

전과정평가(LCA) 방법을 이용한 건축물에 대한 환경영향 평가 방법

Environmental Impact Assessment of Buildings based on Life Cycle Assessment (LCA) Methodology

홍 태 훈*
Hong, Tae-Hoon

지 창 윤**
Ji, Chang-Yoon

정 광 복***
Jeong, Kwang-Bok

Abstract

Most of the studies on reduction of buildings' environmental burden in the construction industry have been focused on carbon dioxide emission, although there are various kinds of environmental issues such as global warming, acidification, and etc. which are considered by many researchers. Therefore, this study defined and suggested six impact categories and the principles to assess each impact for the assessment of comprehensive environmental impacts of buildings. The six impact categories are abiotic depletion, global warming, ozone layer depletion, acidification, eutrophication, and photochemical oxidation. A case study has been conducted through comparative analysis of two structural design alternatives to confirm the necessity of assessing the six impact categories. That is, the results of global warming potential and the six impacts proposed in this study were compared. By comparing the results of only global warming potential, the second design alternative using 24MPa concrete was chosen as a better alternative, while the first design alternative using 21MPa concrete was resulted as a better alternative when six impact categories were considered. The results mean that the assessment of various environmental impacts is an appropriate and reasonable approach and the comprehensive assessment offers more reliable results of environmental impacts in the building construction.

Keywords : *Life Cycle Impact Assessment (LCIA), Life Cycle Assessment (LCA), Environmental Impact Category, Global Warming*

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

환경문제에 대한 인식이 확산됨에 따라, 인간 활동에 의해 발생하는 환경영향을 줄이고자 하는 노력이 점점 확대되고 있다.

특히, 2005년 발효된 교토의정서에서는 지구온난화의 주범으로 이산화탄소(CO₂)를 규정하고, 이에 대한 감축을 위해 노력할 것을 합의하였다. 대한민국은 Non-Annex I에 포함되어 감축의무를 부담하고 있지 않지만, Post-교토체제에서는 Annex I 국가로 분류되어 CO₂ 배출의 감축을 부담해야하는 대상국으로 관리될 가능성이 높다(UNFCCC 1997). 이에 따라, 대한민국 정부

* 중신회원, 연세대학교 건축공학과 부교수, 공학박사(교신저자), hong7@yonsei.ac.kr

** 일반회원, 연세대학교 대학원 건축공학과 박사과정, changyoon@yonsei.ac.kr

*** 일반회원, 연세대학교 대학원 건축공학과 석사과정, kbjeong7@yonsei.ac.kr

는 CO₂ 배출량을 줄이기 위하여 “저탄소 녹색성장”이라는 정책 목표를 제시하고, 2020년까지 탄소배출량을 BAU 대비 30%, 특히 건축부문에서는 26.9%의 감축을 목표로 정책을 추진하고 있다(녹색성장위원회, 2011). 이러한 정책방향과 함께, 건축물로 인한 CO₂ 배출량을 줄이고자 하는 많은 연구가 수행되어 왔다(김윤덕 외 3인 2011, 신재균 외 2인 2009, 이관호 외 2인 2003, 홍태훈 외 2인 2012, Hong et al. 2012a, Hong et al. 2012b, Hong et al. 2012c, Hong et al. 2012d, Hong et al. 2012e).

하지만, 지구온난화의 주요 요인으로는 CO₂ 외에 다양한 배출가스(CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆ 등)들이 더 존재한다(UNFCCC 1997). 또한, 지구온난화뿐만 아니라 중요하게 여겨지는 다양한 환경오염 문제들이 존재한다. 예를 들어, 오존층 파괴는 1989년에 발효된 “오존층 파괴 물질에 관한 몬트리올 의정서”를 통해, 오존층 파괴 물질인 염화불화탄소(CFCs)의 생산과 사용의 규제를 명시하고 있을 만큼, 지구온난화보다 이전 시점부터 중요한 환경문제로 여겨져 왔다(UN, 1987). 그리고 산성화에 영향을 주는 요인으로 알려진 SO₂나 NO_x는 인체 건강에 영향을 주는 요인으로 명시되어, 대기환경 관리 대상으로 규정하고 있다(AirKorea 2012).

이처럼 다양한 환경문제를 야기하는 환경영향 물질들이 존재하는데도 불구하고, 국내에서 수행된 대부분의 연구에서는 CO₂만을 연구 대상으로 한정하고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 지구온난화 영향요인인 CO₂뿐만 아니라, 건축물로 인한 다양한 환경영향을 평가할 수 있는 방법을 제시하고, 이에 대한 타당성을 검토하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 건축물로 인해 발생하는 다양한 환경영향을 정의하고 이에 대한 평가방법을 제시하는 것을 목적으로 한다. 또한, 사례분석을 통해, 본 연구를 통해 제시된 방법을 이용하여 환경영향을 평가하는 것의 필요성을 검토하고자 하며, 이를 위해, 다음과 같은 절차를 통해 연구를 진행하였다.

(1) 먼저, 전과정평가(Life Cycle Assessment; 이하 LCA) 방법론을 이용하여 건축물에 대한 환경영향평가를 수행한 기존 연구를 검토하고, 기존 연구의 한계 및 본 연구의 목표를 정의하였다.

(2) 다양한 전과정 영향평가(Life Cycle Impact Assessment; 이하 LCIA) 방법론에 대한 검토를 통해, CO₂ 외에 추가적으로 고려해야 하는 환경영향을 정의하고, 정의된 환경영향을 평가할 수 있는 기준을 제시하였다.

(3) 제시된 환경영향 평가방법 적용의 타당성을 검토하기 위하

여, 건축 구조 설계안을 대상으로 사례분석을 시행하였다. 건축물 구조부분은 사용 및 운영단계에서 추가적인 환경영향이 거의 발생하지 않으므로, 분석의 범위를 시공단계로 한정하였으며, Hong et al. (2012)에서 제시한 것과 같이 시공단계를 자재생산 단계, 운송단계, 현장시공단계로 구분하여 분석을 진행하였다.

2. 기존연구 고찰

2.1 기존연구 고찰

1990년 이후 국내외에서 건축물의 전생애주기 동안 발생하는 환경성을 평가하는 것을 목적으로 하는 다양한 연구들이 수행되어왔다.

김윤덕 외 3인(2011)은 친환경 기술의 가치평가를 위한 LCC-LCA 통합 경제성 분석 방법을 제시하였다. 특히 AHP 기법을 이용하여 환경성 평가항목 별 가중치를 산정하여, 친환경 기술 별 우선순위를 결정하는 방법을 제시하였으나, 친환경 기술의 선정을 위한 평가항목으로서 CO₂ 발생량만을 고려하였다. 이관호 외 2인(2003)은 LCA와 LCC 방법론을 이용하여 건축물의 경제성과 환경성을 동시에 고려한 리모델링 평가모형을 제시하였다. 환경성에 대한 평가를 위하여 에너지 사용량, CO₂ 배출량, 폐기물 발생량을 평가하였지만, 분석과정에서 다양한 자재 및 대체 에너지원에 대한 데이터의 부족으로 인해, 제시된 평가모형은 이에 대해 충분히 반영하지 못하였다. 신재균 외 2인(2009)은 노후 건축물의 재건축 여부를 결정하는데 있어 건축물 생애주기 동안의 CO₂ 발생량에 대한 평가결과를 활용하였고, 정영선 외 2인(2003)은 샘플 건축물 대비 장수명화 및 에너지효율화 건축물에 대한 LCC 및 LCA 분석을 수행하여, 그 효용성을 제시하였다.

이와 같이 건축물을 대상으로 하여 환경성을 평가하는 다양한 연구들이 수행되어 왔지만, 앞서 언급한 바와 같이 대부분의 연

표 1. 환경부하 평가에 관한 선행연구

연구자	주요내용	한계점
김윤덕 외 3인 (2011)	- LCA-LCC 통합 경제성 분석 모델로서 AHP를 이용하여 평가항목 별 가중치 산정하고 평가에 적용	평가요소로 이산화탄소 발생량만 고려
이관호 외 2인 (2003)	- LCA 및 LCC분석 결과를 고려한 리모델링 평가모형의 효용성 확인 - 에너지, 폐기물, CO ₂ 배출량 고려	건축자재 및 대체에너지 DB 부족
신재균 외 2인 (2009)	- 노후 건축물의 단열성능 저하 등의 원인으로 인한 이산화탄소 배출량을 평가하여 재건축 의사결정에 적용하는 방안 연구	유지관리비용 산정과정의 데이터 부족
정영선 외 2인 (2003)	- 샘플 건축물(수명 25년) 대비 장수명 건축물의 LCA 및 LCC 분석	장수명화 및 에너지효율화에 대한 가정한 내용을 바탕으로 분석수행

구들은 건축물로 인한 CO₂ 발생량만을 환경부하 평가범위로 한정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 CO₂뿐만 아니라, 건축물로 인해 발생하는 모든 오염물질들을 포함하는 환경영향 평가방법을 제안하고자 한다.

2.2 전과정평가(LCA)

LCA는 제품 또는 시스템의 생애주기 동안에 필연적으로 발생하는 환경부하 물질을 규명하고, 이러한 환경부하 물질들로 인한 환경영향을 평가하여, 이를 저감·개선하고자 하는 기법이다. 이러한 LCA는 ISO 14000 시리즈를 근간으로 하고 있으며(ISO 14040, 1997), 환경성 평가를 위한 주요수단으로 사용되어 대표적인 의사결정 도구 중의 하나로 활용되고 있다. 이러한 LCA 방법론은 건축물의 생애주기 동안에 발생하는 투입물과 산출물로 인한 환경영향을 종합적으로 평가하는 데에도 활용될 수 있다(Crawford, R. 2011).

ISO 14000 시리즈에서는 LCA의 수행을 위한 주요 프로세스를 그림 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 구분하고 있다.

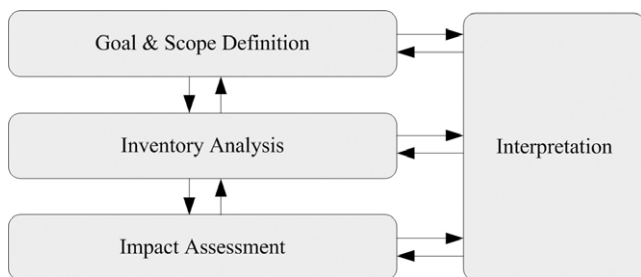


그림 1. ISO 14040의 전과정평가(LCA) 프로세스

목적 및 범위 정의 단계에서는 어떠한 대상을 평가할 것인지, 평가대상에 대해 어떠한 환경영향을 평가할 것인지 등의 문제를 평가의 목적에 따라 정의한다. 만족스러운 평가 결과를 얻기 위해서는 평가 목적과 범위를 명확하게 설정하는 것이 중요하다.

전과정 목록분석은 LCA를 수행하는데 있어 가장 핵심적인 단계로서, 투입물과 산출물에 대한 데이터를 파악하는 단계이다. 예를 들어, 건축물을 건설하는 과정을 평가대상으로 한다면, 이 과정에서 투입되는 모든 원료물질과 배출되는 모든 물질들이 목록분석을 통해 파악된다. 즉, 목록분석은 투입물과 산출물을 분석의 결과로서 제시한다. 예를 들어, 기존 연구들에서 환경영향 평가의 결과로서 제시하는 CO₂와 같은 배출가스는

목록분석의 결과라고 할 수 있다.

세 번째 단계인 전과정 영향평가 단계에서는 목록분석을 통해 얻어진 데이터를 환경영향 범주에 따라 분류하여 제시하는 단계이다. 예를 들어, CO₂와 메탄(NH₄), 아산화질소(N₂O)는 지구온난화에 영향을 주는 요인들로 규정되어, 지구온난화 지수(global warming potential; GWP)로 제시될 수 있다. 이러한 전과정 영향평가는 분류화(Categorization), 특성화(Characterization), 가중화(Weighting)의 3단계로 구성된다.

마지막으로 해석 단계에서는 목록분석과 영향평가를 통해 도출된 결과를 개별적 점수 또는 종합적 결과로 평가·해석하여 제시하는 단계이다.

3. 건축물의 환경영향 평가를 위한 범주 정의

3.1 전과정 영향평가(LCIA) 방법론 검토

제품의 환경성능은 환경영향 평가범주나 평가기준에 따라 다른 결과가 도출될 수 있기 때문에, 평가 대상 및 목적에 따라 적절한 영향범주와 평가기준을 정의하는 것이 중요하다. 현재까지 많은 연구자에 의하여 다양한 LCIA 방법론이 개발되어 왔으며, 각 LCIA 방법론들은 개발한 연구자에 따라 다양한 환경영향 범주와 범주별 평가방법을 정의하고 있다.

LCIA 방법론은 크게 문제 지향 접근법(Problem-oriented approach)과 손실 지향 접근법(Damage-oriented approach)으로 구분된다. 문제 지향 접근법은 투입물이나 산출물에 의한 환경문제를 중심으로 환경영향을 분류하는 방법론으로서, 지구온난화나 산성화, 부영양화 등의 문제를 규정한다. 반면, 손실 지향 접근법은 환경부하로 인해 야기되는 최종적인 피해에 집중한다. 예를 들어, 인체피해나 생태계 파괴 등이 손실 지향 접근법의 환경영향 범주에 포함된다고 할 수 있다.

이러한 두 가지 LCIA 방법론은 방법론적 특성의 차이로 인해 각기 다른 장단점을 가진다. 문제 지향 접근법은 일반적으로 모든 환경영향을 포함하는 반면, 평가결과를 쉽게 이해하기 어렵다는 단점이 있다. 이와 반대로, 손실 지향 접근법은 평가결과를 이해하는데 용이하다는 장점을 가진 반면, 환경영향으로 인한 모든 손실을 포함한다고 단정할 수 없다는 단점이 있다(Bare, J. et al., 2000). 이에 따라, 본 연구에서는 보다 객관적인 결과의 제시가 가능한 문제 지향 접근법을 바탕으로 환경영향 평가를 위한 범주를 정의하고자 하였다. 이를 위해, 먼저 4가지의 LCIA 방법론을 검토하였다.

먼저, Center of Environmental Science of Leiden University (CML)를 중심으로 하는 과학자 그룹은 환경영향 평

가를 위한 범주화와 특성화 방법인 CML 2001을 제시하였다 (Goedkoop et al, 2008). CML 2001은 일반적으로 잘 알려진 메카니즘에 따라 환경영향 범주를 구분하여 제시한다(Guinee et al, 2002). 두 번째로, EDIP(Environmental Design of Industrial Products) 2003은 덴마크 Technical University의 IPU(Institute for Production Development)에 의해 개발된 LCIA 방법론으로, 지구온난화와 오존층파괴라는 전지구적 환경영향 뿐만 아니라 산성화, 부영양화와 같은 지역적 특성에 영향을 받는 다양한 종류의 지역적 환경영향(Non-global impacts)을 제시한다. 그리고 지역적 환경영향 범주들에 대해서는 유럽 전역에서 포괄적으로 적용할 수 있는 지수와 함께, 유럽 지역의 국가별로 구분된 지수를 제시하고 있다(Hauschild, M. and Potting, J. 2004). 그리고 TRACI(The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts)는 U.S. Environmental Protection Agency (EPA)에 의해 개발된 LCIA 방법론으로, 사회적으로 널리 인정되는 근거를 바탕으로 다양한 환경영향범주에 대한 특성화 지수를 제시하고 있다. 산성화, 스모그 형성, 부영양화, 인체영향 등에 대한 특성화 지수는 US 지역의 환경조건을 바탕으로 개발되었으며, 특히 인체건강에 대한 영향을 다양한 범주로 구분하여 자세히 제시할 수 있도록 하였다(Bare et al, 2003). 마지막으로, 환경성적표지제도는 국제 표준화 규격 (ISO 14020s) 중의 하나인 Type III Environmental Declaration ISO/TR 14025로서, LCA 방법론을 바탕으로 환경 친화성을 계량화하여 객관적인 환경성 정보를 전달하도록 하는 제도이다(한국환경산업기술원, 2012). 환경성적표지제도는 미국, 일본, 캐나다, 스웨덴 등에서 활발하게 시행되고 있으며, 대한민국에서는 '환경기술개발 및 지원에 관한 법률'을 통해 2001년부터 시행되고 있다.

이처럼 4가지 LCIA 방법론에서 각각 정의하는 환경영향 범주는 표 2에 나타난 것과 같다.

표 2. LCIA 방법론에 따른 환경영향 범주

LCIA 방법론	환경영향범주
CML 2001	Abiotic depletion, Global warming, Ozone layer depletion, Acidification, Eutrophication, Photochemical oxidation, Freshwater aquatic ecotoxicity, Marine aquatic ecotoxicity, Human toxicity, Terrestrial ecotoxicity
EDIP 2003	Global warming, Stratospheric ozone depletion, Acidification, Terrestrial eutrophication, Aquatic Eutrophication, Photochemical ozone formation, Human toxicity, Ecotoxicity
TRACI	Global warming, Ozone layer depletion, Smog formation, Acidification, Eutrophication, Human health cancer, Human health noncancer, Human health criteria pollutants, Eco-toxicity, Fossil fuel depletion, Land use, Water use
환경성적 표지제도	Abiotic depletion, Global warming, Ozone layer depletion, Acidification, Eutrophication, Photochemical oxidation

3.2 건축물의 환경영향 평가 범주

4가지 LCIA 방법론에 대한 분석을 통해, 6가지의 환경영향을 건축물의 환경성을 평가하기 위한 영향범주로 정의하였다. 정의된 6가지 환경영향 범주에 대한 구체적인 설명은 아래에 서술되며, 표 10은 각 환경영향 범주별 기준 물질 및 평가 기준을 보여준다.

3.2.1 지구온난화 (Global Warming Potential; GWP)

교토의정서에서는 지구온난화를 전 세계의 모든 국가가 동시에 관심을 가져야하는 문제로 제시하고, 이에 대한 해결을 촉구하였다. 이에 따라, 많은 국가에서 지구온난화에 영향을 주는 CO₂ 배출량을 저감하고자 노력하고 있다. 대한민국의 녹색성장 지향정책은 모두 CO₂ 배출량 저감을 목표로 하고 있으며, 이에 따라 지구온난화는 반드시 고려되어야 하는 범주에 포함되어야 한다. 한편, IPCC (2007)에서는 CO₂와 함께 CH₄, N₂O, 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆) 등의 배출가스를 지구온난화 유발 물질로 정의하고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 IPCC 2007의 기준에 따라, 정의된 배출가스를 모두 포함하는 지구온난화 지수(global warming potential; 이하 GWP)를 고려하여 지구온난화 문제에 대한 평가 결과를 제시하고자 하고자 한다.

표 3. 지구온난화 지수의 예 (IPCC 2007)

Emissions	Global Warming Potential
Carbon dioxide(CO ₂)	1
Methane(CH ₄)	25
Nitrous oxide(N ₂ O)	298
CFC-11	4,750
CFC-13	14,400
Halon-1301	7,140
HCFC-22	1,810

3.2.2 온존층 파괴 (Ozone Layer Depletion Potential; ODP)

오존층 파괴문제는 지구온난화보다 이전에 전지구적 문제로 제기되었다. 1989년 정식 발효된 '몬트리올 의정서'에서는 오존층을 파괴시키는 물질에 대한 생산 및 사용을 규제하고 있으며, 대한민국 역시 1992년부터 협약 가입국이 되었다. 이에 따라, 오존층파괴도 반드시 중요하게 고려되어야 하는 환경영향이라 할 수 있다. 앞서 살펴본 4가지 LCIA 방법론들은 오존층 파괴 지수 (ozone depletion potential; 이하 ODP)를 산출하는 기준으로 World Meteorological Organization (WMO) (2006)에서 제시한 기준을 사용한다. 이에 따라, 본 연구에서도 WMO (2006)의 기준을 사용하여 ODP를 산출하고자 한다.

표 4. 오존층파괴 지수의 예 (WMO 2006)

Emissions	Ozone Depletion Potential
CFC-11	1
CFC-114	0.85
CFC-12	0.82
Halon-1301	12
HCFC-22	0.034
Methyl Chloride	0.02

3.2.3 자원고갈 (Abiotic Depletion Potential; ADP)

지구의 자원은 한정적이기 때문에, 한정된 자원을 효율적으로 사용하는 것은 지구적으로 매우 중요한 일이다. CML 2001이나 TRACI, 환경성적표지제도에서는 자원고갈을 중요 환경영향으로 정의하고 있다. 특히 대부분의 자원을 수입에 의존하고 있는 대한민국은 자원고갈에 대한 세계적 인식변화에 민감하게 반응한다고 할 수 있다. 또한, 국내에서 발생하는 폐기물의 약 50%를 건설폐기물이 차지하는 만큼(한국환경공단 2011), 건설산업은 자원고갈 문제에 중요한 영향을 준다고 할 수 있다. 따라서 건축물에 대한 환경영향 평가범위에 자원고갈은 포함되는 것이 타당하며, 자원고갈 지수(abiotic depletion potential; 이하 ADP)로는 Guinee et al. (2001)이 제시한 기준이 사용될 수 있다.

표 5. 자원고갈 지수의 예 (Guinee et al.2001)

Resources	Abiotic Depletion Potential
Crude oil	0.0201
Hard coal	0.0134
Soft coal	0.00671
Natural gas	0.0187
Lead ore	0.000677
Lead(Pb)	0.01352
Uranium(U)	0.002868

3.2.4 산성화 (Acidification Potential; AP)

산성화는 거주 건강 및 제품의 유지관리에 영향을 주는 환경 문제이다. 대부분의 국가에서 SO₂와 NO_x는 산성화를 야기하는 물질의 95% 이상을 차지하는 것으로 드러났으며(EPA, 2005), 대한민국에서 시/도별로 발표하는 통합대기환경지수에서도 SO₂와 NO₂는 관리대상으로 명시하고 있을 만큼, 중요 대기환경 오염물질로 관리되고 있다(AirKorea, 2012). 일반적으로 산성화는 오염물질의 특성과 배출지역의 대기 환경에 따라 달라지지만, CML 2001에서는 포괄적으로 적용이 가능한 산성화 지수(acidification potential; 이하 AP)를 제시하고 있다(Hauschild & Wenzel 1998). 이에 따라, 본 연구에서는 건축물의 환경영향 범주에 산성화를 포함하고, 이를 평가하는데, CML 2001의 AP를 적용하였다.

표 6. 산성화 지수의 예 (Hauschild & Wenzel 1998)

Emissions	Acidification Potential
Sulfur dioxide(SO ₂)	1
Ammonia(NH ₃)	1.88
Hydrogen chloride(HCl)	0.88
Hydrogen fluoride(HF)	1.6
Hydrogen sulfide(H ₂ S)	1.88
Nitric acid(HNO ₃)	0.51
Nitrogen oxides(NO _x)	0.7

3.2.5 부영양화 (Eutrophication Potential; EP)

부영양화는 화학 비료나 오수의 유입 등으로 영양분이 과잉 공급되어 수생 식물의 급속한 성장을 유발하여 최종적으로 대량 증식하게 되는 현상을 말한다. 이러한 부영양화 현상은 수생식물의 비정상적 증식으로 끝나는 것이 아니라, 혐기성 세균에 의한 악취와 독성물질로 인해 해당 수역은 급수원으로서의 이용가치도 거의 상실하게 된다. 건축물의 생산과정에서는 부영양화를 유발하는 물질이 직접적으로 발생하지는 않지만, 건축 자재의 생산과정에서 간접적인 영향이 발생할 수 있다. 또한, 하천 및 해안 연안의 건축 과정에서는 다양한 물질들의 배출로 인하여 부영양화를 유발할 수 있다. AP와 마찬가지로, CML 2001은 포괄적으로 적용될 수 있는 부영양화 지수(eutrophication potential; 이하 EP)를 제시하였다(Heigungs et al.1992). 이에 따라, 본 연구에서는 CML 2001의 기준을 사용하여 건축물의 EP를 산출하고자 하였다.

표 7. 부영양화 지수의 예 (Heigungs et al.1992)

Emissions	Eutrophication Potential
Phosphate(PO ₄ ³⁻)	1
Ammonia(NH ₃)	0.35
COD	0.022
Nitrate(NO ₃ ⁻)	0.1
Nitric acid(HNO ₃)	0.1
Nitrogen oxides(NO _x)	0.13
Nitrogen(N ₂)	0.42

3.2.6 광화학산화 (Photochemical Oxidation Potential; POCP)

광화학산화는 공기중의 오염물질이 태양빛과 반응하여 오존(O₃)과 같은 화학적 화합물을 생성하는 반응을 가리키며, 광화학산화 반응을 통해 만들어진 화합물들은 인체건강 및 농작물 발육과 같은 생태계에 손실을 야기한다(Guinee et al., 2001). 건축물을 생산하는 과정에서도 광화학산화에 영향을 주는 다량의 물질들이 배출되기 때문에, 광화학산화도 평가범위에 포함하는 것이 타당하다. 그리고 Derwent et al. (1998)과 Jenkin & Hayman (1999)가 제시한 광화학산화 지수(photochemical oxidation potential; 이하 POCP)를 사용하여, 건축물의 POCP를 평가하는 것이 가능하다.

표 8. 광화학산화 지수의 예(Jenkin & Hayman 1999, Derwent et al.1998)

Emissions	Photochemical Oxidation Potential
NM VOC	1
Benzene	0.218
Carbon monoxide(CO)	0.027
Methane(CH ₄)	0.006
Methanol(CH ₃ OH)	0.14
Propene	1.123
Sulfur dioxide(SO ₂)	0.048

4. 사례분석

4.1 목적 및 범위 정의

본 연구에서는 앞서 선정된 6가지 환경영향 범주에 대한 통합적 평가의 필요성을 검토하기 위하여, 사례분석을 시행하였다. 본 연구에서는 사례분석을 위해 연면적 70,911m²의 철근 콘크리트 구조 빌딩을 선정하였으며, 선정된 건축물을 대상으로 레미콘 강도에 차이를 준 2개의 설계안을 평가하고 결과를 비교하였다. 즉, 표 9와 같이 21MPa의 레미콘을 사용하는 것으로 가정하여 설계된 비교 1안과 24MPa를 사용하는 비교 2안을 평가하고, 그 결과를 비교하였다. 또한, 기존 연구에서와 같이 CO₂만을 평가 범위로 한정했을 때의 결과와의 비교를 통해, 6가지 영향범주에 대한 평가의 필요성을 제시하고자 하였다.

표 9. 설계안에 따른 콘크리트 강도 및 물량

Design	Concrete Strength	Amount of Concrete
Alternative 1	21MPa	5,984m ³
Alternative 2	24MPa	5,703m ³

4.2 목록분석

앞서 언급한 것과 같이, 본 연구에서는 건축물 구조체를 자재 단계, 운송단계, 현장시공단계로 구분하여 목록분석을 시행하였

다. 먼저, 자재단계에 대한 목록분석은 수식 (1)과 같이, 사용된 자재의 LCI를 이용하여 분석할 수 있다. 지식경제부에서는 1m³의 레미콘을 생산하는 과정에서 투입 및 산출되는 모든 물질들을 명시하는 LCI DB를 구축하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 지식경제부에 의해 구축된 21MPa와 24MPa의 레미콘에 대한 LCI DB를 사용하여, 자재단계에 대한 목록분석을 시행하였다. 즉, 21MPa의 레미콘을 사용한 설계안 1에 대한 목록분석은 콘크리트 물량 5,784m³에 21MPa 레미콘의 LCI DB를 적용함으로써, 완료될 수 있다.

$$Substance_m = m_i \times LCI_i \tag{1}$$

Substance_m : 자재단계에서의 환경영향 유발 물질의 양

m_i: 강도 (i)의 레미콘 물량

LCI_i: 강도 (i) 레미콘의 인벤토리

운송단계와 시공단계에 대해서는 각 단계에서 사용된 장비들에 의해 소비된 연료량을 바탕으로 목록분석을 시행하였다. 즉, 운송과정에서는 콘크리트 믹서 트럭에 의해 소비되는 경유량(Q_T), 시공단계에서는 콘크리트 펌프카에 의해 소비되는 경유량(Q_P)을 산출하고, 산출된 결과에 경유의 생산 및 사용에 대한 LCI를 적용하여 최종 목록분석을 진행하였다. 먼저, 운송단계와 시공단계에서 소비되는 경유량은 아래의 수식 (2)와 (3)을 이용하여 산출할 수 있다. 콘크리트 믹서 트럭의 경우에는 콘크리트 믹서트럭의 용량(C) 및 연비(FE), 왕복 운송거리(2×D)를 고려함으로써, 경유 사용량을 산출할 수 있다. 콘크리트 펌프카에 의한 경유 사용량은 펌프카의 단위시간당 작업량(E)과 단위시간당 경유 소비량(FC)를 바탕으로 산출될 수 있다.

표 10. 환경영향 평가 범주

Impact Category	Reference Substance	Characterization model	General characterization factor equation
Global warming	kgeq-CO ₂	IPCC (2007)	$GWP(CO_{2eq}) = \sum_i (m_i \times GWP_i)$
Ozone layer depletion	kgeq-CFC-11	WMO (2006)	$ODP(CFC-11_{eq}) = \sum_i (m_i \times ODP_i)$
Abiotic depletion	1/year	Guinee et al. (2001)	$ADP(\log-CO_{2eq}) = \sum_i (m_i \times ADP_i)$
Acidification	kgeq-SO ₂	CML 2001, Hauschild & Wenzel (1998)	$AP(SO_{2eq}) = \sum_i (m_i \times AP_i)$
Eutrophication	kgeq-PO ₄ ³⁻	CML 2001, Heigungs et al.(1992)	$EP(PO_4^{3-}eq) = \sum_i (m_i \times EP_i)$
Photochemical Oxidation	kgeq-ethylene	Jenkin & Hayman (1999), Derwent et al.(1998)	$POCP(ethylene_{eq}) = \sum_i (m_i \times OPCEP_i)$

$$Q_T = 2 \left(\frac{m_i}{C} \times \frac{D}{FE} \right) \quad (2)$$

$$Q_p = \frac{m_i}{E} \times FC \quad (3)$$

$Q_{T,P}$: 운송 및 시공과정에서 사용되는 경유의 양

운송단계와 시공단계에서의 경우 사용량을 산출하기 위해 요구되는 각 장비별 기본정보는 표 11에 제시한 것과 같다. 콘크리트 믹서 트럭의 연료소비 정보 및 운송 거리는 채창우 외5 (2008)의 연구를 참고하였으며, 콘크리트 펌프카의 연료소비와 단위시간당 작업량은 표준품셈을 바탕으로 산출한 결과이다.

따라서 표 11을 이용하여 설계안 1과 2에 대한 운송 및 시공단계에서 요구되는 연료사용량을 산출하였다. 예를 들어, 설계안 1에 대한 운송단계와 시공단계에서의 경우사용량은 각각 10,501.92l ($2 \times (5,784 \div 6) \times (15 \div 2.85)$), 7,850.48l ($5,784 \times 41.85 \div 31.9$)로 산출되었다. 그리고 설계안 2에 대한 운송단계와 시공단계에서의 경우 사용량은 각각 10,008.77l와 7,481.84l이다.

표 11. 연료사용량 산출을 위한 기준

Contents	Value	Unit
펌프카 시간당 작업량 (E)	31.9	m ³ /hr EA
펌프카 시간당 연료소비량 (FC)	41.85	l/hr
콘크리트 운송 거리 (D)	15	km
콘크리트 믹서 트럭 용량 (C)	6	m ³ /EA
콘크리트 믹서 트럭 연비 (FE)	2.85	km/l

그리고 환경부에서는 경우 1ton의 생산과정에 대한 LCI를 구축하였으며, 오길중 외 8인(2008)은 경우 1ton을 사용하는 과정에서 배출되는 환경오염 물질에 대한 정보를 제시하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 경우에 대한 목록분석을 위하여, 환경부의

LCI와 오길중 외 8인의 연구에서 제시한 배출량 데이터를 사용하였다.

하지만, 환경부와 오길중 외 8에 의해 제시된 정보는 1ton의 경우를 기준으로 하기 때문에, 단위를 통일하는 작업이 요구된다. 경우 1l는 일반적으로 0.85kg으로 인식되기 때문에, 아래의 식 (4)-(5)와 같이 850으로 나누어줌으로써, 단위를 동일하게 하는 것이 가능하다.

$$Substance_T = (Q_T \times LCI_{dp} + Q_T \times LCI_{dc}) / 850 \quad (4)$$

$$Substance_{P,C} = (Q_p \times LCI_{dp} + Q_p \times LCI_{dc}) / 850 \quad (5)$$

$Substance_{T,P}$: 운송 및 시공단계에서 발생하는 환경오염물질

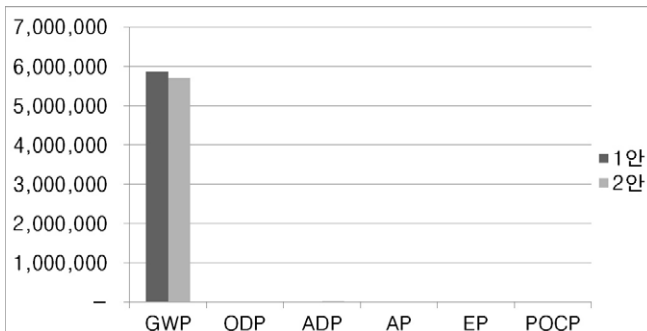
LCI_{dp} : 경우 생산과정에 대한 인벤토리

LCI_{dc} : 경우 사용과정에 대한 인벤토리

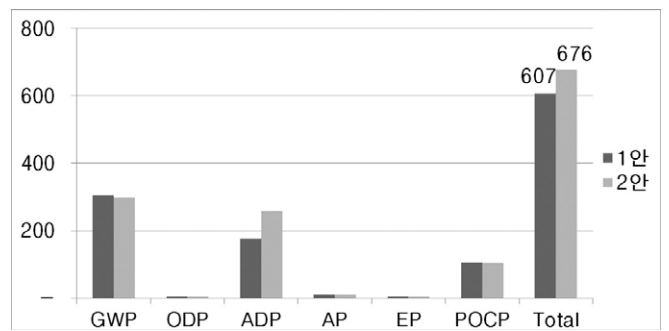
4.3 환경영향 평가

목록분석 결과에 앞서 표 3-8에 제시된 기준을 적용하여 도출된 전과정 영향평가 결과는 표 12와 같다. 즉, 설계안 1에 대한 분석결과, GWP (5,870,930kg-CO₂eq), ODP (0.6729kg-CFC-11eq), ADP (19,005/yr), AP (11,859kg-SO₂eq), EP (1,227kg-PO₄³⁻eq), POCP (16,873kg-ethyleneeq)의 결과가 도출되었으며, 설계안 2에 대한 6가지 환경영향 범주별 평가결과 역시 설계안 1과 유사하게 도출되었다. 설계 1안과 2안을 비교하면, ADP는 1안이 우수하고 GWP는 2안이 우수하다는 사실이 확인되었다. 그리고 ODP, AP, EP, POCP는 두 비교 안이 거의 차이가 없는 것으로 확인되었다.

CO₂로 대표되는 GWP만 고려했을 때의 결과와 6가지 환경영향을 모두 고려할때의 결과를 비교하기 위하여, 환경영향 범주별 가중화 지수를 적용하여 통합 지수를 산출하였다. 이를 위해, 표



(a) 영향범주별 환경부하량 (가중화 지수 미적용)



(b) 영향범주별 환경부하량 (가중화 지수 반영)

그림 2. 환경영향 평가 결과

13에 나타난 것과 같이 이시영 외 3 (2008)이 제시한 가중화 지수가 사용되었으며, 이를 적용한 평가결과는 그림 2와 같다. 그림 2의 (a)는 가중화 지수가 적용되지 않은 평가결과이며, 그림 2의 (b)는 가중화 지수가 적용된 결과이다. 그림 2의 (b)를 보면, 6가지 환경영향 범주 중에서 GWP와 ADP, POCP가 평가결과에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다. 또한, 가중화 지수를 적용한 설계 1안과 2안의 최종 점수는 각각 607과 676으로 산출되어, 비교 1안이 상대적으로 우수하다는 결론이 도출되었다. 반면, 앞서 언급한 것과 같이 기존 대부분의 연구에서와 같이 GWP만을 고려한다면, 비교 2안이 우수하다는 결과가 도출된다.

이는 고려되는 환경영향의 범주에 따라 다른 결과가 도출될 수 있음을 의미한다. 따라서 건축물의 환경성에 대한 보다 타당한 평가결과를 얻기 위하여, 다양한 환경영향에 대한 통합적 평가를 수행하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다. 즉, 건축물에 대한 환경성을 평가하는데 있어, GWP 뿐만 아니라 다양한 환경영향을 평가함으로써, 보다 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

표 12. 환경영향 평가 결과

구분		Impact Category					
		GWP	ODP	ADP	AP	EP	POCP
1안 (21MPa)	자재	5,796,120	0.6449	18,500	11,141	1,111	16,599
	운송	42,809	0.0161	289	411	66	157
	시공	32,001	0.012	216	307	50	117
	총합	5,870,930	0.6729	19,005	11,859	1,227	16,873
2안 (24MPa)	자재	5,652,274	0.6121	27,215	10,769	1,075	16,138
	운송	40,799	0.0153	275	391	63	150
	시공	30,498	0.0114	206	293	47	112
	총합	5,723,571	0.6388	27,696	11,453	1,185	16,400

표 13. 환경영향 범주별 가중화 지수

Impact category	Weighting factor	Impact category	Weighting factor
GWP	5.21E-05	AP	9.04E-04
ODP	7.17E+00	EP	2.90E-03
ADP	9.28E-03	POCP	6.31E-03

5. 결론

대부분의 기존 연구에서는 건축물에 대한 환경영향으로 CO2만을 평가대상으로 한정하지만, CO2뿐만 아니라 다양한 환경영향에 대한 평가가 요구된다. 이에 따라, 본 연구에서는 건축물로 인한 환경영향을 보다 포괄적으로 평가할 수 있는 방법을 제시하기 위하여, LCIA 관련 기존 연구에 대한 분석을 통해 다양한 환경영향 범주를 정의하였다. 즉, CO2로 대표되는 GWP 외에

ODP, ADP, AP, EP, POCP를 환경영향 범주로 정의하고, 6가지 환경영향 범주에 대한 평가기준들을 제시하였다.

그리고 본 연구에서 정의한 환경영향 범주에 대한 평가의 필요성을 검토하기 위하여, 하나의 건축물을 위해 설계된 2가지 비교안을 대상으로 사례분석을 시행하였다. 그 결과, CO2로 대표되는 GWP만을 평가범위로 한정할 경우와는 상이한 결과가 도출되었다. 즉, 2가지 설계안의 GWP만을 비교하면 2안이 우수한 것으로 판단되었지만, 6가지 영향범주 모두를 평가한 결과에서는 1안이 우수하다는 결과가 도출되었다. 이는 고려되는 환경영향의 범주에 따라 다른 결과가 도출될 수 있음을 의미한다. 따라서 건축물의 환경성에 대한 보다 완전한 평가를 위해서는 GWP 뿐만 아니라 다양한 환경영향을 포함하여 평가하는 것이 필요하며, 이는 보다 타당한 결과를 얻는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

하지만, 본 연구에서는 LCA에 일반적으로 포함되는 환경영향 범주만을 제시하였을 뿐, 건축물의 특성을 반영한 환경영향 범주는 제시하지 못하였다. 따라서 향후 연구에서는 본 연구에서 제시한 6가지 환경영향 범주뿐만 아니라, 건축산업의 특성을 반영할 수 있는 환경영향 범주가 추가로 제시되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업(11첨단도시G03)의 연구비 지원을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

김윤덕 · 차희성 · 김경래 · 신동우 (2011). “LCC-LCA 통합 분석에 의한 친환경 건설기술 평가방법”, 한국건설관리학회 논문집, 제12권 제3호, pp.91~100

녹색성장위원회 (2011). 2020년 저탄소 녹색사회 구현을 위한 로드맵, 부문별, 업종별, 연도별 온실가스 감축목표 확정, 보도자료

백정훈 · 태성호 · 노승준 · 이주호 · 신성우 (2011). “건축물 계획단계 LCCO2 평가시스템의 필요요소에 관한 연구”, 한국건설관리학회 논문집 제12권 제3호, pp.31~41

신재규 · 김유민 · 손장열 (2009). “CO2 배출량에 따른 노후 공동주택의 재건축 판단 방안 연구”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 계획계, 제29권 제1호, pp.661~664

염은숙 · 강혜진 · 박진철 · 이연구 (2008). “LCC분석법을 이용한 친환경 건축 요소기술의 경제성 평가방법에 관한 연구”,

- 대한건축학회 학술발표대회 논문집 제28권 제1호, pp.655~658
- 오길중 · 류지연 · 전태완 · 윤정인 · 정다위 · 정일록 · 임진홍 · 김남준 · 이병훈 (2008). 전과정평가기법을 이용한 생활폐기물 관리 지원시스템 개발(I)-수집 · 운반을 중심으로, 국립환경과학원, p.36
- 이강희 · 양재혁 (2009). “주요 건축자재의 에너지소비와 이산화탄소 배출원단위 산정 연구”, 대한건축학회논문집 계획계, 제25권 제6호, pp.43~50
- 이관호 · 김남규 · 이언구 (2003). “LCA 및 LCC를 고려한 환경친화적 리모델링의 평가방법에 관한 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, 제23권 제1호, pp.57~67
- 이시영 · 변순주 · 박상길 · 조규형 (2008). “전과정평가(LCA)를 이용한 공공시설물에서의 환경부하량에 따른 환경영향평가에 관한 연구-S댐 비상여수로 건설사업 사례연구”, 대한토목학회지, 제56권 제5호, pp.47~53
- 정영선 · 양관섭 · 이승연 (2003). “LCA 프로그램을 이용한 건축물의 환경부하 및 경제성 평가 사례”, 대한건축학회 학술발표논문집, 제23권 제1호, pp.749~752
- 채창우 · 이승연 · 이윤규 · 정영선 · 장대희 · 박은미 (2008). 건축자재 환경성정보 국가D/B 구축사업 최종보고서, 국토해양부, 한국건설교통기술평가원, pp.287~292
- 한국환경산업기술원. 환경성적표지제도 안내. http://www.edp.or.kr/edp/system/system_intro.asp. (2012.3.12)
- 환경부 · 한국환경공단, (2011). 2010 전국 폐기물 발생 및 처리 현황. pp.10~33
- 홍태훈 · 지창윤 · 장민호 (2012). “산업연관분석법을 이용한 강도에 따른 구조용 강재의 이산화탄소 배출량 데이터 구축.” 한국건설관리학회 논문집 제13권 제4호. pp.131~139
- AirKorea, 통합대기환경지수(CAI)의 개요. <http://www.airkorea.or.kr/> (2012.04.07)
- 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.” *Journal of Industrial Ecology* 6(3). pp.49~78
- Bare J.C., Hofsteter, P., Pennington D.W., Udo de Haes H.A., (2000) “Life Cycle Impact Assessment Workshop Summary Midpoints versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits.” *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(6). pp.319~326
- Crawford R., (2011). *Life Cycle Assessment in the Built Environment*. London, Taylor and Francis.
- Derwent, R.G., Jenkin M.E., Saunders, S.M., Piling, M.J., (1998) “Photochemical ozone creation potentials for organic compounds in Northwest Europe calculated with a master chemical mechanism.” *Atmospheric Environment*. 32(14-15) pp.2429-2441
- Environmental Protection Agency (EPA) (2005). *Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment-The EDIP 2003 methodology*. EPA, Danish Ministry of the Environment. p.43
- Goedkoop, M., Oele, M., Schryver, A.D., Vieira, M., (2008) *SimaPro Database Manual Methods Library*. Product ecology consultants. pp.9~12
- 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 Potting, J. (2004) “Spatial differentiation in life cycle assessment? the EDIP 2003 methodology.” *Guidelines from the Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen*
- 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, Jang M, Park H (2012a). “Integrated Model for Assessing the Cost and CO₂ Emission(IMACC) for Sustainable Structural Design in Ready-Mix Concrete.” *Journal of Environmental Management* 103. pp.1~8
- Hong T, Ji C, Jang M, Park H (2012b). “Predicting the CO₂ Emission of Concrete Using Statistical Analysis.” *Journal of Construction Engineering and Project*

Management, 2(2). pp.53~60

Hong T., Koo C., and Park S., (2012c). "A decision support model for improving a multi-family housing complex based on CO₂ emission from gas energy consumption." Building and Environment, 52(6), pp.142~151

Hong T., Kim J., and Koo C., (2012d). "LCC and LCCO₂ Analysis of Green Roofs in Elementary Schools with Energy Saving Measures." Energy and Buildings, 45(2), pp.229~239

Hong T., Kim H., and Kwak T., (2012e). "Energy Saving Techniques for Reducing CO₂ Emission in Elementary Schools." Journal of Management in Engineering, 28(1), pp.1~12.

ISO 14040 (1997). "Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework", International Organization for Standardization.

IPCC Working Group (2007). Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

UN (1997). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations, Kyoto

UN (1987). Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Montreal

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, 2006

논문제출일: 2012.07.03
논문심사일: 2012.07.06
심사완료일: 2012.08.03

요 약

환경문제에 대한 인식의 확산과 함께 건설산업에서도 건축물로 인한 환경영향을 저감하고자 하는 연구가 수행되었으나, 대부분의 연구는 이산화탄소에 집중되어 왔다. 하지만, 이산화탄소로 대표되는 지구온난화 뿐만 아니라 다양한 환경영향이 존재하며, 해외에서는 이러한 환경영향에 대한 포괄적인 분석이 적극적으로 시행되고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 건축물로 인한 환경영향을 보다 포괄적으로 평가할 수 있도록, 6가지의 환경영향 범주를 정의하였다. 즉, 지구온난화, 오존층파괴, 자원고갈, 산성화, 부영양화, 광화학산화를 환경영향 범주로 정의하고, 평가 기준들을 제시하였다. 그리고 본 연구에서 제시한 환경영향 범주에 대한 평가의 필요성을 검토하기 위하여 2가지 비교 설계안을 대상으로 사례분석을 시행한 결과, 지구온난화만을 평가한 것과는 상이한 결과가 도출되었다. 즉, 이산화탄소로 대표되는 지구온난화 지수를 기준으로 비교하면 2안이 우수한 것으로 판단되었지만, 6가지 영향범주 모두를 평가한 결과에서는 1안이 우수하다는 결과가 도출되었다. 이는 지구온난화 뿐만 아니라 다양한 환경영향을 포함하여 평가하는 것이 보다 타당한 결과 도출을 유도할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 건축물에 대한 환경영향을 평가하기 위하여, 본 연구에서 제시한 6가지 환경영향 범주를 사용한다면, 보다 타당한 결과의 도출이 가능할 것이라 판단된다.

키워드 : 전과정 영향평가, 전과정평가, 환경영향 범주, 지구온난화