

도로건설공사 토공작업부에 대한 환경부하 영향인자 분석

박진영¹ · 임제규¹ · 김병수*

¹경북대학교 토목공학과

An Analysis of Factors Affecting Environmental Load in Earthwork Type of Road Project

Park, Jin-Young¹, Im, Je-Gyu¹, Kim, Byung-Soo*

¹Department of Civil Engineering, Kyungpook National University

Abstract : In the construction industry, attempts to evaluate the environmental impact of products through life cycle assessment (LCA) approach has been on the rise. However, the domestic construction industry needs to make rapid decisions due to limited budget and schedule, so it is difficult to carry out a review of the environmental load on all resources. The decision-making process requires information on the major influence factors that should be focused on to reduce environmental load. And this information should be quantified so that it can be linked to environmental impact assessment. In this study, the LCA results of road construction cases were analyzed to provide such information. As a result, diesel, ready-mixed concrete, urethane-based paint, aggregate, and asphalt concrete were found to be the main factors that generated 93.17% of the environmental load in the earthwork type of road project. The total environmental cost caused by these affecting factors when constructing 1 km of earthwork type of road project is 242 million won. The analysis also shows that a 10% reduction in the amount of ready-mixed and asphalt concretes can reduce carbon emissions by 5.02% and 2.28% while reducing environmental costs by 11 million won per kilometer. In order to reduce carbon emissions of the earthwork type of road project, it is necessary to actively develop and introduce new methods and eco-friendly materials to reduce the overall use of ready-mixed concrete and asphalt concrete.

Keywords : Life Cycle Assessment (LCA), Environmental Load, Influence Factor, Carbon Emission, Environmental Cost

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 환경오염에 의한 피해는 특정국가에 국한된 문제가 아니며 인류의 생존을 위협하는 전 지구적 문제로 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 각 나라마다 다양한 규제와 기술개발을 시도하면서 환경오염 저감기술은 모든 산업 분야에서 국제경쟁력과 직결되고 있다. 우리나라는 환경오염 저감기술의 확보를 통해 저탄소 에너지구조로의 변화를 꾀함으로써 국제경쟁력을 강화하고자 2015년 유엔기후변화협약 당사국 총회에서 2009년에 제시했던 온실가스 배출량 감축 목표 보다 7%p 늘어난 37%(2030년 배출전망치 대비)의 감축

목표를 제시하였다(UNFCCC, 2015).

시공과정에서 다량의 에너지와 자재를 소비하고 있는 건설업은 산업계에서 세 번째로 많은 탄소를 배출하고 있다(Kwon, 2008; Park et al., 2009). 따라서 우리가 제시한 온실가스 감축목표를 달성하기 위해서는 건설산업의 역할이 무엇보다 중요하다. 건설산업의 환경오염은 자재 및 에너지 소비량과 상관성이 높기 때문에(Park et al., 2016) 사업을 기획하고 설계하는 과정에서 이에 대한 효과적인 분석이 수행되어야 한다. 최근 잠재적 환경영향을 정량화하여 제시함으로써 환경부하를 평가하는 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)의 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)가 가장 합리적인 환경영향평가 기법으로 주목을 받으며 건설산업에서의 적용이 증가하고 있다. 그러나 환경성 분석을 위한 시간을 충분하게 보장받지 못하는 국내 건설산업의 여건과 수많은 투입자원의 분석을 필요로 하는 LCA 기법의 한계를 감안할 때 건설공사에 투입이 예상되는 모든 자원의 잠재적 환경영향을 검토하는 것은 불

* Corresponding author: Kim, Byung-Soo, Department of Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

E-mail: bskim65@knu.ac.kr

Received April 2, 2018; revised -
accepted April 23, 2018

가능하다. 따라서 친환경성 확보를 위한 의사결정과정에서 환경부하 저감을 위해 중점적으로 검토가 수행되어야 하는 주요 영향인자와 이를 환경영향평가로 연계할 수 있는 정량화된 정보의 제공이 요구된다. 이러한 정보의 제공은 불필요한 시행착오로 인한 사업의 지연과 비용발생을 예방할 수 있다.

본 연구는 국내에서 재정투자율이 가장 높은(MSF, 2013) 도로건설사업을 대상으로 친환경성 확보를 위한 의사결정과정에서 활용할 수 있는 기초자료의 제공을 목적으로 한다. 이를 위해 도로건설공사 사례의 LCA결과를 바탕으로 공종과 투입자원, 그리고 환경영향범주에 따른 특성을 분석함으로써 주요 영향인자와 그에 따른 원단위를 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

현대사회의 운송체계에서 중추적인 역할을 수행하고 있는 도로에는 크게 토공작업부, 교량, 터널의 3가지 시설물로 구성이 된다. 토공작업부는 주로 토공사를 통해 조성한 노반에 포장공사를 수행하여 완성된 도로구간을 지칭한다. 작업공종으로는 토공, 비탈면안정공, 배수공, 포장공, 교통안전시설공, 부대공, 옹벽공이 해당된다. 터널은 주로 산악구간에 설치되지만 현장 또는 사업의 여건에 따라 토공작업부로 대체되기도 한다. 따라서 모든 도로에 적용되는 범용적인 시설물로 보기는 어렵다. 교량은 계곡이나 하천 등을 통과하기 위하여 건설하는 구조물로서 재료는 주로 콘크리트와 강재가 사용되지만 현장여건에 따라 적용되는 규모와 구조형식은 크게 상이하다. 이러한 특성으로 인해 교량의 환경영향인자와 원단위는 사용되는 재료와 적용된 구조형식에 따라 다르게 나타날 것으로 예상된다. 따라서, 교량과 터널은 건설사업 단위의 분석보다는 재료와 형식에 따른 분석을 수행하는 것이 합리적이라 판단되어 본 연구의 범위에서는 제외를 하였다.

토공작업부를 대상으로 환경부하 영향인자와 그에 따른 원단위를 제시하기 위하여 국내에서 수행된 30개의 도로건설공사 사례를 수집하고 LCA를 수행하였다. 환경부하에 대한 영향인자는 LCA결과를 활용하여 환경부하량과 작업공종 및 투입자원에 대한 기여도분석을 통해 도출하고 각 영향인자의 환경부하량을 토공작업부 연장에 대한 원단위로 환산하여 제시하였다.

1.3 선행연구 분석

최근 LCA가 잠재적 환경영향을 고려한 의사결정과정에서 가장 합리적인 정보를 제공할 수 있는 방법론으로 평가되면서 건설분야에서도 이를 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Jun, 2007). 대상이 되는 시설물도 도로를 비롯한 사회기반시설(Social Overhead Capital, SOC) 전체로 확대되면서 건설공사로 인한 환경영향을 평가하는 방법론 중 가장 타당함이 제시되고 있다(Treloar et al., 2004; Yue et

al., 2008). 건설분야에서 LCA 방법론을 통해 환경영향을 평가하려는 연구를 살펴보면 다음과 같다.

Lee (2014)는 국내 고속철도를 대상으로 시공단계에서 발생하는 환경부하를 산정하고 1km에 대한 환경부하 원단위를 제시하였다. Moon et al. (2014)은 LCA를 통해 도로건설공사의 환경부하량을 산출하고 1km를 건설할 때 발생이 예상되는 환경부하량을 제시하였다. Parrish and Chester (2014)는 친환경 사회기반시설의 시공단계에서 발생하는 환경영향을 LCA를 통해 정량화하였다.

앞서 기술한 연구내용을 살펴보면 특정 시설물을 대상으로 LCA를 통해 환경영향을 평가하거나, LCA의 적용성을 확대하기 위한 연구로서, 환경부하와 영향요인에 대한 분석보다는 건설공사로 인해 발생하는 잠재적 환경영향을 정량화하여 나타내는데 중점을 두고 있다. 이러한 한계에 대응하여 LCA를 통해 산출된 환경부하를 이용하여 친환경공법이나 자재선택에 대한 기초자료를 제공하려는 연구가 수행되고 있다.

Liu et al. (2013)은 사력댐과 콘크리트댐을 대상으로 환경부하량을 산출한 후 비교함으로써 환경영향에 유리한 구조물 형식을 제안하였다. Thiel et al. (2014)은 포장재료를 대상으로 LCA를 수행하여 포장재료의 물적특성이 환경부하에 미치는 영향을 제시하였다. Min (2013)은 LCA를 통해 공항시설물의 포장공법별 환경부하 저감효과를 정량적으로 평가하였다. 이상의 연구는 환경부하에 영향을 미치는 요인을 분석하여 제시하고 있으나, 그 대상을 특정 자재나 공법에 한정하고 있어 시설물의 전체적인 환경영향을 평가하기 위한 의사결정 과정에 활용되기에는 한계를 가지고 있다. 이에 본 연구는 도로의 친환경성 확보를 위한 의사결정과정에서 효과적으로 활용할 수 있는 환경영향인자에 대한 정보를 제공하고자 한다.

2. LCA에 의한 환경영향평가

LCA는 원재료의 조달로부터 설계, 제조, 사용, 재활용, 그리고 폐기에 걸쳐 제품이 사용하는 자원 및 에너지로부터 배출되는 환경부하와 제품 자체에서 배출되는 환경부하를 정량적으로 평가함으로써 이를 저감·개선하고자 하는 기법이다(Jun, 2007; Hong et al., 2012).

LCA에서 제품의 환경영향을 정량화한 환경부하(특성화 결과)는 <Fig. 1>의 목록분석(Inventory analysis)에서 생산공정에 투입되는 자원과 이로 인해 배출되는 물질을 정량화하여 수집하고 영향평가(Impact assessment)에서 해당되는 환경영향범주로 분류한 자원 및 배출물질의 기여도를 평가함으로써 산출된다. 본 연구에서는 자원고갈(Abiotic resource depletion, ARD), 산성화(Acidification, AC), 부영양화(Eutrophication, EUP), 지구온난화(Global warming, GW), 오존층파괴(Ozone layer depletion, OD), 광화학산화

물생성(Photochemical oxidant creation, POC), 생태계독성(Terrestrial eco-toxicity, TET), 인간독성(Human toxicity, HT)의 8개 환경영향범주를 대상으로 특정 자원에 대한 기능단위의 환경부하를 데이터베이스(Database, DB)로 구축한 LCI (Life Cycle Inventory) DB를 활용하여 환경부하를 산출하였다.

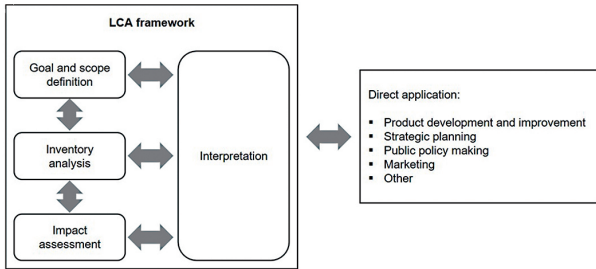


Fig. 1. Stages of an LCA (ISO, 2006)

한편, LCA결과를 제품의 환경성에 관한 의사결정의 수단으로 사용할 경우 모든 환경영향범주에 대한 단일 점수화는 신속한 의사결정을 위해 매우 중요하다(ME, 2003). 본 연구에서는 <Table 1>과 같이 환경부에서 제시한 한국형환경영향지수(Lee, 1999; Heo et al., 2000; ME, 2003)를 활용하여 환경부하를 단일 점수화한 에코포인트(Eco-point)를 산출하였다. 모든 환경영향범주의 환경부하량이 하나의 점수 형태로 표현된 에코포인트(Eco-point)는 식 (1)과 같이 각 영향범주별 환경부하량(특성화값)에 <Table 1>의 정규화지수(Normalization factor)와 가중화지수(Weight factor)를 적용함으로써 산출된다.

Table 1. Factors for Korean eco-indicator

Impact category	Unit	Normalization factor	Weight factor	Converted unit
ARD	1/yr	24.9	0.231	Eco-point
AC	kg SO ₂ -eq	39.8	0.036	
EUP	kg PO ₄₃ -eq	13.1	0.038	
GW	kg CO ₂ -eq	5,530	0.288	
OD	kg CFC ₁₁ -eq	0.0407	0.292	
POC	kg C ₂ H ₄ -eq	10.3	0.065	
TET	kg 1,4 DCB-eq	1.63	0.216	
HT	kg 1,4 DCB-eq	1,480	0.105	

$$EP = \sum \left(\frac{C_i}{N_i} \times w_i \right) \quad (1)$$

EP: 총에코포인트(Eco-point)
 C_i: i환경영향범주의 환경부하량(특성화결과)
 N_i: i환경영향범주의 정규화지수
 w_i: i환경영향범주의 가중화지수

3. 도로건설공사 사례의 LCA

도로건설공사의 환경부하 특성과 영향인자 도출을 위하여 국내에서 기 수행된 30개의 국도건설사업 사례를 수집하고 설계도서의 분석을 통해 LCA를 수행하였다. 건설사업에 LCA를 적용하기 위해서는 투입되는 물질에 대한 정보 즉, 건설공사를 수행하기 위해 투입되는 자재와 에너지에 대한 정보를 파악하여야 한다. 본 연구에서는 수집한 사례를 대상으로 단가산출자료를 분석함으로써 도로 건설공사에 투입되는 공종별 단위 자원량을 수집하고 여기에 수량산출서의 공종별 작업물량을 적용함으로써 각 사례의 자재와 에너지 소비량을 집계하였다. 자원의 소비로 인해 발생하는 환경부하량은 LCI DB의 각 환경영향범주별 원단위값을 해당 자원에 연계해 줌으로써 정량화하였다.

Table 2. Resource inventory of LCI DB

LCI DB category	Unit	Linked resource	Unit
Diesel	kg	Diesel	L
Gasoline	kg	Gasoline	L
Electric steel deformed bar	kg	All types of deformed bar	ton
Ready mixed concrete (25-24-15)	m ³	All types of concrete products	m ³
Portland cement type 1	kg	All types of portland cement	sack
Urethane-based paint	ton	Urethane-based paint	kg
Recycled aggregate	kg	All types of aggregate	m ³
Asphalt	kg	All types of asphalt	DM
Asphalt concrete	ton	All types of asphalt concrete	ton
Plywood	m ²	Plywood	m ²
Sand	m ³	Sand	m ³
Oxygen	ton	Oxygen	L
Electricity	kWh	Electricity	kwh

건설공사 수행과정에는 콘크리트를 비롯하여 수백여 가지의 자원이 투입된다. 건설공사로 인해 발생하는 모든 잠재적 환경영향을 평가하기 위해서는 이 모든 자원에 대한 검토가 필요하나, 이를 위한 투입물과 배출물의 목록분석이 완료되어 LCI DB에 편성된 자원은 극소수에 불과하다. 국내에서 LCA에 활용되고 있는 국가 LCI DB (KEITI, 2015) 중 건축자재는 6.5%인 26개에 불과하다. 다른 산업범주의 데이터를 차용하여 사용하더라도 10%를 넘지 못하는 수준이다. 뿐만 아니라, 대부분의 건설공사에서 10개 내외의 자원이 전체 환경영향을 결정하는 요소로 작용하는 것으로 조사되고 있다 (Kim et al., 2017; Moon et al., 2014). 이 연구에서는 이러한 주요 자원을 대상으로 한국환경산업기술원에서 제공하는 국가 LCI DB (KEITI, 2015)를 적용하고 누락된 자원에 대해서는 한국건설기술연구원(KICT, 2010)과 Ecoinvent (2015)

Table 3. LCA results (/km)

Impact category	Environmental load			
	Characterization result		Weighting result	
	Unit	Value	Eco-point	Distribution rate (%)
ARD	1/yr	3.99E+04	3.70E+02	39.11
AC	kg SO ₂ -eq	9.08E+03	8.21E+00	0.87
EUP	kg PO ₄₃ -eq	3.12E+03	9.04E+00	0.96
GW	kg CO ₂ -eq	5.66E+06	2.95E+02	31.12
OD	kg CFC ₁₁ -eq	5.42E-01	3.89E+00	0.41
POC	kg C ₂ H ₄ -eq	7.62E+03	4.81E+01	5.08
TET	kg 1,4 DCB-eq	1.02E+03	1.36E+02	14.33
HT	kg 1,4 DCB-eq	1.08E+06	7.69E+01	8.12
Total	-	-	9.47E+02	100.00

에서 제공하는 자료를 참조하였다. <Table 2>는 이 연구에서 적용한 LCI DB의 자원목록이다.

이 연구에서 분석을 위해 사용한 30개의 사례는 5km이하 부터 10km이상까지 다양한 도로 연장의 분포를 나타내고 있다. 토공작업부의 연장이 반영된 환경부하량은 각 사례마다 큰 편차를 나타내고 있기 때문에 각 사례의 LCA결과를 단위 연장(/km)에 대한 원단위 환경부하량으로 환산한 후 산술평균하여 <Table 3>에 제시하였다.

특성화결과(Characterization result)는 대표 오염물질의 배출량으로 환경부하를 정량화한 값이다. <Table 3>의 특성화결과에 의하면 도로 토공작업부 1km를 시공함으로 인해 발생하는 이산화탄소(CO₂)배출량은 5,660톤이다. 이산화탄소는 지구온난화(GW)의 주요 오염원으로써 각 나라에서 환경규제의 주요 대상이 되고 있는 물질이다.

<Table 3>의 가중화결과(Weighting result)는 특성화결과에 식 (1)과 같이 <Table 1>의 정규화지수와 가중화지수를 적용하여 무차원의 점수(에코포인트)로 나타낸 값이다. 따라서 환경성에 대한 상대적 비교우위를 평가하는데 유용하게 활용될 수 있다. 도로 토공작업부 1km를 시공할 때 상대적으로 크게 발생하는 잠재적 환경영향은 3.70E+02, 2.95E+02, 1.36E+02의 에코포인트를 나타낸 자원고갈(ARD), 지구온난화(GW), 그리고 생태계독성(TET)이다. 이들의 영향은 전체 에코포인트의 84.56%에 이른다.

4. 영향인자 분석과 논의

4.1 작업공종별 환경부하 특성

도로건설공사의 토공작업부를 구성하는 공종은 일반적으로 토공, 비탈면안정공, 배수공, 포장공, 교통안전시설공, 부대공, 옹벽공 등으로 구성된다. 각 공종이 모든 환경영향범주에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수집한 사례의 LCA 결과 중 에코포인트를 작업공종에 대한 범주로 분류하여 기여도를 분석하고 그 결과를 <Fig. 2>에 나타냈다.

토공작업부의 공종 중 포장공이 전체 환경부하량의 36.41%를 나타내 기여도가 가장 큰 것으로 조사되었다. 배수공은 그 보다 3.28%가 작은 33.13%를 나타냈다. 주로 건설장비에 의한 작업으로 구성되어 있는 토공의 기여도는 14.19%를 보였다. 부대공과 비탈면안정공, 옹벽공 등은 10% 미만의 작은 기여도를 나타냈다. 따라서 토공작업부 전체 에코포인트의 83.73%를 설명할 수 있는 토공, 배수공, 포장공을 환경부하에 대한 주요공종으로 선정하였다. 주요공종은 <Fig. 3>에 나타낸 것과 같이 8개 환경영향범주에 대해서는 각기 다른 특성을 나타낸다. 토공은 자원고갈(ARD)이 전체 환경부하량의 98.37%로써 압도적인 우위를 나타냈다. 배수공은 지구온난화(GW)가 42.69%, 자원고갈(ARD)이 33.06%를 차지하는 것으로 조사되었다. 포장공은 생태계독성(TET)과 지구온난화(GW)에 대한 영향이 상대적으로 높은 31.42%와 29.92%를 보였으며 자원고갈(ARD)의 영향도 23.61%로써 비교적 크게 나타났다.

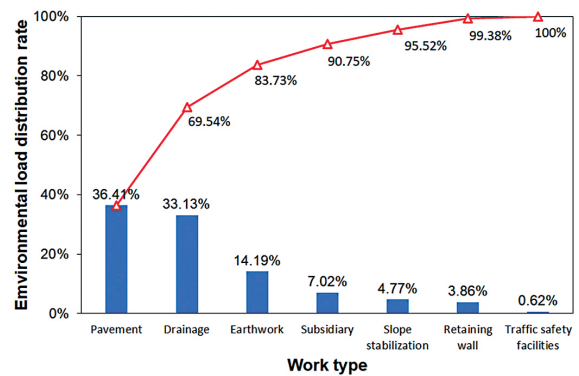


Fig. 2. Environmental load distribution rate of work type

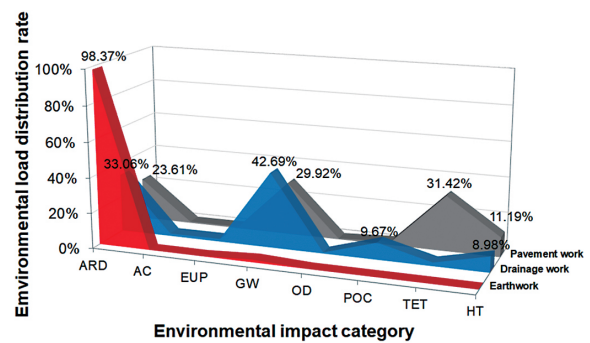


Fig. 3. Environmental impact of major work

4.2 환경부하 영향인자

도로 토공작업부의 환경부하는 <Fig. 3>에 나타낸 바와 같이 주요공종에 의해 자원고갈(ARD), 지구온난화(GW), 생태계독성(TET)의 영향이 크게 평가되었다. 이는 투입물질과 배

출물질에 의한 환경적 영향을 정량화하는 LCA의 특성으로 인해 각 주요공종에 투입되는 자원(자재 및 에너지)의 영향이 반영된 것이다. 환경부하에 대한 자원의 영향을 분석하기 위하여 주요공종에 투입되는 자원 중 사용량이 비교적 많고 <Table 2>에 나타난 LCI DB의 자원목록을 활용하여 환경부하량을 산출할 수 있는 10개 항목을 도출한 후 주요공종에서의 환경영향을 분석하였다.

토공, 배수공, 포장공 작업에 모두 사용되는 경유는 주로 건설장비에서 소비한다. 경유의 환경부하에 대한 영향은 <Fig. 4>와 같이 건설장비에 의한 작업으로 구성되어 있는 토공에서 가장 큰 99.71%를 보였다. 레미콘으로 인한 환경부하의 영향은 배수공에서 63.35%에 달한다. 이는 측구, 배수관, 암거 등 대부분의 배수구조물에 레미콘이 사용되기 때문이다. 포장공은 주요자재인 아스팔트콘크리트의 영향이 56.50%를 나타냈다. 포장공사에서 사용되는 또 다른 주요자재인 골재를 포함하면 2가지 자원으로 인한 영향이 83.31%에 이른다.

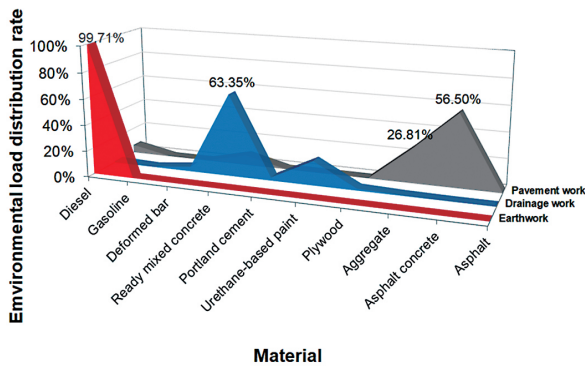


Fig. 4. Environmental impact of material by major work

각 투입자원이 주요공종 전체에 미치는 환경영향을 파악하기 위하여 <Table 4>와 같이 각 주요공종의 에코포인트를 합산하여 기여도를 분석하였다. 10개의 분석대상 자원 중 경유, 레미콘, 아스팔트콘크리트, 골재가 주요공종에서 발생시키는 환경부하는 85.10%에 달하는 것으로 조사되었다. 특히, 레미콘과 아스팔트콘크리트, 경유는 20% 이상의 높은 기여도를 나타냈다. 환경부하에 대한 영향이 클 것으로 예상된 철근은 대부분의 작업물량이 교량과 같은 구조물에 투입된다. 따라서 교량과 터널을 제외한 이 연구에서는 배수공의 암거구조물 등에서 소량만 사용되기 때문에 환경부하에 대한 영향이 1.35%로 비교적 작게 평가되었다.

한편, 배수구조물의 방수를 위한 작업 등에 사용되는 우레탄계도료는 환경부하량의 기여도가 상대적으로 작은 8.07%를 나타냈지만 작은 사용량에도 큰 환경부하를 발생시키는 특성을 가지고 있다. 우레탄계도료의 수량이 1단위 증가할 때

Table 4. Environmental load of material (eco-point/km)

Material	Environmental load (eco-point)				
	Earthwork	Drainage work	Pavement work	Sum total	Distribution rate (%)
Diesel	1.45E+02	2.94E+00	2.02E+01	1.68E+02	21.19
Gasoline	6.40E-02	2.93E-01	2.66E-02	3.84E-01	0.05
Deformed bar	-	1.07E+01	-	1.07E+01	1.35
Ready mixed concrete	-	1.94E+02	2.53E+01	2.19E+02	27.62
Portland cement	-	5.84E+00	-	5.84E+00	0.74
Urethane-based paint	-	6.40E+01	-	6.40E+01	8.07
Plywood	-	4.58E+00	-	4.38E+00	0.55
Aggregate	-	8.54E-01	8.89E+01	8.98E+01	11.32
Asphalt concrete	-	-	1.98E+02	1.98E+02	24.97
Asphalt	-	-	1.21E+00	1.21E+00	0.16
ETC	1.22E-01	2.42E+01	7.26E+00	3.16E+01	3.98
Sum total	1.45E+02	3.07E+02	3.41E+02	7.93E+02	100.00

Table 5. Factors affecting the environmental load

Class	Material	Quantity (/km)	unit	Distribution rate (%)
Major factor	Diesel	819,124.34	L	93.17
	Ready mixed concrete	4,643.51	m ³	
	Asphalt concrete	13,961.03	ton	
	Aggregate	24,382.09	m ³	
	Urethane-based paint	775.00	kg	
Minor factor	Gasoline	2,040.89	L	6.83
	Deformed bar	243.87	ton	
	Portland cement	1,903.63	sack	
	Plywood	324.76	m ²	
	Asphalt	168.79	DM	
	ETC	-	-	

발생하는 에코포인트는 <Table 4>에서 가장 큰 환경부하를 발생시키고 있는 레미콘 수량이 1단위 증가할 때 발생하는 에코포인트의 약 1,750배에 달한다. 즉, 우레탄계도료는 작업물량의 소폭 증가에도 큰 환경적 영향을 미칠 수 있는 자원이기 때문에 <Table 5>와 같이 경유, 레미콘, 아스팔트콘크리트, 골재와 함께 도로 토공작업부 환경부하의 주요 영향인자로 선정하였다.

도로 토공작업부의 환경부하에 대한 주요영향인자로 선정된 5개의 자원은 전체 환경부하에 대한 기여도가 83.73%인 토공, 배수공, 포장공에 의한 환경부하의 93.17%를 발생시킨다. 따라서 <Table 4>와 <Table 5>에서 제시한 공종별 주요 자원의 원단위 에코포인트와 자원량은 도로의 친환경설계와 시공을 위한 의사결정과정에서 작업물량절감을 위한 공법과 대체자원의 선정에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

4.3 환경비용과 탄소배출량 원단위

한정된 예산의 범위에서 사업을 수행해야 하는 도로와 같은 공공시설의 발주기관은 의사결정과정에서 사업의 경제성을 중요한 요소로 평가한다. 따라서 본 연구에서는 국제적으로 공인된 LCA 기법에 의한 환경부하평가 자료와 함께 국내 여건이 반영된 LCA 기반의 환경비용을 제시함으로써 환경경제성평가를 위한 자료를 제공하고자 하였다.

Kwon (2008)은 환경피해에 대한 비용산출을 위해 많이 사용되는 조건부가치측정법(Contingent Valuation Method, CVM)을 적용하여 환경오염개선을 위한 지불의사액을 측정함으로써 도로건설사업의 환경비용을 제시하였다. 본 연구에서는 Kwon (2008)이 제시한 환경가치가 10년전 연구결과임을 감안하여 실질할인율을 적용한 순현재가치로 환산한 후 분석을 수행하였다.

실질할인율은 자금을 차입할 경우에 지불해야 할 이자율의 기회수익률로 볼 수 있다(Choi & Lee, 1999). 따라서 명목이자율은 우리나라의 대표적 시장금리이며 건설사들에게 적용되는 기업대출 이자율의 과거 10년간(2008년 ~ 2017년) 자료(The bank of Korea, 2018)를 참조하였다. 물가상승율은 동일한 기간의 소비자물가지수(The bank of Korea, 2018)를 활용하였다. 10년간의 명목이자율과 물가상승율을 반영하여 산정된 실질할인율은 2.61%이며, 이를 통해 현재가치로 환산된 오염물질 개선을 위한 단위수량당 환경비용은 <Table 6> 과 같다.

환경영향범주별 오염물질을 개선하기 위한 환경비용은 식 (2)와 같이 환경영향범주별 특성화결과에 <Table 6>의 단위수량당 환경비용(Unit cost)을 곱하여 산정하였다. 환경영향범주별 주요 영향인자의 환경비용 산출결과는 <Table 6>에 함께 나타냈다.

$$ERC_i = \sum (E_{i,j} \times C_j) \quad (2)$$

ERC_i : i 자원의 환경(복구)비용
 $E_{i,j}$: i 자원의 j 환경영향범주에 대한 특성화결과
 C_j : j 환경영향범주의 단위수량당 환경비용

Table 6. Environmental cost of major material

		Environmental cost								
		ARD	AC	EUP	GW	OD	POC	TET	HT	Sum total
Unit cost (KRW/ton)	Proposed Kwon (2008)	316,042	65,829	1,250	28,321	160,458	23,119	929	70,483	666,431
	Present value (2017)	409,112	85,215	1,618	36,661	207,710	29,927	1,203	91,239	862,685
Environmental cost of major material (KRW/km)	Diesel	7,317,978	8,094	11	1,699,625	0	227	0	13,386	9,039,320
	Ready mixed concrete	2,775,484	279,124	615	73,048,128	37	133,157	9	22,933,208	99,169,763
	Urethane-based paint	1,475,615	69,278	129	11,038,239	19	9,655	12	12,734,993	25,327,941
	Aggregate	1,682,584	13,518	3	26,708,892	23	4,077	6	14,424,292	42,833,394
	Asphalt concrete	513,491	149,100	1,380	33,150,859	14	7,759	982	31,746,487	65,570,072
	Sum total	13,765,152	519,113	2,137	145,645,743	93	154,876	1,008	81,852,366	241,940,490

도로 토공작업부 1km를 시공함으로써 발생할 것으로 예상되는 총 환경비용은 <Table 6>에 나타난 바와 같이 약 242백만원이다. 가장 많은 환경비용이 발생하는 영향범주는 최근 세계 각국에서 환경규제의 주요 대상이 되고 있는 이산화탄소를 대표 오염원으로 규정하는 지구온난화(GW)이다. 앞서 기술한 <Table 3>의 에코포인트 분포에서는 자원고갈(ARD)이 39.11%로써 가장 많은 기여를 하고 있는 것으로 조사되었으나, 환경비용은 약 146백만원이 발생하는 지구온난화(GW)의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 환경비용의 산정예식 (2)와 같이 각 환경영향범주별 특성화결과가 사용되기 때문이다. 특성화결과는 식 (1)과 같이 정규화와 가중화 과정을 거쳐 에코포인트로 환산이 되는데, 이 때 사용되는 지구온난화(GW)의 정규화지수가 <Table 1>과 같이 자원고갈(ARD)의 약 220배에 달한다. 이러한 영향으로 LCA를 통해 정량화한 모든 잠재적 환경영향을 하나의 점수형태로 제시하는 에코포인트와 환경비용의 환경영향범주별 분포가 <Fig. 5>와 같이 다소 상이하게 나타났다. 따라서 빠른 의사결정을 위해 비교 대안의 환경적 영향을 하나의 점수로 표현한 에코포인트의 결과를 환경경제성 분석으로 확대 해석하는 것은 주의해야 할 것으로 판단된다.

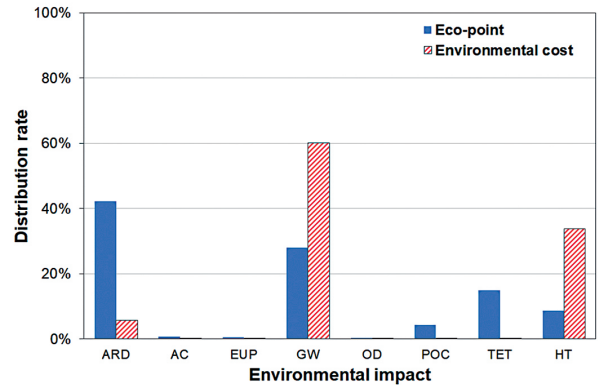


Fig. 5. Distribution of environmental impact indicator

앞서 기술한 바와 같이 최근 국내뿐만 아니라 세계건설시장은 탄소배출에 대한 규제를 강화해 나가고 있다. 본 연구에

서 수행한 영향인자에 대한 분석에서도 <Table 3> 및 <Table 6>과 같이 탄소배출에 의한 지구온난화의 영향이 상대적으로 크게 나타났다. 이에 주요자원의 감소(10%)에 따른 환경영향의 민감도분석을 수행하여 도로건설사업에서 탄소배출량 감축을 위해 중점적으로 검토해야 하는 자원과 그 영향도를 <Table 7>과 같이 제시하였다.

도로 토공작업부에 사용되는 5개 주요자원에 대한 민감도 분석결과 레미콘이 작업물량을 10% 절감했을 때 5.02%의 가장 큰 탄소배출량 감축효과를 나타냈다. 이 때 감축된 탄소배출량은 도로 1km당 199.25톤이며 환경비용은 약 7.3백만원이 절감되는 것으로 나타났다. 이는 토공작업부 전체 탄소배출량인 5,660톤(<Table 3>)의 3.52%에 해당하는 양이다. 아스팔트콘크리트는 이보다 54.16%가 작은 90.43톤이 감축되어 약 3.3백만원의 환경비용을 절감할 수 있는 것으로 조사되었다. 도로 토공작업부의 탄소배출량 감축을 위해서는 레미콘과 아스팔트콘크리트의 사용량을 감소시키기 위한 신공법이나 친환경자재의 적극적인 개발과 도입이 필요할 것으로 판단된다.

Table 7. Sensitivity analysis of carbon emission (/km)

Material	Carbon emission reduction (ton)	Carbon emission reduction rate (%)	Environmental cost reduction (KRW)
Diesel	4.64	0.12	169,963
Ready mixed concrete	199.25	5.02	7,304,811
Urethane-based paint	30.11	0.76	1,103,822
Aggregate	72.85	1.83	2,670,888
Asphalt concrete	90.43	2.28	3,315,084

5. 결론

본 연구는 도로 토공작업부의 환경성 검토를 위한 의사결정과정에서 활용할 수 있는 기초자료를 제공하기 위하여 환경부하에 대한 영향인자를 분석하고 그 원단위 값을 제시하였다. 이를 위해 30개의 도로건설공사 사례를 대상으로 LCA를 수행하고 작업공종과 투입자원의 환경부하에 대한 기여도와 특성을 분석하였다. 환경부하에 대한 누적 기여도가 83.73%를 나타낸 토공, 배수공, 포장공에 투입되는 자원 중 경유, 레미콘, 우레탄계도료, 골재, 아스팔트콘크리트가 전체 환경부하량의 93.17%를 나타냄으로써 환경성검토를 위한 주요 영향인자로 평가되었다. 환경영향범주에서는 자원고갈(ARD)과 지구온난화(GW)에 대한 영향이 39.11%와 31.12%로써 가장 크게 나타났다.

주요 영향인자에 대한 환경비용(환경복구비용)을 분석한 결과 도로 토공작업부 1km를 시공할 때 가장 큰 복구비용이

발생할 것으로 예상되는 오염물질은 약 146백만원이 산출된 이산화탄소로 나타났다. 지구온난화(GW)의 주요 오염원인 탄소배출량을 감축하기 위하여 도로 토공작업부에서 중점적으로 검토하여야 하는 자원은 레미콘과 아스팔트콘크리트로써 작업물량 10%를 절감함에 따라 5.02%와 2.28%의 탄소배출량 감축효과를 얻을 수 있다. 두 자원의 탄소배출량 감축을 통해 1km당 약 11백만원의 환경비용을 절감할 수 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 제시하는 도로 토공작업부의 환경부하에 대한 주요 영향인자와 원단위는 LCA에 의한 환경영향평가가 곤란한 도로건설공사의 기획단계에서 환경성에 대한 검토를 수행할 수 있는 기초자료가 될 수 있다. 이를 통해 사업수행의 초기단계에서 주요 검토대상 자원과 그에 따른 환경영향의 변화추이를 신속하게 파악함으로써 불필요한 시행착오로 인한 사업의 지연이나 비용발생을 예방하고 친환경 건설을 위한 대체자원이나 공법 등의 개발을 촉진할 수 있을 것이다. 또한, 본 연구에서 제시한 환경비용자료는 환경적 영향이 반영된 도로건설사업의 비용편익분석이나 탄소세부과와 같은 각종 환경규제에 대응할 수 있는 기초자료가 됨으로써 건설산업의 경쟁력 강화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술 연구사업의 연구비지원(17SCIP-C085707-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, M., and Lee, E. (1999). "LCCA method of construction industrial and application method." Construction Economy Research Institute of Korea (CERIK).
- Ecoinvent (2015). "Ecoinvent version 3." <http://www.ecoinvent.org> (Nov. 1, 2015).
- Heo, Y., Suh, S., Ha, S., and Lee, K. M. (2000). "Determination of normalization values for Korean eco-indicator." *Journal of Korean Society for Life Cycle Assessment, KSLCA*, 2(1), pp. 69-78.
- Hong, T. H., Ji, C. Y., and Jeong, K. B. (2012). "Environmental impact assessment of buildings based on life cycle assessment (LCA) methodology." *Korean Journal of Construction Engineering and Management, KICEM*, 13(5), pp. 84-93.
- ISO 14040 (2006). *Environmental management -*

- Life cycle assessment – Principles and framework*, International Organisation for Standardization (ISO), Geneve.
- Jun, H. P. (2007). “A study on the application method of life cycle assessment to evaluate environmental impact in construction.” Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul.
- Kim, S. R., Lee, D. E., and Kim, B. S. (2017). “Analysis of environment emission characteristics each construction type for road field.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, 37(1), pp. 143–151.
- Korea Environmental Industry and Technology Institute (KEITI) (2015). “Korea LCI database information network.” <http://edp.or.kr/lci/lci_db.asp> (Nov. 1, 2015)
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2010). “Korea LCI database for construction materials.” <<http://apess,kict.re.kr>> (April 1, 2010).
- Kwon, S. H. (2008). “Development of assessment model for environmental economics of construction projects.” Ph.D. thesis, Chung–ang University, Seoul.
- Lee, C. (2014). “Comprehensive environmental impact assessment of construction phase in high speed railway using LCA.” Master’s thesis, Inha University, Incheon.
- Lee, K. M. (1999). “A weighting method for the Korean eco–indicator.” *Int. J. Life cycle Assess.*, 4(3), pp. 161–165.
- Liu, C., Ahn, C., An, X., and Lee, S. (2013). “Life–cycle assessment of concrete dam construction: comparison of environmental impact of rock–filled and conventional concrete.” *J. Constr. Eng. Manage.*, ASCE, 139(12), A4013009–1–11.
- Ministry of Environment (ME) (2003). *Korean environmental impact assessment index methodology*, ME Research Report.
- Ministry of Strategy and Finance (MSF) (2013). *National financial management plan*, MSF Report.
- Min, S. G. (2013). “A study on the establishment of an environmental–load reduction plan for airport pavement.” MS. thesis, Seoul national university of science and technology, Seoul.
- Moon, J., Ju, K., Seo, M., and Kang, L. (2014). “Evaluation of environmental stress for highway construction project by life cycle assessment method.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 15(6), pp. 83–91.
- Park, J. Y., Lee, D. E., and Kim, B. S. (2016). “A study on analysis of the environmental load impact factors in the planning stage for highway project.” *KSCE J. Civil Engineering*, KSCE, 20(6), pp. 2162–2169.
- Park, P. J., Kim, M. Y., and Yi, I. S. (2009). “Analysis CO2 emission intensity per industry using the input–output tables 2003.” *Environmental and Resource Economics Review*, Korea Resource Economics Association (KREA), 18(2), pp. 279–311.
- Parrish, K., and Chester, M. (2014). “Life–cycle assessment for construction of sustainable infrastructure.” *Prac. Period. Struct. Des. Constr.*, ASCE, 19(1), pp. 89–94.
- The bank of Korea (2018). “Economics Statistics System.” <<http://ecos.bok.or.kr>> (Feb. 1, 2018)
- Thiel, C., Stengel, T., and Gehlen, C. (2014). “Life cycle assessment(LCA) of road pavement materials.” *Eco–Efficient Construction and Building Materials*, pp. 368–403.
- Treloar, G., Love, P., and Crawford, R. (2004). “Hybrid life–cycle inventory for road construction and use.” *J. Constr. Eng. Manage.*, ASCE, 1(43), pp. 43–49.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015). *Submission by the Republic of Korea Intended Nationally Determined Contribution*.
- Yue, H., Roger, B., and Oliver, H. (2008). “Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements.” *J. Cleaner Prod.*, 17(2), pp. 283–296.

요약 : 건설산업에서 LCA (Life Cycle Assessment)를 활용하여 환경영향을 평가하려는 시도가 점차 증가하고 있다. 그러나 제한된 사업예산과 일정으로 인해 신속한 의사결정을 수행해야 하는 국내 건설산업에서 모든 자재와 에너지를 대상으로 환경부하량에 대한 검토를 수행하는 것은 곤란하다. 따라서 친환경성 확보를 위한 의사결정과정에서 환경부하 저감을 위해 중점적으로 검토가 수행되어야 하는 주요 영향인자와 이를 환경영향평가로 연계할 수 있는 정량화된 정보의 제공이 요구된다. 이 연구에서는 이러한 정보의 제공을 위해 도로건설공사 사례의 LCA결과를 분석하였다. 분석결과 경유, 레미콘, 우레탄계도로, 골재, 아스팔트콘크리트가 도로 토공작업부에서 환경부하량의 93.17%를 발생시키는 주요 영향인자로 조사되었다. 도로 토공작업부 1km를 시공할 때 이들 영향인자에 의해 발생하는 총환경비용은 약 242백만원이며 레미콘과 아스팔트콘크리트의 작업물량 10%를 절감함에 따라 5.02%와 2.28%의 탄소배출량 감축효과를 얻을 수 있다. 두 자원의 탄소배출량 감축을 통해 1km당 약 11백만원의 환경비용을 절감할 수 있는 것으로 분석되었다. 도로 토공작업부의 탄소배출량 감축을 위해서는 레미콘과 아스팔트콘크리트의 사용량을 감소시키기 위한 신공법이나 친환경자재의 적극적인 개발과 도입이 필요할 것으로 판단된다.

키워드 : 전과정평가, 환경부하, 영향인자, 탄소배출, 환경비용
