

교육시설 옥상 녹화시스템에 대한 환경성 평가

이수륜 · 정용현†

강릉시 중앙동 도시재생지원센터(코디네이터) · †부경대학교(교수)

Environmental Impact Evaluation of the Green Roof of Education Facilities

Su-Ryun LEE · Young-Hyun CHUNG†

Gangneung Jungandong Urban Regeneration Center(coordinator) · †Pukyong National University(professor)

Abstract

In addition to the excellence of the functional aspect of green roof, the impact of green roof on the environment in the process of disposal before and after construction as life cycle assessment was evaluated.

In order to alleviate climate change, we paid attention to energy consumed by buildings, the main source and cause of greenhouse gases, chose green roof as a method to reduce energy use, and evaluated the environmental impact of the green roof. In this study, basic data on measures to reduce greenhouse gas emissions were presented by evaluating the environmental impact of the entire process from manufacturing to disposal of global warming and air pollution according to the green roof method. As a result of the analysis of environmental impact, it was calculated as 21,540kg CO₂e of greenhouse gas, which is the cause of global warming, accounting for 51%, the highest ratio of 11,646kg CO₂e in the installation stage including the manufacturing process, 31% in the use stage of artificial soil. In the case of environmental impact from urban air pollution, 57% of the environmental load was found in the installation process including the manufacturing process, 36% in the use stage, and 7% in the disposal stage.

Key words : Greenhouse Gases, Air pollution, LCA, Green roof

I. 서론

화석연료의 사용을 통한 산업 발전이 영국을 시작으로 전 세계에 확산되면서 인간의 활동은 도시로 집중되고, 기반 시설의 수용 인원을 초과한 높은 인구 밀도가 형성되며 다양한 도시 환경 오염 문제가 제기되고 있다. 도시의 환경오염 문제 중에는 대기를 매개체로 지역을 넘어 전 세계로 확산되는데, 대표적인 예가 지구온난화, 성층권 오존 감소 등의 문제를 들 수 있다.

특히 화석연료의 사용으로 발생하는 온실가스(Greenhouse Gases, GHGs)는 유례없는 속도로 급증하며 지구 전반에 영향을 미치고 있다. 환경오염은 추상적인 개념을 넘어 피부로 느낄 수 있는 현상으로 변모함에 따라 도시 환경 문제의 심각성과 인지도가 높아지면서 다양한 대안 중에 하나로 옥상 녹화(Sustainable Development, SD)가 제시되고 있다. 옥상 녹화법(2015.12.1.시행)에서 ‘지속가능성은 미래 세대가 사용할 사회·경제·환경 등의 자원을 낭비 및 여건 저하를 시키지 않

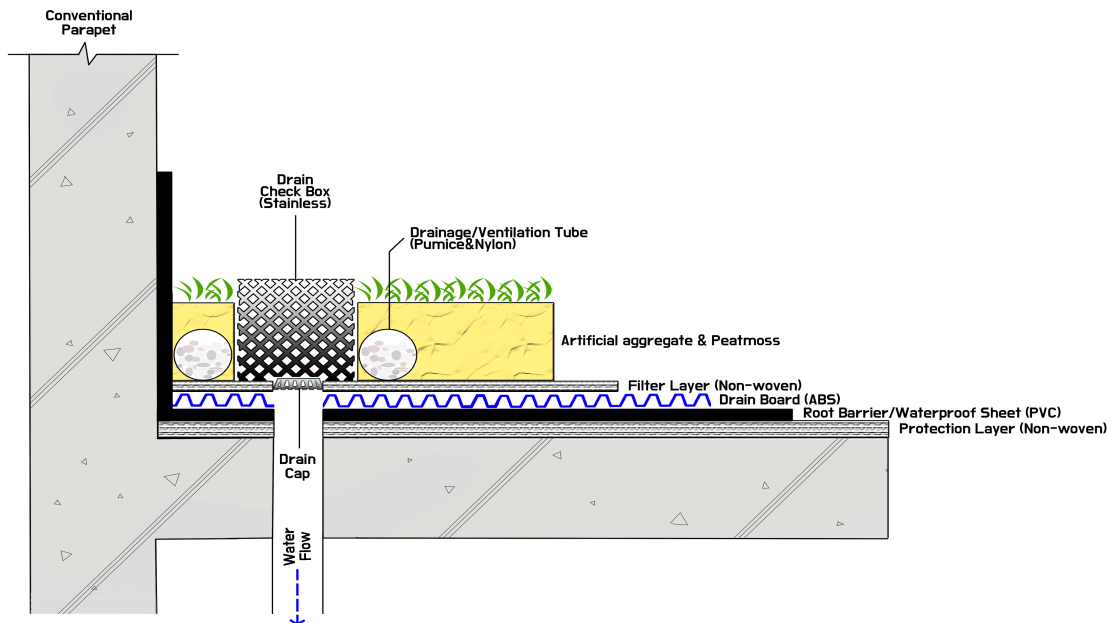
† Corresponding author : 051-629-6543, chungyh@pknu.ac.kr

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의해 연구되었음.

* 본 논문의 일부는 수산해양교육학회 2019춘계학술발표대회에 발표되었음.

으면서 현세대의 필요 충족에 조화와 균형을 이루는 것'으로 정의하고 있다. MOLIT(2014)에서는 향후 온실가스 주요 발생처가 산업부문을 넘어 건물 부문에서 40% 정도가 발생할 것으로 전망하여 건물 부문의 에너지 효율에 대한 지속가능성에 대한 다양한 방안에 대한 연구가 요구되고 있다. 따라서 건물 부문에서 발생하는 온실가스를 감축시키기 위해서 넓은 범위로는 생태 면적률부터, 건축물 단위로는 그린 리모델링, 녹색 건축 인증제와 같은 정책과 사업들이 시행되고 있다. 건축물에서 발생하는 환경 부하를 저감하는 직접적인 방법으로는 차양 시설 설치, 창호 교체, 단열 보드 시공, 쿨루프 도색, 옥상 녹화 시스템 시공, 태양광 패널 설치, 등이 있다. 이와 같은 방법 중에서도 옥상 녹화 시스템은 저영향 개발(Low impact development, LID)에 속하며, 우수 유출 저감으로 도시 홍수를 예방하고(Yeo and Jung, 2013), 열섬 현상 저감 효과(Song et al., 2013), 미세먼지 제거(Cho, 2019)등의 도시 환경 문제를 완화하는 식물의 효과도 검비하고 있어 주목받고

있다. 또한 Lee and Lee(2011)의 지속가능성을 고려한 도시 계획 요소 연구 결과에서도 가장 높은 중요도를 가진 '녹지 및 친수 공간의 조성'과 옥상녹화가 교집합을 이루고 있어 환경 부하를 저감시키는 다른 방법들보다 가치가 높을 것으로 추측된다. 그러나 옥상 녹화의 활성화 연구가 진행되었음에도 옥상 녹화는 활성화되지 못하고 있다(The Seoul Institute(2008); Gyeonggi Research Institute(2010); LH Land and Housing Institute(2010). 옥상 녹화는 식물이 가지는 공기정화 · 심신 안정 · 우수 정화·미세먼지 제거 등의 효과를 가져 친환경 공법으로 분류되지만, 다량의 재료 투입을 요구하여 잠재적 환경오염에 대한 우려를 낳고 있어 옥상 녹화의 활성화가 쉽게 이루어지지 않는 단점을 가진다. 따라서 본 연구에서는 옥상 녹화 공법에 따른 제조에서 폐기에 이르는 전과정을 평가하여 옥상 녹화 활성화를 위한 지구온난화 및 대기오염에 관한 환경성 평가를 실시하였다.



[Fig. 1] Cross section of Extensive Green roof system.

II. 연구 방법

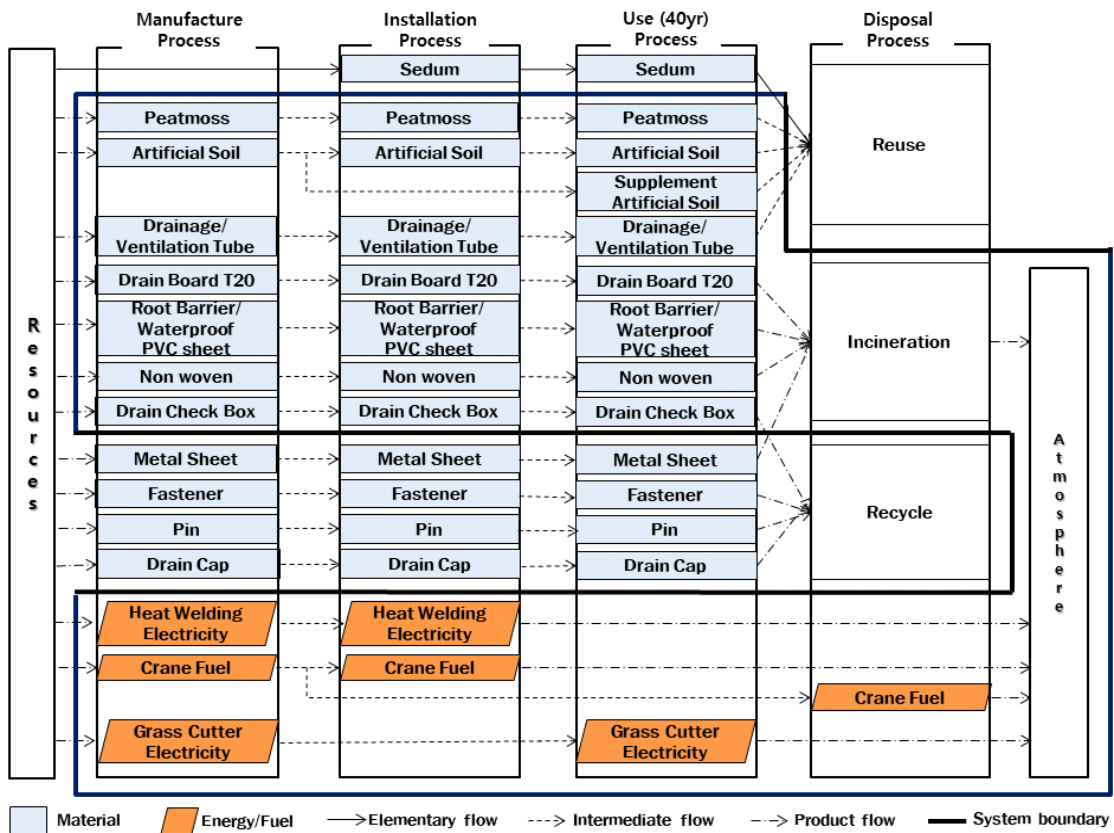
1. 연구 목적

옥상 녹화 시스템의 전과정 평가를 통해 조성, 사용, 폐기 과정에서 발생하는 환경부하를 정량적으로 산출하고자 한다.

2. 연구 대상 설정

옥상 녹화와 쿨루프가 설치되는 건축물은 건축면적 262.5m²의 4-5층 높이 철근-콘크리트 기반 동일 건물로 가정한다. 옥상 녹화 시스템은 국립원예특작과학원의 교육용 옥상 녹화 시스템을 표준으로 하며, 돌나물이 식재된 단면의 구조를 전면화한 저관리·경량형으로 하였다. 건축물은 콘크리

트 옥상으로 가정하고, 국토교통부 승인 <조경설계기준(2016)>에 따라 2개소의 관경 75mm 배수공이 있으며, Gyeonggi Research Institute(2010)에 제시된 최소 경사인 1.1°의 경사를 가지고, <건축법 시행령> 제40조와 <조경기준> 제18조에 근거하여 1.2m 이상의 난간이 설치된 것으로 가정한다. 또한 <법인세법 시행규칙(개정2011.2.28.)>의 ‘건축물 등의 기준내용연수 및 내용연수범위표(제15조 제3항 관련)에 따라 건축물의 수명을 40년으로 설정하며, <도시재생 활성화 및 지원에 관한 특별법> 제13조 및 시행령 제17조에 의거하여 준공된 후로 20년이 경과한 노후 건축물에 옥상 녹화를 설치 및 건물 내구 보강 작업이 동반되어 수명이 20년 증가한 것으로 가정한다.



[Fig. 2] System boundary of Green roof.

3. 옥상 녹화 시스템 경계

연구 대상인 옥상 녹화 시스템의 기능은 단열이며, 기능 단위는 옥상의 면적이다. 환경영향 평가의 시스템 경계(System boundary)는 40년간 각 시스템이 조성-사용-폐기까지의 생애주기 전반(Cradle-to-grave)으로 설정하였고, 제조-유지 단계에서 들어가는 재료(Component)와 기계의 사용을 통해 소모되는 전기 에너지 및 연료를 데이터로 가진다. 운송 거리에 대한 데이터는 조달처에 따라 크게 변동되므로 고려하지 않는다. 건물의 수명이 종료되어도 재사용 및 재활용 가능한 물질의 경우, 본 연구의 폐기 단계에서 환경부하를 발생하지 않기 때문에 시스템 경계의 폐기 단계에서 배제하였다. 또한, 제외 사항(Cut off)으로는 설치 시 소모되는 고정핀, 너트와 같은 부자재를 대상으로 하며 데이터가 명확하지 않고, 그 양이 환경 부하에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 평가되어 환경영향 평가 대상에서 제외했다. 이에 따른 옥상 녹화의 시스템 경계는 [Fig. 2]로 도식화하였다.

4. 환경영향 평가

환경영향 평가는 하나의 대상이 생성되고 소멸될 때까지 발생시키는 환경 부하를 합산하는 전과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA)로 진행되었다. 수명 기준은 법인세법에 명시된 건축물 등의 기준 내용 연수에 따라 40년으로 설정했다. 모델링 프로그램은 MiLCA를 사용하였고, 투입물의 데이터는 현장 조사, 문헌 조사, 인터뷰를 통해 진행했다(JEMAI, 2011). 또한, 투입물의 환경 부하는 IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis) 데이터베이스를 활용했으며, LIME2 (Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling) 방법론으로 특성화 단계까지 진행했다. 환경영향 범주는 수명 기준에 대한 잠재적 환경 부하로 한정한다.

5. DATA 수집

환경영향 평가를 위한 1차적 데이터는 시스템을 구성하는 재료로써, 문헌자료와 현장 조사 그리고 전문가 인터뷰를 통해 수집하여 <Table 1>에 나타내었다. 그리고 각각의 재료를 완성하기까지 발생한 환경 부하인 2차적 데이터는 IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis)의 LCI (Life Cycle Inventory)를 사용하였다. 데이터의 시간적 범위는 2014~2019년이며, 현재까지 국가 기관을 통해 제작-유포된 최신 기술을 기술적 경계로 가진다. 옥상 녹화 시스템을 구성하는 재료의 경우, 국립원예특작과학원의 교육용 옥상정원 보급형(2014) 설계도 및 내역서를 토대로 구성한다. 문헌자료를 통해 특정 업체의 제품이 다수 사용되었음을 확인할 수 있었으며, 해당 업체의 제품 카탈로그를 통해 재료의 소재(素材, Material) 정보를 알 수 있었다. 출처를 알 수 없는 기타 구성품의 경우 3~5개 업체의 동일 품목을 현장 조사하여 계산치를 적용하였다. 또한 식생의 성장 환경을 향상시켜주는 피트모스는 IDEA의 LCI에서도 찾을 수 없어 피트모스의 국내 주요 수입국 중 한 곳인 캐나다의 Canadian Sphagnum Peat Moss Association(2006)의 결과 값을 적용하였다. 마지막으로 장비 사용으로 인한 연료 소모량은 양중기(Crane)는 NTM (Network for Transport Measures)를 활용하였고, 에어 용접기는 Ko and Kim(2014)에 기재된 장비 사양과 Kim et al.(2018)의 용착속도를 추정치로 활용하였다. 사용 단계에서 요구되는 기질 보충량은 G. Peri et al.(2012)의 기질 보충량을 추측치로 차용하였다. 또한 전정을 위한 기기의 전기 에너지 소모량을 현장 조사를 통해 기기 정보를 추출하여 평균 계산치를 사용하였다. 마지막으로 폐기는 환경부의 <건설폐기물의 처리 등에 관한 업무처리지침(시행 2018.1.16.)>을 기준으로 폐기 방식을 결정하였다.

<Table 1> List and quantity of components used in the Green roof

Component	Material	MiLCA DB	Amount	Unit
Installation				
Protect layer	Polyester	Felt and bonded fabrics production	78.75	kg
Root barrier & Water proofing sheets	PVC	Plastic film, PVC, for agriculture	398.66	kg
Drain board	ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene polymer	315.00	kg
Filter/Separation fabric	Polyester	Felt and bonded fabrics production	65.63	kg
Drainage pipe	Pumice	Quarried stone, sand, gravel and round	279.59	kg
Floor access door	Stainless	Shaped stainless steels	8.00	kg
Artificial light weight aggregate	Bottom ash, Cocopeat, Bark, et al	Artificial aggregate	25,200.00	kg
Peatmoss	Peatmoss	-	7.88	m ³
∠Electricity (for hot-air welding)	Electricity	Electricity, from power generation, grid electricity	1.25	kWh
∠Fuel (for crane)	Fuel	Heat energy, from heavy fuel oil C	240.00	L
Use and maintenance				
Artificial light weight aggregate (for supplement)	Bottom ash, Cocopeat, Bark, et al	Artificial aggregate	4.00	kg/yr
∠Electricity (for weedkilling)	Electricity	Electricity, from power generation, grid electricity	0.80	kWh/yr

6. 가정 및 한계

생애주기 전반을 고려한 전과정 평가(Cradle-to-grave)에서는 수명주기가 고려되는데, 옥상 녹화 시스템의 소재의 경우 Nyuk Hien Wong et al.(2003)에 의하면 구성 자재들이 직사광선으로부터 보호되어 내구수명이 40년 이상일 것으로 보고 있고, Giorgia Peri et al.(2012)과 Sanaz Bozorg Chenani et al.(2015) 또한 옥상 녹화 시스템 수명을 40년으로 가정하였기에, 본 연구에서도 옥상 녹화 시스템의 부품을 포함한 전반의 수명이 40년인 것으로 가정하였다. 더불어 전

과정 평가에 포함되는 소재들의 일부가 국내 데이터베이스인 TOTAL software의 LCI에 구축되어 있지 않아 IDEA ver1.1의 데이터베이스를 활용하였다. 옥상 녹화 시스템에서 복합 방수·방근시트를 고정하는 용도의 메탈시트, 패스너는 정확한 사용량에 대한 자료가 없고, 그 사용량도 적어 LCA에 관한 ISO 문서의 제외 권장 기준에 따라 제외(Cut-off)한다. 적용한 기준은 누적 질량 기여도이며, 해당 재료는 95% 미만으로 제외한다. 배수판과 부직포를 연결하는 핀과 드레인 캡 또한 동일한 이유로 제외한다.

Ⅲ. 연구 결과 및 고찰

1. 전과정 목록분석 결과

전과정 목록분석은 설정된 시스템 경계를 바탕으로 투입물과 산출물의 데이터를 수집하고, 기능 단위 또는 기준 흐름에 따른 환경 부하를 계산 및 파악하는 단계이다. 옥상 녹화 시스템에 투입되는 자재 <Table 1>을 IDEA의 데이터베이스를 활용해 MiLCA로 모델링하였다. 목록분석 결과 옥상 녹화는 총 150개의 목록항목이 도출되었으며, 투입된 물질은 67개로 나타났고, 산출된 물질은 대기권, 수권, 지권에 복합적으로 83개의 환경부하 물질이 발생하였다. 옥상 녹화의 목록항목은 <Table 2>로 중복을 제외하고 나타내었다.

2. 환경영향 평가 결과

특성화를 통하여 전과정 평가에서 환경영향을 분석하였다. 특성화는 투입물에 의해 발생한 환경부하를 특정 영향범주로 분류화를 거쳐 영향범주별 특성화 인자에 대한 잠재적인 환경영향을 정량화하였다. 본 연구에서는 가장 큰 기후변화로 손꼽히는 지구온난화를 가속화시키는 온실가스를 감축하기 위하여 옥상 녹화와 쿨루프의 환경영향을 비교하는 것으로, 환경영향 평가 범주는 지구온난화(Global Warming, GW)를 중심으로 평가하였다. 더불어 도시에 미치는 환경적 영향을 평가하기 위해 도시 대기오염(Urban Air Pollution, UAP)을 추가 범주로 채택하였다.

가. 지구온난화(Global Warming, GW)

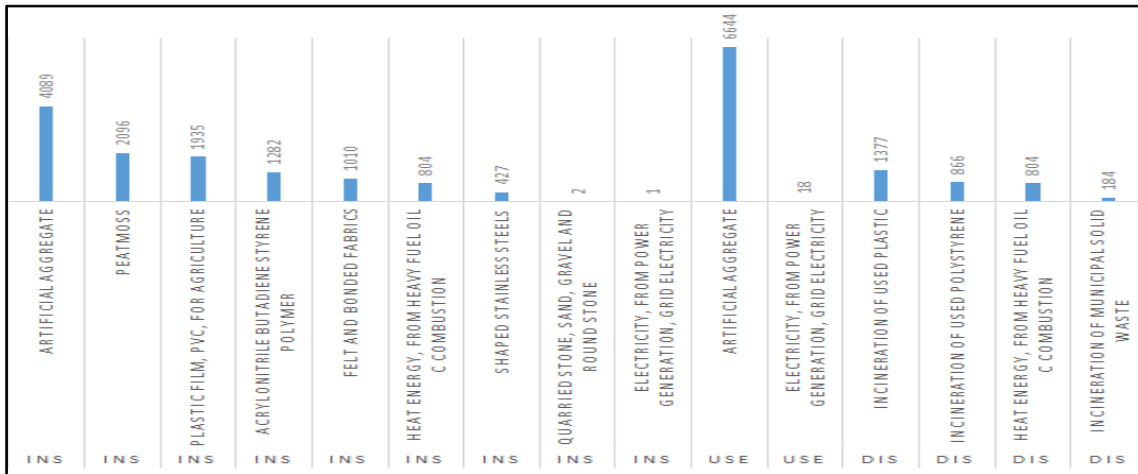
옥상 녹화 시스템의 지구온난화에 대한 잠재적 영향을 분석하였다. 그 결과 총 21,540kg-CO₂e로 산출되었으며, 이 중 이산화탄소(Carbon dioxide, CO₂)가 97%의 높은 기여도로 나타났다(<Table 3>).

이산화탄소의 주 발생 요인을 찾기 위해 시스템 구성 재료(Component)를 재분석한 결과 [Fig. 3]과 같이 사용 단계의 인공토양에서 6,644kg-CO₂e의

높은 잠재적 환경부하가 도출되었다. 다음으로 높은 값을 가지는 요소 또한 설치 단계의 인공토양으로, 인공토양이 옥상 녹화를 구성하는 자재 중 지구온난화의 환경부하를 야기하는 주된 요인으로 나타났다. 인공토양에서 높은 환경부하가 발생한 이유는 옥상 녹화에 투입되는 요소들의 총무게 중 인공토양이 90%의 높은 비율을 차지하기 때문으로 추정된다. 또한 Lee et al.(1999)의 Molecular sieve, Kim et al.(2018)의 Bottom ash, Kim et al.(2017)의 Coco-peat와 같은 인공토양 소재의 제조 단계에서 직접적인 가열 또는 전기 에너지 소모가 있기 때문에 인공토양의 사용과 함께 지구온난화에 대한 잠재적 환경부하가 존재한다고 할 수 있다. 인공토양 다음으로 피트모스가 높은 값으로 도출되었다. 피트모스는 약 300여종의 식물 및 물이끼류가 죽고, 분해되며 쌓인 잔여물(Shaw et al., 2013)로 환경부하가 발생되지 않는 자연물로 생각될 수 있으나, Canadian Sphagnum Peat Moss Association(2006)에 따르면 수확-포장-이동의 각 단계에서 기기 장비가 사용되며 유기물 분해 과정을 통해 온실가스가 추가로 배출되기 때문에 피트모스는 높은 환경부하를 나타내었다. 이러한 결과를 통해 피트모스에 대한 세 가지의 우려 점은 다음과 같다. 첫 번째는 본 연구에 사용된 피트모스의 양이 인공토양의 1/4에 불과하나 환경부하는 1/2이 발생하여 인공토양에 비해 높은 밀도의 환경부하를 발생한다는 점이다. 두 번째는 뛰어난 보수력과 다양한 영양소를 함유를 장점으로 환경부하 발생 정도와 관계없이 원예·축산업에서 활발하게 활용한다는 점이다. 마지막으로, 국내에서 사용하는 피트모스가 주로 라트비아와 캐나다에서 수입되기 때문에 본 연구에서 고려되지 않은 선박 또는 항공을 통한 운송 과정을 포함하면 대량의 환경부하를 발생시킨다는 점이다. 피트모스는 국내 생산이 어렵기 때문에 수입을 지속하면서 환경부하를 절감시킨다는 것은 현실적으로 어려운 것으로 판단된다. 따라서

<Table 2> Result of Life-Cycle Inventory analysis of Green roof

Green roof	
Elementary flow	Elementary flow
air	2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dio-xin
antimony	acid (as H ⁺)
barium	ammonia
bauxite	ammonium
bismuth	arsenic
boron	biological oxygen demand
brine	boron
calcium carbonate	C6 alkylbenzene
carbon	cadmium
chromium	carbon dioxide (biogenic)
clay	carbon dioxide (fossil)
cobalt	carbon monoxide
copper	chemical oxygen demand
diatomite	chlorine
dolomite	chromium
feldspar	cobalt
fluorspar	copper
freshwater, low scarcity	CxHy:hydrocarbons:CxHy
fold	earth & sand (landfill)
ground water, low scarcity	hydrogen chloride
iron	hydrogen fluoride
kaolin	hydrogen sulfide
lead	lead
lithium	low-level radioactive waste
manganese	manganese
marble	mercury
molybdenum	metal wastes (landfill)
natural latex	methane
mickel	methane (fossil)
phosphorus	nickel
platinum	nickel compounds
primary energy from geothermics	nitrous oxide
primary energy from hydro power	nitrogen dioxide
primary energy from solar energy	nitrogen, total (excluding N ₂)
quartz sand	non-methane volatile organic
sea water	-compounds
serpentine	particles (> PM10)
silica stone	particles (PM10)
silver	PFC-14
sodium chloride	phnol
sulfur	phosphorus, total
talc	slag (landfill)
titanium	sludge (landfill)
tungsten	sulfur dioxide
vanadium	sulfur hexafluoride
zinc	sulfur oxides
uranium U308	sulphuric acid
coking coal 29MJ/kg	suspended solids
crude 44.7MJ/kg	treated water
general charcoal 25.7MJ/kg	vanadium
natural gas 54.6MJ/kg	volatile organic compound
natural gas liquid 46.5MJ/kg	water vapour
black liquor	zinc
blast furnace gas (BFG)	animal and plant remains recyclable
cinder, recyclable	bittern
coke oven gas (COG)	blast furnace gas (BFG)
heat energy	coke oven gas (COG)
Linz-Donawitz gas	rubble and debris, recyclable
miscellaneous ore	sludge, recyclable
off gas	slug, recyclable
pig iron scrap	steel and iron scrap
steel scrap	waste alkali, recyclable
sulfur dioxide, recyclable	waste glass and ceramic recyclable
used paper	waste textiles, recyclable
waste alkali, recyclable	
waste textiles, recyclable	
waste wood, recyclable	
Total	Total
67	83



[Fig. 3] Global Warming Impact Value by Component. Installation stage (INS), Use stage (USE), Disposal stage (DIS).

<Table 3> Global Warming Effect Factors and Resulting values of Green roof

	Effect Factor	Value (kg-CO ₂ e)	%
Global Warming	carbon dioxide	20,948.19	97
	methane	382.40	2
	nitrous oxide	209.68	1
	PFC-14	0.31	0
	sulfur hexafluoride	0.13	0
	Total	21,540.71	100

국내의 자원을 활용한 대체재 개발이 필요하다. 인공토양과 피트모스 다음으로 복합방근·방수 자재인 PVC (Polyvinyl chloride)가 설치 단계에서 1935kg-CO₂e,의 환경부하를 발생시키는 것으로 나타났다. 플라스틱은 석유를 원료로 하기 때문에 원유를 추출하는 과정부터 폐기 단계까지 온실가스를 지속 방출하여 세 번째로 높은 환경부하를 야기한 것으로 추측된다. 또한, 배수층을 구성하는 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 제품도 플라스틱의 일종이다. 이러한 이유로 Gargari,

C et al.(2016) 과 Morau, D et al.(2017)는 화학약품 또는 에너지가 투입되는 인공 소재가 아닌, 천연소재 또는 재활용된 소재로의 대체와 연구가 강조되고 있다.

옥상 녹화 시스템의 지구온난화 영향을 단계별로 봤을 때, 제조 과정을 포함한 설치 단계가 11,646kg-CO₂e으로 가장 높은 비율을 차지하였으며, 다량의 인공토양이 투입되는 사용 단계가 31%, 폐기 단계가 15%를 차지하였다(<Table 4>). 폐기 단계가 낮은 비율을 차지하게 된 원인으로 재사용과 재활용을 들 수 있다. 전문가 인터뷰를 통해 옥상 녹화 시스템 종료 후, 인공토양은 재사용이 가능함을 확인하였다. 투입물 중 가장 많은 양을 차지하는 인공토양이 재사용되기 때문에 폐기 단계에서 환경영향이 낮은 비율로 나타난 것으로 판단된다. 피트모스와 통기망(Ventilation channel)으로 쓰이는 부식 또한 자연물로써 원예용으로 재사용이 가능하여 환경영향이 없는 것으로 간주하였다. 재활용은 스테인리스로 이루어진 배수 점검구만 대상으로 선정한다. 복합 방근·방수시트(PVC)와 배수판(ABS), 보호층·여과투수층(부직포)는 공기·물·식생의 영향으로 부식의 강도가 높아 재사용과 재활용이 어렵다고 가정하여

<건설폐기물의 처리 등에 관한 업무처리지침 (2019년 시행)>을 기준하여 폐기 방식을 소각으로 적용하였다.

<Table 4> Comparison of Global Warming Effects by Stages of Green roof.

	Stage	Value (kg-CO ₂ e)	%
Global Warming	Installation	11,645.91	54
	Use(40yr)	6,662.56	31
	Disposal	3,232.24	15
	Total	21,540.71	100

나. 도시 대기오염(Urban Air Pollution, UAP)

옥상 녹화 시스템의 도시 대기오염에 대한 잠재적 영향을 분석하였다. 그 결과 총 17.62 kg·SO₂e로 산출되었다. 이산화황(Sulfur dioxide)이 65%로 가장 높은 비중을 차지하였고, 다음으로 황산화물(Sulfur oxides) 25%, 질소산화물(Nitrogen oxides) 10%, 그리고 이산화질소(Nitrogen dioxide)는 0에 가까운 값으로 나타났다(<Table 5>).

대기의 구성 성분은 질소(Nitrogen, N₂) 78%, 산소(Oxygen, O₂) 21%, 아르곤(Argon, Ar) 0.93%, 이산화탄소(Carbon dioxide, CO₂) 0.03%, 기타 0.04%으로 되어있으며, 기타에는 네온(Neon, Ne), 헬륨(Helium, He), 메탄(Methane, CH₄), 크립톤(Krypton, Kr), 수소(Hydrogen, H₂) 등이 포함된다. 위와 같은 대기의 주성분 외의 SO_x, NO_x, O₃ 같은 물질은 인간의 활동에 따라 농도 변화 및 2차 오염물질 발생으로 이어지는데, 이들의 농도가 인간에게 해로운 수준에 도달할 경우 대기오염이 된다(LIME2, News Letter 2.4).

도시 대기오염에 대한 환경영향 평가는 인간에게 위해요소가 될 수 있는 SO_x와 NO_x를 중심으

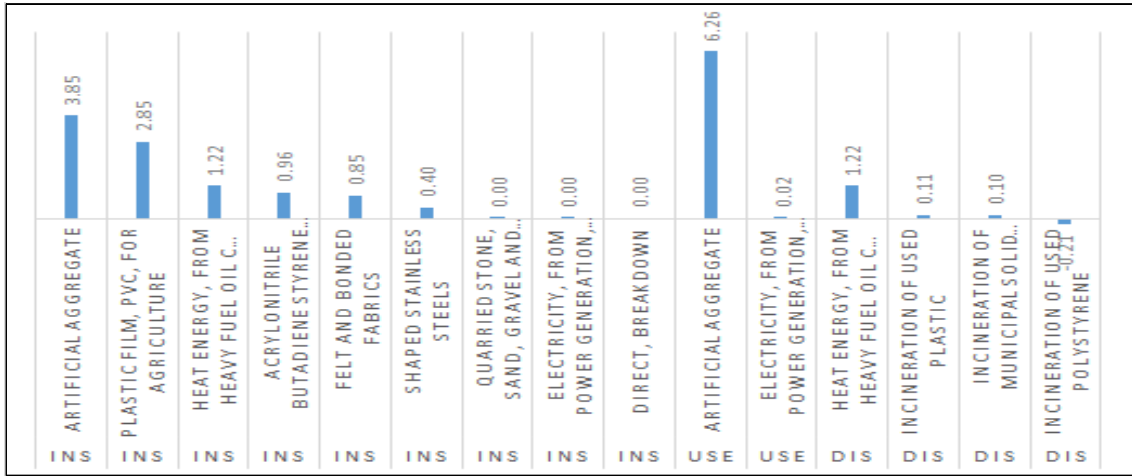
로 평가하여 SO₂로 특성화한다. 황(S) 성분을 함유하고 있는 화석연료의 사용이 증가함에 따라 도시 대기오염 농도가 올라가는데, 대표적인 1차적 발생처로 공장과 자동차를 지목할 수 있다.

<Table 5> Urban Air Pollution Factors and Resulting values of Green roof.

	Effect Factor	Value (kg-SO ₂ e)	%
Urban Air Pollution	sulfur dioxide	11.37	65
	sulfur oxides	4.47	25
	nitrogen oxides	1.78	10
	nitrogen dioxide	0.00	0
	Total	17.62	100

연구 결과, 옥상 녹화는 90%의 높은 비율로 SO_x가 발생하여 화석연료 사용이 많았음을 추측할 수 있다. <Table 5>와 같은 결과가 도출된 원인을 찾기 위해 투입 물질별 환경부하를 추가 계산하였다. 그 결과 도출된 [Fig. 4]는 지구온난화에 대한 잠재적 환경부하를 물질별로 분석한 [Fig. 3]과 유사한 형태를 띠고 있어 도시 대기오염 또한 인공토양의 투입량에 큰 영향을 받은 것으로 판단된다.

단계별 도시 대기오염 잠재적 환경부하는 <Table 6>의 제조 과정이 포함된 설치 단계에서 57%로 높게 나타났으며, 사용 단계에서 36% 그리고 폐기 단계에서 7%로 나타났다. 설치 단계에서 환경부하 비율이 높게 도출된 것은 제품 제조를 위한 공장의 에너지를 다량 사용한 것이 원인으로 추측된다. 더불어 사용 단계에서는 가장 높은 환경부하를 보였던 보충용 흙의 양이 추가로 고려되었을 것으로 추정된다.



[Fig. 4] Urban Air Pollution Impact Value by Component. Installation stage (INS), Use stage (USE), Disposal stage (DIS).

<Table 6> Comparison of Urban Air Pollution Effects by Stages

	Stage	Value (kg-SO ₂ e)	%
Urban Air Pollution	Installation	10.12	57
	Use(40yr)	6.28	36
	Disposal	1.21	7
	Total	17.61	100

IV. 결론

옥상 녹화에 따른 기능적인 측면의 우수성과 더불어 옥상 녹화 실시에 따른 시공 전과 시공 후를 거쳐 폐기에 이르는 과정에서의 환경에 미치는 영향에 대한 평가를 실시하고자, 기후변화를 완화시키기 위해 온실가스의 주요 발생원이자 원인인 건물에서 소모되는 에너지에 주목했고, 에너지 사용을 줄이는 공법으로 옥상 녹화를 택하였으며 옥상 녹화 시스템의 전과정에 따른 환경에 미치는 영향에 대하여 평가를 실시하였다.

옥상 녹화는 식물이 가지는 공기정화·심신안정·우수정화·미세먼지 제거 등의 효과를 가져 친환경 공법으로 분류되지만, 다량의 재료 투입을 요구하여 잠재적 환경오염에 대한 우려를 낳고 있어 옥상 녹화의 활성화가 쉽게 이루어지지 않는 단점을 가진다. 따라서 본 연구에서는 옥상 녹화 공법에 따른 지구온난화 및 대기오염에 관한 제조에서 폐기에 이르는 전과정의 환경 영향을 평가하여 온실가스 절감을 위한 방안들에 대한 기초자료를 제시하였다. 저관리·경량형 옥상 녹화의 경우 총 150개의 목록항목이 도출되었으며 투입물질은 67개로 나타나 복합적으로 83개의 환경부하물질이 발생하였다. 환경영향의 분석 결과 지구온난화의 원인인 온실가스 21,540kg CO₂e로 산출되었으며, 제조 과정을 포함한 설치 단계에서 11,646kg CO₂e로 가장 높은 51%의 비율을 차지하였고, 인공토양이 투입되는 사용 단계에서 31%, 폐기 단계가 15%를 차지하였다. 시스템 구성 재료를 재분석한 결과 인공토양이 투입 요소의 90%를 차지하고 있어 제조 단계에서 에너지 소모의 원인으로 판단되고 있다. 피트모스의 경우 인공토양의 1/4에 불과하나 환경부하는 1/2이 발생하여 높은 밀도의 환경부하를 발생하고 있었

다. 이는 국내 생산이 어려워 수입에 따른 운송 과정에서 대량의 환경부하를 발생시키고 있음을 알 수 있었다. 폐기 단계에서는 재활용과 재사용에 따라 낮은 비율을 차지하고 있음을 알 수 있었다. 도시 대기오염에 따른 환경영향의 경우에는 제조 과정이 포함된 설치 과정에서 57%, 사용 단계에서 36%, 폐기 단계에서 7%의 환경부하를 나타내었다. 설치 단계에서 환경부하 비율이 높게 도출된 것은 제품 제조에 따른 에너지의 사용이었으며, 잠재적 환경부하 물질별 분석한 결과 도시 대기오염 또한 인공토양의 투입량에 큰 영향을 받은 것으로 분석되었다.

References

- Canadian Sphagnum Peat Moss Association(2006). Environmental life cycle analysis(ELCA) of peatmoss. Retrieved from <https://peatmoss.com>
- Caterina Gargari, Carlo Bibbiani, Fabio Fantozzi and Carlo Alberto Campiotti(2016). Environmental Impact of Green Roofing: The Contribute of a Green Roof to the Sustainable use of Natural Resources in a Life Cycle Approach, Agriculture and Agricultural Science Procedia, 8, 646~656. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.087>.
- Cho DG(2019). Prioritization of Species Selection Criteria for Urban Fine Dust Reduction Planting. Korean Society of Environment and Ecology, 33(4), 472~480. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2019.33.4.472>
- Dominique Morau, Tsiormalala N, Rabarison, Hery T and Rakotondramiarana(2017). Life Cycle Analysis of Green Roof Implemented in a Global South Low-income Country, Journal of Environment & Climate Change 7(1), 43~55. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01504422>
- Giorgia Peri, Marzia Traverso Matthias Finkbeiner and Gianfranco Rizzo(2012). The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: Covering the gap, Energy 48(1), 406~414. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.045>
- Gyeonggi Research Institute(2010). Green Roof Strategy for Mitigating the Urban Heat Island Effect.
- JEMAI(Japan Environmental Management Association for Industry)(2011). LCA System MiLCA ver.1.2
- Kim CM, Kim MW, Cho GY and Choi NR(2018). Development and Evaluation of Artificial Lightweight Soil Using Bottom Ash. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 6(4), 252~258. <https://doi.org/10.14190/JRCR.2018.6.4.252>
- Kim DK, Yun JG, Sin HC and Oh HS(2018). The Adaptability Verification about the Waterproofing Sheet of the Automatic Equipment. The Korean Institute of Building Construction, 18(2), 4~5.
- Kim DS, Sung YJ, Kim BM, Kim JY, Rizal Solehuddin, Park YS and Seo YG(2017). Application of Rice Husk Fiber to the Vegetation Media. Journal of Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 49(4), 74~81. <http://dx.doi.org/10.7584/JKTAPPI.2017.08.49.4.74>
- Ko JS and Kim BY(2014). Study on Adhesive Properties by Hot-air Welding of Polyvinyl Chloride Waterproof Sheet Using used vinyl & used cable in Rural Area. Journal of the Korean Institute of Rural Architecture, 16(4), 75~81. <https://doi.org/10.14577/kirua.2014.16.4.75>
- Lee BH, Lee HJ, Choo CU and Yi JH(1999). Desorption of Organic Compounds from the Simulated Soils by Soil Vapor Extraction. Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers, 37(1), 87~96.
- Lee IH and Lee JH(2011). A Study on the Urban Planning Elements for Sustainable Urban Regeneration. Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design, 12(6), 101~114.
- LH(Land & Housing Institute)(2010). A Study on the Method for Greenery on Artificial Ground in Housing Complex
- Life-Cycle Assessment Society of Japan. 2012a. LIME2 Life-cycle impact assessment Method based on Endpoint modeling Outline of LIME2. NEWS LETTER No. 14, 1~69.
- MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport)(2014). The 1st Green Building Basic Plan. National Institute of Advanced Industrial Science and

- Technology(AIST) and Japan Environmental Management Association for Industry(AIST). 2012. LCI Database IDEA ver.1.1
- Nyuk Hien Wong, Su Fen Tay, Raymond Wong, Chui Leng Ong and Angelia Sia(2003). Life Cycle Cost analysis of rooftop gardens in Singapore, *Building and environment*, 38(3), 499~509.
[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00131-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00131-2)Get rights and content
- Rural Development Administration National Institute of Horticultural and Herbal Science(2014) Manual for using the model of the rooftop garden for education- A garden garden for elementary school children.
- Sanaz Bozorg Chenani, Susanna Lehvavirta and Tarja Häkkinen(2015). Life cycle assessment of layers of green roofs, *Journal of Cleaner Production*, 90, 153~162.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.070>.
- Shaw AJ, Shaw B, Johnson MG, Higuchi M, Arikawa T, Ueno T and Devos N(2013). Origins, genetic structure, and sustematics of the narrow endemic peatmosses (sphagnum): *S. Guwassanense* and *s. Triseriporum* (sphagnaceae). *Journal of botany*, 100(6), 1202~1220.
<https://doi.org/10.3732/ajb.1200630>
- Song JH, Lim JH, Kang SR and Song SY(2013). Analysis on Reduction Effect of Heat Island for Green Roof Systems in Urban Area. *Journal of the Korea Solar Energy Society*, 33(2), 87~90.
- The Seoul Institute(2008). Plans to Encourage Green Roofs for Energy Saving and Monitoring Thereof.
- Yeo KD and Jung YH(2013). An Analysis of Effect of Green Roofs in Urbanized Areas on Runoff Alleviation and Cost Estimation. *Seoul Studies*, 14(2), 161~177.
-
- Received : 13 January, 2022
 - Revised : 14 February, 2022
 - Accepted : 18 February, 2022