

한국잔디식재 경량박층형 옥상녹화의 열수지 해석[†]

김세창* · 이현정** · 박봉주***

*충북대학교 대학원 원예학과 · **충북대학교 주거환경학과 · ***충북대학교 원예과학과

Heat Budget Analysis of Light Thin Layer Green Roof Planted with *Zoysia japonica*

Kim, Se-Chang* · Lee, Hyun-Jeong** · Park, Bong-Ju***

*Dept. of Horticulture, Graduate School, Chungbuk National University

**Dept. of Housing & Interior Design, Chungbuk National University

***Dept. of Horticultural Science, Chungbuk National University

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate thermal environment and heat budget of light thin layer green roof through an experiment in order to quantify its heat budget. Two concrete model boxes(1.2m(W)×1.2m(D)×1.0m(H)) were constructed: One experiment box with *Zoysia japonica* planted on substrate depth of 10cm and one control box without any plant. Between June 6th and 7th, 2012, outside climatic conditions(air temperature, relative humidity, wind direction, wind speed), evapotranspiration, surface and ceiling temperature, heat flux, and heat budget of the boxes were measured. Daily maximum temperature of those two days was 29.4°C and 30°C, and daily evapotranspiration was 2,686.1g/m² and 3,312.8g/m², respectively. It was found that evapotranspiration increased as the quantity of solar radiation increased. A surface and ceiling temperature of those two boxes was compared when outside air temperature was the greatest. and control box showed a greater temperature in both cases. Thus it was found that green roof was effective in reducing temperature. As results of heat budget analysis, heat budget of a green roof showed a greater proportion of net radiation and latent heat while heat budget of the control box showed a greater proportion of sensible heat and conduction heat. The significance of this study was to analyze heat budget of green roof temperature reduction. As substrate depth and types, species and seasonal changes may have influences on temperature reduction of green roof, further study is necessary.

Key Words: Heat Island, Evapotranspiration, Net Radiation, Latent Heat, Sensible Heat

국문초록

본 연구는 저관리·경량형 옥상녹화의 열수지를 정량화하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 콘크리트블록을 이용하여 가로 1.2m×세로 1.2m×높이 1m의 모의실험구 2개를 제작하여 하나는 한국잔디를 식재한 토심 10cm의 옥상녹화

[†]: 이 논문은 2011년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

Corresponding author: Bong-Ju Park, Dept. of Horticultural Science, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea, Tel.: +82-43-261-2528, E-mail: bjpak@cbnu.ac.kr

실험구로 하였으며, 옥상녹화를 실시하지 않은 나머지 하나는 대조구로 하였다. 2012년 6월 6일~7일에 기온, 상대습도, 풍향, 풍속 등 외부 기상환경, 증발산량, 옥상녹화와 대조구인 콘크리트의 표면과 천장면의 온도, 열류량, 열수지를 측정하였다.

6일과 7일의 일최고기온은 각각 29.4℃와 30℃로 초여름 날씨로는 매우 무더웠다. 6일과 7일의 일증발산량은 각각 2,686.1g/m²과 3,312.8g/m²이었으며, 일사량이 증가함에 따라 증발산량도 증가하였다. 외부 기온이 가장 높은 시간일 때의 옥상녹화 표면과 대조구 표면의 온도차이를 비교해 보면 대조구 표면이 5.5℃(6일)와 2.2℃(7일) 더 높은 것으로 나타났다. 옥상녹화 천장과 대조구 천장의 온도차이를 비교해 보면 13.1℃(6일)와 14.2℃(7일)로 나타나 옥상녹화에 의한 실내온도저감효과가 매우 큰 것으로 나타났다. 옥상녹화와 대조구인 콘크리트 표면의 열수지를 분석한 결과, 옥상녹화는 순복사량과 잠열량이 많은 비율을 차지하고 있었으나 대조구는 현열량과 전도열량의 비율이 높았다. 즉, 옥상녹화는 한국잔디와 식재토양에 의한 증발산으로 열을 식혀주는 잠열의 비율이 높은 반면에 대조구인 콘크리트 표면은 식물이 식재되어 있지 않기 때문에 열을 식혀주는 잠열은 0W/m²인 반면에 주위 온도를 증가시키는 현열량과 건물내로 전달되는 전도열량의 비율이 높아 표면과 천장면의 온도를 상승시켰다. 본 연구는 옥상녹화의 온도저감과 열수지 해석을 시도했다는 점에서는 매우 의의가 크다고 할 수 있지만, 옥상녹화는 토심과 토양배합비, 식물종, 계절 등 여러 변수에 따라 온도저감효과가 다르게 나타날 수 있기 때문에 이에 대한 후속연구가 필요하다.

주제어: 열섬현상, 증발산, 순복사, 잠열, 현열

1. 서론

최근 도시구조는 일반적으로 녹지지역보다는 인공적인 개발지역이 확대됨에 따라 대량의 태양에너지의 흡수 및 저장이 용이하고 이에 따른 열을 대량으로 복사함으로써 구조물의 온도를 상승시킬 뿐만 아니라 주변 온도까지 상승시켜 열섬현상 및 열대야 현상이 심화되고 있다(Clark *et al.*, 2010). 도시열섬의 발생원인은 자동차 운행과 냉난방장치 가동에 의한 인공열의 공급, 그리고 도시화로 인한 녹지의 감소를 들 수 있으며, 또한 아스팔트나 콘크리트와 같은 불투수층의 확대에 의한 지표면의 보온효과 등도 그 주원인으로 꼽을 수 있다(명수정, 2010). 최근 30년 동안 나타난 우리나라의 서울을 포함한 6개 광역시의 대도시와 인구 10만 명 이하의 24개 소도시 지역을 대상으로 조사한 자료에 따르면 대도시의 기온상승이 소도시 지역보다 2배 이상 빠른 것으로 나타났다. 지난 100년 동안 나타난 지구온난화로 인한 기온상승은 약 0.74℃로 10년 단위 기온상승은 약 0.07℃이다. 하지만 우리나라 대도시의 도시열섬화로 인한 기온상승 속도는 약 0.3℃/10년에 이르러 이보다 훨씬 빠르다는 것을 말해준다(김해동, 2010). 또한, 최근 1996~2005년의 10년간 열대야 발생일수는 9.2일/년으로 1971~2000년 평균값인 7.8일/년과 비교하여 약 1.4일 증가한 것으로 보고되고 있는 등 도시의 열환경이 지속적으로 악화되고 있다(허인혜와 권원태, 2007). 이러한 도시열섬현상 및 열대야를 완화시키기 위해서는 공원계획과 가로수계획 등 도시계획 수준의 정책노력과 옥상녹화, 고반사율 지붕, 벽면녹화 등과 같은 건물계획 수준의 조치가 함께 이루어져야 한다(Takebayashi and Moriyama, 2007).

지금까지의 도시녹화는 공원녹지 및 가로수 등 지상녹화를 중심으로 이루어져 왔지만 도시의 고밀도적인 토지이용의 전개에 따라 대규모 지상녹화를 확대할 여유가 없어지게 되어 최근에는 옥상녹화와 벽면녹화 등에 의한 총량으로서 녹화량을 확보하려는 움직임이 보이고 있다(大岡龍三, 2005; 김정호와 윤용한, 2011).

옥상녹화는 식물과 토양에 의한 증발산작용에 따른 잠열 발생으로 온도저감효과와 건물 내부로 유입되는 전도열을 억제할 수 있어 단열성 향상에 따른 공조부하 저감뿐만 아니라 넓게는 도시열섬현상 완화, 도시 자연생태계 복원, 건물이용자의 쾌적감 증대, 양호한 경관향상 등의 부가적인 효과도 함께 기대할 수 있다(정임수 등, 2010). 우리나라에서도 옥상녹화의 중요성을 인식하고 서울시와 경기도 등에서 옥상녹화 지원조례를 제정하여 지원사업을 추진하고 있으나, 도심의 열섬완화와 녹지확보 측면에서 중요성이 매우 큼에도 불구하고 옥상녹화가 가능한 전체면적에 비해 극히 적은 면적에 대해서만 옥상녹화가 이루어졌고 정원휴게공간으로서 옥상녹화의 역할이 상대적으로 강조되어 열섬완화 기능은 다소 간과된 측면이 있다(박은진 등, 2010). 그동안 건축물 녹화 효과를 평가할 수 있는 구체적인 가이드라인이 없었으나 최근 국토해양부에서 지자체가 '건축물 녹화 기본계획' 수립 시 쉽게 활용할 수 있는 매뉴얼을 제작·배포하여 건축물 녹화 효과를 온도저감, 홍수예방, 탄소저감, 생물다양성 증진, 녹지증진, 경관향상 등 6가지 관점에서 정량적으로 평가하도록 한 것은 매우 의미 있는 일이라 하겠다(국토해양부, 2011).

이러한 시대적 배경을 토대로 옥상녹화와 관련된 연구는 꾸

준하게 이루어지고 있으나, 대부분은 식물과 유지관리, 제도 등에 관한 것이며(이은희 등, 2007; 김원태 등, 2008; 최진우 등, 2009; 박은진 등, 2012; 강태호 등, 2012), 온열환경 평가에 관해서도 표면온도를 위주로 한 연구가 주를 이루고 있으며(박찬필과 古川修文, 2004; 이동근 등, 2005; 주진희와 윤용한, 2010, 제정원 등, 2010; 김정호와 윤용한, 2011; 이춘우 등, 2011; 박세영 등, 2012; 이두호와 이웅직, 2012), 복사수지와 열수지 등의 해석에 기초한 정량적인 평가사례(최동호와 이부용, 2010)는 매우 미비한 실정이다. 那須香織 등(2003)은 들잔디와 멕시코돌나물을 이용한 증산량을 통한 열환경 조절효과를 검토한 결과, 급수조건(근권의 수분상태 0~0.05MPa)일 때의 증산량은 들잔디는 멕시코돌나물의 약 3배, 또한 초기위조점에서 영구위조점 수준의 수분상태에서도 멕시코돌나물의 증산은 거의 정지상태였지만 들잔디는 급수시의 50~20% 정도의 증산량을 유지하고 있다고 보고하고 있어 증산작용에 의해 적극적인 열환경 완화를 도모하기 위해서는 현재 보편적으로 보급되어 있는 세덤류보다는 잔디류가 훨씬 더 성능이 뛰어남을 알 수 있다. 따라서 향후 열환경 개선을 구체적으로 추진하기 위해서는 옥상녹화시 잔디류의 도입을 도모하고 이를 육성하기 위한 최저한의 식재기반의 정비 및 유지관리에 대한 적극적인 검토가 필요하다. 본 연구는 중엽형 한국잔디를 식재한 경량박층형 옥상녹화를 실시한 건물의 열수지를 정량화하기 위하여 온열환경과 열수지 특성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험구 조성

옥상녹화가 건축물의 온열환경에 미치는 영향을 평가하기 위해서 2012년 4월에 충북대학교 부속농장 2층 옥상에 4인치 콘크리트블록(100×190×390mm)을 이용하여 가로 1.2m×세로 1.2m×높이 1m의 모의실험구를 2개 조성한 다음, 지붕에는 10cm의 두께로 별도의 콘크리트 판을 만들어 시공하였다. 모의실험구 시공후 충분한 강도를 가질 수 있도록 살수하면서 양생시켰다. 2011년 6월 시판의 황색 플라스틱 용기(내부 411(W)×244(D)×114(H)mm)에 배수를 원활하게 하기 위하여 바닥에 24개의 구멍을 뚫은 다음 부직포를 깔고 펠라이트(파라소, 경동세라텍, Korea):피트모스(BP-F, Berger, Canada):원예용상토(원조믹스, 농경, Korea)를 6:3:1(v:v:v)의 비율로 조제하여 채운 후, 시중 원예점에서 판매하는 중엽형 한국잔디(*Zoysia japonica*)를 구입하여 식재하였다. 식재초기에는 주 2회의 빈도로 관수하고 그 다음에는 자연강우에 의해 관리해 온 것을 모의실험구에 올려 옥상녹화실험구로 하였다. 옥상녹화를 실시하지 않은 다른 하나의 모의실험구를 대조구로 하였다(그림 1 참조).

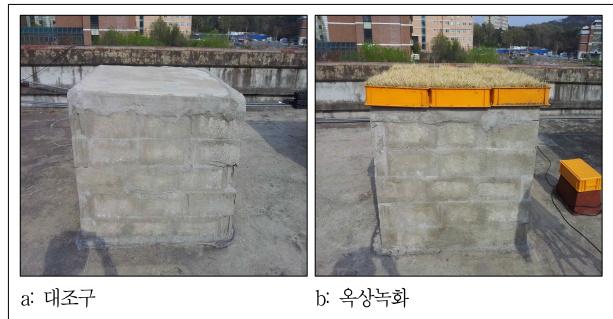


그림 1. 실험구 전경

2. 측정항목 및 분석

1) 기상환경

옥상의 기상환경은 옥상 중앙부근에 설치된 자동기상측정장치(AWS)를 이용하여 측정하였다. 높이 3m의 관측용 폴대 최상부에 풍향·풍속계를 설치하였으며, 옥상면에서 2m 높이에 일사계를, 1.5m 높이에는 통풍식온습도계를 설치하여 각 항목을 측정하였다. 강수량은 옥상면에 우량계를 설치하여 측정하였다.

2) 증발산량

옥상녹화 증발산량 측정은 증발산량 측정용 시험체(내부 411(W)×244(D)×114(H)mm)의 증량을 측정하여 구하였다. 측정하기 전에 충분한 양의 물을 관수하였으며, 중력수가 빠져나간 24시간 이후에 전자저울(EC-D, CAS, Korea)을 이용하여 30분 단위로 데이터로거에 연결하여 자동계측하였다. 이것을 용기로부터의 증발산량으로 간주하고 면적비율로 1m²당 증발산량으로 환산하였다(大野朋子 등, 2006).

3) 온열환경

옥상녹화와 콘크리트 표면, 천장면에 Ø 3.2mm의 T형열전대를 각각 설치하여 온도를 측정하였다. 지표면에서 토양으로 이동하는 열류량을 측정하기 위하여 대조구는 콘크리트 표면에, 옥상녹화는 토양표면으로부터 1cm 깊이에 열류계(HFT3, Campbell

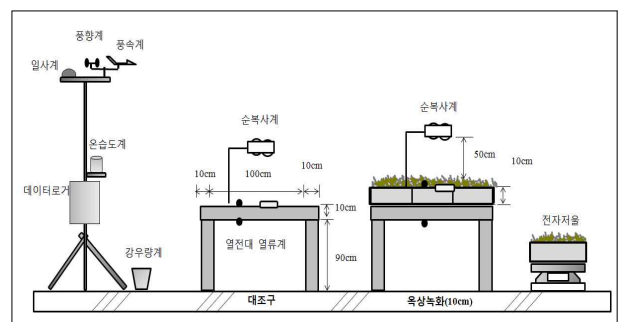


그림 2. 옥상녹화 측정항목과 측정지점

Scientific, Inc. USA)를 설치하였다. 각 계측기의 측정데이터는 데이터로거(DT-80, Datar Taker)를 이용하여 1분 간격으로 측정하여 30분 평균값을 저장하였다(그림 2 참조).

4) 열수지 평가

옥상녹화의 효과를 정량적으로 평가하기 위하여 복사수지와 열수지 특성을 평가하였다. 옥상녹화와 대조구의 50cm 높이에 순복사계(CNR4, Kipp & Zonen Inc., Delft, The Netherlands)를 각각 설치하여 측정하였다. 복사수지는 다음의 식에 의하여 산출하였다(鈴木弘孝와 三坂育正, 2008).

$$Rn=(S\downarrow - S\uparrow)+(L\downarrow - L\uparrow) \quad (\text{식 1})$$

여기서, Rn : 순복사량(W/m^2), $S\downarrow$: 하향단파복사량, $S\uparrow$: 상향단파복사량, $L\downarrow$:하향장파복사량, $L\uparrow$:상향장파복사량
 즉, 이번 측정에서 $S\downarrow$ 는 옥상면으로의 입사일사량, $S\uparrow$ 는 옥상면으로부터의 반사일사량, $L\downarrow$ 는 대기에서 옥상면으로의 입사장파복사량, $L\uparrow$ 는 옥상면에서 대기로의 장파복사량을 의미한다.

열수지는 다음 식에 의하여 구하였으며(橫山 仁 등, 2007), 그림 3은 열수지의 모식도를 나타낸 것이다.

$$Rn=H+IE+G \quad (\text{식 2})$$

여기서, Rn : 순복사량(W/m^2), H : 현열(W/m^2), IE : 잠열(W/m^2), G : 전도열(W/m^2)

순복사량(Rn)은 식 1에 의하여 계측한 장파·단파의 각 복사량 수지에 의해 구하였다. 전도열(G)은 대조구 표면과 옥상녹화 표면에 설치한 열류계(HFT3, Campbell Scientific, Inc. USA)

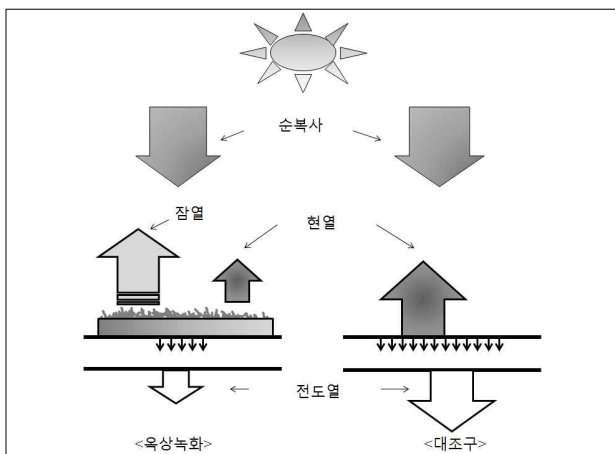


그림 3. 열수지 모식도

의 측정치를 사용하였다. 잠열 IE 는 옥상녹화의 중량변화로부터 증발산량 $E(g/h/m^2)$ 를 측정하고, 물의 증발잠열(J/kg)과 표면온도 $T_s(^\circ C)$ 를 이용하여 산출하였다. 산출된 잠열과 실측에 의해 구해진 순복사량과 전도열을 이용하여 식 2에 의해 현열을 구하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 기상현황

측정기간 동안의 기상환경은 그림 4와 같다. 2012년 6월 6일과 7일의 일최고기온은 각각 $29.4^\circ C$ 와 $30^\circ C$ 로 초여름 날씨로는 매우 무더운 날씨였는데, 이는 5월초부터 시작된 이상고온현상으로 기상청에서 기상관측을 시작한 1908년 이후 104년 만에 나타난 이상고온 때문이었다(노컷뉴스, 2012). 최저기온은 $19.1^\circ C$ 이었으며, 2일간의 평균기온은 $24.1^\circ C$ 이었다. 최고 상대습도는 7일 06시의 92.5% 이었으며, 2일간의 평균습도는 67.8% 이었다. 일사량은 기온의 변화와 거의 비슷한 경향을 보였으며 6일에는 12시 30분에 $761.5W/m^2$, 7일에는 13시에 $789.1W/m^2$ 로 가장 높은 값을 보였다. 측정기간 2일 동안 기온, 습도, 일사량은 비슷한 경시적 변화를 보였다.

2. 증발산량

일적산증발산량은 6일에는 $2,686.1g/m^2$ 를 보였고, 7일에는 $3,312.8g/m^2$ 이었으며 평균 $2,899.5g/m^2$ 이었다. 일중 최대증발산량은 6일에는 11시의 $365.1g/m^2$ 이었으며, 7일에는 13시의 $389.9g/m^2$ 로 나타났다. 전체적으로 6일과 7일의 증발산량 변화는 비슷한 경향을 보였으며(그림 5 참조), 일사량이 증가함에 따라 증발산량도 증가하는 경향을 보였다(그림 4 참조). 이는 王 革 등(1993)이 옥상 잔디표면으로부터의 증발산량이 일사량

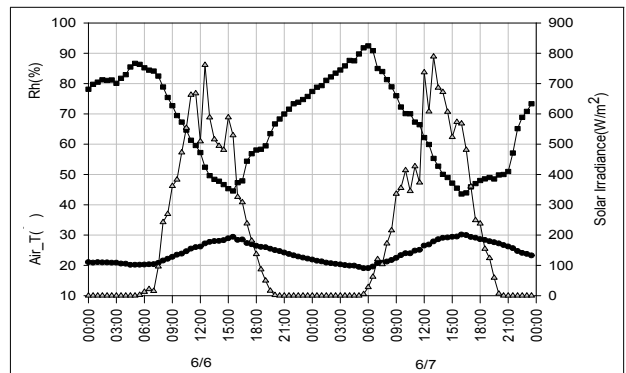


그림 4. 측정기간 중 기온, 습도, 일사량 변화
 범례: ● 기온 ■ 습도 ▲ 일사량

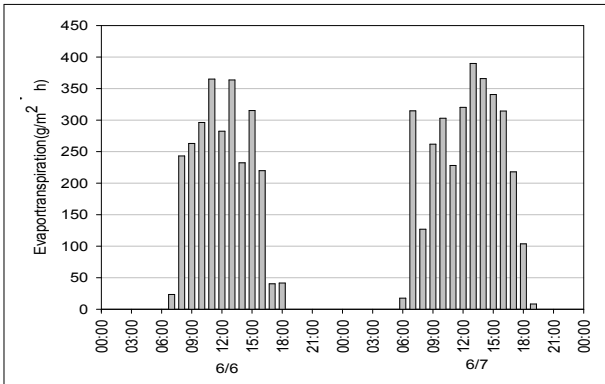


그림 5. 한국잔디 증발산량(2012. 6. 6~7)

과는 정의 상관관계를 상대습도와는 부의 상관관계를 보였다 연구 결과와 일치하였다. 山口隆子 등(2005)은 경량박층형 옥상녹화시설이 지닌 열섬완화효과를 정량적으로 검토한 결과 잔디 식재구는 일정한 증발산량을 유지하여 열수지가 개선되었다고 보고하여 한국잔디는 온열환경 개선에 효용성이 높을 것으로 판단된다.

3. 온도저감

2012년 6월 6~7일 대조구와 옥상녹화의 온도변화는 그림 6과 같다. 6월 6일의 기온은 최저 20.1°C(04시 30분)에서 최고 29.4°C(15시 30분)로 평균 23.9°C이었다. 각 측정지점의 평균 기온은 대조구 천장면이 29.2°C로 가장 높았으며, 그 다음으로 대조구 표면 27.2°C, 옥상녹화 천장면 26.2°C, 옥상녹화 표면 25.1°C의 순으로 나타났다. 이를 일평균기온과의 차이로 나타내면 대조구 천장면 5.3°C>대조구 표면 3.3°C>옥상녹화 천장면 2.3°C>옥상녹화 표면 1.2°C의 순으로 나타났다. 기온이 29.4°C로 가장 높았던 15시 30분의 대조구인 콘크리트 표면은 37.7°C로 측정되었으며, 옥상녹화 표면은 32.2°C로 측정되어 옥상녹화 표면 온도는 2.8°C가 상승한데 비하여 대조구 표면은 8.3°C로 옥상녹화에 의한 기온저감효과가 크게 나타났다. 같은 시각의 대조구 천장은 40.5°C를 보인 반면에 옥상녹화 천장면은 27.4°C로 13.1°C의 차이를 보여 옥상녹화에 의한 실내온도의 저감효과 역시 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 옥상녹화 토양표면보다 토양하부로 내려갈수록 온도감소효과가 증가되어(Dvorak and Volder, 2012) 건물내로 전달되는 전도열이 감소되었기 때문으로 판단된다. 이러한 옥상녹화 토양하부의 온도는 토양표면 온도에 따라 변화되기 때문에(Sailor et al., 2012), 외부 기온, 토양수분, 피복율과의 상호작용에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

7일의 기온은 최저 19.0°C(05시 30분)에서 최고 30.1°C(16시)로 평균 24.4°C로 측정되었다. 평균기온은 대조구 천장면 29.8°C>

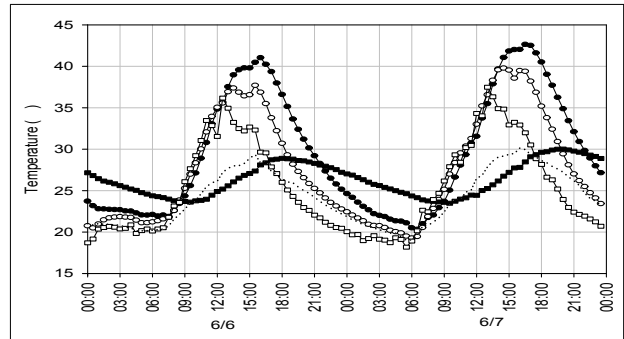


그림 6. 대조구와 옥상녹화 표면, 천장면 온도변화

법례: ○ 대조구 표면 ● 대조구 천장면 ■ 옥상녹화 표면 □ 옥상녹화 천장면 기온

대조구 표면 28.0°C>옥상녹화 표면 26.5°C>옥상녹화 천장면 25.4°C로 나타났다. 이날 기온은 16시에 30.1°C로 가장 높았으며, 같은 시각 대조구 천장면의 온도는 42.0°C로 11.9°C의 온도가 상승되었으며, 대조구 표면은 39.5°C로 9.4°C의 온도가 상승된 것으로 나타났다. 이와 반대로 옥상녹화 표면은 32.9°C로 2.8°C의 비교적 낮은 온도상승을 보였으며, 옥상녹화 천장면은 27.8°C로 오히려 2.3°C의 온도가 저감되는 경향을 보였다. 이는 옥상녹화에 식재한 한국잔디와 식재토양의 증발산에 의한 잠열 증대(橫山仁 등, 2007) 및 엽면적지수(leaf area index)로 인한 그늘 형성(Chen et al., 2004)으로 상부로부터 내려오는 열이 차단되고 토양표면에 그늘을 형성하여 토양표면의 온도 상승을 억제하였기 때문으로 판단된다.

4. 열수지 평가

대조구와 옥상녹화의 열수지 측정결과로부터 구한 열수지 추이는 그림 7과 같다. 대조구 순복사량은 6월 6일의 경우, -65.5W/m²(22시)~407.7W/m²(11시)의 범위로 일적순복사량은 2,006.2W/m²로 나타났으며, 7일에는 -76.6W/m²(23시)~472.4W/m²(13시)의 범위로 일적순복사량은 2,199.8W/m²이었다. 옥상녹화 순복사량은 6일에는 -51.4W/m²(22시)~495.9W/m²(11시)의 범위로 일적순복사량은 2,950.7W/m²이었으며, 7일에는 -55.8W/m²(23시)~602.3W/m²(13시)로 일적순복사량은 3,306.3W/m²이었다. 6일과 7일의 대조구와 옥상녹화 순복사량은 최대값일 때 각각 88.1W/m²와 129.8W/m²의 차이를 보여 일평균 및 최대값에서도 옥상녹화의 순복사량이 높은 것으로 나타났다(표 1 참조).

Takebayashi and Moriyama(2007)는 옥상녹화는 콘크리트 표면보다 순복사량이 높으며, 식물과 식재토양으로부터의 증발산으로 인한 잠열이 소비되어 현열과 건축물로 축열되는 전도열이 적게 나타났다고 보고하여 본 연구결과와 일치하였다. 이는 콘크리트 표면과 옥상녹화에 의한 알베도의 차이(콘크리트

표면 0.25~0.29, 옥상녹화 0.17~0.21) 및 잔디식재에 의한 잠열에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 대조구인 콘크리트 표면에서는 식물이나 식재토양에 의한 잠열이 발생하지 않기 때문에 열수지 산정에는 현열과 전도열만이 관여하기 때문이다.

대조구의 잠열량은 0W/m²를 나타낸 반면에 옥상녹화에서는 6월 6일의 경우에는 27.2W/m²(17시)~245.4W/m²(11시)의 범위를 보였으며 일적산잠열량은 1,794.7W/m²로 나타났다. 7일에는 5.6W/m²(19시)~261.0W/m²(13시)의 범위로 일적산잠열량은 2,232.0W/m²로 나타났다. 대조구의 현열량은 6월 6일의 경우 -17.9W/m²(23시)~218.6W/m²(13시)의 범위로 일적산현열량은 1,378.0W/m²이었으며, 7일에는 -25.1W/m²(05시)~369.0W/m²(13시)의 범위로 일적산현열량은 1,385.4W/m²이었다. 그러나 옥상녹화의 현열량은 6일에는 -36.6W/m²~242.2W/m²의 범위로 일적산현열량은 1,256.3W/m²이었으며, 7일에는 -130.7W/m²(07시)~343.9W/m²의 범위로 일적산현열량은 1,163.8W/m²로 대조구에 비하여 낮게 나타났다. 대조구의 전도열량은 6월 6일에는 -60.5W/m²(19시)~247.0W/m²(11시)의 범위로 일적산전도열량은 628.1W/m²이었으며, 7일에는 -73.7W/m²(20시)~288.2W/m²(12시)의 범위로 일적산전도열량은 814.4W/m²인

표 1. 대조구와 옥상녹화 열수지의 최대값과 최소값(단위: W/m²)

		6일		7일	
		대조구	옥상녹화	대조구	옥상녹화
순복사량	최대값	407.7	495.9	472.4	602.3
	최소값	-65.5	-51.4	-76.6	-55.8
잠열	최대값	-	245.4	-	261.0
	최소값	-	0.0	-	0.0
현열	최대값	218.6	242.2	369.0	343.9
	최소값	-17.9	-36.6	-25.1	-130.7
전도열	최대값	247.0	17.6	288.2	19.1
	최소값	-60.5	-14.7	-73.7	-14.7

반면에 옥상녹화의 6일의 전도열량은 -14.7W/m²(22시)~17.6W/m²(13시)의 범위로 일적산전도열량은 -116.3W/m²로 나타났으며, 7일에는 -14.7W/m²(00시)~19.1W/m²(14시)의 범위로 일적산전도열량은 -89.6W/m²로 나타났는데, 마이너스(-)의 전도열은 건물로부터의 열방출을 의미하기 때문에(辻盛生 등, 2008) 옥상녹화는 열수지에서도 냉각효과가 인정되었다.

IV. 결론

본 연구는 저관리·경량형 옥상녹화의 열수지를 정량화하기 위하여 모의실험을 수행하여 온열환경과 열수지 특성을 평가하였다. 콘크리트블록을 이용하여 가로 1.2m×세로 1.2m×높이 1m의 모의실험구 2개를 만든 다음, 하나에는 한국잔디를 식재한 토심 10cm의 플라스틱 용기를 올려 옥상녹화실험구로 하였으며 옥상녹화를 실시하지 않은 나머지 하나는 대조구로 하였다. 옥상 중앙부근에 설치된 자동기상측정장치(AWS)를 이용하여 기온·습도, 풍향, 풍속 등 외부 기상환경을 측정하였으며, 전자저울을 이용하여 증발산량을 측정하였다. 옥상녹화와 대조구인 콘크리트의 표면과 천장면의 온도는 T형 열전대(Ø 3.2mm)를 이용하여 측정하였으며, 열류계와 순복사계를 이용하여 열류량, 열수지를 측정하였다. 모든 데이터는 데이터로거를 이용하여 1분 간격으로 측정하여 30분 평균값을 저장하였다.

측정기간인 2012년 6월 6일과 7일의 일최고기온은 각각 29.4℃와 30℃로 초여름 날씨로는 매우 무더웠다. 일적산증발산량은 6일에는 2,686.1g/m², 7일에는 3,312.8g/m²이었으며, 증발산량의 변화는 비슷한 경향을 보였으며, 일사량이 증가함에 따라 증발산량이 증가하는 것으로 나타났다. 옥상녹화와 대조구의 온도차이를 살펴보면 6월 6일의 경우, 기온이 29.4℃로 가장 높았던 15시 30분의 옥상녹화 표면은 32.2℃를 기록한 반면에 대조구 표면은 37.7℃로 대기 기온과의 차이가 각각 2.8℃와 8.3℃로 옥상녹화에 의한 기온저감효과가 인정되었다. 같은 시각의 대조구 천장은 40.5℃를 보인 반면에 옥상녹화 천장면은 27.4℃로 13.1℃의 차이를 보여 옥상녹화에 의한 실내온도저감

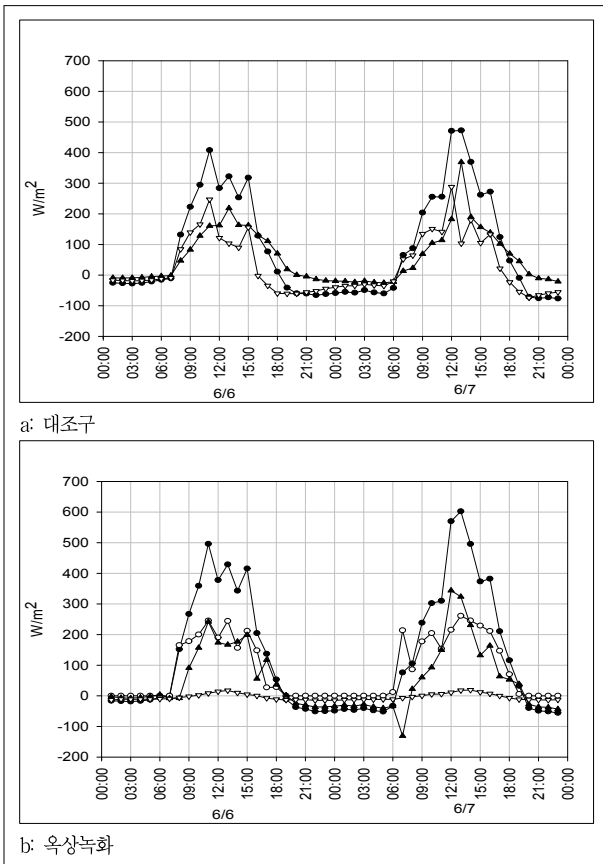


그림 7. 대조구와 옥상녹화 열수지 일변화
 범례: ● 순복사량 ○ 잠열 ▲ 현열 ▼ 전도열

효과도 매우 큰 것으로 나타났다. 7일에는 대기기온은 16시에 30.1°C로 가장 높았으며, 같은 시각 대조구 표면은 39.5°C로 9.4°C가 상승되었으며, 대조구 천장면은 42.0°C로 11.9°C의 온도가 상승된 것으로 조사되었다. 그러나 옥상녹화 표면은 32.9°C로 2.8°C의 비교적 낮은 온도상승을 보였으며, 옥상녹화 천장면은 27.8°C로 온도가 2.3°C가 저감된 것으로 나타났다.

대조구의 일적산순복사량은 6월 6일은 2,006.2W/m²이었으며, 7일에는 2,199.8W/m²이었다. 옥상녹화의 일적산순복사량은 6일에는 2950.7W/m²이었으며, 7일에는 3,306.3W/m²로 옥상녹화의 순복사량이 높은 것으로 나타났다. 이는 대조구인 콘크리트와 옥상녹화에 의한 알베도의 차이(콘크리트 표면 0.25~0.29, 옥상녹화 0.17~0.2) 및 잔디식재에 의한 잠열에 기인하는 것으로 판단된다. 대조구의 일적산잠열량은 0W/m²를 나타낸 반면에 옥상녹화에서는 6월 6일의 경우에는 1,794.7W/m²을 7일에는 일적산잠열량은 2,232.0W/m²로 나타났다. 대조구의 일적산현열량은 6월 6일의 경우 1,378.0W/m²이었으며, 7일에는 1,385.4W/m²이었다. 그러나 옥상녹화의 일적산현열량은 1,256.3W/m²이었으며, 7일에는 1,163.8W/m²로 대조구에 비하여 낮게 나타났다. 대조구의 일적산전도열량은 6월 6일에는 628.1W/m²이었으며, 7일에는 814.4W/m²인 반면에 옥상녹화의 6일의 일적산전도열량은 -116.3W/m²로 나타났으며, 7일에는 -89.6W/m²로 나타나 낮았는데, 마이너스(-)의 전도열은 건물로부터의 열방출을 의미하기 때문에 옥상녹화는 열수지에서 냉각효과가 인정되었다.

본 연구는 옥상녹화의 온도저감과 열수지 해석을 시도했다는 점에서는 매우 의의가 크다고 할 수 있지만, 옥상녹화는 토심, 토양배합비, 식물종, 계절 등 여러 변수에 따라 온도저감효과가 다르게 나타날 수 있기 때문에(Fang, 2008; Gaffin *et al.*, 2010; Liang and Huang, 2011; Sendo *et al.*, 2010) 장기적인 모니터링 및 추가적인 후속연구가 이루어져야 할 것이다.

인용문헌

- 강태호, 조흥하, 이홍, 강성훈(2012) 식생모듈박스를 이용한 저토심 무관리형 옥상녹화: 토양 배합비가 식물생육에 미치는 영향을 중심으로. 한국조경학회지 49(3): 91-98.
- 국토해양부(2011) 건축물녹화 기본계획 수립 매뉴얼.
- 김원태, 박봉주, 윤용환(2008) 건축물의 옥상녹화 시공 및 지원제도에 관한 한일간 비교연구. 한국인간식물환경학회지 11(2): 1-7.
- 김정호, 윤용환(2011) 옥상녹화시스템 유형별 건물에너지 절감 및 경제성 분석. 서울도시연구 12(2): 125-140.
- 김해동(2010) 우리나라 도시의 열섬현상 실태와 발생원인. 도시문제 45(500): 17-21.
- 노컷뉴스(2012) 104년만의 최악 이상고온·가뭄 언제까지?.
- 명수정(2010) 도시열섬현상의 일반적인 특징과 원인. 도시문제 45(500): 12-16.
- 박세영, 송태갑, 김은일(2012) 옥상녹화 재료에 따른 실내온도 저감효과에 관한 연구. 휴양 및 경관계획연구소 논문집 6(1): 13-20.
- 박은진, 강규이, 남미아(2010) 도시열섬 완화를 위한 옥상녹화 활성화 방안. 경기개발연구원 보고서.
- 박은진, 남미아, 강규이(2012) 경기도의 옥상녹화 가용면적 추정과 이의 정책적 함의. 한국환경복원녹화기술학회지 15(1): 107-117.
- 박찬필, 古川修文(2004) 옥상녹화에 따른 콘크리트 건축물의 열환경 개선효과-일사차폐블록과 잔디를 대상으로. 한국환경복원녹화기술학회지 7(1):1-9.
- 이동근, 윤소원, 오승환, 장성완(2005) 옥상녹화조성에 따른 온도저감효과에 관한 연구-서울대학교 실험구를 중심으로. 한국환경복원녹화기술학회지 8(6):34-44.
- 이두호, 이웅직(2012) 옥상녹화 평지붕의 표면온도 저감효과에 대한 고찰. 한국생태환경건축학회논문집 12(3): 83-88.
- 이은희, 조은진, 박민영, 김동욱, 장성완(2007) 초화류를 중심으로한 관리조방적 옥상녹화용 식물 소재 선정. 한국환경복원녹화기술학회지 10(2): 84-96.
- 이춘우, 김수봉, 문혜식(2011) 옥상녹화의 녹화유형별 기온저감효과. 한국주거학회논문집 22(3):25-33.
- 정임수, 최동호, 이부용(2010) 하절기 잔디면의 복수수지 관측. 한국태양에너지학회 춘계학술발표대회 논문집 30(1): 176-181.
- 제정원, 김용태, 이경희(2010) 옥상층의 구성 재료에 따른 열환경 변화에 관한 연구. 한국건축환경설비학회논문집 4(1):35-40.
- 주진희, 윤용환(2010) 옥상녹화에서 토심, 토양배합비 및 지피식물에 따른 식재지반 수분 및 온도변화. 한국생태환경건축학회논문집 10(3): 11-16.
- 최동호, 이부용(2010) 하절기 실험을 통한 건물녹화용 피복재료의 복수수지 해석. 한국태양에너지학회논문집 30(3):71-80.
- 최진우, 김학기, 이경재, 강현경(2009) 저토심 인공지반 녹화공법의 경제성 및 도입 가능한 지피식물의 생육특성. 한국조경학회지 37(5): 98-108.
- 허인혜, 권원태(2007) 우리나라의 최근 10년간 기온 변화. 기후연구 2(2): 79-93.
- 那須香織, 飯島健太郎, 近藤三雄(2003) セダムによる屋上緑化はヒートアイランド現象の緩和策となりうるか. 日本造園學會關東支部大會事例・究報告集 (20): 71-72.
- 大岡龍三(2005) 建物壁面緑化, 屋上緑化の屋外温熱環境緩和効果について. 日本流体力學會誌 24: 497-503.
- 大野朋子, 山本聰, 前中久行(2006) メキシコマンネングサおよび芝生薄層緑化からの蒸發散量. ランドスケープ研究 69: 431-436.
- 鈴木弘孝, 三坂育正(2008) 季節の違いによる壁面緑化の温熱環境改善効果. 日本緑化工學會誌 33(4): 587-595.
- 山口隆子, 横山 仁, 石井康一郎(2004) 軽量薄層型屋上緑化システムにおけるヒートアイランド緩和効果. ランドスケープ研究 68(5): 509-512.
- 辻 盛生, 平塚 明, 佐野嘉彦, 鈴木 周(2008) アゼスゲの屋上緑化への応用と温度上昇抑制効果の評価. 日本緑化工學會誌 34(2): 375-383.
- 王 革, 梅干野 晁, 何 江, 堀口 剛(1993) 屋上芝生植栽の熱的特性に関する實驗研究: その9 水収支特性に関するデータ解析. 日本建築學會學術講演梗概集: 1527-1528.
- 横山 仁, 三坂育正, 三輪 隆, 石渡健太郎, 佐々木啓行, 青木正敏, 康一郎(2007) 貯水型屋上緑化システムのヒートアイランド緩和効果に関する研究. 東京都環境科學研究所年報 2007: 12-16.
- Chen, Y., C. M. Teo, N. H. Wong and P. Y. Tan(2004) Preliminary study of leaf area index and thermal protection of vegetation in the tropical climate. The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, The Netherlands. pp.211-216.
- Clark C., B. Brian, and A. Peter(2010) Quantifying thermal impacts of green infrastructure: Review and gaps. Cities of the Future/Urban River Restoration 2010. pp.69-79.
- Dvorak, B. and A. Volder(2012) Rooftop temperature reduction from unirrigated modular green roofs in south-central Texas. Urban Forestry and Urban Greening(in press).
- Fang, C. F(2008) Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops. Energy and Buildings 40: 1048-1052.

34. Gaffin, S. R., C. Rosenzweig, J. Eichenbaum-Pikser, R. Khanbilvardi and T. Susca(2010) A temperature and seasonal energy analysis of green, white, and black roofs. Columbia University, Center for Climate Systems Research. New York. 19pages.
35. Liang, H. H. and K. T. Huang(2011) Study on rooftop outdoor thermal environment and slab insulation performance of grass planted roof. International Journal of the Physical Sciences 6(1): 65-73.
36. Sailor, D. J., T. B. Elley and M. Gibson(2012) Exploring the building energy impacts of green roof design decisions-a modeling study of buildings in four distinct climates. Journal of Building Physics 35: 372-391.
37. Sendo, T., M. Kanechi, Y. Uho and N. Inagaki(2010) Evaluation of growth and green coverage of ten ornamental species for planting as urban rooftop greening. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science 79(1): 69-76.
38. Takebayashi, H. and M. Moriyama(2007) Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. Building and Environment 42: 2971-2979.

원 고 접 수 일: 2012년 10월 24일
심 사 일: 2012년 11월 21일(1차)
계 재 확 정 일: 2012년 12월 20일
3 인 익 명 심 사 필