

식생캐노피모델을 통한 저관리 조방형 옥상녹화시스템의 열해석 전산모의에 관한 연구

김 태 한

상명대학교 환경조경학과

A study on thermal simulation for extensive green roof system using a plant canopy model

Kim, Tae Han

Dept. of Environmental Landscape Architecture, Sang Myung University.

ABSTRACT

GRS is an effective urban ecology restoration technique that can manage a variety of environmental functions such as ecological restoration, rainwater spill control and island heat effect from a low-impact development standpoint that can be utilized in new construction and retrofits. Recently, quantitative evaluation studies, both domestic and abroad, in the areas related to these functions, including near-earth surface climate phenomenon, heavy rainwater regulation, thermal environment of buildings, have been actively underway, and there is a trend to standardize in the form of technological standards. In particular, centered on the advanced European countries, studies of standardizing the specific insulation capability of buildings with green system that comprehensively includes the green roof, from the perspective of replacing the exterior materials of existing buildings, are in progress. The limitation of related studies in the difficulties associated with deriving results that reflect material characteristics of continuously evolving systems due in part to not having sufficiently considered the main components of green system, mechanisms of vegetation, soils. This study attempts to derive, through EnergyPlus, the effects that the vegetation-related indicators such as vegetation height, FCV, etc. have on building energy load, by interpreting vegetation and soil mechanisms through plant canopy model and using

Corresponding author : Kim, Tae Han, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Sang Myung University,
Tel : +82-41-550-5303, E-mail : taehankim@smu.ac.kr

Received : 7 March, 2012. **Revised** : 4 April, 2012. **Accepted** : 9 April, 2012.

an ecological standard indicator LAI that represent the condition of plant growth. Through this, the interpretations that assume green roof system as simple heat insulation will be complemented and a more practical building energy performance evaluation method that reflects numerical methods for heat fluxes phenomena that occur between ecology restoration systems comprised of plants and soil and the ambient space.

Key Words : Green roof system, plant canopy model, LAI, FVC, energy simulation, energyplus.

I. 서 론

옥상녹화시스템은 건축행위로 훼손된 도시의 생태적 기능성을 복원하고 저영향 개발관점의 우수유출조절, 도심미기상측면의 열섬효과저감 등 다양한 환경적 순기능을 제공하는 도심생태복원 기술이다. 최근 국내외로 이러한 환경적 순기능을 미기상, 강우조절, 건축 열환경 측면에서 정량적으로 평가하려는 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 기술표준화하려는 경향을 보이고 있다. 특히 유럽 선진국을 중심으로 옥상녹화를 포함한 건축물녹화시스템을 기존 건축외장재로 해석하고 구체적인 단열성능을 도출하여 기술표준화)하려는 연구가 진행되고 있다.

옥상녹화시스템과 에너지 해석과 관련된 국내 연구경향을 살펴보면 녹화시스템 각 구성층의 물성치, 즉 열전도도에 따른 열관류율을 산정하여 건물 내 에너지 저감성능을 비교 분석하였으며(석, 양, 정 2008), 옥상녹화조성 및 유형에 따른 지표면 온도 및 지반 내 열류특성의 변화를 전산 모의를 통해 규명하는 연구(황, 송 2009)가 주를 이루었다. 식물관점에서는 녹화공간과 주변대기 간의 온열환경 기능성을 정량화하고자 지표류로 인한 온도저감효과를 모니터링하여 수종별 계량화를 시도한 연구(한, 김, 이 2010)가 있었다.

이러한 기존연구의 한계는 녹화시스템의 주요 구성요소인 식물, 토양에서 발생하는 기작이 충분히 고려되지 않아 연중 지속적으로 변화하는

시스템의 물리적 특성이 반영된 결과도출이 어렵다는데 있다. 이와 관련하여 가변적인 식생 및 유기물로 형성된 옥상녹화시스템의 특성이 적용된 건물에너지 해석기법에 대한 연구는 국내에서 아직 보고되지 않고 있다.

따라서 본 연구는 식생, 토양의 기작을 식생캐노피모델을 통해 해석하고 식물생육상태를 나타내는 대표적인 식생지표인 LAI²⁾를 변수로 하여 식물고, FVC³⁾ 등 식생관련지표가 건물에너지평형에 미치는 영향을 규명하려한다. 이를 위해 미국 에너지성⁴⁾에서 개발된 통합건물에너지해석 프로그램인 EnergyPlus를 사용하여 옥상녹화시스템을 단순히 단열재로 해석하는 것을 지양하고 식생구조에서 발생하는 열유동의 수치해석방법이 적용된 보다 현실적인 에너지해석기법을 제안하고자 한다.

II. 이론적 고찰

1. 열유동 관점의 옥상녹화모델

건물옥상 및 지붕을 녹화하면서 형성되는 미기상은 건물 내외부의 에너지균형에 영향을 미치며 이는 태양에 의한 복사강제력으로 결정된다. 유입된 태양복사에너지는 토양, 식물표면, 대기상에서 각 구성층의 열전도에 따라 대류 및 잠열

2) LAI (Leaf Area Index) : 엽면적지수.

3) FVC (Fractional Vegetation Coverage) : 부분식생피복지수.

4) DOE : US Department of Energy.

1) UNI EN ISO 13786

형태로 에너지 평형을 이루게 된다. 이때 태양복사에너지가 녹화시스템의 토양 및 식생층과 반응하면서 형성되는 모든 열유속은 양의 값을 가지도록 가정된다.

이러한 수치해석모델이 적용된 Energy Plus는 옥상녹화된 건물의 에너지평형에 대하여 식생 및 토양관련지표를 고려하여 보다 현실적인 해석을 제공한다. 특히 물수지 균형측면에서 강우, 관수 등으로 인한 식생과 토양층의 수분평형을 단순화하는 CTF⁵⁾가 적용된다. 여기에서 에너지균형을 해석하는데 사용되는 열유속 정보가 도출되며 최종적으로 토양표면온도와 엽면온도에 대한 방정식의 형태로 결과가 산출된다.

2. 식생캐노피모델(Plant Canopy Model)

녹화면의 에너지수지는 식생과 태양광사이의 상관관계에서 기인한다. 식물의 잎은 수분함유정도가 각기 다른 세포간의 상이한 반사지수로 인해 태양광을 효과적으로 산란시키게 되는데, 이러한 반사율 및 투과율을 Joseph(1971)는 옥수수를 대상으로 식물의 광학적 특성을 규명하였다. 일반적으로 잎의 엽록체에서 가시광선을 잘 흡수하여 어둡게 보이며, 550nm의 파장에서 반사율이 증가하기 시작하는데 이는 색소가 최소로 흡수되기 때문이다. 다시 700nm에서 급감 후 1,350nm

까지의 파장에서 매우 밝게 보이며 1,500nm에서는 다시 급감하여 낮은 반사율과 함께 어둡게 보이는데 이는 일반적으로 잎의 수분에 의한 태양광 흡수에 기인한다.

태양에너지와 식생간의 광학적 관계는 수치적으로 해석 가능하며 유추되는 산식을 통해 다양한 식생지수가 만들어진다. 식생지수에 관한 연구는 1960년대를 시작으로 활발하게 진행되고 있으며 단위가 없는 무차원 비율인 LAI는 광합성 흡수복사량, 엽록소량 등과 같이 식생의 생육정도를 평가하는 지표로 폭넓게 활용되고 있다.

특히 LAI는 다양한 식생지수와의 상관관계를 규명하는 표준 식생지표로써, 태양광에 의해 투영되는 단위 면적당 단일 엽면적의 합을 대상지 면적으로 나눈 무차원 비율이다. 일반적으로 0~6의 값을 가지며 자체적으로도 식생의 생육상태를 예측할 수 있는 자료로 활용된다. 이와 더불어 태양광과 식생피복정도에 대한 정량적 지표로 FVC가 사용되며 이는 단위 면적당 식생에 의한 음영면적에 대한 비율을 의미한다.

식생지수 및 지표에 대한 활용은 단순히 식생의 생육정도를 예측하는데 그치지 않고 대상지에 대한 물수지, 에너지수지를 모의하는 데이터로 활용되기도 한다. 식생캐노피모델을 통해 식생구조 사이에서 발생하는 현열, 잠열형태로 이루어지는 복사전달과정을 수치 해석적으로 예측하게 되며 이때 다양한 식생 및 토양관련지표가 적용된다.

SWAT⁶⁾, FASST⁷⁾는 주요 식생캐노피모델로써 LAI와 식생관련지표와의 관련산식이 개별적으로 적용되는 것을 살펴볼 수 있으며 LAI와 식생관련지표 간의 상관관계를 유추할 수 있다.

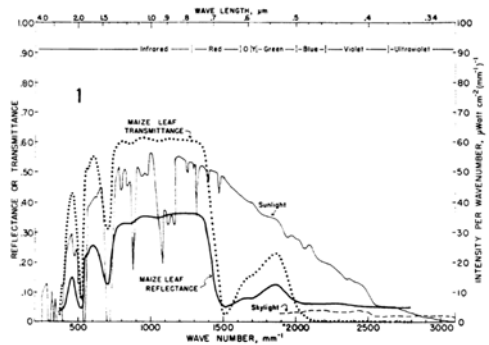


Figure 1. Reflectance or transmittance of mais (J. T. Woolley, 1971).

5) CTF (Conduction Transfer Functions) : 전도전달함수.

6) SWAT : Soil and Water Assessment Tool.

7) FASST : Fast All Season Soil Strength.

1) SWAT

토양 내의 수분이 수증기상태로 변하는 물리적 현상을 증발산이라고 하며 이는 식생층 주변 온도에 많은 영향을 미치는 요소이다. 따라서 옥상녹화가 적용된 건물의 에너지평형을 모의하는데 있어 증발산을 명확히 산정하는 것은 매우 중요하다. 증발산량을 보다 정확히 모의하기 위해 통상적으로 PET⁸⁾개념이 사용되고 있으며 ARS⁹⁾에서 개발된 SWAT 모델의 경우 Hargreaves, Penman-Monteith, Priestley-Taylor 방법 등이 사용되고 있다.

이중 Penman-Monteith 방법은 가장 정교한 모델로써 태양복사에너지, 풍속, 기온, 상대습도 등의 초기모델설정을 위한 자료를 요구하며 증발산에너지, 수분조절기작, 공기저항, 표면저항 등을 도출할 수 있다. PET를 산출하기 위해서는 기준작물에 대한 식생지표가 요구되며 3cm 이상의 천연잔디가 사용된다. 이는 다음과 같은 기준작물의 식물고와 LAI 간의 관계식으로 정리된다.

LAI = 1.5 · ln(h_c) - 1.4 ①

LAI는 엽면적지수, h_c는 cm단위의 식물고를 나타낸다. 이 산식은 SWAT모형의 피복저항방정식연산을 위해 요구되는 LAI를 제공한다. 이 모델은 이미 다양한 관련연구를 통해 신뢰성이 검증되었으며 이를 바탕으로 식물고와 LAI 간의 상관관계가 유추된다.

2) FASST

지표면 부근의 미기상은 자연, 인공적인 요인의 변화에 따라 복합적인 잠열 및 현열의 유동에 의존한다. 특히 식생이 적용될 경우 각 구성층 간에 발생하는 장파, 단파 복사교환으로 더욱 복합

적인 상관관계가 형성된다.

식생환경이 고려된 미기상을 모의하기 위한 연구는 지속적으로 이루어졌다. 이러한 일련의 연구 중에서 미 공병단¹⁰⁾은 무인, 유인차량 및 병력이동 등 각종 전술적인 목적으로 대상지형에 대한 현실적인 예측이 필요하였다.

Frankenstein과 Koenig에 의해 개발된 FASST는 이러한 요구에 대응하는 이상적인 모형으로 피복된 토양내의 결빙, 적설 또한 포괄하는 물수지를 통해 에너지평형모델을 제공한다. 이는 기존 BATS, SiB와 같은 식생캐노피모델에서 발전된 단일차원모델로써 여기에서도 식생관련지표 간의 상관관계를 유추할 수 있다. 다음은 FASST에서 제공하는 LAI와 FVC에 대한 산식이다.

σ_f = 1 - exp(-0.75LAI) ②

σ_f는 FVC를 나타내며 FASST에서 Ramirez와 Senarath(2000)는 설정이 불가능한 식생 중에서 잔디의 경우에 이 방정식으로 식생 캐노피모델을 해석하고 있다.

3. 옥상녹화시스템 에너지해석방법

기존 식생캐노피모델과 같이 옥상녹화가 적용된 건물에도 유입되는 태양복사에너지로 인하여 식생, 토양, 대기 상의 대류, 잠열형태의 유사한 열적평형을 이루게 된다.

EnergyPlus는 옥상녹화시스템의 에너지평형을 모의하기 위해 FASST가 사용되며, FASST의 식물고에 따른 두 가지 모델 중에서 저관리 조방형 옥상녹화시스템에 적합한 저식물고 모델¹¹⁾이 변형되어 적용된다. 이 모델은 녹화면을 식생층(F_i)과 육성층(F_g)으로 구분하고 발생하는 잠열 및 현열유속과 관련된 다양한 매개변수를 포괄하고 각기 다른 두 개의 산출방정식을 동시에 연산 가능

8) PET(Potential evapotranspiration) : 잠재적 증발산.
9) ARS(Agricultural Research Service, USDA) : 미국 농무성 농업연구소.

10) US Army Corps of Engineers.
11) low vegetation model : 저식물고 모델.

한 단일 결과식을 제공한다. 다음은 FASST에서 각 구성층에 적용되는 열유동 모델이다.

1) 식생층 순열유동

식생층에서 발생하는 열유동 현상은 현열과 잠열의 형로 이루어지며 크게 4가지로 구분할 수 있다. 우선 유입되는 단파, 장파 태양복사를 식생에서 반사, 흡수, 방출하는 현상(③), 지면과 식생 사이에서 발생하는 다중반사효과로 인한 복사교환(④), 엽면과 주변대기 간에 이루어지는 현열(⑤), 잠열(⑥)의 열유동으로 해석되며 LAI, FVC, 기공저항, 풍속, 온도 등에 의해 영향을 받는다. 이와 같은 식생층의 순열유동에 대한 물리적 현상은 다음과 같은 산식으로 정리된다.

$$\begin{aligned}
 F_f &= \sigma_f [I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \epsilon_f I_{ir}^\downarrow - \epsilon_f \sigma T_f^4] \cdots \text{③} \\
 &+ \frac{\sigma_f \epsilon_g \epsilon_f \sigma}{\epsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) \cdots \text{④} \\
 &+ H_f \cdots \text{⑤} \\
 &+ L_f \cdots \text{⑥}
 \end{aligned}$$

여기서 F_f 는 식생층 순 열유동, H_f 는 식생층 현열 유동, L_f 는 식생층 잠열 유동을 나타내며 σ 는 슈테판 볼츠만 상수($5.699 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), σ_f 는 FVC를 나타낸다. I_s^\downarrow 는 총 유입 단파복사량 (W/m^2), I_{ir}^\downarrow 는 총 유입 장파복사량(W/m^2)이며 α_f 는 식생캐노피 알베도, T_g 는 지표면 온도(Kelvin), T_f 는 엽면 온도(Kelvin)을 의미한다. ϵ_f 는 식생캐노피 방사율, ϵ_g 는 지표면 방사율, ϵ_1 은 방사율 방정식으로 $\epsilon_1 = \epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_f \cdot \epsilon_g$ 로 표현된다.

2) 토양층 순열유동

EnergyPlus에서 토양층해석에 적용되는 열유동모델 또한 FASST를 옥상녹화에 적용하기 위해 간소화한 것으로 5가지 유형으로 구분된다. 이는 대상지에 유입되는 단파, 장파 태양복사를 토양에서 반사, 흡수, 방출하는 현상(⑦), 지면과

식생사이에서 발생하는 다중반사효과로 인한 복사교환(⑧), 토양과 주변대기 간에 이루어지는 현열(⑨), 잠열(⑩)의 열유동이다.

마지막으로 토양 깊이에 따른 열전도변화현상(⑪)으로 해석되며 FVC, 풍속, 토양표면조도, 열전도도, 밀도, 비열, 열흡수율, 수분함량 등에 의해 영향을 받는다. 이러한 토양층의 순열유동에 대한 물리적 현상은 다음 산식과 같이 정리하고 있다.

$$\begin{aligned}
 F_g &= (1 - \sigma_f) [I_s^\downarrow (1 - \alpha_g) + \epsilon_g I_{ir}^\downarrow - \epsilon_g T_g^4] \cdot \text{⑦} \\
 &- \frac{\sigma_f \epsilon_g \epsilon_f \sigma}{\epsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) \cdots \text{⑧} \\
 &+ H_g \cdots \text{⑨} \\
 &+ L_g \cdots \text{⑩} \\
 &+ K \frac{\delta T_g}{\delta z} \cdots \text{⑪}
 \end{aligned}$$

여기서 F_g 는 토양층 순 열유동, H_g 는 토양층 현열 유동, L_g 는 토양층 잠열 유동을 나타내며 K 는 표면 토양 열전도도($\text{W/m} \cdot \text{K}$), z 는 토양깊이 (m)를 의미한다.

따라서 EnergyPlus는 자연지반환경을 대상으로 구축된 FASST에서 제공하는 이원화 모델을 저관리 조방형 옥상녹화환경에 연동되도록 개선하여 사용하고 있다. 이는 옥상녹화시스템의 에너지해석에 있어 식생캐노피모델이 적용된 융합적인 해석방법으로 사료된다.

III. 연구내용 및 방법

1. 연구목적

본 연구의 목적은 식생캐노피모델과 연동하여 저관리형 옥상녹화가 적용된 국내 중부지방의 건물실내기온변화와 녹화시스템 식생지표 간의 상관관계를 규명하는데 있다. 보다 합리적인 전산모의 유형모델구축을 위해 앞서 제시한 SWAT,

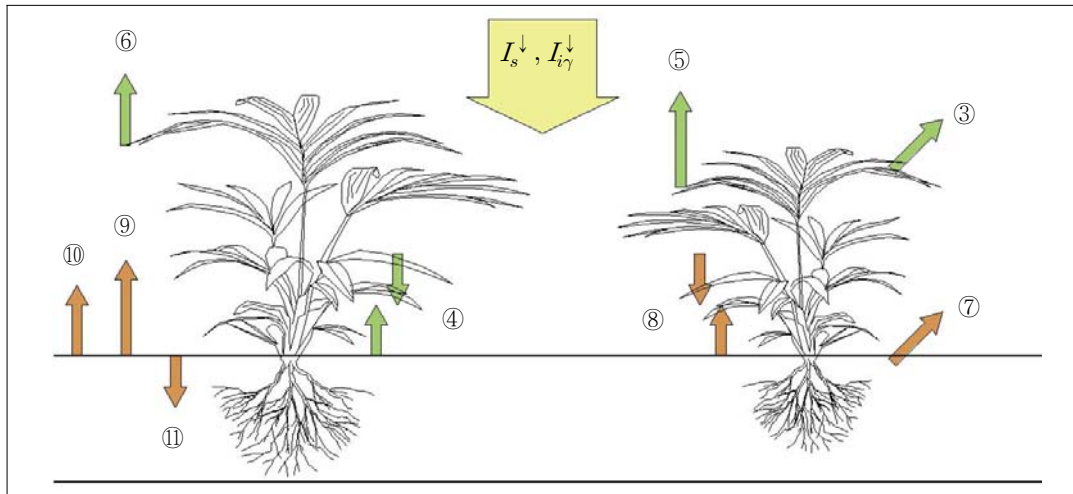


Figure 2. Plant canopy model(low vegetation) of FASST.

FASST의 산식(①, ②)을 적용했으며, 이로써 저 식물고로 이루어진 저관리형 옥상녹화시스템의 식생관련지표가 하절기 건물내부기온에 미치는 영향을 도출하였다.

2. 기본전산해석모델

전산해석모델은 Figure 3과 같이 방위각과 직교하는 10m x 10m x 3.5m의 가상건물에 옥상녹화를 적용하여 전산모의를 진행하였다. 해석모델의 외피는 국토해양부고시 “친환경 주택의 건설 기준 및 성능”¹²⁾에 부합하는 외벽과 지붕 열관류율로 지정하였다. 외기에 면한 옥상은 20cm의 기포콘크리트 슬래브 위에 단열재 7cm, 녹화시스템 20cm이 적층된 총 0.275의 열관류율이 적용된 평지붕으로 설정하였다. 열관류율 0.29의 30cm 외벽은 Table 1과 같이 구성하였으며, 지면과 면하는 바닥면은 이론상 완전단열로 열교환이 일어나지 않도록 설정하였다. 그리고 모든 입면의 30%를 투명복층유리 6mm/13mm air로 구획하여 일조에 의한 실내기온변화를 고려하였다.

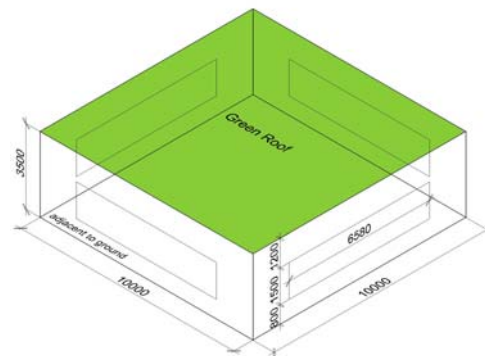


Figure 3. Basic simulation model.

Table 1. Properties of construction layer in modelled wall.

Construction layer	Conductivity (W/m · K)	Thickness (cm)
Brickwork, outer leaf	0.84	9
XPS extruded polystyrene	0.034	10
Concrete block	0.51	9
Gypsum plastering	0.4	2
U-Value(W/m ² · K)	0.29	

옥상녹화 이외의 외부요인을 배제하기 위해 HVAC¹³⁾ 설비와 자연환기는 고려하지 않았으며 실내공간과 외기간의 침기량은 0.7 ac/h로 순환되

12) 국토해양부고시 제2010-421호.

Table 2. Simulation model properties.

Construction	Type	U-Value(W/m ² · K)
External walls	Composite wall	0.29
Glazing	Dbl Clr 6mm/13mm air	2.708
Flat roof	Aerated concrete slab 20cm+green roof 20cm	0.275
Ground floor	Adjacent to ground	

Table 3. Simulation model setup.

Occupancy(people/m ²)	0.1
Infiltration(ac/h)	0.7
Model dimension	10m x 10m x 3.5m
Climate data	Inchon 471120 IWEC
HVAC	no
Natural ventilation	no
Simulation period	June ~ August (summer)

도록 하였다. 전산모의를 위한 기후자료는 DOE에서 제공하는 IWEC¹⁴⁾ 형식을 적용하였으며 국내데이터 중에서 중부지방을 대표하는 인천지역(Inchon 471120 IWEC)을 선택하였다. 그 외의 전산해석모델 구축에 관한 물성치 및 기본설정은 다음 Table 2, 3과 같다.

3. 전산모의조건

EnergyPlus에서 제공하는 옥상녹화관련 에너지해석모형은 식생층과 토양층의 순열유동에 관한 CTF를 통해 모의되며 이때 Table 4에서 보이는 식물관련지표와 Table 5와 같은 토양관련지표에 대한 물성치를 통해 연산된다.

본 연구에서는 식물생육상태를 대표하는 식생지표인 LAI와 FVC, 식생고를 변수로 하여 전산모의 유형모델을 구축하고, 그 외의 식생, 토양관

Table 4. Soil index properties.¹⁵⁾

Roughness	Medium rough
Thickness (cm)	20
Conductivity (dry soil) (W/m · K)	0.4
Density (dry soil) (kg/m ³)	500
Specific heat (dry soil) (J/kg · K)	1000
Thermal absorptance	0.9
Solar absorptance	0.7
Visible absorptance	0.75
Saturation volumetric moisture	0.5
Residual volumetric moisture	0.01
Initial volumetric moisture	0.15

Table 5. Plant index properties.

Height of plant (cm)	10
LAI	2.05
Leaf reflectivity (albedo)	0.22
Leaf emissivity	0.95
Minimum stomatal resistance (s/m)	180

련지표의 물성치는 EnergyPlus의 기본설정을 적용하여 해석하였다. 토양층 두께를 20cm로 하였으며 그 외의 세부설정항목은 다음 Table 4, 5와 같다.

IV. 결과 및 고찰

1. 전산모의 유형모델

유형모델에 적용식물을 잔디로 설정하고 식물고 10~50cm까지 10cm 단위로 구분하여 총 5가지 유형을 설정하였다. 이와 연동되는 LAI, FVC는 각각 Penman-Monteith 방법과 FASST에서 제공하는 산식(①, ②)을 활용하여 유추하였다. 이에 따른 전산모의 유형모델의 식생관련지표변수는 Table 6과 같다.

13) HVAC : Heating, Ventilation, and Air Conditioning.
14) IWEC : International Weather for Energy Calculation.

15) EnergyPlus Input-Output Reference, US Department of Energy.

Table 6. Interrelation between vegetation index (LAI, FVC) and plant height.

Plant height (cm)	LAI	FVC
10cm	2.05	0.79
20cm	3.09	0.90
30cm	3.70	0.94
40cm	4.13	0.95
50cm	4.47	0.96

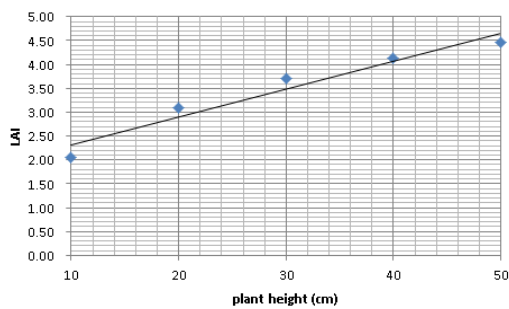


Figure 4. Functional relation between plant height and LAI.

식생캐노피모델 산식을 통해 산출한 식물고에 따른 LAI는 10cm에서 20cm로 증가하는 구간에서 약 51%의 급격한 증가를 보였으며 30cm에서 40cm로 증가하는 구간은 약 12%로 완만한 증가율을 기록했다.

반면 식물고에 따른 FVC는 전반적으로 완만한 증가세를 보였는데 식생이 10cm에서 20cm로 높아지는 구간에서는 14%가 증가하였지만 30cm 이상에서는 1%미만의 증가율을 보였다.

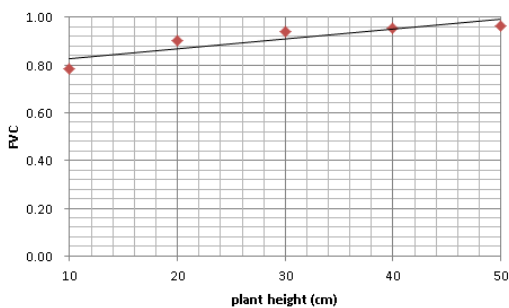


Figure 5. Functional relation between plant height and FVC.

이와 같이 LAI와 FVC의 식물고에 따른 변화 추이를 살펴본 결과 식물고가 10cm에서 20cm로 높아지는 구간에서 공통적으로 높은 식생지표 증가율이 산출되었으며 그 이상의 구간에는 상대적으로 완만한 증가세를 보이는 것으로 유추되었다.

2. 전산모의결과

일반적으로 EnergyPlus는 건물실내 거주 쾌적성을 기반으로 HVAC 설비 및 자연환기 등의 효율을 고려하여 실내온도를 유추한다. 이를 위해 작동온도, 복사온도 등을 산출하는데 Table 7에서와 같이 Niu와 Burnett(1998)이 제안한 풍속에 따른 복사온도지수¹⁶⁾를 적용하여 실내온도를 산출하게 된다.

Table 7. Correlation between radiative fraction and air velocity.¹⁷⁾

Air velocity(m/s)	<0.2	0.2 to 0.6	0.6 to 1.0
γ	0.5	0.4	0.3

$$T_{zone} = \frac{T_{op} - \gamma T_{MRT}}{(1 - \gamma)} \dots\dots\dots \textcircled{12}$$

여기서 T_{zone} 은 평균기온, T_{op} 은 평균작동온도, T_{MRT} 는 냉난방구역에 대한 평균복사온도를 나타내며, γ 는 복사온도지수를 의미한다. 본 연구에서는 옥상녹화에 적용되는 식물의 높이가 하절기 건물실내온도에 미치는 영향을 모의하기위해 식물고별 평균 건물 실내복사온도, 평균 건물실내 작동온도를 산출하여 실내온도변화를 유추하였다. Table 8, 9는 이에 대한 하절기 월별 평균값을 산출한 것이다.

월별 평균복사온도의 경우 식물고가 증가함에 따라 실내온도가 저감하는 경향을 보였으며 10cm 대비 50cm의 경우 6월이 0.44°C로 7, 8월에 비해 높은 복사온도 저감효과를 가져왔다. 여기에서

16) radiative fraction : 복사온도지수.
17) EnergyPlus Engineering reference.

Table 8. Mean of monthly indoor radiative temperature in difference in plant height from June to August (T_{MRT})

Plant height	June	July	August
10cm	28.64°C	29.67°C	31.37°C
20cm	28.34°C	29.48°C	31.17°C
30cm	28.30°C	29.45°C	31.15°C
40cm	28.33°C	29.42°C	31.13°C
50cm	28.20°C	29.40°C	31.15°C

Table 9. Mean of monthly indoor operative temperature in difference in plant height from June to August (T_{op})

Plant height	June	July	August
10cm	27.99°C	29.18°C	30.84°C
20cm	27.73°C	29.01°C	30.67°C
30cm	27.69°C	28.98°C	30.64°C
40cm	27.71°C	28.96°C	30.63°C
50cm	27.60°C	28.94°C	30.64°C

10cm에서 20cm로 증가하는 단위구간이 가장 높은 저감폭을 보였으며 이러한 현상은 7, 8월에도 유사하였다.

작동온도는 비 균일한 실제 환경에서 복사, 대류에 의한 열교환을 균일한 등온 흑체의 온도로 환산한 것을 의미하며 일반적으로 냉난방설비의 설정온도로 활용된다. 본 연구에서는 옥상녹화

식생지표가 실내온도에 미치는 영향을 도출하기 위해 HVAC 설비를 고려하지 않았으며 이로 인하여 하절기 냉방설정온도를 지정하지 않았다.

또한 자연환기도 배제하여 복사온도지수가 0.5로 설정되어 전반적으로 복사온도와 실내온도간의 일정한 작동온도분포를 보였다. 월별 평균작동온도는 식물고에 따라 평균복사온도와 유사한 변화추이를 보였으며 6월 식물고가 10cm에서 20cm로 증가할 때 0.26°C의 가장 큰 실내작동온도 저감결과가 산출되었다. 이러한 감소추이는 7, 8월에도 지속되는 것을 모의결과에서 유추할 수 있었다.

Table 10. Mean of monthly indoor temperature in difference in plant height from June to August (T_{zone})

Plant height	June	July	August
10cm	27.34°C	28.69°C	30.31°C
20cm	27.11°C	28.54°C	30.16°C
30cm	27.07°C	28.52°C	30.14°C
40cm	27.10°C	28.50°C	30.12°C
50cm	27.00°C	28.48°C	30.13°C

이렇게 산출된 평균복사온도와 작동온도를 통해 식물고별 하절기 평균 실내온도를 모의할 수 있으며 월별 평균값은 Table 10에서, 일별 변화

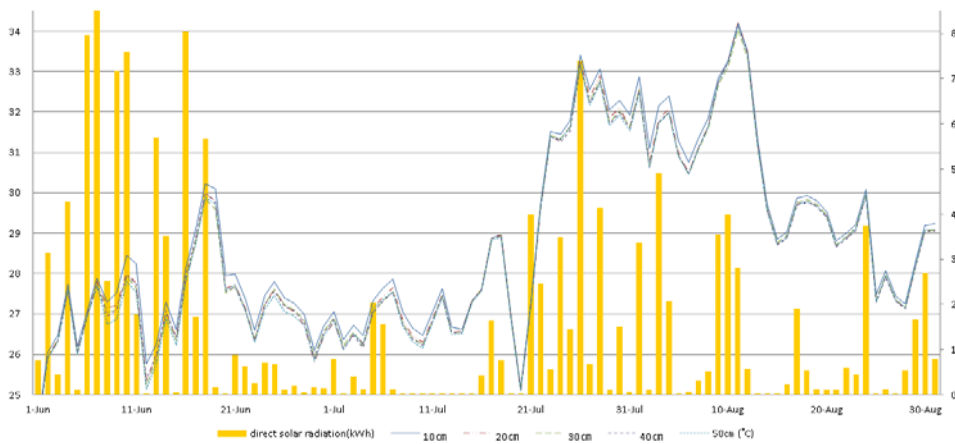


Figure 6. Mean of daily indoor temperature variation in difference in plant height from June to August.

추이는 Figure 6에서 살펴볼 수 있다. 앞서 해석된 온도지표들과 같이 10cm에서 50cm로 식물고가 증가할 경우 6월에 0.34°C로 가장 크게 실내온도가 저감되었으며, 10cm에서 20cm로 증가하는 구간에서 0.23°C의 높은 저감폭을 기록했다.

이는 건물실내온도가 식물고 및 LAI, FVC의 증가율과 유관한 것으로 보여지며 높은 LAI, FVC는 하절기 중에서 직접태양복사량이 많은 6월에 상대적으로 높은 온도 저감율을 유발한 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구는 건물에너지해석관점에서 옥상녹화시스템을 일반 단열재와 같이 단순 열관류율만을 고려한 전산모의방법에서 탈피하여 식생, 토양의 물리적 기작을 고려한 복합적인 열해석 전산모의기법을 제안하였다. 또한 식물의 생육상태를 대표하는 LAI를 기준으로 식물고, FVC 등의 상관관계를 규명하고 식물고를 변수로 하여 식생지표를 전산모의 유형모델에 적용하였다.

전산모의는 FASST 모델이 적용된 EnergyPlus를 통해 수행되었으며 식생층(F_f)과 육성층(F_g)으로 구분된 녹화면의 잠열 및 현열유속에 대한 단일 결과식이 도출되었다. 이로써 국내기후에서 옥상녹화시스템의 식생지표가 실내기온에 미치는 영향을 도출할 수 있었다. 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. Penman-Monteith 방법과 FASST 모델에서 자연상태의 잔디에 대한 LAI, 식물고, FVC의 상관관계를 유추한 결과를 살펴보면 10cm에서 20cm로 식물고가 증가할 경우 LAI는 약 51%, FVC는 14%로 가장 높은 증가율을 보였다. 이는 관련 산식이 저 식물고의 식생에 최적화된 모형이기 때문에 발생하는 결과로 사료된다.

2. 옥상녹화시스템의 식생지표가 건물실내온도에 미치는 영향을 도출하기 위해 전산해석모델 구축 시 HVAC 설비 및 자연환기를 고려하지 않

아 복사온도지수가 0.5로 설정되어 복사온도, 작동온도, 실내온도가 균일한 변화폭을 기록하였다.

3. 하절기 직달태양복사량이 다른 기간에 비해 많은 6월의 경우 10cm에서 50cm로 식물고가 증가할 경우 0.34°C의 가장 높은 실내온도 저감율을 보였다. 특히 10cm에서 20cm로 증가하는 구간에서 0.23°C로 단위구간 중 가장 높은 저감폭을 기록했는데 이는 LAI, FVC가 가장 높은 상승률을 보인 것에 기인한다고 볼 수 있다.

4. 포화, 잔류, 초기 습도지표가 일정하게 유지관리되는 경량형 옥상녹화시스템의 경우 LAI, FVC, 식물고 등의 식생관련지표가 하절기 실내온도저감에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 해석되었다.

5. 전산해석모델이 국내신축 주거건물의 외피 열관류율을 충족하는 조건에서 해석되어 낮은 실내기온 조절효과를 산출한 것으로 사료되며 상대적으로 열악한 외피 열관류율을 보이는 기존건물 리모델링의 경우 옥상녹화시스템이 보다 높은 실내기온 조절효과가 예상된다.

본 연구는 전산모의가 하절기만을 대상으로 이루어져 옥상녹화시스템이 연간 실내온도변화에 미치는 영향과 LAI, FVC, 식물고 외의 식생 및 토양관련지표와 건물에너지평형 간의 상관관계를 규명하는데 한계를 나타냈다. 이는 후속연구를 통해 제고되어야 하며 옥상녹화시스템의 건물외피변수, HVAC설비, 자연환기 등 실내쾌적도 향상을 위한 능동, 수동형 설계기법과의 비교 분석 등 다양한 관련연구가 예상된다. 무엇보다 국내기후환경을 고려한 정량적인 전산모의와 모니터링이 병행된 옥상녹화모델연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 “생태도시 구현을 위한 생태환경복원에 기반한 녹색기술개발”(과제번호 : 2010-A000-

0155) 교내연구지원으로 수행된 결과의 일부분임.

인 용 문 헌

- BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme), Dickinson, R.E., Henderson-Sellers, P.J. Kennedy, and M.F. Wilson. 1986. BATS for the NCAR community climate model. NCAR Technical Note, TN-275+STR.
- SiB (Simple Biosphere model). Sellers, P.J., Y. Mintz, Y.C. Sud, and A. Dalcher. 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of Atmospheric Science*, 43(6), pp. 505-532.
- FASST (Fast All Season Soil Strength), Frankenstein, S., and G. Koenig. 2004. FASST Vegetation Models. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold regions Research and Engineering Laboratory, ERDC/CRREL Technical Report TR-04-25.
- Joseph T. Woolley, (1971) *Reflectance and Transmittance of Light by Leaves*. *Plant Physiology*.
- EnergyPlus Engineering Reference, US Department of Energy.
- EnergyPlus Input-Output Reference, US Department of Energy.
- 석호태 · 양정훈 · 정태웅. 2008. 학교건물에서의 외피녹화에 따른 에너지성능 평가에 관한 연구. *한국태양에너지학회 논문집* 28(6) : 40-47.
- 한승원 · 김형숙 · 이동우. 2010. 인공지반 녹화용 지피식물의 열성능 평가. *한국건축친환경설비학회 춘계학술발표대회* : 235-239.
- 황효근 · 송두삼. 2009. 공동주택 단지 내 지반 특성 및 지반 구성에 따른 열적 특성에 관한 연구. *한국태양에너지학회 논문집* 29(5) : 88-97.