

옥상녹화시스템 유형별 건물에너지 절감 및 경제성 분석

김정호* · 윤용한**

Economic Analysis and Energy Reduction by the Types of the Green Roof

Jeong Ho Kim* · Yong Han Yoon**

요약 : 국내 시공되고 있는 옥상녹화시스템 유형별 건물에너지 절감 및 경제성을 분석하였다. 에너지 절감량 예측은 전열량 시뮬레이션을, 경제성 분석은 생애주기비용 평가를 실시하였다. 분석대상 유형은 국내 건물에 적용되고 있는 옥상녹화 유형과 미적용 유형을 포함하여 총 6개 유형으로 설정하였다. 유형별 분석 결과, 외표면 온도값은 옥상녹화 미적용인 type A가 다른 5개 유형보다 겨울철 평균 1.03℃ 낮았고 여름철에는 0.89℃ 높았다. 내표면 온도값은 type A가 겨울철은 0.13℃ 낮았고 여름철은 0.06℃ 높았다. 계절별 전열량은 type F(0.77~5.96W/㎡) > type B(0.78~6.33W/㎡) > type E(0.80~6.92W/㎡) > type D(0.88~7.21W/㎡) > type C(0.90~7.58W/㎡)였다. 연간 단위면적당 전열량 절감률은 type F(26%) > type B(24%) > type E(19%) > type D(16%) > type C(13%)의 순이었다. 초기투자비, 보수교체비, 해체 및 폐기비를 합한 생애주기비용(LCC)은 type B > type E > type C > type D의 순으로 분석되어 단열재를 적용한 type B가 가장 경제적으로 분석되었다.

주제어 : 표면온도, 시뮬레이션, 생태면적률, 생애주기비용평가

ABSTRACT : Building energy reduction and economical efficiency is analyzed per different types of green roof system constructed in Korea. Heat flow simulation is performed for energy reduction prediction, and LCC evaluation is performed for economical efficiency prediction. Total of six roof types are used for evaluation including one non green roof. Average exterior surface temperature value for type A is lower by 1.03℃, and it is higher by 0.89℃ in summer. Average interior surface temperature value for type A is lower by 0.13℃ where it is higher by 0.06℃ in summer. Total annual energy reduction rate from both air conditioner and heater are in the order of type F(26%) > type B(24%) > type E(19%) > type D(16%) > type C(13%). LCC including the initial investment, operation & replacement fee, waste cost is analyzed in the descending order: type B > type E > type C > type D.

Key Words : surface temperature, simulation, ecological area rate system, life cycle cost(LCC)

* 건국대학교 자연과학대학 산림과학과 외래교수(Lecturer, Dept. of Forest Sci., College of Natural Sci., Konkuk University)

** 건국대학교 자연과학대학 산림과학과 교수(Professor, Dept. of Forest Sci., College of Natural Sci., Konkuk University),
교신저자(E-mail: hoyal209@chol.com, Tel: 043-840-3538)

I. 서론

외부 열환경에 영향을 주는 기후 인자들로써 기온, 습도, 일조 및 일사, 강수량, 풍향 및 풍속 등이 있으며, 이러한 기후요소는 위도, 지형, 해류와 같은 천문지리학적 요인과 대기환류, 기압과 같은 기상학적 요인, 그리고 녹지, 건축물, 포장상태 등 물리적 환경요인에 의해 영향을 받는다.

최근 도시의 발달로 건물과 불투수포장면 증가는 도시 열환경에 큰 악영향을 미치고 이런 영향으로 도시열섬현상이 발생하기에 이르렀다. 도시 열섬 완화를 위해 다양한 방법이 모색되고 있지만, 바람길과 녹지의 확보가 가장 중요한 요소이다. 녹지 확보가 지상을 중심으로 넓게 이루어진다면 가장 양호하겠지만, 녹지 확보공간이 불충분한 도심지역에서는 옥상녹화 등의 건축물 녹화가 최선의 대안으로 여겨진다.

서울시 도시화지역의 면적은 약 363.31km²이고, 녹화가 가능한 평탄한 옥상 및 지붕면적은 도시화 지역의 70%에 해당하는 약 253.59km²으로 보고되었다. 이중 현실적으로 녹화가 가능한 건축물의 옥상 및 지붕면적은 200km² 이상으로 상당한 옥상 녹화 도입증대가 예측되고 있다(박준석 외, 2010). 특히 옥상녹화는 도시환경 개선뿐 아니라, 건물에너지 절감 측면에서도 매우 유용한 특성을 가지고 있다. 즉 옥상녹화는 옥상에 녹지의 창출과 더불어 건물 외피의 성격으로 외단열 형태이며, 이는 건물에너지 절감에 기여하고 있을 것으로 예측된다. 지역과 토지이용유형별로 차이는 발생할 수 있지만, 여름철의 경우 일반 옥상층과 옥상녹화면의 온도는 최고 5~8℃ 정도 차이가 난다(유대중, 2007; 김정호·윤용한, 2011)는 연구결과도 제시되고 있다.

옥상녹화를 생태적 복원차원 이외에 건물에너지 절감차원에서 접근하면 주로 대기온도의 완화, 건물에너지 절약 등으로 요약할 수 있는데, 구체적으로 살펴보면, 옥상녹화는 크게 최상부 식물의 증산작용에 의한 대기 온도완화와 시스템에 의한 건물에 미치는 단열성능으로 구분할 수 있다. 박재철(2004)의 연구자료에 의하면 식물은 토양에서 수분을 흡수하고 광합성을 통해 잎으로 수분을 증발시키는 데 여름철 하루에 약 2,400갤런으로 약 9,084리터라는 엄청난 양의 수분을 증발한다고 보고하였다. 수목이 하루에 100갤런의 물을 증발시키는 것을 기계적으로 환산하면, 약 2,500kcal/h의 에너지를 소비하며 하루 19시간 작동하는 에어컨 5대의 양과 같다. 녹지가 가지는 증산작용을 종합해 보면, 수목 한 그루가 하루에 100갤런의 증산작용을 하며 1에이커의 초지는 하루에 2,400갤런의 증산작용을 하므로 1에이커의 초지는 수목 24그루의 효과와 같다.

지금까지의 옥상녹화 연구는 주로 생태적 측면의 연구와 기온저감에 대한 연구가 주로 진행되었는데, 저에너지 건축물 및 도시 조성 차원에서 건물에 미치는 에너지 절감효과에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 국내에서는 김현수 외(1998)에 의해 옥상녹화시스템에 대한 열성능 시뮬레이션의 필요성과 대략적 방법론이 제시되었고, 이후 장희경 외(2008)에 의해 옥상녹화가 건물에 미치는 에너지절감효과가 분석되기는 했으나, 이는 토양과 식재만을 고려하여 제시되었다. 유대중(2007)은 단열재 없이 토심의 두께만을 대상으로 하여 두께 50mm 증가 시 열관류율은 약 4.4~12.8%씩 증가한다고 보고하고 있다. 경제성측면에서 김수봉·장중근(2007)이 옥상녹화에 대한 경제성 추론의 개략적 가능성만을 제시한 연구가 있었지만,

본 연구처럼 옥상녹화시스템 유형별 절감량을 비교·예측하고, LCC 기법을 고려해 경제성을 검증한 연구는 없었다.

본 연구는 저탄소 도시와 그린빌딩 구현을 위해 건물옥상녹화가 건물에너지 절감에 미치는 영향을 검증하고 아울러 국내 시공되고 있는 옥상녹화시스템이 건물에너지 절감에 미치는 영향 및 경제성 비교·분석을 통해 향후 서울시와 같은 대도시지역의 도시환경 개선과 건물에너지 절감을 실현할 수 있는 경제적 옥상녹화시스템 개발의 기초자료 제공을 목적으로 하였다.

II. 선행연구 검토

옥상녹화와 관련된 기존 연구는 크게 정책적 대안, 활성화 측면과 기술적 측면으로 구분할 수 있다. 정책적 대안 및 활성화 측면 연구로는 인공지반 녹화의 문제점 및 활성화 방안(이행렬, 2000; 이재준 외, 1996; 김유일 외, 1998; 김동찬, 2000) 등이 있으며, 기술적 측면에서는 식재식물 및 시공기술 개발연구(최진우 외, 2009; 심경구·허근영, 2000; 이영무, 1998) 등이 주로 많고 옥상녹화의 열적 특성 및 LCC에 의한 경제성 평가에 대한 연구는 매우 부족하다.

옥상녹화가 도시환경 개선에 미치는 영향은 첫째, 토심 내에서 동·식물이 서식할 수 있는 공간

의 제공(권전오, 2008), 둘째, 도시미기후의 개선(이춘우 외, 2009; 김수봉·장중근, 2007), 셋째, 우수저류 효과, 넷째, 건물 냉난방비 절약 및 에너지 손실 절감(梅干野 외, 2000; Suh et al., 2003; 김수봉·장중근, 2007; 장희경 외, 2008), 다섯째, 알베도 개선(서응철, 2007) 등으로 요약할 수 있다.

옥상녹화에 의한 건물에너지 절감에 대해 시뮬레이션을 통해 결과를 도출한 유대중(2007)은 토심이 300mm인 옥상녹화시스템의 경우 열관류율은 약 0.124W/m·K로 나타나며, 이는 건물내부의 온도 차이를 발생시켜 기존의 냉·난방 절감효과를 가질 수 있다고 보고하였다. 그러나 국내의 다양한 옥상녹화유형별 비교는 하지 않았으며, 단순히 토심의 두께에 따라 열관류율의 차이를 제시하였다.

옥상녹화유형은 관리 및 구성에 따라 저관리·경량형, 중량형, 혼합형으로 구분할 수 있으며, 인공지반 위에 조성되는 옥상녹화는 하중과 배수, 배수로 인한 보수문제, 유지관리의 문제, 생태적 측면의 문제, 식물생육의 문제 등 다양한 문제점을 해결하고자 많은 노력을 기울여 기술을 발전시키고 있다. 최근 저에너지 측면에서 옥상녹화의 중요성이 부각되고 있지만, 단순히 옥상녹화의 에너지절감성만을 증대시키는 것은 여러 가지 문제점을 야기할 수 있으므로 생태적 측면, 도시환경

〈표 1〉 시뮬레이션 개요

구분	분석 항목		
경계조건	온도	실내	24℃(24시간 연속 냉난방)
		실외	TRNSYS Weather Data에 의한 연중시간별 온도 기준
	표면 열전달율	실내	7.7W/m ² K
		실외	25.0W/m ² K
대상부위	분석대상 구조체 규격: 가로 × 세로를 1m × 1m로 설정		

적 측면, 물순환적 측면, 에너지적 측면 등을 종합적으로 고려하여 옥상녹화시스템이 개발·적용되어야 할 것이다. 생태적 측면에서의 기반 및 식물 선정은 많은 연구가 진행되어 왔으므로 본 연구는 국내 옥상녹화시스템의 대표적 유형을 선정하여 에너지측면에서 절감성을 비교하여 향후 최적의 옥상녹화시스템 기술 개발 시 기초자료로 활용하도록 하였다.

Ⅲ. 시뮬레이션 개요 및 방법

1. 시뮬레이션 개요 및 기본조건

본 연구의 시뮬레이션을 위해 전열해석 프로그램은 PHYSIBEL을 사용하였으며, 모듈은 3차원 정상상태로 전열해석을 실시하였다. 일반적으로 실측을 병행하여 실시하여야 하나, 유형별 전열량을 통한 에너지절감 정도를 비교하기 위해 시뮬레이션에 국한하여 실시하였다. PHYSIBEL 프로그램은 국내·외에서 에너지성능 평가 시 흔히 이용되고 있는 프로그램이며, 옥상녹화에 의한 에너지절감에 대해 연구한 김현수 외(1998)와 유대중(2007) 등 많은 연구자들에 의해 검증된 프로그램이다.

연간 에너지소비특성 해석을 위한 해석조건으로는 한국태양에너지학회의 표준기상데이터를 기준으로 표면열전도율은 실내 $7.7\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$, 실외 $25\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 로 하였으며 실내온도조건은 24°C 로 하였다. 이외 실내부하 즉 조명, 인체 및 기기부하 등은 고려하지 않았다. 연간 에너지 절감 특성 해석조건은 <표 1>에 제시하였다. 시뮬레이션에 적용된 물성치는 기존 연구결과에서 제시된 값을 종합하여 <표 2>와 같이 설정하였다.

<표 2> 시뮬레이션 적용 물성치

type	구분	두께	열전도율	밀도
		mm	$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$	kg/m
A	콘크리트	210	1.6	2200
	단열재	110	0.035	20
B	식재	35	0.135	1000
	그린블록	100	0.18	900
	방근시트	2	0.33	920
	GB배수판	50	0.5	980
	콘크리트	210	1.6	2200
	단열재	110	0.035	20
C	식재	35	0.135	1000
	펄라이트	70	3.5	2800
	부직포	2	0.05	120
	화산석	80	3.5	2800
	세덤블록	80	0.5	980
	콘크리트	210	1.6	2200
D	단열재	110	0.035	20
	식재	35	0.135	1000
	펄라이트	115	3.5	2800
	부직포	2	0.05	120
	배수판	35	0.5	980
	콘크리트	210	1.6	2200
E(F)	단열재	110	0.035	20
	식재	35	0.135	1000
	마사토	85(300)	0.55	1600
	펄라이트	30	3.5	2800
	부직포	2	0.05	120
	배수판	35	0.5	980
	콘크리트	210	1.6	2200
	단열재	110	0.035	20

2. 해석 방법

옥상녹화구조 및 재료에 따른 구조물에 미치는 영향을 알아보기 위해 다양한 시뮬레이션 유형을 선정할 필요가 있어, 재료 및 토심구조가 상이하게 적용되고 있는 국내의 대표적 옥상녹화시스템 5개 유형을 선정하여 유형별 에너지 절감효과를 분석하였다. 옥상녹화는 일반적으로 최상부 지피 식물이 위치하는 식생층, 토양층, 단열층으로 구분되는데(장희경 외, 2008), 유형별 에너지절감효과를 정량적으로 분석하기 위해 식재층 재료, 토

〈표 3〉 옥상녹화 유형별 구조

(단위: mm)

유형		유형별 주요 구조
미적용	type A	콘크리트(210)+단열재(110)
식생블록	type B	초본+그린블록(100)+방근시트+단열배수판+콘크리트(210)+단열재(110)
인공토양	type C	초본+펄라이트(70)+부직포+화산석+세덤블록+콘크리트(210)+단열재(110)
	type D	초본+펄라이트(85)+배수용 펄라이트(30)+부직포+조경배수판+콘크리트(210)+단열재(110)
마사토	type E	초본+마사토(80)+펄라이트(30)+부직포+조경배수판+콘크리트(210)+단열재(110)
	type F	초본+마사토(300)+펄라이트(30)+부직포+조경배수판+콘크리트(210)+단열재(110)

양층 재료, 배수판 재료, 단열재 적용유무 등을 고려하여 5개 type을 설정하였으며, 이외 옥상녹화가 미적용된 type을 포함하여 총 6개 type의 시물레이션을 실시하여 미적용 대비 옥상녹화의 에너지절감효과 및 옥상녹화시스템별 에너지절감 차이를 정량적으로 제시하였다.

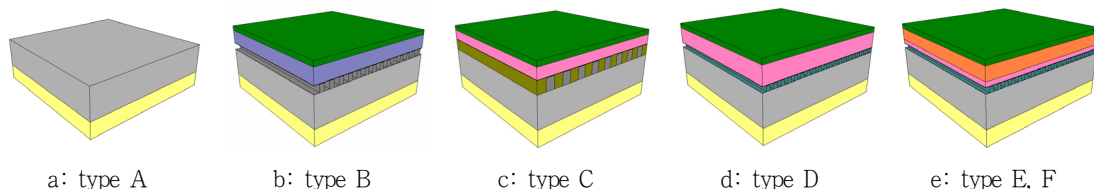
옥상녹화시스템 유형은 저관리경량형으로 type B, C, D, E를, 관리중량형으로 type F를 설정하였다. 시물레이션에 적용된 type별 구조를 구체적으로 제시하면, 옥상녹화가 미적용된 type A는 콘크리트 210mm, 단열재 110mm이고, 이외 5개 type에서도 건물구조는 type A와 동일하게 설정하였다. type B 구조는 식재층+GBblock(우수저류 성능형 단열판)+방근시트+GB배수판, type C 구조는 식재층+펄라이트(70mm)+부직포+화산석+세덤블록, type D 구조는 식재층+펄라이트(85mm)+배수용 펄라이트(30mm)+부직포+배수판, type E 구조는 식재층+마사토(80mm)+펄라이트(30mm)+

부직포+배수판, type F 구조는 식재층+마사토(300mm)+펄라이트(30mm)+부직포+배수판이었다. 〈표 3〉과 〈그림 1〉은 옥상녹화유형별 단면상세 내역 및 구조를 제시한 것이다.

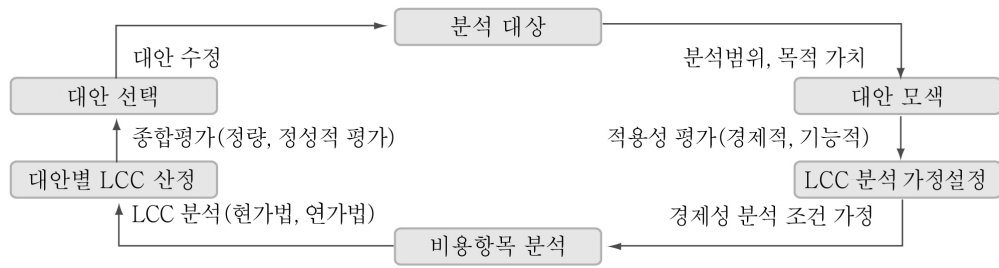
3. 경제성 분석

생애주기비용(LCC)은 수명주기 동안에 발생하는 모든 비용 즉, 계획, 설계, 시공, 운영 및 폐기 처분 등에 소요되는 총 비용으로 적용시스템의 수명가를 기준으로 한 정확한 경제성 평가가 있어야만 적정 옥상녹화시스템 유형의 최종 결정이 이루어질 수 있을 것이다(윤종호 외, 2009).

$$\begin{aligned}
 \text{LCC: Summation of Total Costs during LC} \\
 &= \sum(\text{Total Costs during LC}) \\
 &= \text{Planning Cost} + \text{Design Cost} \\
 &\quad + \text{Construction Cost} + \text{Running Cost} \\
 &\quad + \text{Demolition Cost}
 \end{aligned}$$



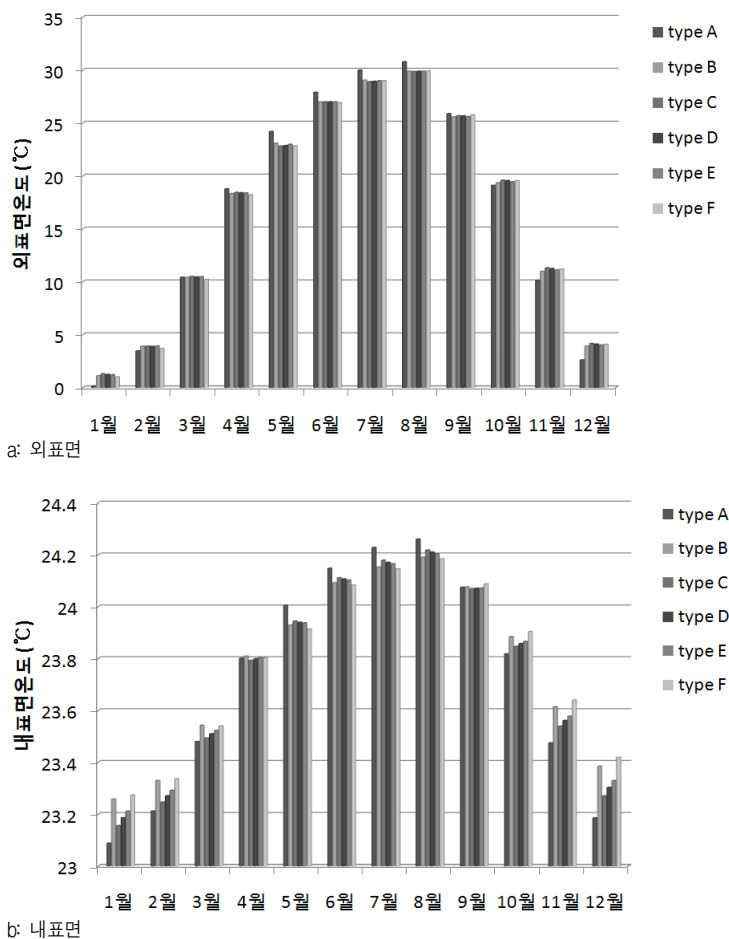
〈그림 1〉 옥상녹화 유형별 모델링 구조



〈그림 2〉 LCC 분석절차 모식도

〈그림 2〉는 LCC의 분석 절차를 도식화한 것이다. LCC 분석은 분석 목표 및 범위를 설정하고 비교 대안을 선정하여 분석 영향인자들인 할인율, 분석기간, 비용항목 등을 결정하여 대안별 LCC를

산정한다. 비용산정방법에는 현가법과 연가법이 있는데, 현가법은 내용연수가 일정할 때, 연가법은 비교대안의 내용연수가 상이할 때 적합하다. 본 연구에서는 분석 기간인 내용연수가 동일하기



〈그림 3〉 연간 월별 표면 평균온도 분포

〈표 4〉 옥상녹화시스템별 비용 산출근거

구 분	기준값	산출근거
초기공사비	재료비/노무비/경비	옥상녹화시스템별 최초 시공되는 공사비
유지관리비	시비/관수비	연간 식재에 제공되는 시비와 관수비
해체 및 폐기비	해체비/운반비	옥상녹화시스템별 해체 및 운반비

때문에 현가법을 사용하였다.

분석기간은 수명주기를 얼마동안으로 설정할 것인가에 대한 가정이다. 분석기간의 가정에는 시설물 또는 시설물 부품의 수명주기에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 분석기간을 40년으로 설정하였는데, 이는 건축물에 관련된 모든 건물(부속설비물 포함)과 구축물은 기준 내용연수를 40년으로 한다는 법적 조건에 근거한 것이다. 할인율은 일반적 LCC 분석 시 사용되는 실질할인율을 적용코자 하며, 이를 위해 최근 10년간(2000년~2009년)의 국내 이자율과 물가상승률에 한국은행이 2010년에 발표한 통계자료로부터 산출한 평균 실질할인율 1.52%를 적용하였다.

LCC 비용항목은 초기공사비, 유지관리비, 해체 및 폐기비이며 각 비용의 산정기준은 〈표 4〉에 정리하였다. 초기공사비는 옥상녹화시스템의 최초 공사비로 재료비, 노무비, 경비로 산출하며 유지관리비는 연간 식재에 제공되는 시비와 관수비를, 해체 및 폐기비는 옥상녹화를 해체하는 데 소요되는 비용과 운반비로 산출하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 연간 표면 평균온도 변화

외피의 표면온도는 재료 고유의 열용량과 축열성에서 비롯되는 열적 응답성과 재료표면을 통해 흡수 혹은 반사되는 것으로 추정된다(최동호 · 이

부용, 2007). 즉 외기온도가 동일한 조건일지라도 지표면의 상태에 따라 표면온도 차이가 발생한다는 것이다. 일반적으로 콘크리트는 다른 물성치에 비해 축열성과 열전달 특성이 높은 특징이 있는데, 최상층 콘크리트 슬래브 하부의 표면온도값 변화를 연구한 최동호 · 이부용(2008)에 의하면 콘크리트는 일간 온도변화 폭이 5.1℃로 석재, 목재, 알루미늄패널보다 약 2배 이상 큰 것으로 분석되었다. 이는 콘크리트로 외피마감이 된 지역이 다른 지역에 비해 냉난방에 필요한 에너지 소비가 크다는 것을 의미한다.

옥상녹화가 미적용된 type A는 콘크리트 표면으로 외기온도에 따라 평균온도 분포가 옥상녹화가 적용된 다른 type들에 비해 겨울철인 1월에는 평균 1.03℃(0.86℃~1.15℃) 낮았고, 여름철인 8월에는 평균 0.89℃(0.86℃~0.91℃) 높았다.

옥상녹화시스템 유형별로 살펴보면, 겨울철인 1월에는 type F의 평균온도가 1.01℃로 가장 낮았고 type B 1.11℃, type E 1.20℃, type D 1.23℃, type C 1.30℃의 순이었다. 여름철인 8월에는 type F가 29.91℃로 가장 높았고 type B 29.90℃, type D와 E가 29.87℃, type C가 29.85℃의 순이었다.

외표면 온도는 표면상태에 따라 내부로 전달되는 온도값을 결정짓는 요인이기는 하지만, 구조체 내부구조에 의해 많이 좌우되므로 에너지 절감 및 전열량과 반드시 비례하지는 않는다. 그러나 외표면 온도가 겨울철에는 높게, 여름철에는 낮게 형성되는 표면마감재가 건물에너지 소비에 미치는

영향은 긍정적인 것으로 추정된다. 이는 최동호·이부용(2008)이 건물 외피마감재에 의한 열특성에서 검증한 바 있다.

본 시뮬레이션에서는 실내온도조건을 24℃로 설정해 놓고 시뮬레이션을 실시했기 때문에 내표면의 온도는 외부의 온도 및 전열량에 의해 결정되는 것보다 내부에서 24℃로 유지되는 에너지의 힘에 의해 거의 동일하게 나타나고 있었다. 만일, 시뮬레이션의 조건을 24℃로 설정하지 않고 실시하였을 경우에는 내표면의 온도차이가 더 크게 발생할 것이다. 그러나 일반적 시뮬레이션에서는 내부 온도를 설정하고 해당 온도 유지를 위해 지속적으로 에너지가 투입되는 것을 가정하고 실시한다.

내표면 평균온도값 분석 결과, 겨울철인 1월에 type A는 23.09℃이었고 type F가 23.27℃, type B 23.26℃, type E 23.21℃, type D 23.19℃, type C 23.16℃ 등의 순이었다. 즉 옥상녹화를 적용한 유형이 적용하지 않은 유형보다 평균 0.13℃(0.07℃~0.19℃) 낮았다. 여름철인 8월에는 type A가 24.26℃로 옥상녹화시스템이 적용된 5개 type보다 평균 0.06℃ 높았다.

2. 일간 옥상녹화시스템 유형별 전열량 해석

구체적 전열량 해석 및 유형별 현황을 살펴보기 위해 계절별 3일(14일, 15일, 16일) 동안의 전열량 흐름을 나타낸 것이 <그림 4>이다. 전열은 열의 흐름으로 크게 정상상태와 비정상상태로 구분할 수 있으며, 전열현상이란 임의의 고체재료 한쪽경계면에서 열류 변화가 재료의 축열 규모에 따라 전열량의 감소와 시간지연을 일으켜 반대쪽 경계면으로 경로를 찾아가는 과정으로 전열량은 외기온도에 따른 외표면의 온도, 에너지 자극, 구조

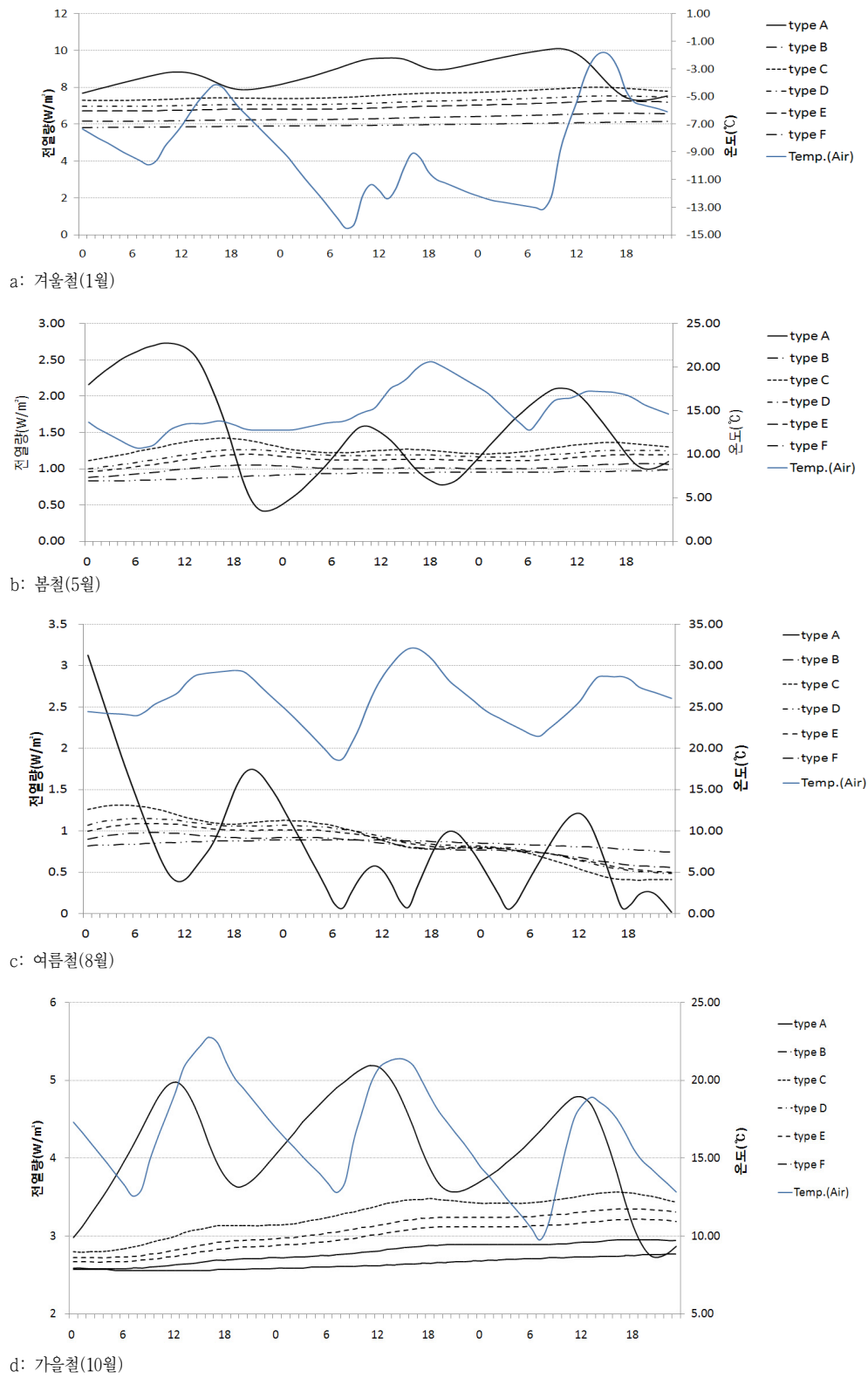
체내 각 재료의 특성에 따라 다르게 나타난다(이병현, 2007). 전열량이 높다는 것은 열전달률이 높아 에너지부하가 크다는 의미이다. 즉, 전열량이 낮은 것이 열전달률이 낮아 단열능력이 높고 에너지 절감률이 높은 것이다.

시뮬레이션 결과, 겨울철에는 옥상녹화 미적용 유형인 type A가 평균 전열량이 8.75W/㎡로 가장 높았고, type C(7.58W/㎡), type D(7.21W/㎡), type E(6.92W/㎡), type B(6.33W/㎡), type F(5.96W/㎡)의 순이었다. 즉 옥상녹화 미적용 유형인 type A 대비 type F는 31.97%, type B는 27.67%의 절감률을 보이고 있다. 봄철인 5월의 경우에도 type A가 1.54W/㎡로 가장 높았고 type F(0.92W/㎡), type B(1.01W/㎡), type E(1.13W/㎡), type D(1.19W/㎡), type C(1.28W/㎡) 순으로 type F가 type A 대비 전열량이 40.25% 감소하여 에너지 절감효과가 가장 높을 것으로 예상되었다.

여름철인 8월을 대상으로 시뮬레이션을 실시한 결과, 옥상녹화 미적용유형인 type A가 1.74W/㎡였고, type F 0.77W/㎡, type B 0.78W/㎡, type E 0.80W/㎡, type D 0.88W/㎡, type C 0.90W/㎡였고, 유형별 절감률은 type F가 55.53%로 가장 높았고 다음으로 type B(55.31%), type E(54.04%), type D(52.40%), type C(48.40%) 순이었다.

가을철(10월) 분석 결과, type A가 4.12W/㎡였고, 옥상녹화시스템 유형에서는 type F가 2.64W/㎡로 type A 대비 전열량 절감률이 35.86%로 단열능력이 가장 높았고, type B 2.79W/㎡(절감률 32.28%), type E 2.98W/㎡(절감률 27.69%), type D 3.08W/㎡(절감률 25.14%), type C 3.27W/㎡(절감률 20.63%) 순이었다.

계절별 3일간의 전열량 시뮬레이션을 통한 성능



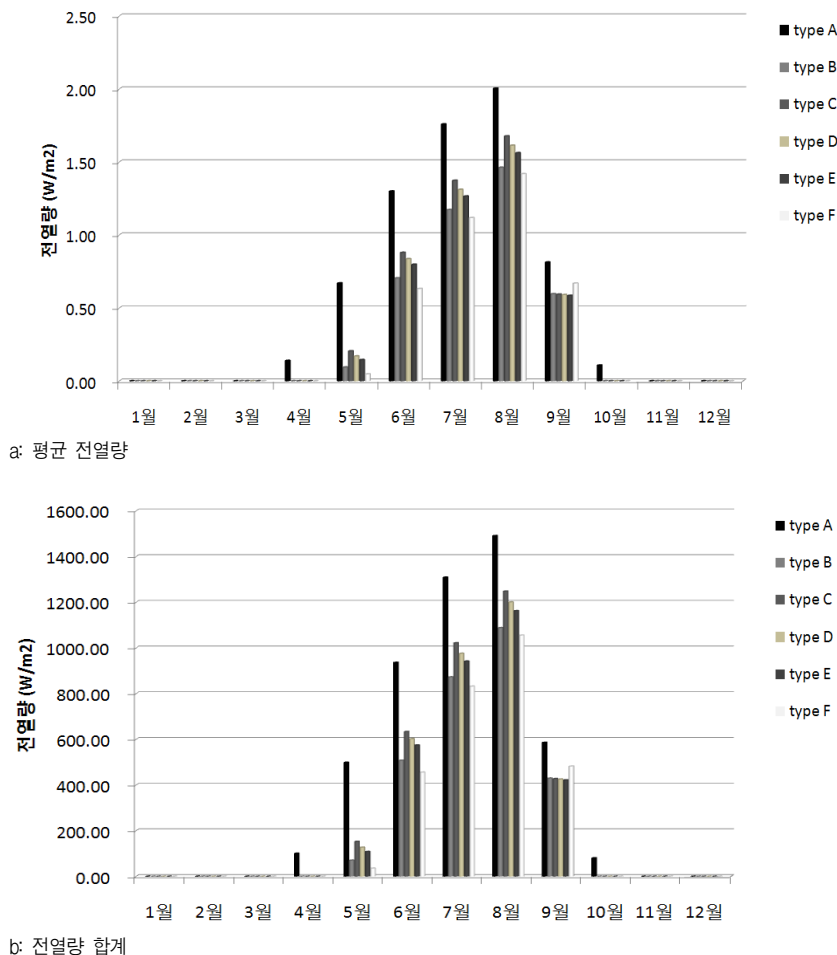
〈그림 4〉 계절별 일간(3일간) 외기온도 및 전열해석 결과

을 검토한 결과, type F > type B > type E > type D > type C > type A 순으로 전열량 절감률이 높았다. 즉 type F의 옥상녹화시스템이 건물에 미치는 에너지 절감률이 가장 크다고 예측할 수 있다.

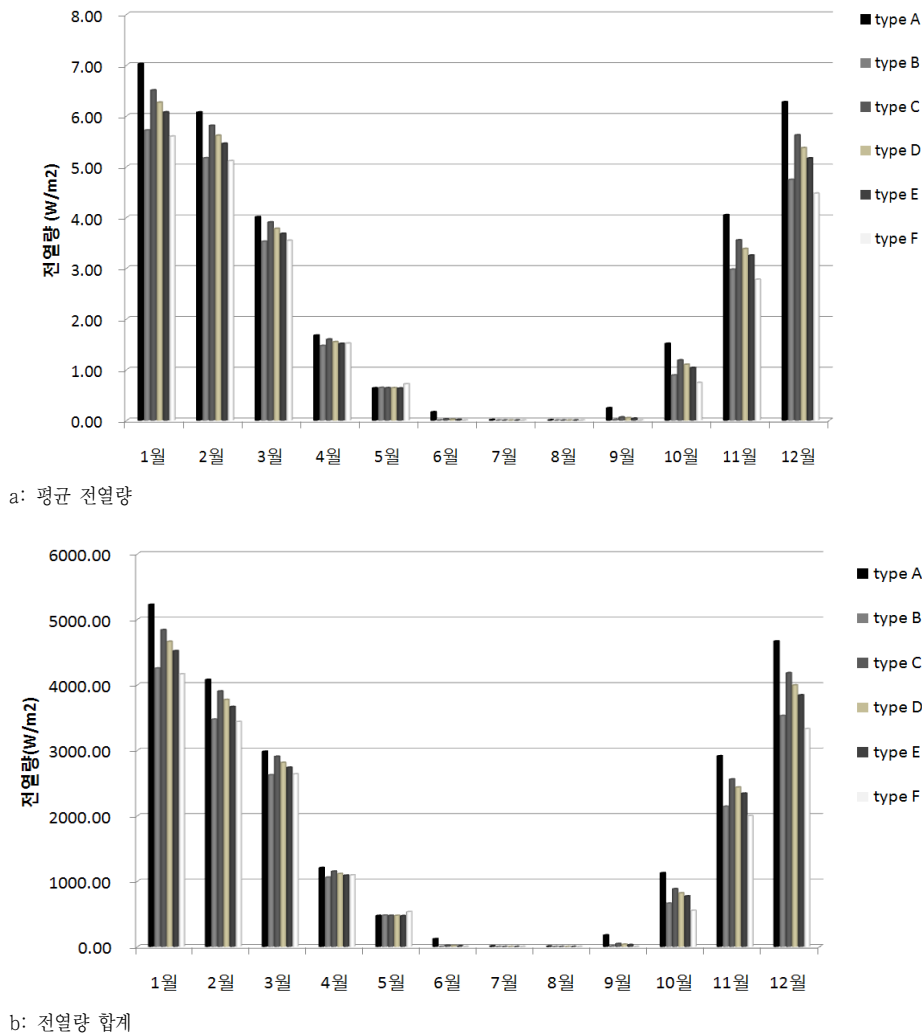
3. 연간 전열량 해석 및 절감률

연간 전열량을 해석하여 이를 통해 연간 에너지 절감률을 산정하였다. <그림 5>는 냉방기의 전열량을 해석한 그래프로 평균 전열량과 전열량 합계를 제시한 것이다. 냉방기의 경우 평균 전열량

은 type A가 0.57W/m²였고, type F 0.32W/m², type B 0.34W/m², type E 0.36W/m², type D 0.38W/m², type C 0.39W/m²의 순이었다. 옥상녹화 미적용 유형인 type A 대비 연간 냉방기간 동안의 평균 전열량 감소율은 type F가 42.8%로 가장 양호하였고, type B 40.7%, type E 35.9%, type D 33.4%, type C 30.4%의 순이었다. 단위면적당 옥상녹화가 건물에 미치는 영향은 미적용(type A)보다 냉방기간 동안 평균 37%의 전열량 절감률을 보였고, 식재토심이 300mm 이상에서는 40%의 전열량 절감률을 나타내고 있다.



〈그림 5〉 유형별 냉방기 전열량 해석 결과

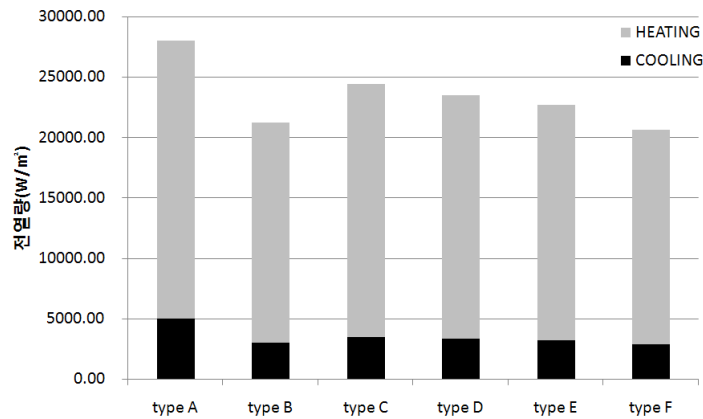


〈그림 6〉 유형별 난방기 전열량 해석 결과

난방기의 경우 평균 전열량은 type A가 2.64W/m²였고, type F 2.04W/m², type B 2.10W/m², type E 2.24W/m², type D 2.31W/m², type C 2.41W/m²의 순이었다(〈그림 6〉).

즉 옥상녹화 미적용 유형인 type A 대비 연간 난방기간 동안 평균 전열량 절감률은 type F가 22.7%로 가장 양호하였고, type B 20.6%, type E 15.2%, type D 12.3%, type C 8.7%의 순으로 감소하는 것으로 해석되었다.

〈그림 7〉은 단위면적당 연간 전열량 합을 도식화한 것이다. 식재기반이 마사토이면서 토심을 300mm로 확보한 type F가 20,600.80W/m²로 전열량이 가장 낮았고, 식생블록과 고단열 배수판을 적용한 type B가 21,197.38W/m²였다. 마사토식재 기반이면서 토심을 85mm로 확보한 type C가 22,682.37W/m², 인공토양인 펄라이트를 식재기반으로 사용한 type D가 23,461.58W/m², 세덤블록을 식재기반으로 적용한 type C가 24,440.20W/m²



〈그림 7〉 옥상녹화시스템 유형별 연간 전열량 비교

로 가장 높았다. 옥상녹화 미적용 유형인 type A 대비 전열량 절감률을 살펴보면, type F가 26%로 가장 높은 절감률을 보였고, type B 24%, type E 19%, type D 16%, type C 13%의 순이었다. 즉 옥상녹화 적용 시 에너지 측면을 고려하고자 한다면, 일반토양의 토심을 300mm 이상으로 하거나, type B처럼 고단열 배수판 및 단열판을 사용하여 한다. 저토심 경량토양으로 적용된 옥상녹화는 단위면적당 약 10% 정도의 에너지 절감률을 보이고 있으므로 향후 건물에너지 단열성 및 생태적 증진을 위해서는 토심을 300mm 이상 혹은 고단열 배수판 및 단열층을 사용하는 것이 타당할 것이다. 실제 옥상녹화가 건물에너지 전체부하에 미치는 에너지절감량은 기존 연구결과를 참조하면,

연간 냉난방부하 절감량 2~3%(김수봉·장중근, 2007)로 예측될 수 있다. 향후 실제 건물에 적용된 옥상녹화의 구체적 에너지 시뮬레이션 및 실측 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 생애주기비용(LCC) 평가

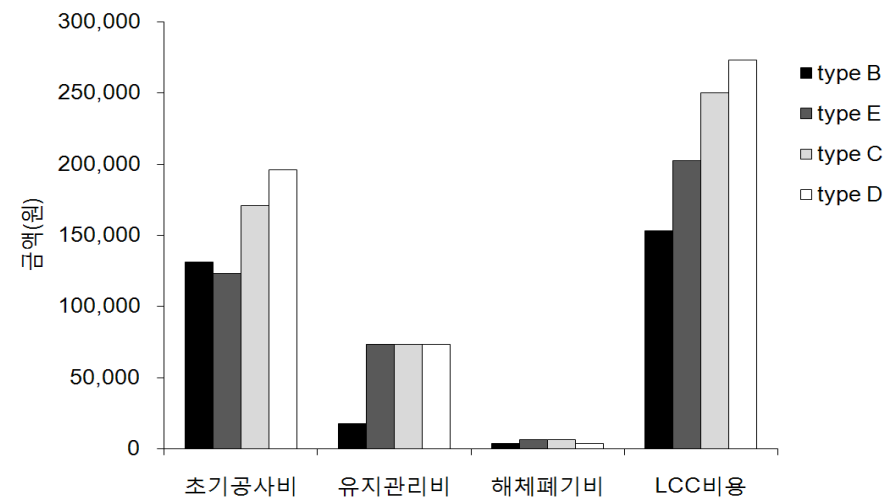
건축물의 총 생애주기비용(Life cycle cost)이라는 것은 시설물의 기획단계에서부터 폐기처분시까지 모든 비용 즉, 계획·설계비, 운용관리비, 폐기물 처분 비용을 합한 것으로 시설물의 생애에 필요한 모든 비용을 말하며, LCC 분석이란 총 생애주기비용(LCC)을 최소화할 수 있는 대안의 비교를 통한 의사결정기법을 의미한다(이한명 외,

〈표 5〉 옥상녹화시스템 유형별 초기투자비 산정

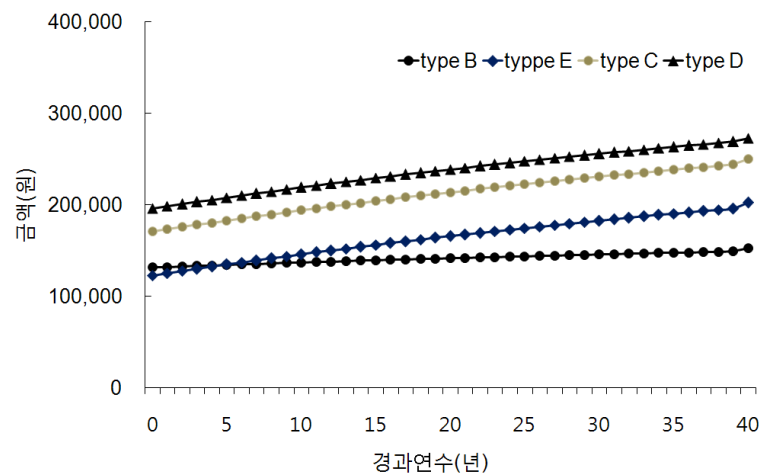
구 분	단 위	type B	type E	type C	type D
식재기반	원/㎡	93,000	45,000	95,000	120,000
식 물	원/㎡	38,000	38,000	38,000	38,000
관수설비	원/㎡	-	5,000	5,000	5,000
운 반	원/㎡	500	5,000	3,000	3,000
방수층 보수	원/㎡	-	30,000	30,000	30,000
합 계		131,500	123,000	171,000	196,000

〈표 6〉 옥상녹화시스템 유형별 보수교체비 산정기준

구분		단위	초기공사비	수선주기	수선율	교체주기	교체율	보수교체비(40년)	
type B	관수	원/㎡	600	-	-	1년	100%	17,556	17,556
type E	시비	원/㎡	1,500	-	-	1년	100%	43,890	73,150
	관수	원/㎡	1,000	-	-	1년	100%	29,260	
type C	시비	원/㎡	1,500	-	-	1년	100%	43,890	73,150
	관수	원/㎡	1,000	-	-	1년	100%	29,260	
type D	시비	원/㎡	1,500	-	-	1년	100%	43,890	73,150
	관수	원/㎡	1,000	-	-	1년	100%	29,260	



a: 비용항목별 분석



b: 누적 연차별 분석

〈그림 8〉 단위면적당 LCC 산출결과

2009). 즉, LCC 분석은 주어진 분석 기간 동안 건물의 전체 또는 부분의 대안에 대한 경제성 평가 기법으로, 동일 목적·기능을 갖는 대안에 대한 LCC를 계산하여 분석 기간 동안 최소의 LCC가 소요되는 대안을 결정하기 위하여 각 대안을 비교하는 것이다. 이러한 분석기법을 통하여 초기단계만이 아니라 전체 수명기간 동안의 경제성을 평가함으로써 초기투자비는 물론 운영관리비와 수선교체비용을 절감할 수 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션에 적용한 5개 유형 중 4개 유형을 선정하여 LCC 분석을 실시하였다. LCC 분석 시 산출근거로 사용한 초기투자비, 보수교체비, 해체 및 폐기비는 제품별 설계가격을 기준으로 설정하였으며, 본 연구에서는 에너지 절감량에 대한 비용 산정은 제외하였다. 이는 본 연구가 표면 열전달률 절감량을 상대적으로 비교하기 위한 연구이므로 건물에너지 절감량을 고려하여 비용을 산정하기에는 다소 무리가 있어 제외하였으며, 단지 에너지 절감량을 산정한다면 미미한 차이는 발생할 것으로 예측되었다. 향후 연구에는 이를 포함하여 진행하고자 한다.

보수교체비 중 시비 초기비용은 500~1,000원/㎡의 평균인 750원/㎡으로 산출하였고, 1년에 2회 실시하는 것을 가정하여 연간 1,500원/㎡이 발생하는 것으로 추정하여 산출하였다.

본 연구는 단위면적당 전열량에 의한 에너지 절감량을 예측한 것으로 LCC 분석에서는 에너지

절감량은 고려하지 않았다.

〈표 7〉 옥상녹화시스템 유형별 보수교체비 산정

품명	단위	type B	type E	type C	type D
해체	원/㎡	3,000	5,000	5,000	3,000
운반	원/㎡	1,000	1,200	1,200	900
합계		4,000	6,200	6,200	3,900

국내에서 흔히 적용되고 있는 4가지 유형 옥상녹화시스템의 LCC 분석 결과, 초기투자비는 type E가 123,000원으로 가장 적었고 다음으로 type B, type C, type D의 순이었으나, 보수교체비는 type B가 17,556원으로 다른 3가지 유형에 비해 약 4배 정도 적었다. 이외 3개 유형은 73,150원으로 동일한 수준이었다.

이는 type B 유형의 함수율이 높아 관수량이 다른 시스템에 비해 적게 들고 기간 내 시비가 포함되어 있어 시비 비용이 추가로 산정되어 있지 않기 때문인 것으로 판단되었다. 해체 및 폐기비는 type D가 가장 적었고 다음으로 type B, type C, type D의 순이었다. 초기투자비, 보수교체비, 해체 및 폐기비를 합한 LCC는 type B, type E, type C, type D의 순으로 양호한 것으로 분석되었다.

V. 결론

본 연구는 시뮬레이션을 통해 옥상녹화시스템별 건물에너지 절감효과 및 경제성을 정량적으로

〈표 8〉 단위면적당 생애주기비용(LCC) 평가분석

구분	초기투자비	보수교체비	해체 및 폐기비	LCC(40년)	증감액	증감률
type B	131,500원	17,556원	4,000원	153,056원		
type E	123,000원	73,150원	6,200원	202,350원	- 49,294원	- 24%
type C	171,000원	73,150원	6,200원	250,350원	- 97,294원	- 39%
type D	196,000원	73,150원	3,900원	273,050원	- 119,994원	- 44%

분석하였다. 분석대상 유형은 옥상녹화 미적용 유형을 포함하여 총 6개 유형으로 설정하였다. 시뮬레이션은 PHYSIBEL을 활용하였고, 경제성 분석은 LCC 평가를 실시하였다. 해석조건은 경계조건으로 온도와 표면 열전달률을 제시하였으며, 분석대상 구조체는 1㎡를 대상으로 하였다.

외기온도와 지표면상태에 따라 영향을 받는 외표면 온도값을 산정한 결과, 옥상녹화 미적용 유형이 옥상녹화 적용 유형보다 겨울철에는 평균 1.03℃ 낮았고, 여름철에는 평균 0.89℃ 높았다. 내표면 온도값은 겨울철은 0.13℃ 낮았고 여름철은 0.06℃ 높았다.

전열량 해석을 통해 옥상녹화시스템이 건물에 미치는 절감률을 분석하기 위해 계절별 일간 전열량 및 연간 전열량 분석을 실시하였다. 계절별 전열량 분석 결과, type F > type B > type E > type D > type C > type A 순이었다. 즉 마사토로 토심이 가장 깊은 유형인 type F가 절감률이 가장 높았고 그 다음으로 단열재가 보강된 type B 유형이 양호한 것으로 분석되었다.

연간 전열량은 냉방기와 난방기로 구분하여 실시하였으며, 냉방기의 경우 옥상녹화시스템 적용이 미적용 대비 평균 37%의 절감률을 보였고, 특히 단열성이 높은 type F와 type B는 약 40% 이상의 절감률이 있는 것으로 예측되었다. 난방기는 type F 22.7%, type B 20.6%, type E 15.2%, type D 12.3%, type C 8.7%의 순으로 에너지 절감률이 있는 것으로 분석되었다.

연간 냉난방 부하를 종합한 절감률을 살펴보면, 옥상녹화시스템 미적용 유형인 type A 대비 절감률이 type F 26% > type B 24% > type E 19% > type D 16% > type C 13%의 순으로 나타나, 옥상녹화에 의한 에너지 절감성능 향상을 위해서는

일반토양의 토심을 300mm 이상으로 하거나, type B처럼 고단열 배수관 및 단열판을 사용하여야 한다. 저토심 경량토양으로 적용된 옥상녹화는 단위면적당 약 10% 정도의 에너지 절감률을 보이고 있으므로, 향후 건물에너지 단열성 및 생태적 증진을 위해서는 토심을 300mm 이상 혹은 고단열 배수관 및 단열층을 사용하여야 에너지 절감 효율을 증진시킬 수 있을 것이다. 초기투자비, 보수교체비, 해체 및 폐기비를 합한 LCC는 type B > type E > type C > type D의 순으로 분석되었다.

향후 옥상녹화 식재의 다양한 유형과 건물내부 부하조건 등을 종합적으로 고려한 정량적 분석이 실시되어야 할 것이다.

참고문헌

- 권전오, 2008, “옥상녹화사례지 분석을 통한 옥상녹화 유형 분류”, 『한국환경생태학회 학술대표발표논문집』, 125~127, 한국환경생태학회.
- 김동찬, 2000, “대학캠퍼스의 옥상공간 활용방안에 관한 사례연구”, 『한국정원학회지』, 18(3): 77~85, 한국정원학회.
- 김수봉·장중근, 2007, “대구시 중구의 옥상녹화를 통한 환경 및 경제적 편익 분석”, 『한국환경과학회지』, 16(5): 603~610, 한국환경과학회.
- 김유일·강석희·이진동, 1998, “분당시범단지 인공지반 옥외환경 평가”, 『대한국토도시계획학회지』, 34(4): 113~122, 대한국토도시계획학회.
- 김정호·윤용한, 2011, “옥상녹화 및 토양피복변화가 단독주택지 외부 열환경에 미치는 영향 분석”, 『한국환경정책연구』, 10(1): 27~45, 한국환경정책평가연구원.
- 김현수·강재식·변혜선, 1998, “옥상녹화시스템의 열성능에 관한 연구”, 『대한설비공학회 학술대회 발표논문집』, 702~707.

- 박재철, 2004, “전통 도시 전주의 기온변화 분석 고찰”, 『한국전통조경학회지』, 22(2): 44~50, 한국전통조경학회.
- 박준석·박지혜·주진희·윤용한, 2010, “저토심 옥상녹화시스템에 따른 토양수분의 변화”, 『한국환경과학회지』, 19(7): 843~848, 한국환경과학회.
- 서응철, 2007, “도시열섬 완화를 위한 제도 개선”, 『한국생태환경건축학회지』, 7(2): 17~23, 한국생태환경학회.
- 심경구·허근영, 2000, “인공지반의 녹화를 위해서 단층 또는 노지토양과 혼합하여 이용되는 인공토양의 특성”, 『한국조경학회지』, 28(2): 28~38, 한국조경학회.
- 유대중, 2007, “경량형 옥상녹화시스템의 냉난방부하절감 효과에 관한 연구”, 중앙대학교 석사학위논문.
- 윤종호·박재완·김효중·이철성·신우철, 2009, “설계 초기단계용 창호 열성능 및 경제성 평가 프로그램 개발”, 『한국태양에너지학회지』, 29(1): 24~31, 한국태양에너지학회.
- 이병현, 2007, “우수를 이용한 옥상층 열부하저감에 관한 실험 연구”, 부경대학교 산업대학원 석사학위논문.
- 이영무, 1998, “하중제한이 기존 건물의 옥상조경에 미치는 영향”, 『한국조경학회지』, 26(2): 166~180, 한국조경학회.
- 이재준·박철수·황경희, 1996, “아파트단지내 녹화공간 확대를 위한 한국과 일본의 인공지반 사례조사 비교 연구”, 『대한국토도시계획학회지』, 31(1): 149~163, 대한국토도시계획학회.
- 이춘우·김수봉·문혜식·정은정, 2009, “옥상녹화의 녹화유형별 기온저감효과 및 시민의식 분석”, 『한국주거학회 춘계학술대회 발표논문집』, 316~320, 한국주거학회.
- 이한명·오민석·김희서, 2009, “투광형 비정질 BIPV 시스템의 LCC 평가에 관한 연구”, 『한국태양에너지학회지』, 29(1): 1598~6411, 한국태양에너지학회.
- 이행렬, 2000, “인공지반 녹화의 실태 분석”, 『산업과학연구』, 10(1): 125~141.
- 장희경·조흥제·여인애·윤성환, 2008, “옥상녹화시스템의 식재방식에 따른 단열효과의 정량적 분석”, 『대한설비공학회 학술대회 발표논문집』, 873~876.
- 최동호·이부용, 2007, “하절기 복사환경 관측을 통한 수목과 일사차폐 막 구조물의 자연냉각효과”, 『한국태양에너지학회지』, 27(4): 137~146, 한국태양에너지학회.
- _____, 2008, “하절기 복사환경 관측을 통한 석재, 목재, 알루미늄 바닥재의 열특성 평가”, 『한국태양에너지학회지』, 28(3): 1598~6411, 한국태양에너지학회.
- 최진우·김학기·이경재, 2009, “저토심 인공지반 녹화공법의 경제성 및 도입 가능한 지피식물의 생육특성”, 『한국조경학회지』, 37(5): 98~108, 한국조경학회.
- 梅干野晃・白井一義・大塚修弘・岩村和夫, 2000, “薄い盛土層を持った屋上芝生植栽の木造建物における室内熱環境調整効果”, 『日本建築學會誌』, 257: 15~20.
- Kim, Young-Su, 1994, “The Development and Application of a Probabilistic Model for Risk Analysis of Life Cycle Predictions: For Apartment Buildings Constructed by the Korea National Housing Corporation in Seoul”, Ph. D. Dissertation, The University of New South Wales at Sydney, New South Wales, Australia.
- Suh, S. J., Lee, C. K., and Choi, W. K., 2003, “A Study on the Roof Planting System of Geometrical Shape”, AIK, 21(10): 283~290.

원 고 접 수 일 : 2011년 4월 25일
1차심사완료일 : 2011년 5월 17일
최종원고채택일 : 2011년 6월 7일