



고형화된 식생기반재를 활용한 여름철 옥상녹화의 실내 온·습도 조절효과 연구

The Research on the Indoor Temperature and Humidity Control of Green Roof by Solid Growing Medium in Summer

이현정* · 염동우** · 이규인***

Lee, Hyun-Jung*, Yeom, Dongwoo** · Lee, Kyu-In***

* Dept. of Architecture, Ajou Univ., South Korea (krkenji@gmail.com)

** Coauthor, Dept. of Architecture, California State Polytechnic Univ. U.S.A(yeom@cpp.edu)

*** Corresponding author, Dept. of Architecture, Ajou Univ., South Korea (kyuinlee@ajou.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: Various studies on the soil-based green roof systems have been conducted, and a lot of green roof systems were developed. A growing medium board is one of them which was developed for better application and maintenance, however the effect and performance of this material need to be verified. On this background, the purpose of this study is to prove cooling load reduction of green roof by monitoring experiment on the full-scale mock-ups. **Method:** To do this, Solid growing medium boards were installed on the mock-ups, and indoor temperature and humidity were monitored and analyzed. **Result:** As a results, the green roof with solid growing medium board were verified effective for controlling indoor temperature in summer.

KEYWORD

식생기반재
옥상녹화
실내온도

Growing Medium
Green Roof
Indoor Temperature

ACCEPTANCE INFO

Received November 12, 2014

Final revision received May 27, 2015

Accepted May 29, 2015

© 2015 KIEAE Journal

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

온실가스 배출을 감축하기 위한 전 세계적인 노력에 동참하는 방안의 하나로, 건축계에서는 옥상녹화, 벽면녹화와 같은 다양한 건축물 녹화방법들을 시도하고 있다. 건축물 녹화는 건물의 냉난방 부하 저감에 기여하는 대표적인 장점 외에도 열섬현상 완화, 도시경관 개선 및 생태면적률 증가를 통한 생태계 복원 등 다양한 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

현재 건축물 및 인공지반 녹화기술은 각종 지원제도를 통해 활성화 되어 있는 상황이며, 관련 시장에서도 여러 가지 녹화기술이 개발되어 활용되고 있다.¹⁾ 그러나 식물의 성장에 기반이 되는 식생기반재의 경우, 자연토양 혹은 인공토양을 사용하거나 플랜트 형태의 용기에 담아 시공하는 등의 방식을 사용하고 있어 벽면, 경사면, 옥상 등의 다양한 대상지 적용에 한계점을 드러내고 있다.

가까운 일본의 경우, 토양 하중 문제와 유지관리를 고려하여 저렴한 비용과 간단한 시공방식을 찾는 건축주가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 또한 경사지붕 및 유기적인 외형의 건축물 등 고층량의 토양을 적재하기 까다로운 형태의 건축물이 늘어남에 따

라 자연 토양이 아닌 모듈화된 고형 식생기반재의 수요가 증가하고 있는 추세이다.²⁾ 국내에서도 동대문 디자인 플라자(DDP)나 행정복합중심도시, 가락시장 현대시설화 사업 등과 같은 대규모 프로젝트에서 이러한 인공 식생기반재를 적용한 녹화 시스템이 시공되고 있다.

이러한 녹화시스템에 대해, 관련 기관과 학계에서는 성능 및 효과를 다각도로 검증하고 있으나, 아직까지는 대부분 흙을 활용한 공법 및 식물 생장에 초점이 맞춰져 있다. 앞서 언급한 고형 식생기반재의 경우, 전반적인 성능에 관한 연구 및 재료의 물성과 관련한 비교 연구는 아직 부족한 실정으로 이에 대한 판단기준이 미흡한 상황이다.

이러한 배경 하에 본 연구의 목적은 현재 개발되고 있는 고형화된 식생기반재를 대상으로 환경성능 및 효과를 검증하는데 있다. 이를 위해 연구 대상인 고형 식생기반재를 분석하여 기본 물성 및 성능을 검토하였으며, 시공 시 실내 온·습도 조절효과를 검증하기 위해 실물스케일의 Mock-up을 구축하여 고형 식생기반재의 여름철 실내환경 성능을 우선적으로 검증하였다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

옥상녹화는 크게 저관리 경량형, 중량형, 혼합형의 세 가지 유형으로 나뉘며, 고형화된 식생기반재를 활용한 공법은 저관리 경

량형에 해당한다.³⁾ 본 연구에서는 고형화된 식생기반재를 활용한 건축물 녹화시스템으로 연구의 물리적 범위를 한정하였으며, 고형 식생기반재의 성능 분석 및 이를 통한 실내환경 조절효과 검증 중심을 연구로 연구를 진행하였다. 연구의 방법은 다음과 같다.

1) 이론적 고찰 및 개념의 정의

기존 건축물 녹화 시장 및 관련 연구 동향을 분석하여 건축물 녹화의 개념을 정의하고, 건축물 녹화시스템의 유형 및 저관리 경량형 녹화 시스템의 특성을 파악하였으며, 식생기반재의 개발방향에 대해 고찰하였다.

2) 고형 식생기반재 성능 분석

현재 사용되고 있는 식생기반재 중 성능 검증을 필요로 하는 고형 식생기반재를 선정하였으며, 한국 건설생활환경 시험연구원 및 농업환경과학연구소에 분석을 의뢰하여 고형 식생기반재의 비열 및 열 저항값 등의 주요 물성치를 분석하였다.

3) 고형 식생기반재의 Mock-up 시공 및 성능 검증

실물 크기의 실험체를 대상으로 고형 식생기반재를 시공하였으며, 이에 대한 대조군으로 아스팔트 싱글로 지붕을 마감한 실험체를 구축하여 비교 분석을 실시하였다. 열화상 촬영을 통해 두 실험체의 표면온도를 비교 분석하였으며, 이후 2013년 8월 한 달간 모니터링 실험을 진행하였다. 녹화 식물의 안정적인 생장을 위해 실험기간 중 주 1회 관수를 실시하였으며, 모니터링 실험 결과 분석을 통해 실내 온·습도를 비교하여 옥상녹화의 내부 환경조절 효과를 검증하였다.

1.3. 선행연구 고찰

해의의 건축물 녹화 관련 연구는 다양한 관점으로 여러 나라에서 진행되어 왔다. 옥상녹화의 인공토양과 관련하여 Ondono 외(2014)는 다양한 비율로 혼합된 인공토양의 미생물학적, 생화학적인 물성에 대한 비교분석을 통해 각각 재료의 장단점 및 환경성능을 검증하였으며, 이를 통해 사용가능성을 확인하였다. Mickovski 외(2013)는 재활용된 골재를 섞은 인공토양층에 대한 성능실험을 진행하였으며, 식물 성장, 배수, 물성치 등에 대한 분석을 통해 사용 가능성을 확인하였다. 옥상녹화 모듈의 경우, Wang 외(2014)는 네 종류의 옥상녹화 모듈을 대상으로 실측을 통해 각 모듈의 열적 성능을 비교 분석하여 검증하였으며, 중국 광주 지역의 기후에 가장 적합한 모듈을 도출하였다. 또한 Yang 외(2013)는 두 종류의 옥상녹화 모듈 방식에 대한 비교실험을 통해 물성치와 열적 성능을 도출하였으며, 이를 바탕으로 에너지 성능의 차이를 비교·분석하였다.

옥상녹화에 의한 에너지 부하 저감과 관련하여 Ouldboukhite 외(2012)의 연구에서는 옥상녹화의 미세구조 등의 물성과 함께 열적성능, 흡습성능 등을 실험에 의해 밝혔으며, 이를 통해 옥상녹화가 건축물 에너지 성능에 미치는 영향을 구체화하는데 필요한 기초 물성치를 도출하였다. Feng(2013)은 LEED 인증을 획득한 건축물의 옥상녹화에 대해 시뮬레이션과 실측을 통한 에너지 성

능 저감량 및 경제성 분석을 진행하였으며, 옥상녹화가 에너지 성능 향상에는 긍정적인 영향을 미치나 겨울철과 추운지방에서는 경제성이 낮다는 결론을 제시하였다. Orazio(2012)는 연간 모니터링을 통해 패시브 쿨링 시스템이 적용된 지붕과 옥상녹화지붕의 열적성능을 비교분석하였으며, 옥상녹화지붕의 열적성능은 단순한 시뮬레이션 분석으로는 한계가 있고 다양한 변수의 의한 성능 변화들을 복합적으로 고려해야함을 밝혔다. Theodosiou 외(2013)는 옥상녹화 대비 일반 건축물에 대해 지중해 기후에서의 장기적인 환경성능 비교 실험을 실시하여 건축물 에너지 사용 저감에 유의미한 효과가 있음을 도출하였고, Jim(2014)은 열대기후의 겨울에서 옥상녹화에 의한 실내 패시브 난방효과를 검증하는 연구를 진행하여 난방부하 저감에 옥상녹화가 효과적임을 입증하였다.

국내의 건축물 녹화 관련 연구의 경우, 국내·외 제도를 비교 분석하여 국내의 실정에 맞는 건축물 녹화의 방향을 제안한 연구들이 진행되었으며, 옥상녹화의 에너지 사용량 저감효과 검증을 위한 실험 연구도 일부 진행되었다. 효과 검증을 위한 실험의 경우, 흙 또는 인공토양을 활용한 연구에 초점이 맞춰져 있으며, 대부분 축소 모형을 제작한 실험들이 진행된 것으로 조사되었다.

옥상녹화의 에너지 사용량 저감효과 검증을 위한 연구의 경우, 김연미 외(2013)는 10cm 두께의 다양한 토양이 적용된 실험체에서 식물 생육에 따른 온도변화 및 저감효과를 도출하였으며, 김철민(2013)은 동대문 디자인 파크(DDP)의 옥상녹화를 중심으로 건축물 녹화시스템에 대한 구체적인 성능 기준을 정리하였다. 이두호 외(2012)는 옥상녹화 평지붕의 표면온도 저감효과를 검증하기 위해 대전광역시청 5층 옥상부에서 표면온도 측정을 실시하여, 평균 온도차 8.67℃, 바닥면 온도차는 11℃로 옥상녹화의 온도저감 효과를 검증하였다. 이춘우 외(2011)는 녹화유형을 잔디, 미식생, 플랜트, 쇠석 깔기, 혼합초, 녹색페인트의 6가지로 구분하고 옥상에 조성한 뒤 모의 실험을 실시하였으며, 옥상녹화시 혼합초 등의 지피식물을 이용한 녹화방법이 가장 효과적인 것을 검증하였다.

제도 관련 연구의 경우, 박종훈 외(2011)는 도시적인 규모를 다루고 있는 법률들에서도 옥상녹화에 대한 직접적인 규정이 요구되며, 현재의 권고 수준인 단계에 생태면적률에 근거한 관련 법규의 개발을 제안하고 있다. 남선영 외(2008)는 일본과 독일의 사례를 들어 국내에서도 옥상녹화와 관련한 적극적인 지역별 참여와 직접적 비용지원이 이루어지는 제도가 바람직하다고 언급하고 있다.

대부분의 옥상녹화 연구에서 흙을 적용한 건축물 녹화 방식 및 그 효과와 관련한 검증 연구는 상당수 진행되었으나, 모듈화된 고형 식생기반재와 관련된 연구는 아직 그 수가 부족한 것으로 파악되었으며, 특히 실제 효과를 검증하는 연구는 매우 미흡한 것으로 분석되어 본 연구의 필요성이 높음을 알 수 있다.

2. 건축물 녹화

2.1. 건축물 녹화의 개념 및 유형

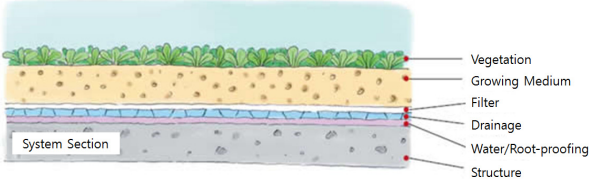
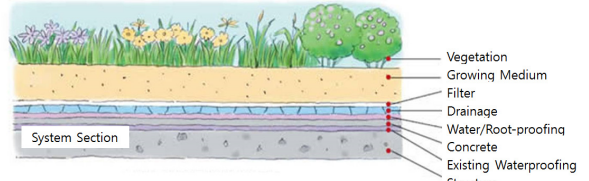
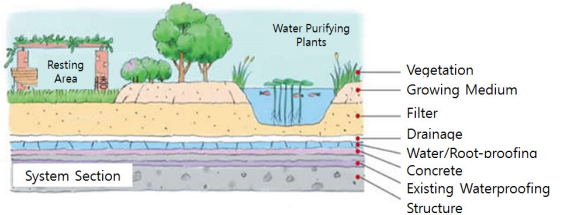
건축물 녹화란 건물의 외피 또는 실내에서 식물의 생장이 유지 되도록 인공 토양층을 형성하여 자연녹지와 유사한 여건에서 녹

지공간을 조성함을 말한다.¹³⁾ 녹화가 적용된 건축물은 기존건축물에 비해 열전도율이 낮아 냉방부하를 저감시켜 에너지 절약 효과를 기대할 수 있으며, 토양층 상부에 위치한 식생층의 일사 반사 및 차단 효과와 증발산 작용에 의한 잠열효과를 얻을 수 있다. 또한 도시공간의 녹지를 확대시켜 쾌적한 도시환경을 제공하며, 이를 통해 온도 조절, 대기 정화, 차음, 방풍, 방화 등의 부수적인 효과도 기대할 수 있다.¹⁴⁾

건축물 녹화 중 옥상녹화는 도심에 버려져 있는 옥상공간을 활용함으로써 생태적 관점에서의 도시 환경문제 해결과 에너지 절약을 동시에 충족시킬 수 있는 대안으로 활성화 되고 있다. 옥상녹화는 저관리 경량형, 관리중량형, 혼합형으로 분류되며 각각의 특성은 Table 11⁵⁾과 같다.

이 중 본 연구의 대상인 저관리 경량형은 건축물 녹화를 통한 경제적, 환경적 효과 이외에 건물 외장 디자인 요소로서 적용이 용이하여 주목받고 있으며, 모듈, 플랜트, 유니트 시스템 등 다양한 제품이 개발되고 있다.¹⁶⁾ 이때 일정 크기의 패널 또는 박스형태 단위 유니트의 형상과 소재를 이용하여 구성요소의 일체화를 도

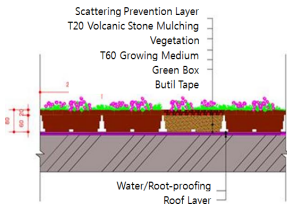
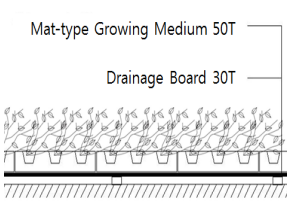
Table 1. Type of green roof

Low Management and Light Weight	
	<ul style="list-style-type: none"> • The minimum soil depth is less than 20 cm (120kgf/m²) • Sedum, grass and other ground cover plants, wild flowers for plants • Minimum management or non-management type • Flat roof or sloped roof type
Low Management and Heavy Weight	
	<ul style="list-style-type: none"> • Soil depth is 60 ~ 90 cm • Shrub and trees for plants • The structural design is essential for large loads • Watering and mowing management are required • Flat roof type
Mixed Type	
	<ul style="list-style-type: none"> • Soil depth is 10~30cm • Water space can be installed with a variety of plants • Relatively low management are required compared with the heavyweight type. • Sedum, grass and other ground cover plants, and trees

모한 녹화시스템은 저관리 경량형 방식에 적합하고 구조에 따라 혼합형 녹화유형으로 관목류의 식재까지도 가능하다.

또한 저관리 경량형의 경우, 플랜트 방식과 유니트 방식을 혼합하여 식물 성장을 위한 기반재로 부직포 토양과 박층의 매트, 포켓 형태의 화분에 식물을 심는 방식 등이 고안되었으며, 본 연구의 대상인 고행 식생기반재가 이 형태에 해당된다. 방근과 방수는 기존 방식과 동일한 방수, 방근 쉬트의 시공을 통해 해결하고 있으며, 이러한 부직포 토양의 경우 부식의 가능성이 현저히 낮고, 부직포의 특성상 수분을 전달하여 고른 관수가 이루어져 하자 발생률이 적다는 장점을 갖는다.

Table 2. Low management and light weight type

Plant Type	Unit Type
	

3. 고행 식생기반재 물성 분석

3.1. 고행 식생기반재

식물이 성장하기 위한 식생기반은 최소한의 양분과 뿌리를 뻗을 수 있는 공극을 필요로 하며, 토양의 대체품으로 사용 가능한 소재가 적용되어야 한다.¹⁷⁾ 기존의 건축물 녹화에 있어서 식생기반재는 시간이 경과됨에 따라 배합된 물질의 이탈이 발생하거나 내구성이 충분하지 않아 녹화율이 높지 않았다. 이를 위해 본 연구에 사용된 식생기반재는 열경화성 수지인 PET의 특성을 이용하여 토양 성분 재료를 일정 기간 열을 가해 일부 용해 및 융착하여 고행화 하였으며, 이를 통해 배합된 재료간의 이탈을 최소화하고, 녹화율을 높일 수 있도록 하였다.

본 연구에 사용된 고행 식생기반재의 주 재료는 코코피트, 피트모스, 왕겨 슛, PE섬유이며, 이를 배합하여 250*500*50mm 크기의 모듈로 제작하였다. 최대 수분포화 시 단위면적 당 무게는 40kg/m²이며, 30일간 식물을 선 재배 후, 13개의 식혈구에 식재(104본/m²)하여 생착력 및 녹화율을 높일 수 있도록 하였다. 또한 계획 과정에서 자연스러운 미관을 갖도록 색, 질감 및 성분 등을 고려하여 제작하였다.

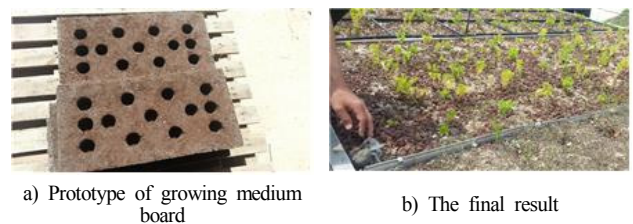


Fig 1. Solid growing medium board and installation results

3.2. 고형 식생기반재의 열 물성 평가

시작품으로 제작된 고형 식생기반재의 물성을 분석하기 위해 시험용 시편을 제작한 후 한국 건설생활환경 시험연구원과 농업 환경과학연구소에 의뢰하여 열 물성을 측정하였다.

측정 항목은 단열성능 평가를 위한 열저항 값 및 축열성능 평가를 위한 밀도, 비열, 비중이며, 측정방법은 열 저항값과 밀도의 경우 (1) KS L 9016:2010, 비열은 (2) KS M ISO 11357-4:2012 방식으로 측정하였다. 열 저항 값은 측정 규격인 300×300×50mm 크기의 시편을 대상으로 하였으며, 비열 측정은 분말 시편을 대상으로 측정 하였다.

고형 식생기반재의 열적 물성에 대한 측정 결과는 Table 3과 같다. 이때 열전도율은 열저항의 역수 값과 두께의 곱으로, 열용량은 비중과 비열의 곱으로 산출하였다. 비교 분석을 위한 일반 흙의 비중, 비열, 열전도율은 참고문헌의 물성치¹⁸⁾를 기준으로 하였으며 Table 4와 같다.

Table 3. Test result of solid growing medium board

Item	Value	Method	Result
Density	kg/m ³	(1)	264
Thermal Resistance [Aver. tem:20°C] Thickness:48.42mm	(m ² ·K)/W	(1)	0.72
Specific heat [25°C]	kJ/(kg·K)	(2)	0.71
Specific gravity	kg/m ³		300
Thermal conductivity	W/m·K	-	0.067
Thermal capacity	kJ/m ² ·K	-	213

<Remarks>

- Thermal conductivity = Inverse of thermal resistance × Thickness
- Thermal Capacity = Specific heat × Specific gravity

Table 4. Specific gravity, specific heat, thermal conductivity of the soil

Soild	Temp °C	Specific gravity kg/m ³	Specific heat, kJ/(kg·K)	Thermal capacity kJ/m ² ·K	thermal conductivity W/m·K
general	20	2000	1.848	3,696	0.52
dry	20	-	-	-	0.13
moistness	20	-	-	-	0.66

열전도율은 값이 작을수록 열전달 저항이 커 해당 물질을 통한 열 손실 및 열 획득을 저감시킨다. 고형 식생기반재의 열전도율은 0.067 W/m·K로 일반적으로 사용되는 지붕마감재인 아스팔트 싱글의 열전도율이 0.109 W/m·K인 것과 비교 했을 때 단열성능이 더 높은 것으로 분석되었다.

또한 고형화된 식생기반재의 밀도는 264 kg/m³으로 분석되었으며, 암면과 유리면의 밀도인 200~300 kg/m³과 유사한 수치를 보이고 있어 축열재로서의 성능 또한 기대할 수 있을 것으로 나타났다.

반면, 열용량은 213 kJ/m²·K로 나타났으며, 이는 일반 흙의 열용량 3,696 kJ/m²·K에 비해 상당히 낮은 수치이다. 이는 일반 흙의 비중과 비열이 고형화된 식생기반재에 비해 높은 수치임을 감안한다면 당연한 결과라 할 수 있으며, 이로 인해 옥상 녹화 시 일반

흙의 사용이 축열성능 측면에서는 좀 더 유리할 것으로 판단된다. 하지만 일반 흙을 활용한 옥상녹화의 경우, 유지 관리와 하중 문제가 지적되었으며, 고형 식생기반재는 이를 개선했다는 점에서 활용가능성이 높은 것으로 판단된다.

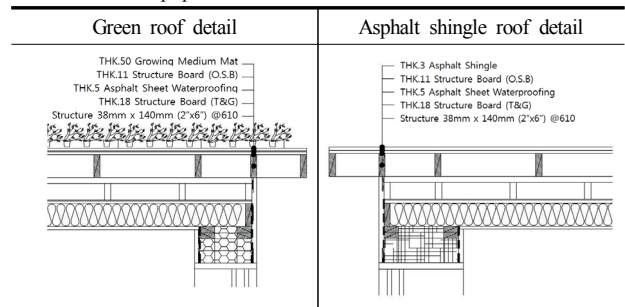
4. 실험체 계획

4.1. 실험체 계획

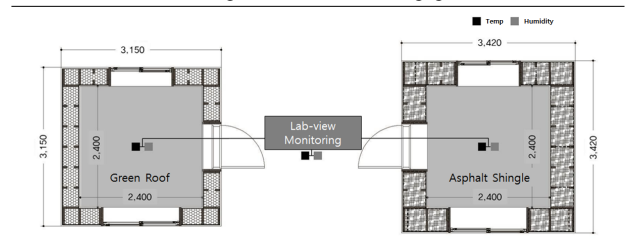
고형 식생기반재를 활용한 옥상녹화의 실내환경 조절효과 검증 위해 실물 스케일의 Mock-up 실험체를 시공하여 표면온도 및 실내 온·습도를 측정하였다.

실험체는 일반적인 경량목구조 구조체를 기반으로 2,400 × 2,400 × 2,300 mm 의 안목치수로 동일하게 계획하였다. 일반 지붕 마감재와의 비교실험을 위해 고형 식생기반재가 시공된 옥상녹화 실험체를 실험군, 경량목구조에 가장 흔하게 사용되는 아스팔트 싱글로 지붕을 마감한 실험체를 대조군으로 구축하였다. 실험체의 벽체는 단열재 관련 기타 실험을 위해 서로 다른 재료가 사용되었으나, 벽체 열관류율은 0.188W/m²K로 동일하게 설정하였다. 동일한 실험조건 조성을 위해 실험체의 향, 개구부 면적, 창호의 종류 및 크기 등은 동일하게 계획되었으며, 실험체의 평면, 지붕 계획 및 모니터링용 센서 위치와 관련한 세부 사항은 Table 5와 같다.

Table 5. Mock-up plan detail



Sensor placement and mock-up plan



4.2. 측정 항목 및 실험 일정

옥상녹화의 열적 성능 및 실내환경 조절 효과의 검증을 위해 F사의 열화상 측정기로 표면온도를 촬영하였으며, 온·습도 센서와 함께 Lab-view기반의 모니터링 시스템을 설치하여 데이터를 수집하였다. 센서의 경우, 두 실험체 사이에 외부 온·습도 측정용 센서를 설치하였으며, 실내 측정용 센서는 실험체의 내부 중앙바닥에서 1.1m 높이에 배치하였다 (Table 5). 모니터링에 사용된 센서의 오차는 Table 6과 같다.

Table 6. Instrument Specification

Thermal Camera	±2°C, -20°C to +650°C
Temperature Sensor	±1.5°C, -40°C to 375°C
Humidity Sensor	±2% (20-80%), ±3% (<20%, >80%)

실험 데이터는 프로그램에 의해 1분 간격으로 자동 저장되었으며, 옥상녹화의 차열효과 및 실내환경 조절효과를 확인하기 위해 일사량이 매우 높은 여름철로 실험기간을 설정하여 2013년 8월 1일부터 27일까지 한 달간 실험을 실시하였다.

5. 실험결과

5.1. 건축물 표면온도 비교

녹화가 설치된 지붕면과 아스팔트 싱글로 마감된 지붕면을 비교하기 위해 열환경 측정기기로 표면온도를 촬영하였다. 촬영은 2013년 8월 19일에 진행되었으며, 하루 중 일사를 충분히 받아 외기 온도가 가장 높은 시간인 15:00시에 측정하였다. 측정 당일의 외기온도는 33.4°C, 최고 온도는 35°C, 최저 온도는 29.1°C였다. Fig 2는 열화상 카메라를 통한 표면온도, Table 7은 Fig 2의 부분 온도이다.

Table 7. Surface temperature of Fig 2.

	Green roof	Asphalt Single roof
Max Temp(°C)	41.2	50
Average Temp(°C)	31.9	46
Minimum Temp(°C)	22.5	41.9

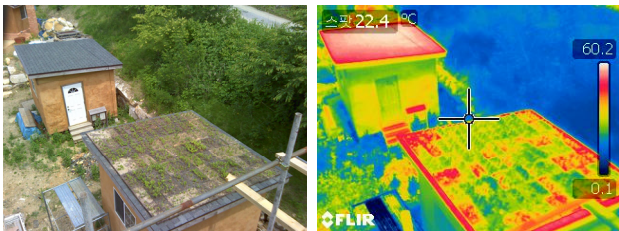


Fig 2. Compared to the surface temperature through Thermo-graphic camera

분석 결과, 아스팔트 싱글 마감 실험체의 경우, 일사에 의해 가열된 표면온도가 최대 50°C까지 올랐으며, 옥상녹화 실험체의 표면온도는 상대적으로 낮은 41.2°C로 나타났다. 두 실험체의 평균 표면온도는 아스팔트 싱글 실험체가 46°C, 옥상녹화 실험체가 31.9°C로 고행 식생기반재 실험체가 약 19%의 표면온도 저감률을 나타내 고행 식생기반재에 의한 옥상녹화가 건축물의 표면온도 저감에 효과적인 것으로 나타났다.

또한 옥상녹화 실험체의 최고 표면온도로 측정된 부분은 식물생장에 필요한 관수가 균일하게 이루어지지 않아 고행 식생기반재가 건조해진 부위이다. 따라서 고행 식생기반재에 의한 표면온도 절감 효과와 함께, 관수에 의해 식생기반재의 수분함량이 증가하게 될 경우 더 높은 여름철 표면온도 절감 효과를 기대할 수 있을 것으로 나타났다.

5.2. 녹화유무에 따른 실내 온·습도 모니터링

옥상녹화 비교 실험에 앞서 약 1년에 걸쳐 두 실험체의 기본 실내 환경을 측정하였다. 두 실험체 모두 외기 온도에 비해 안정적인 실내온도를 나타냈으며, 단열체의 차이에도 불구하고 실험체의 온도는 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다. 습도의 경우 두 실험체 모두 40~60%의 쾌적한 습도를 유지하였으며, 아스팔트 싱글 실험체의 평균습도가 약 3-10% 가량 높은 것으로 나타나 결과 분석 시 이에 대한 고려가 필요한 것으로 나타났다.

옥상녹화 유무에 따른 실내 온·습도 변화를 분석하기 위해 고행 식생기반재를 시공한 후, 2013년 8월 1일부터 27일까지 4주간 모니터링을 실시하여 데이터를 수집하였다. 모니터링 시스템의 전기 공급에 문제가 발생한 8월 9일~15일의 오류 데이터는 제외하고 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 온도 측정 결과

실험기간 동안 측정된 실험체의 온도 모니터링 결과는 Fig 3. 와 Table 8과 같다. 실험 기간 중 외부 공간의 평균 온도는 31°C로 나타났으며, 온도 변화폭은 평균 12.9°C로 측정되었다. 실험체의

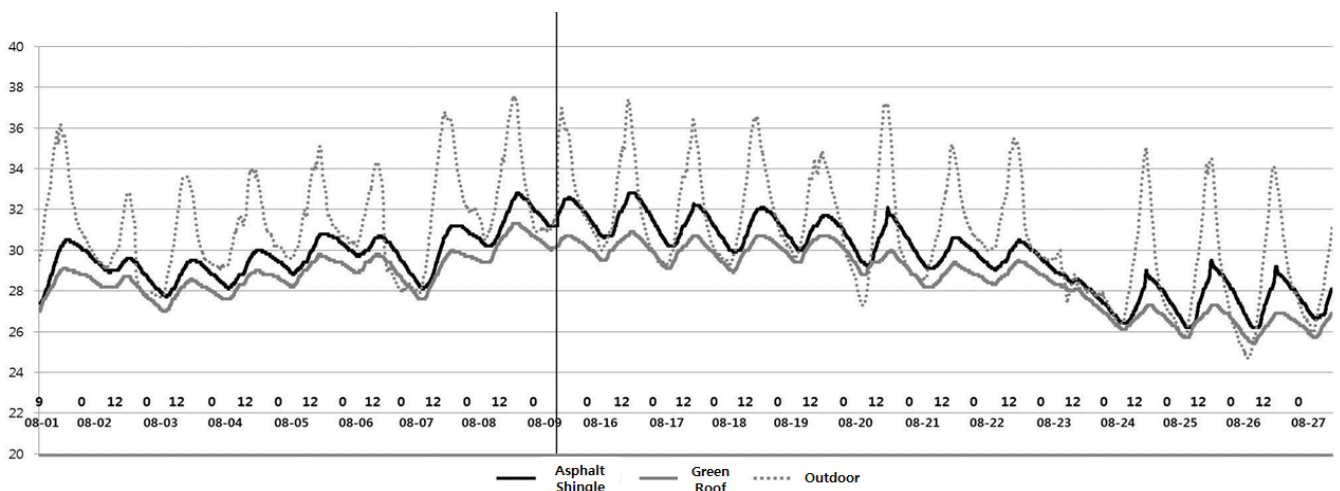


Fig 3. Internal and external temperature <2013.08.01. - 08.27>

Table 8. Internal and external temperature <2013.08.01-08.27>

	Asphalt single	Green roof	Outdoor
Average(°C)	29.7	28.7	31.0
Maximum(°C)	32.8	31.3	37.6
Minimum(°C)	26.2	25.4	24.7
Range	6.6	5.9	12.9
Standard deviation	1.5	1.4	2.7

경우, 아스팔트 싱글 실험체의 평균온도는 32.8°C~26.2°C로 6.6°C의 변화 값을 보였으며, 옥상녹화 실험체는 31.3°C~25.4°C로 5.9°C의 차이를 보여 외기에 비해 상대적으로 안정된 온도 분포를 보였다.

옥상녹화를 설치한 실험체의 내부 온도가 아스팔트 싱글 실험체에 비해 낮게 유지되는 것으로 나타났으며, 일사에 의해 옥상면이 최대로 가열된 오후 세시의 경우, 2.2°C의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 앞서 도출한 고형 식생기반재의 물성치에 의한 열용량 분석 결과, 고형 식생기반재의 상대적으로 높은 열용량에 의해 열전달 지연 효과가 발생한 것으로 판단되며, 따라서 고형 식생기반재에 의한 옥상 녹화가 여름철 건축물의 실내온도 조절에 효과적인 것으로 나타났다.

2) 습도 측정 결과

습도 모니터링 결과는 Fig 4, Table 9와 같다. 외부 평균 습도의 변화 폭이 59.7%로 상대적으로 크게 나타났으며, 이때 각 실험체의 평균 습도는 아스팔트 싱글 실험체 61%, 옥상녹화 실험체 67.1%로 옥상녹화 실험체가 상대적으로 높은 평균 습도를 나타냈다. 표준편차의 경우, 아스팔트 싱글 실험체와 옥상녹화 실험체 모두 외기에 비해 크게 낮게 나타나 외기에 비해 안정적인 습도를 유지하는 것으로 나타났다.

옥상 녹화를 시공하기 전 습도 측정결과, 아스팔트 싱글 실험체의 습도가 옥상녹화 실험체에 비해 상대적으로 높았으나, 옥상 녹화를 시공한 후에는 값이 역전되어 옥상녹화 실험체의 습도가 높

Table 9. Internal and external humidity <2013.08.01-08.27>

	Asphalt single	Green roof	Out door
Average(%)	61.0	67.1	59.7
Maximum(%)	63.4	69.3	70.5
Minimum(%)	58.2	64.8	36.5
Range	5.2	4.5	29.5
Standard deviation	1.1	1.0	5.7
Absolute humidity(%)	1.6	1.6	1.7

게 나타났다. 이는 동일하게 밀폐된 공간에서 실내온도가 높아짐에 따라 아스팔트 싱글 실험체의 포화수증기량이 증가해 상대습도가 낮아진 것으로 판단된다.

이에 대한 정확한 분석을 위해, 온도와 상대습도, 실험 대지의 해발고도를 토대로 절대 습도값을 계산하였으며, 분석 결과, 두 실험체의 절대 습도값은 평균 1.6%로 동일한 것으로 나타나 옥상 녹화가 실내 습도의 절대량에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구는 고형 식생기반재의 환경성능 및 옥상녹화를 통한 실내 온·습도 조절효과를 검증하는 것을 목적으로 실물 스케일의 Mock-up을 제작하여 모니터링 실험을 진행하였으며, 이를 토대로 도출된 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 고형 식생기반재의 열적 물성치에 대한 분석 결과, 열 전도율 0.067 W/m·K로 일정 수준의 단열성능을 갖춘 것으로 나타났다. 열용량 분석 결과 축열재로서의 성능 또한 갖춘 것으로 나타났다.
- 2) 고형 식생기반재를 활용한 녹화 실험체의 경우, 열화상 측정 기기로 촬영한 표면온도가 아스팔트 싱글 마감에 비해 최대 30%의 저감율을 보여 고형 식생기반재를 활용한 녹화 시스

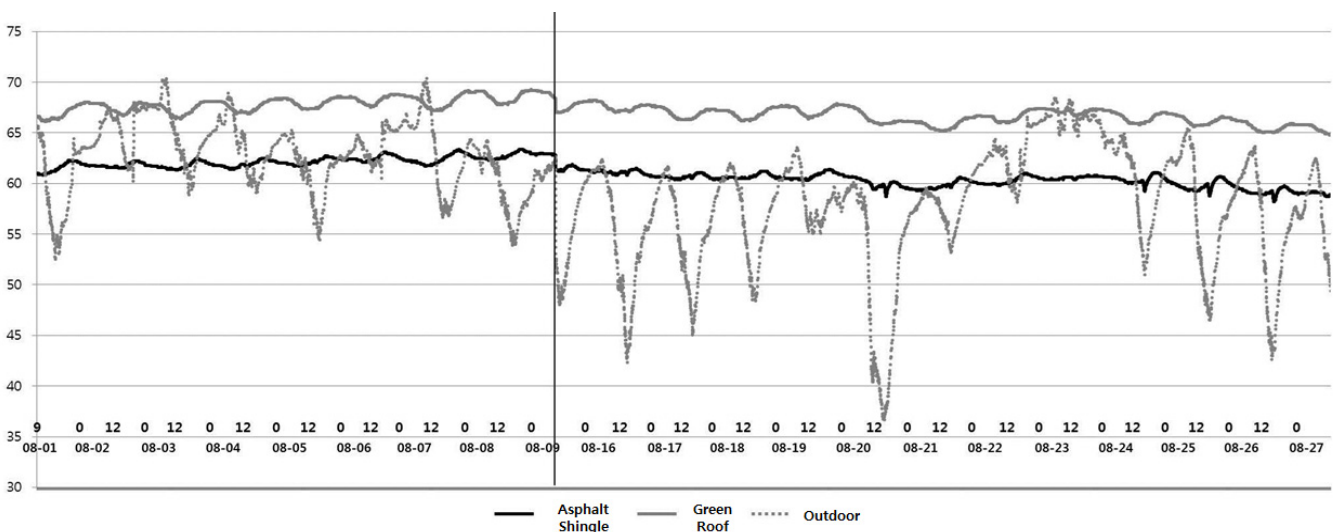


Fig 4. Internal and external humidity <2013.08.01. - 08.27>

템이 여름철 건축물 표면온도저감에 효과적인 것으로 밝혀졌다. 또한 실내 온도의 경우, 옥상녹화 실험체가 아스팔트 싱글 실험체에 비해 약 8%의 온도 저감율을 나타내 여름철 실내온도 조절에 효과적임을 보였다.

- 3) 습도 분석 결과, 두 실험체모두 안정된 습도변화를 나타냈으며, 온도에 따른 상대습도 변화로 실내온도가 높은 아스팔트 싱글로 마감한 실험체가 옥상녹화를 설치한 실험체에 비해 3~4%정도 낮은 수치를 나타냈다. 반면, 두 실험체의 절대 습도는 동일한 것으로 나타나 옥상 녹화가 실내 습기량에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 고품 식생기반재의 물성치를 새롭게 측정하였으며, 이를 활용한 건축물 녹화시스템의 실내 온·습도조절 효과를 검증하였다. 또한 고품 식생기반재의 경우, 단열 및 축열 성능을 통해 겨울철 실내 온도 조절에도 일부 효과가 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 여름에 한정하여 모니터링이 진행되었으므로 계절별 실험에 의한 추가 검증이 요구되며, 기존의 흙을 활용한 공법과의 종합적인 비교연구가 이루어져야 할 것이다. 또한 장기적으로는 옥상녹화의 변화상에 대한 추적 연구를 통해 도시의 생물 다양성에 미치는 영향에 대한 검증이 필요하며, 거시적인 관점에서 개별 건축물의 옥상녹화가 도시 환경에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Reference

- [1] 김태한, 이주희, 김철민, "현대건축경향에 입각한 건축물 녹화시스템 유형의 열적물성치에 관한 연구", 한국생태환경건축학회 논문집 : v.13 n.01, 2013 // (T. Kim, J. Lee, C. Kim. "A Study on the Thermal Properties of Architectural Greenery System Typology Based on the Contemporary Architectural Trend". Journal of the KIEAE : v.13. n.01. 2013)
- [2] 김원태 외, "건축물 옥상녹화 시공 및 지원제도에 관한 한일간 비교연구", 한국인간-식물-환경학회지 : v.11, n.02, 2008 // (W. Kim, B. Park, Y. Yoon, "Comparative Study on Construction and Support System of Building Rooftop Greening in Korea and Japan.", Journal of Korean Society for People, Plants and Environment : v.11 n.02, 2008)
- [3] 윤은주, "건축물 녹화의 현황과 향후 과제", 한국생태환경건축학회 논문집 : v.22, n.05, 2012 // (E. Yoon, "The Present Conditions and the Future Subjects of Architectural Greenery System" : v.22, n.05, 2012)
- [4] S. Ondono, F. Bastida, J.L. Moreno, "Microbiological and Biochemical Properties of Artificial Substrates", Ecological Engineering : v.70, 2014
- [5] S. B. Mickovski, K. Buss, B. M. McKenzie, B. Sokmener, "Laboratory Study on the Potential Use of Recycled Inert Construction Waste Material in the Substrate Mix of Extensive Green Roofs", Ecological Engineering : v.61, Part C, 2013
- [6] Z. Wang, F. Qiu, W. Yang, "Experimental Study of the Thermal Insulation Property of Sedum Linear Roof Module in Real Weather Condition in Guangzhou, China", Advanced material research : v.953-954, 2014
- [7] W. Yang, Z. Wang, X. He, X. Zhao, "Comparative Study on the Insulation Performance of a Lightweight Planted Roof Module Based on Outdoor Guarded Hot-box Testing Method", Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning Lecture Notes in Electrical Engineering : v.261, 2014
- [8] S. Ouldoukhitine, R. Belarbi, R. Djedjig, "Characterization of Green Roof Components: Measurements of Thermal and Hydrological Properties", Building and Environment : v.56, 2012
- [9] H. Feng, K. Hewage, "Energy Saving Performance of Green Vegetation on LEED Certified Buildings", Energy and Buildings : v.75, 2014
- [10] M. Orazio, C. Perma, E. Giuseppe, "Green Roof Yearly Performance: A Case Study in a Highly Insulated Building under Temperate Climate", Energy and Buildings : v.55, 2012
- [11] T. Theodosiou, D. Aravantinos, K. Tsikaloudaki, "Thermal Behaviour of a Green vs. a Conventional Roof under Mediterranean Climate Conditions", International Journal of Sustainable Energy : v.33, Issue 1, 2014
- [12] C. Jim, "Passive Warming of Indoor Space Induced by Tropical Green Roof in Winter", Energy : v.68, 2014.04
- [13] www.greentogether.go.kr
- [14] 김연미, "저관리 경량형 옥상녹화 조성에 따른 온도 및 열섬저감효과", 한국생태환경건축학회 논문집 : v.13, n.01, 2013 // (Y. kim, "Temperature and Heat Island Reduction Effect in Different Type of Extensive Green Roof". Journal of the KIEAE : v.13, n.1, 2013)
- [15] http://www.digitalorganic.net
- [16] 김현수, 오충현, 신정섭, 장대희, "Extensive Green Roof System에 적합한 인공토양 및 식물선정을 위한 실험연구", 한국생태환경건축학회 학술발표대회 논문집 : v.11, 2006 // H. Kim, C. Oh, J. Shin, D. Jang, "Experimental Study on the decision of artificial soil and Plants for Extensive Green Roof System", Journal of KIEAE, v.11, 2006
- [17] 한설그린, "고형화된 식생기반을 활용한 건축물 입체녹화기술 개발", 한설그린 연구보고서, 2013 // Hansul Green, "A Study on the Architectural Greenery System by Solid Substrate Board", Research Report of Hansul Green Corp.m 2013
- [18] http://www.enviropia.co.kr/unit.html