



## 옥상녹화시스템 적용 식물 특성에 따른 건물 냉난방 에너지 저감량 분석

### *Analysis of Heating and Cooling Energy Reduction According to the Characteristics of Plants Applied to Green Roof System*

손형민\* · 박동윤\*\*

Hyeongmin Son\* · Dong Yoon Park\*\*

\* Main Author, Ph.D, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, South Korea (nemilhm@kaist.ac.kr)

\*\* Corresponding Author, Postdoctoral Researcher, Applied Science Research Institute, KAIST, South Korea (dypark@kaist.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** This study investigated the effect of green roof plants on the heating and cooling energy reduction in a building. Plant height, leaf area index, leaf reflectivity, leaf emissivity, and minimum stomatal resistances were selected as major variables of the green roof plants. **Method:** A single building of 85m<sup>2</sup> was modeled by Design Builder based on Energy Plus, then heating and cooling energy conservation was analyzed as a green roof was applied. **Result:** The main simulation results are as follows. As 90cm height plant was applied, 263kWh of heating energy was reduced, which was higher than cooling energy reduction. Thus it is reasonable to select the height of plants in consideration of heating energy. As the leaf area index increased from 1 to 5, the amount of reduction in heating energy decreased by 15.9%, but the amount of reduction in cooling energy increased. As the leaf reflectance and emissivity increased, the amount of reduction in heating energy through the green roof decreased while the amount of reduction in cooling energy increased. As minimum stomatal resistance increased from 50 to 300s/m, the amount of reduction in heating energy was increased by 11%, but the amount of cooling energy reduction was insignificant compared to the amount of heating energy reduction.

#### KEYWORD

옥상녹화  
식물  
냉난방 에너지  
건물에너지 시뮬레이션

Green Roof  
Plant  
Heating and Cooling Energy  
Building Energy Simulation

#### ACCEPTANCE INFO

Received Feb. 17, 2022  
Final revision received Mar. 21, 2022  
Accepted Mar. 25, 2022

© 2022. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

급격한 도시화에 따른 인구증가는 수자원 고갈, 도시 사막화, 홍수, 도시내 열섬 현상 등의 문제를 야기하여 도시의 정주환경을 급격히 변화시키고 있다. 더욱이 도시화에 따른 녹지 공간 부족은 도시열섬현상을 가속화시키고 있으며, 이는 도시 내 에너지 소비를 증가시키는 원인이 되고 있다.

도시의 지속가능성 향상과 에너지 소비 저감을 위해 녹지 및 수변 공간 확보에 따른 도시 녹색 시설(Urban Green Infrastructure) 증설은 점점 중요한 이슈로 대두되고 있다. 현재까지 도시열섬현상 완화를 위한 대책으로서 많은 도시녹화 설계안들이 제시되어 왔으며, 특히 녹지 및 수변공간이 10% 증가 시 최대 0.18°C의 온도저감 효과를 보이는 것으로 나타나고 있다[1]. 하지만 도시 내 한정된 공간적 제약으로 인해 녹지공간을 확보하는데 어려움이 따르고 있다. 이에 수평적 한계를 벗어나 수직적 공간을 녹지로 활용한 옥상녹화가 대안으로 제시되고 있으며, 옥상녹화의 에너지 저감 효과를 분석한 다양한 연구가 진행되고 있다. 안태경[2]은 공동주택 최상부에 옥상녹화가 적용되었을 시 약 6%의 에너지 소비가 저감됨을 규명하였다. 김종민[3]은 국내 옥상녹화에 따른 공동주택 에너지 저감 효과를

Design Builder 기반 에너지 시뮬레이션을 통해 분석하여 옥상녹화를 통한 에너지 저감 효과를 검증하였다. 최정민[4]은 건물 에너지 소비량에 영향을 미치는 토양층, 관계량 등의 옥상녹화의 세부 설계 지표에 대한 연구를 수행하였다. 또한 에너지 저감을 위한 옥상녹화 표도층이 옥상녹화 적용을 통한 에너지 저감에 미치는 냉난방 에너지 저감 연구가 진행되었다[5]. 최석민 등[6]은 건물 통합형 옥상녹화의 에너지 절감 효과를 에너지 시뮬레이션을 통해 평가하였다.

He et al.은 오피스 빌딩에 적용된 옥상녹화 식물의 잎 면적 및 토양두께 변화가 냉방에너지에 미치는 영향성을 검토하였으며, 3.6%의 냉방부하를 저감할 수 있음을 규명하였다[7]. Sailor et al.은 미국 휴스턴, 피닉스, 포틀랜드, 뉴욕에 옥상녹화 적용에 따른 냉·난방 에너지 저감 비용을 분석하였으며, 추운 지방에서 옥상녹화 적용을 통한 난방에너지 저감량이 크며 뉴욕에서 가장 큰 에너지 저감효과를 확인하였다[8]. 또한 옥상녹화 변수별 에너지 저감량을 분석하여 토양두께가 두꺼워 질수록 건물 옥상층으로 흐르는 열유속이 감소하여 에너지 사용량이 감소함을 밝혔으며, 잎 밀도가 높아질수록 냉방 에너지 저감량이 증가함을 확인하였다[9].

또한, 해외뿐만 아니라 국내 옥상녹화 적용에 따른 외부 기후조건에 따른 냉·난방 에너지 영향에 대한 연구가 진행되었다. 국내 옥상녹화 적용시 난대성 기후에 가까운 부산에서 냉방에너지 저감량이 높았으며, 대륙성 기후를 보이는 철원에서 난방에너지 저감량이 높게 나왔다[10]. 하지만, 냉·난방 에너지 저감 총량을 비교하였을 시,

난방에너지 사용량이 큰 대륙성 기후를 갖고 있는 철원에서 옥상녹화를 통한 가장 큰 에너지 저감량을 보여 냉·난방 에너지 저감을 위해서는 난방에너지 저감을 위한 식생선택이 요구된다[10].

이와 같이 국내외 옥상녹화 적용을 통한 에너지 저감 효과를 규명한 다양한 연구가 진행되고 있으나, 대다수의 연구는 옥상녹화 적용이 건물 전체 에너지 저감 효과에 미치는 영향성을 규명한 연구가 주로 진행되었다. 아직까지 옥상녹화 표면 온도에 영향을 미칠 수 있는 옥상녹화 적용 식물 특성에 대한 주요 변수들이 건물 에너지 저감 효과에 미치는 영향성은 규명되지 못했다. 본 연구에서는 옥상녹화에 적용되는 식물의 키, 엽면적 지수, 잎 반사율, 잎 방사율, 최소 기공 저항 등의 적용 식물 특성 변화에 따른 에너지 저감량을 시뮬레이션을 통해 분석하였으며, 본 결과를 통해 에너지 저감형 옥상녹화를 위한 최적 식생 선택안을 제안하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 해석 대상 및 입력조건

본 실험은 Energy Plus 기반 Design Builder 3.0을 통해서 수행되었다. Design Builder는 Energy Plus를 사용하기 위한 인터페이스 중심의 SW로, Energy Plus 엔진이 내장되어 있어 Energy Plus 해석방법을 사용한다. 시뮬레이션의 조건은 인천지역 날씨 데이터를 바탕으로 가정용 건물 거주 스케줄로 설정되었으며, 시뮬레이션 조건은 Table 1.과 같다. 옥상녹화 적용에 따른 에너지 저감 시뮬레이션을 위한 거주 모델은 노후화 및 낮은 단열 기준을 가지고 있어 개수선이 요구되는 1987년 이전 주거용 남향 단층 건물이며, 국민주택 규모 (85 m<sup>2</sup>)로 일반적 주거 건물에 적용되는 남향 전창을 배치하였다. 30년 이상된 주거용 건물이 48%에 이른다는 국토교통부자료[11]를 고려하여 1987년 국내 단열 기준으로 단열 물성치를 설정하였으며, 세부 조건은 Table 3.과 같다.

적용된 옥상녹화 식생 조건에 따른 에너지 저감 효과분석을 위해 식물의 키(Height of Plants), 단위 토양 면적당 식생이 가지는 모든 잎 층의 밀도로서 식재간 거리, 밀집도를 파악할 수 있는엽면적 지수(Leaf area index, LAI), 잎 반사율(Leaf reflectivity), 잎 방사율(Leaf emissivity), 최소기공저항(Minimum stomatal resistance)을 주요 변수로 설정하였으며, 결과 비교를 위한 비교군의 기본 설정은 Table 4.와 같다. 옥상녹화 적용에 따른 에너지 저감에 대한 폭넓은 분석을 위해 월별 에너지 분석이 필요할 수 있겠으나, 일반적으로 옥

Table 1. Conditions for simulations

| Conditions for the simulation target |  |
|--------------------------------------|--|
| Weather data                         | Climate data in Incheon  |
| Run period                           | 01/01/2010~12/31/2010  |
| Holiday                              | Korea, 2010  |
| Schedule                             | Dwell (running time: 16 to 5)  |
| Occupancy                            | 0.05 (person/m <sup>2</sup> )  |
| Equipment                            | 3.9W/m <sup>2</sup>  |
| Lighting load density                | 5W/m <sup>2</sup>  |
| HVAC                                 | Heating: Under Floor heating system<br>Cooling: Packaged direct system |
| Setting temperature                  | Heating set point: 21°C<br>Cooling set point: 26°C                     |

상녹화에 적용되는 식물은 계절, 월별에 따라 변화하지 않고 동일한 식물이 다년간 적용된다. 따라서 계절 변화에 따른 식생의 변화는 고려되지 않았다. 또한 식생 종류와 계절별 변화보다는 변수의 수치상 변화에 따른 에너지 변화량 결과를 바탕으로 냉·난방 에너지 저감형

Table 2. Zoning of the target building for simulations

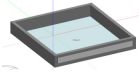
|   | Volme (m <sup>3</sup> ) | Floor area (m <sup>2</sup> ) | Ext. wall area (m <sup>2</sup> ) | Window area (m <sup>2</sup> ) |
|---|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
|  | 239                     | 85                           | 103                              | 12                            |

Table 3. Properties of the building material for simulations

|           | Material              | Thickness [mm] | Conductivity [W/mK] | Specific heat [J/kg·K] |
|-----------|-----------------------|----------------|---------------------|------------------------|
| Ext. Wall | Concrete reinforced   | 220            | 2.5                 | 1,000                  |
|           | Glass fibre wool      | 50             | 0.040               | 840                    |
|           | Gypsum board          | 60             | 0.25                | 1,000                  |
| Roof      | Concrete roofing slab | 50             | 0.16                | 840                    |
|           | Roofing felt          | 4              | 0.19                | 837                    |
|           | Foam-polyurethan      | 50             | 0.03                | 1,470                  |
|           | Asphalt-poured        | 1              | 1.2                 | 920                    |
|           | Concrete reinforced   | 200            | 2.5                 | 1,000                  |
| Floor     | Gypsum plaster board  | 80             | 0.25                | 1,000                  |
|           | Concrete reinforced   | 200            | 2.5                 | 1,000                  |
|           | Glass fibre wool      | 50             | 0.04                | 840                    |
|           | Floor / Roof Screed   | 30             | 0.41                | 840                    |
|           | Timber Flooring       | 30             | 0.14                | 1,200                  |

Table 4. Conditions and properties of the green roof system

| Leaf  | Grass and flower | Soil type                                | Natural soil |
|---|------------------|--|--------------|
| Height of plant (m)                           | 0.15             | Thickness (m)                            | 0.3          |
| Leaf area index                               | 5                | Conductivity of dry soil (W/m·K)         | 0.5          |
| Leaf reflectivity                             | 0.1              | Specific Heat (J/kg·K)                   | 1,350        |
| Leaf emissivity                               | 0.8              | Density of dry soil (kg/m <sup>3</sup> ) | 800          |
| Minimum stomatal resistance (s/m)             | 180              | Thermal absorptance (emissivity)         | 0.9          |
| Max volumetric moisture content at saturation | 0.5              | Solar absorptance                        | 0.6          |
| Min residual volumetric moisture content      | 0.01             | Visible absorptance                      | 0.6          |
| Initial Volumetric moisture content           | 0.15             | -  | -            |

Table 5. Variables of the plants for simulations

| Conditions                        | Simulation values           |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Height of plant (cm)              | 10, 30, 50, 70, 90          |
| Leaf area index                   | 1, 2, 3, 4, 5               |
| Leaf reflectivity                 | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4          |
| Leaf Emissivity                   | 0.8, 0.9, 1                 |
| Minimum Stomatal Resistance (s/m) | 50, 100, 150, 200, 250, 300 |

옥상녹화를 위한 식물 선택 가이드 라인의 제안하기 위해서는 모든 계절을 포함하는 연간 에너지 저감량을 비교하는 것이 합리적이라 판단되어 식생 변수 적용에 따른 총 에너지 저감량을 비교하였다.

옥상녹화 시뮬레이션을 위한 세부 변수는 Table 5.와 같으며, 냉·난방 에너지 저감을 위해 적용되는 식물 선택에 영향을 주는 변수 범위를 최대화하기 위해 Design Builder에서 제공하는 변수의 최대, 최소 값을 설정하였다. 또한, 식생을 직접 선택할 경우 각 식생간 변수의 차이가 일정하지 않아 에너지 변화량 분석이 어려우며 모든 식생을 시뮬레이션에 반영하기 어려워 본 연구에서는 식생 특성 변수를 일정하게 나누어 그에 따른 에너지 변화량과 경향성을 분석하였다. 특히 열면적 지수는 단위 토양 면적에서 식생이 갖는 잎 면적의 합을 의미하므로 식생 간의 거리 및 밀집도는 열면적 지수를 통해 고려하였다.

### 2.2. 옥상녹화 에너지 시뮬레이션 모델링

옥상녹화 시스템의 에너지 평형 해석은 Fast All Season Soil Strength (FASST) 모델을 통해 수행하였다[12, 13]. 이 모델은 크게 식생층과 토양층에서의 에너지 방정식으로 구분된다. 식생층 순 열유속( $F_v$ )은 식생층이 흡수한 단파장 복사열, 대기층과의 장파장 복사열교환, 토양층과의 장파장 복사열교환, 식생층의 현열 및 잠열에 대한 항으로 이루어지며 다음과 같다.

$$F_v [W/m^2] = \sigma_v [I_s(1 - \alpha_v) + \epsilon_v I_{ir} - \epsilon_v \sigma T_v^4] + \frac{\sigma_v \epsilon_v \epsilon_s \sigma}{\epsilon_v + \epsilon_s - \epsilon_v \epsilon_s} (T_s^4 - T_v^4) + H_v + L_v \quad (Eq.1)$$

이때,  $\sigma_v$ 는 식생 피복율,  $I_s$ 는 단파장 복사열유속( $W/m^2$ ),  $\alpha_v$ 는 식생층 단파장 반사율,  $\epsilon_s$ 는 식생층 방사율,  $I_{ir}$ 은 장파장 복사열유속( $W/m^2$ ),  $T_v$ 는 식생층 온도 (K),  $\epsilon_s$ 는 토양층 표면 방사율,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수,  $T_s$ 는 토양층 표면온도 (K),  $H_v$ 는 식생층 현열 열유속( $W/m^2$ ),  $L_v$ 는 식생층 잠열 열유속( $W/m^2$ )을 나타낸다.

열면적 지수와 관련된 식생층에서의 현열과 잠열은 다음과 같이 표현된다.

$$H_v [W/m^2] = (1.1 LAI \rho_{av} C_{p,a} C_v W_{av}) (T_{av} - T_v) \quad (Eq.2)$$

$$L_v [W/m^2] = l_v LAI \rho_{av} C_v W_{av} r'' (q_{av} - q_{v,sat}) \quad (Eq.3)$$

이때,  $\rho_{av}$ 는 식생층 표면 근처의 공기 밀도( $kg/m^3$ ),  $C_{p,a}$ 는 공기 비열( $J/kg \cdot K$ ),  $C_v$ 는 식생층 열전달계수,  $W_{av}$ 는 식생층 표면에서의 기류속도 (m/s)로 인천 지역 기상데이터의 풍속 데이터를 사용하였다.  $T_{av}$ 는 식생층 공기 온도(K),  $l_v$ 는 식생층 표면 온도의 증발잠열 ( $J/kg$ ),  $r''$ 는 습윤지수,  $q_{av}$ 는 식생층 표면에서의 공기 혼합 비율,  $q_{v,sat}$ 는 포화 균열 혼합 비율을 나타낸다. 특히 포화 균열 혼합 비율은 잎의 온도에 대한 함수이며, 아래와 같다.

$$q_{v,sat}(T_v^{n+1}) = q_{v,sat}(T_v^n) + \left( \frac{\partial q_{v,sat}}{\partial T} \right)_{T_v^n} \times (T_v^{n+1} - T_v^n) \quad (Eq.4)$$

식생층의 온도와 토양층의 온도는 미지수이므로 이를 계산하기 위해 토양층에서의 에너지 방정식 계산이 필요하다. 토양층 순 열유속( $F_s$ )은 토양층이 흡수한 단파장 복사열, 대기층과의 장파장 복사열교환, 식생층과의 장파장 복사열교환, 토양층에서의 현열 및 잠열에 대한 항으로 이루어지며 다음과 같다.

$$F_s [W/m^2] = (1 - \sigma_v) [I_s(1 - \alpha_s) + \epsilon_s I_{ir} - \epsilon_s \sigma T_s^4] + \frac{\sigma_v \epsilon_v \epsilon_s \sigma}{\epsilon_v + \epsilon_s - \epsilon_v \epsilon_s} (T_s^4 - T_v^4) + H_s + L_s \quad (Eq.5)$$

이때,  $\alpha_s$ 는 토양층 단파장 반사율,  $H_s$ 는 토양층 현열 열유속( $W/m^2$ ),  $L_s$ 는 토양층 잠열 열유속( $W/m^2$ )을 나타낸다.

각 변수의 변화에 따른 에너지 저감량은 비교군과의 비교를 통해 나타내었다.

## 3. 결과

### 3.1. 식물키에 따른 냉난방 에너지 저감량

Fig. 1.은 옥상녹화 적용 식물의 키에 따른 냉·난방 에너지 변화를 보여준다. 옥상녹화 미적용시 난방에너지는 11661.7kWh가 소비되었으며, 냉방에너지는 1689.4kWh가 소비되었다. 옥상녹화 적용시 적용 식물의 높이가 커질수록 난방에너지 저감량이 감소하였으며, 10cm의 식물 적용시 1,288kWh의 난방에너지가 저감된 반면 90cm 식물 적용시 1,025kWh의 난방에너지가 저감되었다. 모든 변수가 적용되었을 시 난방에너지 감소는 옥상녹화 식생 적용을 위해 적용된 토양층이 단열층 역할을 하여 옥상층의 U-value ( $W/m^2$ )를 감소시킨 결과로서 판단되며, 이는 옥상녹화에 적용된

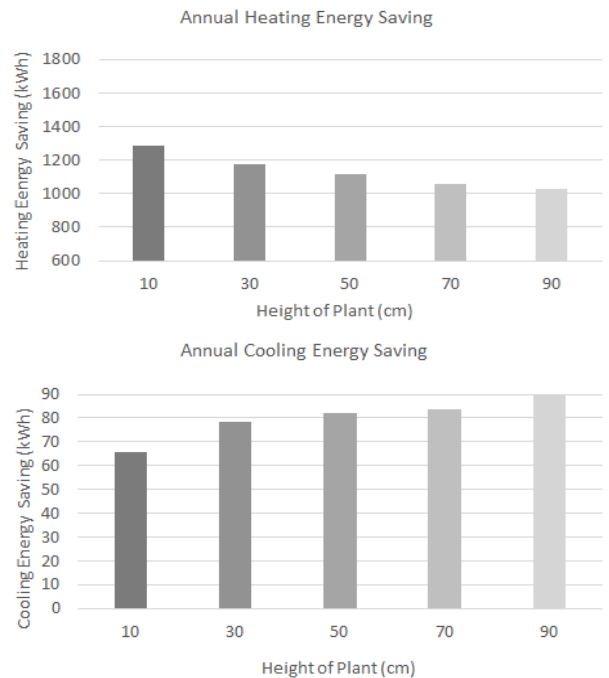


Fig. 1. Energy reduction according to the plant height

토양두께를 15cm에서 30cm로 증가시켰을 시 옥상층 U-value 감소에 따른 난방에너지가 저감된 Berardi의 연구결과와 동일하다[14].

냉방에너지는 식물키가 커질수록 저감량이 높게 나타났으며, 10cm 식물 적용시 65kWh의 냉방에너지가 저감된 반면 90cm의 식물을 적용했을시 90kWh의 냉방에너지 소비량이 감소하였다. 이는 식물의 키가 커짐에 따라 거칠기 길이(roughness length)가 증가하여 식생 층에서의 바람의 속도가 상승하고, 이에 따른 현열과 잠열을 통한 대기층으로의 열전달이 상승함에 따라 옥상녹화 식생층의 온도가 하강한 결과로 판단된다.

### 3.2. 엽면적 지수에 따른 냉난방 에너지 저감량

Fig. 2.는 엽면적 지수가 옥상녹화를 통한 냉·난방에너지 저감에 미치는 영향성을 보여준다. 엽면적 지수가 증가할수록 난방에너지 저감량이 감소하였으며, 엽면적 지수가 1일 시 1,528kWh 난방에너지가 저감된 반면, 5일 경우 1,285kWh 난방에너지를 저감하였다. 엽면적 지수가 높아질수록 식생 피복율이 증가하고, 그 결과 토양층 및 건물옥상으로의 열전달량이 감소하였기 때문에 판단된다. 냉방에너지 저감량은 엽면적 지수가 높아짐에 따라 증가하였으며, 엽면적 지수가 5일 시 66kWh의 냉방에너지가 저감된 반면, 엽면적 지수가 1일 때 80kWh의 냉방에너지가 기존보다 더 낭비되었다. 마찬가지로 엽면적지수가 높으면 토양층 및 건물옥상으로의 열전달량이 감소하고, 반대로 엽면적 지수가 낮으면 토양층 및 건물옥상으로의 열전달량이 증가하기 때문에 여겨진다. 더욱이 낮 동안 토양층에 축적된 열이 야간에 방출되면서 겨울에는 도움이 되는 요인으로, 여름에는 장애요인으로 작용한 것으로 판단된다.

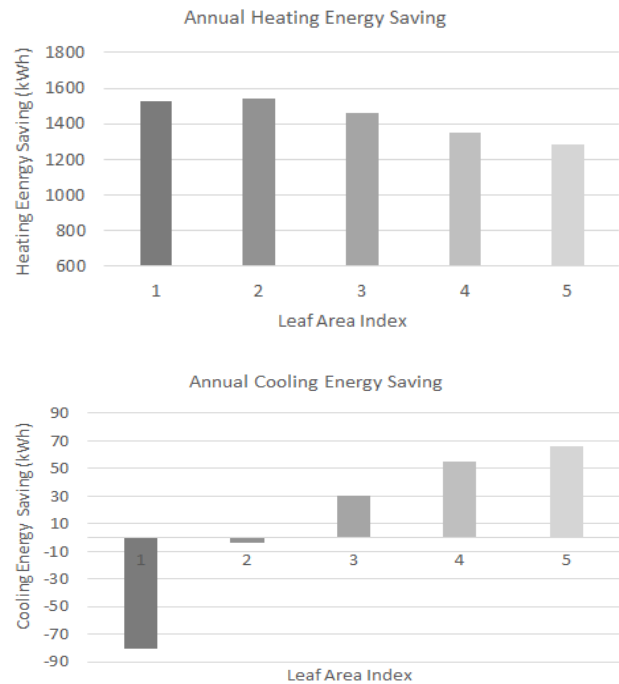


Fig. 2. Energy reduction according to LAI

### 3.3. 잎 반사율에 따른 냉난방 에너지 저감량

Fig. 3.은 잎 반사율 변화에 따른 냉·난방 에너지 저감량을 보여준다. 잎 반사율이 0.8일 때 1,285kWh의 난방에너지를 저감하였으나 1일 경우 1,084kWh 난방에너지 저감량이 감소하였다. 냉방에너지 저감량은 잎의 반사율이 증가함에 따라 냉방에너지 저감량이 증가하였다. 반사율이 0.1일 경우 66kWh 저감된 반면, 0.4일 때 82kWh이 냉방에너지가 저감되어 잎 반사율이 증가할수록 냉방에너지 저감량이 증가하였다. 잎 반사율이 높을수록 식생층으로의 열전달량이 감소한 결과로 판

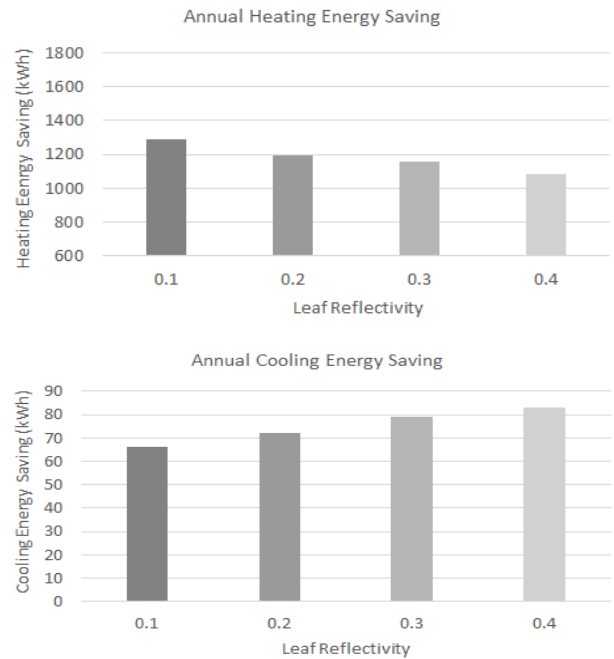


Fig. 3. Energy reduction according to the leaf reflectivity

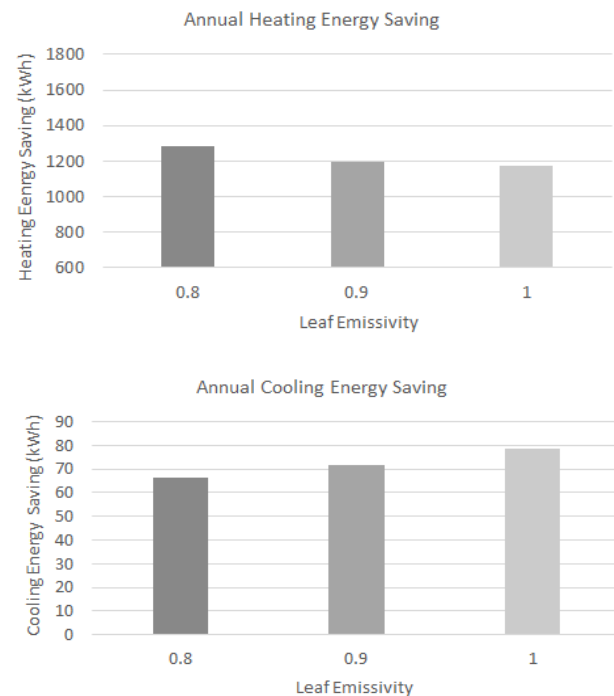


Fig. 4. Energy reduction according to the leaf emissivity

단된다. 잎 반사율의 경우 식물의 엽록소가 증가할수록 낮아지는 경향이 있으므로 옥상녹화 식생별 엽록소 함유량을 고려한 식생 선정이 중요하다[15].

### 3.4. 잎 방사율에 따른 냉난방 에너지 저감량

Fig. 4.는 잎 방사율 변화에 따른 냉·난방 에너지 저감률을 보여준다. 잎 방사율이 0.8일 때 1,285kWh의 난방에너지가 저감하였으나, 잎 방사율이 1이였을 때 1,172kWh로 잎 방사율이 증가함에 따라 난방에너지 저감량이 감소하였다. 냉방에너지 저감량은 잎 방사율이 0.8일 때 66kWh의 냉방에너지가 저감되었으나 1일 때 78kWh로 잎 방사율이 증가할수록 냉방에너지 저감효과가 증가하였다.

### 3.5. 최소기공저항에 따른 냉난방 에너지 저감량

Fig. 5.는 최소기공저항 변화에 따른 냉·난방 에너지 저감효과를 보여준다. 잎 최소 기공저항은 식물의 잎을 통해 이산화탄소 등의 기체 및 수증기 등이 확산되는 것을 억제하는 것을 의미하는 것으로 기공저항이 높을수록 식물의 증산작용이 억제된다[16].

최소기공저항이 50s/m일 경우 1,179kWh의 난방에너지가 저감되고, 300s/m일 때 1,330kWh의 난방에너지가 저감되어 최소기공저항이 증가함에 따라 난방에너지 저감량이 증가하였다. 옥상녹화를 통한 냉방에너지 저감량은 최소기공저항이 50s/m일 경우 74kWh의 냉방에너지가 소비되었으며, 최소기공저항이 증가함에 따라 냉방에너지 저감 효과가 감소하였다. 식물의 증산작용에 따른 열 발산이 겨울에는 장애요인이 되지만 여름에는 에너지 저감에 긍정적인 요소로 작용함을 알 수 있다.

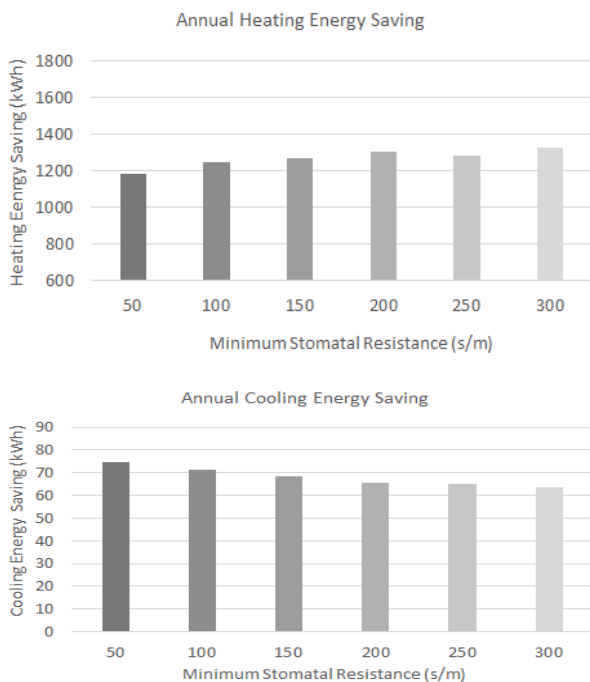


Fig. 5. Energy reduction according to the minimum stomatal resistance

## 4. 결론

본 연구에서는 옥상녹화 적용시 냉·난방 에너지 저감형 최적 옥상녹화 식생을 제안하기 위해 식물 키, 엽면적 지수, 잎 반사율, 잎방사율, 최소기공저항 변화에 따른 냉·난방에너지 저감량을 분석하였다. 옥상녹화 적용에 따른 냉·난방 에너지 저감량 분석결과, 옥상녹화 적용을 통해 냉·난방 에너지를 저감할 수 있었으나, 옥상녹화 적용 식물 키, 엽면적 지수, 잎 반사율/방사율, 최소기공저항 변수 변화를 통해 난방에너지 저감량을 증가시킬수록 냉방에너지 저감량이 감소하는 경향을 보였다. 또한 변수 변화에 따라 난방에너지 저감량은 냉방에너지 저감량 대비 약 11~23배 가량 높았으며 이는 대륙성 기후를 갖는 국내 중부지방에서 냉방에너지 소비량보다 난방에너지 소비량이 높아 옥상녹화 적용 효과가 큰 결과로 판단되며, 이를 통해 국내 옥상녹화 적용시 난방에너지 저감 위주의 식생층 설계가 요구된다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1) 10cm 식물에서 90cm 식물이 적용되었을 시 20% 난방에너지 저감량이 감소하였으나, 냉방에너지 저감량은 38% 증가하였다. 하지만 감소된 난방에너지 저감량은 263kWh로 냉방에너지 저감량 25kWh 보다 높아, 국내 옥상녹화 선정시 난방에너지를 고려하여 키가 큰 관목류보다 세덤류 등의 식물 선정이 유리할 것으로 판단된다.

2) 엽면적 지수가 1에서 5로 증가함에 따라 난방에너지 저감량이 15.9% 감소하였으나, 냉방에너지 저감량은 증가하였다. 이는 높은 엽면적 지수의 식생층은 토양층 및 건물 옥상으로의 열 전달량을 억제하여 낮 시간동안 토양층의 열 축적이 저해된 결과로 판단된다. 따라서 냉방에너지 저감을 위한 옥상녹화 적용 시 잎 엽면적 지수가 낮은 잔디류, 침엽수보다 잎 넓이가 커 LAI 높은 활엽수 종을 활용하는 것이 유리할 것이라 판단된다.

3) 잎 반사율이 증가할수록 옥상녹화를 통한 난방에너지 저감량이 감소하였으며, 냉방에너지는 감소량은 증가하였다. 이는 잎 반사율이 높을수록 옥상녹화 식생층으로 열 전달량이 감소한 결과로서 판단된다.

4) 잎 방사율 또한 반사율과 동일한 양상을 보여 잎 방사율이 높을수록 난방에너지 저감량은 감소하였으나, 잎 방사율이 증가할수록 냉방에너지 저감량 또한 증가하였다.

5) 최소기공저항성이 50s/m에서 300s/m로 증가함 따라 옥상녹화시 난방에너지 저감량은 11% 증가하였다. 냉방에너지 저감량은 최소기공저항성이 커짐에 따라 옥상녹화적용에 따른 냉방에너지 저감량은 감소하였으나 난방에너지 저감량과 비교하여 미미한 것으로 나타났다. 따라서 냉·난방 에너지 저감형 에너지 저감을 위한 옥상녹화 적용시 최소기공저항성이 높은 식물을 선택하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 냉·난방 에너지 저감을 위한 옥상녹화 식생 선택안

을 제안하였으나 옥상녹화 층의 주요 요소인 토양층이 옥상녹화 냉난방 에너지 저감에 미치는 영향성은 검토되지 않았다. 토양층의 두께 등은 독립적으로 단열성능 증가에 따른 옥상녹화를 통한 냉·난방 에너지 저감효과에 영향을 주며, 또한 식생 종류에 따른 토양층 특성 또한 변화하므로 향후 토양층 조건 변화에 따른 냉난방 에너지 저감에 관한 추후 연구가 요구된다.

## Acknowledgement

이 논문은 2021년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2019R1C1C1010136).

## Reference

- [1] 배응규, 율기학, 공동주택단지에서 적용된 주거군의 유형 분석을 통한 열섬현상 완화 설계방향 연구: 2005~2010년 준공 및 당선 설계안을 대상으로, 한국도시설계학회지, 제13권 제2호, 2012, pp.47-60. // (W.K. Bae, K.H. Yoon, A Design Guideline of Apartment House Complex for Mitigation of Heat Island Effect - For the planning agenda constructed and elected in 2005~2010, Journal of The Urban Design Institute of Korea, 17(2), 2012, pp.47-60.)
- [2] 안태경, 공동주택 최상층부의 옥상녹화에 따른 에너지절약 평가, 한국생활환경학회지, 제10권 제3호, 2003, pp.182-186. // (T.K. Ahn, Evaluation for Thermal Performance of Apartment House Top Floor using Roof Planting System, The Korean Society of Living Environmental System, 10(3), 2003, pp.182-186.)
- [3] 김종민, 에너지 절감을 위한 옥상표토층 효과에 관한 기초적 연구, 대한건축학회연합논문집, 제10권 제3호, 2008, pp.143-149. // (C.M. Kim, A Basic Study on Savings of Energy Composition for the Green Roof, Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea, 10(3), 2008, pp.143-149.)
- [4] 최정민, 건물 에너지 소비량에 영향을 미치는 옥상녹화시스템 설계변수 평가에 관한 사례 연구, 한국태양에너지학회 논문집, 제35권 제3호, 2015, pp.41-48. // (J.M. Choi, A Case Study on the Design Variables Evaluation of Green Roof System effecting on Building Energy Conservation, Journal of the Korean Solar Energy Society, 35(3), 2015, pp.41-48)
- [5] 김지현 외 4인, 옥상녹화에 따른 공동주택 에너지 저감효과 분석 연구, LHI 저널, 제7권 제4호, 2016, pp.299-305. // (J.H. Kim et al., An Analysis of Energy Reduction Effects in Housing According to Green Roof, LHI Journal, 7(4), 2016, pp.299-305.)
- [6] 최석민 외 3인, 옥상온실과 통합된 소규모 호텔의 냉/난방 부하 산정을 위한 에너지 해석에 관한 연구, 설비공학논문집, 제32권 제11호, 2020, pp.497-509. // (S.M. Choi et al., Energy Analysis of the Heating and Cooling Load Estimation of a Small Hotel with an Integrated Rooftop Greenhouse, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 32(11), 2020, pp.497-509.)
- [7] Y. He, H. Yu., A. Ozaki., & N., Dong, Thermal and energy performance of green roof and cool roof: A comparison study in Shanghai area, Journal of Cleaner Production, 267, 2020, 122205.
- [8] D.J. Sailor, T. B. Elley, & M., Gibson, Exploring the building energy impacts of green roof design decisions—a modeling study of buildings in four distinct climates, Journal of Building Physics, 35(4), 2012, pp.372-391.
- [9] T.E. Morakinyo, K. K. C. Dahanayake, E. Ng, & C. L. Chow. Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study, Energy and Buildings, 145, 2017, pp.226-237.
- [10] H.M. Son, D.Y. Park, & S.J. Chang, Heating and Cooling Energy Conservation Effects by Green Roof Systems in Relation with Building Location, Usage and Number of Floors, KIEAE Journal, 14(2), 2014, pp.11-19.
- [11] 국토교통부, 보도자료 전국 건축물 현황, [http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?lcmspage=2&id=95085286](http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmspage=2&id=95085286), 2021. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Press release nation building status, [http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?lcmspage=2&id=95085286](http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmspage=2&id=95085286), 2021.)
- [12] S. Frankenstein, G. Koenig, FASST vegetation models, ERDC/CRREL TR-04-25, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Hanover, New Hampshire, 2004.
- [13] D. J. Sailor, A green roof model for building energy simulation programs, Energy and Buildings, 40, 2008, pp.1466-1478.
- [14] U. Berardi., The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits, Energy and buildings, 2016, 121, 217-229.
- [15] 신용희, 박종화, 박민서, 발작물의 분광반사 특성과 식생지수, 한국관개배수, 제10권 제2호, 2013, pp.43-53. // (Y.H. Shin, J.H. Park, M.S. Park, Spectral Reflectance Characteristics and Vegetation Indices of Field Crops, Korean National Committee on Irrigation and Drainage, 10(2), 2013, pp.43-53.)
- [16] 양수진, 우수영, 제선미, 저농도 노존처리에 따른 다섯 가지 유묘의 기공 변화, 엽록소 함량 및 항산화 효소 활성, 한국임학회지, 제96권 제4호, 2017, pp.470-476. // (S.Z. Ryang, S.Y. Woo, S.M. Je, Antioxidant Enzyme, Chlorophyll Contents and Stomatal Changes of Five Tree Species under Ozone Stress, Korean Society of Forest Science, 96(4), 2017, pp.470-476.)