

# 전과정평가기법에 의한 도로건설공사 환경부하량 평가 연구

문진석<sup>1</sup> · 주기범<sup>1</sup> · 서명배<sup>1</sup> · 강인석\*

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 ICT융합연구실

## Evaluation of Environmental Stress for Highway Construction Project by Life Cycle Assessment Method

Moon, Jinseok<sup>1</sup>, Ju, Kibeom<sup>1</sup>, Seo, MyoungBae<sup>1</sup>, Kang, Leenseok

<sup>1</sup>ICT Convergence and Integration Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and building Technology

**Abstract :** The global community demands the reduction of environmental pollution such as greenhouse gas and carbon dioxide emissions. According to these requirements, the road construction project in the highest energy consuming industry is required the efficient way of reducing environmental pollution emissions. In this study, during the whole life cycle process, an environment impact assessment was performed for the several road construction projects in order to evaluate environmental stress through the road construction process. This study provides a proper process of environment impact assessment for life cycle assessment (LCA) analysis of road construction project, and figures the environmental stress regarding to the major construction materials for the case projects. In addition, this study conducted a sensitivity analysis for the key materials of environmental stress through the quantity analysis of major materials for the 1km section of a road construction. By this sensitivity analysis of total environmental stress change from the different volumes of constructing materials, it would be useful information for the environment impact assessment for the future road construction project.

**Keywords :** Road construction project, Life cycle assessment(LCA), Sensitivity analysis, Characterization, Normalization

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

최근의 국제사회는 경제성장에 따른 기상이변의 방지를 위한 국가 간 기후변화협력 체결(1992년)을 시작으로 환경 오염물질 배출 저감을 요구하고 있다. 한국은 2009년 코펜하겐 기후회의에서 온실가스 배출량 30%감축을 약속했다. 그러나 이듬해인 2010년만 해도 국가 온실가스 배출량이 전년도보다 9.8% 증가하였고, 증가율도 17년 만에 최고치를 경신한 바 있다. 또한, 1990년 이후 온실가스 배출량 증가는 85.4%로 나타나 세계 최고의 증가세를 기록하고 있다. 이에 따라 한국은 2020년부터 온실가스 감축의무를 지게 될 가능성이 높다. 이와 같은 세계최고의 이산화탄소 배출량 증가세와 국

제사회의 의무대상국 가입 압박 등은 한국사회의 변화 및 사 전대비에 대한 필요성을 보여주는 중요한 사례이다. 이를 위해 이산화탄소를 직접적으로 배출하는 에너지 다소비 산업 가운데 GDP대비 투자율이 10% 이상인 건설사업에 대한 효율적인 환경오염물질 배출 저감 방안이 요구된다.

본 연구에서는 사회기반시설로서 중요한 역할을 하는 도로건설 사업이 환경에 미치는 정도를 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)방법으로 파악하여 환경오염물질 배출에 관한 자료를 제공하고자 한다. 이를 위하여 도로건설사업의 생애주기 중 시공단계에서 발생하는 환경부하량을 산출하고 다수의 공사에 대한 주요 환경오염물질의 부하량분석을 시도한다. 분석된 자료를 바탕으로 도로건설공사에 소요되는 평균 공사자재량에 대한 환경부하량을 측정하고, 주요자재별 환경영향 수치의 민감도 분석을 통해 향후 도로건설공사의 전과정 환경영향평가에 활용될 수 있는 기본 정보를 제공하고자 한다.

### 1.2 환경기반 가치평가 문헌 고찰

국내외의 건설분야 전과정평가에 관한 연구내용을 살펴보

\* Corresponding author: Kang, Leenseok, Department of Civil Engineering, ERI, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea  
E-mail: lskang@gnu.ac.kr  
Received August 7, 2014; revised October 10, 2014  
accepted October 13, 2014

면, 건축분야를 중심으로 건축물의 시공과 관련된 건설업체나 건축재료에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한, 전과정평가를 위한 프로그램 개발이 위주가 된 연구와 LCI (Life Cycle Inventory) DB (Database) 작성을 위한 연구가 다수 진행되고 있다. 국내외 환경기반 가치평가에 대한 기존의 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다.

국토교통부(2003)는 공정 시스템 전과정에서 발생하는 환경오염물질을 객관적으로 정량화하였으며, 건축물이 유발하는 환경부하의 정량적 평가를 위하여 산업연관법(Input-Output Analysis)과 개별적산법(Process Analysis)을 조합한 Database를 구축하였다. 권석현(2008)은 국내의 환경경제성 평가를 수행하는데 있어 LCA결과와의 연결이 부족한 문제점을 제시하였다. 임지연(2012)은 커튼월을 대상으로 기존 LCA 방법론에 ABC원가관리방식을 도입한 공정기반의 LCA모형을 제안하였다. 홍태훈(2014)은 산업연관분석법을 기반으로 한 LCA 모형을 통해 프로젝트 초기단계에서 건축물의 이산화탄소량 예측가능성을 제시하였다.

Håkan Stripple(2000)은 LCA 기법을 활용하여 아스팔트 포장의 전생애주기에 대한 LCI 모형을 수립하였고, Anna Forsberg(2004)는 최근 10여년간 건설 환경영향평가에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있음을 밝힌바 있다. Zoubir Lounis(2007)는 콘크리트 고속도로 교량의 생애주기를 고려한 지구온난화 가스, 건축폐기물의 생산 및 수명주기 비용 등에 대하여 언급하였다. Yue Huang(2008)은 아스팔트 도로 사업에서 에너지 투입량 및 이산화탄소 배출량의 환경 평가가 반드시 필요하며 이를 위한 평가 방법으로 전과정평가 기법이 적절하다고 판단하였다.

각 연구에서는 개발한 환경영향평가 모델 및 프로그램을 통하여 전과정평가를 실시하였으나, 단일사업에 대한 연구가 대부분이었다. 또한, 환경영향평가 결과 도출에 관한 연구가 많았으며, 환경영향평가의 결과를 활용하는 연구는 상대적으로 부족하였다. 본 논문에서는 국내 10개 도로건설공사에 LCA 평가 결과를 바탕으로 1km 국도건설공사에서 발생하는 평균 환경부하량을 측정하여 각 자재가 도로건설에 미치는 영향을 검토한다. 이를 바탕으로 향후 건설사업관리에서 환경성을 고려한 최적의 도로건설공사 수행을 위한 방안을 살펴본다.

## 2. 전과정평가 수행 절차

### 2.1 LCA의 구성요소 및 수행 단계

Fig. 1은 LCA의 구성요소 및 수행단계를 나타내고 있으며, 세부 수행단계에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

목적 및 범위 정의는 LCA를 수행하기 위한 첫 단계로서, 연구의 목적을 설정하고 수행 한 결과를 어디에 적용할 것인

가를 설정하는 단계이다. LCA는 제품의 생산을 위한 원료획득단계부터 폐기단계까지의 전과정에 발생하는 환경영향을 고려하는 것으로, 연구수행 목적에 따라 해당 제품의 생애주기에서 고려해야 할 영역과 제외시킬 영역이 결정된다. 목록 분석은 목적 및 범위설정 단계에서 설정된 연구대상 시스템에 대하여 자료를 수집하고 기능단위에 적합하게 계산하여 건설자재나 건설공정의 전과정에서 발생하는 환경부하를 파악하는 단계이다. 이를 위해 연구범위에서 설정한 시스템을 대상으로 시스템으로 들어오고 나가는 모든 에너지, 원료, 제품, 부산물 및 환경오염물 등의 종류와 양을 기록하고 목록화하여 환경부하를 계산한다. 즉, 전과정 목록분석은 해당 제품의 원료로 투입되는 Input 항목과 배출되는 Output 항목을 정량화하는 과정이다.

영향평가단계는 앞선 단계에서 수집한 환경투입, 산출물이 지구온난화나 산성화 등과 같은 환경측면에 어느 정도 영향을 미치는지를 과학적인 인자를 사용하여 계산해내는 단계이다. 이는 환경에 미치는 영향 정도를 다양한 정량적이고 정성적으로 추산하여 종합적 평가를 하는 것으로 다음 절에서 다루도록 한다. 마지막으로 결과해석의 목적은 목록분석이나 영향평가 단계로부터 얻은 결과를 분석하여 보고하고 결론을 도출하는 것이다. 또한 이때 LCA의 결과가 갖는 한계점들을 설명하고, 목록분석 연구나 영향평가에 대한 건의사항을 제공한다.

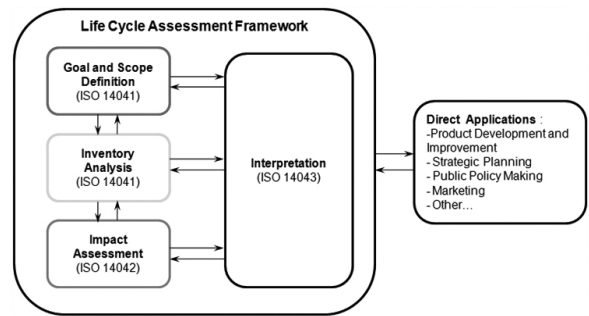


Fig. 1. LCA component and phase

### 2.2 환경영향평가 수행절차

영향평가는 목적과 범위의 정의에 일치하도록 수행되어야 하며, 영향평가의 결과로 연구의 목적이 달성 될 수 없다고 판단되는 경우에는 해당 연구의 목적과 범위의 정의를 수정하는 반복적인 과정이 진행된다. 영향평가방법은 현재 계속 개발 중에 있지만, ISO에서 제시하고 있는 영향평가 단계는 목록항목을 영향범주에 배정하는 분류화(Classification), 영향범주 내에서 목록항목의 환경영향을 나타내는 특성화(Characterization), 지역적, 시간적인 기준을 설정하는 정규화 및 특성화 결과를 합산하는 가중치 부여(Valuation)로 구

분할 수 있다.

영향평가는 전과정 목록분석에서 작성된 투입 및 배출 항목들을 지구온난화, 오존층파괴, 산성화, 부영양화, 생태독성 자원고갈 등과 같은 영향범주에 미치는 잠재적 영향을 연계시키는 과정이다.

영향평가 실시순서에 따라 살펴보면 Fig. 2와 같다. 분류화 단계에서는 자원소비와 배출물을 예상되는 환경영향의 종류에 기초한 환경범주로 분류하며, 특성화단계에서는 배출물이 지정된 환경범주에 대해 미치는 역할을 상대적으로 평가하여 대상 환경범주 내에서의 역할을 수치화한 값을 산출한다. 즉, 환경범주 내에서의 영향을 정량적인 수치로서 나타내는 것이다. 가치평가에서는 각각의 환경범주에서의 특성화 결과에 기초하여 시스템에 의한 여러 종류의 환경영향에 대한 중요성을 상대적으로 평가한다. 이 단계에서는 자연과학적인 것 이외에 정치적, 윤리적인 가치에 의한 평가도 동시에 이루어지게 된다.

### 3. 도로건설공사 환경영향평가 사례 적용

#### 3.1 목적 및 범위 설정

본 논문에서는 10개의 도로건설공사 사례데이터를 바탕으로 도로건설공사 작업 시 발생 가능한 환경부하량을 산출하고, 이를 바탕으로 1km 도로건설공사 시 필요한 주요 자재의 수량과 이에 따른 환경부하량을 측정하였다. 도로의 LCA분

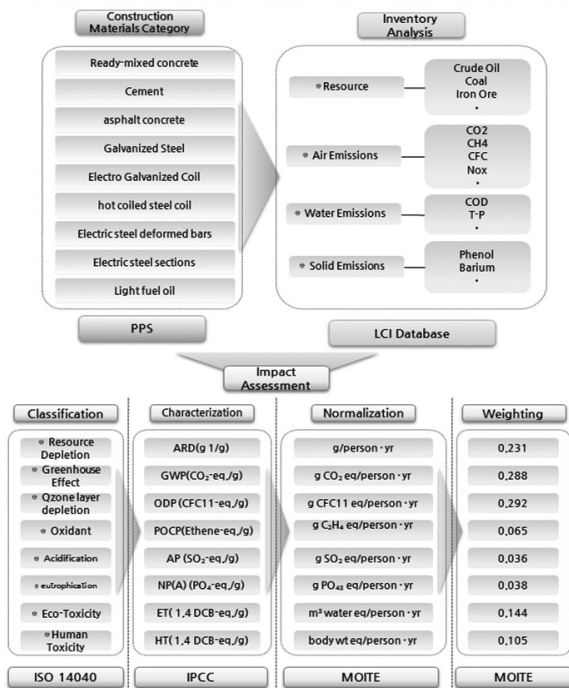


Fig. 2. LCA process (PPS, ISO, IPCC, MOTIE)

석을 위해서는 건설초기단계부터 시공단계, 유지보수, 해체 단계에 이르는 전생애주기를 포함하여야 하나, 자료 확보의 어려움으로 물량산출서를 기반으로 시공단계에 대하여 LCA 분석을 실시한다. 또한, 평가결과에 대한 민감도 분석을 실시하여 자재 수량 파라미터의 편차가 전체 환경부하량 결과 값에 미치는 편차의 변화 정도를 살펴본다.

주요 건설자재의 환경영향평가를 위한 절차는 Fig. 2와 같다. 조달청 공사건자재정보로부터 도로건설공사별 주요자재를 분류하고 LCI DB로부터 목록분석을 실시하였다. 이후 영향평가 단계에서는 ISO, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), 지식경제부 등에서 제공하는 수치를 활용하여 건설자재 환경영향평가를 수행하였다.

도로건설공사 환경영향평가 모델은 Fig. 3과 같이 제안한다. 이와 같은 절차를 바탕으로 도로건설공사의 사례 적용을 통하여 환경영향평가를 실시한다. 본 논문은 차후 신규 도로 건설공사의 건설과정에 대한 환경영향평가의 기초 데이터로서 활용 가능 할 것으로 판단된다.

#### 3.2 주요자재 목록분석 및 환경영향평가

본 절에서는 건설단계의 주요 자재에 대한 목록분석단계와 영향평가의 특성화 단계를 수행한다. 국내외에서는 건설단계의 전과정에 해당하는 LCA 분석을 위한 DB뿐만 아니라 각 산업에 적용되는 DB를 꾸준히 개발하고 있다. 그러나 건설 사업에서 활용되는 자재에 관한 LCI DB의 개발은 미비한 상

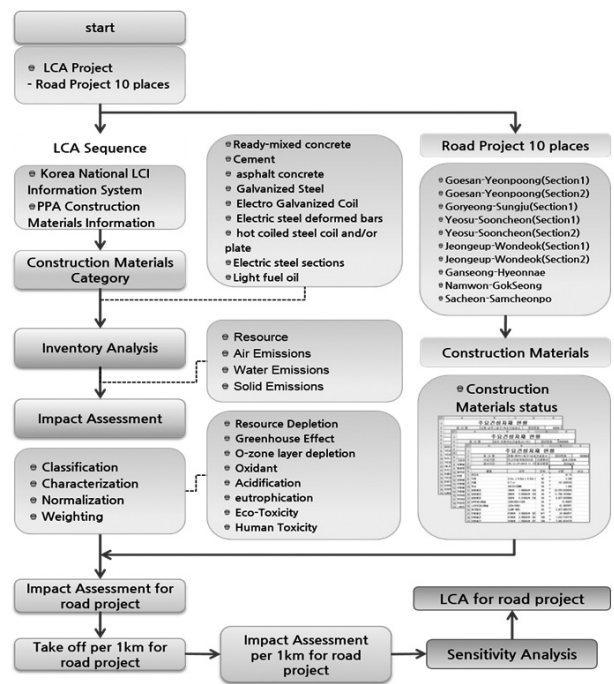


Fig. 3. LCA process for road construction project



태이다. 예를 들어, 레미콘의 경우 환경부에서 제공하는 LCI DB는 25-210-12, 25-210-15, 25-240-12, 25-240-15의 4종류이나, 현재 건설사업에서 사용하는 레미콘의 종류는 매우 다양하다. 이와 같은 LCI DB의 부재는 주요 데이터의 누락을 발생시킬 수 있으므로, 건설사업에서 사용되는 대다수 자재에 대한 LCA수행이 불가능하다는 것을 의미한다. 그러나 건설자재 중 소량이 사용되는 자재의 경우는 환경에 미치는 영향도가 적으므로 이를 제외한다면, 환경영향평가의 수행이 가능하다.

이에 본 논문에서는 건설사업 공사시 투입되는 자재 중 소요수량이 많고 건설사업 가운데 높은 비중을 차지하는 자재를 선정하고, 이를 국내외 기관 및 연구문헌의 LCI DB를 바탕으로 목록분석을 실시한다. 그리고 목록분석을 실시한 자료를 통하여 ISO에서 개발한 분류화 및 특성화 절차를 수행한다.

### 3.2.1 특성화 단계

특성화란 영향범주별로 분류된 항목들이 각각의 영향범주에 미치는 영향을 정량화하는 과정을 말한다. 분류화 단계에서 목록항목을 각 환경영향범주에 연결시켰으나 아직 영향의 크기를 알 수 있는 것은 아니므로 영향 정도를 파악하는 과정이 필요하다. 예를 들면, 지구온난화라는 영향범주에 분류된 목록항목이 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CFC11이라 하면, CO<sub>2</sub>1g이 지구 온난화에 미치는 영향을 1 GWP (Global Warming Potential : g CO<sub>2</sub>-eq/g CO<sub>2</sub>)이라 할 때 CH<sub>4</sub> 1g의 GWP는 24g CO<sub>2</sub>-eq이며, CFC11 1g의 GWP는 4,500g CO<sub>2</sub>-eq이 된다. 이는 IPCC에서 설정한 과학적인 근거를 토대로 결정한 값이다.

따라서, 이러한 값들을 목록항목의 부하량에 곱하면 지구 온난화라는 영향범주내에 각 목록항목이 미치는 영향을 정량적으로 산정할 수 있다. 특성화 과정은 두 부분으로 나누어지는데, 하나는 목록항목이 영향범주에 미치는 영향의 크기를 정량화 하는 단계이고, 다른 하나는 특정 영향범주에 속하는 모든 항목들의 영향을 합산하는 단계이다. 이것을 수식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

목록항목 j가 영향범주 i에 미치는 영향 크기를 C<sub>ij</sub>라 정의하면,

$$C_{ij} = Load_{ij} \cdot eqv_{ij}$$

여기서, Load<sub>ij</sub> = 목록항목 j의 환경부하량, g/f.u

eqv<sub>ij</sub> = i라는 영향범주에 속한 목록항목 j의

상응인자 값(equivalency factor, g-eq/g)

이를 레미콘의 특성화단계에 적용시켜보면,

특성화 결과(1.34E-02) = 레미콘의 목록항목 Baryte(BaSO<sub>4</sub>)의 환경부하량(3.24E-01) \* equivalency factor(4.13E-02)

레미콘의 목록항목 Baryte(BaSO<sub>4</sub>)가 영향범주인 자원

고갈에 미치는 영향 크기는 3.24E-01이며 도출된 값에 equivalency factor수치인 4.13E-02를 곱하여 특성화 값 1.34E-02이 도출된다. 이와 같이 목록항목별로 계산된 모든 특성화 수치를 합하게 되면 레미콘의 자원고갈이라는 영향범주에 미치는 특성화 결과값이 산출된다.

레미콘에 대한 전과정 목록분석 결과는 Table 1과 같으며, 시멘트, 굵은 골재, 잔골재, 플라이 애쉬, 물 등이 주요 원자재로서 활용되며 생산시 전력을 이용하여 생산한다. 생산과정에서는 각종 배출물과 폐기물이 발생되며, 이러한 부산물의 환경영향평가를 위해 환경부의 LCI DB를 활용하여 본 연구에 적용하였다. 특성화 환경영향을 도출하기 위해 사용한 환경영향범주는 자원고갈, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학 산화물생성, 산성화, 부영양화, 생태독성, 인간독성이다. 이와 같은 방법으로 타 건설 주요자재에 대한 특성화 환경영향 평가를 실시하였으며, 특성화 환경영향 수치를 바탕으로 정규화 및 가중화를 실시하였다.

Table 1. Ready-mixed concrete characterization

Category	Unit	Characterization
Resource Depletion	ton 1/ton	1.51E-03
Greenhouse Effect	ton CO <sub>2</sub> -eq./ton	4.29E-01
Ozone layer depletion	ton CFC11-eq./ton	4.60E-08
Oxidant	ton Ethene-eq./ton	2.55E-02
Acidification	ton SO <sub>2</sub> -eq./ton	7.05E-04
Eutrophication	ton PO <sub>4</sub> -eq./ton	7.43E-07
Eco Toxicity	ton 1,4 DCB-eq./ton	5.49E-03
Human Toxicity	ton 1,4 DCB-eq./ton	1.43E-03

### 3.2.2 정규화 및 가중화 단계

정규화 값은 일정기간동안에 일정지역에서 평균적인 개인에 의해 야기되는 영향을 의미하는 것으로 정규화를 수행하기 위해서는 먼저 해당지역의 정규화 값(NS : Normalization Score)을 알아야한다. 정규화를 통해 환경영향에 대한 이해도를 높일 수 있지만, 환경범주별로 환경오염 수준이 다르기 때문에 최종적인 환경영향을 산정할 때, 모든 환경범주들의 영향, 즉 정규화 영향값을 단순히 합산하는 것만으로는 최종적인 결론을 내릴 수는 없다. 따라서 영향평가의 마지막 단계에서 가중치를 적용하게 된다. 정규화 및 가중화 결과는 지식경제부에서 제시한 영향범주별 정규화 및 가중화 인자를 적용하여 도출하였으며, 건설단계의 주요 자재에 대한 정규화 및 가중화 인자와 결과는 다음과 같다.

Table 2. Ready-mixed concrete normalization and weighting

Category	Characterization Result	Normalization Factor	Normalization Result	Weighting Factor	Weighting Result
Resource Depletion	1.51E-03	2.94E+04	4.44E+01	0.231	1.03E+01
Greenhouse Effect	4.29E-01	5.53E+06	2.37E+06	0.288	6.83E+05
Ozone layer depletion	4.60E-08	4.07E+01	1.87E-06	0.292	5.47E-07
Oxidant	2.55E-02	1.03E+04	2.63E+02	0.065	1.71E+01
Acidification	7.05E-04	3.98E+04	2.81E+01	0.036	1.01E+00
Eutrophication	7.43E-07	1.31E+04	9.73E-03	0.038	3.70E-04
Eco Toxicity	5.49E-03	1.50E+03	8.24E+00	0.144	1.19E+00
Human Toxicity	1.43E-03	1.48E+06	2.12E+03	0.105	2.22E+02

Table 2의 레미콘에 대한 정규화 및 가중화 데이터를 보면, 각 영향범주별 특성화 결과 값에 정규화 인자를 곱하여 계산된 정규화 결과 값을 도출한 뒤, 가중화 인자를 곱하여 최종적으로 가중화 결과 값을 얻는다. 즉, 레미콘의 경우 자원고갈의 영향범주에 속하면서 해당지역에서 일정 기간 배출되는 모든 자원고갈 목록항목(Crude Oil, Coal, Iron Ore 등)의 정규화 환경부하량인 2.94E+04에 레미콘의 자원고갈이라는 영향범주에 속한 목록항목의 모든 합 1.51E-03을 곱한 값으로 4.44E+01의 수치를 최종적으로 도출된다.

가중치 부여는 각각의 영향범주들이 환경전반에 미치는 영향을 고려하여 영향범주간에 상대적인 우위, 즉 중요도를 결정하는 과정이다. 본 논문에서는 특성화 결과에 정규화 인자를 곱하여 산출한 정규화결과에 가중화 인자를 곱하여 최종 가중화 결과를 도출하였다. 즉, 레미콘의 경우 자원고갈의 영향범주의 상대적인 중요도가 고려된 자원고갈 영향범주에 미치는 시스템의 환경영향 1.03E+01 값은 레미콘의 자원고갈 환경영향범주의 정규화 결과인 4.44E+01의 값에 가중화 인자 0.231을 곱한 결과이다.

레미콘의 영향범주별 정규화 및 가중화 결과 레미콘은 지구온난화 환경영향범주에서 6.83E+05로 가장 큰 수치를 나타내었으며, 오존층파괴 환경영향범주에서 5.47E-07로서 가장 작은 수치를 보였다.

Table 3. Construction material LCA result

Category	Ready-mixed concrete	Cement	Asphalt concrete	Galvanized Steel	Electro Galvanized Coil	Hot coiled steel coil	Electric steel deformed bars	Electric steel sections	Light fuel oil
Resource Depletion	1.03E+01	9.71E+00	1.32E-03	9.10E+02	1.87E+02	7.53E-03	9.78E-03	1.22E-02	1.90E+02
Greenhouse Effect	6.83E+05	1.69E+06	2.52E+01	4.84E+07	6.02E+07	2.22E+00	6.98E+02	6.83E+02	6.10E+05
Ozone layer depletion	5.47E-07	4.23E-07	8.51E-11	6.89E-06	9.69E-05	1.47E-07	1.26E-10	3.40E-10	1.52E-05
Oxidant	1.71E+01	1.23E-01	1.96E-02	1.05E+02	1.64E+02	2.84E-04	1.49E-04	1.09E-04	1.27E-01
Acidification	1.01E+00	5.73E-01	9.59E-06	7.31E+01	7.85E+01	1.09E-03	2.01E-03	1.91E-03	4.24E+00
Eutrophication	3.70E-04	6.02E-05	6.07E-08	3.00E-02	1.70E-01	2.75E-07	4.95E-07	4.66E-07	6.32E-03
Eco Toxicity	1.19E+00	6.59E-01	1.84E-04	1.06E+01	1.71E+03	8.88E-03	3.65E-04	8.73E-04	1.32E+00
Human Toxicity	2.22E+02	4.20E+02	4.20E+02	4.20E+02	2.73E+05	2.25E-03	2.27E-01	2.42E-01	2.27E-01

### 3.2.3 영향평가 결과

모든 주요건설자재에 대한 환경영향범주별 정규화 및 가중화 결과는 앞선 계산방식에 의해 Table 3과 같이 산출된다. 이는 환경영향 범주별로 영향평가를 실시한 결과이며, 환경영향 범주 가운데 가장 높은 수치를 나타내는 지구온난화 범주이다. Fig. 4는 주요공사자재에 대한 환경영향평가 결과값으로서 각 공사자재 1ton 생산시 발생하는 환경영향범주에 대한 값을 나타낸다. 방사형으로 이루어진 그래프에서 각 축은 주요공사자재를 나타내고 있으며, 8개의 환경영향범주에 대한 수치를 표현한다. 그래프는 대부분의 건설자재에서 지구온난화에 해당하는 환경영향물질 배출이 가장 많았으며, 인간독성, 광화산화물 생성, 산성화, 자원고갈 등의 환경영향범주에 해당하는 오염물질은 상대적으로 적게 배출하고 있음을 나타내고 있다.

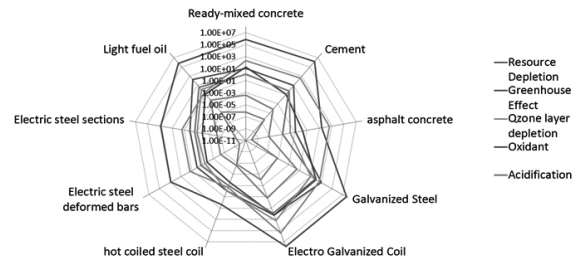


Fig. 4. Construction material emission

## 4. 도로건설공사 환경영향평가 결과 해석

### 4.1 도로건설공사 주요 건설자재 산출

Table 4는 본 논문에서 사례 대상으로 선정된 9가지의 주요 건설자재와 10개소의 도로건설공사에 대한 각 자재에 대한 수량을 나타낸 것이다. 대체적으로 레미콘과 아스콘의 소비량이 많으며 레미콘의 소비가 적은 여수-순천(제1,2공구)의 경우는 시멘트의 소비량이 많은 것으로 파악된다. 또한 아스콘 및 전기로제강 철근의 소비량이 많으며, 전기로제강 형강의 사용량은 현장별로 편차가 큰 특성을 보이고 있다.

### 4.2 도로건설공사 환경영향평가

도로건설공사 주요 자재의 수량을 바탕으로 3장에서 산출한 환경영향평가 결과를 각각의 도로건설에 적용한 후 해당 수치를 로그 값으로 변환시켜 표현한 지수그래프인 Fig. 5에서는 지구온난화 및 인간독성에 대한 환경영향범주가 가장 큰 비중을 차지하고 있음을 보여준다. 또한 자원고갈, 광화학산화물, 산성화, 생태독성 등은 비슷한 수치를 나타내고 있으며, 부영양화와 오존층파괴의 수치는 가장 적은 양으로 나타난다. 이러한 이유는 지구온난화에 대한 가중화 인자 값의 크기 차이로, 상대적으로 오존층파괴에 대한 가중화 인자의 값이 작은 것이 주요 원인으로 파악된다.

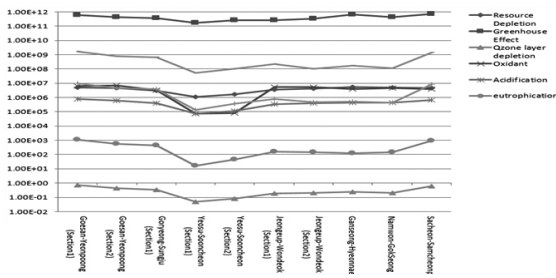


Fig. 5. Each road construction LCA result

### 4.3 도로건설공사 평균 환경부하량 산출

본 연구에서는 도로건설공사 10개 사례데이터에 대한 환경영향평가를 실시하여, 각 도로에 대한 주요 자재별 수량과 이를 바탕으로 도로별 환경부하량을 산출하였다. 해당 데이터를 활용하여 각각의 사례 도로건설공사에 대한 도로연장, 자재수량, 환경부하량, 경유의 부피 단위를 무게 단위로 보정 등을 고려하여 1km 도로건설공사 당 소요되는 평균 자재량 및 환경부하량을 산출하였다. 이러한 데이터는 Table 4에서 제시한 도로건설공사 주요 자재 수량을 모두 합하여 도로연

Table 4. Road construction material quantity (ton)

Road Material	Goesan-Yeonpoong (Section1)	Goesan-Yeonpoong (Section2)	Goryeong-Sungju (Section1)	Yeosu-Sooncheon (Section1)	Yeosu-Sooncheon (Section2)	Jeongeup-Wondeok (Section1)	Jeongeup-Wondeok (Section2)	Ganseong-Hyeonnae	Namwon-GokSeong	Sacheon-Samcheonpo
Ready-mixed concrete	305626.991	366433.414	165618.077	2475.529	282.353	301439.048	312788.728	228238.412	260881.236	168190.497
Cement	1479.120	8769.952	2220.293	56558.661	77402.151	9527.196	9,132.030	1168.161	1553.395	5077.156
Asphalt concrete	131426.000	138831.470	67359.367	41388.653	61198.379	213628.396	33918.602	278006.800	117430.560	148009.000
Galvanized Steel	628.804	485.884	319.897	135.346	272.676	274.676	610.794	473.072	1112.487	528.646
Electro Galvanized Coil	5694.436	2358.685	2106.853	34.662	165.494	228.340	40.821	33.000	28.862	4758.121
Hot coiled steel coil	14.007	26.327	26.217	18.407	30.909	224.468	166.567	2779.300	137.458	41.256
Electric steel deformed bars	13050.797	14301.656	4449.562	7790.277	12949.622	11357.779	8709.521	9001.400	11039.576	6023.995
Electric steel sections	52.929	74.370	2106.853	125.839	276.069	376.815	303.6740	4530.010	848.153	87.923
Light fuel oil	202.987	39.400	73.132	27.803	95.061	108.223	155.235	39.400	50.776	30.615

장의 합으로 나누어 평균 1km 도로건설공사시 소요되는 수량으로 정리한 것이며, 이를 통하여 1km 도로건설시 소요되는 환경부하량의 평균적인 산출이 가능하다. Table 5는 1km 도로건설공사당 소요되는 평균 자재량을 나타낸다. Fig. 6는 1km 도로건설공사시 발생하는 환경부하량을 자원고갈, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학산화물생성, 산성화, 부영양화, 생태독성, 인간독성의 환경범주별로 나타낸 값이다. 각 환경영향범주별 값 중 가장 큰 수치를 나타내는 지구온난화의 경우 2.69E+10이며, 가장 적은 수치를 나타내는 오존층파괴의 경우 2.39E-02으로 값의 차이가 크게 나타났다.

Table 5. Average quantity for road construction (ton/1km)

Material	Average quantity for 1km road construction(ton)
Ready-mixed concrete	20286.2176
Cement	2208.4071
Asphalt concrete	11887.8170
Galvanized Steel	46.4683
Electro Galvanized Coil	117.8703
Hot coiled steel coil	25.0619
Electric steel deformed bars	1020.0890
Electric steel sections	70.1300
Light fuel oil	8.2133

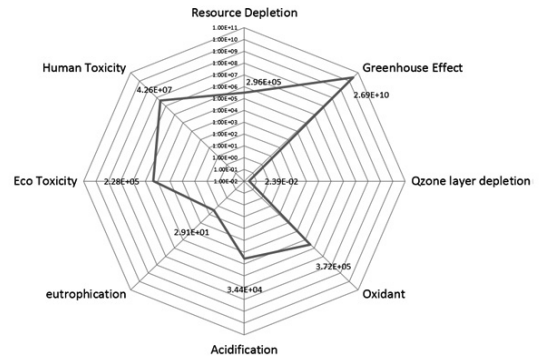


Fig. 6. Average LCA results for 1km road construction



#### 4.4 도로건설공사 환경영향평가 민감도 분석

최근 건설프로젝트의 수행에 있어 새롭게 부각되고 있는 환경영향평가는 공사 자재에 수량에 따라 환경부하량의 변화가 다양하게 나타난다. 이는 곧 도로건설공사시 공사비 견적, 예산수립 등의 민감한 부분에서 환경부하량은 리스크 요인으로 분류할 수 있다. 사례 연구를 통하여 1km 도로건설공사시 소요되는 주요자재 수량을 20% 증가 하였을 경우 환경영향 범주별 미치는 영향과 수량의 변화에 따른 전체 도로건설공사의 환경부하량 변화를 시뮬레이션 하였다.

Fig. 7과 같이 각각의 자재에 대한 증가량과 감소량에 따라 나타난 수치 중 가장 큰 영향을 미치는 자재는 레미콘이며, 그 외 전기아연도금강판과 시멘트, 용융아연도금 강판 순으로 나타난다. 아스콘, 열연후판, 전기로제강철근, 전기로제강형강, 경유의 경우는 증감량에 따른 편차가 거의 없어 총 경부하량에 영향을 미치지 못하는 것으로 파악되었다. Fig. 7과 같이 자재 수량의 변화에 따른 총 환경부하량 수치를 그래프로 나타내었으며, 1km 도로건설공사시 소요되는 주요 건설 자재로부터 발생하는 환경부하량은 합산한 2.70E+10을 기준으로 레미콘의 수량을 20% 증가시킨 경우 1km 도로건설공사에서 발생하는 총 환경부하량은 2.98E+10이며, 레미콘 수량을 10% 감소시켰을 경우는 2.56E+10의 총 환경부하량을 나타내고 있다. 이러한 결과는 1km 도로건설공사시 레미콘의 상대적인 양에 따라 발생하는 총 환경부하량이 크게 변함을 나타낸다.

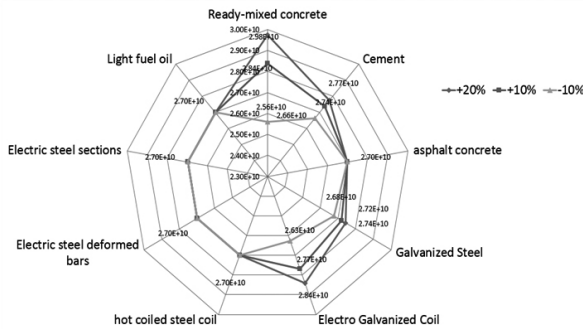


Fig. 7. Total environmental stress change from the different quantity

도로건설공사에서 많이 사용되는 레미콘, 아스콘 등은 물량 변화가 다른 자재들 보다 편차가 심하여 환경영향도가 높게 나타날 것으로 예상된다. 그리고 상대적으로 적은양이 소요되는 전기아연도금판 경우에는 자재의 수량을 감소시키거나 다른 자재로 대체할 시 환경부하량 저감 효과가 크게 나타날 것으로 간주된다.

Fig. 8은 주요자재의 수량을 각각 20% 증가시켰을 경우에 환경영향범주별 미치는 영향을 조사한 것이다. 레미콘은 자재의 수량이 타 자재 보다 월등히 많아 대부분의 환경영향범

주에 큰 영향을 끼친다.

전기아연도금강판의 경우, 수량이 전기로제강철근 물량의 10%수준이나 자원고갈과 광화산화물 범주 이외의 모든 환경영향 범주에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 도로건설공사시 해당 공사의 특성에 따라 자재 수량의 변화가 예상된다면 자재의 수량 변화에 따른 총 환경부하량의 변화를 시뮬레이션해 볼 필요가 있다. 이러한 공사 자재별 수량 변화에 따른 총 환경부하량 변화의 민감도 분석은 향후 발생 가능한 도로건설공사 환경영향평가에 대응하기 위한 초기 단계에서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

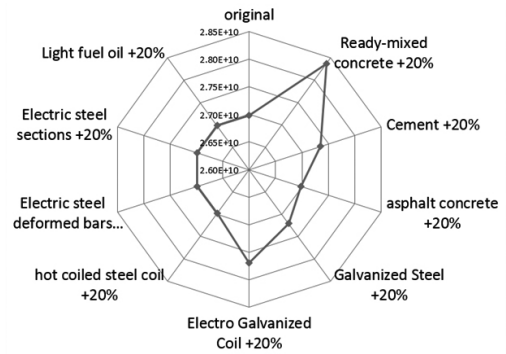


Fig. 8. LCA result in 20% increase of quantity

#### 4.5 환경영향평가 결과 활용

정부에서는 지난 1999년부터 설계금액 500억 이상의 대형 SOC사업의 경우 타당성 조사 및 기본 설계단계에서부터 생애주기 비용분석을 의무화하였으며, 2006년 이후 총공사비 100억원이상의 건설공사의 기본 및 실시설계 등에 대하여는 설계내용에 대한 경제성 및 현장 적용의 타당성을 건설기술관리법과 VE 설계 매뉴얼을 참고하여 검토하도록 하고 있다. 이는 건설공사비용을 절감하기 위한 방안이며, 대상 시설물에 대한 적정한 비용으로 최고의 공사시설물을 제공하고자 하는 평가수단이라고 할 수 있다.

이와 더불어 향후 가까운 미래에 건설공사시 발생하는 환경오염물질에 대한 환경성평가가 필수적으로 도입될 것으로 판단된다. 환경오염물질 규제라는 국제적인 요구와 친환경건설에 따른 인식변화가 이를 뒷받침한다.

이에 따라 건설공사에 대한 VE/LCC와 더불어 LCA평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 설계 및 시공단계에서 이루어지고 있는 공사 타당성 및 경제성 검토시, 하나의 건설공사에 대해 VE/LCC를 수행하여 최종으로 경제적인 공법으로 산출되었다면 이에 LCA분석을 추가하여 공사 타당성 및 경제성 뿐만 아니라 환경성까지 고려한 최적의 공사 수행을 위한 공법선정을 하여야한다.

예를 들어, 본 연구의 도로건설공사 환경성평가 결과를 활

용하여 VE/LCC 수행과 더불어 환경부하량을 산출한다면 건설공사의 환경성도 고려한 사업계획 및 시공이 가능할 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 도로건설공사시 환경오염물질의 감소 가능한 방안을 제시하고, 도로건설공사에 대한 환경영향평가에 대응하기 위한 초기 자료로서 활용 가능하도록 하였다. 이를 위하여 ISO 14040 시리즈에 적합한 전과정평가를 실시하기 위한 환경영향평가 프로세스를 제시하였다. 그리고 제시한 프로세스에 따라 국가 LCI DB와 조달청의 토목공사 건자재정보를 기준으로 주요 건설자재를 분류하고 목록분석 및 영향평가를 실시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 주요 도로공사 건설자재인 시멘트, 레미콘, 아스콘, 용융아연도금강판, 전기아연도금강판 열연후판, 전기로제강철근, 전기로제강형강, 경유 등에 대한 영향평가를 실시하였다. 이러한 수치는 각 자재의 1ton 생산시 발생하는 환경부하량을 전과정평가를 통하여 나타낸 것이다.

2. 도로건설공사 사례데이터를 바탕으로 평균 주요 건설자재에 대한 수량을 산출하였으며, 주요 건설자재의 환경 영향평가 결과를 바탕으로 1km 도로건설공사시 발생하는 환경부하량을 측정하였다. 그 결과 환경영향범주에 따른 환경부하량은 지구온난화, 인간독성, 광화학산화물 생성, 자원고갈, 생태독성, 산성화, 부영양화, 오존층파괴 항목의 순으로 환경부하량이 발생하였다.

3. 도로건설공사의 주요자재 수량의 변화에 따른 전체 도로건설공사의 환경부하량 변화를 시뮬레이션 하였다. 1km 도로건설공사시 소요되는 각 자재에 대한 수량을 +20%, +10%, -10% 변경시켜 시뮬레이션 결과를 비교하며 실시하였다. 또한 자재의 수량변경에 따른 환경영향 범주별 영향력을 분석하였으며 이를 통해 환경성을 고려한 최적의 도로건설공사 자재선택 및 공법의 선택을 유도 할 수 있다.

## References

Anna, F. and Fredrik, V. M. (2004). "Tools for environmental assessment of the built environment, Building and Environment" *Building and Environment*, 39(2), pp. 223-228.

Håkan, S. (2000). "Life Cycle Inventory of Asphalt Pavements" IVL *Swedish Environmental Research Institute Ltd, Report*.

Heo Tak (1996). "Concept of LCA and Status of Korea and World", KonKuk University.

Hong, T. H. and Ji, C. Y. (2014). "Comparison of the CO2 Emissions of Building using Input-Output LCA Model and Hybrid LCA Model" *Korean Journal of Construction Engineering and management*, KICEM, 15(4), pp. 119-127.

Ji, J. S. and Kim, S. H. (2003). "The Study of LCA application schemes on Construction industry areas." *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*.

Kwon, S. H. (2008). "Development of assessment model for environmental economics of construction projects." Ph.D thesis, Chung Ang Univ., Seoul.

Lee, S. U. and Kim, S. W. (2004). "The Environmental Load Unit Composition and Program Development for LCA of Building -The Construction of Method with LCA for Estimating Environmental Building-." *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*.

Lim, J. Y., Yi, J. S., Shin, S. W. and Son, J. W. (2012). "Implementing Activity-based LCA Model for Carbon Dioxide Emission Analysis and Allocation of Environment Cost" *Korean Journal of Construction Engineering and management*, KICEM, 13(4), pp. 78-88.

Public Procurement Service (2014). <http://www.pps.go.kr/>

OECD (2014). OECD StatExtracts, National Account at a Glance

Yue, H., Roger, B. and Oliver, H. (2008). "Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements" *Journal of Cleaner Production*, 17(2), pp. 1-14.

Zoubir Lounis (2007). "Environmental Benefits of Life Cycle Design of Concrete Bridges." *3rd International Conference on Life Cycle Management*, paper #293, pp. 1-6.



---

**요약 :** 최근의 국제사회는 경제성장에 따른 기상이변을 방지하고자 이산화탄소, 온실가스 등의 환경 오염물질 배출 저감을 요구하고 있다. 이러한 요구사항에 따라 에너지 다소비 산업 가운데 도로건설에 대한 효율적인 환경오염물질 배출 저감 방안이 요구된다. 본 논문에서는 전과정 영향평가의 절차에 적합한 도로건설공사 환경영향평가 프로세스를 제시하고, 이를 바탕으로 다수의 도로건설공사에 대하여 주요 건설자재의 환경부하량을 분석한 후, 1km 도로건설공사에서 발생하는 평균 환경부하량을 제시하고 있다. 주요자재수량에 대해서는 환경부하량에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 이러한 분석결과는 도로건설공사의 공법 및 자재별 수량 변화에 따른 전과정 환경영향평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**키워드 :** 도로건설공사, 전과정평가, 민감도분석, 특성화, 정규화

---