퓨터 프로그램으로는 RayMan(Matzarakis *et al.*, 2007; 2010), ENVI-met, TOWNSCOPE(Teller and Azar, 2001), SOLWEIG(solar and longwave environmental irradiance geometry-model: Lindberg *et al.*, 2008; Lindberg and Grimmond, 2011), Human-urban radiation exchange simulation(HURES) model(Park, 2011)이 있다. 이 중에서 RayMan과 ENVI-met은 그 결과가 실제 측정된 양과 많은 차이를 보인다고 보고된 바 있고(Thorsson *et al.*, 2007; Ali-Toudert, 2005; Park, 2011), TOWNSCOPE는 태양 복사에너지 중 건물이나 식재 등 다른 인공 구조물에 의해 반사되는 양과 지구 복사에너지는 계산식에 넣지 않았으며, SOLWEIG는 인체가 복사에너지와 상호교환하는 모델로 VDI(1998)가 제시한 육면체를 가정해 여섯 방향(동서남북과 하늘, 땅)에서 오는 복사에너지를 조합하여 인체에 미치는 양을 예측하는 방법을 사용하였는데, 최근(Lindberg and Grimmond, 2011)에 수목이 차지하는 시각적인 양(vegetation view factor)을 인공구조물이 차지하는 시각적인 양(building view factor)에서 따로 분리하여 계산식에 포함시켰으나, 지구 복사에너지 계산을 위해 수목의 표면온도를 기온과 같게 예상한다든지, 태양 직사광선이 건물이나 수목, 지표면에 미치는 부분과 미치지 않는 부분과의 시각적인 양의 분리가 되지 않는 점 등 반사되는 태양 복사에너지 부분과 지구 복사에너지 부분에서 앞으로 많은 개선이 요구되어진다. HURES model은 그 중 가장 최근에 업데이트된 인체 모델(Park and Tuller, 2011a)과 복사에너지 계산식(Park and Tuller, 2011b), 가장 발달된 시각적인 양 분석 방법을 이용해 태양 직사광선 유무에 따른 음지와 양지의 시각적인 양 분리와 지상에서의 수목과 건물의 시각적인 양 분리를 하여 태양 및 지구 복사에너지양 예측 모델에 이용함으로써 현재로서는 방법론적으로 가장 앞서 나가 있으나, 좀 더 많은 자료와의 비교를 통해 지구 복사에너지양 계산을 위한 표면 온도 예측식의 개선이 요구된다.

위의 T_{mrt} 예측 프로그램과 열환경 지수 모델들을 이용하여 인체가 느끼는 열생리학적(thermophysiological) 결과들을 예측할 수 있는데, 독일이나 홍콩의 경우는 이미 도시계획도에 열환경지수를 접목하여 인간 생기후도(human bioclimatic map)를 만들어 도시계획 및 개발에 중요하게 이용하고 있다(Chen and Ng, 2011).

2. 인간 에너지 균형 모델(Human Energy Balance Model)

이 모델은 기본 에너지 균형 모델을 기반으로 하는 것으로

‘들어오는 에너지양-나가는 에너지양=0’이라는 기본 에너지 개념을 기반으로 하여, 인간이 주변 환경과 교환하는 에너지양을 정량적으로 계산하는 방식이다. 기본 식은 식 1과 같다.

$$M + R + L + C + E + C_r + E_r + H = S \quad \text{식 1}$$

M 은 신진대사에너지(metabolic energy)를 뜻하며, 편안하게 앉아 있을 때 발생하는 신진대사에너지를 1.0 met(58 Wm^{-2})으로 할 때 편안하게 서 있는 자세일 때 1.2 met, 3.2km/h(0.9 m/s) 속도로 걸을 때 2.0 met 정도의 에너지를 신체에서 생산하게 된다(Refer to Figure 1: ASHRAE, 1997). R 은 태양 복사에너지(solar or shortwave radiation)를 뜻하며, 태양 직사광선(direct beam solar radiation, K_b), 건축물이나 수목에 의해 막히지 않은 하늘이 보이는 공간(sky view factor, SVF)에서 오는 분사광선(diffuse beam solar radiation, K_d) 그리고 건축물

Figure 1. Energy transfers between a human body and its surrounding environment

(K_{ro}), 수목(K_{veg}), 지표면(K_g)에서 반사되어 오는 반사광선(reflected solar radiation, K_r)으로 구성된다. L 은 지구 복사에너지(terrestrial or longwave radiation)를 뜻하며, 하늘 공간(L_a), 건축물(L_o), 수목(L_{veg}), 지표면(L_g)에서 방출되어 인체에 미치는 복사에너지와 인체에서 주변 공간으로 방출되는 복사에너지(L_b)로 구성된다. C 는 인체 피부와 주변 공기의 온도의 차이에 의해 발생하는 현열(sensible heat flux density)이며, E 는 인체 피부와 주변 공기의 습도의 차이에 의해 발생하는 잠열(latent heat flux density)을 뜻한다. C_r 과 E_r 은 호흡하는 동안 발생하는 현열과 잠열을 뜻한다. H 는 전도열(conductive heat flux density)로서 직접 신체의 일부가 다른 물체에 닿아서 두 표면의 온도 차이로 인해 발생하는 에너지 전달로서 옥외공간에서는 신발을 착용하므로 보통 계산식에서 제외되고 있다. 마지막으로, S 는 인체에 남은 에너지양을 말하며, 그 값이 양(+)의 값이면 인체가 방출한 에너지양보다 들어오는 양이 더 많다는 것을 의미하는 것으로 그 양에 따라 따뜻하다, 덥다, 매우 덥다는 생리적 반응(physiological response)이 나오게 되며, 그 값이 음(-)이면 인체에 들어오는 에너지양보다 나가는 양이 많다는 것을 의미하며, 그 양에 따라 시원하다, 춥다, 매우 춥다는 반응이 나오게 되는 것이다. 조경계획 디자인에서 S 의 값을 영(0)에 가깝게 조정 공간을 만드는 것이 기후요소를 이용하는 방법의 궁극적인 목표인 것이다.

II. 방법

1. 연구 대상지

위의 연구를 위해 북반구에 위치한 캐나다 비취주 나나이모시(Nanaimo, B.C., Canada: 49°10'N, 123°56'W; altitude, 12 m)에 위치한 북동-남서 방향의 좁은 길 두 곳과 대한민국 경상남도 창원시에 위치한 광장형태의 작은 공원(35°13'N, 128°41'E; altitude, 17m)을 대상으로 선정하였다(Refer to Figure 2). 선정이유로는 3차원 공간자료가 구축된 곳이라는 점과 바닷가에 위치하였으며, 나나이모시의 여름철 평균 최고기온¹⁾ 24.1℃와 창원시의 6월달 평균 최고기온²⁾ 25.7℃가 유사하다는 점이다. 이 연구는 두 장소를 비교하고자 하는 것이 아니라, 북반구에 위치한 도시들을 목표로 만들어진 컴퓨터 시뮬레이션 모델이 얼마나 정확한 결과를 도출하는가를 실제 측정된 자료와 비교하고자 하는 것으로, 향후 더 많은 대상지에 적용해 보고자 한다.

나나이모 대상지에서는 세 곳의 측정지점을 정하여 조사하였다. Nanaimo_1과 2는 북서쪽에 위치한 건물 앞에 위치시켜 오전과 이른 오후(14:00)까지 태양 직사광선이 미치도록 하였으며, Nanaimo_3는 Nanaimo_2의 맞은 편에 위치시켜 위의 두 장소와는 반대로 이른 오후가 되어서야 태양 직사광선이 미

Figure 2. Study sites

(Note: (a) and (d) were from Google maps, (c) and (f) were taken using Nikon Coolpix 8800 camera with Nikon FC-E9 Fisheye converter lens and Nikon UR-E18 converter adapter(from Park, 2011))

치는 장소로 정하였다. 이는 나중에 같은 미기후 공간안에서 태양 직사광선의 유무에 의해 생성되는 양지와 음지에서의 복

사에너지양들을 비교하기 위해서이다.

2. 미기후 자료 측정

태양 및 지구 복사에너지는 Nanaimo site에서 2009년 7월 26일 오전(9:00~11:00), 정오(12:00~14:00) 그리고 오후(15:00~17:00) 세 차례 이루어졌고, Changwon site에서는 2009년 6월 11일 11:30~17:00까지 이루어졌다. 모든 자료 측정날들은 100% 맑은 날들로 하였다. 태양 복사에너지 측정은 두 개의 pyrnanometer인 CMP 11(made by Kipp & Zonen, Delft, the Netherlands)과 Middleton EP08(made by Carter-Scott Design, Melbourne, Australia)을 아래 위로 붙여 각각의 pyranometer가 반구(half a sphere)씩을 커버하도록 하였다. 지구 복사에너지 측정을 위해 net-radiometer [= (incoming solar and longwave radiation) - (outgoing solar and longwave radiation)]인 NR Lite(made by Kipp & Zonen, Delft, the Netherlands)와 표면 온도를 잴 수 있는 열적외선 온도계(infrared thermometer)인 Raytek PM Plus(made by Raytek, Santa Cruz, CA, USA)를 이용하였다. 위의 측정된 데이터들은 CR23X micrologger(Campbell Scientific Inc.)에 5초 단위로 저장되었다. 풍속은 Kestrel 2000 Pocket Weather Meter(Nielsen-Kellerman, USA)로 측정하였으며, 기온과 습도는 sling psychrometer(Sato Keiryoki MFO, Co., Ltd., Japan)를 이용하여 측정된 건구 및 습구 온도로부터 계산되었다. 모든 자료 측정높이는 사람의 가슴높이인 1.2m를 기준으로 하였다.

3. 인간 열환경 지수 분석 방법

3차원 도시 공간안에서의 열환경을 분석하기 위해서는 크게 도시공간 구성요소에 대한 자료들과 기후 자료들이 필요하다. 도시공간 구성요소 자료는 네 가지로 구성되는데, 지표면 높이, 건물의 위치와 높이, 건물 벽의 방향 그리고 수목의 위치와 높이이다. 수목의 위치와 높이는 직접 현장에서 측정하여 자료를 구축하였으며, 나머지 세 가지는 Nanaimo시의 Department of Engineering과 창원국립대학교 환경공학과 ECOGIS lab에서 제공 받았다. 특히, 지표면과 건물의 높이 자료는 vector-based 자료였으므로, ArcGIS 9.2의 Toolbox 중 feature→raster conversion function을 이용하여 그 높이 자료들을 2m×2m raster-based 자료들로 변환시켰으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 다시ASCII 파일로 출력 저장하였다. 기후 자료로서는 기온, 습도, 태양 및 지구 복사에너지 그리고 풍속이 있다. 기온과 습도 자료는 측정된 자료를 사용하였고, 복사에너지는 Human-Urban Radiation Exchange Simulation(HURES) Model(Refer to Figure 3a: Park, 2011)을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하여 결과를 얻었다. 위의 HURES Model을 이용한 복사에너지 컴퓨터 시뮬레이션

a: Human-Urban Radiation Exchange Simulation (HURES) Model

b: Human Thermal Sensation Computer Program

Figure 3. Computer simulation programs

을 위한 기본 입력자료는 Table 1과 같다. 풍속은 ENVI-met 3.1을 이용하여 분석한 지상 1m 높이의 자료에 직접 측정된 자료를 이용하여 그 값들을 보정하여 분석에 이용하였다. Changwon site는 공원의 세 군데(북서쪽끝, 중간 그리고 남동쪽끝)에서 측정된 자료와 ENVI-met의 값들과의 평균 차이값과 하늘시계 지수(sky view factor, SVF)와의 상관관계가 높게 나타났으며($r^2=0.996$), 그 식은 아래와 같다.

$$\text{보정된 풍속} = \text{ENVI-met 풍속} + (1.4871 \times \text{SVF} - 0.6423) (\text{m/s})$$

식 2

그러나, 광장의 형태를 가진 Changwon site가 아닌 좁은 길의 형태를 가진 Nanaimo site에서는 하늘시계지수와 상관관계는 별로 높지 않게 나온 대신에($r^2=0.556$), 일률적으로 ENVI-met의 값들이 낮게 나타나($0.52 \pm 0.17 \text{m/s}$), 0.52m/s 를 일률적으로 더하여 보정하였다. 자세한 내용은 Park *et al.* (2011)를 참조하길 바란다.

인간 열환경 지수 분석을 위해 Fountain and Huizenga(1995)의 PMV 컴퓨터 코드를 Microsoft Visual Basic 2008을 이용하여 재코딩하여 Human Thermal Sensation Computer Program

Table 1. 복사에너지 시뮬레이션을 위한 기본 입력 자료. T_a 는 기온($^{\circ}\text{C}$), RH 는 상대습도(%)를 뜻함

Nanaimo, B.C., Canada					Changwon, Republic of Korea											
Latitude (°)		49°10'N (49.17°N)			35°13'N (35.22°N)											
Longitude (°)		123°56'W (123.93°W)			128°41'E (128.68°E)											
Altitude (m)		12			17											
Time Zone		GMT-8			GST/GMT+9											
North Arrow Rotation Angle (°)		0			45											
					July 26, 2009					June 11, 2009						
					Location morning	Time	Sunny/shady	T_a	RH	Location	Time	Sunny/shady	T_a	RH		
					2	9:37	sunny	25.1	68.9	Small Park	11:30	sunny	28.1	36		
					3	9:45	shady	25.0	68.5		12:00	sunny	28.3	34		
					3	10:12	shady	25.5	67.7		12:30	sunny	28.7	33		
					2	10:20	sunny	24.7	69.3		13:00	sunny	27.8	41		
					1	10:44	sunny	25.0	68.9		13:30	sunny	27.9	41		
					Noon	Time	Sunny/Shady	T_a	RH		14:00	sunny	28.6	38		
					1	12:08	sunny	22.9	77.7		14:30	sunny	29.3	40		
					2	12:34	sunny	26.0	70.0		15:00	sunny	29.2	40		
					3	13:17	shady	26.0	67.4		15:30	sunny	28.8	41		
					2	13:23	sunny	28.1	63.0		16:00	sunny	28.8	44		
					1	13:43	sunny	26.2	67.9		16:30	sunny	28.9	42		
					Afternoon	Time	Sunny/Shady	T_a	RH		17:00	sunny	29.1	42		
					1	14:54	shady	25.0	72.4							
					Emissivity and Albedo	Building walls	Vegetation (trees)	Ground	2		15:18	shady	27.2	65.6		
									3		15:28	sunny	27.2	65.6		
					Emissivity		0.9	0.95	0.95	3	15:46	sunny	28.7	62.4		
					Albedo	Sunny	0.30	0.22	0.15	2	15:53	shady	28.7	62.4		
Shaded	0.21	0.14	0.13	1		16:11	shady	25.3	68.1							

을 만들었으며(Refer to Figure 3b), 이를 이용하여 인간 생기 후도(Human Bioclimatic map)의 형태로 나타내어 보았다. 재 코드된 컴퓨터 코드는 Park(2011)에서 찾아 볼 수 있다.

III. 결과

1. 태양 및 지구 복사에너지

HURES Model을 이용한 복사에너지 예측량은 실제 측정된 복사에너지양과 큰 차이량을 나타내지 않았다. 상관관계는 태양 복사에너지양(K) 예측 부분에서 아주 높은 값을 보였으나, $r^2=0.9978$, 지구 복사에너지양(L) 예측 부분에서는 낮은 상관 관계를 나타내었다($r^2=0.1384$) (Refer to Figure 4). 그러나, 지구 복사에너지양은 거의 100Wm^{-2} 의 범위 안에 분포되어 있었으며, 실제 측정된 값과의 평균 차이값을 보면 큰 차이를 보이

Figure 4. Comparison between collected radiation and results of HURES model. K and L are solar and terrestrial radiation, respectively

지 않았으며 전체 평균 차이값은 $L\downarrow = -6$, $L\uparrow = 3\text{Wm}^{-2}$ 였다. 화살표 방향은 복사에너지가 오는 방향을 뜻하며, 인간 신체 기준 높이인 1.2m를 중심으로 $\downarrow$ 은 하늘반구(the sky hemisphere),

Table 2. 측정된 복사에너지양과 HURES Model 결과 차이값

Locations		Normal mean values (Wm^{-2}) ¹							Absolute mean values (Wm^{-2}) ²						
		K			L			Total	K			L			Total
		K↓	K↑	Total	L↓	L↑	Total		K↓	K↑	Total	L↓	L↑	Total	
Nanaimo	Sunny	-19	-9	-28	-18	-11	-29	-56	24	14	38	25	14	39	77
	Shaded	8	2	10	-13	-2	-15	-5	8	6	15	13	9	22	36
Changwon	Sunny	5	-34	-28	7	16	24	-5	13	34	47	12	17	29	76
Sunny location mean		-5	-23	-28	-4	5	1	-27	18	25	43	17	16	33	76
Overall mean		-2	-17	-19	-6	3	-3	-21	15	21	36	16	14	30	66

¹ 차이값의 평균 값, ² 절대차이값의 평균 값

↑은 지표면반구(the ground hemisphere)를 뜻한다. 실제 차이가 가장 큰 부분은 $17Wm^{-2}$ 를 보였던 K↑였다(Refer to Table 2). 오차의 원인으로는 먼저 지표면 및 건물의 높이 자료, 복잡한 지붕선 및 건물형태와 같은 도시구성 입력자료의 오차에서 찾아 볼 수 있다. 또한, 다양한 건물 외벽 재료들 및 지표면 재료들의 태양 복사에너지 반사율이나 표면온도 예측식이 너무 단순화된 것도 그 한 원인으로 볼 수 있다. 위의 문제점들은 향후 모델개선에 반영되어질 것이다.

2. 인간 열환경 지수

인간 열환경 지수(human thermal sensation)는 인간을 둘러싸고 있는 주변환경과의 열에너지 흐름을 미기후 단위로 정량적으로 분석하여 생리학적으로 인체가 느끼는 정도를 보여주는 것으로, 보통 7단계로 더움(hot), 따뜻함(warm), 조금 따뜻함(slightly warm), 중간(neutral), 조금 선선함(slightly cool), 선선함(cool), 추움(cold)으로 나누어진다(ASHRAE, 1997). PMV 지수는 9단계로 -3.5 이하(매우 추움)부터 3.5 이상(매우 더움)까지 나타내는데(Refer to Table 3), 이 연구에서는 열환경의 패턴을 보기 위하여 최대 6까지 나타내 보았다.

Changwon site의 경우에는 음지는 1(조금 따뜻함) 정도의 지수를 보였으며, 양지는 태양의 고도가 가장 높아서 태양 직사광선이 가장 강한 12:00보다는 지구 복사에너지가 더 방출되는 14:30에 가장 높은 열환경을 형성하는 것으로 나타났다(Refer to Figure 5). 전체적으로 태양 직사광선이 미치는 건물 바로 앞쪽이 지수가 높게 나왔는데, 그 이유로는 건물에 근접할수록 건물이 차지하는 건물 시계지수[building view factor = $1 - (\text{sky view factor} + \text{vegetation view factor})$]가 높아지므로 그 건물벽에서 나오는 태양 반사광선이 높으며, 높은 표면온도에서 방출되는 지구 복사에너지가 높게 나오기 때문이다. 11:30~16:30까지 계속 지수가 높게 나왔던 공원 오른쪽에 위치한 도로 지역은 바로 오른쪽에 위치한 건물의 높이(50m)가 다른 위치에 있는 건물들의 높이(13~40m)보다 월등히 높기 때문에,

Table 3. PMV 지수

PMV	Thermal sensitivity
	Very hot
3.5	
	Hot
2.5	
	Warm
1.5	
	Slightly warm
0.5	
	Neutral
-0.5	
	Slightly cool
-1.5	
	Cool
-2.5	
	Cold
-3.5	
	Very cold

그 영향으로 태양 반사광선과 지구 복사에너지를 강하게 방출하기 때문이며, 또한 풍속이 현저히 줄어드는 지점이라 현열과 잠열이 감소하는 장소였다(Refer to Figure 6a, b).

Nanaimo site는 오전 중에는 태양 직사광선이 미치는 건물 주변을 중심으로 따뜻한 정도에서 점점 더운 환경으로 이동되어 갔으며, 오후 1시를 지나서 매우 더운 환경으로 나타났다(Refer to Figure 7). 특히 좁은 길들 사이에서는 풍속이 떨어져 현열과 잠열이 감소하게 되었으며(Refer to Figure 6c, d), 둘러싸고 있는 건물들에 의해 형성된 높은 건물 시계지수에서 오는 태양 반사광선과 지구 복사에너지들이 높은 열환경을 조성하였다. 오후 3시를 넘어서는 건물에 의해 조성된 그늘효과로 몇 군데의 길에서는 조금 따뜻한 정도의 열환경을 만들었다.

그러므로, 인간 열환경 지수 분석에 크게 영향을 미치는 요

Figure 5. Human thermal sensation PMV maps of the Changwon site

Figure 6. Wind speed maps at the height of 1 m from the ENVI-met computer program at the Changwon and Nanaimo sites

Figure 7. Human thermal sensation PMV maps of the Nanaimo site

소로서 태양 직사광선 유무, 건물 시계지수에 따른 태양 반사광선량 및 지구 복사에너지양, 풍속에 따른 현열과 잠열의 변화로 볼 수 있겠다.

IV. 결론 및 고찰

이 연구는 캐나다 나나이모와 창원 연구대상지를 미기후 요소인 기온, 습도, 풍속, 태양 및 지구 복사에너지량을 이용하여 인간 에너지 균형 모델에 기초한 인간 열환경 지수를 컴퓨터 시뮬레이션 방법을 이용해 정량적으로 분석한 것이다.

태양 직사광선 유무, 태양 반사광선과 지구 복사에너지에 큰 영향을 미치는 건물 시계지수, 현열과 잠열에 큰 영향을 미치는 풍속이 인간 열환경 지수에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 음지는 인체에 미치는 태양 직사광선을 차단함으로써 여름철에 조금 따뜻한 정도의 열환경을 조성하여 매우 더운 열환경을 보인 양지에 비해 큰 효과를 보여 주었다. 나나이모 사이트의 좁은 길들은 주변의 넓은 공간들보다 주변에 둘러싼 건축물에서 오는 태양 반사광선과 지구 복사에너지로 더운 열환경을 만드는 것으로 나타났다. 또한, 풍속이 현저히 감소하는 좁은 길이나 건물 주변 공간에서는 인체에서 방출되는 현열과 잠열의 감소로 주변 공간보다 더운 열환경을 만드는 것으로 나타났다.

이제 조경계획 및 디자인 분야에서도 인간 열환경 지수를 고려한 기후적 요소의 도입은 필수적이며, 특히 도시계획에서 사용되고 있는 중규모(local or meso-scale) 단위의 분석보다는 소규모(micro-scale) 단위의 미기후 분석이 직접적으로 디자인에 적용할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

위의 결과를 바탕으로 조경계획 및 디자인에 적용하기 위한 방법을 생각해 보면, 첫째, 태양 직사광선을 어떻게 처리하는가 하는 문제에서 조경계획 및 디자인은 사계절을 모두 고려해야 하기 때문에, 여름철 더운 날씨에서는 원하는 시간대에 그늘을 조성하여 직사광선을 막아 주어야 하는데, 그러기 위해서는 그 시간대의 태양의 위치(고도와 방위각)를 알아서 수목의 위치, 높이, 폭을 정확히 계산하여 식재 위치를 선정하여야 할 것이다. 또한 봄과 가을에는 어느 정도의 직사광선이 들어오는 것이 적당한지 인간 열환경 지수를 계산해 보고 적합한 투과율을 가진 수종을 선정할 수 있으며, 겨울에는 직사광선을 최대한 받을 수 있도록 계획해야 하므로 침엽수보다는 활엽수를 선정하는 것이 적당한 것이다. 위에 언급한 것들을 고려하여 실제 컴퓨터 시뮬레이션을 하므로써 그늘패턴이나 수목의 투과율에 의한 영향을 직접적으로 파악할 수 있게 되는 것이다. 시뮬레이션이 여의치 않은 경우에는 태양의 위치를 기상청 태양 고도/방위각 계산 웹페이지나 NOAA Solar Calculator 웹페이지를 이용하면 쉽게 계산할 수 있다.

둘째, 인체에 미치는 태양 반사광선량과 지구 복사에너지량을 조절하는 방법이다. 태양 반사광선량은 하늘시계지수(sky view factor)와 연계된 태양 분사광선량과, 건물 벽의 향에 따른 태양 직사광선의 입사각에 의한 직사광선량, 건물 벽의 태양광 반사율(albedo)에 의해 계산되어질 수 있으며, 지구 복사에너지양 또한 유입되는 태양 복사에너지양에 따라 계산이 가능하다(Park, 2011). 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 열환경 지수가 높게 나온 지역을 먼저 파악한 후, HURES model의 결과 중 각 건물 벽의 태양 반사광선량과 지구 복사에너지양을 검토해, 그 양을 낮추기 위한 방법으로 태양광 반사율이 낮고 열 흡수율이 낮은 물질로 건물 벽을 바꾼다든지(외장 교체 또는 색 변화), 건물 벽면에 living wall이나 건물 앞에 수목을 식재하는 방법을 사용할 수 있을 것이다.

셋째, 풍속은 미기후 단위에서는 분석하기가 거의 불가능하지만, 기본적으로 수목도 다른 건축물처럼 풍속을 감소시킨다는 점을 염두에 두고 디자인을 고려해야 한다. 여름철에는 현열과 잠열에 의한 열 방출을 증대시키기 위해 식재 위치를 고려하여 풍속을 높이는 방향으로 식재 위치를 선정하여야 하고, 겨울철에는 그 반대로 현열과 잠열의 손실을 줄이기 위해 풍속을 줄이는 목적으로 식재 위치를 고려하여야 할 것이다. 이것은 ENVI-met을 통해 시뮬레이션해 본 후 직접 측정된 자료를 이용해 그 결과치를 보정하여 사용하면 될 것이다. 자료 측정이 용이하지 않다면 풍속의 패턴만을 고려하여도 디자인에 도움이 될 것이다.

현재까지 국내에서 미기후를 이용한 열환경 지수 분석 방법은 제대로 소개된 사례가 없으며, 한국형 모델 개발에 대한 기본적인 토의도 없었다. 기존에 만들어진 PMV, PET와 UTCI는 모두 서양인들(Caucasian)의 신체모델을 기준으로 그들의 생리적·심리적 요인을 적용한 것으로, 다른 기후대에 사는 다른 인종에게는 생리적(Lee *et al.*, 2009)으로나 심리적(Lin and Matzarakis, 2008)으로 다른 열환경 기준을 가지게 될 것이다.

한국형 모델을 만들기 위해서는 우선, 한국인을 대상으로 한 인체모형 제작이 선행되어야 할 것이다. 기존의 인체모형은 서양인들을 대상으로 한 것으로 최근에 밝혀진 결과에 따르면 기존의 결과치와 큰 차이를 보였다(Park and Tuller, 2011a). 두 번째로, 3차원 조경 및 도시 공간에서의 복사에너지 분석을 위해서 한국형 공간 구성 물질에 대한 태양 복사에너지 반사율(albedo) 및 지구 복사에너지 표면온도 예측모델을 위한 실측이 요구되어지고 있다. 마지막으로, Lin *et al.*(2010)가 보여준 기후대가 다른 서양인과 동양인의 열환경 쾌적성(human thermal comfort)이 다르므로, 한국인에게 맞는 모델 개발이 필수적이다.

열환경 쾌적성 분석을 통해 3차원인 조경 및 도시 옥외공간을 기후적으로 쾌적하게 조성하는 노력은 인간의 외부활동 시

간 증대와 삶의 질 향상에 크게 기여할 수 있으며, 향후 한국형 모델 개발 후 각 지역에 맞는 도시 생기후도를 작성함으로써 각 도시민들에게 기후적으로 최적화된 도시 개발 방향을 제시할 수 있을 것이다. 이 방법은 나아가 도시열섬완화 및 기후변화 연구로도 확대 적용되어질 수 있을 것이다.

주 1. Environment Canada, Canadian Climate Normals 1971-2000(http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/index_e.html)

주 2. Korea Meteorological Administration, Average Climatic Data 1971-2000(http://www.kma.go.kr/sfc/sfc_03_05.jsp)

인용문헌

- 문수영, 김현수, 이광복(2010) 환경생태계획의 도시기후 변화 대응 가능성 연구-남양주 월산리 마스터플랜을 중심으로. 한국생태환경건축학회 논문집 10(6): 11-19.
- 이은주(2006) 도시공간 구성요소와 열쾌적성과의 관련성 연구: 서울 사례지역을 중심으로. 한양대학교 도시대학원 석사학위논문.
- 이정아, 정대영, 전진형, 이상문, 송영배(2010) 공간 구조별 열쾌적성 평가와 열환경 개선방안. 한국조경학회지 38(5): 12-20.
- 이재연, 엄정희, 최영진, 김규량(2011) 토지이용도와 기상모델을 이용한 서울기후분석(CAS) 지도 개발. 한국지리정보학회지 14(1): 12-25.
- 이춘석, 류남형(2010) 조경조장이 옥외공간의 온열쾌적성지수(WBGT)에 미치는 영향-통풍과 차광이 배제된 하절기 주간의 조건에서. 한국조경학회지 38(2): 1-8.
- 조현길, 안태원(2010) 열쾌적성과 에너지절약을 위한 녹지계획 전략 연구. 한국조경학회지 38(3): 23-32.
- Ali-Toudert, F.(2005) Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg Nr.15, <http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/2078>.
- ASHRAE(1997) ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapter 8: Thermal Comfort. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta.
- 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.
- 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.
- Brown, R. D. and T. J. Gillespie(1986) Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermometer and an energy budget model. International Journal of Biometeorology 30: 43-52.
- Brown, R. D. and T. J. Gillespie(1995) Microclimatic Landscape Design: Creating Thermal Comfort and Energy Efficiency. Wiley, New York.
- 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.
- Fanger, P. O.(1972) Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGraw-Hill, New York.
- Fiala, D., G. Havenith, P. Bröde, B. Kampmann and G. Jendritzky (2011) UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. International Journal of Biometeorology, doi: 10.1007/s00484-011-0424-7.
- Fountain, M. and C. Huizenga(1995) A Thermal Sensation Model for Use by the Engineering Profession. Environmental Analytics, Piedmont.
- Gagge, A. P., A. Fobelets and L. G. Berglund(1986) A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Transactions 92 (2B): 709-731.
- Höppe, P. R.(1993) Heat balance modeling. Experientia 49: 741-746.
- 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.
- 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.
- Lee, J. B., J. S. Bae, T. Matsumoto, H. M. Yang and Y. K. Min (2009) Tropical Malaysians and temperate Koreans exhibit significant differences in sweating sensitivity in response to iontophoretically administered acetylcholine. International Journal of Biometeorology 53: 149-157.
- Lin, T. P. and A. Matzarakis(2008) Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. International Journal of Biometeorology 52: 281-290.
- Lin, T. P., A. Matzarakis and R. L. Hwang(2010) Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. Building and Environment 45: 213-221.
- Lindberg, F., B. Holmer and S. Thorsson(2008) SOLWEIG 1.0-modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. International Journal of Biometeorology 52(7): 697-713.
- Lindberg, F. and C. S. B. Grimmond(2011) The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. Theoretical and Applied Climatology, doi: 10.1007/s00704-010-0382-8.
- Matzarakis, A., H. Mayer and M. G. Iziomon(1999) Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. International Journal of Biometeorology 43: 76-84.
- 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.
- Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer(2010) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. International Journal of Biometeorology 54: 131-139.
- Park, S.(2011) Human-Urban Radiation Exchange Simulation Model. PhD dissertation, University of Victoria, BC, Canada.
- Park, S. and S. E. Tuller(2011a) Human body area factors for radiation exchange analysis: standing and walking postures. International Journal of Biometeorology 55(5): 695-709.
- Park, S. and S. E. Tuller(2011b) Comparison of human radiation exchange models in outdoor areas. Theoretical and Applied Climatology 105(3-4): 357-370.
- Park, S., S. E. Tuller and K. Park(2011) Human thermal sensation analysis method for landscape planning and design. Landscape and Urban Planning, in progress.
- Rothfus, L. P.(1990) The Heat Index 'Equation' (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index). Scientific Services Division (NWS Southern Region Headquarters) SR 90-23, Fort Worth, TX.
- Siple, P. A. and C. F. Passel(1945) Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. Proceedings of the American Philosophical Society 89: 177-199.
- Steadman, R. G.(1979) The assessment of Sultriness. Part I: a temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. Journal of Applied Meteorology 18: 861-873.

36. Teller, J. and S. Azar(2001) TownScopeII-A computer system to support solar access decision making. *Sol Energy* 70: 187-200.
37. Thom, E. C.(1959) The discomfort index. *Weatherwise* 12: 57-60.
38. 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.
39. VDI(1998) 3787, Part 2: Environmental Meteorology-Methods for the Human Biometeorological Evaluation of Climate and Air Quality for Urban and Regional Planning at Regional Level Part 1: Climate. Beuth, Berlin.
40. Yaglou, C. P. and D. Minard(1957) Control of heat casualties at military training centres. *A. M. A. Arch. Industr. Health*, 16: 302-316.
41. <http://astro.kasi.re.kr/Life/SolarHeightForm.aspx?MenuID=108>
42. <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=5FBF816A-1>
43. <http://www.envi-met.com>
44. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>
45. http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/Climate_Booklet/kap_2/kap_2-6.htm#
46. <http://www.utci.org>

원 고 접 수 일: 2011년 11월 29일
 심 사 일: 2012년 1월 6일(1차)
 2012년 2월 2일(2차)
 게 재 확 정 일: 2012년 2월 5일
 3 인 의 명 심 사 필