

전과정평가(LCA)를 이용한 친환경 인증 건축물과 일반 건축물의 환경영향 비교 사례 연구

홍태훈* · 정광복¹ · 지창윤¹

¹연세대학교 건축공학과

Comparison of Environmental Impacts of Green and Traditional Buildings using Life Cycle Assessment

Hong, Taehoon*, Jeong, Kwangbok¹, Ji, Changyoon¹

¹Department of Architectural Engineering, Yonsei University

Abstract : This study aims to understand the environmental impact reduction of green buildings that are certified by Green standard for energy and environmental design(G-SEED). To ensure this end, this study assessed and compared the environmental impacts(global warming, ozone layer depletion, acidification, and eutrophication) of a G-SEED-certified elementary school building(green building) and an uncertified elementary school building(traditional building) using the life cycle assessment methodology. This study considered the environmental impacts from the material manufacturing, material transportation, on-site construction, and operation during 40 years. The comparison of the environmental impact intensity of two buildings showed that the green building generated much more environmental impacts than the traditional building. For example, the global warming potential of the green building was approximately 12.5% higher than of the traditional building since the global warming potential of the green building was 3.751 t-CO₂ eq./m² while that of the traditional building was 3.282 t-CO₂ eq./m². It signifies that the G-SEED doesn't guarantee the reduction of the environmental impacts in terms of four impact categories. Therefore, the G-SEED should be complemented and improved to achieve the environmental impact reduction.

Keyword : Life Cycle Assessment, Environmental Impact, Green building, Traditional building, Elementary school

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

1997년 교토의정서의 발표 이후, 기후변화는 전지구적 관심을 받고 있다. 이에, 대한민국 정부 역시 “저탄소 녹색성장”이라는 국가 비전을 제시하고, 2020년까지 이산화탄소 배출량을 BAU(Business As Usual) 대비 30% 수준까지 감축하는 것을 목표로 정책을 추진하고 있으며, 많은 연구자들은 온실가스의 저감을 위해 노력해 왔다 (Baek et al. 2011, Lee and Yang 2009, Hong et al. 2012a, Hong et al. 2012b, Hong et al. 2012c, Hong et al. 2012d, Hong et al. 2012e).

친환경 건축물 인증제도는 건설산업으로부터 발생하는 환경부하를 저감하기 위한 노력들 중의 하나로서, 미국의 LEED (Leadership in Energy & Environmental Design), 영국의 BREEAM (Building Research Establishment's Environmental

Assessment Method), 독일의 DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen)는 대표적인 친환경 건축물 인증제도이다. 대한민국에서도 2002년 1월부터 녹색건축인증제 (Green Standard for Energy and Environmental Design; 이하 G-SEED)가 적극적으로 시행되고 있다.

LEED와 DGNB는 친환경 인증 건축물의 환경부하 저감 측면을 보여주기 위해, 전과정평가(Life Cycle Assessment; LCA)를 활용하여 건축물의 환경부하 평가결과를 평가항목에 포함하고 있다(Trusty 2006). 이를 통해, 친환경 건축물을 활성화하고, 궁극적으로 국가 전체의 환경부하 저감 목표를 달성하고자 한다. 그러나 G-SEED는 계획적인 부문(e.g, 에너지 저감 계획, 교통소음 저감 계획 등)만을 평가항목으로 포함할 뿐, 예상되는 환경부하 평가결과는 포함하지 않는다. 이로 인하여, 친환경 건축물 인증 여부만으로, 어느 정도의 환경부하 저감 효과를 달성했는지 파악하기가 어렵다.

이에 따라, 본 연구에서는 LCA 방법론을 활용하여 G-SEED에 의해 인증된 친환경 건축물과 비인증 건축물(일반 건축물)의 환경영향을 평가하고, 평가결과를 비교함으로써, G-SEED에 의해 인증된 친환경 건축물의 환경영향 저감 효과를 파악하고자 한다.

* Corresponding author: Hong, Taehoon, Department of Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
E-mail: hong7@yonsei.ac.kr
Received January 8, 2014; revised March 25, 2014
accepted March 28, 2014

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 친환경 인증 건축물과 일반 건축물의 환경영향을 비교하기 위하여, 다음과 같은 절차를 통해 연구를 진행하였다.

(1) LCA에 관한 기존 연구를 검토하여, 건축물에 대한 환경영향 평가를 위한 방법을 정의하였다. (2) 친환경 인증 건축물과 일반 건축물을 선정하고, 정의된 방법을 활용하여 두 건축물에 대한 환경영향을 평가하였다. (3) 평가결과를 비교함으로써, 친환경 인증 건축물에 대한 환경적 가치를 파악하였다.

2. 기존연구 고찰

2.1 전과정평가(LCA)

LCA는 제품 또는 서비스의 생애주기 동안에 필연적으로 발생하는 환경부하 물질을 규명하고, 이러한 환경부하 물질들로 인한 환경영향을 평가하는 기법이다(ISO 2006). 이에 따라, LCA는 건축물에 대한 환경성능을 평가하고 개선하기 위한 주요 수단으로 활용되고 있다.

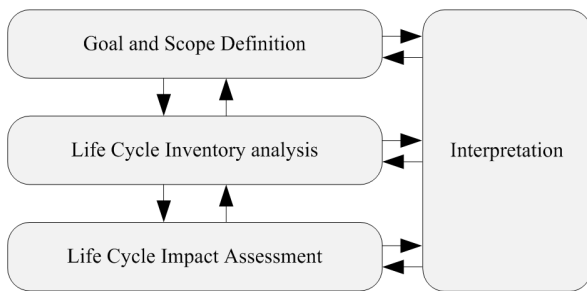


Fig. 1. Process of Life Cycle Assessment

ISO 14000 시리즈에 따르면, LCA는 Fig 1과 같이 목적 및 범위 정의(Goal and scope definition), 전과정 목록분석(Life cycle inventory analysis), 전과정 영향평가(Life cycle impact assessment), 해석(Interpretation)단계로 수행된다(ISO 2006).

첫째, 목적 및 범위 정의 단계에서는 LCA의 수행 목적에 따라 분석범위, 활용 데이터 수준, 기능 단위 등을 정의한다. 둘째, 전과정 목록분석 단계에서는 평가 대상의 생애주기에서 발생하는, 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 이산화황과 같은 배출물(emissions)을 파악한다. 셋째, 전과정 영향평가 단계에서는 전과정 목록분석을 통해 도출된 배출물을 환경영향으로 변환하여 보여준다. 예를 들어, 전과정 목록분석을 통해 산출되는 이산화탄소나 메탄, 아산화질소와 같은 배출물을 지구온난화지수(global warming potential; GWP)로 변환하여 제시한다. 전과정 영향평가는 범주화, 특성화, 정규화, 가중화 단계로 진행될 수 있다. 범주화와 특성화단계는 필수적으로 수행되어야 하는 반면, 정규화와 가

중화는 선택적으로 수행된다. 넷째, 해석단계에서는 전과정 영향평가를 통해 도출된 결과를 평가·해석하여 제시하는 단계이다.

2.2 기존연구 고찰

1990년 이후 국내외 연구자에 의하여, LCA를 이용하여 건축물에 대한 환경영향을 평가하고자 하는 다양한 연구가 수행되어 왔다.

Lee et al. (2003)과 Kim et al. (2011)은 각각 건축물 리모델링과 친환경 기술의 가치를 평가하기 위하여 생애주기비용분석(LCC)와 LCA를 통합하여 평가하는 방법을 제시하였다. Hong et al. (2012e)은 건축물에 대한 환경성능을 평가하는 방법으로서 LCA에 기반을 둔 환경영향평가 방법을 제시하였다. Tae et al. (2011)은 표준형 공동주택의 생애주기 동안 배출되는 이산화탄소를 보다 쉽게 평가할 수 있는 방법을 제시하였으며, Hong et al. (2013)은 건축물의 시공단계에서 발생하는 환경영향을 보다 정확하게 평가할 수 있는 방법을 제시하였다. 한편, Lee and Yang (2009), Hong et al. (2012a)은 건축물 LCA에 기초 자료로 활용되는 주요 건축자재에 대한 인벤토리 데이터를 추가하고자 하였다.

이처럼 LCA를 기반으로 하는 다양한 연구가 수행되었음에도 불구하고, 대부분의 연구는 LCA 결과의 정확성을 향상시키는 데에 초점을 맞추어져 있었을 뿐, LCA를 활용하여 친환경 인증 건축물의 환경적 가치를 보여주고자 한 연구는 부족하였다. 따라서 본 연구에서는 LCA를 활용하여, 친환경 인증 건축물과 일반 건축물에 대한 환경영향을 평가 비교함으로써, 친환경 인증 건축물의 환경적 가치를 검토하고자 한다.

3. 친환경 인증 건축물과 일반 건축물의 환경영향 평가

3.1 분석 대상 건물 선정

본 연구에서는 친환경 인증 건축물과 일반 건축물의 환경영향을 평가·비교하는 것이다. 이를 위해, 2005년에 건설된 일반 초등학교와 2008년에 건설된 친환경 인증 초등학교를 분석대상으로 선정하였다. Table 1은 선정된 초등학교 시설물에 대한 기본 정보를 보여준다.

Table 1. General information of two elementary school buildings

	Green building	Traditional building
Region	Seoul	Seoul
Construction year	2008	2005
Structure type	RC	SRC
Building area	4,012 m ²	2,911 m ²
Total floor area	14,555 m ²	10,236 m ²
No. of people	1,555	1,041
No. of classes	47	32
Total material cost	3,734,634,862 KRW	3,686,118,002 KRW

3.2 범위 및 목적 정의

일반적으로 건축물에 대한 LCA는 자재생산, 자재운송, 시공, 운영, 해체·폐기단계를 포함한다. 그러나, 해체·폐기단계에 대한 평가결과를 도출하기 위해서는 많은 가정 사항을 필요로 하며, 이러한 가정 사항들은 평가결과의 신뢰성 하락에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 자재생산, 자재운송, 시공, 운영 과정을 건축물의 LCA 범위로 한정하였다.

한편, LCA는 연구자에 따라 다양한 환경영향범주를 정의하고, 각 영향범주별 평가 기준을 제시하고 있다(Bare et al. 2003, EPA 2005, Guinea et al. 2001). 예를 들어, CML 2001에서는 자원고갈(Abiotic depletion), 지구온난화(Global warming), 오존층파괴(Ozone layer depletion), 산성화(Acidification), 부영양화(Eutrophication), 광화학산화(Photochemical oxidation), 수계생태독성(Freshwater aquatic ecotoxicity), 해양생태독성(Marine aquatic ecotoxicity), 인체독성(Human toxicity), 토양생태독성(Terrestrial ecotoxicity) 등을 환경영향 범주로 정의하고 있다. 본 연구에서는 대표적인 4가지 영향범주(지구온난화, 오존층파괴, 산성화, 부영양화)에 대한 환경영향 평가결과를 비교하였다. 건축물의 규모에 따라 환경영향의 총량은 달라지기 때문에, 기능단위는 단위 연면적당 환경영향으로 정의하였다. Fig. 2는 LCA의 분석범위 및 방법을 개략적으로 보여준다.

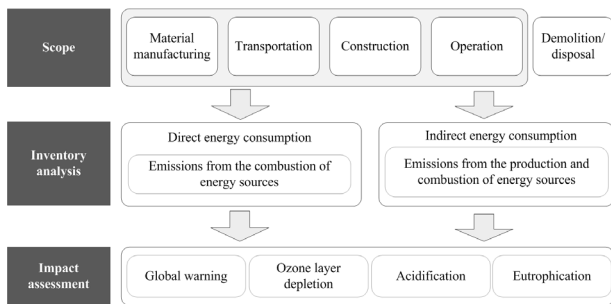


Fig. 2. Framework of life cycle assessment of buildings

3.3 전과정 목록분석

건축물의 생애주기에서 배출되는 배출물을 산출하는 전과정 목록분석은 자재생산, 자재운송, 시공, 운영단계로 구분하여 시행되었다. 각 단계에서의 배출물은 직접배출과 간접배출로 구분하여 산출되었으며, 이에 대한 상세한 설명은 아래와 같다.

3.3.1 자재생산단계

자재생산단계에서의 배출물은 자재를 생산하는 과정에서 직간접적으로 사용되는 에너지량을 바탕으로 산출될 수 있다. 먼저, 자재의 생산과정에서 직접적으로 사용되는 에너지량(AE_j^{dir})은 식 (1)과 같이 i 산업부문에 포함되는 자재

의 자재비(CM_i)에 i 산업부문의 1원 생산시의 에너지사용량 데이터($EU_{i,j}$)를 곱해줌으로써, 산출될 수 있다.

자재의 생산과정에서 간접적으로 사용되는 에너지량은 식 (2)와 같이 레온티에프 역행렬이라고도 불리는, 생산유발계수를 활용하여 산출될 수 있다. 생산유발계수는 하나의 산업부문이 1원단위 변화할 때, 모든 관련 산업부문에 직간접적인 변화의 정도를 보여준다. 따라서 생산유발계수를 이용하면, 자재의 생산과정에서 다양한 관련 산업에 의해 사용되는 간접적인 에너지원 투입액을 산출할 수 있다. 본 연구에서는 한국은행에서 제시하는 2010 산업연관표를 사용하였다.

이때 사용되는 1원 생산 시 투입되는 에너지사용량 데이터(EU)는 다음과 같은 과정에 따라, 산출되었다. 산업연관표는 각 산업부문에 1년 동안 생산된 모든 제품에 대한 생산액 정보와 1년 동안 사용된 에너지의 투입액 정보를 포함한다. 따라서 i 산업부문에 1년 동안 사용된 에너지 투입액을 i 산업 부문의 1년 생산액으로 나누어줌으로써, 1원 생산 시 투입되는 에너지사용량 데이터(EU)를 산출하였다. (산업연관표에 포함되어있는 모든 데이터는 비용 정보이기 때문에, 1원 생산 시 투입되는 에너지사용량은 금액 정보로 제시된다).

식 (1)과 (2)를 통해 산출된 직간접 에너지 투입액을 식 (3)에 적용함으로써, 자재생산 단계에서 발생하는 배출물을 산출하였다. 에너지원의 생산에 대한 LCI 데이터는 환경부와 前)지식경제부에서 구축한 데이터를 활용하였으며, 에너지원의 연소에 대한 LCI 데이터는 Wang (1999)에서 제시하는 데이터를 사용하였다.

$$AE_j^{dir} = EU_{i,j} \times CM_i \quad (1)$$

$$AE_j^{ind} = EU_{i,j} \times (I - A)^{-1} \times CM_i \quad (2)$$

$$E_l = LCI_{j,l} \times (AE_j \div UP_j) \quad (3)$$

- AE_j^{dir} : 자재(i)의 생산과정에서 직접 투입된 에너지(j)에 대한 비용
- AE_j^{ind} : 자재(i)의 생산과정에서 간접적으로 투입된 에너지(j)에 대한 비용
- $EU_{i,j}$: 자재(i)를 1원 생산시 직접 투입되는 에너지(j)의 비용
- CM_i : 자재(i)의 자재비
- $(I - A)^{-1}$: 생산유발계수행렬
- E_l : 자재를 생산하는 과정에서 발생하는 배출물 또는 투입물(l)의 양
- $LCI_{j,l}$: 에너지 (j) 1단위의 생산 또는 연소시 발생하는 투입물 또는 배출물 (l)의 양
- AE_j : 자재 (i)의 생산과정에서 투입된 에너지(j)에 대한 총비용
- UP_j : 에너지(j)의 단가

두 건축물의 내역서는 2005년과 2008년의 가격정보를 포함하고 있다. 따라서 한국은행에서 제시하는 생산자물가

지수(Producer price index)를 활용하여 2010년을 기준으로 변환된 값을 식 (1)과 (2)에 적용하였다. 친환경 인증 초등학교 건축물과 일반 초등학교 건축물의 변환된 총 자재비는 각각 4,283.3백만원(294,248원/m²)과 4,597.7백만원(449,169원/m²)이었다.

3.3.2 자재운송단계

운송단계에서의 배출물은 운송장비에 의해 사용되는 연료의 연소로부터 발생하는 직접 배출물과 사용되는 연료의 생산과정에서 발생하는 간접 배출물을 포함한다.

먼저, 운송장비에 의해 사용되는 연료의 양은 내역서에 포함된 자재의 물량정보를 식 (4)에 적용함으로써 산출될 수 있다 (Hong et al. 2013). 각 운송장비에 대한 적재용량 및 연비정보는 기존 연구에서 제시한 데이터를 사용하였으며(KICT 2004, CAK 2011, Hong et al. 2013), 운송거리는 대한민국 LCI DB 구축 시 표준거리로 사용된 30km로 설정하였다. 그 결과, 친환경 인증 건축물의 운송단계에서 사용된 연료의 양은 48,441.3 l (경유)로 산출되었고, 일반 건축물의 자재 운송을 위해 사용된 연료의 총량은 33,250.1 l (경유)로 산출되었다. 식 (4)를 통해 산출될 결과를 식 (5)에 적용함으로써, 연료로부터 발생하는 직접 배출물을 산출하였다.

간접적으로 사용되는 에너지 투입액은 식 (6)과 같이, 생산유발계수를 이용하여 산출하였다. 그리고 간접 에너지 투입액을 식 (3)에 적용함으로써, 운송단계에서의 간접 배출물을 산출하였다.

$$QE_j = 2 \sum_i \frac{QM_i \times TD_m}{LC_{i,m} \times FE_m} \quad (4)$$

$$E_l = LCI_j \times QE_j \quad (5)$$

$$AE_j^{ind} = (I - A)^{-1} \times (QE_j \times UP_j) \quad (6)$$

QE_j : 자재(i)의 운송을 위하여 운송장비(m)에 의해 사용된 에너지(j)의 양

QM_i : 자재(i)의 물량

$TD_{i,m}$: 자재(i)를 운송하는 운송장비(m)의 운송거리

$LC_{i,m}$: 운송장비(m)의 자재(i)에 대한 적재용량

$FE_{m,j}$: 연료(j)를 사용하는 운송장(m)의 연비

3.3.3 시공단계

시공과정에서의 배출물의 산출은 자재운송단계와 동일하게 진행된다. 다만, 시공단계에서 사용되는 연료의 양은 Hong et al. (2013)의 연구에서 제시한 것과 같이, 내역서에 제시된 자재의 물량정보를 식 (7)에 적용함으로써 산출된다. 이때 사용된 시공 장비의 단위시간당 작업량 및 연료사용량 정보는 기존연구에서 제시하는 데이터를 사용하였다

(KICT 2004, CAK 2011, Hong et al. 2013).

친환경 인증 건축물의 운송단계에서 사용된 연료의 총량은 42,408.0 l(경유)로 산출되었고, 일반 건축물의 자재 운송을 위해 사용된 연료의 총량은 45,173.8 l(경유)로 산출되었다. 산출된 연료사용량을 식 (5)에 적용하여 직접 배출량을 산출하였다. 또한, 산출된 연료 사용량을 식 (3)과 (6)에 적용함으로써, 간접 배출물을 산출하였다.

$$QE_j = \sum_i \frac{QM_i \times EC_{i,n}}{AWD_{i,n}} \quad (7)$$

QM_i : 시공작업(i)의 물량

$EC_{i,n}$: 시공작업(i)에 사용되는 시공장비(n)의 단위시간당 연료소비량

$AWD_{i,n}$: 시공장비(n)의 작업(i)에 대한 작업능력

3.3.4 운영단계

운영단계에서의 배출물은 건축물의 운영과정에서 사용된 에너지원의 사용량을 바탕으로 산출하였다. 본 연구에서는 교육통계연보의 데이터를 바탕으로 각 초등학교 건축물의 연평균 에너지사용량 데이터를 추출하였다(MEST 2010). 두 건축물 모두 전력만을 에너지원으로 사용하였으며, 친환경 인증 초등학교 건축물은 연 평균 729,633 kWh의 전력을 사용하였고, 일반 건축물은 423,693 kWh의 전력을 사용하는 것으로 나타났다. 그리고 건축물의 운영기간은 40년으로 설정하였다.

앞서 언급한 바와 같이, 평가대상으로 선정된 두 초등학교 건축물은 전력만을 사용하기 때문에, 본 연구에서는 운영단계에서의 직접 배출물을 고려하지 않았다. 간접 배출물은 자재운송단계와 시공단계에서의 간접 배출물 산출방법과 동일한 방법에 따라 산출되었다.

3.4 전과정 영향평가

전과정 영향평가 단계는 전과정 목록분석의 결과를 환경영향범주별 결과로 변환하는 단계이다 (ISO 2006). 즉, 전과정 목록분석을 통해 산출된 배출물은 전과정 영향평가를 통해 지구온난화지수(global warming potential; GWP), 오존층파괴지수(ozone layer depletion potential; ODP), 산성화지수(acidification potential; AP), 부영양화지수(4utrophication potential; EP)와 같은 환경영향으로 변환되었다. 본 연구에서는 식 (8)과 같이, 필수과정인 특성화 단계까지만 진행하여, 4가지 환경영향 범주에 따른 평가결과를 제시하였다 (Pennington 2004).

$$CI_k = \sum_l CF_{k,l} \times E_l \quad (8)$$

- CI_k : 환경영향범주(k)에 대한 환경영향 평가결과
- $CF_{k,l}$: 환경영향범주 (k)에 대한 배출물 또는 투입물(l)의 특성화계수
- E_l : 전과정목록 분석을 통해 산출된 배출물 또는 투입물(l)의 양

본 연구에서는 Table 2와 같이, IPCC (2007), WMO (2006), Hauschild and Wenzel (1998), Heijungs et al. (1992)에 의하여 제시된 특성화계수를 사용하여, 전과정 영향평가를 수행하였다.

Table 2. Reference for characterization factors

Impact category	Unit	Reference
Global warming	t-CO ₂ eq.	IPCC (2007)
Ozone layer depletion	g-CFC-11 eq.	WMO (2006)
Acidification	kg-SO ₂ eq.	Hauschild & Wenzel (1998)
Eutrophication	kg-PO ₄ ³⁻ eq.	Heijungs et al. (1992)

4. 결과 분석

4.1 친환경 인증 초등학교 건축물의 환경영향평가 결과

Table 3은 친환경 인증 초등학교 건축물에 대한 환경영향 평가 결과를 보여준다. 지구온난화지수, 오존층파괴지수, 산성화지수, 부영양화지수는 각각 54,593.8 t-CO₂ eq., 177.1 g-CFC-11 eq., 392,228.1 kg-SO₂ eq., 51,014.4 kg-PO₄³⁻ eq.로 산출되었다.

일반적으로 건축물에 대한 환경영향의 80% 이상이 운영 단계에서 발생하는 것으로 알려져 있다(Ortiz et al. 2009). Table 3과 같이, 친환경 인증 초등학교 건축물로부터 발생하는 환경영향의 대부분은 운영단계에서 발생하는 것으로 파악되었다. 지구온난화지수를 예로 들면, 자재생산단계, 자재운송단계, 시공단계, 운영단계에서 각각 7.8%, 0.5%, 0.5%, 91.2%의 환경영향이 발생하는 것으로 나타났다. 산성화지수와 부영양화지수 역시 지구온난화지수의 결과와 유사하게 도출되었다. 다만, 오존층파괴지수의 경우에는 자재 생산단계에서 상당히 높은 비율(40.1%)의 환경영향이 발생하는 것

으로 파악되었다. 이는 오존층파괴 물질의 상당 부분이 합성수지제품과 철강제품 생산 공정에서 발생하고, 전력을 생산하는 과정에서는 상대적으로 적게 배출되기 때문인 것으로 파악되었다.

각 단계별 직간접 환경영향 평가결과를 살펴보면, 자재생산 단계에서는 직접적인 환경영향이 약 3~16%를 차지하였다. 반면, 운송단계와 시공단계에서는 약 50%의 환경영향이 직접적으로 발생하는 것으로 파악되었다. 이는 경유를 생산하는 과정에 비해 운송장비나 건설장비에 의한 경유의 연소로부터 많은 양의 환경영향 유발 물질이 배출되기 때문인 것으로 파악되었다. 한편, 친환경 인증 건축물의 운영에 너지로 전력을 사용하였기 때문에, 운영단계에서의 배출량은 모두 간접적으로 발생하는 것으로 나타났다.

4.2 일반 초등학교 건축물의 환경영향평가 결과

Table 3은 일반 초등학교 건축물에 대한 환경영향 평가 결과를 보여준다. 지구온난화지수, 오존층파괴지수, 산성화지수, 부영양화지수는 각각 33,593.3 t-CO₂ eq., 176.3g-CFC-11 eq., 242,385.6 kg-SO₂ eq., 32,015.6 kg-PO₄³⁻ eq.로 산출되었다.

Table 3과 같이, 일반 초등학교 건축물 역시 운영단계에서 대부분의 환경영향이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 친환경 인증 초등학교 건축물에 비해 자재생산단계의 비율이 높은 것으로 나타났다. 지구온난화지수를 예로 들면, 자재생산단계, 자재운송단계, 시공단계, 운영단계에서 각각 12.6%, 0.6%, 0.8%, 86.0%의 환경영향이 발생하는 것으로 나타났다. 지구온난화지수의 결과와 유사하게, 산성화지수와 부영양화지수 역시 자재생산단계의 비율이 높았으며, 특히 오존층파괴지수의 경우에는 65.0%의 환경영향이 자재생산단계에서 발생하는 것으로 파악되었다.

각 단계에 따른 직간접 환경영향을 살펴보면, 자재생산 단계에서는 직접적인 환경영향이 약 3~20%를 차지하였다. 일반 초등학교 건축물의 운송과 시공과정에서 역시 경유만을 에너지원으로 사용하였기 때문에, 운송단계와 시공단계

Table 3. Environmental impacts of elementary school buildings

Impact category	Unit	Material			Transportation			Construction			Operation			Total	
		Direct	Indirect	Total	Direct	Indirect	Total	Direct	Indirect	Total	Direct	Indirect	Total		
Green building	GWP	t-CO ₂ eq.	139.9	4,135.8	4,275.7(8%)	130.0	158.2	288.1(0.5%)	113.8	138.5	252.2(0.5%)	0	49,777.7	49,777.7(91%)	54,593.8
	ODP	g-CFC-11 eq.	11.3	59.7	71.0(40%)	0	0.2	0.2(0.1%)	0	0.1	0.1(0.1%)	0	105.8	105.8(60%)	177.1
	AP	kg-SO ₂ eq.	3,165.0	32,061.5	35,227.4(9%)	540.7	1,165.0	1,705.8(0.4%)	473.4	1,019.9	1,493.3(0.4%)	0	353,801.6	353,801.6(90%)	392,228.1
	EP	kg-PO ₄ ³⁻ eq.	583.7	5,383.6	5,967.2(12%)	97.3	83.5	180.8(0.4%)	85.2	73.1	158.2(0.3%)	0	44,708.2	44,708.2(88%)	51,014.4
Traditional building	GWP	t-CO ₂ eq.	128.3	4,093.0	4,221.2(13%)	89.2	108.6	197.8(0.6%)	121.2	147.5	147.5(0.8%)	0	28,905.6	28,905.6(86%)	33,593.3
	ODP	g-CFC-11 eq.	22.9	91.6	114.6(65%)	0	0.1	0.1(0.1%)	0	0.2	0.2(0.1%)	0	61.4	61.4(35%)	176.3
	AP	kg-SO ₂ eq.	2,912.7	31,261.3	34,174.0(14%)	371.2	799.7	1,170.8(0.5%)	504.3	1,086.5	1,590.7(0.7%)	0	205,450.1	205,450.1(85%)	242,385.6
	EP	kg-PO ₄ ³⁻ eq.	533.3	5,228.0	5,761.3(18%)	66.8	57.3	124.1(0.4%)	90.7	77.9	77.9(0.5%)	0	25,961.7	25,961.7(81%)	32,015.6

에서의 직간접 비율은 친환경 인증 초등학교 건축물과 동일하였다. 일반 초등학교 건축물 역시 전력을 운영을 위한 유일한 에너지원으로 사용하였기 때문에, 운영단계에서의 환경영향은 100% 간접적인 과정에 의해 발생하는 것으로 파악되었다.

4.3 결과 분석

두 초등학교 건축물은 연면적, 사용자 수, 학급 수 등의 특성이 다르다. 이에 따라, 연면적, 사용자 수, 학급 수와 같은 규모 요인에 따른 결과의 차이를 고려하기 위하여, 단위 연면적, 단위 사용자 및 단위 교실 당 환경영향 평가결과를 비교하였다. 먼저, Table 4는 친환경 인증 초등학교 건축물과 일반 초등학교 건축물에 대한 단위 연면적당 환경영향 평가결과를 보여준다.

자재생산단계와 시공단계에서 발생하는 단위 연면적당 환경영향은 친환경 인증 초등학교 건축물에 비해 일반 초등학교 건축물이 큰 것으로 나타났다. 반면, 자재운송단계와 운영단계에서는 친환경 인증 초등학교 건축물로부터 발생하는 단위 연면적당 환경영향이 일반 초등학교 건축물에 비해 큰 것으로 나타났다. 이로 인하여, 오존층파괴지수를 제외한 3가지 환경영향범주에서 친환경 인증 초등학교 건축물의 환경영향이 일반 초등학교 건축물에 비해 더 높게 나타났다. 예를 들어, 친환경 인증 초등학교 건축물의 자재생산단계와 시공단계의 지구온난화지수는 0.294 t-CO₂ eq./m², 0.017 t-CO₂ eq./m²인 반면, 일반 초등학교 건축물의 지구온난화지수는 0.412 t-CO₂ eq./m², 0.026 t-CO₂ eq./m²로 도출되었다. 친환경 인증 초등학교 건축물의 자재운송단계와 운영단계의 지구온난화지수는 각각 0.020 t-CO₂ eq./m², 3.420 t-CO₂ eq./m²인 반면, 일반 초등학교 건축물의 지구온난화지수는 0.019 t-CO₂ eq./m², 2.824 t-CO₂ eq./m²로 도출되었다. 결국 친환경 인증 초등학교 건축물의 지구온난화지수는 3.751 t-CO₂/m², 일반 초등학교 건축물의 지구온난화지수는 3.282 t-CO₂/m²로 도출되어, 친환경 인증 건축물이 일반 건축물에 비해 약 12.5%=(3.751 t-CO₂/m²-3.282 t-CO₂/m²)÷3.751 t-CO₂/m² 더 큰 영향을 미치는 것

Table 4. Comparison of the Intensity of different buildings

Impact category	Unit	Intensity (unit/m ²)					Total
		Material	Transportation	Construction	Operation		
Green building	GWP	t-CO ₂ eq.	0.294	0.020	0.017	3.420	3.751
	ODP	g-CFC-11 eq.	0.005	0.000	0.000	0.007	0.012
	AP	kg-SO ₂ eq.	2.420	0.117	0.103	24.308	26.948
	EP	kg-PO ₄ ³⁻ eq.	0.410	0.012	0.011	3.072	3.505
Traditional building	GWP	t-CO ₂ eq.	0.412	0.019	0.026	2.824	3.282
	ODP	g-CFC-11 eq.	0.011	0.000	0.000	0.006	0.017
	AP	kg-SO ₂ eq.	3.339	0.114	0.155	20.071	23.680
	EP	kg-PO ₄ ³⁻ eq.	0.563	0.012	0.016	2.536	3.128

으로 나타났다. 산성화지수와 부영양화지수 역시 친환경 인증 초등학교 건축물의 결과(26.948kg-SO₂ eq.와 3.505kg-PO₄³⁻ eq.)가 일반 초등학교 건축물의 결과(23.680kg-SO₂ eq.와 3.128kg-PO₄³⁻ eq.)에 비해 각각 12.1%, 10.8% 높게 도출되었다. 오존층파괴지수는 친환경 인증 초등학교 건축물(0.012g-CFC-11 eq.)이 일반 초등학교 건축물(0.017g-CFC-11 eq.)에 비해 41.5% 높게 도출되었다.

Table 5와 같이, 단위 사용자와 단위 학급에 따른 환경영향 역시 이와 유사하게 나타났다. 단위 사용자 측면에서, 친환경 인증 초등학교 건축물의 지구온난화지수, 산성화지수, 부영양화지수는 일반 초등학교 건축물에 비해 각각 8.1%, 7.7%, 6.3%까지 크게 나타났고, 오존층파괴지수는 48.7% 작게 나타났다. 단위 학급 측면에서는, 친환경 인증 초등학교 건축물의 지구온난화지수, 산성화지수, 부영양화지수가 일반 초등학교 건축물에 비해 각각 9.6%, 9.2%, 7.8%까지 크게 나타났고, 오존층파괴지수는 46.2% 작게 나타났다.

Table 5. The environmental impact per head and chamber of different buildings

	Impact category	Unit	Intensity (uni/head)	Intensity (uni/chamber)
Traditional building	GWP	t-CO ₂ eq.	32.270	1,049.790
	ODP	g-CFC-11 eq.	0.169	5.508
	AP	kg-SO ₂ eq.	232.839	7,574.550
	EP	kg-PO ₄ ³⁻ eq.	30.755	1,000.488
Green building	GWP	t-CO ₂ eq.	35.109	1,161.570
	ODP	g-CFC-11 eq.	0.114	3.768
	AP	kg-SO ₂ eq.	252.237	8,345.279
	EP	kg-PO ₄ ³⁻ eq.	32.807	1,085.413
Difference	GWP	%	8.1	9.6
	ODP	%	-48.7	-46.2
	AP	%	7.7	9.2
	EP	%	6.3	7.8

일반적으로 친환경 건축물은 초기단계의 투입물은 높고, 운영단계에서의 에너지 사용량은 낮다는 특징을 가진다. 이로 인하여 초기단계의 환경영향은 크게 나타나지만 운영단계에서의 환경영향이 작아져 생애주기 동안의 환경영향은 저감된다고 알려져 왔다. 그러나, 본 연구의 결과는 이러한 일반적인 인식과는 상반되는 결과를 보여주었다. 물론, 건축물 운영단계에서의 에너지 사용량은 사용자의 특성과 주변 기후 조건 등의 다양한 요소에 의해 영향을 받는다. 그럼에도 불구하고 친환경 인증 건축물의 환경영향이 일반 건축물에 비해 높게 제시되었다는 사실은 친환경 건축물 인증제도가 건축물로부터 발생하는 환경영향의 감축을 보장하지는 못한다는 사실을 보여주기 충분하다.

5. 결론

본 연구에서는 친환경 인증 건축물에 대한 환경영향 저감 효과를 파악하기 위하여, LCA 방법론을 이용하여 친환경 인증 초등학교 건축물과 일반 초등학교 건축물의 환경영향을 평가하고, 결과를 비교하였다.

4가지 환경영향 범주에 따른 평가결과를 비교한 결과, 기존의 일반적 인식과는 달리, 일반 초등학교 건축물에 비해 친환경 인증 초등학교 건축물로부터 보다 많은 환경영향이 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 친환경 인증 초등학교 건축물의 운영을 위해 사용된 단위 연면적당 전력량이 일반 초등학교에 비해 커, 친환경 인증 초등학교의 환경영향이 더욱 큰 것으로 나타났다. 이는 대한민국에서 사용되고 있는 친환경 건축물 인증제도인 G-SEED가 건축물로부터 발생하는 환경영향의 저감을 보장하지 못한 점을 의미한다. 따라서 친환경 건축물 인증제도를 통하여 건축물로부터 발생하는 환경영향을 감축하기 위해서는, 기존 친환경 건축물 인증제도에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

그러나, 본 연구에서는 단지 하나의 친환경 인증 초등학교 건축물과 일반 초등학교 건축물을 대상으로 환경영향 평가결과를 비교하였다. 두 초등학교 건축물이 모든 건축물을 대표하는 것은 아니기 때문에, 평가결과를 일반화하기에는 문제가 있다. 따라서 향후 연구에서는 추가적인 초등학교 건축물을 비교 분석이 수행되어야 할 것이다. 또한, 초등학교 건축물과 함께, 공동주택 등의 다양한 건축물에 대한 평가 및 비교가 수행될 필요가 있다. 이를 통한다면, 기존 친환경 건축물 인증에 따른 환경영향의 절감 여부를 파악하는 것이 가능하고, 도출된 결과에 대한 신뢰성 역시 향상시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (과제번호:NRF-2012R1A2A1A01004376).

References

- Baek, C., Tae, S., Roh, S., Lee, J., and Shin, S. (2011). "A Study on the Requisite Elements of LCCO₂ Evaluation System at Planning Stage of Building," *Korean journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 12(3), pp. 31-41.
- Bare, J.C., Norris G.A., Pennington D.W., and Mckone T. (2003). "TRACI: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts." *J. Ind. Ecol.*, 6(3), pp. 49-78.
- Construction Association of Korea (CAK). (2011). *General Information for Construction*. Construction Association of Korea, Seoul, South Korea.
- Environmental Protection Agency (EPA) (2005). *Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP 2003 methodology*. EPA, Danish Ministry of the Environment. p. 43.
- Guinee, J.B., Gorree, M., Heijung, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A., Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., Bruijn, H. Duin R., Huijbregts, M.A.J., (2001). *Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards. final report part 2A*. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM) and Centre of Environmental Science-Leiden University (CML). pp. 65-66.
- Hauschild, M. and Wenzel H. (1998). *Environmental assessment of products: scientific background volume2*. 1st ed, Chapman & Hall, London.
- Heijungs, R., Guinee, J., Huppes G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes H.A., Wegener Sleeswijk A., Ansems A.M.M., Eggle, P.G., Duin R., Goede, H.P. (1992). *Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds*. CML, Leiden University, Leiden.
- Hong, T., Ji, C., and Jang, M. (2012a). "An analysis on CO₂ emission of structural steel materials by strength using Input-Output LCA." *Korean journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 13(4), pp. 131-139.
- Hong T, Ji C, Jang M, Park H. (2012b). "Integrated Model for Assessing the Cost and CO₂ Emission (IMACC) for Sustainable Structural Design in Ready-Mix Concrete." *J. Environ. Manage.*, 103. pp. 1-8.
- Hong, T., Ji, C., and Jeong, K. (2012c). "Environmental Impact Assessment of Buildings based on Life Cycle Assessment (LCA) Methodology." *Korean journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 13(5), pp. 85-94.
- Hong T., Koo C., and Park S. (2012d). "A decision support model for improving a multi-family housing complex based on CO₂ emission from gas energy consumption." *Build. Environ.*, 52(6), pp. 142~151.
- Hong T., Kim H., and Kwak T. (2012e). "Energy Saving Techniques for Reducing CO₂ Emission in Elementary Schools." *J. Manage. Eng.*, 28(1), pp. 1-12.
- Hong, T., Ji, C., Jang, M., Park, H. (2013). "Assessment Model for Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions during the Construction Phase." scheduled for publication in *J. Manage. Eng.*

- IPCC Working Group (2007). *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- ISO 14040 (2006). *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*. International Organization for Standardization.
- Kim, Y.D., Cha, H.S., Kim, K.R., and Shin, D.W. (2011). "Evaluation Method of Green Construction Technologies Using Integrated LCC and LCA Analysis." *Korean journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 12(3), pp. 91-100.
- Korea Institute of Construction Technology (KICT). (2004). *The Environmental Load Unit Composition and Program Development for LCA of Building - The Construction of Method with LCA for Estimating Environmental Building*. Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning, South Korea.
- Lee, K.H., Kim, N.G., and Rhee, E.K. (2003). "A Study on the Evaluation Method of Green Remodeling Considering LCA and LCC." *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 23(1), pp. 57-67.
- Lee, K.H. and Yang, J.H. (2009). "A Study on the Functional Unit Estimation of Energy Consumption and Carbon Dioxide Emission in the Construction Materials." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 25(6), pp. 43-50.
- Ministry of Education, Science and Technology (MEST), (2010). *Statistical Yearbook of Education*. Ministry of Education, Science and Technology, South Korea.
- Pennington DW, Potting J, Finnveden G, Lindeijer E, Joliet O, Rydberg T (2004). "Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice." *Environment International*, 30(5), pp. 721-739.
- Tae S., Shin S., Woo J., Roh S. (2011). "The development of apartment house life cycle CO2 simple assessment system using standard apartment houses of South Korea." *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 15(3), pp. 1454-1467.
- Trusty W. (2006). *Integrating LCA into LEED - Working group A Interim Report #1*. US Green Building Council, p. 11.
- Wang M.Q. (1999). *GREET 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.
- World Meteorological Organization (WMO) (2006). *Scientific Assessment of Ozone Depletion:2006, Chapter 8* in: Daniel, J.S, Velders, G.J.M, and Coauthors, Halocarbon Scenarios, Ozone Depletion Potentials, and Global Warming Potentials, WMO Geneva.

요약: 본 연구는 국내에서 시행중인 친환경 건축물 인증제도 (G-SEED)에 따른 환경영향 저감 효과를 파악하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여, G-SEED 인증을 받은 초등학교 건축물과 인증을 받지 않은 일반 초등학교 건축물을 대상으로, 전과정평가 방법론을 이용하여 4가지 환경영향범주 (지구온난화, 오존층파괴, 산성화, 부영양화)에 따른 환경영향을 평가하고, 결과를 비교하였다. 건축물에 대한 환경영향평가는 자재생산, 자재운송, 시공, 운영단계를 포함하였으며, 운영기간은 40년으로 설정하였다. 두 건축물의 단위면적당 환경영향을 비교한 결과, 일반 초등학교 건축물에 비해 친환경 인증 초등학교 건축물의 환경영향이 큰 것으로 나타났다. 예를 들어, 친환경 인증 초등학교 건축물의 지구온난화지수는 3.751 t-CO₂ eq./m²로 산출된 반면, 일반 초등학교 건축물의 지구온난화지수는 3.282 t-CO₂ eq./m²로 산출되어, 약 12.5% 크게 나타났다. 이는 G-SEED 인증이 4가지 측면에서의 환경영향의 저감을 보장하지 못한다는 것을 의미한다. 따라서 건축물로부터 발생하는 환경영향의 저감을 달성하기 위해서는 G-SEED에 대한 보완이 필요하다.

키워드 : 전과정평가, 환경영향, 친환경 건축물, 일반 건축물, 초등학교 건축물
