

전과정평가 모델을 이용한 초등학교 건축물 환경영향 평가 및 비교기준 수립

지창윤¹ · 홍태훈* · 정재욱¹

¹연세대학교 건축공학과

Environmental Impacts Assessment of Elementary School Buildings and Establishment of the Reference Target using Life Cycle Assessment Model

Ji, Changyoon¹, Hong, Taehoon*, Jeong, Jaewook¹

¹Department of Architectural Engineering, Yonsei University

Abstract : In order to determine how much a new green building reduce the environmental impacts, it is necessary to establish the reference target for comparison. Therefore, this study aims to establish the reference target by evaluating the environmental impacts of existing buildings. To ensure this end, this study evaluated the environmental impacts(Global warming potential, ozone layer depletion potential, acidification potential, eutrophication potential, photochemical ozone creation potential, and abiotic depletion potential) of 17 existing elementary school buildings, which are located in Seoul, Busan, Daegu, and Gwangju, by using the hybrid LCA model. As a result, the environmental impacts of the case buildings were clearly distinguished in different regions. Therefore, this study presented the reference targets which are appropriate to each region. For example, the reference targets for global warming potential, which can be used in Seoul, Busan, Daegu, and Gwangju, are $3.76E+03$, $1.90E+03$, $2.63E+03$, $2.81E+03$ kg-CO₂ eq./m², respectively. The presented reference targets are expected to be useful for understanding how much environmental impacts can be reduced when a new green school building is constructed.

Keywords : Life Cycle Assessment, Elementary school building, Environmental impacts, Green building

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

지구온난화나 오존층파괴와 같은 환경문제는 세계가 함께 해결해야하는 중요한 이슈가 되었다. 건축물은 자재생산에서부터 해체폐기 단계까지의 생애주기 기간 동안 많은 양의 자원과 에너지를 소비하는 만큼(EIA 2011), 건설산업에서는 이러한 환경문제에 대한 원인을 저감하도록 강조하고 있다. 세계의 많은 국가들은 녹색건축물(Green building)의 확산과 같은 정책을 통해 건축물에서 발생하는 환경영향을 저감하고자 노력하고 있다. 대한민국 정부 역시 녹색건축물 조성지원법을 제정함으로써, 건축물로 인한 환경영향을 줄이기 위

해 노력하고 있다.

건축물로부터 발생하는 환경영향을 저감하기 위해서는 건축물의 환경영향을 정량적으로 제시하는 방법이 요구된다. 제품 또는 서비스의 생애주기 동안에 필연적으로 발생하는 환경부하 물질을 규명하고, 이러한 환경부하 물질들로 인한 환경영향을 평가하는 기법인(ISO 2006), 전과정평가(Life Cycle Assessment; 이하 LCA) 방법론은 건축물의 생애주기 동안 발생하는 환경영향을 정량적으로 규명할 수 있다. 이에 따라, LCA 방법론은 건축물에 대한 환경영향을 평가함으로써, 친환경 건축물의 환경적 성능을 향상시키는 주요 수단으로 활용되어 왔다.

기존 연구에서는 건축물을 구성하는 자재의 목록 및 물량, 운영 에너지 사용량과 같은 상세한 정보를 바탕으로, 건축물의 생애주기 동안 어느 정도의 환경영향이 발생하는지를 결과로서 제시하는 LCA 모델들을 개발하였다(Hong et al, 2014, Hong and Ji 2014, Jang et al, 2014, Moon et al, 2014). 이러한 LCA 모델들은 평가하는 건축물의 총 환경영

* Corresponding author: Hong, Taehoon, Department of Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

E-mail: hong7@yonsei.ac.kr

Received March 4, 2015; revised March 12, 2015
accepted March 27, 2015

향을 제시하지만, 녹색건축물이 기존의 일반 건축물에 비해 어느 정도의 환경영향 감축을 달성했는지에 대해서는 제시하지 못한다. 하지만, 녹색 건축물의 확산을 위해서는, 기존 건축물과 비교하여 녹색 건축물을 통해 어느 정도의 환경영향 감축을 달성할 수 있는지를 명확하게 파악하는 것이 요구된다.

녹색건축물의 환경영향 감축 효과를 파악하기 위해서는, 기존 건축물과의 비교를 위한 기준이 필요하다. 즉, 녹색건축물의 환경영향 평가 결과와의 비교를 위한 많은 기존 건축물에 대한 누적된 환경영향 평가 결과가 필요하다. 이에 따라, 본 연구에서는 LCA 모델을 이용하여 다양한 기존 건축물에 대한 환경영향을 사례 평가하고, 평가 결과를 바탕으로 신축 녹색건축물의 환경영향 감축 효과를 파악할 수 있도록 하는 기준을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 녹색건축물의 환경영향 감축 효과를 파악하기 위해서, 기존 건축물에 대한 환경영향을 평가하는 것을 목표로 한다. 이에 따라, 본 연구는 건축물의 환경영향을 평가하는 새로운 방법을 제시하는 대신, 기존 연구에서 개발된 LCA 모델을 이용하여 기존 건축물에 대한 환경영향을 평가하고자 한다. 또한, 건축물의 종류에 따라 평가결과는 다르게 나타날 수 있기 때문에, 모든 건축물에 대해 하나의 비교기준을 제시하는 것은 타당하지 않다. 따라서 유사한 성격을 갖는 건축물별로 비교기준을 수립하는 것이 타당하며, 이러한 측면에서 본 연구에서는 초등학교 건축물로 평가 대상을 한정한다. 한편, LCA에서는 다양한 환경영향을 평가하지만, 대한민국 환경부에 의해 시행되는 환경성적표지제도에서는 지구온난화, 오존층파괴, 자원고갈, 산성화, 부영양화, 광화학산화로 총 여섯 가지 환경문제에 대한 영향을 평가항목으로 정의하고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 환경영향 범주를 위의 여섯 가지 환경영향(Global warming potential(GWP), Ozone layer depletion potential(ODP), Abiotic depletion potential(ADP), Acidification potential(AP), Eutrophication potential(EP), Photochemical ozone creation potential(POCP))으로 한정한다.

본 연구는 다음의 순서에 따라 진행된다. 먼저, 건축물의 환경영향을 평가할 수 있는 LCA 모델로서, 기존 연구에서 개발된 Hybrid LCA 모델을 정의한다. 둘째, 전국에서 운영되고 있는 초등학교 건축물 중 사례분석 대상을 선정하고, 선정된 건축물에 대한 환경영향을 평가한다. 마지막으로, 사례 건축물들에 대한 환경영향 평가결과를 분석하고, 신축 녹색 초등학교 건축물의 환경영향 감축 효과를 파악할 수 있는 기준을 제시한다.

2. 기존연구 고찰

1990년 이후, LCA를 이용하여 건축물에 대한 환경영향을 평가하는 것을 목적으로 하는 다양한 연구가 국내외 연구자들에 의해 수행되어 왔다. Hong and Ji(2014), Jang et al. (2014), Moon et al.(2014)은 LCA에 기반한 건축물에 대한 환경성능을 평가하는 방법을 제시하였다. Hong et al. (2014)은 건축물 시공단계에서의 환경영향을 보다 정확하게 평가할 수 있는 방법을 제시하였다. 또는, 개별 건축물의 환경영향을 파악하기 위하여, LCA 모델을 이용하여 해당 건축물에 대한 환경영향을 사례 분석하는 연구가 대부분이었다(Choi et al. 2013, Lee 2002).

이와 같이, 많은 연구자들에 의해 건축물의 환경성능 및 환경영향을 평가하는 다양한 연구가 수행되었음에도 불구하고, 신축 녹색건축물의 환경영향 감축 효과를 비교하기 위해 필요한 다양한 기존 건축물에 대한 사례분석 결과를 제시하는 연구는 부족하였다. 따라서 본 연구에서는 LCA 모델을 활용하여 다양한 기존 건축물에 대한 환경영향을 평가·분석함으로써, 신축 녹색건축물의 환경영향 감축 효과를 평가하는데 활용될 수 있는 기준을 제시하고자 한다.

3. 초등학교 건축물의 환경영향 평가

3.1. 평가 범위 및 목적 정의

일반적으로 건축물에 대한 LCA는 자재생산, 운송, 시공, 운영, 해체·폐기단계를 포함한다. 하지만, 기존 연구에 따르면 건축물의 생애주기 단계 중 자재생산단계와 운영단계에서 대부분의 환경영향이 발생하는 반면, 생산된 자재를 가공하는 성격을 갖는 운송 및 시공, 해체·폐기단계는 상대적으로 큰 영향을 미치지 않는다. 특히, 운송 및 시공, 해체·폐기단계에 대한 환경영향 평가를 위해서는 운송거리나 공법과 같은 많은 사항들이 가정되어야 하며, 이러한 가정사항은 평가 결과의 신뢰성에 영향을 줄 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 초등학교 건축물의 자재생산단계와 운영단계에서 발생하는 환경영향을 평가 범위로 한정하였다. 한편, 건축물 규모에 따른 차이가 고려되도록, 기능단위(Functional unit)는 단위면적당 환경영향으로 정의하였다.

3.2. 대상 건물 선정

신축 녹색건축물의 환경영향 감축 효과를 파악하기 위해서는 기존 건축물에 대한 환경영향 평가 결과를 바탕으로 하는 비교 기준이 요구된다. 본 연구에서는 신축 녹색 초등학교 건축물의 환경영향 감축 효과를 파악할 수 있도록, 서울, 부산, 대구, 광주 지역에서 2008년 이후 신축된 17개 초등학교 건축물에 대한 환경영향을 평가하였다. 선정된 초등학교 건축

물은 모두 친환경 건축물 우수 등급을 받았으며, 각 초등학교에 대한 개요정보는 Table 1과 같다.

Table 1. Summary of the case buildings

School	Construction year	Energy source used for operation	Region	Material cost (KRW/m ²)	Total floor area (m ²)
A	2008	Electric	Seoul	350,433	14,555
B	2009	Electric	Seoul	582,365	14,073
C	2009	Electric + Gas	Seoul	399,506	7,670
D	2008	Electric	Seoul	530,670	10,631
E	2009	Electric	Seoul	461,235	12,532
F	2010	Electric	Busan	580,921	8,774
G	2009	Electric	Busan	563,222	7,525
H	2010	Electric	Busan	521,123	11,033
I	2009	Electric + Gas	Daegu	433,542	11,680
J	2009	Electric + Gas	Daegu	516,237	12,373
K	2008	Electric	Daegu	504,999	12,973
L	2008	Electric	Daegu	507,617	12,227
M	2009	Electric + Gas	Daegu	432,369	8,779
N	2009	Electric	Gwangju	439,079	8,292
O	2009	Electric	Gwangju	439,985	9,530
P	2008	Electric	Gwangju	484,236	7,705
Q	2009	Electric	Gwangju	622,066	6,372

3.3. Hybrid LCA 모델

본 연구에서는 초등학교 건축물의 환경영향을 평가하기 위하여, 기존 연구에서 제시한 LCA 모델을 사용하였다(Hong and Ji 2014, Jang et al. 2014). 평가 과정은 직·간접적인 에너지사용량 산출, 배출물 및 고갈 자원 산출, 환경영향 평가로 구성되며, 각 단계별 설명은 아래와 같다.

3.3.1 에너지 사용량 산출

산업연관표(Input-output table)는 국가의 생산시스템이 모두 직·간접적으로 연관되어 있다는 가정을 기반으로, 각 산업부문별 영향 정도를 정량적으로 제시한다. 한국은행에서 제시하는 산업연관표는 투입계수표(Input coefficient matrix)와 레온티에프역행렬계수표(Leontief inverse matrix)로도 표현되는 생산유발계수표(Production inducement coefficient matrix)를 포함한다. 투입계수표는 하나의 산업부문에서 최종수요가 1단위 변화할 때 관련 산업부문에서의 직접적인 변화를 나타낸다. 생산유발계수표는 무한히 계속되는 생산의 파급효과를 고려하여, 하나의 산업부문에서 최종수요가 1단위 변화할 때 관련 산업부문에서 직·간접적으로 얼마만큼의 변화가 이루어져야 하는지를 나타낸다(Bank of Korea 2007).

산업연관표는 “0030 무연탄”, “0134 휘발유” 등의 에너지 산업과 함께, “0038 모래및자갈”, “0115 합판”, “0179 시멘트”, “0180 레미콘” 등의 건축자재와 관련한 다양한 산업을 포함한다. 따라서 수식 (1)과 같이 건축자재 관련 산업의 최종수요에 에너지산업부문에 대한 투입계수표를 이용하여, 건

축자재의 생산에 직접적으로 요구되는 에너지량을 산출할 수 있다. 또한, 최종수요에 에너지산업부문에 대한 생산유발계수표를 적용하면, 건축자재를 생산하기 위하여 직·간접적으로 요구되는 에너지 투입량을 산출할 수 있다. 생산유발계수를 통해 산출되는 결과는 직·간접적인 에너지사용량을 모두 포함하기 때문에, 자재생산단계에서의 간접적인 에너지사용량은 수식 (2)를 통해 산출될 수 있다.

수식 (1)과 (2)를 통해 산출되는 직·간접적인 에너지 투입량은 “원”을 단위로 하는 금액정보이기 때문에, 수식 (3)과 같이 에너지원의 단위 가격으로 나누어줌으로써, 물량단위의 에너지원별 투입량으로 변환되어야 한다.

$$X_{dir} = A \times Y \tag{1}$$

$$X_{ind} = ((I - A)^{-1} - A) \times Y \tag{2}$$

$$QE_i = X_i \div UP_i \tag{3}$$

X_{dir} : 직접 투입되는 에너지원 (i)에 대한 투입량 정보(X_i)를 포함하는 에너지산업 부문별 투입량 벡터

A : 투입계수표

Y : 산업부문별 최종 수요

X_{ind} : 간접 투입되는 에너지원 (i)에 대한 투입량 정보(X_i)를 포함하는 에너지산업 부문별 투입량 벡터

$(I - A)^{-1}$: 생산유발계수표

QE_i : 에너지원 (i)의 투입량(물량단위)

X_i : 에너지원 (i)의 투입량(금액단위)

UP_i : 에너지원 (i)의 단위가격

한편, 교육통계연보에서는 전국 초등학교 건축물의 연평균 에너지사용량 데이터를 제시하고 있다(MEST 2010). 따라서 운영단계에서의 직접적인 에너지 사용량은 교육통계연보에서 제시하는 실제 건축물의 데이터를 사용할 수 있다. 그리고 교육통계연보의 에너지 사용량을 수식 (2)에 적용함으로써, 운영단계에서의 간접적인 에너지 사용량은 산출된다. 교육통계연보의 에너지 사용량 데이터는 물량 정보이기 때문에, 수식 (4)와 같이 사용된 에너지원의 단위가격이 함께 적용되어야 한다. 그리고 수식 (4)를 통해 산출되는 결과는 금액정보이기 때문에, 수식 (4)를 통해 산출된 결과를 수식 (3)에 적용함으로써, 운영단계에서의 간접적인 에너지 사용량은 산출될 수 있다.

$$X_{ind} = ((I - A)^{-1} - A) \times (QE_{dir,i} \times UP_i) \tag{4}$$

X_{ind} : 자재 (j)의 운송을 위하여 직접적으로 사용된 에너지원 i 의 생산과정에서 간접적으로 투입되는 에너지원의 투입량 벡터

$(I - A)^{-1}$: 생산유발계수표

A : 투입계수표

QE_i : 에너지원 (i)의 투입량(물량단위)

UP_i : 에너지원 (i)의 단가

3.3.2 배출물 및 고갈자원 산출

자재생산단계 및 운영단계에서 직·간접적으로 사용되는 에너지원의 생산과정에서는 다양한 자원이 사용된다. 또한, 에너지원의 연소 및 생산과정에서는 환경에 영향을 미치는 다양한 물질들이 배출된다. 따라서 직·간접적인 에너지사용량에 의한 배출물 및 고갈자원은 수식 (5)와 같이 LCI(life cycle inventory) 데이터를 적용하여 산출된다.

에너지원의 생산 과정에서 배출 및 투입되는 물질에 대한 데이터는 국가 LCI 데이터베이스 정보망(Korea LCI Database Information Network)에서 제공하는 환경부와 前) 지식경제부의 LCI 데이터를 활용하였다(KEITI 2013). 이때, 무연탄, 유연탄, 연탄에 대한 LCI 데이터는 없기 때문에, 지식경제부에서 구축한 석탄의 LCI 데이터를 동일하게 적용하였다. 전기 역시 수력, 화력, 원자력, 기타발전으로 구분하여 구축한 데이터가 없기 때문에, 지식경제부에서 구축한 전기 LCI 데이터를 동일하게 적용하였다. 에너지원의 연소에 대한 배출물 데이터는 Wang (1999)에 의해 제시된 데이터를 사용하였다(Wang 1999).

$$I_j = LCI_{j,i} \times QE_i \quad (5)$$

I_j : 배출물 또는 투입물 (j)의 양

$LCI_{j,i}$: 에너지원 (i) 단위의 생산과 연소 시 배출되는 배출물 및 투입물 (j)의 양

QE_i : 사용된 에너지(i)의 양

3.3.3 환경영향 산출

수식 (5)에 의해 산출된 배출물 및 투입물은 전과정 영향평가 단계를 통해 여섯 가지 영향 범주에 따른 환경영향으로 변환된다. 본 연구에서는 ISO 14040에서 필수과정으로 규정하는 특성화 단계까지만 진행하여, 6가지 환경영향 범주에 따른 평가결과를 제시하였다. 환경영향은 수식 (6)을 이용하여 수행되며, Table 2의 연구에서 제시된 특성화계수가 사용되었다.

$$CI_k = \sum_j CF_{k,j} \times I_j \quad (6)$$

CI_k : 환경영향범주 (k)에 대한 환경영향평가 결과

$CF_{k,j}$: 환경영향범주 (k)에 대한 배출물 또는 투입물 (j)의 특성화 계수

I_j : 배출물 또는 투입물 (j)의 양

Table 2. Reference for characterization factors

Impact category	Reference substance	Reference
GWP	CO ₂	IPCC (2007)
ODP	CFC-11	Daniel et al. (2006)
AP	SO ₂	Hauschild & Wenzel (1998)
EP	PO ₄ ³⁻	Guinee (2001)
POCP	C ₂ H ₄	Jenkin and Hayman (1999)
ADP	Sb	Guinee (2001)

3.4. LCA 모델 구축 및 가정사항 설정

LCA 모델을 구축하기 위하여, 본 연구에서는 한국은행에서 발표한 2010 산업연관표(투입계수표, 생산유발계수표)를 사용하였고, 에너지원의 단위 가격은 국가에너지통계종합정보시스템에서 제시하는 2010년 기준 값을 사용하였다. 선정된 초등학교 건축물의 설계 시점이 다르기 때문에, 한국은행에서 제시하는 생산자물가지수(Produce price index)를 활용하여, 내역서의 자재비를 2010년 기준값으로 변환하였다. 또한, 내역서에 포함된 자재비 단가는 자재의 운송비 및 이윤 등을 포함하기 때문에, Chang et al.(2012)과 같이, 내역서에 제시된 자재비의 90%를 직접 자재 생산비로 설정하였다. 건축물의 운영기간은 40년으로 설정하였다.

4. 결과 및 논의

4.1 환경영향 평가 결과

4.1.1 자재생산단계

Table 3은 사례 건축물의 자재생산단계에 대한 환경영향 평가 결과를 보여준다. 평가 결과, 자재생산단계에서의 환경영향은 초등학교 건축물에 따라 큰 차이를 가지지 않은 것으로 나타났다. 예를 들어, Fig. 1은 17개 초등학교 건축물에 대한 GWP 평가결과를 보여준다. GWP의 경우, 최소 6.21E+02 kg-CO₂ eq/m²에서 최대 1.12E+03 kg-CO₂ eq/m²의 범위에 포함되는 것으로 나타났으며, 평균값은 9.05E+02 kg-CO₂ eq/m², 표준편차는 1.52E+02로 나타났다. GWP와 마찬가지로, ODP, AP, EP, POCP, ADP 역시 큰 차이를 가지지 않는 것으로 나타났다.

Table 3. Environmental impacts in material manufacturing phase

School	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADP
	kg-CO ₂ eq/m ²	kg-CFC-11 eq/m ²	kg-SO ₂ eq/m ²	kg-PO ₄ ³⁻ eq/m ²	kg-C ₂ H ₄ eq/m ²	kg-sb eq/m ²
A	6.21E+02	8.46E-06	1.06E+00	1.83E-01	5.55E-01	3.40E+00
B	1.06E+03	1.40E-05	1.77E+00	3.08E-01	8.63E-01	5.83E+00
C	6.33E+02	8.68E-06	1.15E+00	2.00E-01	5.87E-01	3.47E+00
D	1.04E+03	1.25E-05	1.70E+00	2.97E-01	7.93E-01	5.76E+00
E	9.24E+02	1.10E-05	1.49E+00	2.62E-01	6.79E-01	5.11E+00
F	1.06E+03	1.32E-05	1.79E+00	3.12E-01	8.61E-01	5.82E+00
G	8.62E+02	1.15E-05	1.57E+00	2.74E-01	7.75E-01	4.74E+00
H	8.25E+02	1.08E-05	1.46E+00	2.55E-01	7.27E-01	4.54E+00
I	7.69E+02	1.21E-05	1.49E+00	2.62E-01	6.50E-01	4.29E+00
J	1.12E+03	1.57E-05	1.82E+00	3.20E-01	7.98E-01	6.37E+00
K	1.07E+03	1.54E-05	1.81E+00	3.19E-01	7.81E-01	6.11E+00
L	1.00E+03	1.56E-05	1.76E+00	3.09E-01	7.89E-01	5.67E+00
M	7.18E+02	1.18E-05	1.42E+00	2.50E-01	6.06E-01	3.99E+00
N	7.92E+02	1.44E-05	1.47E+00	2.57E-01	6.96E-01	4.41E+00
O	7.90E+02	1.21E-05	1.49E+00	2.63E-01	6.35E-01	4.42E+00
P	8.36E+02	1.41E-05	1.69E+00	2.99E-01	6.86E-01	4.64E+00
Q	1.09E+03	1.93E-05	2.14E+00	3.77E-01	9.39E-01	6.08E+00
Mean	9.05E+02	1.31E-05	1.60E+00	2.81E-01	7.40E-01	5.03E+00
S.D.	1.52E+02	2.50E-06	2.46E-01	4.37E-02	1.00E-01	8.74E-01

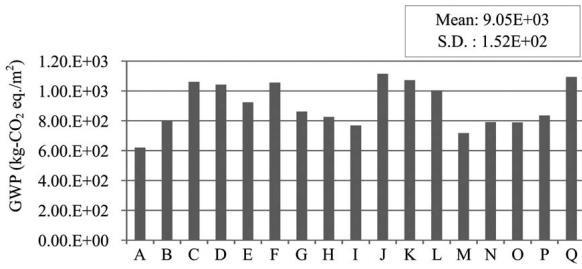


Fig. 1. GWP in material manufacturing phase

4.1.2 운영단계

Table 4는 운영단계에 대한 환경영향 평가 결과를 보여준다. 자재생산단계에서의 환경영향 평가 결과와 달리, 운영단계에 대한 환경영향은 다소 큰 차이를 가지는 것으로 나타났다. 예를 들어, 운영단계에서 발생하는 GWP는 최소 7.19E+02 kg-CO₂ eq/m²에서 최대 3.31E+03 kg-CO₂ eq/m²의 범위에 포함되는 것으로 나타나, 최대 4.5배까지 차이가 나는 것이 확인되었다. GWP와 마찬가지로, 나머지 다섯 가지 환경영향 범주에 대한 평가결과 역시 초등학교에 따라 큰 차이를 가지는 것으로 나타났다.

Table 4. Environmental impacts in use phase

School	GWP kg-CO ₂ eq/m ²	ODP kg-CFC-11 eq/m ²	AP kg-SO ₂ eq/m ²	EP kg-PO ₄ ³⁻ eq/m ²	POCP kg-C ₂ H ₄ eq/m ²	ADP kg-sb eq/m ²
A	3.01E+03	2.75E-05	3.52E+00	5.51E-01	4.79E+00	1.53E+01
B	2.48E+03	2.26E-05	2.89E+00	4.53E-01	3.94E+00	1.26E+01
C	4.68E+03	4.14E-05	5.61E+00	8.58E-01	8.59E+00	2.36E+01
D	2.67E+03	2.44E-05	3.12E+00	4.88E-01	4.24E+00	1.36E+01
E	3.31E+03	3.03E-05	3.87E+00	6.06E-01	5.26E+00	1.69E+01
F	1.16E+03	1.05E-05	1.35E+00	2.12E-01	1.87E+00	5.88E+00
G	1.08E+03	9.84E-06	1.26E+00	1.97E-01	1.71E+00	5.48E+00
H	7.19E+02	6.57E-06	8.39E-01	1.31E-01	1.14E+00	3.66E+00
I	1.64E+03	1.49E-05	1.92E+00	3.00E-01	2.69E+00	8.32E+00
J	1.90E+03	1.71E-05	2.25E+00	3.48E-01	3.22E+00	9.65E+00
K	1.82E+03	1.66E-05	2.12E+00	3.32E-01	2.89E+00	9.26E+00
L	1.26E+03	1.15E-05	1.47E+00	2.30E-01	2.00E+00	6.41E+00
M	1.84E+03	1.64E-05	2.19E+00	3.37E-01	3.28E+00	9.29E+00
N	1.95E+03	1.79E-05	2.28E+00	3.57E-01	3.11E+00	9.95E+00
O	1.75E+03	1.60E-05	2.05E+00	3.20E-01	2.79E+00	8.92E+00
P	2.13E+03	1.95E-05	2.49E+00	3.89E-01	3.38E+00	1.08E+01
Q	1.88E+03	1.72E-05	2.20E+00	3.44E-01	2.99E+00	9.57E+00
Mean	1.97E+03	1.69E-05	2.28E+00	3.49E-01	3.48E+00	9.62E+00
S.D.	7.18E+02	6.36E-06	9.52E-01	1.36E-01	2.30E+00	3.67E+00

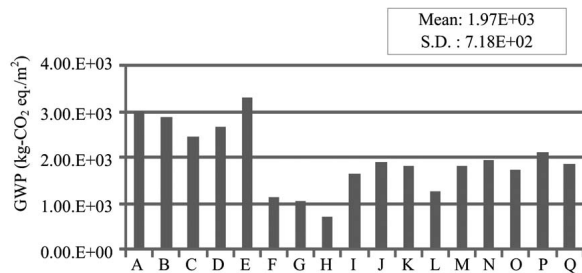


Fig. 2. GWP in use phase

4.2 결과 분석

Table 3, 4와 같이, 17개 초등학교 건축물의 환경영향은 다소 차이를 가지는 것으로 나타났다. 유사 성격을 가진 초등학교 건축물이더라도 그 규모, 지역 등과 같은 특성의 차이는 건축물의 환경영향의 차이를 야기할 수 있다. 신축 녹색 초등학교 건축물에 대한 환경영향 감축 효과를 파악하는데 활용될 수 있는 비교 기준을 제시하기 위해서는, 이러한 특성으로 인한 평가 결과의 차이가 고려되어야 한다. 따라서 초등학교 건축물의 규모, 지역, 사용에너지원, 투입 자재비의 차이에 따른 초등학교 건축물의 환경영향을 비교하였다.

4.2.1 규모에 따른 환경영향

평가 대상으로 선정된 초등학교 건축물은 모두 다른 규모로 설계되었다. 건축물의 규모는 시공과정에서 투입되는 자재의 물량과 운영과정에서의 에너지 사용량에 영향을 줄 수 있으며, 이는 건축물의 환경영향에 차이를 야기하는 요소가 될 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 초등학교 건축물의 연면적에 따른 환경영향의 차이를 비교하였다.

Fig. 3은 연면적에 따른 초등학교 건축물의 환경영향 평가 결과를 보여준다. 자재생산단계에서의 환경영향은 연면적의 변화와 관련 없이, 일정한 것으로 확인되었다. 운영단계에서의 환경영향은 자재생산단계에 비해 크게 변화하는 것으로 나타났다. 특히, 유사한 연면적의 건축물임에도 불구하고, 운영단계에서의 환경영향은 큰 차이를 가지는 것으로 나타났다. Fig. 3과 같이, 운영단계에서는 연면적이 증가함에 따라 환경영향이 다소 증가하는 경향이 관찰되었다. 연면적과 운영단계 환경영향의 상관관계를 분석한 결과, 0.395에서 0.520(POCP 0.395, EP 0.520)의 상관계수가 산출되었으며, ODP, AP, EP, ADP 등 총 4개 범주에 대한 결과가 95% 수준에서 유의한 것으로 나타났다. 그러나 생애주기 환경영향과 연면적의 상관계수는 0.360에서 0.512(ODP 0.360, ADP 0.512)로 감소하였으며, 6개의 환경영향 중 ADP만이 95% 수준에서 유의한 것으로 나타났다. 이에 따라, 건물 규모에 따라 환경영향 평가의 기준을 설정하기에는 무리가 있는 것으로 판단되었다.

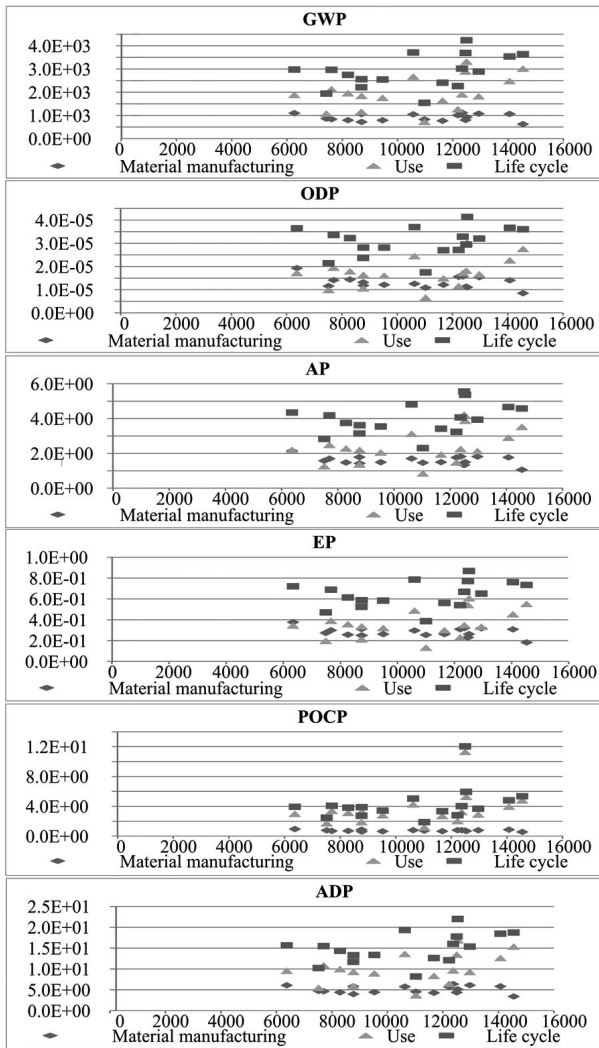


Fig. 3. Environmental impacts depending on building size

4.2.2 지역에 따른 환경영향

평가 대상으로 선정된 건축물은 서울, 부산, 대구, 광주 지역에 건설된 초등학교 건축물이다. 기후 조건의 차이는 건축물에 적용되는 기술이나 운영단계에서의 에너지 사용량에 영향을 줄 수 있기 때문에, 초등학교 건축물의 환경영향은 지역에 따라 크게 달라질 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 지역에 따른 환경영향의 차이를 비교하였다.

Fig. 4는 지역에 따른 초등학교 건축물의 환경영향 평가 결과를 보여준다. 자재생산단계에서의 환경영향은 지역의 변화와 관련 없이, 일정한 수준을 유지하는 것으로 확인되었다. 반면, 운영단계에서의 환경영향은 지역에 따라 큰 차이를 가지는 것으로 나타났다. Fig. 4와 같이, 위도가 가장 높은 서울 지역 초등학교 건축물의 환경영향이 가장 높게 나타난 반면, 위도가 가장 낮으며 해양성 기후 지역인 부산 지역 초등학교 건축물의 환경영향이 가장 낮게 나타났다. 한편, 운영단계에서는 자재생산단계에 비해 큰 환경영향이 발생하기 때문에,

생애주기 환경영향 역시 지역에 따라 명확하게 구분되었다.

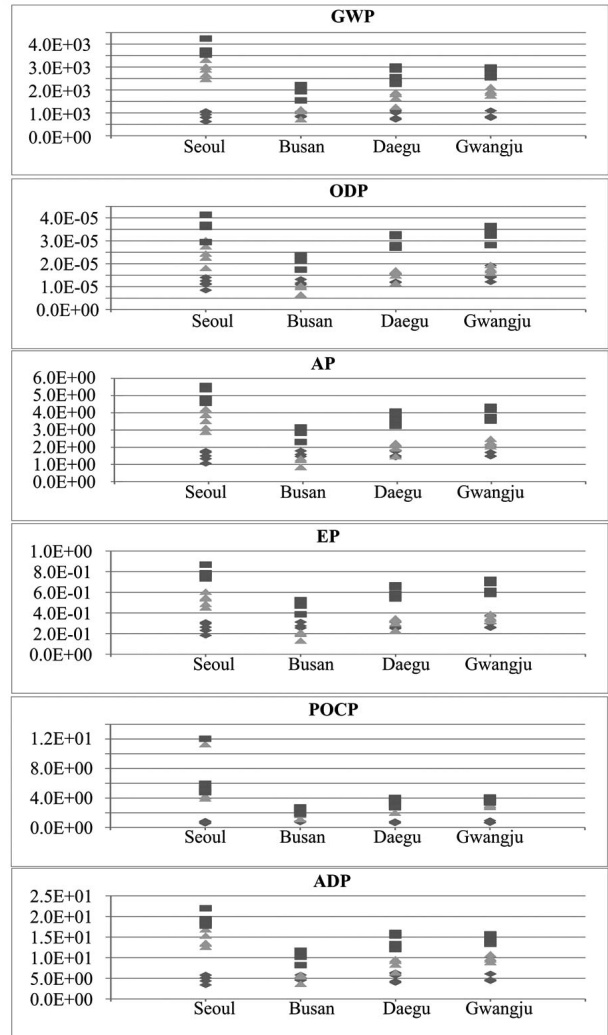


Fig. 4. Environmental impacts depending on regions

지역에 따른 생애주기 환경영향 평가결과의 유의성을 판단하기 위해 Analysis of Variance(ANOVA) 분석을 실시한 결과, Table 5의 결과와 같이 6개 환경영향 모두 지역에 따라 구분하는 것이 타당하게 나타났다.

Table 5. ANOVA analysis between city and environment impacts

	F-value	P-value	Confidence interval
Region-GWP	29.18	0.0001	95%
Region-ODP	10.81	0.0008	
Region-AP	19.31	0.0001	
Region-EP	17.16	0.0001	
Region-POCP	4.95	0.0165	
Region-ADP	18.92	0.0001	

4.2.3 운영단계 사용 에너지원에 따른 환경영향

평가 대상으로 선정된 건축물은 운영단계에 에너지원으로 전기와 가스를 각각 사용하거나, 둘 모두를 동시에 사용하도록 건설되었다. 사용되는 에너지원의 종류는 환경영향의 차

이를 야기할 수 있는 요소이기 때문에, 사용 에너지원에 따른 환경영향의 차이를 비교하였다.

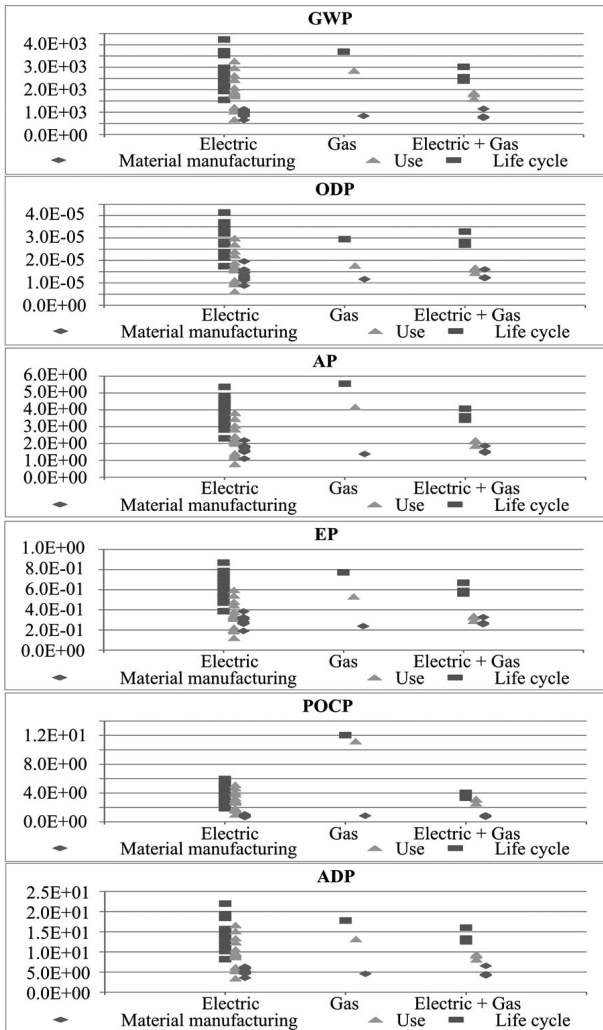


Fig. 5. Environmental impacts depending on types of energy sources

Fig. 5는 사용 에너지원에 따라 환경영향을 비교한 결과를 보여준다. Fig. 5와 같이, 전기만을 에너지원으로 사용하는 건물들 사이에서도 상당한 차이가 나타났다. 반면, 자재생산 단계에서의 환경영향은 에너지원에 관련 없이, 일정한 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 운영단계의 환경영향 역시 사용 에너지원에 따라 명확하게 구분되지 않았다. 특히, 17개의 초등학교 건축물 중 가스만을 에너지원으로 사용하는 초등학교는 B 초등학교가 유일하였고, 가스와 전기를 모두 사용하는 초등학교들은 대부분의 에너지를 얻는데 전기를 사용하였기 때문에, 에너지원의 차이에 따른 환경영향의 차이를 명확하게 파악하는 것은 어려웠다. 다만 가스를 주 에너지원으로 사용하는 B 초등학교의 경우, 전기를 주요 에너지원으로 사용하는 초등학교에 비해 AP와 POCP가 높게 나타나는 것으로 나타났다. 이는 운영단계 에너지 사용량의 차이이기

보다, 가스의 생산 및 연소과정에서 AP와 POCP의 원인 물질이 다량 방출되기 때문인 것으로 여겨진다.

4.2.4 단위면적당 자재비에 따른 환경영향

일반적으로 건축물 친환경 성능의 향상은 초기 공사비의 상승과 함께 운영단계에서의 에너지 사용량 저감을 야기하는 것으로 알려져 있다. 이로 인하여, 초기 투입되는 공사비의 차이에 따라 자재생산단계와 운영단계의 환경영향을 달라질 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 단위면적당 투입 자재비에 따른 환경영향을 비교하였다. Fig. 6은 단위면적당 투입 자재비에 따른 환경영향을 비교한 결과를 보여준다. Fig. 6을 살펴보면, 투입 자재비 단가가 상승할수록 자재생산단계에서의 환경영향은 증가하는 경향이 관찰되었다. 상관관계 분석결과, 투입 자재비와 자재생산단계의 환경영향 간에 0.622에서 0.945(POCP 0.945, ODP 0.622)의 높은 상관관계가 나타났으며, 6개 환경영향 범주 모두 99% 신뢰구간에서 유의한 것으로 나타났다.

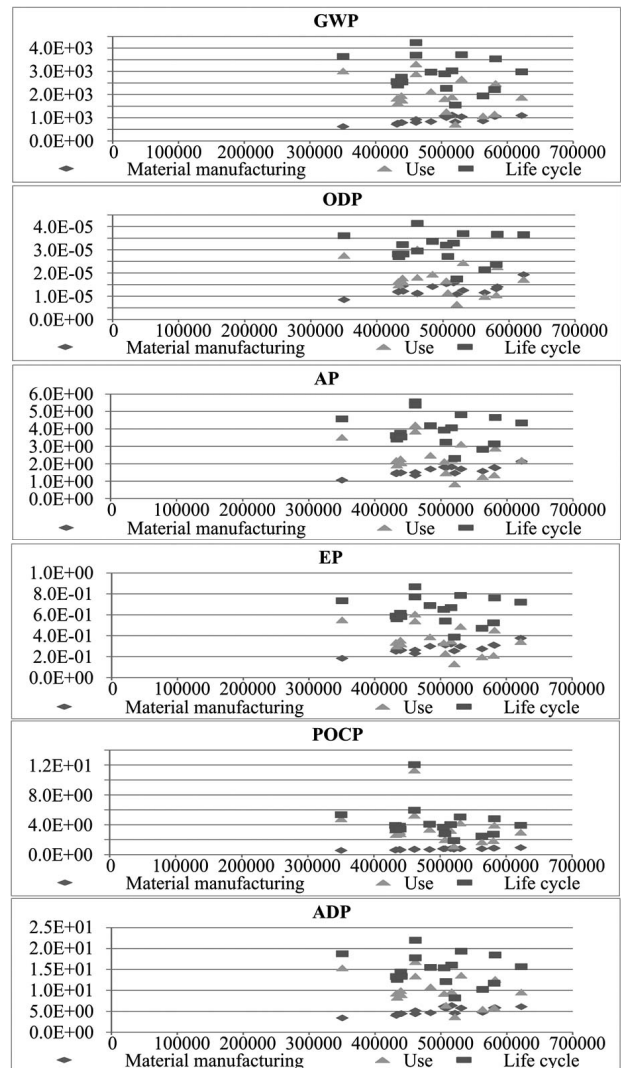


Fig. 6. Environmental impacts depending on material cost

더불어 운영단계에서의 환경영향은 감소하는 경향을 보여, 초기 자재비의 증가는 건축물의 에너지효율 향상에 따른 운영단계 환경영향 감소로 이어진다는 추론이 가능하였다. 상관관계 분석 결과, 투입 자재비 단가와 운영단계의 환경영향 사이에서는 -0.275에서 -0.386까지 음의 상관관계가 확인되었으나, 6개 환경영향 범주 모두 95% 수준에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 초기 자재비의 차이에 따라 운영단계의 환경영향을 구분하기는 어렵다는 것을 의미한다. 최종적으로 투입 자재비와 생애주기의 환경영향과의 상관관계 또한 6개 범주 모두 95% 수준에서 유의하지 않은 것으로 나타나, 투입 자재비를 환경영향 평가비교의 기준으로 보는 것은 적절하지 않은 것으로 나타났다.

4.3 논의

앞선 언급과 같이, 자재생산단계에서의 환경영향은 연면적, 에너지원의 종류, 지역에 따라 큰 차이가 없었다. 운영단계에서의 환경영향 역시 에너지원의 종류에 따라 크게 차이가 나지 않았으며, 연면적에 따른 영향은 부분적으로 발견되었으나, 일부 범주에 국한되어 있어 일반화하기에는 어려움이 있었다. 하지만, 지역에 따라 운영단계에서의 에너지 사용량이 큰 차이를 가지는 것으로 나타났으며, 이로 인하여 운영단계에서의 환경영향 역시 지역에 따라 뚜렷하게 구분되는 것으로 나타났고, 최종적으로 지역에 따라 생애주기 환경영향이 상이함을 통계적으로 확인하였다.

한편, 투입 자재비의 차이는 자재생산단계의 환경영향에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 지역의 차이와 함께, 투입 자재비의 차이를 고려하여 평가기준을 제시하는 것이 필요하다고 볼 수 있다. 하지만, 본 연구에서 평가한 17개 초등학교 건축물에 대한 평가 결과는 투입 자재비의 증가가 자재생산단계의 환경영향의 증가와 상당한 관계를 가지는 것을 명확하게 보여준 반면, 운영단계의 환경영향은 감축와의 관계는 신뢰 가능한 수준으로 나타나지 않았다. 이에 따라, 투입 자재비에 따른 건축물의 환경영향을 명확하게 파악하기 위해서는, 추가적인 초등학교 건축물에 대한 사례평가 및 투입 자재비에 대한 세부적인 분류 등의 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

이에 따라, 본 연구에서는 녹색 건축물의 환경영향 감축 효과를 평가를 위한 기준으로서, 지역에 따라 구분된 결과를 제시하였다. Table 6은 본 연구에서 사례 분석을 통해 도출된 서울, 부산, 대구, 광주 지역 초등학교 건축물의 환경영향 평가결과의 평균값을 제시한다. Table 6의 결과는 신축 녹색 초등학교 건축물의 환경영향 감축 효과를 파악하기 위한 기준값으로 활용될 수 있을 것이다.

Table 6. Reference target for evaluating the reduction of the environmental impacts

Phase	School	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADP
		kg-CO ₂ eq/m ²	kg-CFC-11 eq/m ²	kg-SO ₂ eq/m ²	kg-PO ₄ ³⁻ eq/m ²	kg-C ₂ H ₄ eq/m ²	kg-sb eq/m ²
Material	Seoul	8.90E+02	1.15E-05	1.47E+00	2.56E-01	7.26E-01	4.89E+00
	Busan	9.15E+02	1.19E-05	1.61E+00	2.80E-01	7.88E-01	5.03E+00
	Daegu	9.36E+02	1.41E-05	1.66E+00	2.92E-01	7.25E-01	5.28E+00
	Gwangju	8.78E+02	1.50E-05	1.70E+00	2.99E-01	7.39E-01	4.89E+00
Use	Seoul	2.87E+03	2.46E-05	3.52E+00	5.28E-01	5.91E+00	1.44E+01
	Busan	9.84E+02	8.98E-06	1.15E+00	1.80E-01	1.57E+00	5.01E+00
	Daegu	1.69E+03	1.53E-05	1.99E+00	3.09E-01	2.82E+00	8.59E+00
Life cycle	Seoul	3.76E+03	3.61E-05	4.99E+00	7.84E-01	6.63E+00	1.93E+01
	Busan	1.90E+03	2.08E-05	2.76E+00	4.60E-01	2.36E+00	1.00E+01
	Daegu	2.63E+03	2.94E-05	3.65E+00	6.02E-01	3.54E+00	1.39E+01
	Gwangju	2.81E+03	3.26E-05	3.95E+00	6.51E-01	3.80E+00	1.47E+01

4. 결론

신축 녹색 건축물에 대한 환경영향 감축 효과를 파악하기 위해서는 기존 건축물에 대한 환경영향 평가를 바탕으로 하는 비교 기준이 요구된다. 이에 따라, 본 연구에서는 LCA 모델을 이용하여, 기존 초등학교 건축물에 대한 생애주기 환경영향(GWP, ODP, AP, EP, POCP, ADP)을 평가하고, 결과를 분석하여 비교 기준을 제시하고자 하였다.

서울, 부산, 대구, 광주 지역에서 운영 중인 17개 초등학교 건축물을 선정하여, 각 초등학교 건축물에 대한 환경영향을 분석한 결과, 다음과 같은 특징이 파악되었다. 건축물의 규모(연면적), 사용 에너지원의 종류, 지역의 차이와 관계없이, 자재생산단계의 환경영향은 일정한 수준을 유지하는 것으로 확인되었다. 운영단계에서의 환경영향 역시 건축물의 규모나 사용에너지원의 종류에 따라 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 하지만, 운영단계에서의 환경영향은 지역에 따라 뚜렷한 차이를 가진다는 사실이 확인되었다. 이는 신축 녹색건축물의 환경영향 감축 효과는 지역에 따라 구분하여 평가하는 것이 타당함을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 Table 6과 같이, 사례분석 결과를 바탕으로 지역에 따라 구분된 평가 기준값을 제시하였다. 제시된 평가 기준값은 신축 녹색 초등학교 건축물의 환경영향 감축 효과를 파악하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 Table 6에 제시된 결과는 17개 초등학교 건축물에 대한 사례평가 결과만을 반영한다. 비록 4개 지역의 17개 초등학교 건축물을 평가 대상에 포함하였지만 사례분석에 활용된 대상 건축물이 모든 건축물을 대표하는 것은 아니기 때문에, 신축 녹색 건축물의 환경영향 감축 효과를 명확하게 평가하기 위해서는 보다 많은 초등학교 건축물에 대한 사례분석이 수행되어야 한다. 특히, 본 연구에서 분석한 사례 건축물들은 모두 2008년 이후에 신축된 것으로, 친환경 건축물 우수 등급으로 설계되었기 때문에, 과거 친환경건축물 인증이

적용되지 않은 초등학교 건축물의 환경영향 발생 특성을 보여주지는 못한다. 따라서 향후 연구에서는 보다 이전 시점에 건설된 초등학교 건축물에 대한 사례분석을 추가적으로 수행하고, 건설 시점이나 친환경 등급에 따른 환경영향의 차이가 분석되어야 할 것이다. 또한, 이를 통해 신축 녹색 초등학교 건축물의 전 생애기반의 경제성 및 친환경 수준을 평가할 수 있는 기준으로 발전시켜야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 첨단도시개발 연구개발사업의 연구비지원(11첨단도시G03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bank of Korea (2007). *Input-Output Analysis Explanation*. Bank of Korea, South Korea.
- Chang Y., Ries R.J. and Lei S. (2012). "The embodied energy and emissions of a high-rise education building: A quantification using process-based hybrid life cycle inventory model." *Energ. Buildings*, 55, pp. 790-798.
- Choi D., Chun H., and Cho K. (2013). "A Study on the LCA of an Apartment House through a Simplified Technique." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 29(1), pp. 307-316.
- Daniel, J.S., Velders, G.J.M., Douglass, A.R., Forster, P.M.D., Hauglustaine, D.A., Isaksen, I.S.A., Kuijpers, L.J.M., McCulloch, A., and Wallington, T.J. (2006). *Scientific assessment of ozone depletion:2006, Chapter 8 in: Halocarbon Scenarios, Ozone Depletion Potentials, and Global Warming Potentials*. Geneva, Switzerland.
- Energy Information Administration(EIA). (2011). Table 2.1a Energy Consumption Estimates by Sector, 1949-2010. Accessed on 15 November 2014. <<http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/showtext.cfm?t=ptb0201a>>
- Guinee J.B., Gorree, M., Heijung, R., Huppoes, G., Kleijn, R., Koning, A., Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., Bruijn, H. Duin R., and Huijbregts, M.A.J., (2001). *Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards*. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM) and Centre of Environmental Science - Leiden University (CML), Netherlands.
- Hauschild, M., and Wenzel, H., (1998). *Environmental assessment of products: scientific background volume 2*. Chapman & Hall, London, UK.
- Hong T., Ji C., Jang M., and Park H. (2014). "Assessment Model for Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions during the Construction Phase." *J. Manage. Eng.*, 30(2), pp. 226-235.
- Hong T., and Ji C. (2014). "Comparison of the CO2 Emissions of Buildings using Input-Output LCA Model and Hybrid LCA Model." *Korean journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 15(4), pp. 119-127.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. IPCC 4th assessment report*. Cambridge University press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- ISO 14040 (2006). *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*. International Organization for Standardization.
- Jang M., Hong T., and Ji C. (2014). "Hybrid LCA model for assessing the embodied environmental impacts of buildings in South Korea." *Environ. Impact Assess. Rev.*, 50, pp. 143-155.
- Jenkin M.E., Hayman G.D. (1999). "Photochemical ozone creation potentials for oxygenated volatile organic compounds: sensitivity to variations in kinetic and mechanistic parameters." *Atmos. Environ.*, 33(8), pp. 1275-1293.
- Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI). Korea LCI Database Information Network. South Korea; Ministry of Environment: 2004. Accessed on 15 October 2013. <http://www.edp.or.kr/lcidb/english/lcidb/lcidb_intro.asp>.
- Lee K. (2002). "A Study on the Application of Life Cycle Assessment for the remodeled Multifamily Housing - Focused on the Inventory Analysis of LCA-." *Korean journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 18(12), pp. 16-23.
- Moon H., Hyun C., and Hong T. (2014). "Prediction Model of CO2 Emission for Residential Buildings in South Korea." *J. Manage. Eng.*, 30(3), 04014001.
- Wang M.Q. (1999). *REET 1.5: Transportation fuel-Cycle model, volume 2: appendixes of data and*

results, Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.

요약 : 신축 녹색건축물의 환경영향 감축 효과를 평가하기 위해서는 비교를 위한 기존 건축물에 대한 환경영향 결과가 필요하다. 본 연구는 비교 기준을 제시하기 위하여, 많은 기존 건축물에 대한 환경영향을 사례 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여, 산업연관표와 에너지원별 목록분석 데이터(LCI)를 기반으로 하는 LCA 모델을 이용하여 서울, 부산, 대구, 광주 지역의 17개 초등학교 건축물에 대한 환경영향(지구온난화지수, 오존층파괴지수, 산성화지수, 부영양화지수, 광화학산화지수, 자원고갈지수)을 평가하였다. 평가 결과, 초등학교 건축물의 환경영향은 연면적, 사용에너지원의 차이에 따라서는 큰 차이를 보이지 않은 반면, 지역에 따라 명확하게 구분되는 것으로 나타났다. 이에 따라, 본 연구에서는 지역에 따라 구분된 비교 기준을 제시하였다. 예를 들어, 서울, 부산, 대구, 광주 지역에서의 GWP에 대한 비교 기준은 각각 $3.76E+03$, $1.90E+03$, $2.63E+03$, $2.81E+03$ kg-CO₂ eq./m²로 나타났다. 제시된 결과는 신축 녹색 초등학교 건축물의 환경영향 저감 효과를 파악하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 전과정평가, 초등학교, 환경영향, 녹색 건축물
