



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

기후변화 완화를 위한 옥상녹화의
도시재생 적용 및 생태효율성 평가



2020 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

생 태 공 학 과

이 수 루

공학석사 학위논문

기후변화 완화를 위한 옥상녹화의 도시재생 적용 및 생태효율성 평가

지도교수 정 용 현

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2020년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

생 태 공 학 과

이 수 료

이수륜의 공학석사 학위논문을 인준함.

2020년 2월

위 원 장 수산학박사 최 창 근



위 원 공학박사 김 동 규



위 원 공학박사 정 용 현



목 차

I. 서론	1
II. 이론적 배경	5
1. 도시재생(Urban Regeneration)	5
가. 도시재생의 정의	5
나. 도시재생 유형 및 현황	6
2. 옥상녹화(Green roof)	8
가. 옥상녹화 정의	8
나. 옥상녹화 효과	10
다. 옥상녹화와 LCA	13
3. 전과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA)	15
가. 전과정 평가의 배경	15
나. 전과정 평가의 정의	15
다. 전과정 평가의 방법	16
4. 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)	20
가. 생애주기비용 분석법의 배경	20
나. 생애주기비용 분석법의 정의	20
다. 생애주기비용 분석법	21
5. 생태효율성(Eco-efficiency)	24
가. 생태효율성의 배경	24
나. 생태효율성의 정의	24
다. 생태효율성의 지표	25

III. 연구 내용	26
1. 연구 모델 설정	26
가. 대상지 선정	26
나. 건물 설계	28
다. 옥상녹화 시스템 설계	29
라. 쿨루프 설계	30
2. 환경영향 분석	31
가. 연구 목적 및 범위 정의	31
나. 데이터 수집	34
다. 영향평가 범주 및 방법	35
라. 가정 및 제한사항	37
3. 경제성 분석	39
가. 연구 목적 및 범위 정의	39
나. 데이터 수집	41
4. 생태효율성 평가	43
가. 연구 목적 및 범위 정의	43
IV. 연구 결과 및 고찰	44
1. 전과정 목록분석 결과	44
2. 환경영향 분석 결과	48
가. 옥상녹화	48
나. 쿨루프	63
3. 경제성 분석 결과	67
가. 옥상녹화	67
나. 쿨루프	68

4. 경제적 가치 분석 결과	70
가. 주말농장의 대체로 절약한 교통비	70
나. 냉·난방 에너지 절약 비용	71
5. 생태효율성 평가 결과	74
가. 환경영향 분석	74
나. 경제적 가치 분석	75
다. 생태효율성 분석	75
6. 대상지역에 대한 적용 및 고찰	77
가. 경제성 평가 적용	77
나. 환경성 평가 적용	78
V. 결론	79
참고문헌	83

표 목 차

Table 1 GreenHouse Gas Emissions in Korea	3
Table 2 Urban decline indicator	5
Table 3 Characteristics by type of Urban regeneration New Deal Projects	6
Table 4 Types of Green roof	9
Table 5 Effects of Green roof (Detail)	10
Table 6 Example of LCA for Green roof	14
Table 7 Elements for Eco-efficiency in the business sector (ESCAP, 2009)	25
Table 8 Specifications of Cool roof paint	35
Table 9 List and quantity of components used in Green roof	45
Table 10 List and quantity of components used in Cool roof	45
Table 11 Result of Life Cycle Inventory analysis of Green roof	46
Table 12 Result of Life Cycle Inventory analysis of Cool roof	47
Table 13 Global Warming Effect Factors and Resulting values of Green roof	49
Table 14 Comparison of Global Warming Effects by Stages of Green roof	51
Table 15 Urban Air Pollution Factors and Resulting values of Green roof	52
Table 16 Comparison of Urban Air Pollution Effects by Stages	55
Table 17 Value entered in the calculation of saved transportation fuel	56

Table 18 Information about stored fuel	57
Table 19 GWP value and UAP value of saved fuel	57
Table 20 Variable of Green Roof Energy Calculator	59
Table 21 Climate Information for Two Cities	61
Table 22 Value entered in the program	62
Table 23 Comparison of Annual Energy Savings of Dark Roof, Green Roof, Cool Roof(Criteria : Green roof)	62
Table 24 Global Warming Effect Factors and Resulting values of cool roof	63
Table 25 Urban Air Pollution Factors and Resulting values of Cool roof	65
Table 26 Detailed statement of Green roof	68
Table 27 Detailed statement of Cool roof	69
Table 28 Value entered in the calculation of saved transportation cost	71
Table 29 Comparison of Annual Energy Savings of Dark roof-Green roof-Cool roof	73
Table 30 Environmental load of Green roof(40yr)	74
Table 31 Environmental load of Cool roof(40yr)	75

그림 목 차

Fig. 1 Green roof design process of an existing building	9
Fig. 2 Effects of Green roof	10
Fig. 3 Life Cycle Assessment framework	16
Fig. 4 Operational procedure for LCI analysis	18
Fig. 5 System of Life Cycle Assessment	19
Fig. 6 LCC Analysis Process	21
Fig. 7 Two or more legal standards(2013year)	27
Fig. 8 The Study Area	28
Fig. 9 Cross section of Extensive Green roof system	29
Fig. 10 System boundary of Green roof	33
Fig. 11 System boundary of Cool roof	33
Fig. 12 Classification of component of LCC	41
Fig. 13 Trends in Inflation(2014~2019year)	42
Fig. 14 Global Warming Impact Value by Component	49
Fig. 15 Energy balance of green roof, including latent heat flux	59
Fig. 16 Comparison of Gobal Warming Effects by Stages of Cool roof	64
Fig. 17 Comparison of Urban air pollution by Stages of Cool roof	66
Fig. 18 The classification of Eco-efficiency trend	76

Eco-efficiency evaluation and application of green roof to urban regeneration for mitigating climate change

Su Ryun Lee

*Department of Ecological engineering, Graduate school,
Pukyong National University*

Abstract

This study focused on the energy consumed by buildings that are the main source and cause of GreenHouse Gas(GHG) to mitigate Climate change. And chose Green roof as a method to reduce energy use. Because Green roof is classified as an eco-friendly construction method due to the effects of air purification, mental stability of plants and removal of fine dust. But, it requires the injection of many materials, making it a concern about potential environmental pollution, and has disadvantages that cannot be revitalized well with high investment costs. Relatively inexpensive low material cool roof are activated, but cool loops are also made of artificial materials and need to be repainted with a short life cycle, which is a potential environmental concern.

We want to find out what the more sustainable construction method is through environmental, economic and Eco-efficiency assessments of Green roof and Cool roof, which have different strengths and weaknesses.

The research period was set at 40 years, while Extensive Cool roof and water-based Cool roof were adopted and conducted. The results are as follows;

First, the extensive green roof is more environmentally friendly in the long run. Although Green roof consumes more material than cool roof,

most of the materials that make up Green roof can be reused and recycled, and the plants in Green roof absorb CO₂ through photosynthesis. This is because even the energy saving effect of heating and cooling offsets both the use case and GreenHouse Gas produced in 32 years. On the other hand, Cool roof is stacked in layers on a regular basis and consists of only artificial materials, a lot of contaminants occur when disposed of them.

Second, the cool roof is more economical than the green roof.

Since the total cost of producing and using Green roof is 1.7 times the total cost of Cool roof, it is more economical to do so.

Third, Green Roof is more sustainable than Cool Roof.

As a result of environmental assessment and economic assessment, Green Roof is more environmentally friendly but less economical than Cool Roof. However, after calculating the secondary effects of Green roof as economic values, Green roof showed higher ecological efficiency than the Cool roof.

Finally, the project sites for urban regeneration were selected to calculate the amount of GreenHouse Gas that are reduced after introduction of Green roof, and the economic costs were calculated. The urban regeneration project was able to install Green roof of all buildings located in the target area and confirm that 191,274 trees aged 30 removed the amount of GreenHouse Gas they absorb for a year.

In short, Green Roof is superior to Cool Roof in terms of environmental, economic value and sustainability. In addition, it is believed that the long-term and public-friendly urban regeneration projects and the integration of Green roof will alleviate urban environmental problems and climate change.

I. 서론

한국전쟁(1950) 이후 도시는 무너진 체제를 정비하는 동시에 시대적 흐름에 맞춰 도시화·산업화를 이루었다. 도심을 중심으로 사람이 모여들고 주거지가 형성되면서 도시의 기반시설은 수용인원을 초과하기 시작했다. 이러한 도시의 인구 과밀을 해소하기 위해 강제철거이주정책 혹은 재개발 사업 등이 진행되었고, 재정착하지 못한 원주민은 도시 외곽으로 밀려나게 되었다(오, 2011). 더불어 핵가족화와 부동산 투기로 신도시가 형성되면서 도시는 무분별하게 확장되었다. 도시의 확장으로 인해 원활한 관리가 이루어지지 못한 원도심은 노후화·불량화 되었고(김 등, 2012), 도시의 원동력인 산업이 시대의 변화에 따라 쇠퇴하면서 공동화 현상(空洞化 現狀) 및 공·폐가의 증가로 범죄도 증가되었다(오, 2015). 또한 확산되어있는 기반시설들의 유지·관리를 위한 높은 사회적 비용이 요구되는 등의 경제적 문제가 발생하게 되었다(김 등, 2016). 이러한 도시 문제가 전 세계적으로 대두되면서 기존의 지역 자원을 활용하여 새로운 기능을 도입 및 창출하는 도시재생으로 도시계획의 패러다임이 변화하였다.

현재까지 진행된 도시재생의 형태를 살펴보면, 주로 역사적 배경과 해당 지역 출신의 유명 인사를 바탕으로 스토리텔링한 문화적 재생, 교육프로그램과 봉사활동 등의 단체 활동에 의한 공동체 재생, 협동조합·마을기업·사회적기업 등의 일자리 사업을 통한 경제적 재생, 그리고 앵커시설 조성 및 주차장 조성 등의 물리적 재생이 이루어졌음을 알 수 있다(김 등, 2014). 그러나 이와 같은 도시재생의 형태는 이전의 도시계획에서 비롯된 사회적·문화적·경제적 문제를 개선 및 해결하는 방안이 될 수 있으나 도시에서 야기되는 환경 문제를 해소시키는 방안으로는 부족함이 있다(이, 2018). <도

시재생 활성화 및 지원에 관한 특별법> 제2조 도시재생의 정의에 의하면 ‘환경적 활성화’가 명시된 것을 확인할 수 있으나, ‘환경적’이라는 단어는 3~5년 주기로 재도색이 요구되는 벽화를 그리고, 기존 건물을 허물어 거점 공간을 신축하는 현재의 도시재생 형태에서는 ‘물리적 환경’으로 한정되어 해석된 양상을 보이고 있다. 그러나 도시재생에서 ‘환경’의 해석은 ‘자연환경’과 ‘생태환경’으로 방향 전환이 필요하다. 자연·생태환경을 고려하지 않은 지금까지의 도시계획과 재생사업으로 인해 다음과 같은 도시환경문제들이 발생했기 때문이다.

먼저 정응호(2015)는 아스팔트와 도시를 뒤덮은 인공재료들은 자연 상태의 재료에 비해 열적특성 수치가 높아 열섬현상 같은 도시미기후를 형성한다고 밝혔다. 또한 인공소재로 도시를 포장하는 기존의 개발 방식에 의해 불투수층이 증가하여 도시홍수나 가뭄의 자연재해가 발생하였고, 늘어난 인공지면과 반대로 녹지가 감소되어 소생태계의 서식지 또한 영향을 받아 결국 도시의 생물다양성이 축소되는 결과를 가져왔다. 가장 심각한 점은 토양의 씨드 बैं크(Seed Bank) 기능까지 훼손하여 자연생태계의 자생과 회복이 어려워진 점이다.

또한, 현재의 도시는 지속적인 유지·관리를 통해 건축물의 수명을 연장시키는 형태가 아닌, <도시 및 주거환경정비법> 제2조에 의거한 재건축·재개발 기준연한(20년)을 토대로 건물을 철거하고 새로 준공하여 자원낭비와 대량의 폐기물을 발생시켰다.

이와 같은 도시개발로 인한 환경문제들은 토지에 그치지 않고 대기에서도 나타나는데, 건물의 고층화로 바람 길을 훼손하여 공기를 정체·와류시키는 것을 들 수 있다. 정체된 공기에 SO_x , NO_x 가 유입될 경우 스모그가 형성되거나 중금속을 함유한 미세먼지가 집적되면서 폐호흡을 하는 인간에게 직접적인 피해를 끼친다. 그러나 대기 중에서 발생하는 더 큰 도시환경

문제는 지구온난화이다. 지구온난화는 범지구적 규모이지만 근본적인 원인은 인간의 활동 전반이라는 Hanaki(2013)의 연구 결과와 에너지를 위한 연료연소 과정에서 86%(6111.832백만tCO₂.eq)의 온실가스가 배출한다는 국가온실가스 배출통계(2017)를 통해 인구의 91%가 거주하면서 에너지 자급률은 낮은 도시에 지구온난화에 대한 큰 책임이 있음을 알 수 있다.

특히 녹색성장위원회(2011)에서 산업 부문 다음으로 건물 부문에서 온실가스 발생이 높은 것을 확인할 수 있었는데(Table 1), 선진국의 온실가스 배출 양상처럼 우리나라 또한 산업 부문의 온실가스 발생량이 감소하고, 건물 부문의 온실가스 발생량이 향후 40%까지 증가할 것으로 국토교통부(2014)가 전망하여 건물부문 에너지 절감방안 모색이 필요하다.

Table 1. Green House Gas Emissions in Korea

Classification	Total	Industry	transport	Structure	Agriculture	Disposal	The others
Output (1,000Ton)	588,011	294,467	103,255	148,518	14,516	15,358	11,897
Contribution(%)	100.0	50.1	17.6	25.2	2.5	2.6	2.0

*Source: Green Growth Korea(2011)

다양한 구성체가 유기적으로 얽혀 복잡한 관계망을 이루는 도시 생태계 안에서 도시환경문제들은 대규모 공간과 많은 시간에 대한 투자를 통해 해결이 가능하다. 그러한 방안으로 우선 국가와 지자체 행정측면의 도시계획과 도시재생 사업을 포맷으로 생태적·자연적 요소의 고려가 필수적이다.

한편, 도시의 지구온난화에 대한 영향을 감소시키기 위한 건물 부문의 에너지 절감 공법을 탐색한 결과, 옥상녹화, 벽면녹화, 차양시설, 태양광패널, 쿨루프 등을 확인할 수 있었다. 이 중 옥상녹화는 건물의 냉·난방에너지

지 절감뿐만 아니라 건축물의 외벽을 보호하여 건물 내구성을 향상시키고, 식물이 가지는 공기정화, 심신 안정 등의 장점을 겸비하고 있으며, 전문가들이 선정한 지속가능한 도시재생을 위한 고려 1순위인 녹지 및 친수공간의 조성과의 관계가 있기 때문에(이 등, 2011), 기후변화를 고려한 가장 적합한 수단으로 판단된다. 그러나 구성 자재의 양이 많고 초기 투자비용이 높아 상대적으로 설치가 간편하고 비용이 낮은 쿨루프(Cool roof; White roof)가 공공기관 및 민간부문에서도 활성화되고 있다. 문제는 쿨루프는 에너지 절감 효과 외에 생태 환경적 효과가 옥상녹화에 비해 미비하며 수생 쿨루프의 경우 5년 주기로 재도색이 요구되어 건물의 수명을 고려했을 때 환경성 및 비용의 효율이 의문시되고 있다.

따라서 본 연구에서는 지구온난화를 야기하는 온실가스의 주요 배출원인 건축물의 환경부하를 감소시키기 위한 방안으로 옥상녹화를 선택하고, 건축물의 40년 수명 동안 소요되는 비용, 배출하는 환경부하, 지속가능성을 평가하여 쿨루프와 비교를 통해 옥상녹화의 활성화를 도모하고자 한다.

더 나아가, 공공을 위하여 시행되는 도시재생사업에 옥상녹화를 적용함으로써 기후변화 완화와 생태도시로 나아갈 수 있도록 제고하고자 한다.

Ⅱ. 이론적 배경

1. 도시재생(Urban Regeneration)

가. 도시재생 정의

<도시재생 활성화 및 지원에 관한 특별법> 제2조에 정의된 도시재생이란, 기존의 완전 철거 방식의 도시개발을 지양하고, 도시가 가진 인적·물적 자원을 강화하면서 경제적·사회적·물리적·환경적으로 대상지를 활성화시키는 것을 말한다. 도시재생 대상지역은 매년 제작되는 도시 쇠퇴지표의 인자인 인구감소, 사업체 수 감소, 생활환경 악화와 관련된 5개 법정지표를 기준으로 선정된다(도시재생 활성화 및 지원에 관한 특별법 제13조 및 시행령 제17조; Table 2).

Table 2. Urban decline indicator

Population decline	Reduced number of businesses	Worsening living environment
• Decreased by more than 20% from the most in 30 years • Three consecutive years of decline in last five years	• Decreased by more than 5% from the peak of the last decade • Three consecutive years of decline in last five years	• More than 50% of old buildings over 20 years

*Source : Urban Regeneration information system

나. 도시재생 유형 및 현황

도시재생 사업은 전국의 각 중앙부처와 유관기관을 통해 다양한 규모의 사업이 진행 중이다. 문재인 정부에 들어서면서 매년 10조원씩, 5년간 50조원을 도시재생 뉴딜정책에 투입하여 현재 도시재생 분야의 중심 사업으로 도시재생 뉴딜사업이 추진되고 있다. 도시재생 뉴딜사업은 기존의 박근혜 정부의 도시재생 선도지역 사업에 우리동네살리기, 주거지지원형을 추가하면서 소규모 노후 주거지재생을 중시하는 양상을 보인다.

Table 3. Characteristics by type of Urban regeneration New Deal Projects

Assortment	Residential regeneration Type		General neighborhood Type	Central city Type	Economic foundation Type	
	Restoration our Neighborhood	Residential support Type				
Legal Type	-	Neighborhood regeneration Type			Economic foundation Type	
Existing business Type	(New)	General neighborhood Type		Central city Type	Economic foundation Type	
Business promotion&Support basis	(Law)Special act on balanced national development	(Law)The Urban Regeneration and Assistance Act				
Planning of Urban regeneration	Establish if necessary	Need to establish				
Business scale (Recommended area)	Small residence (Under 5TTm ²)	Residence (510TTm ²)	Quasi-residential area (10~15TTm ²)	Commerce, Local Commerce (Around 20TTm ²)	Industry, local economy (Around 50TTm ²)	
Target area	Small low rise residential area	Low rise residential area	Alley business & residence	Commercial, start-up, history, tourism, etc	Backcountry, ports, etc.	
Grant limit/Support period	5billion won/3yr	10billion won/4yr	10billion won/4yr	15billion won/5yr	25billion won/6yr	
Introduction of Infrastructure	Convenient facilities such as parking lot, shared facilities	Convenient facilities such as alley maintenance, parking lot, shared facilities	Small public welfare facilities	Medium Public Welfare Facilities	Medium and Large Public Welfare Facilities	

* Source : Urban Regeneration Information System

그러나 도시재생 대상지는 이웃한 마을과 동일하거나 유사한 역사적 배경을 가지고 있어 대상지만의 스토리를 구분·제작하기 어렵고, 우후죽순 생겨나는 도시재생 지역 간의 벤치마킹을 통한 유사한 사업으로 고유성과 지역 매력도가 떨어지는 등 악순환이 발생하고 있다. 또한, 환경적 활성화가 도시재생의 법적 정의로 명시되어 있음에도 생태·자연환경은 고려하지 않고 물리적 환경에 한하여 활성화가 이루어지는 한계를 가진다.



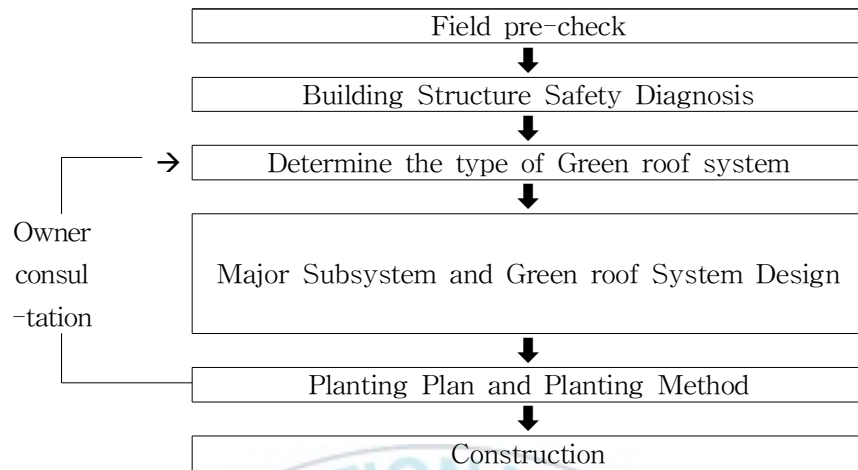
2. 옥상녹화(Green roof)

가. 옥상녹화 정의

국토교통부의 조경기준(2018) 제1장에 따르면, 옥상조경이란 인공지반조경 중 지표면에서 높이가 2m 이상인 곳에 설치한 발코니에 설치하는 화훼시설을 제외한 조경을 일컫는다. 넓은 의미로는 높이가 있는 인공지반에 설치된 조경을 뜻하기도 하나, 본 연구에서는 LH 토지주택연구원(2013)과 동일한 <건축법> 제2조에서 정의하고 있는 “건축물”을 의미한다.

옥상녹화는 인공지반에 조성된 녹지이지만 동일면적 대비 생태적 기능의 1/2을 하는 것으로 간주되어 생태면적률의 산출 요소로써 포함되어 있으며, 친환경건축물인증제도 및 그린리모델링의 혜택을 받을 수 있는 친환경 공법으로 인증되고 있다. 옥상녹화는 대개 방수/방근층, 보호층, 배수층, 여과층, 식재기반층으로 구성되어있으며, 사람이 거주하는 공간이기 때문에 안전을 최우선시하여 Fig. 1과 같이 설계 프로세스를 지침으로 설정하고 있다.

설계에 반영되어야하는 상세한 기준과 사항은 국토해양부의 조경기준 제4장에 따라 옥상녹화의 면적 산정, 구조적 안전성 확인, 식재 토심 선정, 유지관리를 시행한다. 조경기준을 바탕으로 옥상녹화는 크게 3가지 유형으로 분류가 되는데, 토심, 식재 식생, 토양의 중량, 관리 형태에 따라 저관리 경량형(Extensive), 혼합형(Semi-intensive;Combination), 관리 중량형(Intensive)으로 정리할 수 있다.



* Source : Seoul<Green Roof System Standard Detailing Manual(2011)>

Fig. 1. Green roof design process of an existing building

Table 4. Types of Green roof

Sort	Extensive	Combination	Intensive
Thickness of growing medium	~20cm	10~30cm	20cm~
Plant types	Grasses, loans, ground covers, seasonal flowers	Climbers, cactus, succulents, shrubs	Lawn, Shrubs, small trees
Support weight	*D.L 120kgf/m ² **L.L 100kgf/m ²	D.L 200kgf/m ² L.L 200kgf/m ²	D.L 300kgf/m ² L.L 200kgf/m ²
Irrigation	No	Periodically	Regularly
Slope	Flat, Inclined	Flat	Flat
Costs	Low	Middle	High

* D.L (Dead load) : The final constructed weight of all built elements and all components associated with the roof or wall assembly, including plants, growing substrate and any water held in the system.

** L.L (Live load) : The weight of people who will use the space, and of any mobile equipment that will be used periodically on the site, for example, maintenance.

나. 옥상녹화 효과

하나의 시스템으로 구축된 옥상녹화 시스템은 건축물 보호와 단열 기능을 함께 갖춘 공법이며, 식생이 가지는 효과를 동반하고 있어 환경적·심미적·사회적·경제적인 효과 등을 가지고 있다. 다양한 연구를 통하여 옥상녹화 시스템이 가진 긍정적인 효과가 입증되고 있어 총 12가지로 분류한 장점을 Fig. 2과 Table 5에 나열하였다.

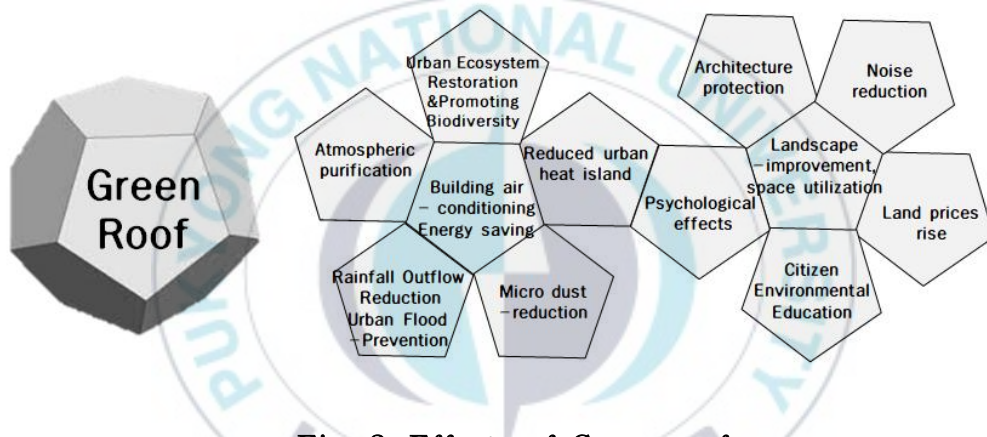


Fig. 2. Effects of Green roof

Table 5. Effects of Green roof (Detail)

Assortment	Cotents	Source
Reduced urban heat island	- Mitigates the heat island effect by creating a passageway that introduces cold wind from outside the city into the city - Plants Planted in Rooftop Transpiration to Air Cool - For every 10% increase in green area, average temperature decreases by 0.9°C 2.7°C temperature reduction compared to general rooftop surface	Land and Housing Institute (2010)

Rainfall Outflow Reduction Urban Flood -Prevention	If the roof covered area is 3.78% of the total area, it has an average 25.09% runoff reduction efficiency	Dong Soo Shin et al (2013)
	- Flood control by storing 10~90% of rainwater according to precipitation or roofing depth - If the soil of Green roof is installed at 10cm, precipitation of 20mm/m² can be saved. - When building 140m² with Green roof depth of 10cm, 87% of rainwater runoff is reduced and runoff time is delayed by 2 hours	Land and Housing Institute (2010)
Atmospheric purification	- Reduce air pollution by supplying oxygen through plants - Other air pollutants are also absorbed while absorbing carbon dioxide through photosynthesis of plants.	Dea Ho Ryu et al (2013)
Micro dust -reduction	- Green roofs have a similar ability to absorb particulate matter like street trees 19m² of Extensive Green roof in urban areas reduces PM10 in Chicago by 14% - Depending on the air purification function of trees, it absorbs about 20g of particulate matter per m² per growing season	Farina Sempel et al (2013)
Urban Ecosystem Restoration &Promoting Biodiversity	- Green roof can play a role as a stepping stone bridge in the green network, and location selection of Green roof should be considered according to the movement characteristics of aerial species such as birds and insects. - Indigenous plants and naturalized plants flow from the outside of the Green roof	Jong Hun Park et al (2010) Kwi Gon Kim (2004)
Landscape -improvement, space utilization	- Provide green space in the dark city space by improving and shielding the building exterior - Contributing to pleasant and beautiful city design by improving landscape	Land and Housing Institute (2010)
Architectural protection	- Anti-aging function of building exterior by acid rain and ultraviolet ray - The effect of protecting the building by reducing the influence of temperature on the structure - Protects the waterproof layer by reducing radiant heat by about 25°C during Green roof	Land and Housing Institute (2010)

Building air - conditioning Energy saving	• Green roof reduces the thermal conductivity of buildings and insulates exterior walls • Reduce building energy use by lowering room temperature in summer and increasing temperature in winter • Green roof building has less heating energy than concrete house • Temperature rise of 3°C in winter during Green roof consisting of 'Grass+Plant block+Styrofoam' • When the Green roof is applied, the average external surface temperature decreases by 5~6°C, and the room temperature decreases by 2~3°C. • The same effect as using 2,700 air conditioners when creating a Green roof area of 91,106m² • If the rooftop of Tokyo-23Gu is formed with a Green roof, the temperature in the building decreases by 0.8°C in the summer, and the cooling cost is reduced by about 1.1 billion won/day • Reduction of building cooling and heating energy by about 16.6% per year	
	• The model of the plant with the ground cover has an internal temperature of 1.6°C lower than that of the model without the plant.	Chun Woo Lee et al (2009)
Noise reduction	• Noise reduction of 46dB by absorbing and crushing sound wavelength when soil layer of Green roof is 20cm	RDA (2010)
	• The 12cm thick soil layer reduces noise by 40~50dB.	D Morau et al (2017)
Land prices rise	• As urbanization becomes more advanced, the scarce value of green spaces increases, thus increasing the willingness to pay(WTP) them.	Sang Young Shin et al (2006)
Psychologi cal effects	• Stable and relaxed effect is shown by visual stimulus of forest background color than urban background • Green plants provide comfort, and immersion compared to colored flowers, and have a positive effect on mental physiology by improving creativity and concentration of external attention.	Hey Sook Jang (2013)

	• Contact with plants reduces and prevents stress and increases cognitive function through interaction with nature • Natural environment and plant landscape are very effective in improving the quality of life due to the stability of green.	
Citizen Environmental Education	• Restoration of the ecosystem provides a place for environmental education utilizing the ecosystem • Use of gardening activity training centers such as rooftop flowers, herbs and vegetable gardening	RDA (2010)

다. 옥상녹화와 LCA

옥상녹화는 설문, 온도측정, 뇌파측정, 식생 재배, 등의 연구를 통해 냉·난방 에너지 절감 및 기후안정 등의 긍정적인 효과를 입증하였다. 그러나 옥상녹화 시스템을 제작 및 유지·관리하는 단계에서 다량의 자재가 투입되어 옥상녹화 시스템을 시공하지 않은 경우 보다 환경오염을 더 야기할 수 있다는 우려가 발생된다. 그리하여 옥상녹화 시스템의 수명주기 동안 투입·산출되는 물질과 에너지 및 환경부하를 정량적으로 계산하는 연구가 요구되었고, LCA를 통해 결과가 도출되었다. 그러나 옥상녹화의 종류와 구성 재료, 그리고 공법이 지속적으로 변화·개발됨에 따라 환경영향 평가도 이에 발맞춰 연구되고 있다. 옥상녹화의 LCA평가 연구사례는 Table 6으로 정리하였다.

Table 6. Example of LCA for Green roof

Literature	Program	Type	System boundary	F.U	Life span	Conclusion
Takanori Kuronuma et al (2018)	MiLCA	Module	Material maintain(Irrigation, Fertilizer)	Concrete rooftop area 1m ²	45yr	CO₂ emitted during the production-maintenance process of the modular green roof is offset by 5.8~15.9yr due to the reduction of heating and cooling energy and photosynthesis of plants.
F.Bianchini et al (2012)	Sima Pro 7.1	Extensive Intensive	Manufacture-Use	Green roof area 1ha	40~55yr	NO₂, SO₂, O₃, PM10 from LDPE and polypropylene can be offset after 13~32yr
Chenani Sanaz Bozorg et al (2015)	Sima Pro 7.3.2	Extensive	Manufacture-Move-Use-Disposal(incineration/Recycle)	Green roof area 1m ² , 40yr	40yr	- Rootproof LDPE is Greener Than PVC - Drainage layer is recommended to use recycled products - Filter layer is recommended for light polypropylene - Rock Wool and Plastic drainage layers not recommended
Dominique Morau et al (2017)	Open LCA	Extensive Intensive	Manufacture-Move-Use (Water, substrate)	Green roof area 1m ²	1yr 5yr 10yr	- Recommended use of well water rather than tap water - Recommend the use of local products rather than imports - Recommended natural fertilizer made from poultry manure
Shin, Sang-Min (2008)	Total	Intensive	Manufacture-Use-Disposal (material)	Rooftop area 400m ²	40yr	It is more environmentally friendly to maintain with TBM (Time-based Maintenance) method according to the life cycle of components instead of conventional maintenance.

3. 전과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA)

가. 전과정 평가의 배경

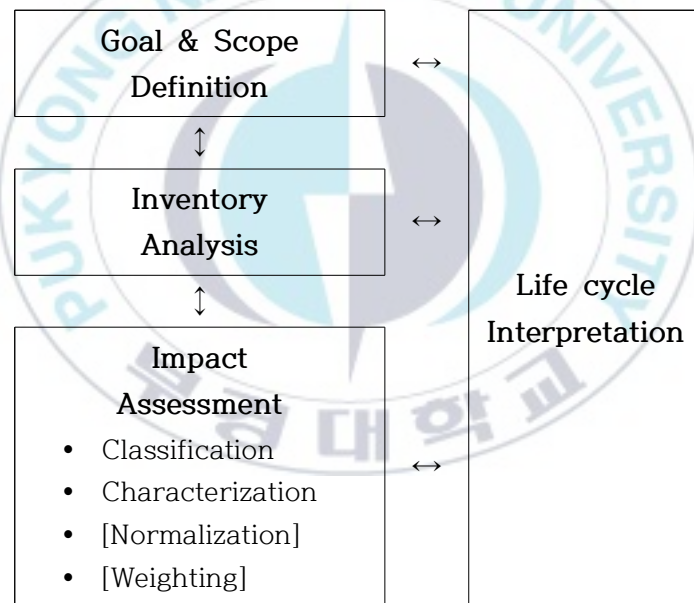
전과정 평가에 관한 연구는 1969년 미국 코카콜라사의 음료 용기 제작에 소모되는 자원을 최소화하기 위한 연구를 첫 사례로 시작되었다(A Bjørn, et al, 2018). 그 후 에너지 평가, 온실가스 평가에 이어 활용분야가 확대되었고, 1980년대 전 세계적으로 환경문제가 대두됨에 따라 미국과 북유럽의 과학 분야에서 전과정 평가 방법론에 대한 급진적인 성장을 이루었다. 1992년 네덜란드 레이덴 대학(Leiden University)의 전과정 평가 방법론 지침서가 발간되었고(H Gabathuler, 1997), 이듬해인 1993년에는 국제표준화 기구(International organization for standardization, ISO)의 환경기술위원회(TC 207)가 조직되어 산하 제5분과위원회(SC5)에서 환경경영(ISO 14000 s)에 관한 기술 및 평가규격으로, 전과정 평가 인증 및 심사 시 필요한 기술적인 요건들에 대해 규정하였다. 이러한 과정을 통해 전과정 평가는 현재 국제적 환경영향 규명 기법으로 자리매김 하였다(ISO 14040, 2006).

나. 전과정 평가의 정의

전과정 평가란 원료 채취, 운송, 제조, 사용, 폐기까지 대상의 생애주기(Cradle to Grave) 동안 토양, 대기, 자원량, 등에 영향을 미치는 잠재적 환경부하를 정량화하여 종합적으로 평가하는 기법이다(이 등, 1998). 또한 도출된 결과를 바탕으로 환경을 개선하는 것이 전과정 평가의 목적이라 할 수 있다.

다. 전과정 평가의 방법

전과정 평가는 ISO 14040을 통해 표준화된 절차를 가지고 있으며, 그 과정은 Fig. 3와 같다. 목적 및 범위 정의, 투입물과 산출물의 목록분석, 그리고 각 영향범주에 해당하는 값으로 분류화 및 특성화 단계를 거쳐 객관적인 수치로 환경영향을 규명한다(T.E.Graedel, 2004). 또한 이러한 평가는 각 단계들 간 수 차례의 반복을 통해 높은 신뢰도의 결과를 얻을 수 있다(이 등, 2004).



*Source : SolidWorks Corporation

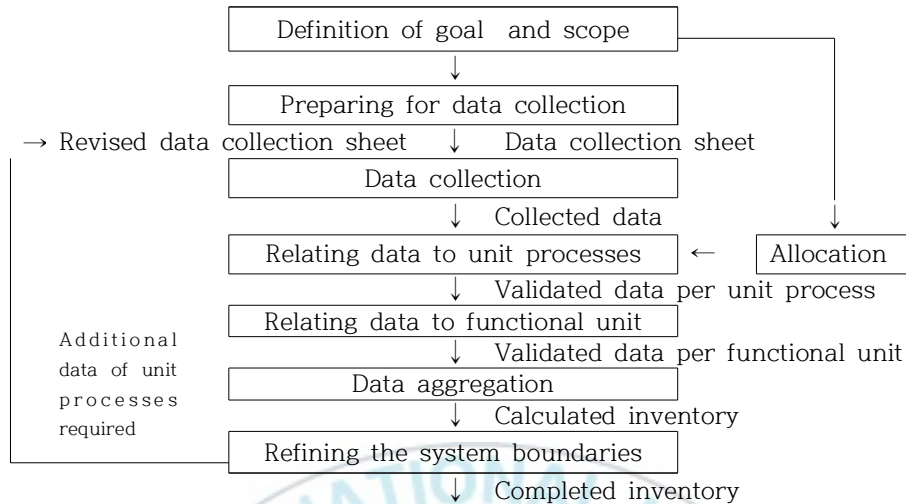
Fig. 3. Life Cycle Assessment framework

(1) 목적 및 범위 정의 (Goal & Scope Definition)

연구 전체의 방향을 설정하는 가장 중요한 단계로, 연구 결과의 적용 분야와 목표청중에 대한 고려를 바탕으로 목적을 설정하고, 목적 달성을 위해 타당한 연구 범위 설정이 요구된다. 또한 연구 범위의 경우, 기능, 기능단위(Function Unit, F.U), 시스템 경계, 데이터 품질, 가정 및 제한요인을 기재하여 범위를 명확히 규정하는 과정이 필요하다.

(2) 전과정 목록분석 (Inventory Analysis)

명료화된 시스템 경계 내에서 이루어지는 공정의 모든 투입·산출물(에너지, 원료, 부산물, 환경부하)의 종류와 양을 규명하고 정량화하는 단계로써, 수집되는 데이터가 많을수록 공정에 대한 환경관련 정보를 다량 수집할 수 있다. 일반적으로 공정흐름도 작성, 데이터 수집, 환경부하 계산, 목록분석에 대한 해석의 단계로 진행된다.



*Source : Lee, 2004

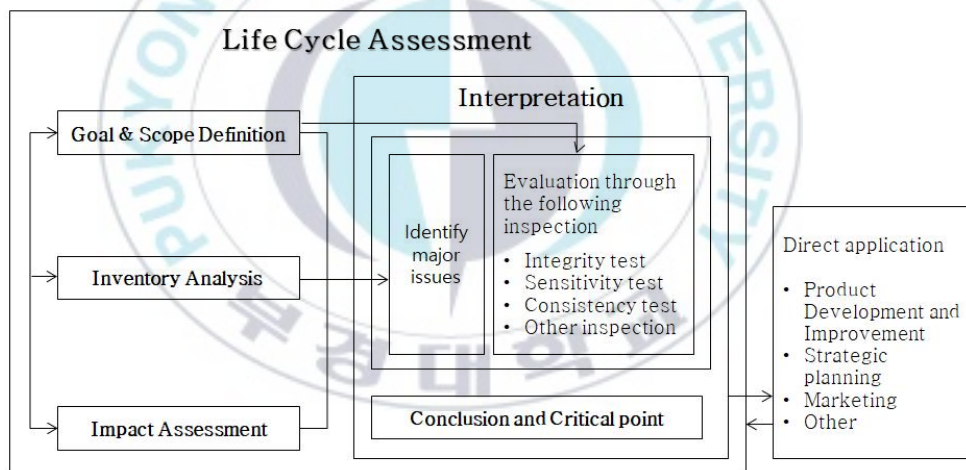
Fig. 4. Operational procedure for LCI analysis

(3) 전과정 영향평가 (Life cycle impact assessment)

전과정 목록분석을 통해 규명된 데이터를 해당되는 각각의 환경영향범주로 분류화(Classification)하고, 연구 대상이 환경에 미치는 잠재적 영향을 특성 계수 또는 변환 계수를 활용한 특성화(Characterization)과정을 통해 정량적, 또는 정성적으로 추산하는 종합 평가 단계이다. 분류화와 특성화는 ISO 14000s에 근거하여 필수적으로 수행해야하는 단계이나, 대상 연구의 목적에 따라 정규화(Normalization)와 가중치 부여(Weighting) 단계는 선택적으로 적용 가능하다. 정규화는 환경영향을 지역적·시간적 인자 등에 대한 기여도로 일반화하는 과정이며, 가중치 부여는 환경범주 간의 상대적 중요도를 비교 평가하여 각각의 가중치를 부여하는 단계이다.

(4) 전과정 해석 (Life cycle interpretation)

전과정 해석은 Fig. 5와 같이 전과정에 걸쳐 진행되며, 목록분석과 전과정 영향평가의 결과를 연구목적과 범위에 맞게 해석하고, 최종 결론을 도출하여 의사결정의 토대를 제공하는 단계이다. 전과정 해석이 신뢰도를 얻기 위해서는 일관성, 민감도, 완전성 검사가 이루어져야하며, 연구 결과가 이용될 분야에 부합 될 수 있는 결론과 더불어 한계를 제공해야한다. 그리고 전과정 결과 해석 시 전과정 평가는 유일한 지침이 아닌 참고자료로써 활용되도록 주의 및 안내가 필요하다.



*Source : Korean Agency for Technology and Standards

Fig. 5. System of Life Cycle Assessment

4. 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)

가. 생애주기비용 분석법의 배경

1930년 이후 미국의 국방성(Department of Defense)의 군 관계 병참지원을 위한 비용 평가 수단으로 사용된 VE방법(Value Engineering)과 가치분석(Value Analysis)을 거쳐 1960년대에 생애주기비용이 생겨났다. 생애주기비용은 1960년대 미국의 정부에서 교량, 터널, 포장의 설계 및 엔지니어링 부문에 적용했으며, 미국의 에너지성(Department of Energy)에서는 법규 제정을 통한 생애주기비용 분석법 보급화의 개기를 마련하였다(김경환, 2012). 국내에서는 1980년대 초, 미래에 발생될 비용을 현재 시점에서 체계적으로 분석하는 것에 관심을 갖기 시작하여 1981년 12월 <체계분석과 비용>이라는 문헌 자료까지 출판하였는데, 이것이 국내 생애주기비용 평가의 시작이라 할 수 있다.

나. 생애주기비용 분석법의 정의

생애주기비용 분석법은 일반적으로 대상의 생산, 사용, 폐기의 각 단계에서 소요되는 비용의 총합을 통해 경제성을 평가하고, 대체 간의 순위를 선정하는 분석법을 일컫는다. 그러나 연구 목표에 따라 생애주기비용의 관점이 변화될 수 있다. 예를 들어 생산자의 생애주기비용은 제품 설계부터 시작되고, 소비자의 생애주기비용은 제품을 구매하는 순간부터 비용이 발생하는 것으로 볼 수 있어 명확한 목표설정이 필요하다(김, 2012). 생애주기비용에서 가장 중요한 요인은 미래에 발생하는 비용을 현재의 화폐적 가치

로 환산하여 산출하기 때문에 시간이 가장 중요하다고 할 수 있다.

다. 생애주기비용 분석법

생애주기비용은 국제적으로 표준화된 방법론은 존재하지 않는다(김, 2012). 그러나 일반적으로 Fig. 6과 같이 분석 목표 및 범위 확인, LCC 구성항목 조사, 분석을 위한 기본 가정, 구성항목별 비용 산정, 전체 비용 종합, LCC분석에 근거한 의사결정, 자료축적 및 피드백의 과정을 거친다.



Fig. 6. LCC Analysis Process

(1) 분석 목표와 범위 확인

분석 대상을 명료화하는 과정으로, 기능단위(Function Unit, F.U)와 연구 결과의 활용도를 설정한다.

(2) LCC 구성항목 조사

분석 목표와 범위 설정에 따라 LCC를 구성하는 항목을 조사하는 단계이며, 보통 건물과 관련된 LCC의 구성항목은 기획비(Planning Cost), 설계비(Design Cost), 건설비(Construction Cost), 운영 및 일상 수선비(Operati-on&Minor Maintenance Cost), 장기 수선비(Long-Term Maintenance Co-sts), 폐기 처분비(Remaining Value&Removal Costs)가 발생한다.

(3) 분석을 위한 기본 가정

대상과 대상을 구성하는 부품들의 물리적·기능적·사회적·경제적·법적 수명주기 조사를 통해 분석기간을 설정하고, 미래의 화폐적 가치를 현재로 환산할 때 요구되는 할인율을 정하는 단계이다.

(4) 구성항목별 비용 산정

미래에 발생할 비용까지 항목별로 나누어 계산하는 과정으로, 일반적으로 유사 사례 조사를 활용한다.

(5) 전체 비용 종합

구성항목별로 산정한 비용을 종합하는 단계로, 단순 항목간 비교를 위한 불변 총비용과 현가에 기초한 의사결정을 목표로 하는 할인 총비용까지 크게 두 가지의 방법이 있다.

(6) LCC분석에 근거한 의사결정

LCC분석 결과와 기타 경제성 분석 결과를 토대로 의사를 결정하는 단계이다.

(7) 자료축적 및 피드백의 과정을 거친다.

LCC 수행과정의 문제점을 찾고, 예상과 실제의 수치를 비교하여 수정해가는 단계이다.

5. 생태효율성(Eco-efficiency)

가. 생태효율성의 배경

산업화와 경제성장을 추구하던 사회에서 비롯된 환경오염으로 지속가능한 개발이 요구되기 시작하였다. 이러한 배경 속에서 1992년 출판된 Stephan Schmidheiny의 <Changing Course: A Global Business Perspective on Development and the Environment>에서 ‘생태효율성’이 처음 사용되었다. 또한 같은 해 브라질 리우데자네이루에서 개최된 지구정상회의에서도 세계지속가능발전기업협의회(World Business Council for Sustainable Development, WBCSD)에 의해 새로운 비즈니스 개념으로 생태효율성이 공식적으로 채택되고, 이를 개기로 생태효율성이 활발히 논의되었다(이, 2013).

나. 생태효율성의 정의

WBCSD는 생태효율성을 지구 환경용량 내에서 환경영향과 자원 소모를 줄이면서도 인간의 욕구와 삶의 수준을 만족시킴으로써 달성되는 지표라고 하였고, OECD(Organization for Economic Cooperation and Development)는 인간의 필요를 충족시키기 위해 사용되는 환경자원의 효율로 정의하였다(박, 2015). 정리하자면, 효율적인 자원이용과 환경오염물질 배출 절감, 그리고 경제성장의 세 꼭지를 함께 고려한 개념이다.

다. 생태효율성의 지표

생태효율성 지수는 WBCSD에 따라 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있으며, 분자인 제품 혹은 서비스의 가치가 크고, 분모인 환경부하가 적을수록 값이 증가하여 지속가능성이 높다고 할 수 있다. 분자에 해당하는 파라미터는 화폐적·기능적 그리고 기타 가치가 있으며, 분모에 해당하는 파라미터는 지구온난화, 산성화, 자원고갈 등이 있다. 이러한 파라미터들은 단일로 사용이 가능하지만, 복합된 형태로도 적용이 가능하다.

$$EE_r = \frac{y_r}{x_r}$$

EE : Eco-efficiency

r : r번째 측정대상, r=1,2,...,k

x : input variable (e.g. environmental influence)

y : output variable (e.g. product or service value)

WBCSD에서는 생태효율성을 높이기 위한 7가지 요소를 제시하였다(Table 7).

Table 7. Elements for Eco-efficiency in the business sector

Contents	
1	Reducing material requirements for goods and services
2	Reducing energy intensity of goods and services
3	Reducing toxic dispersion
4	Enhancing material recyclability
5	Maximizing the sustainable use of renewable resources
6	Extending product durability
7	Increasing the service intensity of goods and services

Ⅲ. 연구 내용

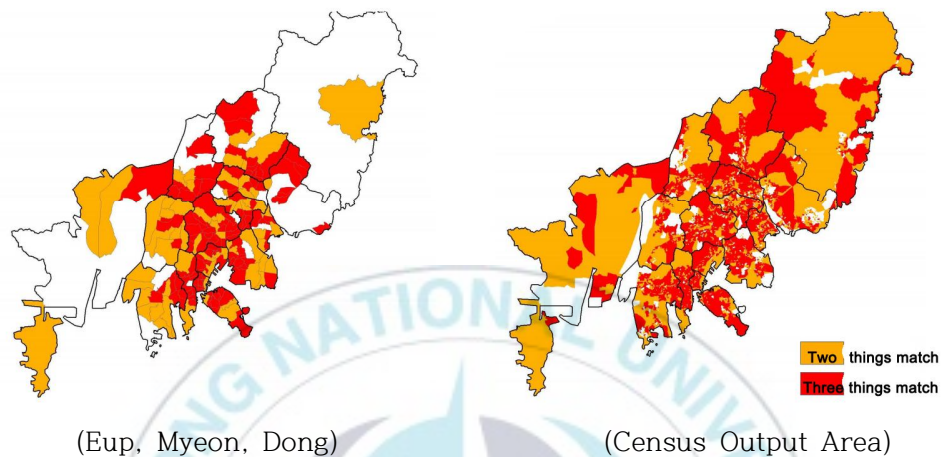
1. 연구 모델 설정

가. 대상지 선정

본 연구에서 활용되는 데이터에 기후 및 거리와 같은 지역 정보가 포함되어 있어 옥상녹화 시스템과 쿨루프가 시공될 건물의 배경 지역을 설정하였다.

부산광역시의 읍·면·동 및 집계구를 기준으로 도시재생 대상지 선정 법적 요인의 부합여부를 도식화한 결과 Fig. 7과 같이 원도심의 쇠퇴도가 높게 나타났다. 부산의 원도심은 서구, 중구, 동구, 영도구로 구성되어 있으며, 부산 경관의 핵심체로 볼 수 있는 산복도로가 위치하고 있어 피란수도의 역사성과 부산의 지역성이 두드러지게 나타나는 장소이다. 그 중에서도 동구, 서구, 중구를 잇는 망양로 일원은 1972년 도시미관 및 해안조망 확보를 위하여 최고고도지구로 설정되어 산복도로의 노면보다 높은 건물을 지을 수 없어 주민들의 민원이 지속 제기된 곳이기도 하다. 그러나 옥상녹화를 통한 그린리모델링 진행시 2030 부산도시기본계획의 녹지와 연결한 건축물 녹시율(綠示率) 증대 및 생태적 녹지 복원 계획과 맞물려 계단식 비오톱(Biotope) 확보와 스카이라인을 개선할 수 있고, 고도제한 규제 완화를 도모할 수 있어 옥상녹화를 적용하는 적재적소로 판단된다. 또한 산복도로 일원에 옥상녹화가 이루어질 경우, 해운대, 광안리, 남포동, 태종대, 국제시장, 다음으로 높은 관광 명소로 순위를 차지한 감천문화마을처럼(허, 2018),

도시재생 여행지에 대한 높은 관심과 맞물려 새로운 생태적 관광명소 형성을 기대해볼 수 있다.



*Source : Busan Metropolitan City(2015)

Fig. 7. Two or more legal standards (2013year)

망양로 일원 중 서구와 동구는 도시재생 사업이 추진되었거나 추진 중이기 때문에 중구로 선정하였으며, 고도제한지구를 고려하여 대청동4가를 최종 선정하였다. 해당 장소는 주거환경개선사업과의 시너지(Synergy)를 고려하여 주거환경개선1지구를 포함한 약 48,000m²로 상세한 위치 및 구역은 Arc GIS 10.5.1과 Photoshop CS6를 활용하여 Fig. 8로 나타냈다.

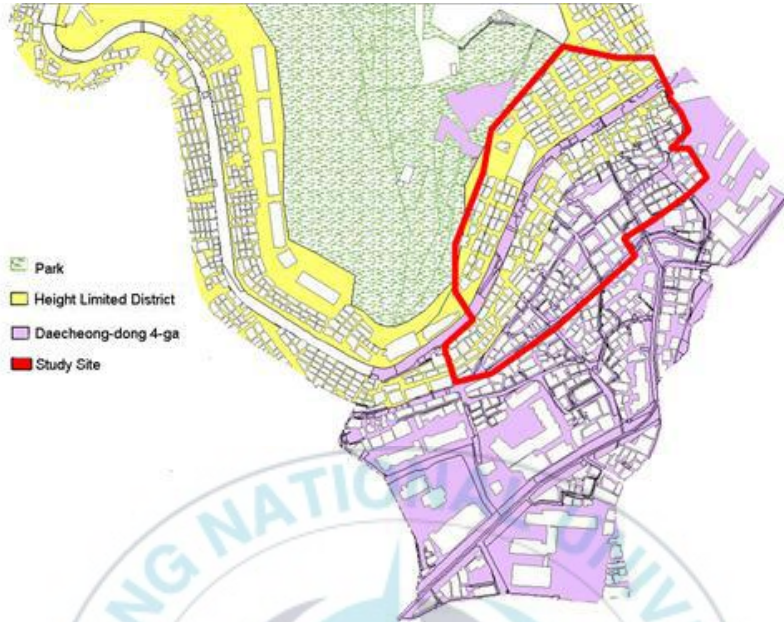


Fig. 8. The Study Area

나. 건물 설계

건축물은 콘크리트 옥상으로 가정하고, 국토교통부 승인 <조경설계기준(2016)>에 따라 2개소의 관경 75mm 배수공이 있으며, 경기개발연구원(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 기준내 용연수 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 노후건축물에 옥상녹화를 설치 및 건물 내구 보강 작업이 동반되어 수명이 20년 증가한 것으로 가정한다.

다. 옥상녹화 시스템 설계

본 연구의 옥상녹화 시스템은 농촌진흥청 국립원예특작과학원의 교육용 옥상정원 모델을 표준으로 하며, 시스템 예시로 기재된 혼합형 262.5m²를 표준으로 한다. 그러나 도시재생 대상지역 선정 지표 5개 중 20년 이상 노후건축물의 50%이상의 조건이 포함되어 있기 때문에 옥상녹화 세 가지 유형 중 건축물에 부하를 가장 적게 주는 저관리 경량형(Extensive Green roof system)으로 전면을 개량한다. 저관리 경량형은 일반적으로 토심이 20cm이하이며 관수·예초·시비 등의 관리도 최소화가 요구되기 때문에 표준 모델에서 지피류가 식재되는 토심 15cm를 차용하여 Fig. 9와 같이 구조화 한다.

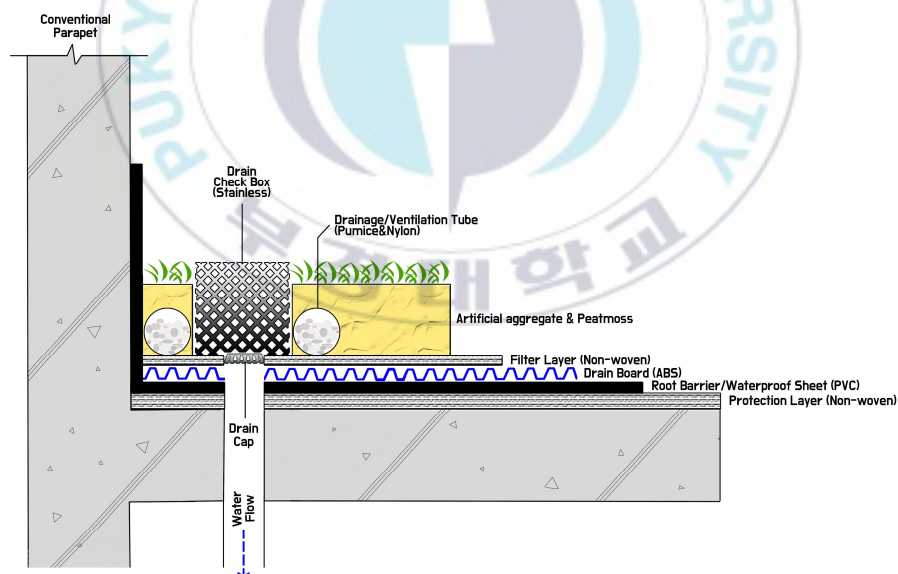


Fig. 9. Cross section of Extensive Green roof system

식재 식물은 세덤(Sedum)과인 돌나물로 선정한다. 돌나물은 강규이 외(2005)의 7년 이상 무관수·무시비의 옥상 노출 환경에서도 생존하였고 생장도 양호하였으며, 전국에 분포하는 특징을 가진다. 게다가 이춘우 외(2009)에 따르면 지피식물은 잔디와 화분으로 옥상녹화를 하는 경우 보다 건물 내부 온도 감소에 더 효과적이었으며, F. Sempe 외(2013)의 연구결과와 같이 미세먼지를 이끼보다 포집하는 공기정화 능력이 뛰어난 특징을 가진다.

위와 같은 효과로 인해 돌나물이 채택되었으며, 국립원예특작과학원(2014)에 기재된 8cm 간격의 식재를 가정한다.

식물은 시비·관수·제초·숙음질·병충해 관리가 요구된다. 그러나 강규이 외(2005)의 연구결과와 국가생물종지식정보시스템의 돌나물 특성상 질소가 지나치게 많을 경우 썩음병 증세가 생길 수 있기 때문에 시비·관수는 하지 않는다. 더불어 돌나물은 포기가 퍼져 나가기 시작하면 잡초가 전혀 발생하지 않고, 병해충이 거의 생기지 않아 농약 살포의 필요성이 없다는 국가생물종지식정보시스템을 바탕으로 농약 살포도 제외한다. 또한 옥상은 옥상녹화시스템 상세설계 및 관련도서 작성지침에 따라 주거공간에 포함되기 때문에 농약 살포를 권장하지 않고 병충해 발견시 즉시 수작업으로 해결하는 것으로 설정한다. 숙음질 또한 위와 같은 이유로 수작업으로 관리하고자 한다.

라. 쿨루프 설계

쿨루프가 시공되는 콘크리트면은 평탄화 작업이 필요한 상태로 설정하여 첫 번째 시공이 전문가를 통해 수행되는 것으로 가정하며, 그 후 유지기간 동안 7회는 붓과 롤러를 활용한 셀프 도색을 가정한다.

2. 환경영향 분석

가. 연구 목적 및 범위 정의

(1) 목적 정의

전과정 평가를 통해 옥상녹화와 쿨루프 각각을 조성-사용-폐기하는 과정에서 발생하는 환경부하를 정량적으로 산출하고자 한다.

(2) 범위 정의

(가) 기능과 기능단위, 기준흐름 설정

본 연구의 대상은 두 가지이다. 하나는, 국립원예특작과학원(2014)에서 보급형으로 만든 교육용 옥상정원이며, 그 중에서 지피류가 식재된 부분을 전면화한 옥상녹화 시스템이다. 또 다른 하나는, 전문가 인터뷰를 통해 도색 방식을 정형화한 쿨루프이다.

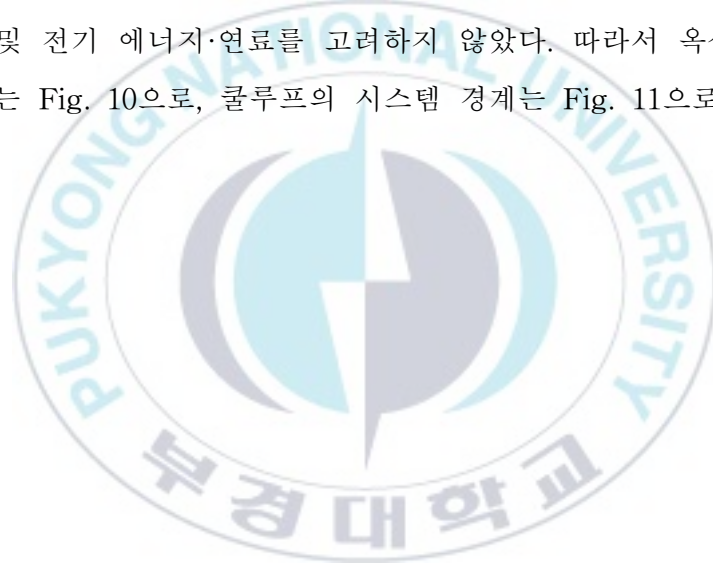
시스템의 기능(Function)은 냉·난방에너지 절감을 위한 옥상 단열이며, 기능단위(Function Unit, f.u.)는 40년 수명의 콘크리트 옥상 262.5m²이다.

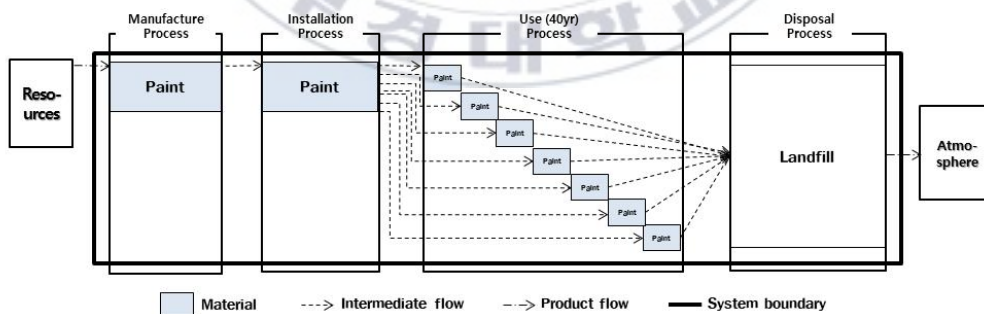
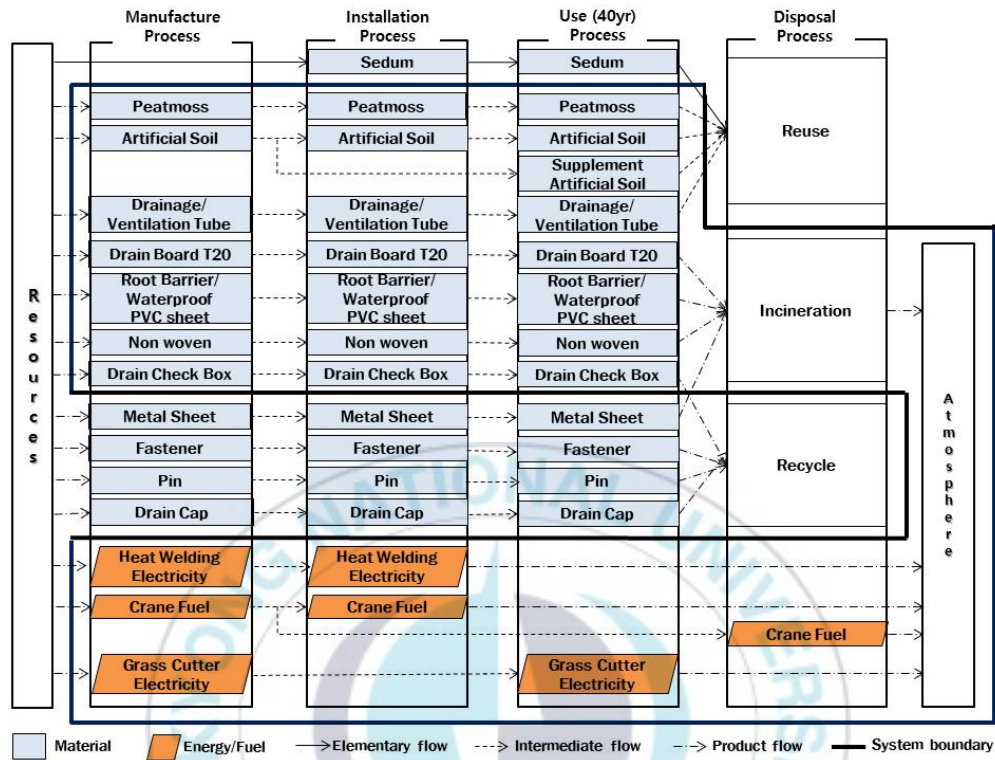
(나) 시스템 경계 설정

환경영향 평가의 시스템 경계(System boundary)는 40년간 각 시스

템이 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. 운송거리에 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, 건물의 수명 종료와 함께 옥상녹화와 쿨루프 시스템도 동일하게 철거되는 것으로 가정하여 폐기과정에서 별도의 기계사용 및 전기 에너지·연료를 고려하지 않았다. 따라서 옥상녹화의 시스템 경계는 Fig. 10으로, 쿨루프의 시스템 경계는 Fig. 11으로 도식화 하였다.





나. 데이터 수집

환경영향 평가를 위한 1차적 데이터는 시스템을 구성하는 재료로써, 문헌자료와 현장 조사 그리고 전문가 인터뷰를 통해 수집하였다. 그리고 각각의 재료를 완성하기까지 발생한 환경부하인 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·유보된 최신 기술을 기술적 경계로 가진다.

(1) 옥상녹화 시스템

옥상녹화 시스템을 구성하는 재료의 경우, 국립원예특작과학원의 교육용 옥상정원 보급형(2014) 설계도 및 내역서를 토대로 구성한다. 문헌 자료를 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, 에어용접기는 고진수 등(2014)에 기재된 장비 사양과 김대규 등(2018)의 용착속도를 추정치로 활용하였다.

사용 단계에서 요구되는 기질 보충량은 G. Peri 등(2012)의 기질 보충

량을 추측치로 차용하였다. 또한 전정을 위한 기기의 전기에너지 소모량을 현장 조사를 통해 기기 정보를 추출하여 평균 계산치를 사용하였다.

마지막으로 폐기는 환경부의 <건설폐기물의 처리 등에 관한 업무처리 지침(시행 2018.1.16.)>을 기준으로 폐기 방식을 결정하였다.

(2) 쿨루프

쿨루프는 국내 표준 규격이 없고, 업체와 제품 성능에 따라 도배 차수 및 두께가 달라지기 때문에 10년 이상의 경력을 가진 전문가 인터뷰를 거쳐 페인트의 종류 및 도배 방법을 Table 8과 같이 선정하였다.

Table 8. Specifications of Cool roof paint.

Category	Alkyd Water Paint	Color	White
Item	Thickness	Unit	Number
Top coat	75	μm	1
Base coat	75	μm	1

다. 영향평가 범주 및 방법

전과정 평가의 단계는 필수 단계인 분류화와 특성화까지 진행하였으며, 특성화는 특정 영향범주에 속하는 모든 목록항목들의 영향을 합산하는 단계로, 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ij} = Load_j \times eqv_{ij}$$

C_{ij} : 목록항목 j가 영향범주 i에 미치는 영향의 크기. g-eq/f.u.

$Load_j$: 목록항목 j의 환경부하량, g/f.u

f.u. : functional unit, 기능단위

eqv_{ij} : I라는 영향범주에 속한 목록항목 j의 상응인자 값(equivalency factor), g-eq./g

또한, 목록항목들이 속한 특정 영향범주 i에 미치는 영향의 크기는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i = \sum C_{ij} = \sum (Load_j \times eqv_{ij})$$

본 연구는 CO₂ 주요 발생처인 건축물의 에너지 절감을 통한 옥상녹화와 쿨루프, 두 가지 시스템의 환경성 비교가 포함되며, CO₂를 흡수 하는 식물의 영향이 평가 인자로 고려되기 때문에 환경영향평가의 범주로 지구온난화에 미치는 영향을 설정하였다. 지구온난화에 대한 영향으로 특성화하기 위한 계수로 인간의 수명과 유사한 IPCC(2007)의 100년 기준 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)를 활용하였다. 더불어 인간 활동의 주 범위이자 인간의 활동 중 화석연료 사용에 크게 영향을 받는 도시 공기 오염(Urban Air Pollution, UAP)의 잠재적 환경부하를 두 번째 영향평가 범주로 채택하여 산출하였다. 도시 공기 오염은 SO₂를 표준물질로 채택하며, 표준물질을 포함한 대기오염물질인 CO, NO₂, 미세먼지(Suspended particulate matter, 10μm이하), 광화학스모그(Photochemical oxidants)의 단위량 배출 농도계수 [(μg/m³)/(kg/yr)]를 구한 후, 1차적으로 일본의 환경기준값(The environmental standard value in Japan)으로 나누고, 2차로 표준물질로 나누어 표준물질에 대한 비율을 도출하는 방법으로 특성화하였

다.

위에서 제시된 두 가지 환경영향범주는 LIME2(Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)의 방법론과 MILCA를 통한 모델링이 진행되었다(AIST and JEMAI, 2012; JLCA, 2012; JEMAI, 2011).

라. 가정 및 제한사항

(1) 가정

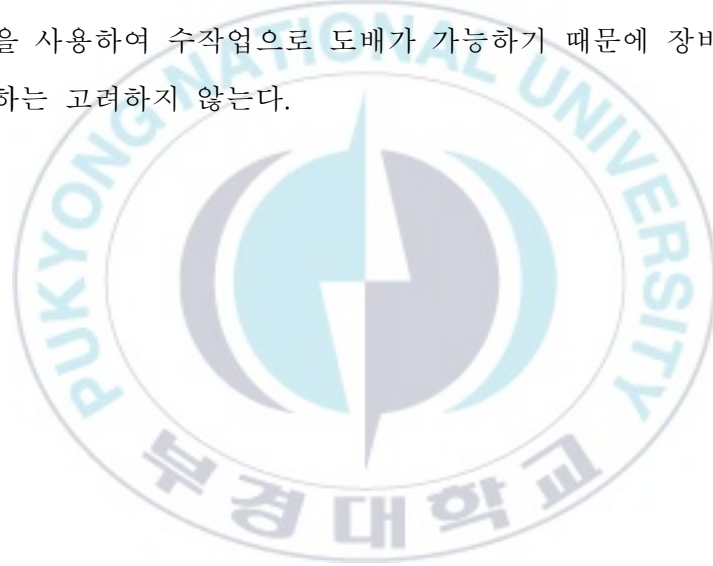
생애주기 전반을 고려한 전과정 평가(Cradle-to-grave)에서는 수명주기가 고려되는데, 옥상녹화 시스템의 소재의 경우 Nyuk Hien Wong 등(2003)에 의하면 구성 자재들이 직사광선으로부터 보호되어 내구수명이 40년 이상이 될 것으로 보고 있고, Giorgia Peri 등(2012)과 Sanaz Bozorg Chenani 등(2015) 또한 옥상녹화 시스템 수명을 40년으로 가정하였기에, 본 연구에서도 옥상녹화 시스템의 부품을 포함한 전반의 수명이 40년인 것으로 가정한다.

쿨루프를 조성하는 소재는 알키드(Alkyd) 수성 도료이고, 국토교통부의 <2017 장기수선계획 실무 가이드라인>에 명시된 건물 외부 수성페인트 칠의 전면도장 주기인 5년을 쿨루프 수명으로 적용하였다.

더불어 전과정 평가에 포함되는 소재들의 일부가 국내 데이터베이스인 TOTAL software의 LCI에 구축되어있지 않아 일본의 IDEA ver1.1의 데이터베이스가 한국의 것과 동일하다고 가정하여 활용하였다.

(2) 제한사항

옥상녹화 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. 쿨루프는 도막방수공사 표준시방서(KCS 41 40 06 :2016)에 따라 솔, 롤러, 고무주걱 등을 사용하여 수작업으로 도배가 가능하기 때문에 장비 사용에 대한 환경부하는 고려하지 않는다.



3. 경제성 분석

가. 연구 목적 및 범위 정의

(1) 목적 정의

생애주기비용 분석을 통해 목표기간 동안 옥상녹화와 쿨루프를 설치 및 사용할 때 투입되는 총비용을 현재 금액을 기준으로 산출하고, 결과 값을 토대로 옥상녹화와 쿨루프의 경제적 우위를 가려 최종적으로 도시재생 사업에 활용할 것인지 의사결정하기 위한 수단으로 활용하고자 한다.

(2) 범위 정의

(가) 분석기간 설정

친환경 단열공법으로 채택된 옥상녹화와 쿨루프의 LCC분석을 시행하기 위해서는 시공의 바탕이 되는 건축물의 수명주기 파악이 필요한데, 이는 앞서 기술한 LCA와 동일한 모델을 활용함으로써 같은 기간인 40년을 적용한다.

(나) 할인율(Discount rate)

공칭할인율은 장기정부채권의 적용을 원칙으로 하나 국내에서는 장기정부채권 시장의 규모가 작고, 10년 이상의 경제전망의 예측이 어려워

일반적으로 실질할인율(Real(Constant) Discount rate)을 적용한다(정 등, 2002; 한양경제연구원). 그러나 본 연구에서는 옥상녹화와 쿨루프의 단순 비교를 목표로 하여 할인율에 대한 고려는 제외한다.

(다) LCC 구성 항목 설정

비용분석기간 동안 옥상녹화와 쿨루프의 생애주기비용에 영향을 미치는 공통 항목을 추출 및 분류하였다. 생애주기비용은 크게 초기투자비용과 유지·관리 비용으로 분류된다. 폐기 단계의 경우 건축물이 수명 종료됨에 따라 철거가 진행되고, 동시에 옥상녹화와 쿨루프도 철거되는 것으로 가정하여 고려하지 않는다. 또한, 건설폐기물은 다양한 소재가 혼합되어 분류가 쉽지 않고 폐기물의 무게와 거리에 따라 비용이 정해지기 때문에 표준을 잡기가 어렵다. 더불어 옥상녹화 시스템의 토양, 식물, 체크박스 등은 재활용이 가능하기 때문에 폐기물의 양이 많이 없을 것으로 추측되며 Giorgia, P et al(2012)의 연구결과를 통해서도 옥상녹화의 폐기 단계 비용이 전체 생애주기비용의 10% 미만의 낮은 영향을 끼쳐 비교를 목표로 하는 쿨루프의 폐기물과 발생량이 비슷할 것으로 판단되어 LCC 구성 항목에서 제외하였다.

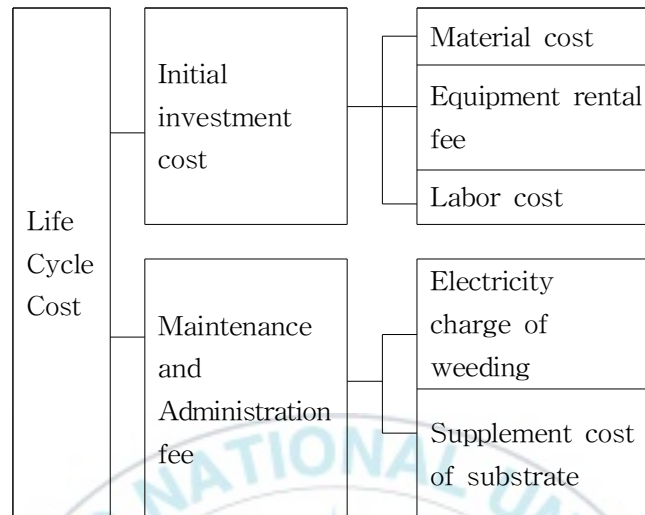


Fig. 12. Classification of component of LCC

나. 데이터 수집

본 연구의 옥상녹화 표준 모델로 설정한 국립원예특작과학원(2014)을 통해 옥상녹화를 시공하며 소요된 비용들을 확인할 수 있었다. 그러나 기존 혼합형을 돌나물이 식재되는 단면의 전면화하여 저관리·경량형으로 변화시켜 본 연구에서 적용하기 때문에 노무비, 재료비 및 공사 시일은 문헌과 차이가 발생하였다.

쿨루프는 사단법인 한국물가정보(Korea Price Information, KPI)의 건축 자재의 도막방수에서 차열용 페인트를 기준으로 재료비를 책정하고, 한국 건설기술원(Korea Institute of Civil Engineering and Bilding Technology, KICT)의 2019 품셈의 도막바름을 기준으로 노무비를 책정하였다. 2014년이 아닌 2019년도 데이터를 활용한 원인으로 2014년도 품셈에서 우레탄과 고무재질의 도막바름과 교량 도막 외에는 노무비를 찾을 수 없었던 점을

들 수 있으며, 2014년도부터 2019년까지 하락세를 보인 인플레이션을 및 기준금리와 국립원예특작과학원(2014)에서 사용한 특정 업체의 제품 6개를 2019년 카탈로그의 가격과 비교하였을 때 가격변동이 5개의 제품에서 없었던 점을 바탕으로, 2019년의 데이터와 2014년의 데이터 값에 큰 차이가 없다고 판단하여 2019년도의 데이터를 활용하였다.

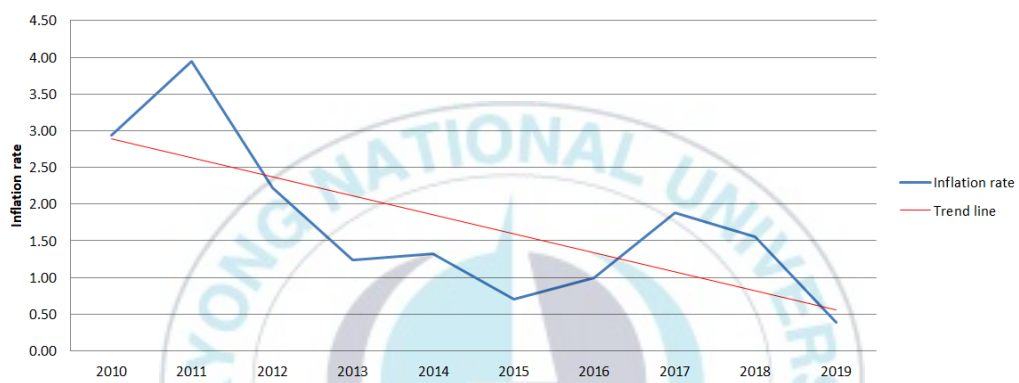


Fig. 13. Trends in Inflation (2014~2019year)

4. 생태효율성 평가

가. 연구 목적 및 범위 정의

(1) 목적 정의

환경과 경제, 두 가지 분야를 동시에 고려하는 생태효율성 평가를 통해 옥상녹화와 쿨루프의 지속가능성을 비교하고, 공공의 이익을 위한 공법을 최종 선정하는 것을 목표로 한다.

(2) 범위 정의

생태효율성을 평가하는 환경영향 인자는 앞서 진행하는 LCA 평가 결과를 활용하고, 경제적 가치 인자는 비용 편익으로써 옥상녹화와 쿨루프의 냉·난방 에너지 절약비용과 옥상녹화의 주말농장 대체역할로 절약한 기름 값과 온실가스 배출 절약 비용을 계산 및 적용한다.

IV. 연구 결과 및 고찰

1. 전과정 목록분석 결과

전과정 목록분석은 설정된 시스템 경계를 바탕으로 투입물과 산출물의 데이터를 수집하고, 기능단위 또는 기준흐름에 따른 환경부하를 계산 및 파악하는 단계이다. 옥상녹화 시스템에 투입되는 자재 Table 9와 쿨루프를 구성하는 요소에 해당하는 Table 10을 IDEA의 데이터베이스를 활용해 MiLCA로 모델링하였다.

목록분석 결과 옥상녹화는 총 150개의 목록항목이 도출되었으며, 투입된 물질은 67개로 나타났고, 산출된 물질은 대기권, 수권, 지권에 복합적으로 83개의 환경부하 물질이 발생하였다. 쿨루프의 경우, 투입물 61개와 산출물 78개로 총 139개의 목록항목으로 나타났다. 옥상녹화와 쿨루프의 목록항목은 각각 Table 11과 Table 12로 중복을 제외하고 기술하였다.

Table 9. 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

* ⚡ : Electricity and Fuel Energy

Table 10. List and quantity of components used in the Cool roof.

Component	Material	MiLCA DB	Amount	Unit
Installation				
Paint	limestone mixture	Coat paint, white, for car use, organic solvent	47.25	kg
Use and maintenance				
Paint	limestone mixture	Coat paint, white, for car use, organic solvent	330.75	kg

Table 11. Result of Life-Cycle Inventory analysis of Green roof.

Green roof			
	Elementary flow		Elementary flow
Input flow	air	Output flow	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
	nickel		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 (> PM ₁₀)
	silica stone		particles (PM ₁₀)
	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 recycable
	cinder, recycable		bittern
	coke oven gas (COG)		blast furnace gas (BFG)
	heat energy		coke oven gas (COG)
	Linz-Donawitz gas		rubble and debris, recycable
	miscellaneous ore		sludge, recycable
	off gas		slug, recycable
	pig iron scrap		steel and iron scrap
	steel scrap		waste alkali, recycable
	sulfur dioxide, recycable		waste alkali, recycable
	used paper		waste glass and ceramic recycable
	waste alkali, recycable		waste textiles, recycable
	waste textiles, recycable		
	waste wood, recycable		
Total	67	Total	83

Table 12. Result of Life-Cycle Inventory analysis of Cool roof.

Cool roof			
	Elementary flow		Elementary flow
	Input flow	Output flow	
	air antimony barium bauxite bismuth boron brine calcium carbonate carbon chromium clay cobalt copper diatomite dolomite feldspar fluorspar freshwater, low scarcity fold ground water, low scarcity iron kaolin lead lithium manganese marble molybdenum natural latex nickel phosphorus platinum primary energy from geothermics primary energy from hydro power primary energy from solar energy quartz sand sea water serpentine silica stone silver sodium chloride sulfur talc titanium tungsten vanadium zinc uranium U308 coking coal 29MJ/kg crude 44.7MJ/kg general charcoal 25.7MJ/kg natural gas 54.6MJ/kg natural gas liquid 46.5MJ/kg coke oven gas (COG) dust and soot, recycable off gas spent oil, recycable steel scrap sulfur dioxide, recycable used paper waste alkali, recycable		2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dio-xin acid (as H+) ammonia ammonium arsenic biological oxygen demand boron C6 alkylbenzene cadmium carbon dioxide (biogenic) carbon dioxide (fossil) carbon monoxide chemical oxygen demand chlorine chromium cobalt copper CxHy:hydrocarbons:CxHy earth & sand (landfill) hydrogen chloride hydrogen fluoride hydrogen sulfide lead low-level radioactive waste manganese mercury metal wastes (landfill) methane metane (fossil) nickel nickel compounds nitrous oxide nitrogen dioxide nitrogen, total (excluding N2) non-methane volatile organic compounds particles (> PM10) particles (PM10) PFC-14 phnol phosphorus, total slag (landfill) sludge (landfill) sulfur dioxide sulfur hexafluoride sulfur oxides sulphuric acid suspended solids treated water vanadium volatile organic compound water vapour zinc coke oven gas (COG) miscellaneous industrial waste rubble and debris, recycable slug, recycable waste alkali, recycable waste glass and ceramic recycable
Total	61	Total	78

2. 환경영향 분석 결과

특성화를 통하여 전과정 평가에서 환경영향을 분석하였다. 특성화는 투입물에 의해 발생한 환경부하를 특정 영향범주로 분류화를 거쳐 영향범주별 특성화 인자에 대한 잠재적인 환경 영향을 정량화하는 단계이다.

본 연구에서는 가장 큰 기후변화로 손꼽히는 지구온난화를 가속화시키는 온실가스를 감축하기 위하여 옥상녹화와 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.

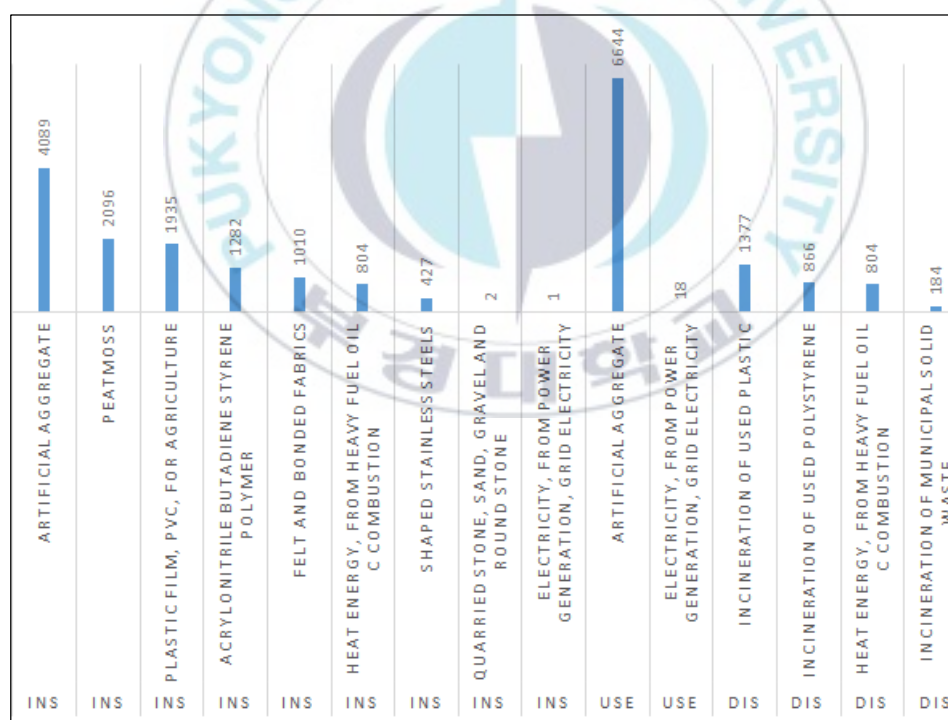
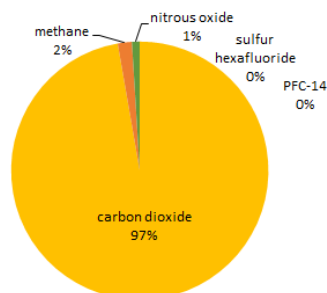
가. 옥상녹화

(1) 지구온난화 (Global Warming, GW)

옥상녹화 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 13).

Table 13. 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



*INS : Installation stage , USE : Use stage . DIS : Disposal stage

Fig. 14. Global Warming Impact Value by Component.

이산화탄소의 주 발생요인을 찾기 위해 시스템 구성 재료(Component)를 재분석한 결과 Fig. 14와 같이 사용 단계의 인공토양에서 $6,644\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{e}$ 의 높은 잠재적 환경부하가 도출되었다. 다음으로 높은 값을 가지는 요소 또한 설치 단계의 인공토양으로, 인공토양이 옥상녹화를 구성하는 자재 중 지구온난화의 환경부하를 야기하는 주된 요인으로 나타났다. 인공토양에서 높은 환경부하가 발생한 이유는 옥상녹화에 투입되는 요소들의 총무게 중 인공토양이 90%의 높은 비율을 차지하기 때문으로 추정된다. 또한 이 등(1999)의 Molecular sieve, 김 등(2018)의 Bottom ash, 김 등(2017)의 Coco-peat와 같은 인공토양 소재의 제조단계에서 직접적인 가열 또는 전기 에너지 소모가 있기 때문에 인공토양의 사용과 함께 지구온난화에 대한 잠재적 환경부하가 존재한다고 할 수 있다.

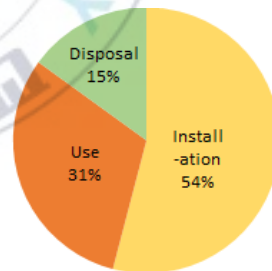
인공토양 다음으로 피트모스가 높은 값으로 도출되었다. 피트모스는 약 300여종의 식물 및 물이끼류가 죽고, 분해되며 쌓인 잔여물(Shaw et al., 2013)로 환경부하가 발생되지 않는 자연물로 생각될 수 있으나, Canadian Sphagnum Peat Moss Association(2006)에 따르면 수확-포장-이동의 각 단계에서 기기장비가 사용되며 유기물 분해 과정을 통해 온실가스가 추가로 배출되기 때문에 피트모스는 높은 환경부하를 나타내었다. 이러한 결과를 통해 피트모스에 대한 세 가지의 우려 점은 다음과 같다. 첫 번째는 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. 피트모

스는 국내 생산이 어렵기 때문에 수입을 지속하면서 환경부하를 절감시킨다는 것은 현실적으로 어려운 것으로 판단된다. 따라서 국내의 자원을 활용한 대체재 개발이 필요하다.

인공토양과 피트모스 다음으로 복합방근·방수 자재인 PVC(Polyvinyl chloride)가 설치단계에서 1935kg·CO₂e의 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.

Table 14. Comparison of Global Warming Effects by Stages of Green roof.

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



옥상녹화 시스템의 지구온난화 영향을 단계별로 봤을 때, 제조과정을 포함한 설치 단계가 11,646kg·CO₂e으로 가장 높은 비율을 차지하였으며, 다량의 인공토양이 투입되는 사용 단계가 31%, 폐기 단계가 15%를 차지하였다. 폐기 단계가 낮은 비율을 차지하게 된 원인으로 재사용과 재활용을 들 수 있다. 전문가 인터뷰를 통해 옥상녹화 시스템 종료 후, 인공토양

은 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 배수점검구만 대상으로 선정한다. 복합방근·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.

(2) 도시대기오염 (UAP, Urban Air Pollution)

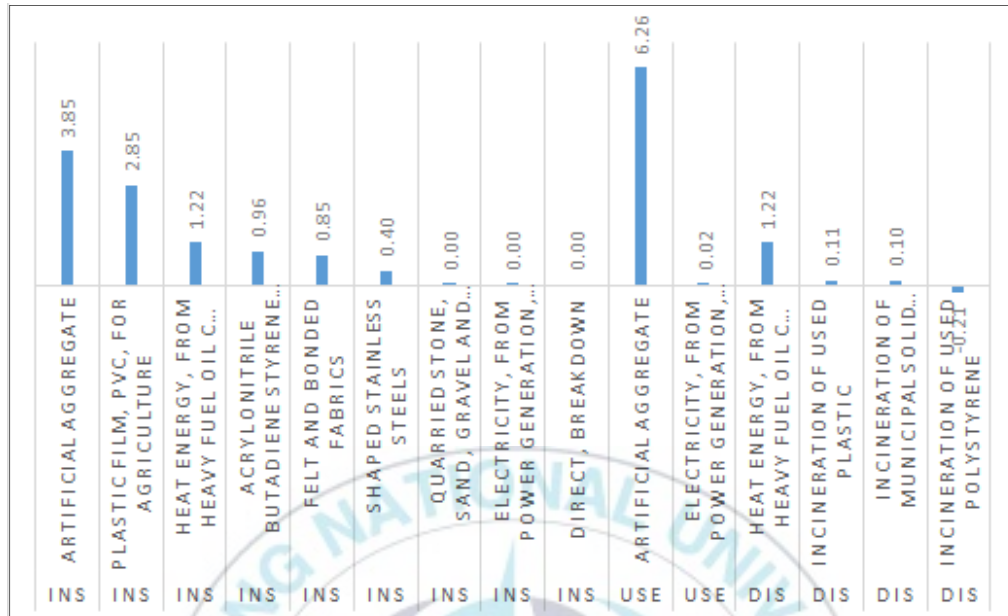
옥상녹화 시스템의 도시대기오염에 대한 잠재적 영향을 분석하였다. 그 결과 총 17.62 kg·SO₂e 로 산출되었다. 이산화황(Sulfur dioxide)이 65%로 가장 높은 비중을 차지하였고, 다음으로 황산화물(Sulfur oxides) 25%, 질소산화물(Nitrogen oxides) 10%, 그리고 이산화질소(Nitrogen dioxide)는 0에 가까운 값으로 나타났다(Table 15).

Table 15. 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	

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, O₃같은 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). 도시대기오염에 대한 환경영향평가는 인간에게 위해요소가 될 수 있는 SO_x와 NO_x를 중심으로 평가하여 SO₂로 특성화한다. 황(S) 성분을 함유하고 있는 화석연료의 사용이 증가함에 따라 도시대기오염 농도가 올라가는데, 대표적인 1차적 발생처로 공장과 자동차를 지목할 수 있다.

연구 결과, 옥상녹화는 90%의 높은 비율로 SO_x가 발생하여 화석연료 사용이 많았음을 추측 할 수 있다. Table 15와 같은 결과가 도출된 원인을 찾기 위해 투입 물질별 환경부하를 추가 계산하였다. 그 결과 도출된 Fig. 15는 지구온난화에 대한 잠재적 환경부하를 물질별로 분석한 Fig. 14와 유사한 형태를 띠고 있어 도시대기오염 또한 인공토양의 투입 양에 큰 영향을 받은 것으로 판단된다.

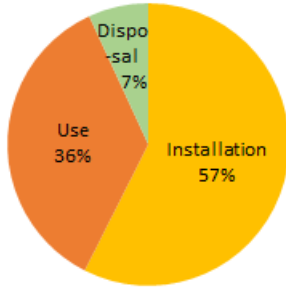


*INS : Installation stage , USE : Use stage . DIS : Disposal stage

Fig. 15. Urban Air Pollution Impact Value by Component.

단계별 도시대기오염 잠재적 환경부하는 Table 16의 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.

Table 16. Comparison of Urban Air Pollution Effects by Stages.

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

(3) 주말농장의 대체로 절감한 자동차 연료의 환경부하

본 연구에서 옥상녹화는 단열이 주 기능이나, 부가적으로 식생을 통한 채소 재배지로서 기능도 가진다. 그리하여 식생과 관계가 없는 쿨루프를 제외하고 옥상녹화에 한해서 주말농장의 역할을 대체할 수 있는 수단으로써 환경부하의 영향을 고려하였다.

주말농장을 찾는 비율은 주5일 근무의 확산과 자연에서 정서함양을 하려는 도시민(都市民)의 욕구와 함께 증가하고(경기도농업기술원, 2014), 5도 2촌이라는 말까지 생겨나면서 주말농장에서 1박을 하는 체류형 주말농장도 확산되고 있어 주말농장의 대체로 절감한 자동차 연료의 환경부하를 영향인자로 포함하고자 한다.

홍창수(2012)와 유찬주 등(2002)의 설문결과에 의하면 주말농장을 참여하는 동기로 여가시간과 교육의 측면을 중시하였는데, 저관리·경량형 옥상녹화 유형에서 식재되는 초화류를 통해서도 주말농장에 대한 욕구를 대체해 줄 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 도입되는 돌나물(*Sedum sarmentosum*)의 경우 초화류이나 김치, 무침, 샐러드, 주스, 등의 식자재로 활용 또한 가능하기 때문이다.

옥상텃밭을 주말농장지로 대체함에 따라 절감된 환경부하는 주말농장의 방문 주기, 이동수단 및 거리, 자동차 평균연비를 통해 발생량을 산출하고, LCA를 통해 지구온난화에 대한 잠재적 환경부하와 도시대기오염에 대한 잠재적 환경부하로 재환산하였다.

유찬주 등(2002)에서 36.7%를 차지한 주1회 방문이 가장 많았고 다음으로 1~2주에 1회 방문이 높은 순위를 차지하여 주1회를 방문을 가정하였고, 임미정 등(2011), 홍창수(2012), 장진 등(2013)을 통해 주 이동수단이 자가용임을 확인 및 적용하였다. 주말농장까지 이동 거리는 대상지인 부산광역시 중구 대청동4가를 기준으로 인근 주말농장 15개소의 평균 거리를 구하였고, 자동차 평균 연비는 한국에너지공단의 <2018 자동차 에너지소비효율 분석집>의 ¹⁾복합연비 15.49km/L를 채택하여 활용하였다.

1) 복합연비(Combined 모드 측정 연비)는 FTP-75 모드(도심주행모드) 측정 연비와 HWFET 모드(고속도로주행 모드) 측정 연비를 시험을 통해 측정한 후 가중 평균하여 산출하는 방식임

Table 17. Value entered in the calculation of saved transportation fuel.

Contents	Value	Unit	Source
Usage period	40	yr	
Number of visits	52	wk/yr	Yu et, al.,(2002)
Average distance (round trip)	36.34	km	
Fuel efficiency of Private Car	15.49	km/L	Korea Energy Corporation(2018)

$$\text{Usage period} \times \text{Number of visits} \times \text{Transfer time} \times \text{Average distance} \\ \div \text{Fuel efficiency of private car} \times \text{Oil price}$$

Equation 1. Saved transportation fuel instead of Weekend Farm(40years).

Table 18. Information about stored fuel.

Component	Material	MiLCA DB	Amount	Unit
⚡ Fuel (for car)	Fuel	Heat energy, from heavy fuel oil C combustion	4879.74	L

* ⚡ : Electricity and Fuel Energy

주말농장을 운영함으로써 40년간 소모하는 자동차 휘발유 양을 Table 17과 같이 인자를 선정하였고, 계산을 통해 4,879.74L 의 값을 산출하였다. 이 연료의 양은 IDEA 인벤토리의 Heat energy, from heavy fuel oil C combustion을 활용하여 MiLCA로 모델링한 결과 지구온난화에 대한 잠재적 환경부하는 16,355.19kg·CO₂e, 도시대기오염에 대한 잠재적 환경부하는 24.736kg·SO₂e로 나타났다.

Table 19. GWP value and UAP value of saved fuel.

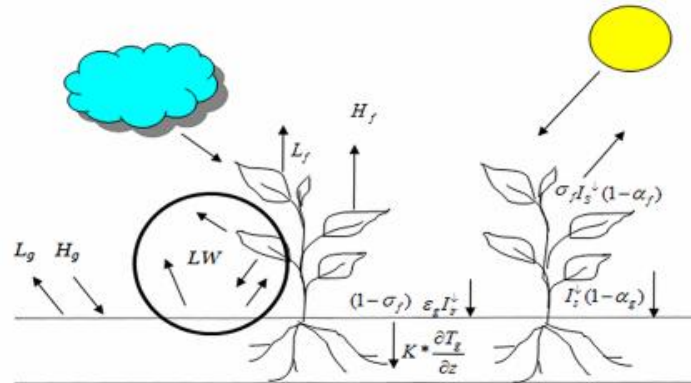
Global Warming			Urban Air Pollution		
Element	Equivalent	Unit	Element	Equivalent	Unit
Carbon dioxide	1,5852.34	kg·CO ₂ e	Nitrogen dioxide	1.113 ⁻¹⁰	kg·SO ₂ e
Methane	426.51	kg·CO ₂ e	Nitrogen oxide	1.098	kg·SO ₂ e
Nitrous oxide	76.34	kg·CO ₂ e	Sulfur dioxide	22.540	kg·SO ₂ e
PFC-14	17.7 ⁻⁷	kg·CO ₂ e	Sulfur oxides	1.098	kg·SO ₂ e
Sulfur hexafluoride	1.9 ⁻⁸	kg·CO ₂ e			
Total	16,355.19	kg·CO ₂ e	Total	24.736	kg·SO ₂ e

(4) 돌나물 광합성으로 감쇄한 환경부하

옥상녹화 시스템의 전면에 식재된 돌나물은 옥상녹화의 경량형에 주로 식재되는 세덤(*Sedum*)의 일종이며, 강규이 등(2005)와 주진희 등(2010) 그리고 박성식 등(2017)의 연구를 통해 국내의 옥상녹화 식재종으로서 적합성이 증명되었다. 또한 박성식 등(2017)에 의해 돌나물의 광합성량 연구가 진행되었는데, 그 결과 값인 $1.9\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 을 바탕으로 40년간 돌나물이 식재된 기능단위(Function Unit, F.U) 262.5m^2 가 흡수하는 이산화탄소량을 계산하였다. 그 결과 40년간 옥상녹화에 식재된 돌나물이 $27,300\text{kg}\cdot\text{CO}_2$ 를 흡수하는 것으로 도출되었다. 이 값은 옥상녹화의 전과정에서 발생하는 $21,540.71\text{kg}\cdot\text{CO}_2$ 보다 많은 양이며, 1년에 돌나물이 흡수하는 CO_2 의 양을 $682.5\text{kg}\cdot\text{CO}_2/\text{F.U}$ 라고 할 때, 옥상녹화 설치 32년 후 설치 및 사용·유지 단계에서 보상(Pay off)이 될 것으로 판단된다. 결과적으로, 옥상녹화는 대기 중 CO_2 를 절감시키는 효과가 있음을 확인할 수 있다.

(5) 냉·난방 에너지 절감으로 감쇄된 환경부하

건축물의 냉·난방 에너지 변화는 사용자의 수와 행동패턴 등의 변수가 통제되지 않기 때문에 실증(實證)에 어려움이 있어 건축물 에너지 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 이를 측정하였다. 본 연구에서는 Green Roof Energy Calculator(GREC) ver.2.0을 사용하여 냉·난방에너지 절약 비용을 산출하였는데, GREC는 건물 성능 에너지 모델링 프로그램인 ESP-r을 사용하여 건물의 에너지 흐름을 모델링하고, 미국의 에너지성에서 개발한 건물에너지 해석 프로그램 EnergyPlus으로 Fig 15 형태의 토양 내·외부 열 흐름을 모델링하여 만든 옥상녹화 전용 에너지 시뮬레이션 프로그램이다.



(L), wise heat flux
(H) and shortwave radiation
(Is) It also shows the complex exchange of long-wavelength
(LW) radiation within the canopy and into the soil. From (Sailor, 2008).

Fig. 15. Energy balance of green roof, including latent heat flux.

또한 GREC는 EnergyPlus의 옥상녹화모듈을 동일하게 차용하였으며, EnergyPlus로 8,000회 시뮬레이션한 결과를 바탕으로 설계되었다(David et al, 2014). GREC에 입력하는 건물과 옥상녹화의 변수는 Table 20과 같다.

Table 20. Variable of Green Roof Energy Calculator.

Variable	Values simulated	Unit
Building Information		
City name	State/Province	
Roof area		ft ²
Building type	1) Old (pre 1980) or New (~2004) 2) Residence or Office	
Green Roof Information		
Growing Media Depth	2 to 11.5	inches
Leaf Area Index	0.5 to 5	
Irrigation or not	Yes or No	
Percent of Green Roof covered	1 to 100	%
Substances other than Green Roof	White (albedo=0.65) Dark (albedo=0.15)	

도시 입력란에는 미국의 95개 도시와 캐나다 5개 도시 중 선택이 가능하여 일본의 Takanori et.,al(2018)와 같이 연구 대상지와 유사한 기후의 도시를 입력하였다. 본 연구의 대상지인 부산과 유사한 기후를 찾기 위해 WWIS(World Weather Information Service)의 도시별 30년 평균 기후 데이터의 기온과 강수량을 바탕으로 최종적으로 같은 위도(latitude)의 North Carolina주의 Charlotte City를 선정하였다. 또한 Charlotte City와 부산은 식생의 분포를 기준으로 경험적 기후 구분을 하며 세계적 통용 기후 분류법으로 활용되는 쾨펜 기후 분류(Köppen Climate Classification)에서 동일한 온난 습윤 기후(Cfa)로 나타나 Charlotte City를 부산의 대체 지역으로 적용에 타당성을 가진다(Table 21). 기타 입력 값은 Table 22와 동일하다.

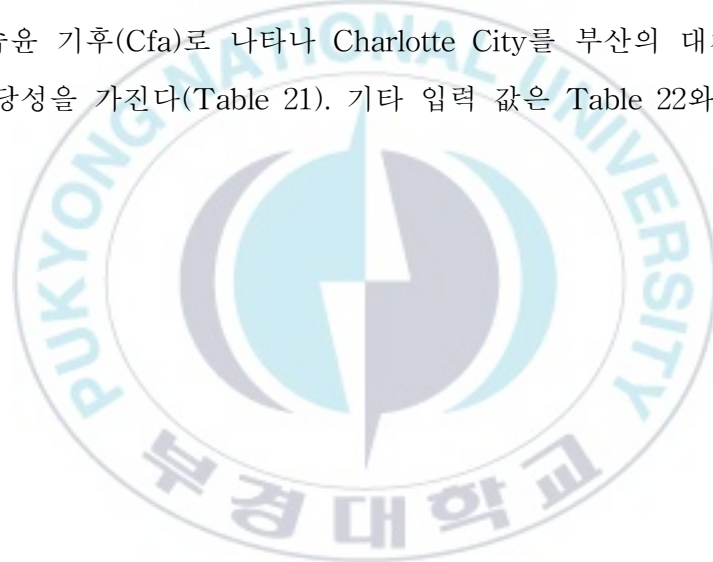
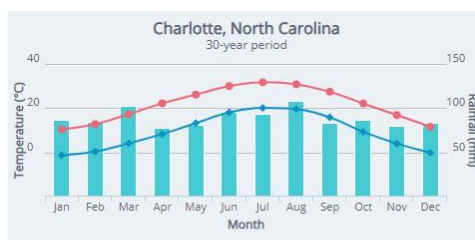


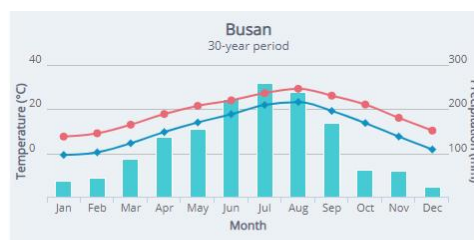
Table 21. Climate Information for Two Cities.



Source : WWIS

geographical grid	Latitude: 35.2062
	Longitude: -80.8326
Climate	Temperature humid (Köppen Climate Classification of : Cfa)

*Source : DB-City.com



Source : WWIS

geographical grid	Latitude: 35.1783
	Longitude: 129.074
Climate	Temperature humid (Köppen Climate Classification of : Cfa)

*Source : DB-City.com

Table 22. Value entered in the program.

Variable	Values simulated	Unit
Building Information		
City name	North Carolina state / Charlotte	
Roof area	2825.5	ft ²
Building type	Old Residence Bldg	
Green Roof Information		
Growing Media Depth	5.9	inches
Leaf Area Index	5	
Irrigation or not	No	
Percent of Green Roof covered	100	%
Substances other than Green Roof	Dark (albedo=0.15)	

최종적으로 산출된 값은 옥상녹화 전 콘크리트 지붕(Dark roof)과 옥상녹화를 비교했을 때 상대적인 에너지 절감량과 옥상녹화와 쿨루프의 에너지 절감 비교 값이다. Table 23과 같이 옥상녹화는 시공하지 않은 어두운 콘크리트 지붕 보다 1,962.2kWh의 전기에너지와 101Therms의 열에너지를 절약할 수 있다. 각 전기에너지와 열에너지는 IDEA의 데이터베이스를 활용하여 10,878.11kg·CO₂e, 1.65kg·SO₂e, 그리고 826.03kg·CO₂e, 0.12kg·SO₂e로 산출되어, 옥상녹화로 인해 절감한 냉·난방에너지의 총 환경부하는 11,704.14kg·CO₂e, 1.77kg·SO₂e로 나타났다.

Table 23. Comparison of Annual Energy Savings of Dark Roof, Green Roof, Cool Roof(Criteria : Green roof).

	Compared to a Dark Roof (albedo=0.15)	Compared to a White Roof (albedo=0.65)
Electrical Savings	1,962.2 kWh	86.1 kWh
Gas Savings	101.0 Therms	199.5 Therms

* 1 US Therm = 105.48MJ

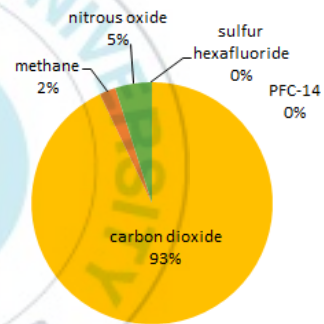
나. 쿨루프

(1) 지구온난화 (Global warming, GW)

쿨루프의 지구온난화에 대한 잠재적 영향을 분석한 결과 총 1,871kg·CO₂e로 산출되었으며, 이 중 이산화탄소가 93%의 지배적인 비율로 나타났다(Table 24).

Table 24. Global Warming Effect Factors and resulting values of Cool roof.

	Effect Factor	Value (kg·CO ₂ e)	%
Global Warming	carbon dioxide	1737.53	93
	methane	41.17	2
	nitrous oxide	92.29	5
	PFC-14	0.01	0
	sulfur hexafluoride	0.00	0
	Total	1,871.01	100



쿨루프의 소재인 페인트는 제작 공정에서 기계의 사용이 많으며 안료·수지·첨가제·용제 등의 화학물질이 다량 포함되어 옥상녹화에 투입된 부품들의 총 무게에 비해 높은 환경부하를 나타내었다. 또한 페인트는 탄소를 함유한 유기화합물이기 때문에 이산화탄소의 비율이 높게 나타난 것으로 판단된다.

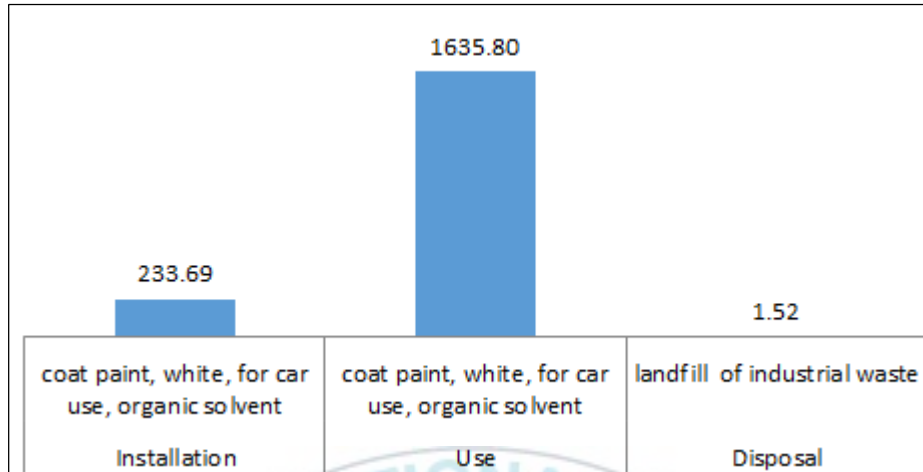


Fig. 16. Comparison of Global Warming Effects by Stages of Cool roof.

쿨루프의 경우 설치-사용-폐기 각 단계에서 하나의 재료가 다른 양으로만 투입되기 때문에 Fig. 16과 같이 설치 및 사용단계의 환경부하도 동일한 비율로 도출된 것을 확인할 수 있다. 그러나 콘크리트와 결합된 혼합물로서 지정폐기물로 분류되어 매립으로 처리된 페인트는 1.52kg·CO₂e의 낮은 환경부하가 도출되었다. 원인으로 특성화 기준 IPCC 100의 시간과 재료 분해 시간을 추정할 수 있다. IPCC 100년(2007)은 페인트가 100년의 시간 동안 매립을 통해 분해되어 발생시키는 환경부하를 뜻한다. 따라서 페인트 같은 인공물질은 매립을 통한 자연분해에 천연물질 보다 많은 시간을 요구하며 소각과 달리 침출수를 매개로 유해물질을 배출하기 때문에 지구온난화에 대한 영향은 미미한 것으로 판단된다.

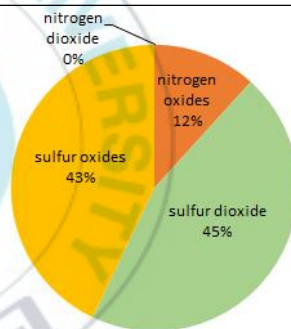
(2) 도시대기오염 (Urban Air Pollution, UAP)

쿨루프의 도시대기오염에 대한 잠재적 환경부하는 이산화황(Sulfur

dioxide) 45%, 황산화물(Sulfur oxides) 43%, 질소산화물(Nitrogen oxides) 12%, 이산화질소(Nitrogen dioxide)는 0%에 가까운 수치로 나타났으며, 총 1.81kg·SO₂e이 도출되었다(Table 25). 쿨루프는 옥상녹화의 도시대기오염에 대한 잠재적 환경부하 6.24kg·SO₂e 보다 낮은 값이 도출되어 옥상녹화보다 친환경적이라고 볼 수 있다. Fig. 17의 단계별 분석에서는 매립을 설정한 폐기 단계에서 0에 가까운 낮은 값들이 도출되었는데, 지구온난화에 대한 잠재적 환경부하 분석과 동일한 이유로 낮은 값이 도출된 것으로 판단된다.

Table 25. Urban Air Pollution Factors and Resulting values of Cool roof.

Urban Air Pollution	Effect Factor	Value (kg·SO ₂ e)	%
	sulfur dioxide	0.82	45
	sulfur oxides	0.78	43
	nitrogen oxides	0.21	12
	nitrogen dioxide	0.00	0
	Total	1.81	100



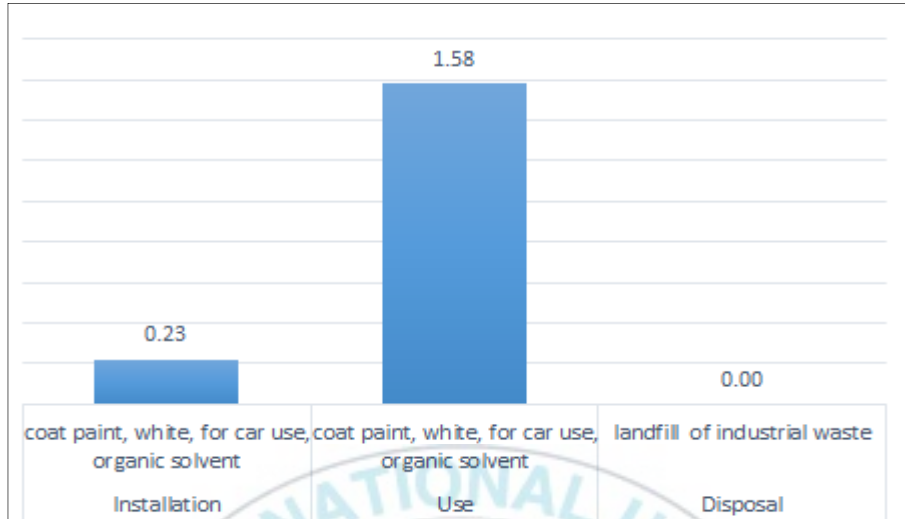


Fig. 17. Comparison of Urban air pollution by Stages of Cool roof.

(3) 냉·난방 에너지 절감으로 감축된 환경부하

2.가.(5)에서 도출된 Table 23을 활용하여 쿨루프 설치 전 후 차이를 산출하였다. 옥상녹화, 쿨루프, 콘크리트 순으로 높은 전기 에너지 절감 효과가 나타났고, 결과를 바탕으로 옥상녹화와 콘크리트 간의 절감량에서 옥상녹화와 쿨루프의 차이 값을 제거하면 쿨루프와 콘크리트 간의 절감량이 나타나는 것으로 가정하여 계산하였다. 그 결과 전기에너지는 1,876.1kWh. 가스 절감량은 -98.5Therms 값을 얻었으며 IDEA를 기반으로 환산한 전기 절감에 따른 절감한 환경부하는 1,040.08kg·CO₂e, 0.16kg·SO₂e이고, 가스 절감에 따른 절감한 환경부하는 805.59kg·CO₂e, 0.11kg·SO₂e로 나타났다. 결과적으로, 냉·난방 에너지 절감으로 지구온난화에 미치는 잠재적 환경부하 1,845.67kg·CO₂e와 도시대기오염에 대한 잠재적 환경부하 0.27kg·SO₂e를 감축시켰다.

3. 경제성 분석 결과

가. 옥상녹화

생애주기비용의 목록항목인 초기투자비, 사용·유지비용을 국립원예특작과학원(2014)의 데이터를 바탕으로 산정하였다.

설치 단계에서 활용되는 열음착기와 사용·유지 단계에서 쓰이는 제초기에 소비되는 전기비용은 산업통상자원부의 누진세 개편(2019.7.1)의 2019년도 판매단가 93원/kWh를 기준하였다.

양중기의 주유비는 한국석유공사 석유정보센터의 유가정보서비스를 활용하여 2018년 평균 주유소 유통단계의 자동차용 경유 단가 1,392원/L를 적용하였다. 2019년도의 평균 유가를 활용하지 않은 사유는 2018년 11월부터 2019년 8월까지 한시적으로 시행된 유류세 인하 정책에 있다.

또한, 본 연구는 국립원예특작과학원(2014)과 달리 파고라, 빗물저금통 같은 부가시설물이 일체 포함되지 않아 양중기는 1일 사용으로 대여기간을 단축 설정하였다.

Table 26. Detailed statement of Green roof.

Component	Product standard	Amount	Unit	Component Price(₩)		Labor expenses(₩)	
				Unit	Total	Unit	Total
Installation							
Protect layer	300g	262.5	m ²	2,025	531,563	377	98,963
Root barrier &Water proofing sheets	-	295.1	m ²	31,150	9,192,365	13,729	4,050,741
Drain board	0.02m*1.0m*1.5m	175	EA	18,333	3,208,275	755	132,125
Filter/Separation fabric	200g	262.5	m ²	1,350	354,375	251	65,888
Drainage pipe	φ130*1.0m	28.1	m	14,000	393,400	-	-
Floor access door	200*200*	2	EA	165,000	330,000	-	-
Artificial light weight aggregate	-	31.5	m ³	99,000	3,118,500	24,788	780,822
Peatmoss	-	7.9	m ³	198,000	1,564,200	24,788	195,825
Rent fee (for crane)	25ton	1	day	911,421	911,421	-	-
↘Electricity (for hot-air welding)	-	1.25	kWh	93	116	-	-
↘Fuel (for crane)	-	240.00	L	1,392	334,080	-	-
					19,938,215	5,324,364	
Use and maintenance							
Artificial light weight aggregate (for supplement)	1,050kg	39	yr	129,938	5,067,582	-	-
↘Electricity (for weedkilling)	0.8kWh	39	yr	93	2,901,600	-	-
					7,969,182		

Table 26을 바탕으로 총 금액을 도출한 결과 40년간 옥상녹화를 조성하고 사용하기까지의 투자비용은 33,231,761원으로 나타났다.

나. 쿨루프

쿨루프의 시공단계는 옥상 면의 평준화와 균열을 막아주는 전문성이 요구되기 때문에 1회에 한해 전문가 고용을 가정한다. 전문가를 통한 도색비용은 노무비와 재료비가 혼재되어있으며, 현장조사를 통해 평균치를 적용

하였다. 또한 쿨루프 도료의 가격은 한국물가정보의 차열용 페인트에 등록된 3사 제품 중 시공이 간단한 수성도료를 채택하여 현장조사를 바탕으로 평균 가격을 산정하였다. 사용·유지 단계의 경우 거주자가 수작업으로 5년마다 상·하도를 셀프 도색 하는 것으로 가정하여 노무비가 발생하지 않도록 설정하였다.

그 결과 설치 단계에서 7,954,545원, 사용·유지 단계에서 10,624,020원이 산출되었으며 40년간 쿨루프에 총 18,578,565원이 소요되었다(Table 27).

Table 27. Detailed statement of Cool roof.

Component	Product standard	Amount	Unit	Component Price(₩)		Labor expenses(₩)	
				Unit	Total	Unit	Total
Installation							
Painting (Expert)		80	3.3m ²				7,954,545
Use and maintenance							
Painting (Self)	4kg	330.75	kg	32,121	10,624,020		

4. 경제적 가치 분석 결과

생태효율성 평가를 위한 경제적 가치는 시스템으로 인해 절약한 화폐적 가치로 설정하였으며, 그 영향요인으로 냉·난방에너지 절약비용과 주말농장 대체로 절약한 교통비를 설정하였다.

가. 주말농장의 대체로 절약한 교통비

김성수 등(2002)은 주말농장을 운영하는 사람을 포함한 표본에서 주말농장을 운영하지 않거나 기피하는 이유에 대해 설문조사를 진행하였다. 설문 결과 주말농장에 대한 부정적인 인식은 교통비로 인한 경제성이 주 요인으로 도출되었고, 이러한 단점은 거주지의 옥상에 텃밭을 조성하면서 제거가 가능하여 옥상녹화가 주말농장의 대체제로서 효용성이 높다고 볼 수 있다.

교통비를 계산하기 위해서 방문주기, 주거지와 주말농장의 거리, 승용차 연비, 유류비를 인자로 채택하였다. 이동 거리는 대상지를 기준으로 인근의 15개 주말농장의 평균치를 활용하였다. 유류비의 경우 하이브리드 차종의 판매량 증대로 2016년도부터 휘발유 차량의 비율이 상승하는(한국에너지공단, 2018) 경향을 반영하여 유종을 휘발유로 선정하고, 한국석유공사 오피넷(Opinet)의 주유소로 유통되는 보통 휘발유 2018년도 평균가격 1,581.37 원을 적용하여 유가(油價)를 선정하였다. 본 연구에서 유가 상승은 고려하지 않았다.

Table 28. Value entered in the calculation of saved transportation cost.

Contents	Value	Unit	Source
Usage period	40	yr	
Number of visits	52	wk/yr	Yu et, al.,(2002)
Average distance (round trip)	36.34	km	
Fuel efficiency of Private Car	15.49	km/L	Korea Energy Corporation(2018)
Oil price	1,581.37	won/L	O-pinet of Korea National Oil Corporation(2018)

$$\text{Usage period} \times \text{Number of visits} \times \text{Transfer time} \times \text{Average passing speed} \\ \div \text{Fuel efficiency of private car} \times \text{Oil price}$$

Equation 2. Saved transportation cost instead of Weekend Farm(40yr).

옥상녹화지가 주말농장의 대체로써 절약한 교통비는 연간 192,916원이며, 40년의 생애주기를 반영하여 총 7,716,677원으로 나타났다. 자동차 보험료 및 차량의 유지관리비의 절약 비용까지 포함한다면 더 높은 비용을 절약할 것으로 예상된다.

나. 냉·난방 에너지 절약 비용

냉·난방 에너지 절약 비용은 2.가.(5)와 동일한 방법을 통해 절감한 에너지량을 도출한 후, 한국전력공사의 전기요금계산기를 활용하여 주택용(저압)의 주거용 조건으로 계산하였다. 또한 미국과 달리 한국의 주택용 전기요금은 300kWh이하, 301~450kWh, 450kWh 초과로 누진세 과금 구간이 정해져있어(2019.7.1.개편), 절감한 전기량이 월별 300kWh 이하가 되도록 12개월로 나눠 요금을 계산하고, 연간 발생한 비용으로 합산한다. 가스비는

부산의 도시가스 주택용 2018.7.1.일 기준 16.3541원/MJ을 적용한다. 또한, 전기세 및 가스비의 가격변동은 없는 것으로 가정하며 옥상녹화 시스템의 수명이 건물과 동일한 40년을 고려하여 최종 절약 비용을 산출하였다. 도출된 결과 값은 기존 사용 비용에 옥상녹화 및 쿨루프의 설치를 통한 절감되는 부가적 에너지 비용을 계산하는 것이기 때문에 전력량요금을 제외한 기본요금, 부가가치세, 필수사용량 보장공제, 전력산업기반기금은 제외하였다.

옥상녹화와 쿨루프의 냉·난방에너지 절약비용은 2.나(3)과 같이 옥상녹화, 쿨루프, 설치 전 콘크리트 지붕 순으로 에너지 절약효과가 높은 것으로 판단되며, 옥상녹화와 콘크리트 지붕 간의 비교 절약 비용을 옥상녹화의 순이익으로 채택하고, 옥상녹화와 콘크리트 지붕의 비교 절약 비용에서 옥상녹화와 쿨루프의 비교 절약 비용을 제외한 비용을 쿨루프의 순이익으로 적용하였다.

최종적으로 옥상녹화 설치를 통한 순이익은 40년간 14,267,720원으로, 연간 356,693원을 절약하는 것으로 나타났다. 쿨루프는 순이익이 40년간 1,494,600원 발생하며, 연간 37,365원을 절약하는 것으로 산출되었다. 온난 습윤한 부산의 기후를 바탕으로 계산된 쿨루프의 경우 전력 절감량은 옥상녹화와 유사하게 나타났으나 가스비용에서 큰 차이를 보여 알베도 0.65의 높은 반사율로 인해 겨울 난방비를 절감시키지 못한 것으로 판단된다.

Table 29. Comparison of Annual Energy Savings of
Concrete roof-Green roof-Cool roof.

	Green roof - Concrete (albedo=0.15)	Concrete - Cool roof(Albedo=0.65)
Electrical Savings	1,962.2 kWh	1,876.1 kWh
Gas Savings	101.0 Therms	-98.5 Therms
Total Energy Cost Savings (1yr)	356,693 won	37,365 won
Total Energy Cost Savings (40yr)	14,267,720 won	1,494,600 won

* 1 US Therm = 105.48MJ

* Ministry of Trade, Industry and Energy, Progressive electric rate tax,
2019.07.01. Reshuffle.

5. 생태효율성 평가 결과

가. 환경영향 분석

옥상녹화의 환경부하는 설치-사용-유지-폐기 단계의 전과정 평가와 주말 농장 대체로 절약한 이동수단의 연료의 환경부하, 식재된 돌나물의 광합성으로 절감한 CO₂량, 단열효과로 절약한 냉·난방 에너지로 감축한 환경부하가 고려되었다(Table 30). 전과정 평가 외의 세 가지 요인은 환경부하를 감축시키기 때문에 40년간 지구온난화에 대한 잠재적 환경부하는 -18,268.59kg·CO₂로 최종 산출되었으며, 도시대기오염에 관한 잠재적 환경부하는 12.48kg·SO₂e가 최종 도출되었다. 음수(-)가 의미하는 것은 제거 가능한 이산화탄소량이다.

Table 30. Environmental load of Green roof(40yr).

Global warming			Urban air pollution		
Element	Equivalent	Unit	Element	Equivalent	Unit
Ins-Use-Dis	21,540.00	kg·CO ₂ e	Ins-Use-Dis	17.62	kg·SO ₂ e
Saved fuel	804.45	kg·CO ₂ e	Saved fuel	3.37	kg·SO ₂ e
<i>Sedum samentosum</i> photosynthesis	27,300.00	kg·CO ₂	-	-	-
Saved Heating&Cooling Energy	11,704.14	kg·CO ₂ e	Saved Heating&Cooling Energy	1.77	kg·SO ₂ e

쿨루프의 환경부하는 설치-사용-유지-폐기 단계의 전과정 평가와 쿨루프의 단열효과로 절약한 냉·난방 에너지에 대한 환경부하를 영향인자로 선정하여 산출하였다(Table 31). 쿨루프 262.5m²가 40년간 지구온난화에 미치

는 잠재적 환경부하는 $25.33\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{e}$, 도시대기오염에 미치는 환경부하는 $1.54\text{kg}\cdot\text{SO}_2\text{e}$ 로 나타났다.

Table 31. Environmental load of Cool roof(40yr).

Global warming			Urban air pollution		
Element	Equivalent	Unit	Element	Equivalent	Unit
Ins-Use-Dis	1,871.00	$\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{e}$	Ins-Use-Dis	1.81	$\text{kg}\cdot\text{SO}_2\text{e}$
Saved Heating&Cooling Energy	1,845.67	$\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{e}$	Saved Heating&Cooling Energy	0.27	$\text{kg}\cdot\text{SO}_2\text{e}$

나. 경제적 가치 분석

생애주기 동안 발생한 옥상녹화의 순이익은 주말농장의 대체로 절약한 자동차 연료비와 절약한 냉·난방에너지 비용으로 두 가지가 있으며 각각 7,716,677원과 14,267,720원으로 총 21,984,397원의 경제적 가치를 가진 것으로 산출되었다.

쿨루프의 경우 냉·난방에너지 절감 비용이 적용되는데 40년간 1,494,600원의 순이익을 발생하는 것으로 나타났다.

다. 생태효율성 분석

생태효율성 평가는 식을 통해 도출되어지는데, 분자 값으로 시스템을 통해 얻는 경제적 가치를 적용하고, 분모에는 환경부하를 입력하여 산출한다. 그러나 앞서 도출한 옥상녹화의 환경부하 값에 음의 부호가 있으며, 환경부하가 절감되었다는 긍정적인 결과이기 때문에 김태석(2015)의 생태효율

성 트렌드 분류를 응용하여 단순 식이 아닌 Fig. 18과 같이 도식화하였다.

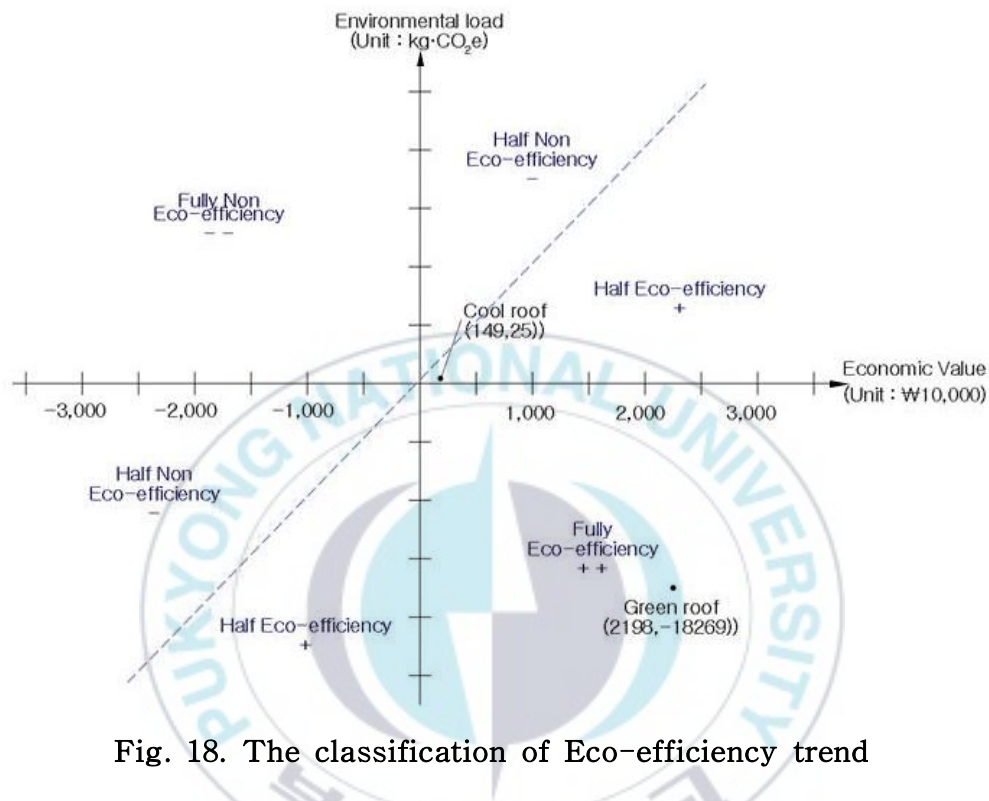


Fig. 18. The classification of Eco-efficiency trend

옥상녹화는 지구온난화에 대한 환경부하가 음의 영역에 자리하며 생태효율성이 높아 지속가능성이 매우 높다고 볼 수 있다. 반면에 쿨루프는 지속가능성이 없지는 않으나 0에 가까운 형태를 보이며 옥상녹화 보다 낮은 것을 확인할 수 있다.

6. 대상지역에 대한 적용 및 고찰

본 연구에서는 옥상녹화와 쿨루프의 환경성, 경제성, 생태효율성을 평가하고, 결과를 바탕으로 대상지에 적용 하고자 한다. 대상지는 부산광역시 중구 대청동4가의 주거환경개선1지구를 포함한 48,000m²로 설정하였으며, 주거용도지역으로 도시재생뉴딜사업의 우리동네 살리기에 해당하는 면적이다. 우리동네 살리기 유형으로 선정되었다고 가정하였을 때, 국비지원 한도를 기준으로 옥상녹화를 적용해보고, 환경영향 평가 결과를 바탕으로 부산시의 온실가스 감축 목표량에 미친 영향을 알아보하고자한다.

가. 경제성 평가 적용

연구 대상지인 대청동4가 일원이 우리동네 살리기 유형으로 선정되었다고 가정했을 때, 3년간 최대 50억원의 국비가 지원된다. 최대 사업비를 바탕으로 옥상녹화를 대상지에 적용할 때 가능성을 평가해보았다.

우선, 대상지에 소재한 건물의 바닥 면적을 지도서비스를 통해 측정하여 기능단위의 98배 면적인 25,703m²을 도출하였다. 사업비와 대상면적 그리고 옥상녹화의 경제성 평가 결과를 바탕으로 적용 가능성을 평가한 결과, 사업비로 옥상녹화 39,495m²를 시공할 수 있으며 해당 값은 대상지의 시공 면적을 초과하는 범위임으로 도시재생의 사업에 경제적 부족함은 없을 것으로 판단된다. 또한 그린리모델링 사업과 연계한다면 비용의 부담을 더 축소시킬 수 있을 것이다. 다만, 사업 기간이 짧아 사업비를 지속 활용할 수 있는 방안 모색이 필요할 것으로 판단된다.

나. 환경성 평가 적용

대상지에 소재해 있는 건물의 옥상 전면에 녹화를 진행할 경우, 대상지에 미치는 환경성 변화를 확인하고자 한다.

환경성 평가 결과 기능단위 기준 범위의 옥상녹화는 $18,268.59\text{kg}\cdot\text{CO}_2$ 의 온실가스를 절감하는 것으로 나타났다. 대상지의 옥상녹화 적용 가능 면적에 옥상녹화 시공시 40년간 $1,790,321.82\text{kg}\cdot\text{CO}_2$ 의 이산화탄소 절감이 가능하며 이 수치는 30년 수령의 나무 191,274그루가 1년간 흡수하는 이산화탄소량과 맞먹는다. 그러나 부산광역시 에너지의 건물 부문 2030년도 전망치의 37%이자, 감축 목표량인 639천톤 CO_2eq 에 비해서는 0.28%의 낮은 수치에 해당한다. 그러나 연구 대상지의 면적은 부산광역시 전 면적의 0.0001%에 불과하기 때문에 옥상녹화의 면적이 확대될수록 기후변화에 직접적인 대안으로 적용 될 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구는 기후변화를 완화시키기 위해 온실가스의 주요 발생원이자 원인인 건물에서 소모되는 에너지에 주목했고, 에너지 사용을 줄이는 공법으로 옥상녹화를 택하였다. 옥상녹화는 식물이 가지는 공기정화·심신안정·우수정화·미세먼지 제거 등의 효과를 가져 친환경 공법으로 분류되지만, 다량의 재료 투입을 요구하여 잠재적 환경오염에 대한 우려를 낳고, 높은 투자비용으로 활성화가 쉽게 이루어지지 않는 단점을 가진다. 반면에 상대적으로 저렴하고 재료가 적게 사용되는 쿨루프가 활성화되는데, 쿨루프는 인공물질로 구성되어있으며 짧은 수명주기를 가져 재도색을 요구하는 단점을 가진다. 이를 바탕으로 보다 친환경적인 공법을 도출하기 위해 40년이라는 기간을 설정하여 환경영향평가와 경제성 평가, 그리고 지속가능성 평가지표인 생태효율성 평가를 진행하였다. 또한, 온실가스 절감 효과를 극대화하기 위해 도시재생을 빌어 활성화하는 방안을 검토하였다. 그에 따른 결과는 다음과 같다.

1. 저관리 경량형 옥상녹화는 장기적으로 봤을 때, 수성 쿨루프 보다 친환경적이다.

옥상녹화는 제작시 26,346kg이상의 투입물을 요구하며 자원을 소모한다. 상대적으로 쿨루프는 알베도가 0.65이상인 도료 한 가지로 구성되며 1cm도 되지 않는 얇은 두께로 총 47kg가량이 도포되기 때문에 초기 시공 단계를 두고 봤을 때, 쿨루프가 친환경적이라고 볼 수 있다. 그러나 자원을

채취하는 순간부터 수명이 종료되어 폐기될 때까지 건축물의 수명과 동일한 40년으로 봤을 때, 옥상녹화는 쿨루프 보다 친환경적이다. 옥상녹화는 재사용·재활용 가능한 자재가 전체 투입 중량의 95%를 차지하여 폐기물을 많이 발생시키지 않는다. 또한, 옥상녹화 시스템을 구성하는 식물이 광합성 과정에서 온실가스를 $27,300\text{kg}\cdot\text{CO}_2$ 흡수하고, 여름에는 건축물 외벽을 태양 열로부터 차단하여 냉·난방에너지를 $11,704\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{e}$ 절약하고, 식물을 재배하는 취미 공간 조성으로 자동차 연료 소모를 $804\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{e}$ 만큼 절감시켜 옥상녹화의 생애주기 동안 발생한 온실가스 $21,540\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{e}$ 는 32년 만에 상쇄된다. 반면에 쿨루프는 40년간 8회에 걸쳐 도료가 입혀짐으로써 $1,871\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{e}$ 만큼의 환경부하가 발생한다. 그러나 냉·난방에너지 절약으로 일부가 상쇄되어 $26\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{e}$ 가 존재한다. 음의 영역대의 옥상녹화가 더 지구온난화에 대한 환경부하가 적어 친환경적이라고 할 수 있다.

2. 경제성은 옥상녹화 보다 쿨루프가 더 높다.

생애주기비용 분석법을 통해 옥상녹화와 쿨루프가 40년간 소모시킨 비용을 산출하고 비교하였다. 생애주기비용은 연구결과의 활용 목적과 분야에 따라 관점과 분석항목이 상이해지는데, 본 연구에서는 소비자의 관점으로 제품을 설치 및 구매하는 단계부터 시작하며 분석 결과는 옥상녹화와 쿨루프 중 경제성이 뛰어난 제품으로 의사결정하는 바탕 자료로 활용한다.

분석 결과, 옥상녹화는 40년간 33,231,761원의 비용이 발생하고, 쿨루프는 18,575,555원의 비용이 발생하는 것으로 도출되어 옥상녹화 보다 쿨루프가 14,656,206원 만큼 더 경제성이 높다고 할 수 있다.

3. 지속가능성은 옥상녹화가 쿨루프 보다 더 뛰어나다.

경제적·환경적인 영향을 함께 고려하며 지속가능성의 가장 현실적인 지표로 불리는 생태효율성 평가를 통해 옥상녹화와 쿨루프를 비교하였다. 본 연구에서 설정한 경제적 가치는 옥상녹화와 쿨루프 각각의 화폐적 가치를 고려한다. 화폐적 가치에는 냉·난방에너지 절약비용부터, 주말텃밭의 대체제로 옥상녹화를 활용할 시 절감시키는 자동차 연료 비용 등이 포함된다. 환경적 고려에서는 앞서 실시한 전과정 평가의 지구온난화에 대한 환경부하를 도입한다.

그 결과, 옥상녹화는 40년간 $18,268.59\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{e}$ 를 흡수하고 21,984,397원을 절약한다. 그에 반해 쿨루프는 동일 기간 동안 $25.33\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{e}$ 만큼 배출하고 1,494,600원을 절약하여 옥상녹화가 쿨루프 보다 생태효율성이 높다고 할 수 있다. 또한, 생애주기비용을 추가 고려하였을 때에도 옥상녹화는 11,247,364원, 쿨루프는 17,080,955원의 순수 투자비가 발생하여 장기적인 시각으로 봤을 때 옥상녹화가 더 합리적인 선택이 될 수 있다.

4. 도시재생에 옥상녹화를 적용시 기후변화 완화에 기여할 수 있다.

도시재생은 넓은 면적을 대상으로, 집중적인 국비를 투입하는 도시계획이다. 본 연구에서는 부산광역시 중구 대청동4가의 일부인 $48,000\text{m}^2$ 를 도시재생뉴딜 우리동네 살리기 유형의 대상지로 가정하여 건물의 옥상녹화를 적용하였다.

그 결과, 10년생 소나무로 조성된 산림지의 동일면적·기간 동안 흡수하는 온실가스 보다 465ton 더 흡수하여 부산시 건물부문 2030년도 온실가스 감축 목표량의 0.28%를 절감가능하다. 본 연구에서는 부산의 0.0001%에 불과한 범위를 가정하여 진행하였으나 옥상녹화가 적용되는 대상지가 넓어질수록 기후변화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 공공을 위한 도시재생에서 옥상녹화와 같은 친환경공법을 모색 및 도입함으로써 인문·사회·경제·물리적환경의 활성화뿐만 아닌 생태·자연 환경적인 영향을 함께 고려한다면 도시환경문제와 기후변화 같은 범지구적 문제를 완화할 수 있을 것으로 판단된다.



참고문헌

- 강규이, 이은희, 2005, 관리조방적 옥상녹화에 적합한 자생초화류와 식재토양에 관한 연구, 8(4), pp.23-31
- 경기개발연구원, 2010, 도시열섬 완화를 위한 옥상녹화 활성화 방안, pp.17-19
- 경기도농업기술원, 2014, 2013년도 시험연구보고서, pp.236-248
- 고진수, 김병윤, 2014, 농촌의 폐비닐과 폐전선을 활용한 폴리염화비닐 방수시트의 열풍용착에 의한 접착특성에 관한 연구, 한국농촌건축학회논문집, 16(4), pp.75-81
- 국토교통부, 2014, 제1차 녹색건축물 기본계획, pp.1-30
- 국토교통부, 2016, 국가건설기준 표준시방서 도막방수공사 KCS 41 40 06, pp.10-14
- 국토교통부, 2016, 조경설계기준, pp.117-125
- 국토교통부, 2017, 장기수선계획 실무 가이드라인, pp.82
- 국토교통부, 2018, 도시계획현황
- 김경환, 2012, LCA 및 LCC 기법을 이용한 태양광 및 풍력 발전의 환경,경제적 편익 분석, 건국대학교 석사학위논문, pp.14-15
- 김귀곤, 조동길, 2004, 유네스코 생물권보전지역 개념을 도입한 옥상 생물서식공간 조성 기법에 관한 연구-유네스코회관 옥상을 사례로, 한국환경복원기술학회지, Vol.7(4), pp.32-43
- 김대규, 윤종구, 신흥철, 오홍석, 2018, 방수시트의 자동화장비에 대한 적용성 검증, 한국건축시공학회 학술발표대회논문집, 18(2), pp.4-5
- 김동성, 성용주, 김보미, 김지윤, 박영석, 서용교, 2017, 매트형 식생기반재 개발을 위한 왕겨 섬유질의 활용, 한국펄프·종이공학회지, 49(4), pp.74-81
- 김성수, 이채식, 주대진, 2002, 주말농장 참여의 사회·경제적 효과에 대한 연구, 한국농촌지도학회지, 9(1), pp.29-41
- 김영빈, 이선철, 추미경, 이재용, 하태석, 강진갑, 박은실, 황승우, 조광호, 최종철, 박승기, 김영기, 강현수, 박소현, 최봉문, 진영효, 임준홍, 변명식, 최정환, 이도

- 형, 장원봉, 최병선, 박경난, 신경희, 김상일, 신동술, 2014, 도시재생컨퍼런스: 도시재생네트워크 세미나_다양한 분야의 융합을 통한 도시재생 실행방안, 국토(389), pp.111-120
- 김지민, 강석민, 양영록, 윤정용, 조권호, 최양호, 2015, 피트모스 첨가사료가 육계의 생산성에 미치는 영향, 한국가금학회지, 42(3), pp.267-274
- 김진하, 남진, 2016, 도시쇠퇴지역의 빈집 분포현황과 관리체계에 관한 연구, 한국지역학회지, 32(1), pp.105-122
- 김철민, 김민우, 조근영, 최나래, 2018, 바텀애시를 활용한 인공경량토양의 개발 및 성능 평가, 한국건설순환자원학회논문집, 6(4), pp.252-258
- 김태석, 2015, 자원재활용센터의 재활용 공정에 대한 생태효율성 평가, 부경대학교 석사학위논문, pp.3-8
- 김형진, 권영식, 최윤근, 정찬교, 백승혁, 김영우, 2009, 유리병 재사용에 대한 전과정 평가, 청정기술학회지, 15(3), pp.224-230
- 김호용, 김지숙, 이성호, 2012, 도심경계설정을 위한 공간통계학적 접근, 한국지리정보학회지, 5(4), pp.42-54
- 김홍순, 최재연, 신은하, 2014, 옥상녹화사업의 종류에 따른 경제성 분석-서울시 중구 사례를 대상으로-, 대한건축학회, 30(10), pp.159-167
- 노태준, 김대인, 배중돈, 하수현, 임창국, 김영호, 이순홍, 2004, 폐페인트 기능성 소재화를 위한 물리화학적 탈수공정에 관한 연구, 한국폐기물자원순환학회 학술대회발표논문집, pp.222-226
- 녹색성장위원회, 2011, 지자체별 온실가스 배출량 및 배출특성 분석결과
- 농촌진흥청(Rural Development Administration, RDA), 2010, 녹색생활농업실천 매뉴얼, 농촌진흥청, pp.226-249
- 농촌진흥원(Rural Development Administration, RDA), 2014, 교육용 옥상정원 모델 활용 매뉴얼
- 류대호, 이동근, 2013, 수도권 그린벨트 지역의 생태계 서비스 가치 평가 연구, 대한국토도시계획학회, 48(3), pp.279-292
- 박성식, 최재혁, 박봉주, 2017, 건조스트레스에 따른 옥상녹화 식물의 생리적 반응, 한국조경학회지, 45(2), pp.51-59
- 박종훈, 양병이, 2010, 녹지네트워크의 기능향상을 위한 서울시 중구의 옥상녹화 입지 선정-조류목표종으로 활용하여-, 한국생태환경건축학회논문집,

- Vol.10(6), pp.3-10
- 박준모, 2015, 생태산업단지의 생태효율성 및 전과정 평가 방법론 개발 및 적용, 울산대학교 박사학위논문, pp.58-66
- 부산광역시, 2017, 2030 도시기본계획(변경)-제5편;부문별계획-제3장;저탄소 녹색도시구상, pp.475-490
- 부산광역시, 2015, 2025 부산광역시 도시재생전략계획, pp.81
- 산림청, 2012, 주요 산림수종의 표준 탄소흡수량, pp.5
- 산업통상자원부, 2014, 제2차 에너지기본계획, pp.19-25
- 산업통상자원부, 2019, 제3차 에너지기본계획, pp.8-36
- 서울특별시, 2007, 건축물 옥상녹화 시스템 유형결정과 관리 매뉴얼
- 서울특별시, 2013, 옥상녹화시스템 상세설계 및 설계도서 작성지침
- 신동수, 박재범, 강두기, 조덕준, 2013, SWMM-LID를 이용한 상습침수구역 내 유출절감효과 분석, 한국방재학회 13(4), pp.303-309
- 신상민, 2008, 유지관리 Material을 고려한 옥상녹화의 전과정 평가 및 개선방안 연구, 한국과학기술원 석사학위논문
- 신상영, 김민희, 목정훈, 2006, 서울숲 조성이 주택가격에 미치는 영향, 서울시연구 Vol7(4), pp.1-17
- 에너지경제연구원, 2018, 주거용 건물 에너지 소비요인 분석을 통한 건물 에너지 정책 방안 연구, pp.iv
- 오승훈, 2015, 익산시 구도심의 빈집 형성에 관한 연구-중앙동을 중심으로-, 서울대학교 석사학위논문, pp.4-5
- 오윤경, 2011, 정책이주지의 주거환경개선사업을 위한 거주민 특성에 관한 연구, 동의대학교 석사학위논문, pp1-2
- 우에타 가즈히로, 나이토 마사아키, 하나키 게이스케, 기타무라 류이치, 시오자키 요시미쓰, 테라나시 순이치, 고토 가즈코, 진노 나오히코, 니시무라 유키오, 마미야 요스케, 2013, 도시 어메니티와 생태, 한울, 제3장
- 유찬주, 장동현, 2002, 주말농장 활성화 방안에 관한 연구, 한국농촌사회학회지, 12(1), pp.63-88
- 이건모, 허탁, 김승도, 1998, 환경 전과정 평가(LCA)의 이론과 지침, 한국품질환경인증협회(KAB), pp.6-10
- 이건모, Atsushi Inaba, 2004, Life Cycle Assessment ISO 14040 시리즈 실무지침,

- 한국산업자원부, 6-10pp.
- 이규리, 2018, 도시 자연환경재생 요소 도출 및 효과 분석-서울시 신사동 가로수길 지역을 대상으로-, 한양대학교 박사학위논문, pp.13-15
- 이다은, 2013, 제강 환원슬래그의 재활용을 통해 생산된 초경속시멘트의 Eco-efficiency 분석. 건국대학교 석사학위논문, pp.5
- 이동주, 2012, Emergy 분석법에 의한 생태효율성지수 개발, 부경대학교 석사학위논문, pp.3-5
- 이병환, 이현주, 주창업, 이종협, 1999, 인공토양으로부터 토양증기추출법에 의한 유기화합물의 탈착 현상에 관한 연구, 화학공학회지, 37(1), pp.87-96
- 이일희, 이주형, 2011, 지속가능성을 위한 도시재생 계획요소에 관한 연구, 한국도시설계학회지, 12(6), pp.101-114
- 이춘우, 김수봉, 문혜식, 전은정. 2009, 옥상녹화의 녹화유형별 기온절감효과 및 시민의식 분석, 한국주거학회 학술대회논문집, pp.316-320
- 임미정, 이은희, 2011, 지역 공동체 활성화를 위한 도시 텃밭의 이용자 인식 분석, 인간식물환경학회지, 14(4), pp.237-243
- 장진, 오충현, 안철환, 권혁문, 김건우, 2013, 서울시 도시농업 실태 및 특성 연구-서울시 내 농장형 공원형 도시농업 공간 참여자 인식을 중심으로, 한국환경생태학회, 23(2), pp.41-42
- 장혜숙, 2013, 식물의 시각적 요소가 인간의 감성과 뇌파에 미치는 영향, 고려대학교 박사학위논문, pp.113
- 정용식, 서치호, 2002, 고층공동주택 재건축과 리모델링의 경제성 비교를 위한 LCC분석연구, 대한건축학회지, 18(12), pp.115-124
- 정응호, 2015, 친환경 도시계획을 위한 바람길 도입 이론과 사례연구, 문운당, pp.20-35
- 주진희, 김원태, 최우영, 윤용한, 2010, 무관수 옥상녹화시스템의 차이에 따른 들잔디 적응성 평가, 한국환경과학회지, 19(9), pp.1137-1142
- 한국도시녹화, 2019, 카탈로그
- 한국토지주택공사 토지주택연구원, 2013, 그린 홈 적용을 위한 옥상녹화 방안 연구
- 한국환경정책·평가연구원(KEI), 2006, 도시지역에서의 바람길과 대기질 영향에 관한 연구, pp.1-58
- 허성란, 2018, 빅 데이터를 이용한 부산의 도시평판 분석에 관한 연구

- 홍창수, 2012, 주말농장 참여자의 특성 및 참여 결정요인 분석, 서울대학교 석사학위논문, pp.39-68
- 환경부, 2019, 건설폐기물의 처리 등에 관한 업무처리지침
- A Bjørn, M Owsianiak, C Molin, MZ Hauschild, 2018, LCA History, Life Cycle Assessment, pp.17-30
- Canadian Sphagnum Peat Moss Association, 2006, Environmental life cycle analysis(ELCA) of peatmoss(www.peatmoss.com)
- Chenani, Sanaz Bozorg, Susanna Lehvävirta, and Tarja Häkkinen, 2015, Life cycle assessment of layers of green roofs, Journal of Cleaner Production 90, pp.153-162
- Cterina Gargari, Carlo Bibbiani, Fabio Fantozzi, 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(2016) pp.646-656
- David J, Sailor, Brad Bass, 2014, Development and features of the Green Roof Energy Calculator(EREC), Journal of Living Architecture 1(3), pp.36-58
- Dominique Morau, Tsiorimalala N, Rabarison, Hery T, Rakotondramiarana, 2017, Life Cycle Analysis of Green Roof Implemented in a Global South Low-income Country, Journal of Enbironmet&Climate Change 7(1), pp.43-55
- ESCAP, 2009, Eco-effocoency indicators : Measuring Resource-use Efficiency and the Impact of Economic Activities on the Environment, United Nations publication, pp.4
- Fabricio Bianchini, Kasun Hewage 2012, How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials, Building and Environment, 48, pp57-65
- Farina Sempel, O. Gorbachevskaya, I. Mewis, C. Ulrichs, 2013, Modellversuch zur Feinstaubbindung: extensive Dachbegrünung vs. Schotterdach, 65(3), pp113-118
- Giorgia Peri, Marzia Traverso Matthias Finkbeiner, Gianfranco Rizzo, 2012, The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: Covering the gap,

- Energy 48(1)
- H Gabathuler, 1997, LCA History :Centrum voor Milieukunde Leiden (CML),
The International Journal of Life Cycle Assessment, 2(4), pp.187-194
- ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment –
Requirements and guidelines, ISO;2006
- ISO 14045: Environmental management – Eco-efficiency assessment of product
systems – principles, requirements and guidelines, ISO;2012
- Japan Environmental Management Association for Industry(JEMAI), 2004,
Eco-efficiency and Factor Handbook for Products, pp4-5
- Nyuk Hien Wong, Su Fen Tay, Raymond Wong, Chui Leng Ong, Angelia Sia,
2003, Life Cycle Cost analysis of rooftop gardens in Singapore, Building
and environment, 38(3), pp.499-509
- OECD, 1998, Eco-efficiency, pp.7
- Osman Balaban & Jose Antonio Puppim de Oliveira, 2012, Understanding the
links between urban regeneration and climate-friendly urban development:
lessons from two case studies in Japan. Journal Local Environment 19(8),
pp.868-890
- Shaw AJ, Shaw B, Johnson MG, Higuchi M, Arikawa T, Ueno T, 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), pp.1202-1220
- Takanori Kuronuma, Hitoshi Watanabe, Tatsuaki Ishihara, Daitoku Kou,
Kazunari Touda, Maasaya Ando, Satoshi Shindo 2018, CO₂ Payoff of
Extensive Green Roofs with Different Vegetation Species, Article of
Sustainability, 10(7), pp.2256
- T.E. Graedel, 2004, 산업생태학-제15장 전과정 평가 입문, 한산, pp.197-210
- WBCSD, 2000, Eco-efficiency : Creating more value with less impact, pp.4-15
- WBCSD, 2000, Measuring Eco-efficiency a guide to reporting company
performance, pp.3-31