여름철 낮 그늘시렁의 차양이 온열쾌적 지표에 미치는 영향[†]

류남형 · 이춘석

경남과학기술대학교 조경학과

Pergola's Shading Effects on the Thermal Comfort Index in the Summer Middays

Ryu, Nam-Hyong · Lee, Chun-Seok

Dept. of Landscape Architecture, Gyeongnam National University of Science and Technology

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the effects of pergola's shading on the thermal comfort index in the summer. The 3 type of pergolas(4m×4m×h2.7m) which were screened overhead(Ⅰ)/overhead·west(Ⅱ)/overhead·west·north(Ⅲ) plane with reed blind for summer shading and winter wind break, were constructed on the 4th floor rooftop. Thereafter the meteorological variables(air temperature, humidity, radiation, and wind speed) of pergola Ⅰ, Ⅲ and rooftop were measured from 14 to 16 August 2013(1st experiment), those of pergola Ⅰ, Ⅱ and rooftop were measured from 26 to 28 August 2013(2nd experiment). The effects of pergola's shading on the radiation environment and mean radiant temperature(T_{mrt}), standard effective temperature(SET^*) were as follows.

The maximum 1 h mean values of differences Δ of the sums of shortwave radiant flux densities absorbed by the human body ($\Delta K_{abs, max}$) between pergola Ⅰ, Ⅲ and nearby sunny rooftop were $-119W/m^2$, $-158W/m^2$, those between pergola Ⅰ, Ⅱ and rooftop were $-145W/m^2$, $-159W/m^2$. The maximum 1 h mean values of differences Δ of the sums of long wave radiant flux densities absorbed by the human body ($\Delta L_{abs, max}$) between pergola Ⅰ, Ⅲ and nearby sunny rooftop, were $-15W/m^2$, $-17W/m^2$, those between pergola Ⅰ, Ⅱ and nearby rooftop, were $-8W/m^2$, $-7W/m^2$. The response of the direction dependent long wave radiant flux densities L_1 on the pergola's shading turned out to be distinctly weaker as compared to shortwave radiant flux densities K_1 .

The pergola's shading leads to a lowering of T_{mrt} and SET^* . The peak values of T_{mrt} absorbed by the human body were decreased $16^\circ C$ and $21.4^\circ C$ under pergola Ⅰ and Ⅲ as compared to that of nearby rooftop in the 1st experiment. Those were decreased $18.8^\circ C$ and $20.8^\circ C$ under pergola Ⅰ and Ⅱ as compared to that of nearby rooftop in the 2nd experiment. The peak values of SET^* absorbed by the human body were decreased $2.9^\circ C$ and $2.6^\circ C$ under pergola Ⅰ and Ⅲ as compared to that of nearby rooftop in the 1st experiment. Those were decreased $3.5^\circ C$ and $2.6^\circ C$ under pergola Ⅰ and Ⅱ as compared to that of nearby rooftop in the 2nd experiment. The relative SET^* decrease in pergola Ⅱ, Ⅲ compared to nearby sunny rooftop SET^* were lower than that in pergola Ⅰ, revealing the influence of the wind speed. Therefore it is essential to design pergola to maximize wind speed and minimize solar radiation to achieve comfort in the hot summer.

[†] : 이 논문은 2013년도 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

Corresponding author: Chun-Seok Lee, Dept. of Landscape Architecture, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 660-758, Korea, Tel.: +82-55-751-3305, E-mail: stoney@gntech.ac.kr

The SET^* under pergola I, III were exceeded 28.7°C and 30.4°C which were the upper limit of thermal comfort and tolerable zone during all most daytimes in the 1st experiment(maximum air temperature 37.5°C). The SET^* under pergola I was exceeded 28.7°C which was the upper limit of thermal comfort zone at 13h, that under pergola II was exceeded 28.7°C from 8h to 14h, meanwhile the SET^* under pergola I, II were within thermal tolerable zone during most daytimes in the 2nd experiment(maximum air temperature 34.4°C). Therefore to ensure the thermal comfort of pergola for summer hottest days, pergola should be shaded with not only reed blind but also climbing and shade plants. T_{mrt} and SET^* were suitable index for the evaluation of pergola's shading effects and outdoors.

Key Words: Shortwave Radiation, Long Wave Radiation, Mean Radiant Temperature, Standard Effective Temperature

국문초록

본 연구는 여름철 낮 그늘시령의 차양이 온열쾌적 지표에 미치는 영향을 파악하고자 수행하였다. 이를 위해 여름철 차양 및 겨울철 방풍을 고려하여 갈대밭로 천개면 등을 차폐한 3가지 유형의 그늘시령(가로 $4\text{m} \times$ 세로 $4\text{m} \times$ 높이 2.7m) I(천개면 차폐) · II(천개면, 서향면 차폐) · III(천개면, 서향면, 북향면 차폐)을 4층 옥상에 구축하였다. 그리고 1차 실험은 2013년 8월 14일부터 16일까지 대조구, 그늘시령 I, III을 대상으로, 2차 실험은 2013년 8월 26일부터 28일까지 대조구, 그늘시령 I, II를 대상으로 기상변수(기온, 습도, 복사, 풍속)를 측정하였다. 그늘시령의 차양이 인체가 흡수하는 복사환경과 T_{mrt} 및 SET^* 에 미치는 영향은 다음과 같다.

그늘시령의 차양으로 인해 인체가 흡수한 복사량의 저감은 단파복사가 장파복사에 비해 훨씬 크게 나타났다. 대조구 대비 인체가 흡수한 단파복사량 차이의 최대값 $\Delta K_{abs, max}$ 는 그늘시령 I과 III에서는 -119W/m^2 와 -158W/m^2 였으며, 그늘시령 I과 II에서는 -145W/m^2 와 -159W/m^2 였다. 대조구 대비 인체가 흡수한 장파복사량의 차이의 최대값 $\Delta L_{abs, max}$ 는 그늘시령 I과 III에서는 -15W/m^2 와 -17W/m^2 였으며, 그늘시령 I과 II에서는 -8W/m^2 와 -7W/m^2 였다.

그늘시령의 차양에 의해 인체가 흡수한 T_{mrt} 와 SET^* 값도 낮아졌다. T_{mrt} 는 1차 실험에서는 그늘시령 I과 III에서 각각 최대 16.0°C 와 21.4°C , 그리고 2차 실험에서는 그늘시령 I과 II에서 각각 최대 18.8°C 와 20.8°C 저감되었다. SET^* 는 1차 실험에서는 그늘시령 I과 III에서 각각 최대 2.9°C 와 2.6°C 그리고 2차 실험에서는 그늘시령 I과 II에서 각각 최대 3.5°C 와 2.6°C 저감되었다. 대조구 SET^* 대비 그늘시령 II, III의 SET^* 저감효율은 그늘시령 I에 비해 낮게 나타났는데, 이는 풍속의 차이 때문이었다. 따라서 그늘시령 수직면의 차폐시에는 차양 못지않게 통풍을 고려하는 것이 필수적이라 생각된다. 대조구의 3일간 평균 최고기온이 37.5°C 였던 1차 실험기간 결과에서는 SET^* 값이 하루 중 대부분 시간대에서 온열 쾌적대 및 수용대의 상한 값인 28.7°C 와 30.4°C 를 초과하였다. 반면에 대조구의 3일간 평균 최고기온이 34.4°C 였던 2차 실험결과, SET^* 값이 그늘시령 I에서는 18~12시와 오후 14~18시, 그늘시령 II는 15~18시에만 온열 쾌적대에 드는 것으로 나타났다. 반면에 그늘시령 I, II에서 SET^* 값은 하루 중 대부분 시간대에서 온열 수용대에 드는 것으로 나타났다. 따라서 혹서기에 그늘시령의 온열쾌적성을 확보하기 위해서는 갈대밭 등에 의한 차양뿐만 아니라, 덩굴식물이나 녹음수에 의한 차양을 도입하는 방안을 강구하여야 할 것이다. 그리고 그늘시령의 차양효과를 평가하는 지표로서 T_{mrt} 와 SET^* 는 실효성이 있었다고 판단되며, 향후 옥외 조경공간의 온열환경 평가 지표로서 활용이 기대된다.

주제어: 단파복사, 장파복사, 평균복사온도, 실효온도

1. 서론

레크레이션과 레저에 대한 요구가 커지면서 옥외공간에서의 온열쾌적성의 중요성이 제고되고 있다. 그러므로 기후와 이용객의 행태를 고려한 패시브 설계전략을 구사하여 쾌적한 옥외 및 반옥외 환경을 조성하는 것이 중요하다(Lin *et al.*, 2006). 기존

의 연구들(Thorsson *et al.*, 2007)은 물리적 구조나 배치에 차이가 있는 도심 옥외공간 시스템의 기온과 상대습도는 유의적으로 변화하지 않지만, 풍속과 복사량은 크게 달리 나타난다고 보고하였다. 즉, 옥외공간의 온열쾌적성은 장파와 단파 복사 그리고 풍속에 의해 좌우된다는 것이다. 따라서 설계자들은 풍환경과 복사환경의 조절을 통해 옥외공간에서 미기후를 조절할 수 있다.

복사환경의 조절을 위한 시설인 그늘시령은 차양을 위한 시령과 기둥에 의해 구성된 반옥외공간으로서, 이용객들이 햇빛을 피해 잠깐 쉬는 동안의 일시적 환경을 제공하는 대표적인 조경시설물이다. 따라서 조경시설물 중 그늘시령의 온열쾌적성은 무엇보다도 중요하다. 그늘시령의 온열쾌적성을 확보하기 위해 공기조화와 같은 냉난방 기술을 도입하는 것은 현실적으로 한계가 있으며(Lin *et al.*, 2006), 계획 및 설계 단계에서 패시브 디자인을 통해 그늘시령의 온열쾌적성을 확보하는 것이 매우 중요하다.

Tianyu *et al.*(2012)은 최근에 가장 널리 사용되는 옥외환경의 온열쾌적성 평가지표인 SET^* (Standard Effective Temperature, 신표준유효온도 이하 SET^* 라 부른다), PMV (Predicted Mean Vote, 예상온열감 이하 PMV 라 부른다)와 PET (Physiological Equivalent Temperature) 중에서, Ishii *et al.*(1988)은 SET^* 가 옥외의 온열쾌적 평가시 상대적으로 적합하며, Kinouchi(2001) 역시 옥외의 온열쾌적 평가시 지표로서 SET^* 를 사용할 수 있다고 하였다(Tianyu *et al.*, 2012: 165. 재인용). 옥외환경의 온열쾌적 평가지표로 유럽에서는 PMV 와 PET 가 특히 자주 사용되며, 이웃 일본에서는 SET^* 와 $WBGT$ 를 주로 사용한다. SET^* 나 PET 의 계산시 입력변수로 필수적인 것이 MRT (mean radiant temperature, 평균복사온도 이하 T_{mrt} 라 부른다)이다(Meteorological Society of Japan, 2010).

Lin *et al.*(2006)은 대만에서 쉼터를 대상으로 천공계수와 T_{mrt} , PET , SET^* 등과의 상관관계를 밝힌 바 있다.

Choi and Lee(2007)은 한 여름철 수목, 등나무 파고라, 막구조물의 내·외부 일사량 차이는 컸으나, 장파복사량 차이는 크지 않았고, 등나무파고라에서는 정오를 전후하여 수목과 막구조물에 비해 내·외부 기온차가 컸으며, 막구조물에서는 그 온도 차이가 거의 없었다고 보고하였다.

공동주택 단지 내 외부환경에서의 하절기 온열쾌적감 평가를 통해 쾌적감과 개인적 수용도에서 SET^* 의 쾌적대를 제시하였다(Lim *et al.*, 2008; Lim *et al.*, 2009).

한편, 종래의 온열감에 관한 연구는 주로 실내 환경을 중심으로 이루어져 왔으며, 옥외 공간 온열감에 관한 연구는 상대적으로 매우 적은 상황이며(Lim *et al.*, 2008), 특히 그늘시령을 대상으로 한 온열쾌적성에 대한 연구 또한 희소하다. 따라서 향후 옥외공간을 대상으로 한 온열쾌적성 특히 차양시설의 온열쾌적성에 대한 연구가 시급히 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 여름철 낮에 그늘시령의 복사환경을 포함한 기상환경을 측정하고, 이를 바탕으로 그늘시령의 차양이 인체가 흡수하는 장·단파복사 그리고 T_{mrt} 나 온열쾌적 지표인 SET^* 에 미치는 영향을 정량적으로 규명하였다. 이러한 연구의 결과는 열환경 조절 측면에서 보다 기능적인 그늘시령의 물리적 구조를 평가함에 있어서 기본적 자료가 될 것으로 기대

한다. 나아가 옥외공간의 온열쾌적성 평가기준으로서 T_{mrt} 와 SET^* 의 가능성을 제시하게 될 것이다.

II. 연구사

온열쾌적성은 “이용자가 열환경에 대한 만족를 표현할 수 있는 환경”이며(Matzarakis *et al.*, 2010), 주어진 환경 속에서 생리적 및 심리적 상태에 바탕을 둔 이용자의 주관적인 반응이다. SET^* 는 신표준유효온도(ET^*)를 보다 발전시킨 쾌적지표로서, ASHRAE(미국 난방·냉방·공기조화학회)에서 채택하여 세계적으로 널리 사용하고 있으며, ASHRAE에서는 이용자의 주관적인 반응 즉 80% 사람들이 만족하는 범위를 쾌적대로 설정하고 있다.

SET^* 는 인간 체온조절의 동적 2노드모델에 기초를 두고 개발한 온열쾌적성 평가지표로서 개념은 Figure 1과 같다(Oyamada and Tenmei, 2005).

ASHRAE에서는 일정 시점에서 열저장량이 순열취득량과 열손실량의 차이와 같다면 에너지가 균형을 이루게 되며, 이를 활용하여 SET^* 는 다음의 식 1~5와 같이 열평형식으로 정리할 수 있다고 하였다(Tianyu *et al.*, 2012: 165 재인용).

$$S_{cr} = M - W - (C_{res} + E_{res}) - (t_{cr} - t_{sk}) \times (5.28 + 1.163 \times skbf) \quad (\text{식 1})$$

$$S_{sk} = (t_{cr} - t_{sk}) \times (5.28 + 1.163 \times skbf) - (C + R + E_{sk}) \quad (\text{식 2})$$

여기서 S_{cr} : 인체중심부 열저장량[W/m²], S_{sk} : 인체표층부 열저장량[W/m²], M : 인체의 대사열량[W/m²], W : 활동량[W/m²], C_{res} : 호흡에 의한 대류열손실량[W/m²], E_{res} : 호흡에 의한 증발열손실량[W/m²], t_{cr} : 인체중심부 온도[°C], t_{sk} : 인체표층부

Figure 1. Summary of the :two-node model"

Source: Oyamada and Tenmei, 2005

온도[°C], $skbf$: 말초 혈류 속도[m/s], C : 피부에서의 대류에 의한 현열손실량[W/m²], R : 피부에서의 방사에 의한 현열손실량[W/m²], E_{sk} : 피부에서의 총 증발손실량[W/m²]

인체의 열저장율은 체내 에너지 증가율과 동일하므로, 저장율은 열용량과 온도의 시간변화율에 관련된 항으로 분리하여 나타낼 수 있다.

$$S_{cr} = (1 - \alpha)mc_{p,b}(dt_{cr}/d\theta)/A_D \quad (\text{식 3})$$

$$S_{sk} = \alpha mc_{p,b}(dt_{sk}/d\theta)/A_D \quad (\text{식 4})$$

여기서 α : 인체 질량에서 표층부가 차지하는 비율[-], m : 체질량[kg], $C_{p,b}$: 인체의 비열[J/kg], θ : 시간[s], A_D : Dubois 표면적[m²].

ASHARE에서는 SET^* 를 표준 착의량의 피험자가 일반적인 환경에서와 같은 열적 스트레스(피부온도)와 체온조절작용(피부젖음율)을 나타내는 상대습도가 50%인 등온환경(isothermal environment, 기온과 평균복사온도가 같고, 기류가 없는 해발 0m의 환경)에서의 상당온도(equivalent temperature)로 정의하고 있다. H_{sk} 를 피부에서의 열손실(피부의 열부하)라고 정의하면, 식 5로 표현할 수 있으며, 이를 통해 SET^* 를 산정할 수 있다.

$$H_{sk} = h_s(t_{sk} - SET^*) + w \times h_{s,e}(p_{s,sk} - 0.5p_{SET^*}) \quad (\text{식 5})$$

여기서 h_s : 표준 열전달율(W/m²·°C), $h_{s,e}$: 표준 증발열전달계수(W/m²·kPa), w : 피부 젖음율[-], $p_{s,sk}$: 피부의 수증기압, 보통 t_{sk} 에서의 포화수증기압으로 가정(kPa), p_{SET^*} : SET^* 에서의 포화수증기압(kPa).

이상의 식을 근거로 기온, 기류, 습도, T_{mrt} , 활동량, 착의량을 입력하여 SET^* 를 산정할 수 있는 프로그램에는 RayMan 1.2(Matzarakis *et al.*, 2010)와 일본 구주대학 ET_AEE(<http://ktlabo.cm.kyushu-u.ac.jp/e/ETAEE.htm>) 등이 있다. 하지만 햇빛이 있는 옥외환경의 경우, 이 입력변수 중 가장 까다로운 것이 평균복사온도의 측정이다. 옥외환경에서 평균복사온도를 측정하는 방법에는 흑구온도계를 이용한 방법과 장·단파복사계를 이용하는 방법이 있는데, 장·단파복사계를 이용하는 방법 중 6방향의 장·단파복사량의 실측을 바탕으로 평균복사온도를 산출하는 방법이 가장 정확한 방법이다(Kántor and Unger, 2011).

온열쾌적지표 SET^* 를 기준으로 한 연구에서 공동주택 단지

내 외부환경에서 쾌적감과 수용도 설문결과 불만족율 20%의 경우 쾌적범위는 각각 17.15~30.4°C, 15.84~32.6°C로 나타났다고 보고하였다(Lim *et al.*, 2008). 그리고 후속 연구에서 옥외공간에서의 온열쾌적감에 대한 피험자 설문 결과를 로지스틱 회귀분석한 후 쾌적감(CSV: Comfort Sensation Vote)과 개인적 수용도(PTV: Personal Tolerance Vote)에 대한 불만족율 PD(Percentage of Dissatisfied)에 관하여 다음과 같은 식을 제시하였다(Lim *et al.*, 2009)(식 6 참조).

$$PD = \begin{cases} 1 - \frac{1}{1 + e^{-15.517 + 0.493 \times SET^*}} (CSV) \\ 1 - \frac{1}{1 + e^{-12.941 + 0.380 \times SET^*}} (PTV) \end{cases} \quad (\text{식 6})$$

PD: 불만족율[%]

SET^* : 실험준유효온도[°C]

이 식을 근거로 계산하면 불만족율 20%의 고온역 쾌적감 상한온도는 28.7°C이며, 고온역 개인적 수용도 상한온도는 30.4°C이다.

III. 재료 및 방법

1. 공시재료

가설용 철재 파이프로 4m×4m×2.7m의 그늘시령 틀을 구축한 후, 천정면에 갈대발을 설치한 그늘시령 I, 천정면과 서측면에 갈대발을 설치한 그늘시령 II, 천정면과 서측면 그리고 북측면에 갈대발을 설치한 그늘시령 III를 구축하였다. 그리고 그늘시령이 설치되지 않은 옥상면을 대조구로 하였다(Figure

Figure 2. Pergola I, II, III and Ref

2 참조). 그늘시령 II는 오후 시간대의 서측 햇빛을 차단하기 위한 유형으로 구축하였으며, 그늘시령 III은 오후 시간대의 서측 햇빛 차단과 겨울철 북서풍 방풍을 위한 유형으로 구축하였다.

2. 연구 방법

1) 대상지

주변건물에 의한 바람의 영향이 적으며, 바닥은 콘크리트 위에 녹색 방수도장으로 마감한 개방적인 장소(경남과학기술대학교 제4공학관 4층 건물의 옥상, 약 40m×25m)를 실험장소로 하였다.

2) 측정방법

1차 측정은 2013년 8월 14일부터 8월 16일까지 그늘시령 I, III, 대조구를 대상으로 하였으며, 2차 측정은 2013년 8월 26일부터 8월 28일까지 그늘시령 I, II, 대조구를 대상으로 하였다. 하루 중 오전 5시 30분부터 오후 7시 30분까지 측정을 하였다. 측정 높이는 앉은 자세의 인체의 무게중심 높이인 80cm로 하였다(BS EN ISO 7726:2001).

(1) 장단파복사량

6방향의 장파복사(지구복사: 파장 3~100μm, 이하 장파복사라 한다)량과 단파복사(일사: 파장 0.3~3μm, 이하 단파복사라 한다)량의 실측을 바탕으로 T_{mrt} 를 산출하기 위해 옥상면으로부터 상방 80cm 높이에 설치한 순복사계(net-radiometer, Kipp & Zonen사, CNR4)를 사용하여, 장단파복사량을 1분 간격으로 측정하여 10분 평균값을 데이터 로거(Campbell사, CR10X)에 입력하였다. 1, 2차 측정시 순복사계 3조로 천공 및 지면 복사량, 동서 복사량, 남북 복사량을 각각 1일 14시간 총 3일 52시간 동안 측정하였다.

(2) 기온, 습도 및 풍속

대조구와 그늘시령 I, II, III의 기온, 습도는 WBGT계(Lutron사, WBGT-2010SD)로 1분 간격으로 측정하여 SD메모리에 입력하였다.

대조구와 그늘시령 I의 풍속은 옥상면으로부터 상방 180cm 높이에 설치한 기상장비(Davis사)로 1분 간격으로 측정하여 5분 평균값을 입력하였다. 그리고 다음의 식 7을 이용하여 180cm 높이(해발고도 44m)의 풍속을 80cm 높이(해발고도 42.2m)의 풍속으로 환산하였다(Kaltschmitt *et al.*, 2007).

$$V_{Wi,h} = V_{Wi,ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{\alpha_{Hell}} \quad (\text{식 7})$$

여기서 $V_{Wi,h}$ 는 높이 h (m)에서의 평균풍속(m/s), $V_{Wi,ref}$

는 대조점 높이 h_{ref} (m)에서의 풍속(m/s), α_{Hell} 은 조도계수이다. 시가지에서는 α_{Hell} 은 0.27~0.60의 값을 가지나, 본 연구에서는 중립상태 값인 0.34으로 하였다. 그리고 그늘시령 II, III의 풍속은 옥상면으로부터 상방 80cm 높이에 설치한 Weather Station(WA1801)으로 1분 간격으로 측정하여 5분 평균값을 입력하였다.

3) T_{mrt} 와 SET^* 의 산정방법

(1) 인체가 흡수한 장단파 복사량과 T_{mrt}

인체가 흡수한 단파 복사량 K_{abs}^* 는 실측한 6방향의 단파복사량을 근거로 식 8에 의해 산정하였다.

$$K_{abs}^* = \alpha_k \cdot \sum_{i=1}^6 W_i \cdot K_i \quad (\text{식 8})$$

여기서 α_k 는 인체의 단파복사흡수율, W_i 는 3차원 복사량 K_i (i =천공, 지면, 동, 서, 남, 북)에 대해 앉은 자세로 있는 피험자의 가중치(weighting factors)

마찬가지로 인체가 흡수한 장파 복사량 L_{abs}^* 는 실측한 6방향의 장파복사량을 근거로 식 9에 의해 산정하였다.

$$L_{abs}^* = \alpha_l \cdot \sum_{i=1}^6 W_i \cdot L_i \quad (\text{식 9})$$

여기서 α_l 는 인체의 장파복사흡수율이다.

인체의 단파복사흡수율은 표준치로서 0.7, 착의인체의 방사율은 0.97로 하였다. 또한 3차원 복사량 K_i 및 L_i (i =천공, 지면, 동, 서, 남, 북)에 대해 앉은 자세로 있는 피험자의 가중치(weighting factors)는 Table 1과 같다(Watanabe and Horikoshi, 2012).

인체가 흡수한 T_{mrt} 는 식 7과 8에 의해 산정된 인체가 흡수한 장단파복사량을 식 10과 같은 스테판 볼츠만의 법칙에 의해 산정하였다(Watanabe and Horikoshi, 2012; Kántor and Unger, 2011).

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{K_{abs}^* + L_{abs}^*}{\varepsilon_p \cdot \sigma}} - 273.15 \quad (\text{식 10})$$

Table 1 Weighting factors W_i depending on the orientation

	front	back	left	right	upward	downward
Seated person	0.21	0.21	0.16	0.16	0.13	0.13

Figure 3. ET_AEE Version 1.1.12

여기서 K_{abs}^* 는 3차원 환경으로부터 인체에 흡수되는 단파복사량의 합, K_{abs}^* 는 3차원 환경으로부터 인체에 흡수되는 장파복사량의 합, ε_p 는 장파방사율, σ 는 스테판 볼츠만 정수($=5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^2\text{K}^4$)

(2) SET*

온열쾌적감의 지표인 SET*는 Figure 3과 같은 일본 구주대학 도시건축환경연구실에서 무료로 공개하는 온열쾌적 지표를 계산하는 프로그램인 ET_AEE Version 1.1.12(<http://ktlabo.cm.kyushu-u.ac.jp/e/ETAEE.htm>)를 활용하여 산정하였다. 환경변수로 기온[℃], 상대습도[%], 풍속[m/s], T_{mrt} [℃]의 측정값과 인체변수로는 앉은 자세의 대사율 1.0Met(58.2W/m²), 착의량은 여름철 표준 0.5clo를 입력하여 SET*의 값을 산정하였다(Akihiko and Hiroyuki, 2010).

IV. 결과 및 고찰

4층 옥상에 설치된 차양면을 달리한 하절기 옥외 그늘시령 I, II, III 그리고 대조구에서의 복사량과 T_{mrt} 의 저감효과를 분석하였다. 그리고 그늘시령 I, II, III 및 대조구에서의 SET*의 일변동을 분석함으로써 하절기 옥외 그늘시령 아래에서의 이용객들의 온열환경을 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 기상 현황

1, 2차 실험시 측정된 일사량과 기온의 시간 평균값의 일변동을 그림 4와 5에 나타냈다. Figure 4와 5를 통해 측정 기간 3일간 비교적 맑은 날씨를 보였다는 것을 판단할 수 있다. 1, 2차 실험시 3일 최고 일사량의 평균값은 각각 898W/m², 825W/m²였다.

1차 실험기간 3일 동안 오전 6시부터 오후 7시까지의 기온평

Figure 4. Solar radiation and air temperature(1st experiment from 14 to 16 August 2013)

Legend —○— solar radiation —▲— air temperature at pergola I
—□— air temperature at pergola II —◇— air temperature at ref.
—●— Weather Station

Figure 5. Solar radiation and air temperature(2nd experiment from 26 to 28 August 2013)

Legend —○— solar radiation —▲— air temperature at pergola I
—□— air temperature at pergola II —◇— air temperature at ref.
—●— Weather Station

균값은 그늘시령 I 이 최저기온 25.8℃, 최고기온 36.7℃, 평균기온 33.6℃, 그늘시령 III 이 최저기온 25.9℃, 최고기온 37.2℃, 평균기온 33.9℃, 대조구가 최저기온 25.8℃, 최고기온 37.5℃, 평균기온 33.9℃, 시외곽 진주기상대의 최저기온 22.8℃, 최고기온 33.8℃, 평균기온 30.2℃로서 매우 더운 날씨를 보였다.

2차 실험기간 3일 동안 오전 6시부터 오후 7시까지의 기온 평균값은 그늘시령 I 이 최저기온 22.3℃, 최고기온 33.4℃, 평균기온 29.8℃, 그늘시령 II 가 최저기온 22.6℃, 최고기온 33.6℃, 평균기온 30.2℃, 대조구가 최저기온 22.1℃, 최고기온 33.4℃, 평균기온 29.9℃, 시외곽 진주기상대의 최저기온 19.7℃, 최고기온 30.5℃, 평균기온 27.0℃로서 1차 실험기간보다는 낮은 기온을 보였지만, 전형적인 여름철의 기온을 보였다.

1차 및 2차 실험기간 동안 대조구와 그늘시령 I, II, III 의 3일간 평균기온 차이는 0.3~0.4℃로 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 1차 및 2차 실험시 대조구의 3일간 평균기온은 진주시 외곽의 기상대에 비해 각각 3.7℃, 2.9℃ 높게 나타났다.

Figure 6. Relative humidity and wind velocity(1st experiment from 14 to 16 August 2013)

Legend ● relative humidity ▲ wind velocity at pergola I /Ref.
▲ wind velocity at pergola III

Figure 7. Relative humidity and wind velocity(2nd experiment from 26 to 28 August 2013)

Legend ● relative humidity ▲ wind velocity at pergola I /Ref.
▲ wind velocity at pergola II

1, 2차 실험기간에 측정된 상대습도와 풍속의 시간 평균값 일변동을 Figure 6과 7에 나타냈다.

1, 2차 실험기간 3일 동안 오전 6시부터 오후 7시까지의 대조구와 그늘시령 I, III 그리고 대조구와 그늘시령 I, II의 상대습도 차이가 기기(WBGT-2010SD)의 측정 오차범위 ($<70\% \text{ RH}: \pm 3\%, \geq 70\% \text{ RH}: \pm(3\% \text{ reading} + 1\% \text{ RH})$) 내에 있어서 대조구와 그늘시령 I, III의 상대습도를 평균한 값을 그림 6과 7에 나타냈다. 1차 및 2차 실험기간 3일간 측정치의 평균값은 각각 최저상대습도 27%와 47%, 최고상대습도는 87%와 89%, 평균상대습도는 45%와 62%로 나타났다.

1차 실험기간 3일 동안 대조구와 그늘시령 III에서 오전 6시부터 오후 7시까지의 풍속평균값은 각각 최저풍속 0.5m/s, 0.1m/s, 최고풍속은 2.3m/s, 1.6m/s, 평균풍속은 1.6m/s, 0.9m/s로 나타났다. 북측과 서측을 차폐한 그늘시령 III에서는 대조구에 비해 평균풍속이 0.7m/s 저감되는 것으로 나타났다. 2차 실험기간 3

일 동안 대조구와 그늘시령 II의 평균값은 각각 최저풍속 0.4m/s, 0.3m/s, 최고풍속은 1.7m/s, 1.0m/s, 평균풍속은 1.2m/s, 0.6m/s로 나타났다. 서측을 차폐한 그늘시령 II에서는 대조구에 비해 평균풍속이 0.6m/s 저감되는 것으로 나타났다.

2. 인체가 흡수한 장·단파복사 특성

1차 실험 결과, 대조구 대비 그늘시령 I, III에서 인체가 흡수한 장파 및 단파 복사량의 1시간 평균값 차이를 Figure 8에 나타냈다. 대조구 대비 그늘시령 I, III에서 인체가 흡수한 단파 복사량 차이의 최대값 $\Delta K_{abs, max}$ 는 -119W/m^2 , -158W/m^2

Figure 8. 1h mean values of differences Δ of the sums of short-wave radiant flux densities (Kabs) and long-wave radiant flux densities (Labs) from the three-dimensional environment absorbed by the human-biometeorological reference person between pergola I, III and Ref(1st experiment from 14 to 16 August 2013)

Legend ● Pergola I ΔK_{abs} ■ Pergola III ΔK_{abs} ▲ Pergola I ΔL_{abs} □ Pergola III ΔL_{abs}

Figure 9. 1h mean values of differences Δ of the sums of short-wave radiant flux densities (Kabs) and long-wave radiant flux densities (Labs) from the three-dimensional environment absorbed by the human-biometeorological reference person between pergola I, II and Ref(2nd experiment from 26 to 28 August 2013)

Legend ● Pergola I ΔK_{abs} ■ Pergola II ΔK_{abs} ▲ Pergola I ΔL_{abs} □ Pergola II ΔL_{abs}

였으며, 대조구 대비 그늘시령 I, III에서 인체가 흡수한 장파복사량 차이의 최댓값 $\Delta L_{abs, max}$ 는 $-15W/m^2$, $-17W/m^2$ 으로 나타났다.

2차 실험 결과, 대조구 대비 그늘시령 I, II에서 인체가 흡수한 장파 및 단파 복사량의 1시간 평균값 차이를 Figure 9에 나타냈다. 대조구 대비 그늘시령 I, II에서 인체가 흡수한 단파복사량 차이의 최댓값 $\Delta K_{abs, max}$ 는 $-145W/m^2$, $-159W/m^2$ 였으며, 대조구 대비 그늘시령 I, II에서 인체가 흡수한 장파복사량 차이의 최댓값 $\Delta L_{abs, max}$ 는 $-8W/m^2$, $-7W/m^2$ 으로 나타났다.

대조구와 그늘시령 I, II, III에서 인체가 각각 흡수한 일사량(K_{abs}^*)의 차이는 장파복사량(L_{abs}^*)의 차이보다 크게 나타났다. 이는 장파복사보다 단파복사가 복사교환에 영향을 미치는 차양에 의해 크게 좌우된다는 것을 보여주는 것이라 판단된다.

3. T_{mrt}

차양에 의한 T_{mrt} 의 저감효과를 평가하기 위해 1, 2차 실험

Figure 10. 1h mean values of T_{mrt} from the three-dimensional environment absorbed by the human-biometeorological reference person(1st experiment from 14 to 16 August 2013)

Legend: ● Pergola I ■ Pergola III ○ Ref.

Figure 11. 1h mean values of T_{mrt} from the three-dimensional environment absorbed by the human-biometeorological reference person(2nd experiment from 26 to 28 August 2013)

Legend: ● Pergola I ■ Pergola II ○ Ref.

시 측정된 그늘시령 I, II, III에서의 T_{mrt} 시간평균값의 일변동을 Figure 10과 11에 나타냈다. 차양에 의해 인체가 흡수한 T_{mrt} 는 1차 실험시 그늘시령 I과 III에서 각각 최대 $16.0^\circ C$, 최대 $21.4^\circ C$ 저감되었으며, 2차 실험시 그늘시령 I과 II에서 최대 $18.8^\circ C$, 최대 $20.8^\circ C$ 저감되었다. 이는 하절기 옥외 레크레이션 공간에서의 그늘시령은 T_{mrt} 저감에 실질적으로 기여한다는 것을 보여주는 것이라 판단된다.

4. SET^*

차양에 의한 SET^* 의 저감효과를 평가하기 위해 1, 2차 실험시 측정된 오전 8시부터 오후 6시까지 그늘시령 I, II, III에서의 SET^* 시간평균값의 일변동을 Figure 12와 13에 나타냈다. 차양에 의해 인체가 흡수한 SET^* 는 1차 실험결과, 그늘시령 I과 III에서 최대 $2.9^\circ C$ 와 $2.6^\circ C$ 저감되었으며, 2차 실험결과, 그늘시령 I과 II에서 최대 $3.5^\circ C$ 와 $2.6^\circ C$ 저감되었다. 이는 하절기 옥외공간에서의 그늘시령은 인체에 미치는 온열쾌적

Figure 12. 1h mean values of SET^* from the three-dimensional environment absorbed by the human-biometeorological reference person(1st experiment from 14 to 16 August 2013)

Legend: ● Pergola I ■ Pergola III ○ Ref.

Figure 13. 1h mean values of SET^* from the three-dimensional environment absorbed by the human-biometeorological reference person(2nd experiment from 26 to 28 August 2013)

Legend: ● Pergola I ■ Pergola II ○ Ref.

지표의 개선에 상당한 기여한다는 것을 보여주는 것이라 판단된다.

그리고 그늘시령 II, III에서는 오전 8시부터 오후 3시까지 그늘시령 I보다 SET^* 가 높게 나타났으며, 대조구 대비 SET^* 의 저감효율은 낮게 나타났다. 이는 그늘시령 II, III은 그늘시령 I에 비해 통풍이 잘되지 않았기 때문이라 판단된다(Figure 12, 13 참조). 따라서 그늘시령 수직면의 차폐시에는 차양 못지않게 통풍을 고려하는 것이 필수적이라 생각된다.

Lim *et al.*(2009)이 제시한 불만족율 20%의 고온역 쾌적감 및 개인적 수용도 상한온도는 SET^* 28.7℃와 30.4℃를 기준으로 1차 및 2차 실험시 그늘시령의 온열환경의 평가하면 다음과 같다.

대조구의 3일 평균 최고기온이 37.5℃였던 1차 실험기간의 결과를 28.7℃로 보면 대조구, 그늘시령 I, III 모두 낮 동안 대부분 시간대에서 쾌적범위를 벗어난 것으로 나타났다. 그리고 30.4℃로 보면 대조구는 18시, 그늘시령 I은 10~12시와 18시, 그늘시령 III은 15~18시에서 수용범위 내의 온열환경을 보여주었다. 하지만 그늘시령 I, III 모두 쾌적범위를 벗어나는 온열환경을 보여주는 시간대가 주간의 상당 시간을 차지한다는 것은 3일 평균 최고기온이 37.5℃가 되는 혹서기에는 갈대밭로 1면 또는 3면을 차양하는 그늘시령만으로는 쾌적범위를 충족시킬 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 혹서기 옥외공간에서 쾌적범위를 충족시킬 수 있는 온열환경을 확보하기 위해서는 그늘시령에 덩굴식물을 도입한다든지 녹음수와 조합시키는 방안 등을 강구하여야 할 필요가 있다고 판단된다.

대조구의 3일 평균 최고기온이 34.4℃였던 2차 실험기간의 결과를 28.7℃로 보면 대조구는 8시와 17~18시, 그늘시령 I은 8~12시와 오후 14~18시, 그늘시령 III은 15~18시에만 쾌적범위 내에 드는 것으로 나타났다. 그리고 30.4℃로 보면 대조구는 오전 9시부터 오후 3시까지 온열 수용대를 초과하였음에 비해, 그늘시령 I은 하루 종일, 그늘시령 II는 오전 8시를 제외한 하루 종일 수용범위 내의 온열환경을 보여주고 있음을 알 수 있었다. 이는 혹서기가 아닌 경우 갈대밭에 의한 천개면 등의 차양만으로도 수용도 기준을 만족시키는 쾌적한 온열환경을 확보할 수 있음을 보여주는 것이라 판단된다.

V. 결론

본 연구는 4층 옥상에 설치한 여름철 낮 그늘시령의 차양이 온열쾌적 지표에 미치는 영향을 파악하고자 수행하였다. 그늘시령의 차양이 인체가 흡수하는 복사환경과 T_{mrt} 및 SET^* 에 미치는 영향을 다음과 같다.

그늘시령의 차양으로 인해 인체가 흡수한 복사량의 저감은 단파복사가 장파복사에 비해 훨씬 크게 나타났다. 대조구 대비 인체가 흡수한 단파복사량 차이의 최댓값 $\Delta K_{abs, max}$ 는 그늘시

령 I과 III에서는 $-119W/m^2$, $-158W/m^2$ 였으며, 그늘시령 I과 II에서는 $-145W/m^2$, $-159W/m^2$ 였다. 대조구 대비 인체가 흡수한 장파복사량 차이의 최댓값 $\Delta L_{abs, max}$ 는 그늘시령 I과 III에서는 $-15W/m^2$, $-17W/m^2$ 였으며, 그늘시령 I과 II에서는 $-8W/m^2$, $-7W/m^2$ 였다.

그늘시령의 차양에 의해 인체가 흡수한 T_{mrt} 와 SET^* 값도 낮아졌다. T_{mrt} 는 1차 실험에서는 그늘시령 I, III에서 각각 최대 16.0℃, 21.4℃ 그리고 2차 실험에서는 그늘시령 I, II에서 각각 최대 18.8℃, 20.8℃ 저감되었다. SET^* 는 1차 실험결과에서는 그늘시령 I, III에서 각각 최대 2.9℃, 2.6℃ 그리고 2차 실험결과에서는 그늘시령 I, II에서 각각 최대 3.5℃, 2.6℃ 저감되었다. 그늘시령 II, III은 그늘시령 I에 비해 통풍이 잘되지 않아서 SET^* 의 저감효율도 낮게 나타났다. 따라서 그늘시령 수직면의 차폐시에는 차양 못지않게 통풍을 고려하는 것이 필수적이라 생각된다.

대조구의 3일간 평균 최고기온이 37.5℃였던 1차 실험결과, 그늘시령 I, III의 SET^* 값이 하루 중 대부분 시간대에서 온열 쾌적대와 수용대의 상한 값인 28.7℃와 30.4℃를 초과하는 것으로 나타났다. 반면에 대조구의 3일간 평균 최고기온이 34.4℃였던 2차 실험결과, SET^* 값이 그늘시령 I에서는 18~12시와 오후 14~18시, 그늘시령 III은 15~18시에만 온열 쾌적대에 드는 것으로 나타났다. 반면에 그늘시령 I, II에서 SET^* 값은 하루 중 대부분 시간대에서 온열 수용대에 드는 것으로 나타났다. 따라서 혹서기에 그늘시령의 온열쾌적성을 확보하기 위해서는 갈대밭에 의한 차양뿐만 아니라, 덩굴식물이나 녹음수에 의한 차양을 도입하는 방안을 강구하여야 할 것이다.

그리고 그늘시령에 의한 차양의 영향을 평가하는 지표로서 T_{mrt} 와 SET^* 는 실효성이 있었다고 판단되며, 향후 옥외 조정공간의 온열환경 평가 지표로서 활용이 기대된다.

본 연구의 결과는 4층 옥상에 설치한 갈대밭로 천개면과 서면·북면 등을 차폐한 그늘시령을 대상으로 한 여름철 6일간의 관측자료를 근거로 온열쾌적 지표인 T_{mrt} 와 SET^* 를 이용하여 그늘시령의 차양이 온열쾌적성에 미치는 영향을 계량적으로 제시했다는 점에서 의의가 있지만, 이를 일반화하기 위해서는 옥상이 아닌 지면상 그리고 겨울철의 관측자료를 추가적으로 확보하여 할 필요가 있다고 생각된다. 아울러 덩굴식물이나 녹음수 등을 도입한 그늘시령의 온열쾌적성에 대한 후속적인 연구도 요구된다. 또한 옥외공간에서 다양한 계층의 피험자를 대상으로 한 온열 쾌적대와 수용대의 온열 지표 값에 대한 후속적인 연구도 요구된다.

인용문헌

1. Akihiko, E. and Y. Hiroyuki(2010) Comfort Evaluation PMV. <http://mikelab.doshisha.ac.jp/dia/monthly/monthly10/20100430/aemi.pdf>[in

- Japanese]
2. BS EN ISO 7726, 2001, Ergonomics of Thermal Environments - Instruments for Measuring Physical Quantities.
 3. Choi, D. H. and B. Y. Lee(2007) Analysis of passive cooling effect of membrane shading structure and the tree by field observations in the summer. J. Kor. Solar Energy Soc. 27(4): 137-146. [in Korean]
 4. Hyunjung, L., J. Holst and H. Mayer(2013) Modification of human-biometeorologically significant radiant flux densities by shading as local method to mitigate heat stress in summer within urban street canyons advances in meteorology. Article ID 312572, 13 pages.
 5. Kaltschmitt, M., W. Streicher and A. Wiese(2007) Renewable Energy Technology, Economics and Environment. New York: Springer Berlin Heidelberg.
 6. Kántor, N. and J. Unger(2011) The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment -the mean radiant temperature. Cent. Eur. J. Geosci. 3(1): 90-100.
 7. Lim, J. Y., H. K. Hwang, D. S. Song and T. Y. Kim(2008) A study on evaluation the thermal comfort in residential building block in summer. J. Kor. Inst. Architectural Sustainable Environment and Building Systems Fall Conference, pp. 110-115. [in Korean]
 8. Lim, J. Y., H. K. Hwang, M. K. Ryu and D. S. Song(2009) Thermal comfort in outdoor environment by questionnaire survey : Using the logistic regression. J. Kor. Solar Energy Soc. Spring Conference 29(1): 97-101. [in Korean]
 9. Lin, T. P., A. Matzarakis and J. J. Huang(2006) Thermal comfort and passive design strategy of bus shelters. The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture.
 10. Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer(2010) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. Int. J. Biometeorol. 54: 131-139.
 11. Meteorological Society of Japan(2010) Thermal Index. http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2010/2010_01_0057.pdf [in Japanese]
 12. Oyamada, S. and N. Tenmei(2005) Study on the human thermal sensation in the high reflection pavement. http://www.kon.arc.tcu.ac.jp/reaserch/musashi/musashi_2005/oyamada.pdf [in Japanese]
 13. Thorsson, S., F. Lindberg and B. Holmer(2007) Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. Int. J. Climatol. 27: 1983-1993.
 14. Tianyu, X., L. Qiong, A. Mochida and M. Qinglin(2012) Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas. Building and Environment 52: 162-170.
 15. Watanabe, S. and T. Horikoshi(2012) Calculation of mean radiant temperature in outdoors based on measurements. Japanese J. Bio-meteorology 49(2): 49-59. [in Japanese]
 16. ET_AEE Version1.1.12(2013. 11) <http://ktlabo.cm.kyushu-u.ac.jp/e/ETAEE.htm>

원 고 접 수 일: 2013년 10월 2일
 심 사 일: 2013년 11월 4일(1차)
 2013년 11월 19일(2차)
 계 재 확 정 일: 2013년 11월 22일
 4 인 의 명 심 사 필