

# 건물 에너지 소비량에 영향을 미치는 옥상녹화시스템 설계변수 평가에 관한 사례 연구

## A Case Study on the Design Variables Evaluation of Green Roof System effecting on Building Energy Conservation

최정민\*†  
Choi Jeong-Min\*†

(Received 26 April 2015; accepted 9 June 2015)

**Abstract :** This study is to find out the major design variables of Green roof system effecting on the building energy consumption. Therefore, in three categories of green roof system, namely, foliage layer, soil layer and irrigation, 10 design variables are selected and simulated with one-story case building. Simulation is carried out with Design Builder and EnergyPlus. Finally, it was found out the effects of major variables affecting on the building heating and cooling energy and how they are affecting on the heating and cooling seasons respectively.

**Key Words :** 옥상녹화시스템(Green roof system), 식생층(Foliage layer), 토양층(Soli layer), 관개(Irrigation), 건물 에너지 소비량(Building energy consumption), 에너지플러스(Energyplus)

### 기 호 설 명

$LAI$  : 식생잎 면적 지수 ( $m^2/m^2$ )  
 $F_f$  : 식생층 순 열유속 ( $W/m^2$ )  
 $\sigma_f$  : 식생 피복율  
 $I_{SW}$  : 단파장 복사 ( $W/m^2$ )  
 $I_{LW}$  : 장파장 복사 ( $W/m^2$ )  
 $\alpha_f$  : 식생층 단파장 반사율

$\epsilon_f$  : 식생층 방사율  
 $\sigma$  : 스테판-볼츠만 상수  
 $T_f$  : 식생층 온도 (K)  
 $\epsilon_g$  : 토양층 표면 방사율  
 $T_g$  : 토양층 표면 온도 (K)  
 $H_f$  : 식생층 현열 열류 ( $W/m^2$ )  
 $L_f$  : 식생층 잠열 열류 ( $W/m^2$ )  
 $F_g$  : 토양층 표면 순열류 ( $W/m^2$ )

\*† 최정민(교신저자) : 창원대학교 건축학부  
E-mail : jmchoi@changwon.ac.kr, Tel : 055-213-3801

\*† Choi Jeong-Min(corresponding author) :  
School of Architecture, Changwon National University.  
E-mail : jmchoi@changwon.ac.kr, Tel : 055-213-3801

- $\alpha_g$  : 토양층 표면 단파장 반사율
- $H_g$  : 토양층 현열 열류 ( $W/m^2$ )
- $L_g$  : 토양층 잠열 열류 ( $W/m^2$ )
- $K$  : 토양층 표면열전도율 ( $W/m \cdot K$ )
- $Z$  : 높이 (m)
- $C_h^g$  : Bulk transfer coefficient
- $l_g$  : 토양층 온도의 증발잠열 (J/kg)
- $W_{af}$  : 식생층 캐노피의 풍속 (m/s)
- $\rho_{ag}$  : 지표면 온도의 공기밀도 ( $kg/m^3$ )
- $q_{af}$  : 식생층 캐노피의 공기 혼합비율
- $q_g$  : 토양층 온도에서의 혼합비율

### 1. 서 론

건물 외피 가운데 지붕은 해당지역의 기후에 가장 많이 노출되어 있는 건물 부위로, 건물 에너지 소비량에 밀접한 연관이 있으며, 도심 열섬현상의 주요 원인이 되기도 한다. 최근에 이를 해소하기 위한 대안으로 옥상 구조물 상부에 인위적인 토양층을 구성하고 식물을 식재하는 건물 옥상녹화시스템 설치 방안이 각광을 받고 있다. 이에 따라 국내에서도 옥상녹화시스템의 식생층 면적 지수(LAI)와 토양층 두께 위주로 건물 에너지 소비량에 미치는 연구<sup>3),4),5),6),7)</sup>가 이루어져 왔으나, 토양층 종류와 관개량(irrigation)등을 포함한 연구는 미진한 실정이다.

이에 본 연구에서는 옥상녹화시스템을 식생층과 토양층, 관개량의 3가지 분야로 구분하고, 이들 분야에서 건물 에너지 소비량에 미치는 설계변수들을 분류하여 각 설계변수들이 건물 에너지 소비량에 미치는 효과를 검토하고자 한다. 옥상녹화시스템의 건물 에너지 평가를 위해 시뮬레이션 프로그램인 Designbuilder와 EnergyPlus Ecoroof module을 사용하였다.

### 2. 예비적 고찰

#### 2.1 옥상녹화시스템의 열교환방정식<sup>1),2)</sup>

옥상녹화시스템의 에너지 평형 해석은 Frankenstein, S & G. Koenig(2004)에 의해 제안된 FASST(Fast All Season Soil Strength) 모델이 제안된 바 있다. 이중 저관리형 옥상녹화시스템에 적합한 저(底)식물 모델을 사용하여 Sailor(2008)가 Ecoroof module을 개발<sup>1)</sup>하여 이를 이용한 해석이 이루어지고 있다. 이 모델은 발생하는 잠열 및 현열 유속과 관련하여 다양한 매개변수를 포괄하고 옥상녹화시스템에서 식생층과 토양층으로 구분하여 에너지와 수분의 수지 계산이 다음과 같이 이루어지게 된다.

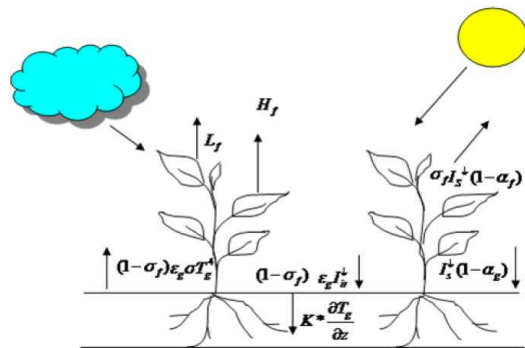


Fig. 1 Green Roof Module energy balance<sup>1),2)</sup>

#### 2.2 식생층의 에너지 수지

FASST내에서 식생층에서 발생하는 전열 및 에너지 계산은 다음 식 (1)로 계산된다.

$$F_f = \sigma_f [I_{SW}(1 - \alpha_f) + \epsilon_f I_{LW} - \epsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \epsilon_g \epsilon_f \sigma}{\epsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (1)$$

여기서, 식생 피복율은 (Fractional Vegetation Coverage)은 식 (2)로 계산한다.

$$\sigma_f = 0.9 - 0.7 \times \exp(-0.75 \times LAI) \quad (2)$$

### 2.3 토양층의 에너지 수치

토양층에서 발생하는 전열 및 에너지 계산은 식 (3)으로 계산된다.

$$F_g = (1 - \sigma_f) [I_{sw}(1 - \alpha_g) + \epsilon_g I_{LW} - \epsilon_g \sigma T_g^4] \quad (3)$$

$$- \frac{\sigma_f \epsilon_g \epsilon_f \sigma}{\epsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \frac{\partial T_g}{\partial Z}$$

$$(\epsilon_1 = \epsilon_g + \epsilon_f - \epsilon_f \epsilon_g)$$

### 2.4 관개량의 에너지 수치

관개량은 식생층과 토양층에서 잠열과 연관이 있으며, 이 가운데 토양층의 잠열 열류는 식 (4)로 계산된다.

$$L_g = (C_e^g l_g W_{af} \rho_{ag})(q_{af} - q_g) \quad (4)$$

## 3. 옥상녹화시스템의 설계 변수 및 평가 모델 선정

### 3.1 옥상녹화시스템의 개요

옥상녹화시스템은 그림 2와 같이 식생층과 토양층, 그리고 구조체층으로 구성된다. 토양

층은 일반적으로 경량 무기 혼합물(모래, 팽창 점토, 질석, 펄라이트, 자갈 등)이나 토양 유기물(퇴비 등)로 구성되며 사용되는 토양의 종류에 따라 표 1과 같은 열적 물성치를 나타낸다.

Table. 1 Examples of Eco-Roof soil Properties<sup>2)</sup>

Soil Type	Soil VM (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivity (W/m·K)	Heat Capacity (MJ/m <sup>3</sup> ·K)
PS75C10	0.49	678	0.122	0.861
PS50C10	0.48	1054	0.151	1.047
EC75C10	0.26	1150	0.17	1.012
ES75C10	0.22	1248	0.205	1.284
EC50C10	0.29	1293	0.188	1.232
ES50C10	0.27	1432	0.225	1.25

\* PS = porous silicate, EC = expanded clay, ES = expanded slate

옥상녹화시스템은 건축재료와 달리 식물 성장을 위해 수분 공급이 요구된다. 식생층은 증산작용과 복사열 흡수, LAI 지수로서 설명되며, 기공을 통해 액체로부터 수증기로 상변화하는 양을 조절하여 대기와의 잠열교환이 이루어지고 주변 식생 캐노피 냉각과 식생 캐노피 그림자로 토양층을 냉각시킨다. 일사 흡수율은 광합성 과정에서 필요한 장파장과 단파

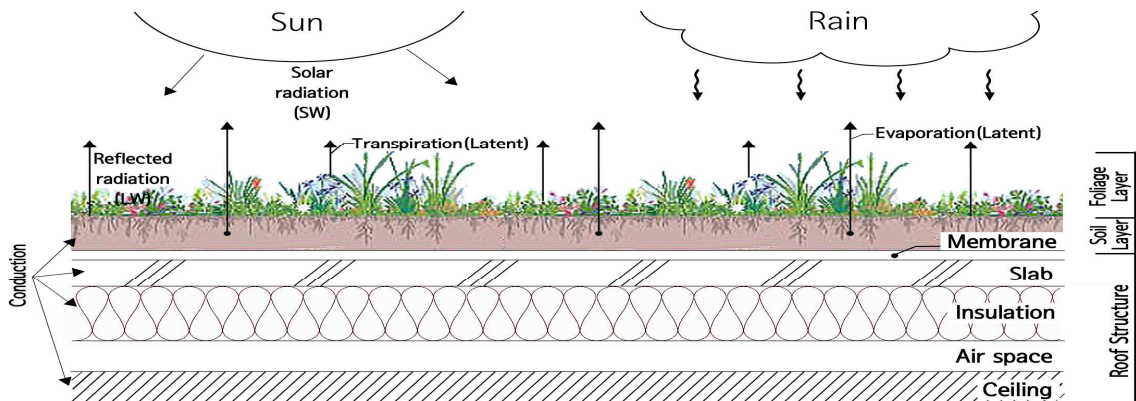


Fig. 2 Eco-roof energy balance with Roof structure

장 에너지의 비율을 정하며 일사를 흡수하게 된다. LAI는 식생캐노피에서 흡수되는 에너지의 비율을 결정하는 중요 요소로, 식물 종에 따라 변화하여 최대 침엽수는 8, 낙엽수는 6의 값을 가진다.<sup>2)</sup>

### 3.2 Ecoroof Module의 변수 항목

건물 에너지 해석 프로그램인 EnergyPlus에서는 옥상녹화시스템의 에너지 평형 해석을 위해 FASST(Fast All Season Soil Strength) 모델에 기반을 둔 Ecoroof module을 이용한 해석이 이루어지고 있다. EnergyPlus의 Ecoroof module 사용을 위해 요구되는 식생 및 토양층, 물을 주는 관개량의 주요 변수는 표 2과 같다.

Table. 2 Eco Roof Condition

Cate.	Variable	Input Value Range
Foliage Layer	Height of Plants(m)	0.1-0.3*-0.5
	Leaf area index(LAI)	0.01-2.5*-5.0
	Leaf reflectivity	0.1-0.25*-0.4
	Leaf emissivity	0.8-0.85*-0.9
	Minimum stomatal resistance(s/m)	50-150*-300
Soil Layer	Thickness(m)	0.1-0.3*-0.5
	Conductivity (W/m·K)	0.2-0.6*-1.0
	Specific Heat (J/kg·K)	501-1250*-2000
	Density(kg/m <sup>3</sup> )	300-1150*-2000
	Max volumetric moisture content at saturation(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.5
	Min residual volumetric moisture content(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.1
	Initial volumetric moisture content (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.2
Irrigation	Irrigation Rate (m/hr)	0-0.005*-smart**

\* reference condition

\*\* as scheduled but overrides the irrigation to be off when the earth is 30% or more saturated with water

### 3.3 평가 건물 및 지표의 선정

평가 건물은 남부지역에 위치한 단층 사무실 용도의 건물(건축면적 96.0m<sup>2</sup>, 높이 3.5m)로 그림 3, 표 3과 같은 옥상녹화시스템이 설치되지 않는 모델(이하, 비녹화모델, Base Model)과 옥상녹화시스템이 설치된 모델(이하 옥상녹화모델, EcoRoof Model)로 구분하여 작성하였다. 평가 지표는 냉난방 에너지 소비량(난방은 가스, 냉방은 전기)으로 하였다.

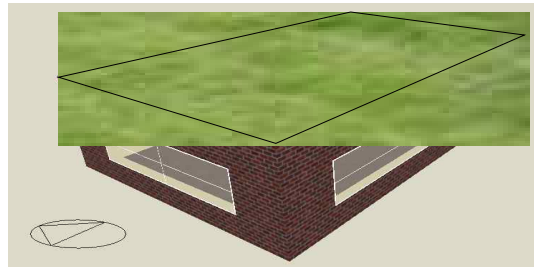


Fig. 3 Perspective of Building Model

Table. 3 Building Input Condition

Category	Variable	Input Value
K-Value (W/m <sup>2</sup> ·K)	Wall	0.324 (≤ 0.340)
	Window	2.099 < (≤ 2.4)
	Door	2.041 < (≤ 2.4)
	Floor	0.417 < (≤ 0.470)
	Roof	0.217 < (≤ 0.220)
System	Set Temp.	Heating 22℃, Cooling 24℃
	Working Day & Time	Mon~Fri, 8AM~7PM
	COP	Cooling 3.5 / Heating 0.8
	Evaluation Period	One year

## 4. 결과 분석

### 4.1 옥상녹화모델의 에너지소비량 특성

비녹화모델과 옥상녹화모델의 연간 난방 및 냉방 에너지 소비량은 표 4와 같이 난방에너지는 3.2% 증가하는 것으로 나타났으나, 냉방에너지

지는 4.6% 감소하는 것으로 나타났다. 난방에너지가 증가하는 것은, 옥상 토양층의 단열효과에도 불구하고 식생층 높이와 식생잎 면적 지수 등의 영향을 받아 난방기간중 지붕 일사열 유입이 방해를 받았기 때문인 것으로 사료된다.

Table. 4 Energy Simulation Results

Category	Energy Consumption (kWh)	
	Heating	Cooling
Base Model	2,071.58	2,443.13
EcoRoof Model (reference condition)	2,137.34	2329.90
Increase Ratio (%)	3.2%	-4.6%

#### 4.2 옥상녹화모델의 설계변수 민감도 특성

표 5는 옥상녹화모델에서 설정한 표 2의 설계변수 변화가 난방 및 냉방에너지 소비량에

미치는 영향 정도를 시뮬레이션 평가한 결과이며, 그림 4는 각 설계변수의 민감도를 분석한 것이다.

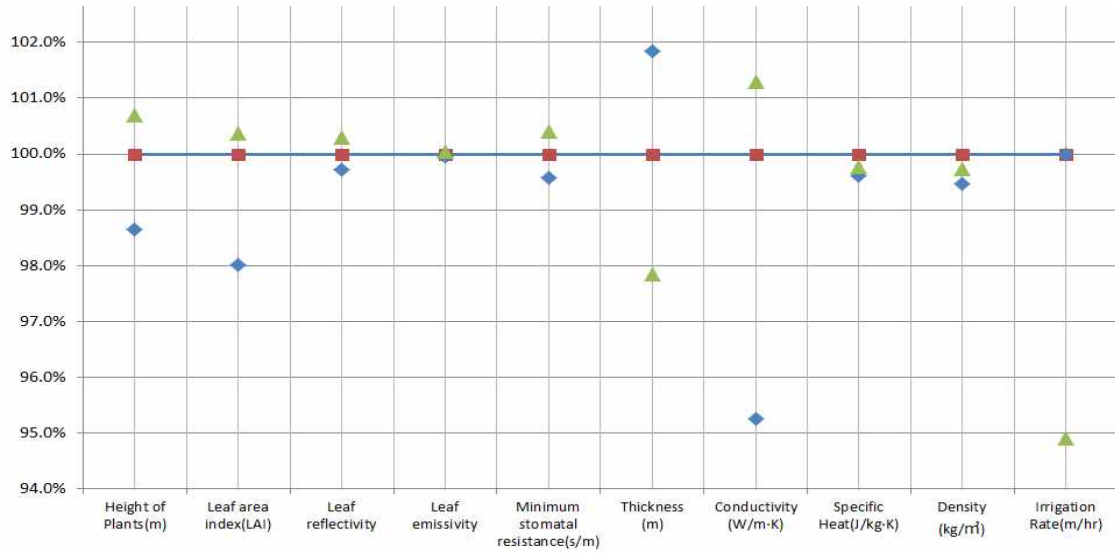
난방 및 냉방 에너지 소비량에 영향을 미치는 주요 변수로는 관개량, 토양 열전도율, 토양층 두께, 식생잎 면적 지수, 식생층 높이, 기공저항 등의 순서로 나타났다.

설계변수중 식생층과 관련된 설계변수는 난방과 냉방에너지 소비량에 서로 반대되는 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 식생층은 하계기간에는 에너지소비량 감소에 기여하지만, 동계기간에는 에너지소비량을 증가시키는 요인으로 기대된다.

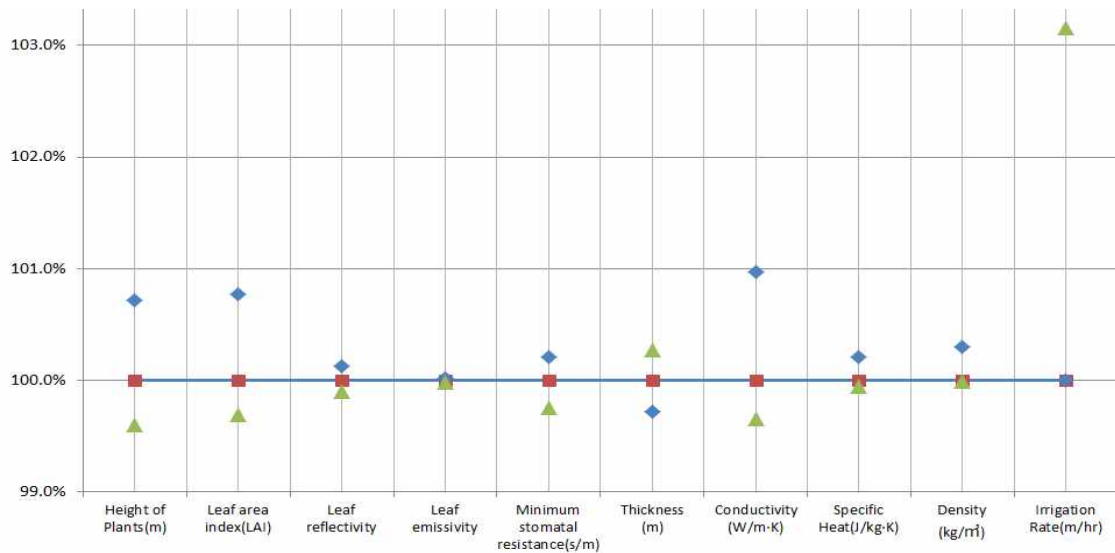
토양층과 관련한 설계변수중 토양층 두께와 열전도율 변수도 난방과 냉방에너지 소비량에 서로 반대되는 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table. 5 Energy Consumption of EcoRoof Model

Category	Variable		Energy Consumption (kWh)		Category	Variable		Energy Consumption (kWh)	
			Heating	Cooling				Heating	Cooling
Foliage Layer	Height of Plants(m)	0.1	2108.48 ↓	2346.53 ↑	Soil Layer	Thickness(m)	0.1	2176.56 ↑	2323.40 ↓
		0.3*	2137.34	2329.90			0.3*	2137.34	2329.90
		0.5	2152.08 ↑	2320.67 ↓			0.5	2091.48 ↓	2336.18 ↑
	Leaf area index(LAI)	0.01	2094.80 ↓	2347.94 ↑		Conductivity (W/m·K)	0.2	2035.88 ↓	2352.47 ↑
		2.5*	2137.34	2329.90			0.6*	2137.34	2329.90
		5.0	2145.31 ↑	2322.66 ↓			1.0	2164.88 ↑	2321.95 ↓
	Leaf reflectivity	0.1	2131.47 ↓	2332.81 ↑		Specific Heat(J/kg·K)	501	2128.91 ↓	2334.88 ↑
		0.25*	2137.34	2329.90			1250*	2137.34	2329.90
		0.4	2143.63 ↑	2327.52 ↓			2000	2132.36 ↓	2328.62 ↓
	Leaf emissivity	0.8	2136.23 ↓	2330.36 ↑	Density(kg/m³)	300	2125.90 ↓	2336.88 ↑	
		0.85*	2137.34	2329.90		1150*	2137.34	2329.90	
		0.9	2138.18 ↑	2329.56 ↓		2000	2131.75 ↓	2329.75 ↓	
	Minimum stomatal resistance(s/m)	50	2128.40 ↓	2334.74 ↑	Irrigation	Irrigation Rate(m/hr)	0.001	2137.17 ↓	2329.90
		150*	2137.34	2329.90			0.005*	2137.34	2329.90
		300	2146.08 ↑	2324.29 ↓			smart	2028.52 ↓	2403.46 ↑



(a) Heating energy



(b) Cooling energy

Fig. 4 Sensitivity Analysis of EcoRoof Model

토양층 두께의 경우 두께가 두꺼워짐에 따라 난방에너지는 감소하지만 냉방에너지는 증가하는 경향을 나타내고 있어, 하계 주간에 지붕 구조체에 축적된 열을 야간에 천공으로 방냉시키는 데 토양층이 장애요인으로 작용한 것으

로 추정된다. 토양층 열전도율 변수의 경우 열전도율값이 작아질수록 난방에너지는 감소하나, 냉방에너지는 증가하고, 반대로 열전도율값이 증가할수록 난방에너지는 증가하고 냉방에너지는 감소하는 현상이 나타나고 있다.

토양층의 열용량과 밀접한 관련이 있는 비열과 밀도 설계변수는 기준조건의 값이 감소 또는 증가됨에 상관없이 난방에너지는 감소하는 경향을 보여 적정 비열값과 밀도값이 있는 것으로 추정되며, 냉방에너지 소비량은 토양층 열용량이 커질수록 작아지는 것으로 나타났다.

물을 공급하는 관개량 변수는 물의 공급이 많아질수록 증산작용이 활발해져 난방에너지는 증가하고, 물의 공급이 작아질수록 냉방에너지는 증가하는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대상 평가건물의 경우, 비녹화모델과 옥상녹화모델의 연간 에너지 소비량은 난방에너지는 3.2% 증가하는 것으로 나타났으나, 냉방에너지는 4.6% 감소하는 것으로 나타났다. 여기서, 난방에너지가 증가하게 된 원인은, 옥상 토양층의 단열효과에도 불구하고 식생층 높이와 식생잎 면적 지수 등의 영향을 받아 지붕 일사열 유입이 방해를 받았기 때문인 것으로 추정된다. 동계에 식생잎 면적 지수를 기준 조건인 2.5에서 0.01로 낮추면 동계 난방에너지는 기준 조건 대비 2.0% 감소하게 되므로, 여름에는 식생잎 면적 지수가 높고 겨울에는 잎이 지는 수종을 선정하는 것이 유리하다.
- (2) 저관리형 옥상녹화시스템을 대상으로 식생층, 토양층, 관개량으로 구분한 10개 주요 변수를 설정하여 민감도를 분석하였다.(표 5 참조) 그 결과 난방 및 냉방 에너지 소비량에 영향을 미치는 주요 변수로는 관개량(4.13%), 토양층 열전도율(3.67%), 토양층 두께(2.26%), 식생잎 면적 지수(1.72%), 식생층 높이 변수(1.57%), 기공

저항(0.64%)의 순서<sup>1)</sup>로 나타났다.

- (3) 옥상녹화시스템 설계변수중 식생층과 토양층, 관개량의 대부분 변수가 냉방과 난방에너지 소비량에 서로 반대되는 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 따라서, 옥상녹화시스템 설계시 연간 냉난방 에너지 소비량을 절감시키기 위한 설계 변수의 적정 값 검토가 필수적이다.
- (4) 옥상녹화시스템 설치시, 냉난방에너지 소비량에 미치는 효과는 해당 지역과 건물 규모, 형태, 건물 사용조건 등에 따라 달라질 수 있으며, 특히 냉방에너지 소비량에 미치는 토양층 적정 두께에 대해서도 추후 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 후 기

“이 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음”

## Reference

1. Sailor. D. J, A green roof model for building energy simulation programs, Energy and Buildings 40, pp. 1466-1478, 2008.
2. Seth. S. M, Development of Dynamic Thermal Performance Metrics for Eco-roof Systems, Master of Science in Mechanical Engineering, Portland State University, 2012.
3. Jang. H. K, Cho. J. H, Yeo. I. A and Yoon. S. H, Quantitative Analysis on the Insulating Effect by the Green Roof Planting system, Summer Conference of SAREK, pp. 873-876, 2008.
4. Yeo. I. A, Cho. H. J and Yoon. S. H, The Control of Temperature of green Roof System

1) reference condition 대비, 비열 편차합의 순서임.

- with the Roof Slab Insulation Method, Summer Conference of SAREK, pp. 869-872, 2008.
5. An. K. A, Han. S. W and Moon. H. J, Energy Saving Effects of Green Roof in Existing Buildings according to Different Insulation Levels, Journal of the Korean Society of Living Environment System, Vol. 21, No. 6, pp. 959-964, 2014.
  6. Moon. H. J, An. K. A and Han. S. W, The Evaluation of Energy Performance in Building with Green Roof according to the Characteristics of the Vegetation and Soil Layers, Autumn Conference of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, pp. 207-210, 2013.
  7. Kim. T. H and Park. S. E, A Study on Computer Simulation to Investigate Correlations between Temperature Controlling Effect of Green Roof System and the Photovoltaic Power Generation Efficiency, Journal of KSES, Vol. 33, No. 4, pp70-79, 2013.