

프리스트레스 콘크리트 거더의 LCA기반 환경영향 분석

최경찬* · 김도훈** · 박진영*** · 김병수****

Choi, Gyeong-Chan*, Kim, Do-Hoon**, Park, Jin-Young***, Kim, Byung-Soo****

LCA-based Environmental Impact Analysis for Prestressed Concrete Girders

ABSTRACT

Bridges which are components of road network consume large amounts of resources such as concrete and steel materials, which have large environmental impacts during construction. This causes a great environmental burden. In order to reduce the environmental impact caused by the construction of the bridge, the environmental impact should be reviewed based on reasonable data in the early design stage. The purpose of this study is to provide basic data for LCA-based environmental impact assessment in the process of selecting bridge type in the early design stage. For this purpose, design data for four types of PSC bridges (general PSC girder, IPC girder, e-Beam, DR girder) were collected and LCA was performed to analyze the basic unit value and impact factors of environmental load. The results of the analysis showed that the environmental impact of IPC girder was the smallest, and the environmental impact of e-Beam was 133.7% higher than that of IPC girder. In addition, concrete, reinforcement, PC strand, square timber, sheath pipe, and steel plate were derived as the main factors that generate 98.5% of the overall environmental impact of PSC girder.

Key words : Road project, Bridge, Environmental impact, PSC girder, LCA

초 록

도로의 부속시설인 교량은 시공과정에서 콘크리트 및 강재와 같이 환경영향이 큰 자원을 다량 소비하며 이로 인해 큰 환경적 부담을 발생시킨다. 교량의 시공으로 인해 발생하는 환경영향을 줄이기 위해서는 초기 설계단계에서 합리적인 자료를 토대로 환경영향에 대한 검토가 수행되어야 한다. 이 연구는 초기 설계단계의 교량형식 선정과정에서 LCA (Life Cycle Assessment) 기반의 환경영향평가가 가능한 기초자료를 제공하고 자 하였다. 이를 위해 기 시공된 4가지 형식(일반 PSC거더, IPC거더, e-Beam, DR거더)의 PSC교량에 대한 설계자료를 수집하고 LCA를 수행하여 환경부하 원단위값과 영향요인을 분석하였다. 분석결과 IPC거더의 환경영향이 가장 작게 나타났고, e-Beam의 환경영향은 IPC거더 보다 133.7% 크게 평가되었다. 또한 콘크리트, 철근, PC강연선, 각재, 쉬즈관, 강판이 PSC거더 전체 환경영향의 약 98.5%를 발생시키는 주요인자로 도출되었다.

검색어 : 도로, 교량, 환경영향, PSC거더, 전과정평가

* 경북대학교 토목공학과 석사 (Kyungpook National University · choigyeongchan@naver.com)

** 경북대학교 토목공학과 석사 (Kyungpook National University · astroboy723@nate.com)

*** 중신회원 · 경북대학교 지능형건설자동화연구센터 연구교수 (Kyungpook National University · jinypark@knu.ac.kr)

**** 중신회원 · 교신저자 · 경북대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Kyungpook National University · bskim65@knu.ac.kr)

Received October 23, 2019/ revised November 5, 2019/ accepted November 6, 2019

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설 프로젝트는 시공과정에서 많은 건설자재와 에너지를 소비함으로써 다량의 환경오염물질을 배출한다. 특히 전 세계적으로 기후변화를 유발하며 큰 이슈가 되고 있는 이산화탄소의 경우 국내 28개 산업분야 중 세 번째로 많은 양을 배출하고 있는 실정이다 (Park et al., 2009).

국내 사회간접자본(Social Overhead Capital, SOC) 투자액의 33 %를 차지하고 있는 도로의 부속 시설물로서 건설되는 교량은 시공연장이 전체 도로연장의 10~15 %에 불과하지만 건설과정에서 환경영향이 큰 자재(콘크리트, 강재, 화석연료 등)를 소비하기 때문에 환경적 부담을 크게 가중시킬 수 있다. 이러한 환경적 부담을 줄이기 위해서는 교량공법을 결정하는 의사결정단계에서 환경영향에 대한 합리적인 분석결과를 토대로 환경영향이 큰 자재의 사용을 줄이거나 친환경 자재로 대체하기 위한 검토가 수행되어야 한다.

최근 정량적 지표를 사용하여 환경영향을 분석하는 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)의 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)가 합리적인 환경영향평가 방법론으로써 여러 분야에 도입되어 활용되고 있다. LCA는 환경영향에 대한 정량적 자료를 제공할 수 있다는 점에서 상당히 유용한 방법으로 평가되고 있다(Jun, 2007). 그러나 발주자의 주문 생산방식으로 수행되는 건설 프로젝트는 한 번의 설계로 대량생산이 가능한 일반 제조업과 달리 공정의 표준화가 곤란하기 때문에 설계가 완료될 때까지 환경영향의 정량화 과정에서 필요한 기초자료를 제공하는 것이 불가능하다(Kwak, 2007; Park, 2017). 따라서, 초기 설계단계에서 공법선정을 위한 의사결정과정에 LCA가 활용되지 못하고 있다.

이 연구는 환경영향의 정량화를 통해 합리적인 방법론으로 평가되고 있는 LCA가 건설 프로젝트의 교량공법 선정과정에 활용될 수 있도록 기초자료를 제공하는 데 목적이 있다. 이를 위해 PSC교량을 대상으로 LCA를 수행하고 환경영향을 정량화하여 그 원단위를 제시하고자 한다. 또한 주요 환경영향 인자(자재)를 도출하여 원단위 값과 함께 제공함으로써 PSC교량의 친환경성 확보를 위한 검토에 유용한 자료를 제공하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

현대사회의 운송체계에서 중추적인 역할을 수행하고 있는 도로의 부속시설물로서 설치되는 교량은 일반적으로 상부공의 거더에 사용되는 주재료의 종류와 구조형식에 따라 분류한다. 교량의 거더에 주로 사용되는 재료는 강재와 콘크리트이다. 이중 우리나라의 교량시설에 많이 채용되는 재료는 콘크리트이며, 이중 PSC거더를

채용한 교량이 전체 교량의 약 45 %를 차지하고 있다(KISTEC, 2017). 따라서 교량의 환경영향을 평가하기 위한 기초자료의 제공을 목적으로 하는 이 연구는 PSC거더 교량을 분석대상으로 선정하였다. 분석과정에서 거더의 특성에 따른 시공단계(PSC거더 제작)의 환경영향을 명확하게 도출하기 위하여 거더 이외의 상부공(슬래브, 중앙분리대, 난간 등)과 하부공(교대, 교각, 기초 등), 그리고 PSC거더의 가설작업은 분석대상에서 제외하였다.

PSC거더의 제작으로 인해 발생이 예상되는 환경영향은 LCA를 통해 정량화하였다. 이를 위해 도로의 설계과정에서 많이 채택되는 4가지 형식의 PSC거더(일반 PSC거더, IPC거더, e-Beam, DR거더)를 대상으로 설계자료를 수집하여 투입되는 자원과 에너지양을 분석하였다. LCA결과는 설계과정에서 간편하게 적용할 수 있도록 원단위로 제시하고 자원별 환경영향에 대한 기여도 분석을 통해 PSC거더의 주요 환경영향인자를 도출하여 제시하였다.

1.3 선행연구 분석

LCA가 시공과정에서 발생이 예상되는 잠재적 환경영향을 합리적으로 정량화할 수 있는 방법론으로 평가되면서 건설 분야에서도 이를 적극 활용하기 위한 연구가 활발하게 수행되고 있다. 특히 도로와 교량 및 터널과 같은 그 부속 시설물을 대상으로 많은 연구자들이 LCA를 활용하여 환경영향을 평가하고자 하였다.

Moon et al.(2014)과 Park et al.(2018)은 기 시행된 도로를 대상으로 LCA를 통해 환경영향을 분석하고 그 영향요인과 원단위 값을 제시하였다. Kwon(2008)은 LCA분석 자료를 활용하여 도로 프로젝트의 환경영향을 경제적 관점에서 분석하여 환경비용을 산정한 바 있다. 이 연구들은 도로 프로젝트 전체를 대상으로 환경영향을 평가하고 그 원단위를 제시함으로써 세부적인 공법선정을 위한 자료로 활용하기에는 한계를 가지고 있다.

Thiel et al.(2014)과 Min(2013)은 포장공사에 사용되는 재료에 대한 LCA를 통해 재료의 특성에 따른 환경영향을 분석하고 포장공법에 따른 환경영향의 저감효과를 정량적으로 제시하였으며, Liu et al.(2013)은 댐의 주재료를 대상으로 환경영향을 분석하여 비교함으로써 친환경공법이나 자재선정을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

교량을 대상으로 수행한 연구는 Steel box거더, Concrete box거더, 목조이치 형식을 대상으로 LCA를 수행하고 원단위를 산출하여 비교한 연구와(Hammervold et al., 2013) PSC교량을 대상으로 LCA를 수행하고 환경영향범주별 기여도와 재료별 특성을 분석한 연구가 수행되었다(Cho et al., 2016). 이 연구들은 교량의 주재료가 상이한 교량을 대상으로 환경영향을 비교하거나 전통적인 PSC거더(일반 PSC거더)가 적용된 교량만을 대상으로 LCA를 수행하였으며, 상부공과 하부공이 모두 포함된 교량 전체의 환경영향을

분석하였다. 따라서, 분석된 자료를 활용하여 유사한 구조형식에 대한 환경성을 비교하거나 동일한 구조형식과 재료를 대상으로 거더만의 영향을 파악하는데 어려움이 있다.

2. 전과정평가

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). 생산품의 전생애주기 관점에서 환경영향을 평가하기 때문에 LCA를 ‘요람에서 무덤까지(Cradle-to-grave)’ 환경영향평가 방법론이라 칭한다(Cabeza et al., 2014). 또한 SOC의 건설로 인해 발생이 예상되는 환경부하를 평가하기 위한 방법론 중 가장 합리적인 기법으로 평가되고 있다(Yue et al., 2008; Treloar et al., 2004).

LCA에서 환경영향의 정량적 지표인 환경부하는 시설물의 전생애주기 동안 지구환경에 영향을 미치는 인자들에 대한 부담정도를 정량화한 것으로서(Lee and Lee, 1996) ISO 14040 (ISO, 2006)에서 Fig. 1과 같이 표준화된 프로세스를 제시하고 있다.

LCA의 첫 번째 단계인 목적 및 범위설정에서는 평가의 목적과 필요한 가정 및 제한 그리고 목록분석의 기준이 되는 기능단위를 설정한다. 두 번째 목록분석 단계에서는 생산공정에 투입되는 자원과 이로 인해 배출되는 물질을 정량화하여 수집한다. 마지막 단계인

영향평가에서는 해당되는 환경영향범주로 분류한 자원 및 배출물질의 기여도를 평가함으로써 환경부하를 산출하게 된다.

3. PSC거더의 LCA

3.1 목적 및 범위설정

이 연구에서 LCA의 목적은 초기 설계단계에서 환경성 평가를 위한 기초자료를 제공하는데 있다. 이를 위해 Table 1과 같이 국내에서 국도건설공사의 설계에 반영되어 기 시공된 PSC거더형식의 교량을 대상으로 설계도서를 수집하였다. 분석을 위해 수집한 PSC거더 교량은 4가지 형태로써 일반 PSC거더와 최근 많이 채택되고 있는 개량형 PSC거더인 IPC (Incrementally prestressed concrete) 거더, e-Beam (Effective prestressed concrete beam), DR (PSC girder with detensioning and retensioning system) 거더이다. 앞서 언급한 바와 같이 LCA는 시설물의 전생애주기에 걸쳐 발생하는 환경영향을 정량화하는 기법이지만 이 연구에서는 객관적인 자료수집이 가능한 시공단계의 환경영향에 대한 평가만을 수행하였다. 또한 수량산출서와 단가산출서의 분석을 통해서 산출하는 환경부하는 각 공법별 거더의 경간장과 단면의 규모에 의한 영향을 배제하고 동일한 조건에서 비교하기 위하여 거더의 표면적으로 정규화를 하여 나타냈다.

PSC거더의 환경영향 분석을 통해 도출한 각 공법별 환경부하 특성과 그 원단위는 초기 설계단계의 교량공법 선정을 위한 의사결정과정에서 환경성을 평가하는 유용한 기초자료로 활용될 수 있다.

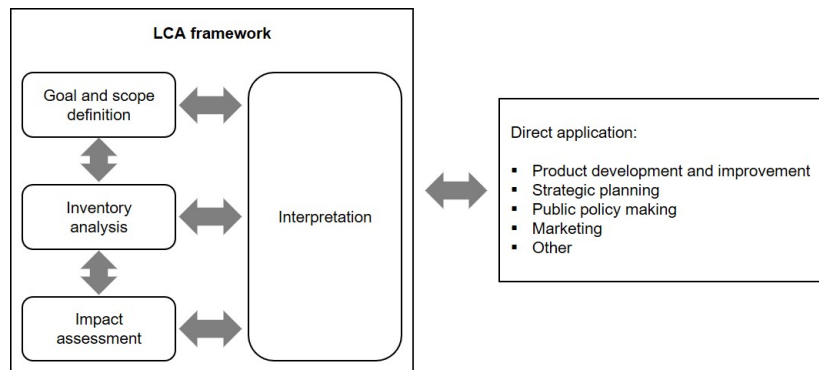


Fig. 1. Stages of an LCA (ISO, 2006)

Table 1. Overview of Cases

Class	No. of Girders	Span Length (m)	Surface Area (m ²)
General PSC	10	35.0	2,259.67
IPC	10	35.0	2,276.96
e-Beam	10	45.0	3,207.68
DR	8	40.0	2,184.00

3.2 목록분석

이 연구에서는 특정자원에 대한 기능단위의 환경부하를 데이터베이스(Database, DB)로 구축하여 둔 LCI (Life cycle inventory) DB를 목록분석에 활용하였다. 분석에 주로 활용된 LCI DB는 한국환경산업기술원에서 제시하는 국가 LCI DB (KEITI, 2019)와 한국건설기술연구원에서 제공하는 DB (KICT, 2010)이며, 여기에서 제공하지 않는 자원 또는 에너지는 해외 DB인 Ecoinvent version 3 (Ecoinvent, 2015)을 활용하였다. 이들 LCI DB는 자원 고갈(Abiotic resource depletion, ADP), 산성화(Acidification,

AP), 부영양화(Eutrophication, EP), 지구온난화(Global warming, GWP), 오존층파괴(Ozone layer depletion, ODP), 광화학산화물 생성(Photochemical oxidant creation, POCP), 생태계독성(Terrestrial eco-toxicity, TETP), 인간독성(Human toxicity, HTP)의 8개 환경영향범주를 대상으로 자료를 제공하고 있다.

LCI DB와 연계를 통해 PSC거더의 시공단계에서 발생이 예상되는 환경부하를 산출하기 위하여 수량산출서와 단가산출서 등의 설계도서를 분석하고 PSC거더의 제작 공중에 투입되는 자원과 에너지에 대한 정보를 수집하였다. 설계도서에서 수집된 자원과 에너지는 Table 2와 같이 연계가 가능한 국내 및 해외 LCI DB의 대표자원으로 할당하였다.

Table 2. Resource Inventory of PSC Girder

Resource	Unit	LCI DB Category	Unit
Ready-Mixed Concrete	m ³	Ready-Mixed Concrete	m ³
Rebar	kg	Rebar	kg
PC Strand	kg	Wire Rod	kg
Welding Rod	kg		
Bolt/Nail/Nut	kg		
Steel Plate	ton	Steel Plate	ton
Hot Rolled Steel	ton	Hot Rolled Steel	ton
Diesel	L	Diesel	kg
Gasoline	L	Gasoline	kg
Angles	kg	Electric Steel Section	kg
Cement	Pack	Cement	kg
Timber	m ³	Plywood	m ³
Plywood	m ³		
Sand	m ³	Sand	m ³
Sheath Pipe	m	PVC	kg
PVC Pipe	m		
Acetylene	kg	Acetylene	kg

3.3 영향평가

분석 대상이 되는 각 PSC거더 공법에 투입되는 자원과 에너지량을 LCI DB의 대표자원과 연계하여 Table 3과 같이 8개 환경영향범주에 대한 부하량(특성화값)을 산정하였다. 최근 기후변화의 주원인으로 평가되며 전 지구적 규제의 대상이 되고 있는 CO₂는 일반 PSC거더와 e-Beam이 상대적으로 많은 104 kg과 110 kg을 배출하는 것으로 분석되었다. IPC거더와 DR거더의 CO₂배출량은 일반 PSC거더의 84.5 %와 88.1 %로 조사되어 상대적으로 지구온난화(GWP)의 영향이 작은 공법임을 보였다. 개량형 PSC공법인 IPC거더는 Table 3과 같이 8개 환경영향범주 중 자원고갈(ADP), 산성화(AP), 부영양화(EP), 지구온난화(GWP), 오존층파괴(ODP), 광화학산화물생성(POCP), 인간독성(HTP) 등 7개 범주에서 환경부하가 가장 작게 나타나 가장 친환경적 공법으로 평가되었다. 반면 e-Beam은 부영양화(EP)와 생태계독성(TETP)을 제외한 6개 환경영향범주에서 환경부하가 가장 크게 평가되어 환경적 영향을 감축하기 위한 방안이 필요한 것으로 분석되었다.

Table 3. LCA Results (/m²)

Impact Category	Environmental Load									
	Characterized Result					Weighted Result				
	Unit	General PSC	IPC	e-Beam	DR	Unit	General PSC	IPC	e-Beam	DR
ADP	kg Sb-eq	3.72E-01	2.88E-01	4.53E-01	2.99E-01	Eco-point	3.45E-03	2.68E-03	4.21E-03	2.78E-03
AP	kg SO ₂ -eq	2.47E-01	1.90E-01	2.47E-01	2.11E-01		2.23E-04	1.72E-04	2.24E-04	1.91E-04
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	6.96E-2	6.22E-02	6.63E-02	9.47E-02		2.02E-04	1.80E-04	1.92E-04	2.75E-04
GWP	kg CO ₂ -eq	1.04E+02	8.79E+01	1.10E+02	9.16E+01		5.41E-03	4.58E-03	5.71E-03	4.77E-03
ODP	kg CFC11-eq	6.45E-06	5.55E-06	6.71E-06	5.61E-06		4.62E-05	3.98E-05	4.81E-05	4.02E-05
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq	2.00E-01	1.75E-01	2.34E-01	1.80E-01		1.26E-03	1.10E-03	1.47E-03	1.13E-03
TETP	kg 1,4DCB-eq	2.20E-03	2.07E-03	2.03E-03	3.26E-03		2.91E-04	2.74E-04	2.69E-04	4.32E-04
HTP	kg 1,4DCB-eq	1.03E+01	8.82E+00	1.06E+01	9.16E+00		7.29E-04	6.26E-04	7.52E-04	6.50E-04
Total	-	-	-	-	-		1.16E-02	9.65E-03	1.29E-02	1.03E-02

LCA를 통해 산출한 환경부하(특성화값)는 Table 3과 같이 각 환경영향범주에 대한 대표오염물질의 등가무게로 표현되기 때문에 산술적 합산을 통해서 8개 환경영향범주가 모두 고려된 평가결과를 도출할 수 없다. 그러나 LCA결과를 제품의 환경성에 관한 의사결정의 수단으로 사용할 경우 모든 환경영향범주에 대한 단일 점수화는 신속한 의사결정을 위해 매우 중요하다(ME, 2003). 이 연구에서는 환경부에서 제시한 Table 4의 한국형환경영향지수(Lee, 1999; Heo et al., 2000)를 적용하여 8개 환경영향범주의 환경부하를 에코포인트(Eco-point)로 단일 점수화하였다(Eq. (1)).

$$P_E = \sum \{ (C_i / N_i) \times w_i \} \quad (1)$$

여기서, P_E 는 총에코포인트(Eco-point), C_i 는 i 환경영향범주의 환경부하(특성화값), N_i 는 i 환경영향범주의 정규화지수, w_i 는 i 환경영향범주의 가중화지수이다.

4. 결과분석 및 논의

4.1 PSC거더의 환경부하 특성 및 원단위

이 연구에서 8개 환경영향범주를 분석에 모두 반영하기 위하여

Table 4의 한국형환경영향지수를 Eq. (1)에 적용하여 산출한 각 PSC거더 공법별 환경부하(가중화값)은 Table 3에 환경부하(특성화값)과 함께 나타내고 PSC거더 공법별 환경부하 특성분석에 활용하였다.

모든 환경영향범주의 평가결과가 합산된 에코포인트(Eco-point)는 일반 PSC거더가 단위표면적당 1.16E-02를 나타냈다. IPC거더와 DR거더는 일반 PSC거더의 83.2 %와 88.8 % 수준인 거더의 단위표면적당 9.65E-03에코포인트와 1.03E-02에코포인트가 산정되었다. 앞절에서 가장 많은 CO₂를 배출하는 것으로 평가된 e-Beam은 모든 환경영향범주를 포함하는 환경부하(가중화값)평가에서도 1.29E-02에코포인트로써 가장 환경영향이 큰 공법으로 조사되었다. 이는 일반 PSC거더의 111.2 %, IPC거더의 133.7 %, DR거더의 125.2 %에 해당하는 값이다.

각 PSC거더 공법별 환경부하(가중화값)의 분포를 살펴보면 Table 5와 같이 분석에 사용된 모든 PSC거더 공법이 유사한 경향을 나타냈다. PSC거더의 제작으로 인해 발생하는 환경부담 중 지구온난화(GWP)에 의한 영향이 가장 많은 전체 환경부하의 44.3-47.4 %를 나타냈고, 자원고갈(ADP)의 영향이 27.1~32.7 %를 보였다. 지구온난화(GWP)와 자원고갈(ADP)의 합은 전체 환경부하(가중화값)의 약 76 %에 달한다. 이는 Table 5에 나타낸 바와 같이 지구온난화

Table 4. Korea Eco-Indicator (Lee, 1999)

Impact category	Unit	Normalization factor (N _i)	Weight factor (w _i)	Converted unit
ADP	kg Sb-eq	24.9	0.231	Eco-point
AP	kg SO ₂ -eq	39.8	0.036	
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	13.1	0.038	
GWP	kg CO ₂ -eq	5,530	0.288	
ODP	kg CFC11-eq	0.0407	0.292	
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq	10.3	0.065	
TETP	kg 1,4DCB-eq	1.63	0.216	
HTP	kg 1,4DCB-eq	1,480	0.105	

Table 5. Environmental Impact Distribution (%)

Impact Category	PSC Girder				Ready-Mixed Concrete
	General PSC	IPC	e-Beam	DR	
ADP	29.7	27.8	32.7	27.1	28.4
AP	1.9	1.8	1.7	1.9	1.3
EP	1.7	1.9	1.5	2.7	0.5
GWP	46.6	47.4	44.3	46.4	46.0
ODP	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6
POCP	10.9	11.4	11.4	11.0	14.9
TETP	2.5	2.8	2.2	4.2	0.4
HTP	6.3	6.5	5.8	6.3	7.9

(GWP)와 자원고갈(ADP)의 영향이 각각 46.0 %와 28.4 %를 보이는 레미콘의 환경영향범주별 분포와 일치하는 결과이다. 즉, PSC거더의 환경부하는 레미콘 자재가 가장 큰 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다.

4.2 환경부하 영향인자

PSC거더의 제작에는 콘크리트, 철근, 강연선, 경유 등 약 20여개 이상의 자원과 에너지가 투입된다. Table 6은 이들 자원과 에너지 중 각 PSC거더 공법에서 환경영향이 비교적 크게 나타나는 항목을 나타낸 것이다.

PSC거더의 제작에 투입되는 자원과 에너지 중 콘크리트, 철근, PC강연선, 각재, 슈즈관, 강판의 6개 자원이 Table 6에 나타낸 바와 같이 전체 환경부하(가중화값)의 97.7~99.3 %를 차지하고 있다. 즉, 이들 6개 자원을 PSC거더 공법의 환경부하에 영향을 미치는 주요인자로 볼 수 있으며 PSC거더의 환경성을 개선하기 위해서는 이들 자원의 사용량을 감축하거나 친환경 자원으로 대체하여야 함을 나타낸다.

콘크리트는 Table 6과 같이 거더의 단위표면적당 6.35E-03 ~7.21E-03에코포인트의 환경부하(가중화값)가 발생하여 각 PSC 거더 공법 전체 부하량 중 가장 많은 54.4~66.8 %를 차지하고 있다. 이는 앞서 Table 5에서 제시한 내용과 일치하는 결과이다. 콘크리트와 함께 구조물의 주요재료로 분류되는 철근은 일반 PSC 거더의 경우 총에코포인트의 19.9 %에 해당하는 환경부하(가중화

값)가 발생하는 것으로 분석되었다. 그러나 개량형 PSC거더인 IPC거더, e-Beam, DR거더는 6.5~8.2 %의 환경부하(가중화값)가 발생하는 것으로 조사되었다. 이는 일반 PSC거더를 개량하면서 철근이 부담하는 응력을 프리스트레스를 통해 PC강연선에 추가로 할당하면서 철근수량이 감소했기 때문이다. 건설 프로젝트의 환경 부하는 자재 및 에너지의 소비량과 상관성이 높기 때문에 자원의 절감은 환경부하의 감축으로 이어질 수 있다(Park et al., 2016). PC강연선의 환경부하(가중화값)는 Table 6에 나타낸 바와 같이 일반 PSC거더 보다 개량형 PSC거더 공법이 증가하였다.

각재와 슈즈관은 4가지 PSC거더가 유사한 분포를 나타냈다. 강판은 일반 PSC거더에서는 0.001 kg/m²의 강판이 사용되어 1.13E-07에코포인트의 환경부하(가중화값)가 발생하였으나, IPC 거더에서는 725배 증가한 0.725 kg/m²의 강판이 사용되어 환경부하가 373배 증가하였다. e-Beam에서는 거더의 중앙부 보강강판과 연속부 연결강판에 다량의 강재가 사용되면서 일반 PSC거더의 15,695배에 달하는 강판자재의 투입으로 환경부하(가중화값)가 20,796배 증가하였다. 이 결과는 전체 환경부하(가중화값)의 상승으로 이어져 Table 3에 제시한 환경부하(가중화값) 합계와 같이 e-Beam의 환경영향이 가장 크게 평가되었다.

이 연구에서 제시한 Table 6의 PSC거더에 대한 주요 환경영향요인을 대상으로 비용의 영향과 환경부하의 영향에 대한 상관관계를 분석하여 친환경성 확보를 위해 우선적으로 개선해야 하는 자원을 분석하였다.

Table 6. Environmental Impact of Major Materials (Eco-point/m²)

Resource	General PSC	IPC	e-Beam	DR
Concrete	7.21E-03	6.45E-03	7.02E-03	6.35E-03
Rebar	2.31E-03	7.93E-04	8.34E-04	7.01E-04
PC Strand	9.42E-04	1.10E-03	1.31E-03	1.12E-03
Timber	8.33E-04	8.38E-04	7.79E-04	1.45E-03
Sheath	2.28E-04	2.14E-04	3.02E-04	2.09E-04
Steel Plate	1.13E-07	4.22E-05	2.35E-03	3.50E-04
Total Sum.	1.15E-02	9.43E-03	1.26E-02	1.02E-02
Distribution Rate (%)	99.30	97.70	97.90	99.16

Table 7. Material Cost Distribution Ratio (%)

Resource	General PSC	IPC	e-Beam	DR
Concrete	13.6	18.8	13.8	18.3
Rebar	54.3	28.9	20.4	25.1
PC Strand	17.3	33.7	25.1	31.2
Timber	2.6	4.4	3.7	7.5
Sheath	7.2	10.5	9.9	10.0
Steel Plate	0.0013	1.5	22.9	5.0

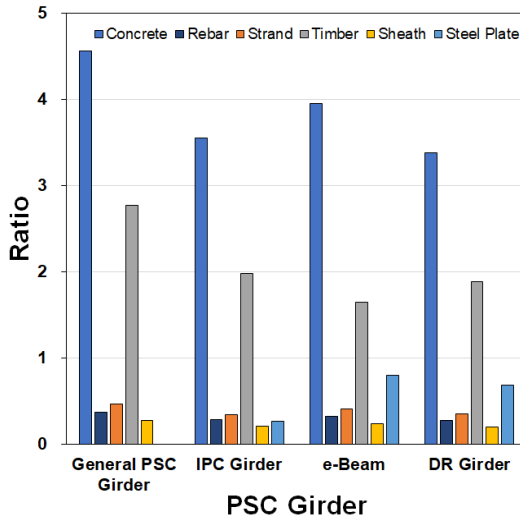


Fig. 2. Environmental Impact Ratio

PSC거더의 제작에 투입되는 철근은 Table 7과 같이 전체 재료비 중에서 20.4~54.3 %를 차지한다. 반면 철근으로 인해 발생하는 환경부하(가중화값)는 6.5~19.9 % 수준이다. 콘크리트는 전체 재료비의 13.6~18.8 %를 나타내지만 환경부하는 이보다 3.6~4.0 배 크게 발생한다. 각 PSC거더 공법에 투입되는 자원 및 에너지의 종류가 20여 가지 이상임을 감안하면 상당한 비중이라 할 수 있다. 즉, PSC거더에서 콘크리트는 다른 주요 자원보다 투입되는 재료비용과 비교하여 상당한 규모의 환경부하를 발생시키는 자원인 것이다. Table 6에서 제시한 6개 주요자원을 대상으로 각 PSC거더 공법별 환경부하 분포율을 산출한 후 Table 7의 재료비 분포율로 나누어 Fig. 2의 환경영향도를 산정하였다.

환경영향도가 크다는 것은 해당 자원 또는 에너지가 전체 재료비에서 차지하는 비중을 비해 큰 환경부하를 발생시킬 수 있음을 의미한다. PSC거더 공법의 경우 콘크리트의 환경영향도가 3.4~4.6으로 가장 크게 산출되었으며, 각재가 1.6~2.8을 나타내 PSC거더 공법의 환경영향을 개선하기 위해서 가장 먼저 검토해야할 자원으로 분석되었다. 한편, 일반 PSC공법을 개량하면서 e-Beam, DR거더에서 그 투입량이 크게 증가한 강판은 Table 6에서와 같이 환경부하의 증가에는 큰 영향을 미쳤으나 투입되는 재료비용 측면에서 환경영향을 검토하면 Fig 2에 제시한 것과 같이 그 영향이 콘크리트나 각재에 비하여 상대적으로 작게 나타났다.

5. 결론

이 연구는 초기 설계단계에서 PSC거더 교량의 공법을 선정하는 과정에 LCA 기반의 환경영향 평가가 가능하도록 기초자료를 제공하는 데 목적이 있다. 이를 위해 국도건설사업의 일부로써 설계에

반영되어 시공된 4가지 형식의 PSC거더 교량에 대한 설계자료를 수집하고 LCA를 수행하여 환경부하 특성을 분석하였다. 또한 LCA결과를 활용하여 각 PSC거더 공법의 원단위 환경부하를 제시하고 주요영향인자(자재)를 도출하였다.

PSC거더는 이 연구에서 수행한 8개 영향범주에 대한 환경영향평가에서 CO₂를 대표물질로 하는 지구온난화(GWP)가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 발생이 예상되는 CO₂양은 거더의 단위표면적당 87.9~110 kg이다. 환경부하(특성화값)를 8개 환경영향범주가 모두 내재된 환경부하(가중화값)로 환산하여 분석한 결과 IPC거더의 환경영향이 9.65E-03에코포인트로 가장 작게 평가되었으며, 일반 PSC거더 보다 강재의 사용량이 크게 증가한 e-Beam이 1.29E-02에코포인트를 나타내 환경영향이 가장 큰 것으로 조사되었다.

PSC거더의 제작에 투입되는 20여개의 자원 중 콘크리트, 철근, PC강연선, 각재, 슈즈관, 강판의 6개 자원이 전체 환경부하량의 97.7~99.3 %를 나타내 PSC거더의 환경부하에 영향을 미치는 주요인자로 도출되었다. 이들 자원 중 콘크리트와 각재는 투입되는 재료비율보다 큰 환경부하를 발생시킬 수 있는 것으로 분석되어 PSC거더의 환경영향을 감축하기 위해서 가장 먼저 검토해야하는 자원으로 평가되었다.

이 연구에서 제시하는 PSC거더 공법별 환경부하 특성과 그 원단위는 LCA 수행이 곤란한 초기 설계단계에서 PSC교량을 선정할 때 합리적인 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 신속한 의사결정을 지원하고 시행착오로 인한 사회적 비용의 증가를 예방할 수 있을 것이다. 또한 함께 제시하고 있는 PSC거더의 환경부하 영향인자에 대한 자료는 친환경 공법과 자재개발을 촉진함으로써 우리 건설 산업의 경쟁력 제고에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018R1A2 B6009111)

References

Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilarinho, V., Pérez, G. and Castell, A. (2014). "Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 394-416.

Cho, N., Yun, W. G., Lee, W. R. and Kim, K. J. (2016). "An analysis of the characteristics of environmental impact for PSC beam bridges using life cycle assessment." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 36, No. 2, pp. 297-305 (in Korean).

- Ecoinvent (2015). *Ecoinvent version 3*, Available at: <http://www.ecoinvent.org> (Accessed : November 1, 2015).
- Hammervold, J., Reenaas, M. and Brattebø, H. (2013). "Environmental life cycle assessment of bridges." *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 18, No. 2, pp. 153-161.
- Heo, Y. C., Seo, S. W. and Lee, K. M. (2000). "Determination of normalization values for Korean eco-indicator." *Journal of KSLCA*, KSLCA, Vol. 2, No. 1, pp. 69-78 (in Korean).
- 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, Vol. 13, No. 5, pp. 84-93 (in Korean).
- International Organization for Standardization (ISO) (2006). *Environmental management -Life cycle assessment- Principles and framework*, ISO, Geneva.
- 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, South Korea (in Korean).
- Korea Environmental Industry and Technology Institute (KEITI) (2019). *Korea LCI database information network*, Available at: http://edp.or.kr/lci/lci_db.asp (Accessed: January 1, 2019).
- Korea Infrastructure Safety Corporation (KISTEC) (2017). *Specifications for public bridge facilities*, Available at: <https://www.data.go.kr> (Accessed: January 1, 2019).
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2010). *Korea LCI database for construction materials*, Available at: <http://apess.kict.re.kr> (Accessed: January 1, 2010).
- Kwak, S. N. (2007). *Cost prediction model of planning and design phase using available information*, MSc Thesis, Yonsei University, Seoul, South Korea (in Korean).
- Kwon, S. H. (2008). *Development of assessment model for environmental economics of construction projects*, Ph.D. Thesis, Chungang University, Seoul, South Korea (in Korean).
- Lee, K. H. and Lee, K. H. (1996). "The estimation of amount of energy consumption and CO2 emission in construction activities." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 12, No. 7, pp. 197-204 (in Korean).
- Lee, K. M. (1999). "A weighting method for the Korean eco-indicator." *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 4, No. 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." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 139, No. 12, A4013009-1-11.
- Min, S. G. (2013). *A study on the establishment of an environmental-load reduction plan for airport pavement*, MSc Thesis, Seoul national university of science and technology, Seoul, South Korea (in Korean).
- Ministry of Environment (ME) (2003). *Korean environmental impact assessment index methodology*, ME Research Report (in Korean).
- Moon, J. S., Ju, K. B., Seo, M. B. and Kang, L. S. (2014). "Evaluation of environmental stress for highway construction project by life cycle assessment method." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, Vol. 15, No. 6, pp. 83-91 (in Korean).
- Park, J. Y. (2017). *An environmental load estimation model for road earthwork in the planning phase of national highway project based on LCA*, Ph.D. Thesis, Kyungpook National University, Daegu, South Korea (in Korean).
- Park, J. Y., Im, J. G. and Kim, B. S. (2018). "An Analysis of factors affecting environmental load in earthwork type of road project." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, Vol. 19, No. 4, pp. 52-60 (in Korean).
- 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 Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 20, No. 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*, KREA, Vol. 18, No. 2, pp. 279-311 (in Korean).
- 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." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 130, No. 1, pp. 43-49.
- 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*, Vol. 17, No. 2, pp. 283-296.