

경량모듈형 옥상녹화시스템의 온도저감 및 열수지 평가

김세창 · 박봉주*

충북대학교 원예과학과

Assessment of Temperature Reduction and Heat Budget of Extensive Modular Green Roof System

Se-Chang Kim and Bong-Ju Park*

Department of Horticultural Science, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

Abstract. The purpose of this study was to evaluate temperature reduction and heat budget of extensive modular green roof planted with *Sedum sarmentosum* and *Zoysia japonica*. Plant height and green coverage were measured as plant growth. Temperature, net radiation and evapotranspiration of concrete surface, green roof surface, in-soil and bottom were measured from August 2 to August 3, 2012 (48 hours). On 3 P.M., August 3, 2012, when air temperature was the highest (34.6°C), concrete surface temperature was highest (57.5°C), followed by surface temperature of *Sedum sarmentosum* (40.1°C) and *Zoysia japonica* (38.3°C), which proved temperature reduction effect of green roof. Temperature reduction effect of green roof was also shown inside green roof soil, and bottom of green roof. It was found that *Zoysia japonica* was more effective in temperature reduction than *Sedum sarmentosum*. Compared with the case of concrete surface, the highest temperature of green roof surface was observed approximately 2 hours delayed. Plant species, temperature and soil moisture were found to have impact on surface temperature reduction. Plant species, air temperature, soil moisture and green roof surface temperature were found to have impact on temperature reduction in green roof bottom. As results of heat budget analysis, sensible heat was highest on concrete surface and was found to be reduced by green roof. Latent heat flux of *Zoysia japonica* was higher than that of *Sedum sarmentosum*, which implied that *Zoysia japonica* was more effective to improve thermal environment for green roof than *Sedum sarmentosum*.

Additional key words: evapotranspiration, net radiation, soil moisture, thermal performance, urban heat island

서 언

도심 내 환경문제로 대두되고 있는 도시열섬현상은 도시 기온이 주변 외곽지역보다 2-4°C 정도 높게 형성되는 것으로(Moon et al., 2006; Rosenzweig et al., 2007), 냉난방용 전기기기, 자동차와 연소기관에서 발생하는 배기가스뿐만 아니라 고밀도의 건축물로 인한 통풍방해, 불투수층 표면의 증가로 인한 녹지·수변 지역 감소 등이 주요인이다(Ling et al., 2011; Ono et al., 2005). 최근 이러한 문제점을 해결하기 위한 대안으로 옥상녹화, 벽면녹화 등 건축물녹화가 주목 받고 있다(Wong et al., 2010). 옥상녹화는 대지 부족 및 높은 지가 등 추가적인 토지확보가 어려운 도심에서 버려진

공간으로 인식되고 있는 옥상공간을 활용하여 녹지를 제공할 수 있다(Kang and Lee, 2005; Kim et al., 2010). 옥상녹화는 크게 관리·중량형(intensive green roof)과 저관리·경량형(extensive green roof)으로 구분되며, 관리·중량형은 목본류 중심으로 200mm 이상의 깊은 토심과 집중적인 유지관리가 필요한데 비하여 저관리·경량형은 초본류 위주로 조성되기 때문에 200mm 이하의 낮은 토심과 관수, 시비, 예초 등 지속적인 유지관리 없이도 식생층이 유지되는 시스템을 말한다(Nagase and Dunnett, 2010). 이러한 장점 때문에 건축물의 하중 부담이 낮은 저관리·경량형 옥상녹화시스템이 많이 이용되고 있는데, 적은 비용으로 넓은 면적의 녹화가 가능하다(Emilsson and Rolf, 2005). 건축물 옥상식생은 자

*Corresponding author: bjpak@chungbuk.ac.kr

※ Received 9 January 2013; Revised 21 March 2013; Accepted 25 March 2013. 이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

연식생과 비교하여 강한 일사, 바람, 고온, 습도, 높은 기온 차 등으로 식물 선택이 제한적이며(Kim et al., 2003), 그에 따라서 내건성이 강하고 저관리에 내성이 있는 *Sedum*속 식물이 많이 이용되고 있는 실정이다(Durhman et al., 2006; Emilsson and Rolf, 2005; Kim and Huh, 2003; Kim et al., 2003). 그러나 대부분의 *Sedum*속 식물은 CAM 식물로 C3와 C4 식물보다 적은 기공을 가지고 있으며, 광합성 특성으로 낮 동안 기공을 닫아 건조기간 동안 탈수현상을 피하는 생리적 기작을 가지는데(Thuring et al., 2010), 이와 같은 특성은 옥상녹화 적용 시 열섬현상 및 미기후완화 효과를 상대적으로 감소시킬 수 있다(Durhman et al., 2006). 반면에 한국잔디는 내건성이 강하고 동시에 증산작용도 뛰어나(Hoyano and Shirai, 1996; Ishihara et al., 1996; Ju et al., 2012), 옥상녹화 적용 시 열섬현상 등 환경문제를 완화할 수 있을 것으로 기대된다.

옥상녹화는 유입된 태양복사에너지를 현열과 잠열의 형태로 소비하며, 그 밖의 나머지 열은 각 구성층의 열전도에 따라 건물 내로 대류하여 에너지평형을 이뤄 온도를 저감시킨다(Kim, 2012). 특히, 식물과 토양의 증발산에 의한 잠열의 형성은 현열 및 건물 내 지중열전도량을 감소시켜 건물 내 온도저감 효과 뿐만 아니라 도시열섬현상 완화 및 미기후개선 효과를 기대할 수 있다(Ono et al., 2005). 이와 관련하여 국내에서 이루어지고 있는 옥상녹화의 온도저감 효과에 관한 대부분의 연구들은 콘크리트와 옥상녹화 표면온도 차이를 측정된 수준이며(Kim et al., 2009; Lee and Kim, 2004; Lee et al., 2005, 2011) 열수지를 통한 온도저감 효과를 시도한 사례는 거의 없다. 본 연구는 돌나물과 한국잔디를 식재한 경량 모듈형 옥상녹화시스템을 이용하여 식물재료에 따른 온열환경과 열수지를 평가하여 건축물 옥상의 온열환경 개선을 위한 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

재료 및 방법

식물 재료

2012년 4월 27일 충청북도 청주시에 위치한 충북대학교 부속농장 2층 옥상에 500(W) × 500(D) × 100(H)mm 크기의 경량 모듈형 옥상녹화용 상자(EcoTop EP-16, Eco & Bio,

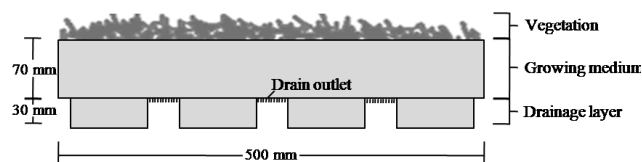


Fig. 1. Cross section of extensive modular green roof system.

Korea)에 펠라이트(Paraso, Kyungdong One., Korea):피트모스(BP-F, Berger, Canada):원예용상토(Wonjomix, Nongkyung Agroindustrial, Korea)를 7:2:1(v:v:v)로 혼합하여 식재층을 조성하였다(Fig. 1). 식물재료는 저관리·경량형 옥상녹화 조성 시 많이 이용되고 있는 돌나물(*Sedum sarmentosum*)과 한국잔디(*Zoysia japonica*)를 선정하였다(Getter and Rowe, 2009; Huh et al., 2003; Ju et al., 2012). 돌나물은 충북대학교 교내에서 채취한 재래종을 사용하였으며, 한국잔디는 시장에서 판매하는 180(L) × 180(W) × 20(T)mm 규격의 중엽형 한국잔디 뗏장을 구입하여 식재하였다. 돌나물은 Kim and Lee(2008)의 방법에 따라 상부의 3마디를 4cm 길이로 잘라 상자당 100개체씩 9반복으로 삽식하였다. 한국잔디는 상자당 뗏장을 4개씩 9반복으로 식재하였다. 식재 후 초기활착 시기와 여름 무강우 기간에는 주 2회의 빈도로 두상관수 하였으며 그 밖의 기간에는 자연강수에 의존하였다. 시비는 5월 20일에 복합비료(12N-5P-9K, Dongbu Farm Hannong, Korea)를 5g·m⁻² 실시하였다. 식물재료가 온열 환경에 미치는 영향을 분석하기 위하여 온도저감 및 열수지 측정이 종료된 직후인 8월 5일에 피복울과 엽면적을 조사하였다. 피복울은 1.2m 높이에서 디지털카메라를 이용하여 촬영한 다음 Adobe Photoshop 프로그램(Adobe System incorporated, USA)을 이용하여 녹화된 면적과 비녹화 면적의 색을 구분하여 백분율로 산출하였으며(Sendo et al., 2010), 엽면적은 반복당 10 × 10cm 면적으로 샘플링하여 엽면적계(Li-3000A, Li-Cor, USA)를 이용하여 측정하였다.

온열환경

온열환경 측정을 위한 실험구는 생육조사를 위해 조성한 돌나물과 한국잔디가 식재된 경량 모듈형 옥상녹화 상자를 이용하여 1,500 × 1,500mm의 크기로 하였으며, 동일한 넓이의 콘크리트 면적을 대조구로 하였다(Fig. 2). 옥상녹화와 대조구 표면, 토양 속, 옥상녹화 모듈 하부의 온도는 T형 열전대(Ø 0.32mm, Doo Kwang MFG, Korea)를 이용하여 측정하였다. 또한 열의 흐름을 파악하기 위하여 열류계(HFT3, Campbell Scientific, USA)를 옥상녹화와 대조구 표면, 모듈 하부에 부착하여 측정하였다. 옥상녹화 식재 토양의 수분함량은 토양수분측정기(10HS, Decagon Devices, USA)를 토심 5cm에 삽입 고정하여 측정하였다. 모든 측정은 2012년 8월 2일부터 3일까지 동일지점을 48시간 동안 연속하여 측정하였다. 실험기간 중 옥상의 기상환경은 옥상 중앙 부근에 설치한 자동기상관측장비(automatic weather system, AWS)를 이용하여 측정하였다. 높이 3m의 관측용 폴대 최상부에 풍향·풍속계를 설치하였으며, 옥상면에서 2m 높이에는 일

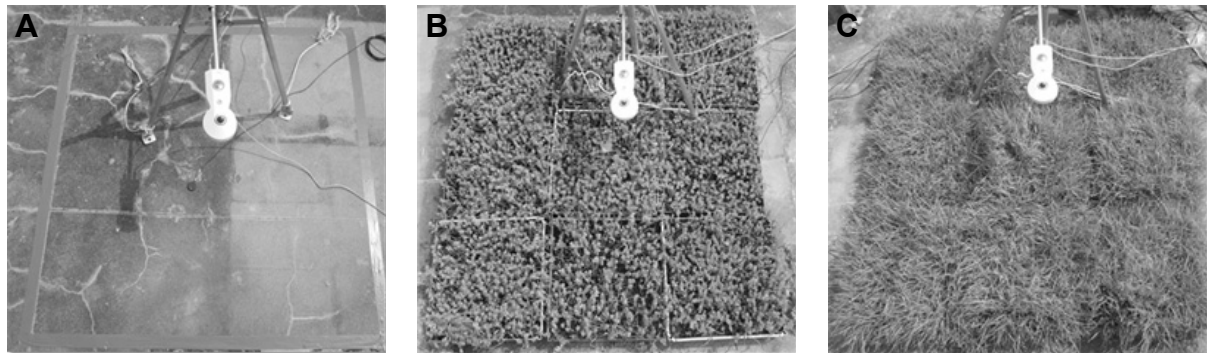


Fig. 2. Measurement of heat budget and temperature in control and experimental plots. (A) control; (B) *Sedum sarmentosum*; (C) *Zoysia japonica*.

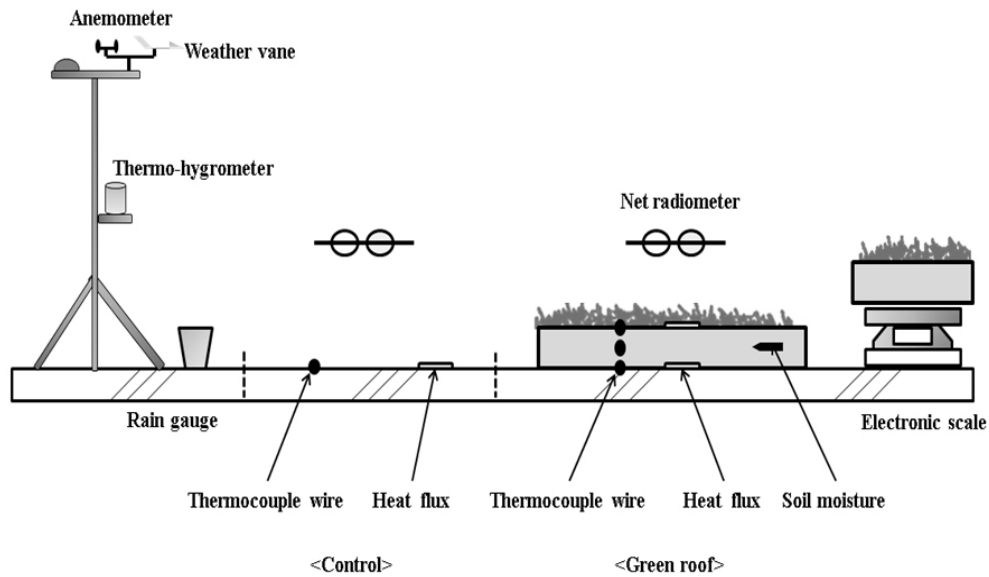


Fig. 3. Observation points of the experimental setup for this study.

사계를 1.5m 높이에는 통풍식 온습도계를 각각 설치하여 측정하였다. 강우량은 옥상면에 우량계를 설치하여 측정하였다(Fig. 3). 각 계측기의 측정데이터는 데이터로거(DT80, dataTaker, UK)를 이용하여 1분마다 측정하였으며, 30분간의 평균값을 이용하여 분석하였다.

열수지 측정

저관리·경량형 옥상녹화시스템 식재 식물에 따른 열수지를 정량화하기 위하여 순복사계(CNR4, Kipp & Zonen, The Netherland)를 대조구와 옥상녹화 실험구 중앙의 지표면으로부터 50cm 위에 고정시켜 측정하였다(Figs. 2 and 3). 측정된 순복사는 다음 식 (1)을 이용하여 열수지 특성을 분석하였다(Takebayasi and Moriyama, 2007).

$$Rn = H + IE + G \quad (1)$$

여기서, Rn : net radiation($W \cdot m^{-2}$), H : sensible heat flux($W \cdot m^{-2}$), IE : latent heat flux($W \cdot m^{-2}$), G : soil heat flux($W \cdot m^{-2}$)이다.

지중열전도량(G)은 온열환경에서 측정된 각 실험구의 표면 열류량을 이용하였다. 잠열(IE)과 현열(H)은 다음 식 (2)에 의하여 산출하였다.

$$IE = l \times E$$

$$l = 2.5 \times 10^6 - 2400 \times \theta_a \quad (2)$$

여기서, IE : latent heat flux($W \cdot m^{-2}$), l : latent heat of evaporation($J \cdot kg^{-1}$), E : evapotranspiration($kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), θ_a : surface temperature($^{\circ}C$)이다.

증발잠열(l)은 측정된 옥상녹화 토양표면온도(θ_a)와 식(2)에 의하여 산출하였으며, 증발산량(E)는 옥상녹화 실험구의

중량변화로부터 측정된 실측치를 이용하였다. 중량변화는 돌나물과 한국잔디가 식재된 경량 모듈형 옥상녹화용 상자 하나씩을 이용하였으며, 충분한 양의 물을 관수한 다음 중력수가 빠져나간 24시간 후 전자저울(EC-30D, CAS, Korea)을 이용하여 연속 측정하였다. 데이터는 데이터로거(DT80, dataTaker, UK)를 이용하여 1분 간격으로 저장하였으며, 30분 동안의 평균값을 이용하여 분석하였다. 통계분석은 SAS 프로그램(SAS 9.2, SAS Institute Inc., USA)을 이용하여 독립표본 T검정과 이변량 상관분석, 회귀분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

기상환경

실험기간 동안 기상환경과 청주시 과거 30년(1981-2010년)의 기상을 비교하면 5월, 6월에는 맑은 날이 많아 기온은 평년과 같았으나, 7월, 8월에는 극심한 더위와 태풍으로 인한 집중호우가 내렸다. 6월 이후 평균기온 20°C 이상, 최고기온 30°C 이상을 나타냈으며, 8월 최고기온은 27.3°C로 8월의 평년기온 25.8°C보다 높아 무더운 날씨를 나타냈다. 평균습도는 여름기간 동안 70% 이상을 보였으며, 강우량은 6월 93.7mm, 7월 257.4mm, 8월 479.5mm로 여름기간(6-8월)의 평년 강우량 711.9mm보다 높았다(Table 1).

온열환경

옥상의 기상을 측정된 결과, 일 최고기온은 8월 2일 34.8°C, 8월 3일 35.1°C로 평균 30°C 이상의 높은 기온을 나타냈으며, 상대습도는 평균 60% 이상을 보였다. 일사량은 최대 900W·m²를 나타냈으며, 풍속은 평균 3.0m·s⁻¹로 조사되었다. 측정기간 중 34.6°C로 가장 기온이 높았던 8월 3일 15:00시의 표면온도는 콘크리트가 57.5°C로 가장 높았으며, 그 다음으로 돌나물 40.1°C, 한국잔디 38.3°C의 순으로 나타났다. 옥상녹화 조성 시 콘크리트와 온도 차는 17.4°C-19.2°C이었으며, 한국잔디가 돌나물보다 1.8°C 기온을 더 저감시

키는 것으로 나타났다. 모듈 하부의 온도는 돌나물 36.4°C, 한국잔디 36.0°C로 콘크리트 표면과의 온도 차는 약 21°C로 크게 나타났으나, 식물 간의 온도 차는 0.4°C로 차이가 크지 않았다. 토양 속 온도는 한국잔디(32.9°C)가 돌나물(37.3°C)보다 4.4°C가 더 낮은 것으로 나타났다(Fig. 4 and Table 2). 이는 8월 5일 돌나물과 한국잔디의 피복율과 엽면적 조사결과, 피복율과 엽면적 모두 한국잔디가 돌나물보다 더 높았기 때문인 것으로 판단된다(Table 3). 식재식물의 엽

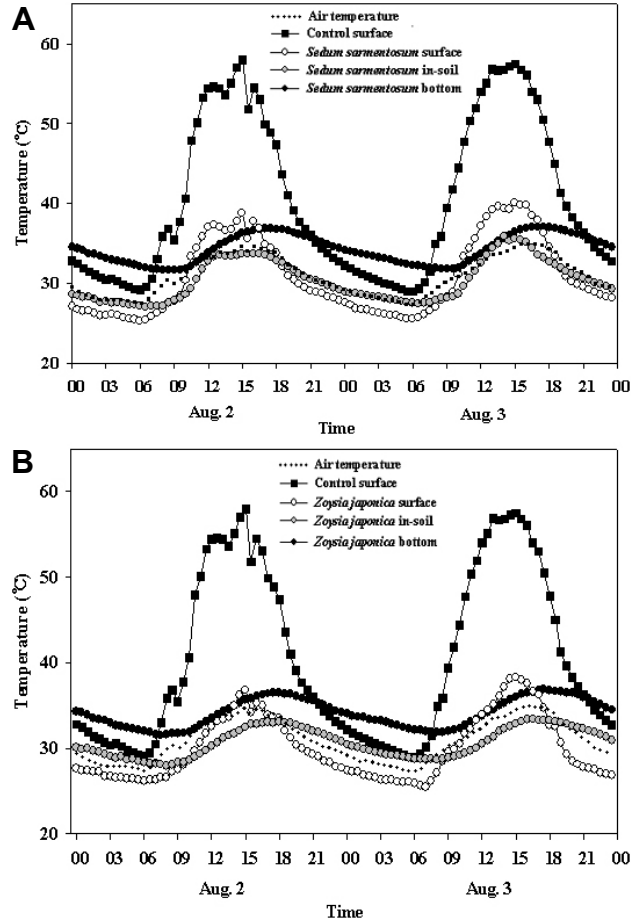


Fig. 4. Change in temperature at each observation point. (A) *Sedum sarmentosum*; (B) *Zoysia japonica*.

Table 1. Weather condition from May to November 2012.

| Month | Air temperature (°C) | | | Relative humidity (%) | Wind velocity (m·s ⁻¹) | Precipitation (mm) |
|-----------|----------------------|------|------|-----------------------|------------------------------------|--------------------|
| | Max. | Min. | Avg. | | | |
| May | 29.4 | 10.7 | 19.9 | 54.6 | 1.5 | 31.2 |
| June | 32.6 | 15.5 | 23.8 | 61.2 | 1.8 | 93.7 |
| July | 34.5 | 19.4 | 26.3 | 76.3 | 1.5 | 257.4 |
| August | 36.4 | 18.7 | 27.3 | 74.0 | 2.0 | 479.5 |
| September | 31.5 | 11.1 | 21.1 | 73.6 | 1.4 | 162.5 |
| October | 20.8 | 9.5 | 14.8 | 65.7 | 1.1 | 61.2 |
| November | 10.6 | 2.2 | 6.2 | 64.9 | 1.3 | 52.1 |

Table 2. Temperature at each observation point at the time with the highest air temperature (3 P.M., 35.1°C) on August 3, 2012.

| Plot | Surface (°C) | In-soil (°C) | Bottom (°C) |
|--------------------------|---------------------------|--------------|-------------|
| Control | 57.5 | - | - |
| <i>Sedum sarmentosum</i> | 40.1 (17.4 ²) | 37.3 (20.2) | 36.4 (21.1) |
| <i>Zoysia japonica</i> | 38.3 (19.2) | 32.9 (24.6) | 36.0 (21.5) |

²Temperature difference between control surface and each observation point.

Table 3. Growth characteristics of *Sedum sarmentosum* and *Zoysia japonica* on extensive modular green roof system on August 5, 2012.

| Plant | Green coverage (%) | Leaf area (cm ²) |
|--------------------------|--------------------|------------------------------|
| <i>Sedum sarmentosum</i> | 70.3 ± 1.25 | 159.7 ± 12.62 |
| <i>Zoysia japonica</i> | 97.7 ± 0.62 | 501.6 ± 30.58 |

²Data are shown as mean ± standard error (n = 9).

면적지수(LAI)가 높을수록 위에서부터 내려오는 열을 차단하고, 토양표면 위에 그늘을 형성하여 토양표면의 온도상승을 억제한다(Jim, 2012; Wong et al., 2003). 또한, 식물체의 재식밀도, 초장과 같은 지상부 생육은 온도저감 효과에 중요한 역할을 하며, 특히 목본류와 같은 다층구조는 비교적 높은 엽면적지수로 인하여 토양표면 위의 공기를 외부와 차단하여 보다 높은 토양냉각효과를 기대할 수 있다(Takakura et al., 2000; Wong et al., 2002).

8월 2일 24시간 동안의 최대온도와 최소온도 차를 분석한 결과, 대조구가 28.8°C로 가장 높았으며, 돌나물 표면(13.5°C), 한국잔디 표면(10.7°C), 돌나물 토양 속(6.6°C), 한국잔디 토양 속(5.2°C)과 돌나물 모듈 하부(5.2°C), 한국잔디 모듈 하부(5.0°C)의 순으로 나타났다. 전체적으로 표면에서 하부로 내려갈수록 온도 변화폭이 적었으며, 돌나물보

다는 한국잔디의 변화폭이 적었다(Table 4). 이와 같은 온도변화의 감소는 건축물 옥상에 옥상녹화를 조성할 경우, 건축물 내 안정된 열환경을 조성함으로써 냉·난방에너지의 이용을 줄여 비용절감 효과를 가져올 수 있다(Celik et al., 2010).

기온과 콘크리트, 옥상녹화 표면은 15:00시에 가장 높은 온도를 보였으나, 옥상녹화 토양 속과 모듈 하부의 최고 온도는 지연되는 현상을 보였다. 토양 속은 돌나물이 1시간 30분, 한국잔디가 2시간 지연되었으며, 모듈 하부는 돌나물과 한국잔디는 각각 2시간과 2시간 30분이 지연되는 것으로 나타났다. 이는 옥상녹화 조성이 식재 식물과 토양에 의한 증발산량의 증가로 현열과 지중열전도량을 감소시켜 건축물로 유입되는 열을 지연시켰기 때문으로(Lin and Lin, 2011), 측정기간 동안의 총 증발산량은 한국잔디 14,155.2g·m⁻², 돌나물 11,238.7g·m⁻²이었다(Fig. 5). 이처럼 옥상녹화의 온도저감 효과는 식물체의 생육상태 뿐만 아니라 식재지반을 포함한 옥상녹화 구성층의 물리성에 따라 차이가 나며(Ling et al., 2011), 식재층의 다공성이 높을 경우에는 수분과 공기 보유능력이 상승하여 높은 온도감소 효과를 기대할 수 있다(Yang, 2007). 또한, 최고온도의 지연현상과 최고온도와 최저온도 간 온도 폭 감소는 방수층에 대한 물리적인 스트레스를 완화하여 옥상 콘크리트 구조물의 내구성을 향상시킬

Table 4. Temperature comparison between the experimental plots on August 2, 2012.

| Observation point | Average temperature (°C) | Range of temperature (°C) | Temperature difference (°C) | Time with highest temperature (hh:mm) | Time lag ² (h:mm) |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Air temperature | 30.9 | 27.4-34.8 | 7.4 | 15:00 | 0:00 |
| Control surface | 40.1 | 29.2-58.0 | 28.8 | 15:00 | 0:00 |
| <i>Sedum sarmentosum</i> | | | | | |
| Surface | 30.4 | 25.2-38.7 | 13.5 | 15:00 | 0:00 |
| In-soil | 30.1 | 27.1-33.7 | 6.6 | 16:30 | +1:30 |
| Bottom | 34.2 | 31.6-36.8 | 5.2 | 17:00 | +2:00 |
| <i>Zoysia japonica</i> | | | | | |
| Surface | 29.7 | 26.2-36.8 | 10.7 | 15:00 | 0:00 |
| In-soil | 30.5 | 27.9-33.7 | 5.2 | 17:00 | +2:00 |
| Bottom | 34.0 | 31.5-36.5 | 5.0 | 17:30 | +2:30 |

²The time lag is difference between time with highest temperature at each observation point and time with the highest air temperature.

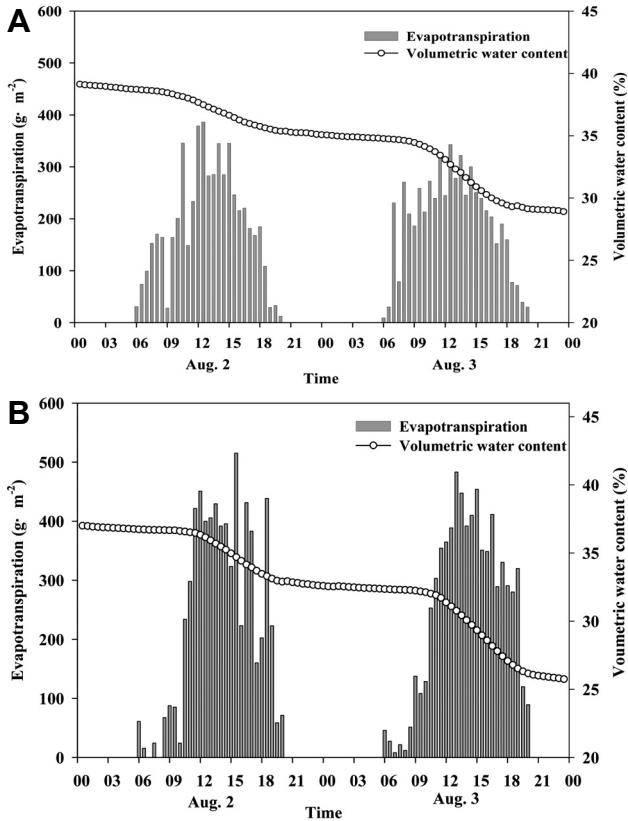


Fig. 5. Evapotranspiration of green roof planted with *Sedum sarmentosum* (A) and *Zoysia japonica* (B).

수 있기 때문에(Köchler, 2006) 옥상녹화 조성 시 식재 토양 층에 대해 충분히 검토할 필요가 있다.

기온과 풍속이 표면 온도저감(surface cooling)과 모듈 하부의 온도저감(bottom cooling)에 미치는 영향을 분석한 결과는 Fig. 6과 같다. 표면온도의 경우, 돌나물($R^2 = 0.826$, $P = 0.000$)과 한국잔디($R^2 = 0.819$, $P = 0.000$)는 기온이 높아질수록 온도저감 효과도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 풍속에 의한 온도저감 효과는 크지 않았으며, 일정한 경향이 나타나지 않았다. 하부온도는 돌나물($R^2 = 0.764$, $P = 0.000$)과 한국잔디($R^2 = 0.770$, $P = 0.000$) 모두 기온이 높아질수록 온도저감 효과가 큰 것으로 나타났으며, 표면온도와 비교해서 온도저감 폭이 더 큰 것으로 나타났으나, 풍속과는 관련성이 적은 것으로 나타났다. Dvorak and Volder (2013)는 다육식물을 이용한 옥상녹화의 온도저감 효과를 분석한 결과, 콘크리트 표면과 비교하여 토양 표면과 토양 하부 모두 온도저감 효과가 인정되었으며, 특히 토양 표면(18.0°C)보다는 토양 하부(27.5°C)에서 온도 감소폭이 큰 것으로 나타났다고 보고하여 본 연구 결과와 일치하였다.

독립표본 T 검정 결과, 식물종은 표면 온도저감과 모듈 하부 온도저감에 통계적으로 유의한 영향이 없는 것으로 나타났다. 돌나물과 한국잔디 각각의 표면 온도저감에 기온과

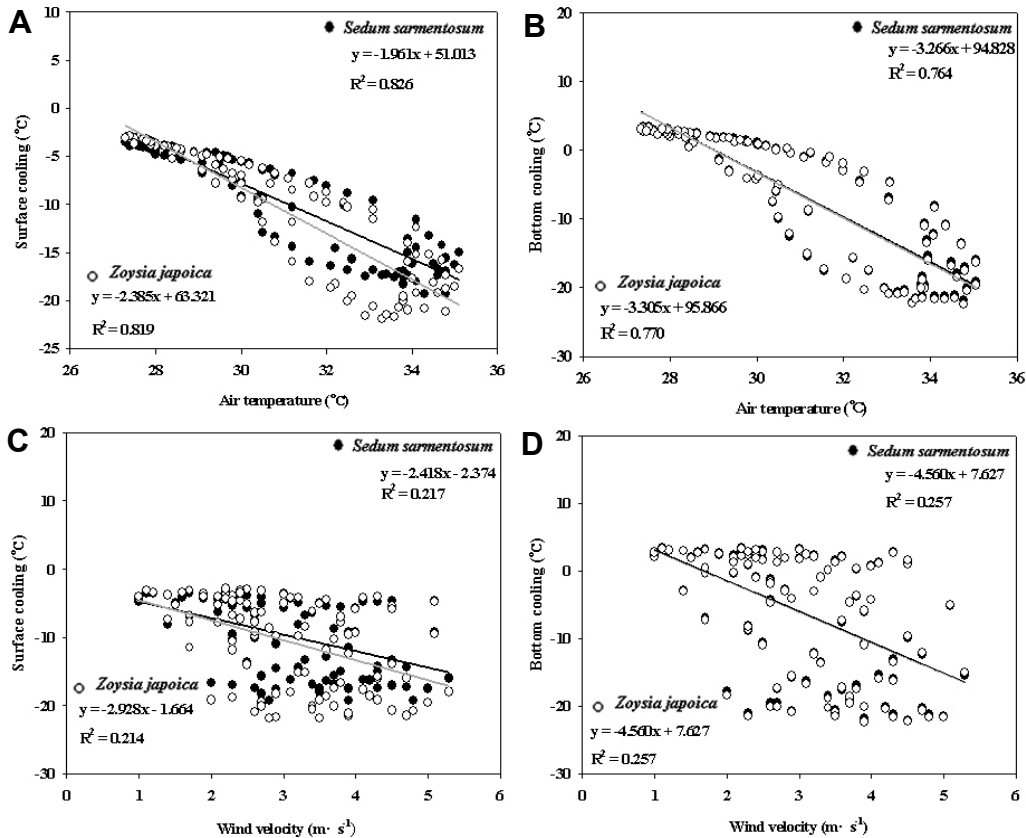


Fig. 6. Green roof surface cooling (green roof surface temperature - concrete surface temperature) (A and C), bottom cooling (bottom temperature - concrete surface temperature) (B and D) affected by air temperature and wind velocity.

토양수분이 미치는 영향을 이변량 상관분석을 실시한 결과, 돌나물의 표면 온도저감에는 기온과 토양수분이 유의한 영향을 미쳤지만, 한국잔디의 표면 온도저감에는 기온 만 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다($p < 0.05$). 돌나물과 한국잔디는 기온이 올라갈 수록 온도저감 효과가 증가하였다. 돌나물의 경우 토양수분이 높아질수록 온도저감 효과는 떨어지는 경향을 보였다.

돌나물과 한국잔디의 모듈 하부 온도저감에 기온, 토양수분, 표면온도가 미치는 영향을 역시 이변량 상관분석을 실시한 결과, 돌나물의 모듈 하부 온도저감에는 기온, 토양수분, 표면온도 모두가 5% 유의수준에서 통계적으로 유의한 영향을 미치지, 한국잔디의 모듈 하부 온도저감에는 기온과 표면온도 만 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 돌나물과 한국잔디 모두 기온이나 표면온도가 올라갈 수록 모듈하부의 온도저감 효과는 커지는 경향을 보였으며, 돌나물의 경우 토양수분이 높을 수록 모듈 하부 온도저감 효과가 떨어지는 경향을 보였다(Table 5).

모듈 하부온도는 토양 표면온도의 영향을 받으며, 토양 표면온도는 식물종, 기온, 토양수분, 피복율의 상호작용에 의해 영향을 받는다(Sailor et al., 2012). 식물종에 따른 엽면적지수는 토양 표면의 증발산능력에 의한 냉각능력에 중요한 요소가 되며(Tabares-Velasco and Srebric, 2012), 토양수분함량이 높을수록 토양 표면에서 건축물로의 단열효과 뿐만 아니라 토양으로부터의 증발산 능력도 향상되기 때문에 온도저감 효과를 증가시킬 수 있다(Feng et al., 2010). 옥상

녹화에 의한 온도저감 효과는 식재층에 관수를 실시한 조건에서의 결과가 대부분이지만(Sonne, 2006; Simmons et al., 2008), 무관수 조건에서도 일정수준 이상의 온도저감 효과가 있는 것으로 보고되고 있어(Dvorak and Volder, 2013), 관수 조건 뿐만 아니라 옥상녹화의 식물재료, 식재층 등 구성요소에 대한 충분한 고려가 필요하다.

열수지

돌나물과 한국잔디를 식재한 경량 모듈형 옥상녹화시스템의 09:00-18:00시의 낮 동안 열수지 분석 결과는 Table 6 과 같다. 총 잠열량(IE)은 한국잔디(8월 2일 3,986.1W·m², 8월 3일 4,226.2W·m²)가 돌나물(8월 2일 3,227.8W·m², 8월 3일 3,252.5W·m²)보다 높은 것으로 나타났다. 총 현열량(H)과 총 지중열전도량(G)는 8월 2일과 3일 모두 콘크리트 표면에서 가장 높게 난 반면에 돌나물과 한국잔디에서는 상대적으로 낮은 값을 나타냈다. 이는 옥상녹화 조성 시 콘크리트 표면보다 순복사량이 증가하고, 증발산으로 인한 잠열의 소비로 인해 현열과 건축물로 축열되는 전도열이 감소하였다는 보고와 일치하였다(Takebayasi and Moriyama, 2007).

순복사량이 가장 높았던 8월 3일 13:00시의 순복사량에 대한 현열, 잠열, 지중열전도량의 비율로 열수지를 분석한 결과는 Fig. 7과 같다. 콘크리트 표면은 현열 29.8%와 지중열전도량 70.2%의 구성비율을 나타냈다. 돌나물은 현열 35.1%, 잠열 62.2%, 지중열전도량 2.7%의 구성비율을 나타냈으며, 한국잔디는 현열 13.6%, 잠열 85.5%, 지중열전도량

Table 5. Results of bivariate correlation analysis to test the effects of air temperature, volumetric water content and green roof surface temperature on cooling at the green roof surface and bottom by plant species.

| Factor | Surface cooling ^z | | Bottom cooling ^y | |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| | <i>Sedum sarmentosum</i> | <i>Zoysia japonica</i> | <i>Sedum sarmentosum</i> | <i>Zoysia japonica</i> |
| Air temperature | -.908*** | -.904*** | -.874*** | -.878*** |
| Volumetric water content | .225* | .165 | .230* | .116 |
| Green roof surface temperature | | | -.955*** | -.924*** |

^zSurface cooling = green roof surface temperature - concrete surface temperature.

^yBottom cooling = green roof bottom temperature - concrete surface temperature.

* $p < 0.05$, *** $p < 0.001$.

Table 6. Heat budget on experimental plots between 9 A.M. and 6 P.M. on August 2 and 3, 2012.

| Plot | Latent heat flux (LE) | | | | Sensible heat flux (H) | | | | Soil heat flux (G) | | | |
|--------------------------|-----------------------|-------|---------------------|---------|------------------------|--------|--------|---------|--------------------|--------|--------|---------|
| | Max. | Min. | D.I.R. ^z | | Max. | Min. | D.I.R. | | Max. | Min. | D.I.R. | |
| | | | Aug. 2 | Aug. 3 | | | Aug. 2 | Aug. 3 | | | Aug. 2 | Aug. 3 |
| Control | - | - | - | - | 201.2 | -9.9 | 1634.8 | 1659.5 | 398.8 | -166.5 | 841.0 | 1,134.6 |
| <i>Sedum sarmentosum</i> | 448.3 | 130.1 | 3,227.8 | 3,252.5 | 234.4 | -115.5 | 673.7 | 1,159.3 | 19.1 | -11.4 | 35.9 | -89.6 |
| <i>Zoysia japonica</i> | 587.0 | 74.2 | 3,986.1 | 4,226.2 | 327.0 | -324.1 | 175.8 | 606.2 | 6.6 | -36.0 | -36.0 | -375.5 |

^zDaytime integrated radiation (W·m²).

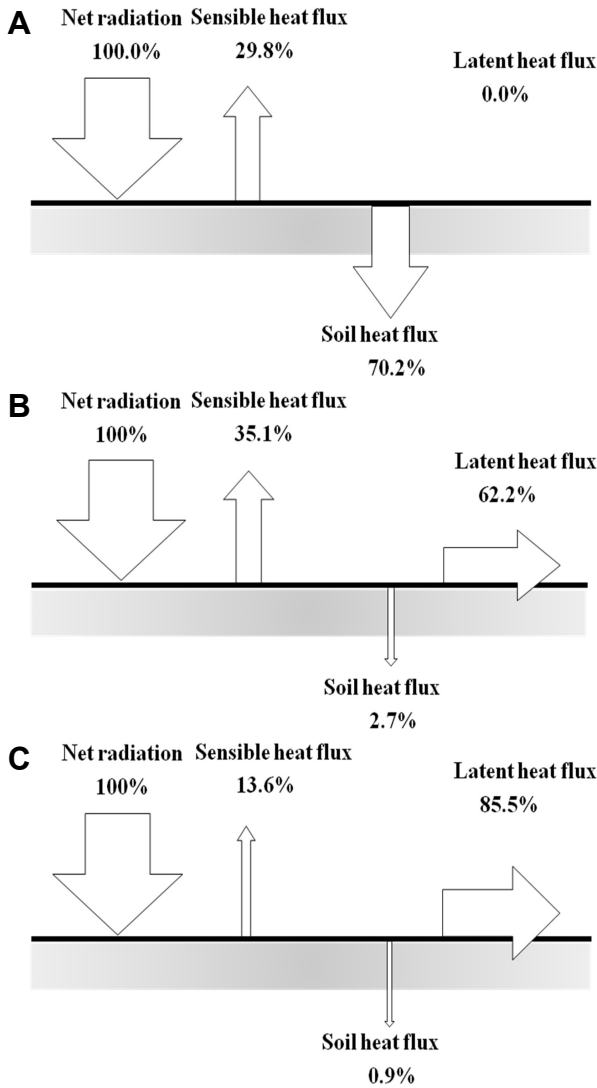


Fig. 7. Schematic diagram of heat budget of control and experimental plots at 1 P.M. on August 3, 2012. (A) control; (B) *Sedum sarmentosum*; (C) *Zoysia japonica*.

0.9%의 구성비율을 보여 돌나물보다 한국잔디 식재 시 잠열의 비율이 증가하고 현열, 지중열전도량은 감소하는 것으로 나타났다. Jones and Suckling(1983)은 지피식물을 활용한 옥상녹화 시 순복사량의 약 96.5%가 잠열의 형태로 소비된다고 보고하여 본 연구의 결과와 유사한 경향을 보였다. 따라서 돌나물보다 한국잔디를 옥상녹화에 적용하는 것이 온도저감 및 열섬현상 완화에 더 효과적인 것으로 판단된다. 옥상녹화에 의한 열수지 측정에는 순복사, 식재층에 의한 현열과 잠열의 흐름, 토양층에 의한 열전도 해석이 필요하며(Tabares-Velasco et al., 2012), 열수지는 기상조건, 식물의 생리학적 기능, 건물구조 등 다양한 변수에 의하여 영향을 받기 때문에(Jim and He, 2010), 이러한 요소들과의 관련성에 대한 추가적인 해석이 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 돌나물과 한국잔디를 식재한 경량 모듈형 옥상녹화시스템의 온도저감과 열수지를 평가하였다. 식물생육은 초고와 피복율을 측정하였으며, 2012년 8월 2일부터 3일까지 48시간 동안 콘크리트와 옥상녹화 표면, 토양 속, 모듈 하부의 온도와 순복사, 증발산량을 측정하였다. 기온이 34.6°C로 가장 높았던 8월 3일 15:00시의 표면온도는 콘크리트가 57.5°C로 가장 높았으며, 그 다음으로 돌나물 40.1°C, 한국잔디 38.3°C의 순으로 옥상녹화 조성 시 큰 폭으로 온도가 저감되는 것으로 나타났다. 토양 속과 모듈 하부도 옥상녹화에 의한 온도저감 효과가 나타났으며, 한국잔디가 돌나물보다 온도저감 효과가 큰 것으로 나타났다. 콘크리트 표면과 비교하여 옥상녹화 최고 온도는 약 2시간 정도 지연되는 것으로 나타났다. 표면의 온도저감에는 식물층, 기온, 토양수분이 영향을 미치고, 모듈 하부의 온도저감에는 식물층, 기온, 토양수분, 표면온도가 유의하게 영향을 미친 것으로 나타났다. 열수지 분석결과, 현열은 콘크리트 표면이 가장 높았으며, 옥상녹화 시 감소하는 경향을 보였으며 잠열은 한국잔디가 돌나물보다 높았다. 따라서 온열환경 개선을 위해서는 한국잔디가 돌나물보다 옥상녹화 적용에 더 효과적임을 알 수 있었다.

추가 주요어 : 증발산, 순복사, 토양수분, 열성능, 도시열섬

인용문헌

Celik, S., S. Morgan, and W.A. Retzlaff. 2010. Energy conservation analysis of various green roof system. Green Technol. Conf. 1-4.

Durhman, A.K., D.B. Rowe, and C.L. Rugh. 2006. Effect of watering regimen on chlorophyll fluorescence and growth of selected green roof plant taxa. HortScience 41:1623-1628.

Dvorak, B. and A. Volder. 2013. Rooftop temperature reduction from unirrigated modular green roofs in south-central Texas. Urban For. Urban Greening 12:28-35.

Emilsson, T.U. and K. Rolf. 2005. Comparison of establishment methods for extensive green roofs in southern Sweden. Urban For. Urban Greening 3:103-111.

Feng, C., Q.L. Meng, and Y.F. Zhang. 2010. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. Energy Buildings 42:959-965.

Getter, K.L. and D.B. Rowe. 2009. Substrate depth influences *Sedum* plant community on a green roof. HortScience 44: 401-407.

Hoyano, A. and K. Shirai. 1996. Investigation of the effect of rooftop lawn planting on indoor thermal environment by measurement and simulation. J. RIEMAM 18:39-42.

Huh, K.Y., I.H. Kim, and H.C. Kang. 2003. Effects of artificial

- substrate type, soil depth, and drainage type on the growth of *Sedum sarmentosum* grown in a shallow green rooftop system. *J. Kor. Inst. Landscape Architecture* 31:102-112.
- Ishihara, O., Q.Y. Zhang, and K. Shimoyama. 1996. Experimental study on thermal characteristics and water performance of rooftop lawn. *J. Architecture Planning Environ. Eng.* 486:17-24.
- Jim, C.Y. and H. He. 2010. Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem. *Ecol. Eng.* 36:1052-1063.
- Jim, C.Y. 2012. Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of tropical green roof. *Landscape Ecol. Eng.* 8:173-187.
- Jones, C.A. and W. Suckling. 1983. Comparison of the radiation balance of a rooftop lawn with that of a conventional rooftop surface. *Arch. Meteorol. Geophysics Bioclimatology Ser. B* 33:77-87.
- Ju, J.H., G.T. Bae, W.T. Kim, and Y.H. Yoon. 2012. Computation of irrigation interval and amount as affected by growing substrate and soil depth planted with *Zoysia japonica* in green roof during a dry summer. *J. Environ. Sci.* 21:289-296.
- Kang, K.Y. and E.H. Lee. 2005. The study on native plants and planting soil for extensive rooftop greening. *J. Kor. Environ. Restoration Revegetation Technol.* 8:23-31.
- Kim, D.H., K.W. Lee, J.Y. Lee, Y.C. Seok, and M.Y. Huh. 2009. The study on temperature reduction and survey of roof garden in Gaho-dong, Jinju city. *J. Kor. Soc. People Plants Environ.* 12(3):39-44.
- Kim, H.J. and S.Y. Lee. 2008. Variation of growth and yield in rice nursery-tray cultivation of *Sedum sarmentosum* local strains. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 26:129-133.
- Kim, I.H. and K.Y. Huh. 2003. Growth characteristics of *Sedum oryzifolium* in extensive green roof systems. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 21:346-352.
- Kim, I.H., K.Y. Huh, and M.R. Huh. 2010. Cold tolerance assessment of *Sedum* species for shallow-extensive green roof system. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 28:22-30.
- Kim, M.H., K.J. Bang, J.H. Ju, and S.W. Han. 2003. Effects of light-weight soil mixture and depth on the three native plants in extensive roof garden. *J. Kor. Inst. Landscape Architecture* 31:101-107.
- Kim, T.H. 2012. A study on thermal simulation for extensive green roof system using a plant canopy model. *J. Kor. Environ. Restoration Technol.* 15:137-147.
- Köehler, M. 2006. Long-term vegetation research on two extensive green roofs in Berlin. *Urban Habitats* 4:3-26.
- Lee, C.W., S.B. Kim, and H.S. Moon. 2011. A study on the analysis of temperature reduction effect by the types of the green roof. *J. Kor. Housing Assn.* 22(3):25-33.
- Lee, D.K., S.W. Yoon, S.H. Oh, and S.W. Jang. 2005. The effect of temperature reduction as influenced by rooftop greening. *J. Kor. Environ. Restoration Revegetation Technol.* 8(6):34-44.
- Lee, S.T. and J.S. Kim. 2004. Temperature changes of indoor and outdoor by grass planting block in planting of roof area. *J. Kor. Environ. Restoration Revegetation Technol.* 7(6):54-60.
- Lin, Y.J. and H.T. Lin. 2011. Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries. *Building Environ.* 46:345-355.
- Ling, P., M. Kawamura, and K. Nakane. 2011. Effect on rooftop temperatures and heat fluxes of a bamboo charcoal sublayer in rooftop greening soil at a factory office. *Intl. J. Environ. Protection* 1:15-20.
- Moon, Y.S., H.L. Lee, E.J. Hwang, and H.J. Chae. 2006. Analysis on characteristics of tropical night based on urban heat island effect in Seoul. *J. Environ. Studies Educ.* 10:35-55.
- Nagase, A. and N. Dunnett. 2010. Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity. *Landscape Urban Planning* 97:318-327.
- Ono, K., M. Yanagi, T. Kudo, J. Teshirogi, Y. Shibuya, and H. Koshimizu. 2005. Evapotranspiration of rooftop gardening plants and their effect on the thermal environment of building. *The 2005 World Sustainable Building Conf.* 771-776.
- Rosenzweig, C., W. Solecki, L. Parshall, and S. Gaffin. 2007. Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. *Proc. Sixth Symp. Urban Environ. Atlanta.*
- 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. *J. Building Phys.* 35:372-391.
- Sendo, T., M. Kanechi, Y. Uno, and N. Inagaki. 2010. Evaluation of growth and green coverage of ten ornamental species for planting as urban rooftop greening. *J. Japan Soc. Hort. Sci.* 79:69-76.
- Simmon, M., B. Gardiner, S. Windhager, and J. Tinsley. 2008. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roof and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystem* 11:339-348.
- Sonne, J. 2006. Evaluating green roof energy performance. *ASHARE J.* 48:59-61.
- Tabares-Velasco, P.C. and J. Srebric. 2012. A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions. *Building Environ.* 49:310-323.
- Takakura, T., S. Kitade, and E. Goto. 2000. Cooling effect of greenery cover over a building. *Energy Buildings* 31:1-16.
- Takebayasi, H. and M. Moriyama. 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building Environ.* 42:2971-2979.
- Thuring, C.E., R.D. Verghage, and D.J. Beattie. 2010. Green roof plant responses to different substrate types and depths under various drought conditions. *HortTechnology* 20:395-401.
- Wong, N.H., V.L. Wong, Y. Chen, S.E. Lee, D. Cheong, G.T. Lim, C.L. Ong, and A. Sia. 2002. The thermal effects of plants on buildings. *Architectural Sci. Rev.* 45:337-348.
- Wong, N.H., Y. Chen, C.L. Ong, and A. Sia. 2003. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Energy Buildings* 38:261-270.
- Wong, N.H., A.Y.K. Tan, Y. Chen, K. Sekar, P.Y. Tan, D. Chan, K. Chiang, and N.C. Wong. 2010. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building Environ.* 45:663-672.
- Yang, C.F. 2007. Physical properties of spheric media with different size and water holding capacity. M.S. Diss., Cheng Kung Natl. Univ., Tainan, Taiwan.