

# 현대건축경향에 입각한 건축물녹화시스템 유형의 열적물성치에 관한 연구

## A Study on the Thermal Properties of Architectural Greenery System Typology Based on the Contemporary Architectural Trend.

김 태 한\*      이 주 희\*\*      김 철 민\*\*  
Kim, Tae-Han      Lee, Ju-Hee      Kim, Chul-Min

### Abstract

Recently, greenery system is frequently applied on buildings and artificial grounds to improve urban ecological functionality. Specifically, architectural greenery is also known as an architectural language that can meet the sustainable design concept of architects. Although the architectural greenery system can be optimized through an interdisciplinary approach between architecture, horticulture and landscape-architecture, there is a problem of communication on the ideal gap between them. Therefore, this study is expected to establish the contemporary architecture as hi-tech and the organic architecture in internationalism. Moreover, it can analyze the case study on architectural greenery system designed by a Pritzker Prize winner who represents the contemporary architectural trend. In this analysis, we calculate and compare the U-value of the free-form surface system based on the international standards: ISO and CIBSE etc. Moreover, we calculate a change of artificial soil transmittance respect on compounding ratio of the bottom ash and perlite. In the case of California Academy of Science by Renzo Piano, total transmittance of the greenery system results in 48% of domestic thermal insulation standard in dry condition. This result will be used as a basic study to promote developing the advanced system based on the concept of consilience.

키워드 : 현대건축사조, 건축물녹화시스템, 열관류율,

Key Words : Contemporary Architectural Trend, Architectural Greenery System, Thermal Conductivity

### 1. 서론

최근 기후변화로 인한 환경폐해들은 산업전반에 걸쳐 '친환경'이라는 필수적인 트렌드를 양산하고 있다. 기후변화요인 중 하나인 지구온난화의 주요지표인 이산화탄소는 총 배출량의 약 40%가 건설관련부문에서 유발되고 있다. 이는 건설 산업의 친환경적 체질개선으로 인해 미칠 수 있는 환경적 순기능의 파급효과가 상대적으로 중요하다는 것을 유추할 수 있다. 이러한 배경으로 건축계획 및 설계부문에서는 생태건축, 경관건축, 환경건축 등의 어휘로 다양한 친환경 건설기술연구가 진행 중에 있다.

이러한 연구 중에서 식물소재의 기술적 적용은 기존 건축물에 생태적 기능성을 보완한다는 측면에서 널리 시도되고 있다. 건물외피에 식물을 도입함으로써 외피의 물리적 증발산 현상을 유발하여 도심열섬효과 완화, 우수유출저감, 방음효과증진, 대기오염원저감 등을 통해 도시환경차

원의 다양한 순기능을 기대할 수 있다. 따라서 관련연구는 건축, 환경, 조경, 원예 등을 아우르는 융합적 접근방법이 수반되어야 하는 분야라고 할 수 있다.

최근 해당분야의 건축관련연구로는 학교건물에서의 입체녹화기법 적용에 따른 에너지성능 평가에 관한 연구(정재웅 외 2008), 옥상녹화시스템의 식재방식에 따른 단열효과와 정량적 분석(장희경 외 2008), 인공지반 녹화용 공법의 시공환경을 고려한 성능평가 시스템 연구(박창화 외 2011)와 같이 녹화시스템을 기능측면에서 건축의장재 또는 단열재로 인식하여 열관류율로 고려한 연구방법이 주를 이루었다.

반면 조경관련연구는 조경녹화용 잔디류와 이끼의 열성능평가(한승원 외 2010), 옥상녹화의 이용관리에 대한 시민인식도 연구(이재우 2011) 등과 같이 식물자원관점의 모니터링 연구와 시스템의 정성적 가치에 대한 설문조사연구가 대부분을 차지하였다.

이와 같은 연구경향에서처럼 건축물녹화시스템으로 정의되는 식물의 건축적 적용에 관련된 연구는 건축, 조경부문에서 건축구조와 식물소재로 구분되어 근원적인 교류가

\* 교신저자: 상명대학교 환경조경학과, 조교수 (taehankim@smu.ac.kr)

\*\* 상명대학교 대학원 환경 자원학과

원활하게 이루어지지 않고 있다. 독일의 경우 총 건축물녹화의 약 85%<sup>1)</sup>정도가 관리 조방형 녹화시스템으로 시공되고 있고 국내에도 점차 건축물통합형 녹화시스템에 대한 요구가 높아지고 있는 상황이다. 그러나 주요 사용자인 건축가와 시스템 개발자인 조경, 원예 기술자 간의 건축물녹화에 대한 개념적 간극은 효율적인 시스템 개발에 장애요인으로 작용하고 있다. 따라서 이러한 분야 간의 간극을 최소화하기 위해 상호전문성을 포괄할 수 있는 융합 성격의 연구가 필요한 시점이다.

여기에 본 연구는 동시대 건축경향을 대변하는 주요 건축가의 녹화시스템 적용에 관해서 유형적으로 구분하고 녹화기술 적용의도를 객관적으로 해석하려한다. 이를 위해 기존 시스템개발 관점에서 필요했던 시스템 및 식물 육성층의 열적 물성치에 대한 정량적 이해를 바탕으로 다양한 건축적 요구에 대응하는 녹화시스템 개발방향을 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 현대건축경향과 건축물녹화

현대건축에 있어서 녹화시스템은 건물의 생태적 기능을 제고하는 대표적인 융합기술로 정착되고 있다. 그러나 시스템 적용에서 건축가의 접근방법이 상이한 경우가 많은데 이는 일반적으로 기능성, 심미성에 대한 상대적 가치의 차이에 기인한다. 따라서 건전한 녹화시스템 적용을 위해서는 건축가의 요구에 능동적으로 대응하는 것이 필요하며 이를 위해 현대건축경향을 바탕으로 설계의도에 대한 포괄적인 이해가 필요하다. 여기서 동시대 건축경향을 기능성이 강조되는 하이테크 건축, 심미성을 대변하는 국제주의적 유기건축양식 등으로 해석할 수 있는데 이러한 구분은 후기모더니즘 건축에서 유래한다.

#### 2.1.1 후기 모더니즘 건축과 구조미학 운동

1950년대 모더니즘의 기술이상을 이어받은 후기모더니즘 건축은 구조요소나 외피재료를 장식적 개념으로 해석하게 된다. 이에 따라 절제미를 추구하던 모더니즘 건축양식은 후기에 이르러 표현주의에 입각한 장식주의로 변형되었다. 모더니즘의 기본어휘를 기교적으로 사용하려한 후기모더니즘 건축가 중에서 건축구조법칙자체를 설계개념화하려는 근원적 경향을 보이게 되는데 이를 구조미학(Structural Aesthetics)운동이라고 한다. 여기서 건축구조에 대한 기본적 이해를 바탕으로 프라이 오토(Frei Otto), 오브 아룹(Ove Arup) 등에 의해 다양한 공학적 가능성이 건축어휘로 재생산되기에 이른다. 이는 과거 설계, 예술, 공학을 아우르던 르네상스 시대의 건축가에 비견되며 다시금 첨단구조공학과 설계 간의 융합으로 모더니즘 건축을 완성하였다고 해석할 수 있다. 이렇게 시작된 후기모더니즘과 구조미학운동은 기능적 관점에 보다 충실한 하이테크 건축양식을 파생시키게 된다.

### 2.1.2 하이테크 건축에서의 녹화 시스템

구조학적으로 새로운 구조체를 미의 기준으로 재정립하려했던 구조미학운동에 반해 초기 하이테크 건축은 금속, 유리 등의 공산재를 통해 첨단 이미지를 건물에 부여하려했다. 하이테크 건축은 1960년대 영국에서 리처드 로저스(Richard Rogers), 노먼 포스터(Norman Foster), 마이클 홉킨스(Michael Hopkins), 니콜라스 그림쇼(Nicholas Grimshaw) 등 4인에 의해 처음 태동 되었으며 이탈리아의 렌조 피아노(Renzo Piano) 등에 의해서도 유사한 건축행위가 시도되었다. 이들은 상호간 파트너십을 통해 홍콩은행, 로이드빌딩과 같은 대표작을 완성하며 동시대 하이테크 건축의 대표건축가로 평가되고 있다.

1980년대에는 장 누벨(Jean Nouvel), 본 게르칸(Von Gerkan), 막시밀리아노 푸크사스(Massimiliano Fuksas)와 같은 건축가들을 통해 유럽 전역으로 확대 되었으며 1990년대에 이르러 하이테크는 세계 건축을 주도하는 가장 큰 흐름으로 자리 잡게 된다. 21세기로 접어들면서 기후변화 등 환경문제가 대두되면서 하이테크 건축가들은 환경적 가능성을 부각하는 건축성향을 보이게 된다. 이는 화석 에너지 사용을 최소화하기 위해 채광, 환기, 냉난방 등 기존설비가 담당했던 부하를 최소화하는 수동형설계(Passive Design)의 형태로 구체화되고 있다. 이러한 건축외피설계는 환경 기능을 개선하는 주요 요소로 평가되고 있으며 건물의 에너지, 자원순환 및 생태적 기능을 제고한다는 측면에서 건축물녹화시스템의 적용빈도도 점차 증가하고 있다.

일반적으로 하이테크 건축의 녹화시스템은 다분히 기능적 측면을 부각하는 기술요소로 해석되고 있으며 사용자인 건축가의 포괄적인 시스템에 대한 이해를 전제로 적용되는 경향을 보이고 있다.

### 2.1.3 국제주의적 유기건축에서의 건축물녹화

한편 현대건축은 정보화로 인한 현대사회의 다변화된 요구를 수용하는 건축공간구성에 대한 개념적인 한계에 이르게 된다. 건축가는 이를 충족시키기 위해 기존 유클리드 기하학 관점의 공간적 한계를 극복하고 경계를 완화하여 다양한 프로그램들을 병치하여야했다. 여기서 질 들뢰즈(Gilles Deleuze)의 주름이론은 대지와 슬래브가 통합된 연속판으로 실내외 경계를 모호하게 하는 개념적 기반을 제공하였다. 이를 통해, 공간간의 물리적 이동을 촉진하여 이용행위를 다변화, 극대화하는 주름건축(Fold Architecture)이 대두되게 된다. 일반적으로 형태적 측면에서 주름건축은 외부의 자연경관이 내부로 관입되거나 대지의 생태적 요소가 건물벽면, 옥상 등으로 자연스럽게 유입되는 형태를 취한다. 건축물녹화는 이를 실현시킬 수 있는 구체적인 기술로 해석되어 관련 건축유형에 널리 적용되게 된다. 또한 컴퓨터응용설계(Computer Aided Design)기술의 비약적인 발전과 더불어 위상기하학적 공간실현이 가능하게 됨에 따라 유기적 디자인으로 비 유클리드적 공간설계를 촉진시키게 된다. 이러한 위상기하학적 건축물녹화사례로는 주름건축의 연속성에 대한 개념을 정립한 램 콜라스(Rem Kool

1) F.Hammerle 2002. Doch + Grun n.3, september 2002

hass)의 에두카토리움(Educatorium), 국제주의적 유기건축을 구현하고 있는 자하 하디드(Zaha Hadid)의 동대문 디자인 플라자(DDP: Dongdaemun Design Plaza) 등이 있다.

이러한 건축가들이 녹화시스템을 적용하는 목적은 건축 환경 관점에서 하이테크 건축가들이 건물의 생태적 기능을 제고하려는 것과는 확연히 구분된다. 즉 다양한 이용자의 요구에 대응하는 건축공간을 철학적, 미학적 표현으로 완성하기 위해 소재적 측면에서 녹화시스템을 적용하고 있다고 해석할 수 있다.

## 2. 건축물녹화시스템의 열적 물성치

일반적으로 건물 외피적 관점에서 건축물 녹화시스템을 평가하는 물리적 공통지표는 열적물성치이다. 이는 구성요소의 열전도도, 열저항, 열관류율 등을 의미하는 것으로 건물외피의 단열성능을 결정하는 주요지표이다. 건축물 녹화시스템은 일반적으로 식생, 육성, 배수, 방근, 방수층으로 이루어지는데 최근에는 배수, 방근, 방수가 통합된 유닛형 제품이 소개되고 있다. 보다 실질적인 시스템의 열적 물성치를 산출하기 위해서는 식물의 기작, 토양의 수분함량 등 보다 복합적인 요건이 고려되어야하며 이와 관련된 다양한 연구들이 현재 진행 중에 있다.

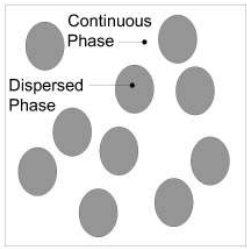

본 연구에서는 녹화시스템의 건축적 적용에 대한 개념을 제고하는 차원에서 이미 정립된 열적 물성치 도출방법을 평가지표로 사용하고자 한다. 이는 생화학적 변수가 배제된 균질한 시스템 설정을 기반으로 하며 식생기작이 제외된 건조상태의 토양, 각 시스템의 물리적 열전도도를 고려하여 총 열관류율을 도출하려 한다.

### 2.1 혼합 토양의 열전도도

녹화시스템의 육성기반재는 주로 토양이 사용되고 토양은 물리적 관점에서 고형입자와 입자 간에 존재하는 물, 공기로 이루어진 혼합물로 해석되며 물, 공기의 비율에 따라 포화, 불포화, 건조 상으로 구분된다.

토양과 같은 다중 혼합물에 대한 열전도도 산출은 준이론모델(semi-theoretical model), 경험모델(empirical model), 수치모델(numerical model)등을 통해 이루어진다. 여기서 준이론 모델은 가장 단순한 모델로 정확성이 다소 낮으나 경우에 따라 기초모델로 활용 가능하다. 준이론모델의 유형으로는 직렬(Series)모델, 병렬(Parallel)모델, Maxwell-Eucken(ME)모델, 유효매질이론(Effective Medium Theory: EMT), 기하평균(Geometric Mean: GM) 그리고 상호 연속적 구조모델(Co-Continuous structural model: CC) 등이 있다. 이 중에서 ME모델은 혼합물을 이루는 매질의 분포가 연속 또는 분산되는 균질한 구조라는 논리적 가설 하에 혼합물의 열전도도를 산출하게 되며 매질이 두 가지 일 경우 표1과 같이 정리된다.

Table1. semi-theoretical model: Maxwell-Eucken<sup>2)</sup>

Maxwell-Eucken 1 (ME1) (k <sup>1</sup> = continuous phase, k <sup>2</sup> = dispersed phase)	Maxwell-Eucken 2 (ME2) (K <sup>1</sup> = dispersed phase K <sup>2</sup> = continuous phase)
	
$k = \frac{k_1 v_1 + k_2 v_2}{v_1 + v_2} \frac{3k_1}{2k_1 + k_2}$	$k = \frac{k_2 v_2 + k_1 v_1}{v_2 + v_1} \frac{3k_2}{2k_2 + k_1}$

이 모델은 균질한 토양조건에서 열전도도를 산출하여 시스템의 열적 물성치를 유추하려는 연구목적에 부합하는 것으로 사료된다. 따라서 두 가지 매질을 변수로 하여 혼합 토양의 구성비에 따른 열전도도를 열관류율 도출에 적용하고자 한다

### 2.2 시스템 구성요소의 열전도도

다중 혼합물인 토양과 달리 다른 건축물녹화시스템의 구성요소는 단일재로 이루어져 상대적으로 상변화에 따른 일정한 열전도도를 도출할 수 있다. 열전도도를 도출하는 실험방법 및 표준 물성치는 국제표준화기구(ISO<sup>3)</sup>), 건물서비스 엔지니어링 공인평가기관(CIBSE<sup>4)</sup>)등에서 제공한다. ISO는 제품과 서비스간의 국제적 교환을 용이하게 하고 국가 간 협력증진을 위해 설립된 기구로서 국제적 표준을 제시하고 있다. 또한 CIBSE도 건축 엔지니어링에 관련된 각종 규격을 표준화 하는 영국의 공신력 있는 기관으로 CIBSE Guide Series를 통해 다양한 건축표준규격을 제시한다. 여기서 건축자재에 대한 열적 물성치의 국제적 표준은 ISO6946, ISO10456, CIBSE Guide A: Environmental Design 2006 등에서 포괄적으로 정리되고 있다. 반면 현재 국내는 KS에서 건축자재의 열적 물성치에 대한 표준 실험방법은 제시하고 있으나 재료별 표준값은 별도로 제공하지 않고 있다.

### 2.3 시스템의 열관류율과 열저항

열관류율은 건축열환경 관점에서 건물구조체의 성능평가 지표로 활용되며 각 건물구성요소가 가지는 열전도도의 단위면적당 발생하는 열전달현상에 기인한다. 국제적으로

2) G. Buonanno, A. Carotenuto. The effective thermal conductivity of packed beds of spheres for a finite area Numer. Heat Transfer  
3) ISO: International Organization for Standardization  
4) CIBSE: Chartered Institution of Building Services Engineers

ISO6946은 건물의 열관류율과 열저항을 측정하는 산식을 제공하고 있으며 이는 소재의 열전도도를 기반으로 열저항 설계에 활용된다. 또한 중공층을 포함한 균질, 비균질 건축 외피시스템에 대한 총체적인 연산이 가능하도록 다양한 계산모듈을 제공하고 있다. 여기서 균질한 건축외피에 대한 열관류율과 열저항에 대한 사항은 다음과 같다

**2.3.1 균질한 외피의 열저항**

건축자재의 열적 물성치는 소재의 두께, 열전도도, 열저항으로 정의될 수 있으며 다음 산식으로 상호관계가 설명된다.

$$R = \frac{d}{\lambda} \dots\dots\dots ①$$

여기서 R(m<sup>2</sup>K/W)은 구성층에 적용된 소재의 열저항, d(m)는 소재의 두께를 의미하며, λ(W/mK)는 ISO10456에서 제공하는 연산결과 또는 평균치에 의거한 소재의 열전도도를 나타낸다.

**2.3.2 균질한 외피의 총 열저항**

균질한 건물외피시스템의 구성층에 대한 총 열저항은 두께가 고려된 소재의 열저항을 합산하여 산정할 수 있다. 총 열저항 RT는 열류의 흐름에 따른 방향성에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots\dots R_n + R_{se} \dots\dots\dots ②$$

여기서 R<sub>si</sub>는 건물내피저항을 의미하고, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>... R<sub>n</sub>은 각 구성층 소재의 열 저항, 그리고 R<sub>se</sub>은 외피저항을 나타낸다.

**2.3.3 열관류율과 열 저항**

열관류율은 열관류저항의 역산으로 유추할 수 있으며 고온측 고체표면에서 시작하여 고체 내부, 저온측 고체표면으로 진행되는 열 이동 과정상 발생하는 관류열량의 계수를 의미한다. 기호는 K 또는 U가 사용되고, 단위는 W/m<sup>2</sup>K 또는 kcal/m<sup>2</sup>h°C이 사용된다. 열관류율은 열관류시험을 통해 이루어지며 주로 건물 열에너지 손실성능을 판단하기 위해 건축 개구부 및 구조체의 단열성능을 측정하는 것으로 외기환경노출에 따른 내후성시험도 병행할 수 있다. 열관류율과 총 열저항 간의 상호관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U = \frac{1}{R_T} \dots\dots\dots ③$$

이렇게 유추된 열관류율은 외피를 기준으로 산출면적 A(m<sup>2</sup>), 열전달량 Φ(W), 외피로 분리된 공간의 온도차 ΔT의 상관관계가 형성되며 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\Phi = A \times U \times \Delta T \dots\dots\dots ④$$

**3. 연구방법 및 대상**

**3.1 연구방법**

본 연구는 관리 조방형 건축물녹화시스템의 주 사용자인 건축가의 설계개념을 이해하고 물리적 평가지표에 대응할 수 있는 녹화시스템방향을 제시하는데 있다. 이를 위해 동시대 건축경향을 하이테크, 국제주의적 유기건축으로 정의하고 이를 대변할 수 있는 주요건축가를 선정하였다. 여기서 선정된 건축가들이 적용한 시스템 중에서 의미있는 육성층 변수가 확보되는 모델을 도출하여 열관류율 분석을 통해 정량적 평가를 진행하고자 한다. 여기서 주요건축가는 객관성을 확보하기 위해 건축계에서 가장 공신력있는 프리츠커 건축상(Pritzker Architecture Prize) 수상자에 한하여 선정하였다. 시스템의 열적 물성치는 토양 열전도도의 경우 ME 모델을 통해 도출하였으며, 각 시스템 소재에 대한 열전도도는 ISO 10456, CIBSE Guide A의 평균치를 적용하였다. 그리고 열관류율 산정은 국제기술기준인 ISO6946에서 제공하는 산식에 준하여 산출하였다.

**3.2 연구대상**

본 연구의 대상으로 프리츠커상 역대수상자 중에서 건축물녹화시스템의 적용설계 및 시공을 성공적으로 수행한 램 콜하스(Rem Koolhaas), 피터 Zumthor, 장 누벨(Jean Nouvel), 헤르조그 앤 뉘메론(Herzog & de Meuron), 렌조 피아노(Renzo Piano), 자하 하디드(Zaha Hadid)등 6인의 건축가를 선정하였다. 이들은 공통적으로 식물소재의 건축적 통합을 위해 녹화시스템의 건축 외피화를 추구하였으며, 이를 위해 경량화, 관리 조방화 등을 주요시스템 적용개념으로 설정하고 있다. 적용유형은 수평면, 수직면, 자유곡면형으로 구분할 수 있으며 상세한 내용은 다음과 같다

**3.2.1 수평면 녹화시스템**

**(1) 에두카토리움 (Educatorium, Utrecht, Netherlands):**

**램 콜하스**

네덜란드의 위트레흐트 대학 내의 학생센터인 에두카토리움을 설계한 램 콜하스는 건축은 물론 라빌레뜨(La Villette), 다운스뷰(Downsview)등을 통해 조경설계에도 큰 영향을 미치고 있는 건축가이다. 그는 2000년 프리츠커상을 수상하며 자신의 설계역량을 공인받았으며 국내에는 서울대 미술관, 리움박물관, 프라다 트랜스포머 등을 통해 대중에게 널리 알려져 있다.



Figure1. Side and green roof view of Educatorium<sup>5)</sup>

에두카토리움은 Education과 Torium의 합성어로 교육장이라는 의미를 지니고 있다. 여기서 콜하스는 바닥, 벽, 천정을 일체화한 연속적 슬래브를 하나의 판으로 해석하여 대지와 건물의 유연한 통합을 통해 주름건축의 개념을 정립하기에 이른다. 이러한 주변자연경관과 건물간의 통합효과를 극대화하기 위해 최상층에 조방형 세덤녹화를 도입하고 있다. 건물에 사용된 저관리 옥상녹화시스템은 유럽의 주요 인공지반녹화시스템 업체인 Zinco사의 제품을 사용하였다. 옥상층, 배수관, 방수 방근층으로 구성된 전형적인 녹화시스템으로 상세 단면은 다음 표2와 같다.

Table2. The details of ZinCo system

Cross Section <sup>6)</sup>	Layer
	1. Sedum
	2. Alumasc ZinCo sedum carpet substrate
	3. Filter Sheet SF
	4. Floradrain® FD 25-E drainage layer
	5. Alumasc Roofmate TF/A insulation
	6. Hydroguard 40 root barrier
	7. Hydrotech MM 6125 waterproofing
	8. Roof construction

(2) 발스온천 (Therme Vals, Vals, Switzerland) : 피터 줌터

발스온천 설계자인 피터 줌터는 1943년 스위스 바젤 출신으로 2009년 프리츠커상을 수상했으며 자연과 어우러지는 감성적인 작업을 하는 작가적 건축가 성향을 보인다.



Figure2. Top and green roof view of Therme Vals<sup>7)</sup>

1996년 완공된 발스온천은 인구 100명 미만의 작은 마을을 온천개발을 통해 경제적 활력을 도모하게 되었다. 줌터는 그의 설계에서 해당 지역의 지방색채를 이입하기 위해 지역 천연자원인 편마암을 건축자재로 활용한 적층공법으로 건축내외피를 마감하였다. 길이 1미터의 판석 6만여 장에서 나오는 다양한 실루엣은 주변 발스의 목가적 풍경과 조화를 이루게 된다. 이를 극대화하기 위해 건물옥상부에 저관리형 녹화시스템을 적용하여 주변경관의 연속성과 동식물상의 자연스러운 유입을 가능하게 하였다.

3.2.2 수직면 녹화시스템

(1) 케브랑리 박물관(Musee du Quai Branly, Paris, France)

: 장 누벨

파리의 원시문화박물관인 케브랑리를 설계한 장 누벨은 1945년 프랑스 출생으로 동시대 건축가 중에서 건축의 철학적 접근방법을 적극적으로 도입하고 있는 작가이다. 특히 장 보드리야르(Jean Baudrillard)와의 지속적인 담론을 통해 자신의 건축세계를 넓혀갔으며, 국내에는 리움 박물관 2판으로 소개되었고 2008년 프리츠커상을 수상하였다. 특유의 철학적 사색이 내재된 하이테크적 건축을 통해 도시와 인간의 잠재된 감성을 연계하는 작품성향을 보이고 있다. 그리고 세계적인 원예가 페트릭 블랑(Patrick Blanc)과 케브랑리, 까르띠에 본사 등의 협업을 통해 적극적으로 건축물녹화를 설계에 반영하였다.



Figure3. Side and green wall view of Musee du Quai Branly<sup>8)</sup>

케브랑리 박물관은 1995년부터 자크 시락(Jacques Chirac) 전 대통령에 의해 추진된 프로젝트로 '다양한 문화간의 교류'를 표방하는 원시문화박물관이다. 누벨과 함께 작업한 질 끌레몽(Gilles Clement)의 원시림을 재현한 조경공간은 원시박물관의 정체성을 구축하였다. 이를 건물로 확장하려는 의도에서 블랑의 무르 베제탈(mur végétal)시스템이 적용되는데 여기에는 중국, 일본, 미주 및 유럽에서 도입된 150여종 15,000여주의 식물이 약 800평방미터의 입면에 식재되었다. 시스템의 세부 상세는 다음 표3과 같다.

Table3. the details of "mur végétal"

Cross Section <sup>9)</sup>	Layer
	1. Reinforced polyamide Felt
	2. Polypropylene 30mm irrigation tube
	3. Reinforced polyamide Felt
	4. Polypropylene Geo-Textile
	5. PVC panel
	6. Steel structure
	7. Waterproof Layer
	8. Concrete

여기서 시스템은 10mm의 PVC 패널에 2중 폴리아미드 부직포를 부착하여 경량형 육성기반역할을 제공하고 300mm

5) <http://www.archdaily.com>

6) Almasc\_zinco Brochure

7) <http://www.greenroofs.com>

8) <http://www.greenroofs.com>

9) Valeria Tatano VERDE naturallizzare in verticale, Miggioli Editore, p.183, 2008



간격으로 관수파이프를 삽입하여 배양액을 공급하는 구조로 이루어진다. 일련의 수직수경재배(vertical hydro ponic)시스템으로 2중 폴리amide 부직포는 약 3 mm의 두께에도 식물을 정착시킬 수 있어 기존 육성층의 중량부하를 원천적으로 저감할 수 있다. 습윤상태의 평균 중량은 약 3kg/m<sup>2</sup>로 현저한 경량형 시스템으로 동절기에 상대적으로 온화한 유럽의 지중해성 기후에 이상적인 건축물 입면녹화를 제공하게 된다.

**(2) 까이사 포룸(Caixa Forum, Madrid, Spain): 헤르조그 앤 뒤 메론**

작품마다 항상 새로운 물성에 대한 고찰을 통해 독자적인 건축세계를 구축해 가는 헤르조그 앤 뒤 메론은 스위스 바젤 출신의 건축가로 2001년 프리즈커상을 수상하였다. 마드리드 시내에 위치한 까이사 포룸을 통해 역사, 문화, 자연을 통합하는 기존 건물에 대한 외과의적 접근방법을 보여주고 있다.



Figure4. Side and green wall view of Caixa Forum<sup>10)</sup>

까이사 포룸은 도심 복합문화센터로써 기존 중앙전력소(Central del Mediodía)의 용도변경을 통한 도심재생프로젝트이다. 이는 시립식물원, 프라도(Prado), 레이나소피아(Reina Sofia), 티센-보르네미스자(Thyssen-Bornemisza)박물관이 형성하는 마드리드의 문화 삼각지에 새로운 중심축으로 작동하게 된다. 또한 그들은 시내에 위치한 역사적 정체성이 내재된 중앙전력소의 기존물성을 유지하고 생태적 기능성 관점에서 새롭게 개편되는 도심 녹지네트워크를 완성하기 위해 건축물녹화를 적용하였다. 여기에 적용된 입면녹화시스템은 케 브랑리와 동일한 무르 베제말을 적용하는데 24미터의 건축입면에 250여종 15,000여 주로 새로운 생태네트워크를 제공한다.

**3.2.3 자유곡면 녹화시스템**

**(1) 캘리포니아 과학대학(California Academy of Sciences, San Francisco, USA): 렌조 피아노**

1998년 프리즈커상을 수상한 렌조 피아노는 리차드 로저스와 함께 폰피두센터를 설계함으로써 하이테크 건축의 태동을 알린 건축가이다. 그의 설계개념은 진보된 과학기술에서 도출되지만 자연과 인간이 공생할 수 있는 지속 가능한 건축을 지향하고 있다. 이러한 관점에서 1853년에 설립된 캘리포니아 과학대학의 자연사 박물관 재건축 프로젝

트는 그의 건축철학을 잘 투영하고 있다. 18,300m<sup>2</sup>에 이르는 지붕면적의 녹화를 위해 Rana Creek Living Architecture, SWA 등 조경업체를 중심으로 실제경사도를 반영한 mock-up에 30여종의 자생수종을 3년여 동안 모니터링이 진행되었다. 이를 통해 연구진은 시비, 관수가 제외된 생육실험에 대응하고 곤충유입에 적합한 9종을 선발하여 양호한 생육과 지역 자생종 보호효과를 도출하였다. 이러한 지역성을 반영한 녹화시스템은 자연사 박물관이 LEED 플래티넘 등급을 획득하는데 기여하게 된다. 급경사에도 안전성이 확보되는 자유곡면형 녹화시스템의 세부 상세는 다음 표4와 같다.



Figure5. Top and green roof view of California Academy of Science<sup>11)</sup>

Table4. the details of SWA system

Cross Section <sup>12)</sup>	Layer
	1. Coconut fiber tray
	2. Engineered Soil 3.5 Fabric filter
	4. Drainage board
	6. Insulation
	7. Protection board and waterproof membrane
	8. Concrete
	9. Stainless steel gabion basket
	10. Irrigation system

여기서 산업 폐기용 야자섬유로 제작된 바이오 트레이(Bio Tray<sup>®</sup>)는 기반토양에 생분해되는 시점까지 효율적으로 묘목과 토양을 결속시켜주며 약 50,000여개가 사용되었다. 재활용 재질로 제작된 배수관은 식물필터를 통해 우수를 저류하고, 저류된 물은 기상청의 자동제어에 반응하는 자동관수시스템의 관계용수로 사용된다. 이러한 생태적 녹화외피는 하절기 실내기온을 10℃ 감소시켜 냉방부하를 저감하고 45dB의 소음조절효과를 가져온다.

**(2) 동대문 디자인 플라자(Dongdaemun Design Plaza, Seoul, Korea): 자하 하디드**

2004년 프리즈커의 첫 여성 수상자가 된 자하 하디드는 이라크 바그다드 출생으로 수학전공 후 런던건축협회학교(AA School of Architecture)에서 콜하스에게 사사받았다. 그녀는 1980년대 포스트모더니즘의 흐름에서 1920년대 러

10) <http://www.needfulmachines.com>

11) <http://www.archdaily.com>

12) Infra Structure Landscape (Case Studies by SWA)

시아 구성주의의 분석을 통해 동시대 해체주의 정립에 기여한 현대 아방가르드 건축 이론가이기도 하다. 하디드는 2007년 동대문운동장재개발계획의 지명설계자로 초청되고 '환유의 풍경 Metonymic Landscape'으로 당선되어 현재 시공 중에 있다.

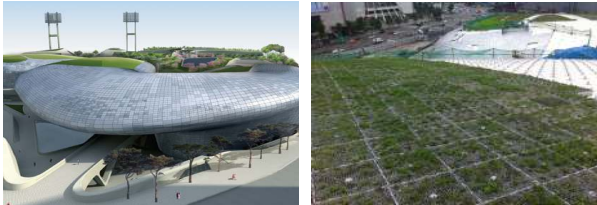


Figure6. Top<sup>13)</sup> and green roof view of DDP

여기서 그녀는 바다, 외피, 천정의 건축구성요소들을 융합하고 확장시켜 유체의 흐름과 같이 유연한 위상기하학적 건축을 구현하였다. 이는 컴퓨터응용설계기술을 바탕으로 구조와 시공간의 조화를 통해 유기적 건축외피를 형성한다. 이러한 특유의 건축적 외형에 건축물녹화시스템을 도입함으로써 자칫 경직될 수 있는 차가운 유기외피에 생태적 접목을 시도하게 된다. 시스템으로는 (주)한국도시녹화의 POP unit이 적용되었으며 자세한 세부상세는 표5와 같다.

Table5. the details of Unit Box<sup>14)</sup>

Cross Section	Layer
	1. Net
	2. Net hook
	3. Irrigation Hole
	4. Partition rib
	5. Cone hole
	6. Air vent/Overflow
	7. Irrigation pipe support
	8. Waterway
	9. Water storage

POP unit은 두께 8cm, 설계하중 72kg/m<sup>2</sup>의 초경량 저

관리 모듈형 시스템으로 바람에 대비한 비산방지망 일체형 구조로 이루어져 있다. 그리고 특수 접착테이프와 콘 시스템을 통해 3000~5000N/m<sup>2</sup>으로 우수한 내풍압성능을 보여 자유곡면형 외피에 능동적으로 대응하게 된다. 또한 유닛 내에 배수, 배기, 통기기능을 일체화하여 간편한 시공이 가능하며 선재배를 통해 초기녹피율 70% 이상으로 높은 식물생육안정성을 보이는 장점을 가지고 있다.

### 3. 분석모델 설정

#### 3.1 모델선정

본 연구에서는 상기 건축가의 건축물녹화 적용사례 중에서 기술적으로 안정화된 평면과 수직수경재배시스템으로 해석되는 수직면을 제외하고 육성층 변수가 확보되는 자유곡면 녹화시스템을 중점적으로 분석하고자 한다. 또한 이는 기능성, 심미성의 상이한 설계접근방법을 보이는 하이테크, 국제주의적 유기건축경향의 대표작으로써 동시대 건축경향을 대표한다는 해석이 가능하다.

따라서 피아노의 캘리포니아 과학대학을 타입 A, 하디드의 DDP를 타입 B로 선정하여 상호 비교하였다. 여기서 기술적으로 가장 진보한 이 유형들을 ISO6946에서 제시하는 열관류율 계산방식을 통해 열적 물성치 측면의 객관적인 기능성 평가를 진행하였다

#### 3.2 시스템 조건설정

시스템의 열관류율 산출을 위해 동일한 인공토양 육성층을 변수로 하여 배합비에 따른 열관류율 변화를 산출하였다. 인공토양조합은 최근 건축물 녹화에 사용빈도가 높아지고 있는 재활용재인 바텀애쉬(Bottom Ash)와 펄라이트(Perlite)의 조합을 8:2, 6:4, 4:6, 2:8로 나누어 ME1, ME2 모델을 적용하여 혼합인공토양의 열전도도를 유추하였다. 이때 혼합토양을 연속, 분산상의 균질한 매질이라는 가정 하에 두 토양외의 물, 공기 등 다른 물리적 조건을 배제하였다.

Table6. Cross Section of selected green roof system: Type A - California Academy of Science<sup>15)</sup>, Renzo Piano

cross section	Layer	Material	Thickness (mm)	Conductivity (W/m·K)	Specific Heat (J/kg·K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal Resistance(m <sup>2</sup> ·K)	Source
	1	Artificial Soil	50.8	table8			-	ME 1, 2
	2	Coco coir tray	25.4	0.06	1090	520	-	CIBSE
	3	Artificial Soil	76.2	table8			-	ME 1, 2
	4	Fabric layer	1	0.5	1000	1700	-	CIBSE
	5	Air gap >=25mm	38.1	-	-	-	0.18	ISO6946
	6	Fabric layer	1	0.5	1000	1700	-	CIBSE
	7	PIR Bord	101.6	0.02	920	32	-	CIBSE
	8	Root barrier	1	0.5	1000	1700	-	CIBSE
	9	Asphalt waterproofing	1.5	1.15	840	2330	-	CIBSE
	10	Aerated concrete slab	152.4	0.16	840	500	-	CIBSE

13) <http://www.seouldesign.or.kr>

14) (주)한국도시녹화

15) California Academy of Science : SWA

Table7. Cross Section of selected green roof system - Type B : Dongdaemun Design Plaza<sup>16)</sup>, Zaha Hadid

Cross section	Layer	Material	Thickness(mm)	Conductivity (W/m·K)	Specific Heat (J/kg·K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Source
	1	Artificial Soil	80	table8			ME 1, 2
	2	HDPE	3	0.5	1800	980	ISO10456
	3	TPO Roofing Sheet	1.5	0.06	1000	1090	CIBSE
	4	Rubber Sheet	1	0.17	1470	1500	CIBSE
	5	OSB Board	11.1	0.13	7700	650	ISO10456
	6	PIR Board	64	0.02	920	32	CIBSE
	7	Acoustic Sheet(PVC)	3	0.04	750	100	CIBSE
	8	PIR Board	64	0.02	920	32	CIBSE

본 연구의 목적은 녹화시스템을 개발하는데 있어 국제 기술기준에 의거한 열전도도, 열관류율 등의 열적 물성치에 대한 설정을 통해 정량적 시스템 평가방안을 제안하는데 있다. 따라서 시스템 구성요소의 열전도도를 ISO6946, ISO10456, CIBSE Guide A 등의 표준치를 적용하여 열관류율을 도출하고자 한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 시스템 구성층 열전도도 도출

ISO, CIBSE 등을 통해 재료의 열전도도를 적용한 피아노의 타입 A는 콘크리트 구조로 식생층을 제외한 시스템이 6개 층으로 총 192.5mm, 구조체를 포함할 경우는 10개 층, 총 449mm로 이루어져 있다. 자세한 사항은 표6과 같다. 구성층의 열전도도 산출 과정에서 시스템의 완전 건조 상태를 열관류율 조건으로 설정한 관계로 배수층을 공기층으로 해석하였다. 여기서 시스템에서 차지하는 토양비율은 79%이고, 단열재 및 구조체를 포함한 경우 토양이 차지하는 비율은 34%로 나타났다. 반면 전체 시스템에서 단열재가 차지하는 비율은 23%였다.

하디드의 타입 B는 철골구조로 식생층을 제외한 시스템이 4개 층으로 총 85.5mm, 구조체를 포함할 때는 8개 층, 총 224.6mm를 기록했다.

자세한 사항은 표 7과 같다. 여기서 콘과 모듈사이의 공간은 열전도도 산출과정에서 제외되었다. 따라서 토양이 시스템에서 차지하는 비율이 94%에 이르렀고, 구조체를 포함할 경우는 36%로 기록되었다. 단열재가 전체 시스템에서 차지하는 비율은 58%에 이르러 건물 구조적 특징을 잘 반영하고 있다.

4.2 토양조건별 열전도도 산출

육성기반재에 사용되는 혼합인공토양의 열전도도를 산출하기 위해 준이론 모델인 ME 모델을 적용했다. ME 모델은 매질분포가 연속 또는 분산되는 균질한 구조라는 논리적 가설과 함께 배합비에 따라 ME1, ME2 모델로 구분된다.

여기에서 혼합인공토양에 사용된 바텀애쉬의 열전도도를 k1, 체적을 v1으로 설정하였고, 펄라이트의 열전도도를 k2, 체적을 v2로 하여 혼합인공토양의 열전도도 k를 유추하였다. 여기서 제시된 바텀애쉬와 펄라이트의 단위 열전도도는 KS L 9016에서 제공하는 평관열류계법을 통해 산출된 값이다. 결과는 다음 표8과 같다.

Table8. Thermal Conductivity of Composite Artificial Soil

Semi-Theoretical Model	ME1		ME2	
Conductivity(W/m·K) k	0.106	0.096	0.086	0.078
Conductivity(W/m·K) k1: Bottom Ash	0.116			
Volume(m <sup>3</sup> ) v1	0.8	0.6	0.4	0.2
Conductivity(W/m·K) k2: Perlite	0.07			
Volume (m <sup>3</sup> ) v2	0.2	0.4	0.6	0.8

4.3. 유형별 열관류율 도출

본 연구에서 바텀애쉬와 펄라이트의 혼합인공토양 성분비에 따른 타입A와 타입B의 열관류율은 시스템만을 산정한 경우와 단열재 및 구조체를 포함한 경우로 구분하여 산출하였다.

우선 피아노의 타입 A는 단열재 및 구조체를 고려한 시스템의 열관류율은 0.119~0.125 W/m<sup>2</sup>·K의 분포를 보여 펄라이트 배합비 증가에 따라 약 5% 미만의 개선효과를

Table9. System Thermal Transmittance of Type A and Type B: depend on Soil Composit (Soil Composit Rate = Bottom Ash : Pearlite)

Thermal parameter		Type A				Type B			
		80:20	60:40	40:60	20:80	80:20	60:40	40:60	20:80
System included insulation (ISO6946)	R-Value (m <sup>2</sup> ·K/W)	7.981	8.106	8.260	8.411	7.492	7.571	7.668	7.763
	U-Value (W/m <sup>2</sup> ·K)	0.125	0.123	0.121	0.119	0.133	0.132	0.130	0.129
System excluded insulation (ISO6946)	R-Value (m <sup>2</sup> ·K/W)	1.945	2.070	2.224	2.376	0.932	1.010	1.107	1.203
	U-Value (W/m <sup>2</sup> ·K)	0.514	0.483	0.450	0.421	1.073	0.990	0.903	0.832

16) DDP : ISS consortium



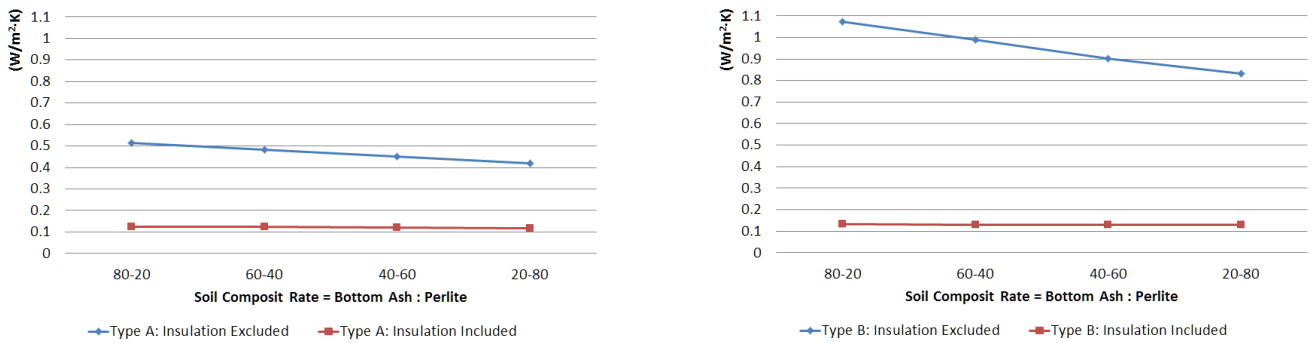


Figure7. System Thermal Transmittance of Type A and Type B: depend on Soil Composit Rate

가져올 수 있었다. 반면 녹화시스템만을 고려했을 경우 0.421 ~ 0.514 W/m<sup>2</sup>·K의 변화를 보여 바텀애쉬 비율이 20:80으로 감소할 경우 0.093 W/m<sup>2</sup>·K이 저감되어 약 18%의 개선효과를 거두었다.

하디드의 타입 B는 단열재 및 구조체가 적용된 시스템의 열관류율이 0.129 ~ 0.133 W/m<sup>2</sup>·K의 분포를 보이고 있으며 펄라이트 배합비가 증가함에 따라 약 3% 미만의 총 열관류율 개선효과가 도출되었다. 반면 녹화모듈과 방수층만을 고려했을 경우 0.832 ~ 1.073 W/m<sup>2</sup>·K의 변화를 보였으며 바텀애쉬 배합비율이 20으로 저감되었을 때 0.241 W/m<sup>2</sup>·K의 상대적으로 높은 감소를 기록하여 약 22%의 개선효과를 기록하였다.

## V. 결론

본 연구는 국내에도 점차 확산되고 있는 관리조방형 건축물통합 녹화시스템을 현대건축경향 측면에서 이해하고 이를 통해 시스템 개발자가 식물, 육성층 등의 소재제공 외에 보다 능동적 측면에서 동시대 건축가의 설계의도를 수렴하는 건축물 녹화시스템을 제안할 수 있는 정보제공의 기초연구성격을 가지고 있다. 연구결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 동시대 건축경향의 경향을 대표하는 프리즈커 수상 건축가의 사례에서 보여지는 바와 같이 기능성을 대변하는 하이테크, 심미성을 추구하는 국제주의적 유기건축에서도 공통적으로 각자의 설계개념을 구체화하는 효율적인 도구로 건축물녹화가 활용되고 있다.
- 2) 자유곡면 건축물녹화 분석모델로 선정된 피아노와 하디드의 모델은 서로 유사한 관리 조방형 성격을 가지고 있음에도 불구하고 캘리포니아 과학대학의 경우 최소 토심을 15cm 유지한 반면 DDP는 이에 절반인 약 8cm 미만의 토심을 보이고 있다. 이는 건축 구조적 차이에서 기인한 것으로 파악할 수 있으나 기능주의적 하이테크 건축을 추구하는 피아노의 녹화시스템은 토착수종, 종다양성 등 보다 부가적인 생태적 기능성을 제고한다는 점에서 주로 심미적 측면을 부각시키는 하디드의 유기건축과는 상이한 접근방법을 보이

고 있다.

- 3) 열적 물성치 측면에서도 준이론모델인 ME1, ME2 모델을 적용하여 혼합인공토양의 열전도도를 산출하여 해당시스템에 대한 열관류율을 배합비에 따라 산출하였다. 상대적으로 충분한 토심을 확보하고 있는 피아노의 타입A가 펄라이트 혼합비 증가로 5%의 총 열관류율 개선효과를 보인 반면 하디드의 타입B는 동일한 조건에서 3%의 개선효과를 기록하였다.
- 4) 선정된 타입 A, B의 건축외피는 중부지역을 기준으로 한 국내 단열기준<sup>1)</sup>을 모두 만족하고 있으며 기준치를 상회하는 열적 물성치가 도출되었다. 녹화시스템부문의 국내 단열기준<sup>17)</sup>에 대한 전체 열관류율 분담율을 살펴보면 타입 A는 기준의 48% 수준이고 타입 B는 24% 수준으로 유추되었다. 반면 펄라이트 혼합비 증가로 인한 열관류율 개선율은 타입 B의 경우 22%로 타입 A의 18%를 상회하였다.

본 연구는 그 동안 기능과 소재에 제한되었던 기존 연구를 보완하여 건축물 통합형 녹화를 건축사조적 해석으로 기능적, 심미적 건축유형으로 구분하고 적용되는 녹화시스템의 특징을 열적 물성치 중심으로 해석하였다. 이는 시스템 사용자와 개발자간의 상호간의 이해를 도모함으로써 보다 융합적 관점에서 건축물녹화시스템 개발을 유도할 수 있는 기초연구로 활용될 것으로 사료된다. 연구의 한계는 시스템의 열적 물성치를 도출하는 과정에서 변수로 적용한 인공토양혼합비에 따른 열전도도 산출과 관련된 경험모델, 수치모델이 보고된 바가 없는 관계로 정확도가 다소 미흡한 준이론모델을 적용하였다. 이로 인하여 현실적인 결과 산출에 한계를 가지고 있으며 이는 후속연구를 통해 보완되어야 할 것이다.

## 후기

본 연구는 상명대학교 교내연구과제지원으로 수행된 결과임.

17) 최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕 - 외기에 직접 면하는 경우: 0.20W/m<sup>2</sup>·K, 지역별 건축물부위의 열관류율표, 국토해양부령 제458호, 제21조 제1항 제1호 관련.

## 인용문헌

1. 박창화, 오상근, 임남기 (2011). 인공지반 녹화용 방수방근 복합 공법의 시공환경을 고려한 성능평가 시스템 연구. 한국건축시공학회 논문집 v.11 n.2
2. 신경선(2012) 조경화건축의 최신경향에 관한 연구. 서울과학기술대학교 주택대학원 주택기획디자인학과 석사학위논문.
3. 이재우(2011) 옥상녹화의 이용 및 관리에 대한 시민인식도 연구 : 창원시를 중심으로. 경남과학기술대학교 석사학위논문
4. 임석재(2000) 물질문명과 고전의 역할. 서울:북하우스
5. 조성현 김철규(2010) 친환경 건축의 통합설계를 위한 건축 계획적 접근방법에 관한 연구. 한국 건축·인테리어 디지털 디자인학회 논문집 10(3) 79-86 1738-0790 KCI후보
6. 장희경, 조홍제, 여인애, 윤성한(2008) 옥상녹화시스템의 식재방식에 따른 단열효과의 정량적 분석. 대한설비공학회 2008 하계 학술발표대회논문집.
7. 정재용, 양정훈, 석호태(2008) 학교건물에서의 벽면 및 옥상녹화에 따른 에너지성능평가에 관한 연구. 대한건축학회지 Vol.2008 No.1
8. 한승원, 김형숙, 김상민, 이동우 (2010). 조경녹화용 잔디와 이끼류의 열성능평가. 한국건축친환경설비학회 Vol4 No4
9. A. Eucken, "Allgemeine gesetzmäßigkeiten für das wärmeleitvermögen verschiedener stoffarten and aggregatzustände," Forschung Gabiete Ingenieur, vol. 11, no. 1, pp. 6-20, 1940.
10. Abbate, jaye, Michael C. Thomsett(2009) 건축의 거인들, 초대 받다. 김주연 엮음; 김현정 옮김. 파주: 나비장책
11. CIBSE Guide A
12. G. Buonanno, A. Carotenuto. The effective thermal conductivity of packed beds of spheres for a finite area Numer. Heat Transfer, Part A: Applicat., 37 (4) (2000), pp. 343-357
13. ISO6946 Building components and building elements-Thermal resistance and thermal transmittance-Calculation method.
14. ISO10456 Building materials and products-Hygrothermal properties-Tabulated design values and procedures for determining declared and design
15. J. Maxwell, Treatise on Electricity and Magnetism, chapter 9, Dover, New York, NY, USA, 3rd edition, 1954.
16. Peltason, Ruth A. Ong-Yan, Grace. 건축가 : 프리츠커상 수상자들의 작품과 말. 황의방 옮김. 서울: 까치글방
17. R.P.A. Rocha, M.E. Cruz Computation of the effective conductivity of unidirectional fibrous composites with an interfacial thermal resistance Numer. Heat Transfer, Part A: Applicat., 39 (2) (2001), pp. 179-203
18. Valeria Tatano VERDE naturallizzare in verticale, Miggioli Editore, p.183, 2008

---

투고(접수)일자: 2012년 11월 26일

수정일자: (1차) 2013년 1월 25일

(2차) 2013년 2월 1일

게재 확정일자: 2013년 2월 3일