

# 한국형 Green Roof System 개발을 위한 Proyotype 제안

## A Study on the Development of Prototype for Green Roof System in Korea

김 현 수\*

Kim, Hyen-Soo

### Abstract

The purpose of this study is to develop an available outdoor insulation construction for the green roof system in Korea.

On its own economical and structural problems of constructional risk, the typical outdoor insulation construction on the korean spot does not function efficiently with the green roof. Therefore, this study consists of four main contents as follows: 1. The objectives of the study are established by analysing the problems of the typical in- and outdoor roof insulation system in korea. 2. The foreign outdoor insulation systems for the green roof are clarified to find out an acceptable prototype for Korea. 3. According to loadtest, the prototype, which has a waterproof on the thermal insulation, is tested to demonstrate the structural safety. 4. The U-value test of the prototype on KS F 2277 brings the thermal performance of the green roof system, which can influence the thickness of the insulation.

Keywords : Green Roof System, Outdoor Insulation, Thermal Performance

### 1. 서 론

#### 1.1 연구의 필요성

오늘날의 도시는 과밀 개발의 부작용으로 심각한 생태적 문제를 야기하고 있다. 1990년대 중반부터 건축 차원에서 도시생태 문제에 대응할 수 있는 대안으로서 옥상녹화에 대한 연구가 시작된 이후, 다양한 기술 개발이 이루어져 왔다. 선행 연구는 주로 저관리 경량형 옥상녹화시스템(Extensive roof planting system)의 개발, 열성능 및 우수유출 저감 등 옥상녹화 효과의 정량화를 주요 내용으로 다루어 왔다.

이러한 기존 연구성과는 기술 적용 대상의 관점에서 볼 때 신축 건물이 아닌 기존 건물에 편중된 한계를 보이고 있다. 기존 연구성과를 현실에 적용한 대표적 사례인 서울시 옥상녹화 지원사업<sup>1)</sup> 또한 기존 건물을 지원 대상으로 한정하고 있다.

한편, 옥상녹화의 필요성에 대한 인식 확산과 기술 보급에 따라, 최근에는 신축 건물 옥상의 녹화에 대한 사회적 수요가 높아지고 있다. 즉, 설계단계에서부터 녹화를 고려한 녹화옥상시스템(Green roof system)<sup>2)</sup> 기술 개발에

대한 현실적 요구가 대두되고 있다.

더불어, 건물 옥상 건축공법으로 보편화되어 있는 외단열 공법은 방수층의 위치와 부적합한 단열재의 사용으로 옥상부 내구성에 근본적인 문제를 야기하고 있다(2.1 참조). 따라서 신축 건물을 대상으로 하는 새로운 녹화옥상시스템의 개발 요구와 기존 외단열 옥상 건축공법의 문제를 개선할 수 있는 새로운 개념의 녹화옥상시스템 기술의 개발과 보급이 시급하다고 판단된다.

#### 1.2 연구 목적 및 범위

본 연구는 신축 건물 설계에 적용할 수 있는 한국형 녹화옥상시스템 프로토타입(Prototype)의 개발을 목적으로 한다. 이를 위해 녹화옥상시스템의 Prototype 제안과 기본적인 물성(단열성 및 구조적 안전성)의 평가를 연구의 내용적 범위로 설정하고, 신축 건물을 연구의 대상으로

2) 적용 대상에 관계없이 옥상녹화라는 용어의 사용이 일반적이거나, 본고에서는 기술적 관점의 차이를 분명히 하기 위해 옥상녹화(Roof planting)와 녹화옥상(Green roof) 용어를 구분하였다. 즉, 옥상녹화 기술은 이미 건축된 건물의 옥상에 녹화시스템을 추가하는 기술로 보았으며, 녹화옥상시스템 기술은 구조물과 녹화시스템이 일체화된 새로운 생태적 건물외피시스템 기술로 정의하였다. 따라서, 기술 적용 대상이 전자는 주로 기존 건물, 후자는 신축 건물이라는 차이가 있으며, 전자가 녹화(Planting) 기술 위주인 반면, 후자는 건축과 녹화 기술이 완전히 통합된 특징을 가진다.

\* 한국건설기술연구원 건축연구부 수석연구원, 공학박사  
1) 옥상녹화 기술의 보급을 유도하기 위해 서울시가 2002년부터 추진하고 있는 민간옥상녹화 지원 사업. 기존 건물을 대상으로 옥상녹화 사업비의 50%를 시에서 지원하고 있음.

한정하였다.

본 연구에서 제시하고자 하는 녹화옥상시스템은 건축물 최상부에 적용할 수 있는 생태적 외피시스템을 의미하여, 구조물(슬라브)과 녹화시스템이 일체화된 외피시스템을 말한다. 따라서, 구조부(슬라브)의 구성, 방수 소재의 선정 및 방수층 구성, 단열재의 선정 및 단열층 구성, 토양 소재의 선정 및 토양층 구성, 식재 소재의 선정 및 식재 플랜 등 다양한 연구가 요구되나, 본 연구는 기존 건물을 대상으로 하는 옥상녹화 기술과 근본적인 차이가 있는 요소기술 및 시스템 프로토타입의 제안과 그에 대한 기초적 물성 평가에 중점을 두고 연구를 진행하고자 하였다. 따라서 연구의 내용적 범위를 다음과 같이 설정하였다.

- 녹화옥상시스템 구성 요소기술 검토
- 녹화옥상시스템 프로토타입 제안
- 프로토타입의 기본 성능(구조적 안전성/열성능) 평가

### 1.3 연구의 방법

신축 건물 설계에 적용 가능한 녹화옥상시스템 프로토타입의 개발을 위해 본 연구에서는 먼저 국내 옥상부 건물외피 조성의 문제를 진단하였다(2.1장). 이를 바탕으로 국내의 녹화옥상시스템의 유형을 분류하고 유형간의 시스템 구성 특성을 비교 분석한 후, 한국의 현실에 적합한 녹화옥상시스템 프로토타입 개발 방향을 도출하였다(2.2, 2.3, 2.4장). 다음으로 녹화옥상시스템의 하부시스템 구성에 필요한 요소기술을 검토하여 한국 현실에 적합한 프로토타입 구성안을 제안하였다(3장).

한편, 제안된 녹화시스템 프로토타입은 건축물과 일체화된 건물외피시스템인 점을 고려하여, 건물 옥상부에 요구되는 구조적 안전성과 단열 성능에 대한 성능평가를 수행하였다(4장). 전자의 평가는 유압식 디지털 압축시험기(만능시험기)를 이용하였으며, 효율적 재하 실험을 위해 시스템의 안전성에 결정적인 영향을 미치는 단열층, 방수층, 배수층 부분을 대상으로 하여 발생 가능한 시스템의 변형 정도를 예측하고자 하였다. 후자에 대한 평가는 열관류율시험기를 활용하였으며, 열관류저항 측정을 통해 녹화옥상시스템의 열성능을 정량적으로 파악함과 동시에, 건축물의 내구성에 영향을 미치는 결로의 가능성을 분석하고, 또한 이의 성능이 최근 개정된 ‘에너지 절약 설계기준’을 충족하는지의 여부를 판단하였다.

## 2. 녹화옥상시스템(Green Roof System) 기술 개발 현황

### 2.1 옥상부 건물외피 조성의 문제

건물 옥상의 건축공법은 단열재의 위치에 따라 내단열 및 외단열 공법으로 구분이 가능하다. 국내에서는 내단열과 외단열 공법이 선택적으로 사용되고 있으나, 최근에는 에너지절약에 관한 관심의 증가와 건축 기술의 발전으로 외단열 공법이 보편화되는 추세에 있다. 그러나 현실에서 적용되고 있는 외단열 공법은 단열 소재 및 시스템 기술상의 문제로 옥상부 단열성능의 저하와 열화의 구조적

원인이 되고 있다.

국내의 경우 외단열 공법은 아래 그림에서와 같이 일반적으로 구조체(콘크리트 슬라브), 방수층, 단열층, 누름층의 순서로 시공된다. 따라서, 단열층 소재는 일정 수준 이상의 압축강도와 투습저항을 가지는 소재의 선택이 필수적이거나 방수층 하부에 적용되는 수준의 단열재를 사용하고 있다. 이에 따라 누름층(누름콘크리트)에서 발생된 균열을 통해 침투된 우수나 내부에서 생성된 결로수가 장기간 단열층(방수층과 누름층 사이)에 축적되어서 단열 성능이 저하되고, 잔유 수분의 기화팽창에 따라 누름층의 들뜸파손 및 동해열화 등 문제를 발생시키게 된다.

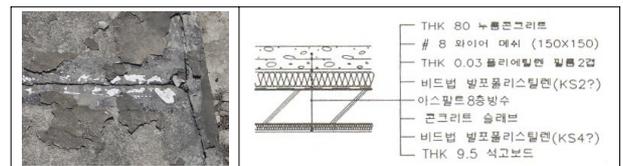


그림 1. 누수 및 균열이 발생한 옥상부 표면  
출처 : 대한주택공사 건축공사 표준상세도 - 외단열공법

국내의 기술 수준을 고려할 때 옥상 외단열시스템에서 단열재는 아래 그림과 같이 방수층과 구조체의 사이(위로부터 방수층, 단열층, 구조체 순서)에 위치하는 것이 바람직하며, 필요한 경우 단열재에 전달되는 습기를 차단할 수 있는 방안(방수층 또는 증기압 조정층)이 마련되어야 한다.

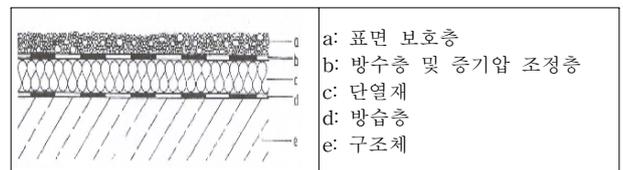


그림 2. 이상적인 외단열 공법

단열재가 방수재의 상부에 위치하는 경우 구조체 위에 바로 방수층을 시공할 수 있는 장점은 있으나, 이 경우 사용 가능한 단열 소재는 충분한 압축강도와 투습저항을 가지는 소재로 국한될 수밖에 없다.

이런 관점에서 옥상부 건물외피 구성에서 단열층과 방수층의 위치, 그리고 단열재의 물성은 매우 중요한 의미를 가진다. 따라서, 녹화옥상시스템의 유형 구분에서 단열층의 위치는 중요한 기준으로 고려되어야 한다.

### 2.2 녹화옥상시스템 유형 분류

옥상녹화시스템의 유형은 일반적으로 저관리·경량형(Extensive roof planting system)과 중량형(Intensive roof planting system)으로 구분된다. 그리고 유형을 구분하는 주요 기준은 유지관리방식, 적용방식, 적용대상건물, 건물의 경사유무, 단열위치, 토양의 하중, 토심, 식생의 종류<sup>3)</sup>를 들 수 있다. 본 연구는 신축 건물(적용대상건물)에

3) 김현수 외, 건물옥상녹화 학술용역, 2002, 서울특별시, P.24

전면녹화(적용방식)할 수 있는 저관리(유지관리) 경량형 (토양의 하중 및 토심) 녹화옥상시스템에 관한 연구이므로, 연구의 변수가 될 수 있는 분류 기준으로는 건물 경사유무, 단열위치, 식생의 종류를 들 수 있다. 이 중에서 경사유무는 시스템의 본질적 구성보다는 활용과 관련이 깊고, 저관리 경량형 옥상녹화시스템에 적용 가능한 식생의 종류는 세덤류 또는 지피식물류 중에서 조건에 따라 선택이 가능하다. 따라서, 본 연구에서는 가장 중요한 유형 분류 기준으로 단열위치를 도출하였다. 따라서, 국내외 신축 건물 대상 저관리 경량형 녹화옥상시스템 사례를 내단열과 외단열 유형으로 구분하고, 이 중에서 본 연구의 방향과 일치하는 외단열 시스템을 대상으로 보다 구체적인 분류를 모색하였다.

독일, 미국, 한국의 대표적 녹화옥상시스템을 단열위치와 시스템 구성상의 주요 변수인 방수층 위치를 기준으로 분석한 결과 다음과 같은 2가지 유형을 도출하였다.

- 단열층 상부에 방수층이 있는 외단열 녹화시스템-(1)
- 단열층 하부에 방수층이 있는 외단열 녹화시스템-(2)

2.3 녹화옥상시스템 유형별 특성

(1) 단열층 상부 방수 외단열 녹화시스템(Prototype 1)

이 시스템은 상부로부터 녹화층, 방수층, 단열재, 구조체 순으로 구성되며, 신축용 녹화옥상시스템에 가장 일반적인 형태이다. 사례로는 독일 DAKU사의 DAKU 시스템과 Zinco사의 Duo 시스템이 대표적이다.

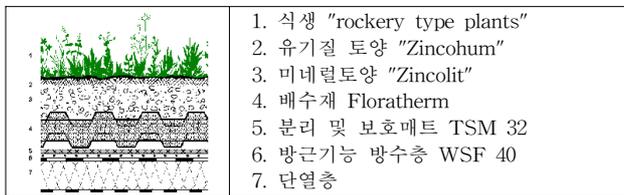


그림 3. DUO시스템의 기본 구성 [출처 : www.zinco.de]

위 그림에서 사례로 제시한 Duo 시스템은 경우에 따라서 노후한 외단열 지붕구조에 단열성능의 보강을 위해 적용되기도 한다. 기본적인 성능은 역전지붕에 준하며, 기존 외단열층 위에 추가로 설치될 경우 0.2W/m²K 이하의 매우 낮은 열전도율 값을 얻을 수 있게 된다.

이 유형으로 분류할 수 있는 국내 시스템에는 독일 DAKU 시스템과 유사한 C사의 녹화시스템과 단열재와

방수층 사이 공기층이 삽입된 H사의 녹화시스템을 들 수 있다.

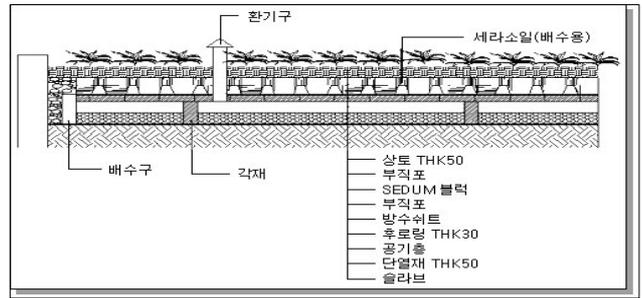


그림 4. 공기층을 둔 Prototype1 사례 [출처 : www.hansu.com]

(2) 단열층 하부 방수 외단열 녹화시스템(Prototype 2)

시스템의 구성은 상부로부터 녹화층, 단열층, 방수층, 구조체 순으로 구성된다. 단열층이 상부에서 방수층을 보호하고 방수층이 단열재의 아래에 위치하여, 습기에 영향을 받지 않는 투습성이 낮은 단열 소재만 사용 가능하다.

건축물리적 관점에서 볼 때 이 시스템은 일종의 역전지붕(Insulated Roof Membrane Assembly)형 녹화시스템이다. 역전지붕의 경우 단열재가 바람이나 우수에 의해 들리는 것을 방지하기 위해 적어도 50mm 이상의 자갈층이나 이에 상응하는 누름층이 요구되나, 역전지붕형 녹화시스템의 경우 녹화층이 이 기능을 대신한다. 단기적인 우수 침수는 투습저항이 높은 단열재의 사용으로 문제가 되지 않지만, 장기간의 침수에 대한 예방책은 두 시스템에 공통적으로 필요하다. 단열재 아래에 우수가 장기간 고이게 되면 구조체로부터 열이 전달되어 불필요한 열손실이 발생하게 되므로 역전지붕 구성에서는 이 점을 고려하여 하부 구조체의 열저항을 보완해주어야 한다.

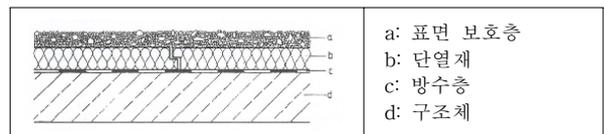


그림 5. 역전지붕의 기본구성

대표적인 역전지붕형 녹화옥상시스템 사례로는 미국의 AMERFREEM TM 시스템을 들 수 있다. 이 시스템은 방수층 위에 방근기능을 가지는 보호층을 두고, 그 위에 단열층 그리고 단열층 위에 배수층, 토양층, 식생층으로 구성되어 있다.

표 1. 국내외 옥상녹화시스템 유형분류

구분	prototype		시스템 구성	독일	미국	한국
단열위치 (외단열)	단열층 상부 방수층	1		- 녹화층 - 방수층 - 단열재 - 구조체	DAKU 시스템(DAKU) Duo 시스템 (ZinCo) Duodach (Pingo)	A.R.T Green Roof System (한국 CCR) 세덤녹화시스템 (한수 종합조경)
	단열층 하부 방수층	2		- 녹화층 - 단열재 - 방수층 - 구조체	역전지붕(Pingo)	AMERFREEM TM (American Wick Drain Corporation)

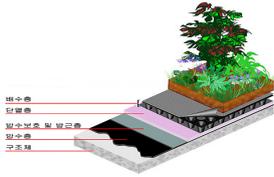


그림 6. AMERFREEM TM 시스템  
[출처 : www.americanwick.com]

2.4 국내 Green Roof System 개발 방향

위에서 살펴본 바와 같이 신축 건물을 대상으로 하는 국내의 녹화옥상시스템 유형은 대부분 외단열 개념을 채택하고 있다. 분석의 결과로 제시한 프로토타입1, 2는 선진국에서 일반화되어 있는 시스템이나, 우리 나라의 경우 프로토타입2는 두가지 관점에서 문제가 예상된다.

먼저, 프로토타입2의 경우 단열재가 습기와 외기에 노출되며, 방수층을 보호하는 기능과 함께 최상부 녹화층의 구조적 기반 역할을 하게되므로 단열 소재의 성능개선이 필수적이다. 다음의 도표와 같이 국산 단열재도 열전도율과 투습저항에 있어서는 선진국 수준에 근접하고 있지만, 압축강도의 경우는 다르다. 비교적 고급에 속하는 압출법 단열재의 경우 25(특호)~10(3호)N/cm<sup>2</sup> 정도에 이르며, 가장 일반적으로 사용되는 나급 비드법 단열재의 경우 16(1호)~5(4호)N/cm<sup>2</sup>로 선진국에서 보편적으로 사용되는 외단열용 단열재 강도 30N/cm<sup>2</sup>에 미치지 못하고 있다. 한편, DIN 52517에서는 역전지붕용 단열소재는 응결실험 중 50K 온도차에서 용적대비 흡수 수분량이 3%를 넘지 않아야 하는 것으로 규정하고 있어, 보편적으로 사용되고 있는 비드법 국산 단열재는 프로토타입2에 적용이 불가능한 것으로 판단된다.

표 2. 국내외 단열재 성능비교

종류	압축강도 (N/cm <sup>2</sup> )	열전도율 (W/mK)	투습계수 (두께25mm)	제조사
국내 iso pink 특호	25	0.027이하	146	(주) 벽산
국내 iso pink 1호	18	0.028이하	146	한국
Floormate 500*	50	0.027	150-220	DOW社
Floormate 700*	70	0.027	150-220	독일
국외 Foamglas T4*	85	0.038		Foamglas社
국외 Foamglas F*	170	0.044		독일
Pingo SF	30	0.035	100-200	Pfleiderer社
Pingo SX	30	0.030	150-200	독일

\* 10% 압축시

다음으로, 역전지붕형 녹화시스템의 경우 장기간의 우수 침수로 인해 하부 구조체로부터 열손실이 발생하므로 이를 보정할 수 있는 방안이 필수적이며, 이는 우기가 긴 우리나라의 기후에 매우 불리한 조건이 된다. 특히, 구조

표 3. 역전지붕 단열재 보정치 기준<sup>4)</sup>

지붕구조의 전체저항대비 구조체의 저항 in %	Δk 보정치
Δk < 10	0.05
10 < Δk < 50	0.03
50 < Δk	0

4) 이민석, 건물의 열에너지 관리, 1999, p152

체에서 상부 방향으로 열전도가 발생할 경우 구조체와 방수층간에 결로가 발생할 가능성이 커지게 되어, 이를 예방할 수 있는 습기 차단층의 구성이 필요하게 된다.

이런 관점에서 국내에서 제작되는 단열재 중 프로토타입2에 적용 가능한 단열재는 Iso Pink와 같은 압출법 단열재 일부에 불과하여, 현실적으로 프로토타입2의 구성은 불가능한 실정이다. 따라서, 방수층을 단열재 상부에 두는 Prototype1을 토대로 국내 현실에 적합한 녹화옥상시스템을 개발하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3. 외단열 녹화옥상시스템 Prototype 구상

2장의 분석 결과를 토대로 본 장에서는 녹화시스템에 요구되는 기본적인 구성요소들(식생, 토양, 단열재 등)의 종류와 특징을 구체적으로 살펴보고, 이를 토대로 적용 가능한 Prototype을 제시하고자 한다.

3.1 적용 가능한 식생 소재

식생 소재는 생태적 건물외피에 해당하는 녹화옥상시스템의 지속성을 좌우하는 중요한 요인이다. 이미 기존 연구를 통해서 많은 자료가 축적되었으므로 본 연구에서는 기본적으로 기존의 연구성과를 활용하는 수준에서 식생 소재를 검토하였다. 다만, 기존의 연구가 무기질 토양 위주인 반면 본 연구에서는 유기질 토양의 적용을 동시에 고려하여 적용 가능한 식생 소재를 도출하고자 하였다. 따라서, 적용 가능한 식물 선정 기준은 기존 보급형 옥상녹화 식재플랜<sup>5)</sup>에 적용한 식물의 선정요건을 토대로 자연토양을 육성층으로 할 경우에 발생할 수 있는 문제를 고려하였다. 즉, 다량의 유기물에 의한 염분피해 여부를 추가로 고려하였다.

1998년부터 지금까지 약 5년간 옥상녹화시스템과 식물소재에 대한 실험 연구 및 시범사업 결과<sup>6)</sup>를 고려하여 Prototype 구성에 적용 가능한 식물 소재를 도출한 결과는 다음 표와 같다.

표 4. Prototype 적용식물

대분류	중분류	식물명	선정기준
자생 식물	기린초류 자생 세덤류	에기기린초, 섬기린초 땅채송화, 돌나물	- 자생세덤류, 척박형식물 - 기존옥상녹화에서 강함 - 자연토양에서의 생육 정도에 대한 검증필요
	일반자생 초화류	두메부추, 좀비비추 금불초, 돌마타리 벌개미취, 매발톱꽃 섬백리향, 총꽃나무	- 일반 자생초화류 - 척박에 어느정도 강함 - 악천후일때는 생육력이 조금떨어짐 - 양분이 있는 자연토양에서 생육정도가 강해지는지에 대한 검증 필요
외래 식물	외래 세덤류	Sedum album Sedum album 'cora- l carpet' Sedum reflexum Sedum rupestre Sedum spurium Sedum spurium'Ful- daglut' Sedum acre Sedum sexangulare Sedum oregannum	- 외래 세덤류 - 척박에 강함 - 기존 옥상녹화에서 강함 - 자연토양에서의 생육 정도에 대한 검증필요

5) 김현수 외, 건물옥상녹화 학술용역, 2002, 서울특별시

6) 그린타운개발사업(Ⅲ~Ⅴ)(1998~2000, 한국건설기술연구원), 생태 도시 기반기술 개발 사업(Ⅱ~Ⅲ)(1998~1999, 환경부), 건물옥상 녹화 학술용역(2000, 서울특별시)

3.2 적용 가능한 토양 소재

녹화시스템에 적용 가능한 인공토양은 크게 무기질과 유기질로 구분된다. 현재 국내 시장에 공급되고 있는 무기질 인공토양은 펄라이트 계열과 발포세라믹계열로 구분 가능하며, 고온에서 원석을 발포시켜 다공질의 경량체로 제조된다. 그러나 발포 경량토양 자체는 무기질이므로 보비력을 갖게 하기 위해 유기질과 적절히 혼합하거나 양액을 혼합하여 사용한다. 무기질 인공토양은 대부분이 펄라이트 계열이며, K사의 펄라이트 인공경량토양이 시장의 70% 정도를 점유하고 있는 상황이다. 일반적으로 펄라이트 계열 인공토양은 색상이 하얀색이라 멀칭이 필요하고, 시공 시 바람에 비산될 뿐만 아니라 표층이 노출될 경우 토양층이 풍식되는 단점을 가지고 있다.

한편, 옥상녹화용으로 활용 가능한 유기질은 다양한 종류가 있으나 주로 농업용 상토나 유기질 퇴비로 제품화되어 왔으며, 최근에 와서 기존의 농업용 상토에 난분해성 유기질을 많이 혼합하여 인공지반용 토양으로 제품화하는 경향이 증가하고 있다. G사는 바크 등 유기물과 소량의 발근제 등을 미량원소로 첨가하여 수목의 활력을 증진시키는 유기질 토양을 시판하고 있으며, I사는 코코넛 섬유를 사각형태로 성형하여 그 속에 코코넛 유기물을 충전하여 인공지반 식재기반용 토양 제품을 선보이고 있다. 또한, M사는 이탄토를 주소재로 코코넛 섬유 등 유기질을 혼합한 인공토양을 개발하여 녹화용 토양으로 공급하고 있다.

이런 현실을 고려하여 본 연구에서는 무기질 토양뿐만 아니라 유기질 토양을 함께 프로토타입에 적용 가능한 토양으로 판단하였다.

표 5. 국내에서 시판되고 있는 인공지반 녹화용 토양

구분	펄라이트 계열	세라믹 계열	유기질 계열
개요	-중국 등에서 수입한 진주암을 발포 가공하여 제품화	-규사에 발포제를 섞어 800~900°C에서 발포 가공하여 제품화	-바크, 피트모스, 코코넛, 이탄토 등 난분해성 유기질을 혼합하여 녹화용 토양으로 제품화

3.3 적용 가능한 단열소재

(1) 요구조건

방수층 하부 외단열 녹화시스템에 적용할 단열재의 경우 역전지붕에 적용되는 단열재에 비해 건축물리적 요구수준은 떨어진다. 그러나 단열재로서의 본질적인 기능인 단열성과 구조체 일체형 녹화시스템이란 특성으로 요구되는 압축강도는 역전지붕과 크게 다를 바 없다.

단열성 측면에서 볼 때, 건축물 에너지절약설계기준(2001년6월1일)의 개정으로 단열규정이 강화됨으로써 중부지방 최상층 천정의 단열재는 열관류율 기준으로 0.29W/m<sup>2</sup>k 이상의 성능이 요구된다. 더불어 단열재 상부에 무근콘크리트층을 두지 않는 녹화옥상시스템의 경우, 단열재가 녹화층을 포함한 상부의 적재하중에 견딜 수 있어야 하므로 충분한 압축강도가 요구된다. 또한, 단열재가 우수 침수로 인한 습기로부터는 보호받을 수 있지

만 구조체로부터 전달되는 습기의 영향을 받을 수 있으므로 가능하면 높은 투습저항을 가지는 것이 유리하다.

따라서, 이러한 점을 종합하면, 외단열 녹화시스템에 적용되는 단열재는 중부지방 최상층을 기준으로 할 때 0.29W/m<sup>2</sup>k 이상의 단열 성능, 녹화층을 포함한 상부의 적재하중을 지지할 수 있는 압축강도, 그리고 구조체로부터 전달되는 습기에 견딜 수 있는 일정 수준 이상의 투습저항이 요구된다.

(2) 국내 시판되는 단열재의 종류와 특성

기준에 맞는 소재선정을 위해 국내에서 적용되고 있는 8종류의 단열소재를 다음과 같이 검토하였다<sup>7)</sup>.

a. 폴리스티렌보온재(KS M 3038 : Foam Polystyrene Thermal Insulation Material)

비드법 발포 폴리스티렌(1차발포/2차발포)과 압출법 발포 폴리스티렌(연속 압출발포)으로 구분한다. 전자는 폴리스티렌수지에 발포제를 넣은 다공질의 기포플라스틱(foam plastic)으로 스티로폼(styropor)이라고도 하는 발포계 단열재 대부분의 건설현장에서 사용되고 있다. 최고 안전사용온도는 70°C로 고온, 자외선에 약하고 화재시 착화나 유독가스의 발생 위험을 내재하고 있으며, 일반적인 최상층 단열재로 사용되는 비드법 보온판의 열전도율은 다음과 같은 기준으로 구분된다.

표 6. 비드법 단열재의 열전도율<sup>8)</sup>

구분	1호	2호	3호	4호
열전도율 (W/mK)	0.036이하	0.037이하	0.040이하	0.043이하

후자는 스티렌 수지 원료에 난연제, 발포제 등을 첨가하여 압출기에서 용해, 혼합후 발포시킨 판상 단열재로서 물리적 성질은 폴리스티렌폼과 유사하나 단열성이 우수하며 양호한 투습저항을 가지고 있다. 특히, 고발포폴리스티렌은 폴리스티렌수지에 발포제를 혼합하여 4~50배로 발포시킨 단열재로 열전도율이 작아 단열성(표 2 참조)이 우수하며 방수성, 내약품성, 내후성도 우수한 소재이다.

b. 유리면 (KS L 9102 : Thermal Insulation Material Made of Glass Wool)

규사, 석회석, 장석, 소다회 등 유리계 광물질을 주원료로 유리섬유사이에 밀봉된 공기층이 단열층을 형성하게 만든 소재이다. 그러나, 압축이나 침하에 의한 유효두께 감소, 함수에 의한 단열성의 저하가 우려되며 투습저항이 없어 녹화용 단열재로는 부적합하다.

c. 암면 (KS F 4701 : Thermal Insulation Material of Rock wool)

고로슬래그, 현무암 등의 광석원료로 만든 단열재로 물리적 성질이나 특성이 유리면과 흡사하여 녹화용 단열재

7) 조준현, 건축재료학, 기문당, 1998/건축재료, 대한건축학회편, 1998  
8) KS M 3038

로는 부적합하다.

d. 발포폴리에틸렌보온재 (통산산업부고시 83-14호 : Foam Polyethylene Thermal Insulation Material)

폴리에틸렌수지에 발포제 및 난연재를 배합하여 압출 발포시킨 후 냉각한 판상의 발포제로 적층, 열융착하여 자기소화성을 갖추고 있는 소재이다. 평균온도상의 열전도율은 0.039kcal/mh℃ 이하이며, 최고안전사용온도는 80℃이다.

e. 폴리우레탄폼 (KS M 3809 : Polyurethan Foam)

폴리올(Polyol), 폴리이소시아네이트(Polyisocyanate)와 발포제, 난연성을 위한 첨가제를 주원료로 발포성형한 유기 발포제(독립기포구조)의 단열재이다. 경질의 폴리우레탄폼이 사용되며 판상, 통상형의 생산품과 현장발포 시공방식이 있다. 내열성(최고안전사용온도 100℃)과 단열성이 우수하고 기밀성이 우수하여 시공이 곤란한 곳의 단열에 적합하다. 그러나 시공 후 부피가 줄고 열전도율이 저하되는 단점을 지니고 있다.

f. 질석보온재 (KS F 3702 : Vermiculite)

운모계 광석으로 1000℃에서 소성한 유공형의 무기질로 비중 0.2~0.4, 단열, 보온, 불연, 방음, 결로방지 효과가 있다. 그러나 흡수율이 90%정도로 녹화용으로 사용하기에는 바람직하지 못하다.

g. 펄라이트 보온재 (Perlite)

화산석으로 된 진주석을 900~1200℃로 소성, 팽창시켜 내부에 미세공극을 가지는 경량 구상형의 입자 소재로 경량골재 및 단열 소재로 이용된다. 단열, 보온, 흡음 등의 목적으로 사용되며 충전제, 몰탈, 플라스틱의 골재로도 사용한다. 비중 0.04~0.2, 공극율은 90%로 경량의 소재이며 내화성(최고사용온도 600℃)도 뛰어나지만, 흡수성이 높아 녹화용으로는 부적합하다.

h. 펄라이트 경량콘크리트

펄라이트 경량콘크리트는 경량골재용으로 생산한 건축용 펄라이트와 시멘트 분산제, 증점제, 균열방지제를 주성분으로 PRE-WETTING 상태로 생산하며, 작업성이 우수하고 경량성, 내구성, 내화성, 강도 등의 특성을 고루 갖추고 있다. 특히 압축강도가 우수하여 녹화시스템의 보재 단열재로 사용을 고려해볼 수 있으나, 단열성 자체는 일반적인 발포 폴리스티렌에 비해 크게 낮다.

(3) 소재 선정

이상과 같이 외단열 녹화옥상시스템에 적용 가능한 주요 단열 소재를 검토한 결과, 적용 가능한 소재로 꼽을 수 있는 것은 압축발포 폴리스티렌(Extruded Foam Poly styrene Borad)뿐이다. 이 소재는 녹화시스템에 요구되는 단열성, 투습저항, 압축강도를 고루 갖추고 있으며, 에너지절약설계기준의 강화로 건설 시장에서 이용이 보편화되고 있어 실용성이 높은 장점을 지니고 있다.

이론적으로는 비드법 폴리스티렌판재의 사용도 고려해볼 수 있으나, 이 경우 구조적 안전성(압축강도)에 대한 검토가 필수적이다. 이 외에 폴리우레탄판재를 생각해볼 수 있으나 국내에서는 생산이 많지 않고 비교적 고가여서 현실적인 대안이 되지 못하는 것으로 판단된다.

3.4 Prototype 제안

앞서 검토한 녹화옥상시스템 기술 개발 현황과 적용 가능한 소재를 종합적으로 고려하여 방수층 하부에 단열재를 두는 외단열 녹화옥상시스템(Prototype 1)이 한국적 현실에 가장 합리적인 대안으로 판단된다. 시스템 구성에 필요한 단열재로는 발포 폴리스티렌 판재(EPB)를 선택하였으며, 고밀도 압출발포폴리스티렌 또는 특호 이상의 아이소핑크를 사용하여 구조적 안전성을 확보하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 단열재 위 방수층은 재료간에 화학적으로 반응하지 않는 시트 또는 복합방수 시스템을 선정하면 된다. 방수층 위 배수층은 상호간에 화학적으로 반응하지 않으며 방수층의 보호층 기능, 방근 기능 그리고 상부하중을 등분포시킬 수 있는 기능을 가지는 소재로 선택한다. 특히, 기존 옥상녹화시스템에서는 보편적으로 사용되나 하부시스템(방수층 및 단열층)에 부정적 영향(집중하중으로 인한 방수층 또는 단열층 훼손)을 미칠 것으로 예상되는 소재는 제외하여야 한다.

이러한 점을 고려하여 신축 건물의 설계에 활용할 수 있는 한국형 녹화옥상시스템의 하나로 다음과 같은 Prototype을 제안하고자 한다.

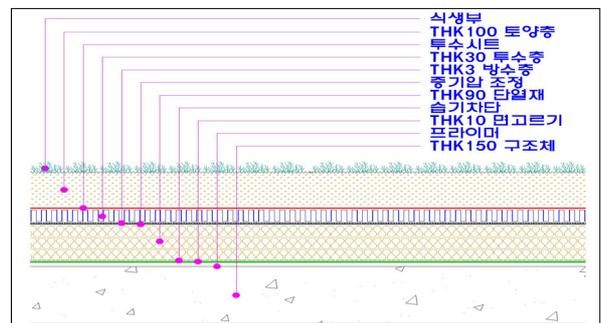


그림 7. 기존외단열공법 대체 Green Roof System Prototype

표 7. 시멘트와 펄라이트의 배합비율에 따른 열전도율 변화.

용적 배합비	1m³ 당 재료 소요량			W/C (%)	열전도율 (kcal/mh℃)	4주압축강도 (kg/cm²)
	시멘트 (kg)	펄라이트 경량골재(L)	물 (L)			
1:3	876	1752	331	38	0.20	153
1:5	362	2475	361	49	0.18	91
1:6	-	-	-	-	0.14	-
1:8	-	-	-	-	0.13	-

4. Prototype 성능 실험

4.1 구조적 안전성 실험

본 실험에서는 제안된 프로토타입에 현실적으로 발생 가능한 하중을 상부에 가하여 시스템의 구조적 안정성

및 상부시스템의 적재한계를 알아보려고 하였다. 실험은 구조체를 제외하고 Prototype에서 선정된 배수매트, 시트 방수층 그리고 단열재를 차례로 겹쳐서 수행하였다. 시스템에 포함되는 단열재 및 배수판의 표준압축강도는 생산업체의 물성시험결과를 근거하고 있으며, 사용된 단열재의 두께는 에너지절약 설계기준에 따라 일반적으로 각각의 단열재가 실제로 사용될 때 요구되는 두께를 기준으로 하여 압출법 단열재 3호 110mm (60+50) 그리고 비드법 단열재 기성1호 110mm(50+30+30)로 선정하였다. 실험에 요구되는 단열재의 두께와 공장에서 생산되는 단열재의 두께가 달라 현장에서 가장 많이 사용되는 단열재를 중첩하여 시험체를 만들었다.

실제 실험은 S사의 투수팻, D사의 플라스배수판 그리고 G사의 배수매트를 각각의 단열재와 조합하여 방수시트의 유무에 따라 18개의 시험체를 제작하여 각각 1회씩 실시하였다. 여기에서는 Prototype 구성에서 선정된 G사의 배수매트와 방수시트 그리고 두 종류의 단열재를 조합한 2개의 시험체에 대한 실험결과를 제시하였다.

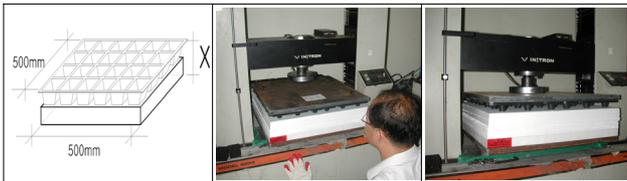


그림 8. 시험체 크기와 재하실험모습

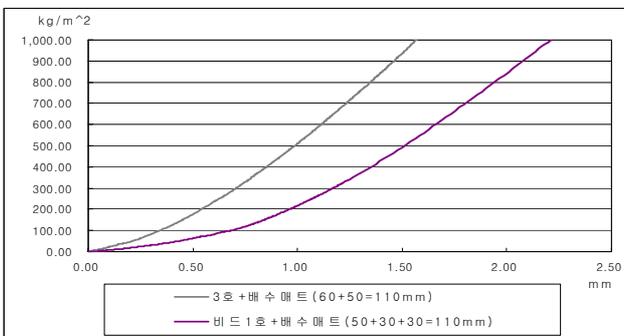


그림 9. 압축강도를 이용한 구조적 안정성 실험 (X축 : 변형, Y축 : 하중)

500kg/m<sup>2</sup>에서 압출법 3호는 0.62mm 그리고 비드법1호는 1.07mm의 변형이 발생하였고, 1mm의 변형에 대한 단위면적당 하중은 1호 507.4kg/m<sup>2</sup> 그리고 비드법3호 216.7 kg/m<sup>2</sup>로 나타났다. 상기의 실험결과에서 비드법 단열재에 비해 압출법 단열재의 변형이 적으므로, 옥상녹화 적용시 압출법 단열재가 상대적으로 안정적임을 확인할 수 있었다.



그림 10. 유압식 디지털 압축재료시험기

#### 4.2 열성능 실험

기존 옥상 외단열공법과 본 연구에서 제시된 녹화옥상 시스템을 열관류율 시험을 통해 열성능 관점에서 정량적으로 비교 분석을 실시하였다. 단열 성능평가에 사용된 열관류율 시험장치는 KS F 2299 (건축물 부재의 정상상태에서의 단열성능 시험), KS F 2278 (창호의 단열성능 시험), KS F 2295 (창 및 문의 결로방지성능 시험)의 시험기준 및 ISO 8990<sup>9)</sup>과 ISO 12567<sup>10)</sup>에 의하여 건축부재의 열관류율을 평가할 수 있는 장치이며, 이는 향온실, 저온실, 향온실내 가열상자, 저온실내 냉풍 취출장치, 각실의 공조기기, 온습도 제어장치, 계측장치 및 기타 부대 설비로 구성되어 있다.

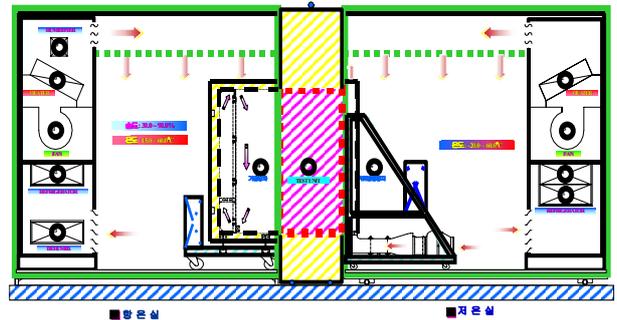
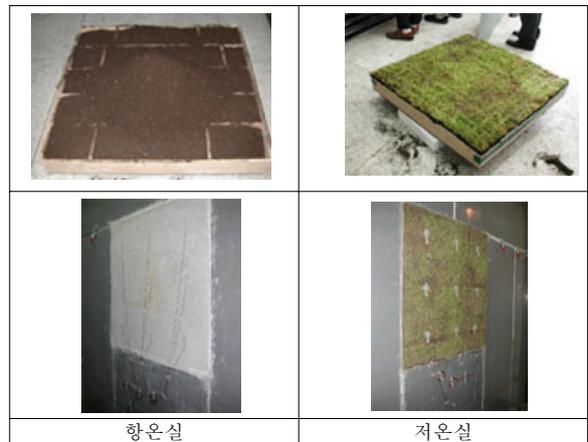


그림 11. 단열성능평가를 위한 열관류율 시험장치 개요도

이 실험 장치는 주로 벽체 및 창호부의 열성능을 평가하는데 활용되나, 수직으로 설치 가능한 프로토타입 시험체를 제작하여 열성능을 평가하였다. 일반적으로 토심 120mm의 시스템에 소요되는 토양의 양은 120liter로 39kg가량이 소요되나 상기 실험에서는 시험체가 수직으로 설치되어 토사침하에 의한 공극발생을 막기 위하여 다짐을 강하게 한 결과 실제로 투입된 총토양량은 175liter로 56.88 kg에 달하였다.



9) Thermal insulation - Determination of steady state thermal transmission properties-Calibrated and guarded hot box  
10) Thermal insulation-Determination of thermal resistance of components - Hot box method for door and windows

그림 12. 실험체 제작 및 부착시의 모습

또한, 이 장치에서 실험 가능한 시험체의 두께가 300mm로 한정되어, 실제 실험에서는 단열재를 제외한 식재층/토양층/배수판/방수층/구조체로 프로토타입을 제작하여 실험을 수행하였다. 결국 단열재를 제외한 순수 녹화시스템의 열전도저항을 분석하는 것을 중점적으로 실험하였다.

2003년 8월5일에 실험체를 장착하고 실험기내 안정화상태 유지를 위한 예비 가동을 시작했고, 8월9일에서 13일까지 본실험을 실시하였다. 이 실험 결과를 분석한 결과는 다음과 같다.

표 8. 열관류율 시험결과

구 분	두께 (m)	열전도저항 (m <sup>2</sup> K/W)	ΣR
항온실 평균온도 19.68°C			
표면 열전달저항	-	0.159	1.48
구조체	0.150	1.162	
방수시트+도막방수	0.003		
배수층	0.010		
토양층 (474kg/m <sup>3</sup> )	0.120		
잔디매트	0.030		
표면 열전달저항	-	0.159	
저온실 평균온도 0.24°C			
U-Value (W/m <sup>2</sup> K)		0.68	

위 결과를 에너지절약기준 고시에 따른 중부지방 지붕층 단열성능 0.25W/m<sup>2</sup>K과 비교하면, 본 연구에서 제안된 녹화옥상시스템을 적용할 경우 단열성능이 0.194 W/m<sup>2</sup>K로 낮아지게 되어 옥상부를 통한 열손실이 약 23.4%가량 줄어들게 된다. 이 결과를 보다 구체적으로 나타내면 다음 표와 같다.

표 9. 옥상녹화시스템을 활용한 단열재 두께의 감소효과

단열재 종류	가급(아이소핑크)				나급 1호
	특호	1호	2호	3호	
열전도율 (W/mK)	0.027	0.028	0.029	0.031	0.035
옥상녹화 적용시 단열재 소요두께 (mm)	68	70	73	78	88
평지붕구조에서 누름 콘크리트 적용시 단열재 소요두께 (mm)	82	86	89	97	111
단열 두께 감소 (mm)	14	16	16	19	23

이 실험 결과는 단열층을 포함한 녹화시스템 전체의 열성능을 평가하지 못한 한계를 가짐에도 불구하고, 단열재를 제외한 녹화층이 보조적인 열성능을 가지는 것을 정량적으로 제시해주고 있다. 따라서, 이론적으로는 녹화시스템에 요구되는 단열재의 두께를 기존 외단열 공법에 비해 감소시켜 적용할 수 있는 가능성을 보여 주고 있다.

**5. 결론 및 향후연구**

본 연구에서는 신축 건물의 설계에 활용할 수 있는 현실적인 녹화옥상시스템(Green Roof System)의 프로토타입을 제안하고, 그 구조적 안정성과 열성능을 검증하고자 하였으며 주요 연구내용과 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 국내 옥상 건축공법에 적용되고 있는 외단열 공법은 옥상부 단열성능 저하와 열화의 구조적 원인으로, 옥상부 건물외피 구성에서 단열층과 방수층의 위치, 그리고 단열재의 물성은 매우 중요한 의미를 가진다.
- 녹화옥상시스템의 유형 분류에서 가장 중요한 기준으로 단열층의 위치를 고려하여야 하며, 본 연구에서는 단열층 상부에 방수층이 있는 외단열 녹화시스템과 단열층 하부에 방수층이 있는 외단열 녹화시스템으로 유형을 구분하였다.
- 녹화시스템의 유형별 특성과 단열재 개발 수준 등을 종합적으로 고려할 때, 국내에서는 방수층을 단열재 상부에 두는 녹화시스템 프로토타입의 개발이 합리적인 것으로 판단된다.
- 제안된 녹화시스템에 적용 가능한 요소기술 중 단열소재는 압축강도, 투습저항, 단열성능을 종합적으로 고려하여 선정하여야 할 것으로 판단되며, 현재 국내 현실을 고려할 때 외단열 녹화시스템에 적용 가능한 단열소재는 일부 압축발포형 폴리스티렌 단열판재에 한정될 수밖에 없다.
- 국내 신축 건물 설계에 활용 가능한 녹화옥상시스템의 프로토타입은 상부로부터 식생층, 토양층, 투수시트, 배수층, 방수층, 단열층, 구조체의 순서로 구성되는 것이 바람직하다.
- 제시된 프로토타입은 구조적 안전성과 열성능 관점에서, 건물 옥상부에 요구되는 기본 성능을 충족시킬 수 있는 것으로 판단된다.

향후, 제안된 녹화옥상시스템 프로토타입을 바탕으로 보다 구체적인 시스템 개발 연구가 필요하며, 녹화용 단열 및 방수 소재 개발에 역점을 두어야 할 것이다. 특히, 방수층의 경우는 습기차단, 면고르기 및 바인딩 기능을 통합하는 복합기능 Mortar의 개발이나, 현장에서 원활하게 시공될 수 있는 디테일개발에 대한 접근도 향후에는 함께 진행되어야 할 것으로 판단된다.

**참고문헌**

1. 건축물의 에너지절약설계기준, 건설교통부고시, 2001
2. 이민석, 건물의 열에너지 관리, 1999
3. H. Fischer 외, Lehrbuch der Bauphysik, Stuttgart, 1997
4. 건축재료, 대한건축학회편, 1998
5. 환경부, 생태도시조성기반기술 개발사업(III), 1999. 12
6. 서울특별시, 건물옥상녹화 학술용역, 2000. 12
7. 한국건설기술연구원, Green Town 개발사업 (I)~(II), 1996~98
8. 김현수, 강제식, 변혜선, 옥상녹화시스템의 개발과 열성능에

관한 기초 연구, 대한건축학회 15권 3호 P127. 1999

9. K. Dierks 외, Baukonstruktion, 2002