

LCA 기반 PSC 교량의 환경부하 특성분석에 대한 연구

조남호* · 윤원건** · 이완렬*** · 김경주****

Cho, Namho* · Yun, Won Gun** · Lee, Wan Ryul*** · Kim, Kyong Ju****

An Analysis of the Characteristics of Environmental Impact for PSC Beam Bridges using Life Cycle Assessment

ABSTRACT

This study aims to analyze characteristics of environmental load for the construction phase of PSC beam bridge based on Life Cycle Assessment. For detail computation of environmental load, the construction materials and energy consumption are derived from the BOQ, also connecting with environmental load by Korea LCI Database Information Network. The characteristic of environmental impact was analyzed by 25 cases and cut-off ratio was 80% to 94%. The result sorted by construction materials revealed that environmental load were 53.3% for ready-mixed concrete, 9.6% for wire rod, 7.8% for rebar, 6.8% for cement, 5.5% for plywood, and 5.2% for energy. Furthermore, the result of environmental impact revealed that 45.5% for global warming, 30.4% for abiotic resources depletion, 10.5% for human toxicity, and 8.9% for photochemical oxidant creation. In the future, we can make a decision considering environmental load based on LCA at design phase.

Key words : LCA (Life Cycle Assessment), LCI (Life Cycle Inventory), Environmental load, PSC beam bridge, BOQ (Bill of Quantity)

초 록

2015년부터 한국에서 시행된 “탄소배출권 거래제”로 인해 각 분야에서 환경문제에 대응하고자 하는 움직임이 커지고 있다. 특히 환경부하량의 정확한 산출이 어려운 건설 분야에서는 ISO 14040 Series의 LCA (Life Cycle Assessment)를 적용하여 환경부하량을 산출하고자 하는 움직임이 지속되고 있다. 본 연구에서는 PSC beam 교량의 시공중 발생하는 환경부하량을 전과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA) 방법론을 기반으로 분석하였다. 총 34개의 교량을 대상으로 분석한 결과, 건설 자재별 환경부하량은 레미콘(53.3%), 선재(9.6%), 철근(7.8%), 시멘트(6.8%) 합판(5.5%), 에너지(5.2%) 순으로 도출되었으며, 환경 범주별 환경부하량은 지구온난화(45.5%), 자원고갈(30.4%), 인체독성(10.5%), 광화학산화물생성(8.9%) 순으로 도출되었다. 향후 LCA를 기획 및 설계 단계에서 도입한다면, 환경부하를 고려한 의사결정을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 전과정 평가, 목록분석, 환경부하량, PSC beam 교, 수량산출

* 중앙대학교 토목공학과 연구원 (Chung-Ang University · nhc51@cau.ac.kr)

** 정희원 · 교신저자 · 중앙대학교 토목공학과 전임연구원 (Corresponding Author · Chung-Ang University · ogun78@naver.com)

*** 중앙대학교 토목공학과 석사과정 (Chung-Ang University · 20071197@hanmail.net)

**** 중신회원 · 중앙대학교 사회기반시스템공학부 교수, 공학박사 (Chung-Ang University · kjkim@cau.ac.kr)

Received November 20, 2015/ revised December 15, 2015/ accepted January 27, 2016

1. 서론

최근 발생하고 있는 지구온난화와 같은 환경문제로 인해 전 세계적으로 환경문제에 대응하고자 하는 움직임이 있다. 한국에서도 2015년부터 “탄소배출권 거래제”가 시행되었으며, 정부에서 탄소배출량을 줄이고자 하는 노력을 지속적으로 보이고 있다. 이에 따라 환경부에서는 각 기업에 배출하고 있는 배출량을 측정하기 위해 “탄소성적표지” 제도를 운영하여 제품별로 전과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 수행하고 있다. 이 외에도, 전 세계적으로 단순히 탄소배출량에 근거한 환경가치를 평가할 뿐만 아니라 다양한 환경파괴인자에 대해 분석하여 향후 전반적인 환경부하량에 대한 평가를 수행하고 있다.

국내에서는 90년대 후반부터 LCA 방법론을 기반으로 건설분야의 환경영향평가 연구가 진행되어 왔다. 국토교통부에서는 2011년도에 “탄소배출량 산정 가이드라인”을 발행하여 건설 시설물의 온실가스 배출량을 정량적으로 평가하기 위한 기반을 마련하였다. 현재까지 건설 분야에서는 고속도로, 포장, 건축물, 철도 구조물에 대한 온실가스 배출량 및 환경부하 발생량을 산출하는 연구가 수행되어 왔다. 그러나 현재까지 연구된 환경부하량 평가 연구는 다양한 사회간접자본에 적용이 미흡하고 주로 온실가스 배출량에 편중되어 분석되었다.

따라서 산업통상자원부에서는 환경 파괴로 인한 피해 범위, 임계 Damage, 상응되는 피해 수준 등을 국내 현실에 맞게 규정하고, 외국에서 개발된 환경성 지표 방법론을 개선한 한국형 Eco-indicator 방법론인 Korea Indicator 환경성 지표 방법론을 구축하였다. 이 방법론은 자원고갈(Abiotic Resources Depletion, ARD), 산성화(Acidification, AD), 부영양화(Eutrophication, EU), 지구온난화(Global Warming, GW), 오존층파괴(Ozone Depletion, OD), 광화학산화물생성(Photochemical Oxidant Creation, POC), 생태계독성(Terrestrial Eco-Toxicity, TET), 인체독성(Human Toxicity, HT)의 8가지 환경부하 영향범주를 고려하여 환경부하를 평가할 수 있도록 한다.

본 연구에서는 국토해양부의 탄소배출량 산정 가이드라인과 산업통상자원부의 Korea Eco-Indicator (Lee, 1999) 환경성 지표 방법론을 동시에 적용하여 PSC (Pre-Stressed Concrete) beam 교량의 시공시 발생하는 환경부하량을 다양한 환경영향범주를 고려하여 평가하고자 하였다. 따라서 25개의 PSC beam 교량의 실시설계 데이터를 수집하여 8가지 환경부하 영향범주로 환경부하량을 산출하여 환경부하 배출 특성을 비교·분석하였다.

2. LCA의 개념 및 연구동향

2.1 LCA의 개념

ISO 14040에서는 LCA란 “제품의 전과정에 걸쳐 소모되는 자원과 에너지 및 발생하는 배출물의 양을 정량화하여, 이들이

환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 환경영향 평가 기법”이라 정의하고 있다. 따라서 LCA는 환경관리 시스템을 구현하기 위한 하나의 도구로서 사용될 수 있으며, LCA 평가 안에는 다음의 Fig. 1과 같이 목적 및 범위 정의(Goal&Scope Definition), 목록분석(Inventory Analysis), 영향 평가(Impact Assessment) 및 해석(Interpretation) 단계가 포함되어 있다.

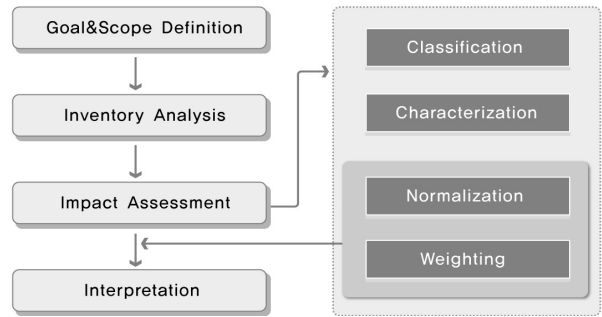


Fig. 1. LCA Process (ISO 14040 Series, 2006)

국내에 전과정(Life Cycle)적 개념이 도입된 것은 제품의 환경성을 평가하기 위한 도구로 활용되기 시작하면서부터이다. 즉 제품의 원료 획득, 가공, 제조, 운송, 유통, 사용, 폐기 및 재활용에 이르기까지 전과정을 통하여 소모, 배출된 에너지 및 자원의 양을 정량화하고 이들이 환경에 미치는 영향을 총체적으로 평가 및 이에 대한 환경개선의 방안을 모색하고자 하는 객관적이며 적극적인 환경영향 평가방법으로 도입되면서 1990년대 후반부터 활용되었다. 이후, 건설분야에 전과정 개념이 도입되어, 건축분야를 중심으로 건축물로부터 발생하는 지구온난화 문제와 에너지저감 환경지향이 대두되면서 국내외적으로 전과정적 연구가 활발히 진행되었다(Kwon, 2008).

본 연구에서는 신뢰성 있는 평가를 수행하기 위해 ISO 14040에서 제시된 LCA 평가 프로세스를 준용하였으며, 목록분석을 위해 국가 LCI (Life Cycle Inventory) DB를 우선적으로 적용하였다.

2.2 LCI DB

목록분석 단계는 대상에 투입되는 자재와 에너지를 분석하여 배출되는 환경부하량을 산출하는 단계이다. 목록분석 단계를 수행하기 위해서는 필수적으로 LCI DB를 기반으로 분석을 수행해야 한다. LCI DB란 원료의 추출, 수송, 추출된 원료를 건설자재로 가공하는 데에 발생하는 환경부하량을 정량화 해놓은 것을 말한다. 현재 국내에서 적용되는 LCI DB는 한국환경산업기술원에서 제공하는 국가 LCI 데이터베이스 정보망을 활용할 수 있다.

현재 국가 LCI DB 정보망에서는 다음의 Table 1과 같이 환경부

Table 1. National LCI DB

Stage	Category	Count	Stage	Category	Count
Material and Parts Manufacture	Construction Material	25	Processing Process	Metal Processing	13
	Rubber	8		Accessory Processing	0
	Metal	51		Plastic Processing	24
	Basic Parts	30		etc.	0
	Chemical Substances	92	Transportation	Ground Transportation	20
	Water Resources	11		Air Service	0
	Energy	23		Marine Transport	22
	Pulp-Paper	9		etc.	0
	Plastic	37	Disuse	Landfill	3
	etc.	20		Incineration	10
				Recycling	16
				etc.	2
Total	416 pcs.				

(KEITI, <http://www.edp.or.kr>)

와 지식경제부에서 개발한 416개의 LCI DB를 제공하고 있다. 현재 제공되는 국가 LCI DB의 물질 및 부품제조 항목의 시스템 경계는 주 원료물질을 채취하는 단계에서부터 제품이 출하되는 단계를 포함하고 있다. 따라서 건설 프로젝트에 이러한 기준들을 적용하기 위해 내역서 및 일위대가를 참조하여 강재의 가공 등에 적용되는 세부자재를 기반으로 하여 환경부하량을 산출하였다.

또한 건설 프로젝트에서는 대상 공종 특성에 따라 다양한 자재가 적용되어 국가 LCI DB에 분석되지 않은 항목이 존재한다. 이를 해결하기 위해 우선적으로 국가 LCI DB 목록을 적용하였으며, 관련 배출계수가 존재하지 않는 경우, 유사 DB 및 해외 DB를 활용하여 환경부하량을 산출하였다. 예를 들어, 모래와 함판의 경우는 국가 LCI DB에서 아직까지 환경부하량에 대한 정보를 제공하지 않고 있기 때문에, 한국건설기술연구원에서 제공하는 정보를 이용하였으며, PVC, 아스팔트, 아세틸렌의 경우는 스위스에서 만들어져 세계적으로 많이 활용되고 있는 Ecoinvent에서 제공하는 해외DB를 적용하였다.

2.3 LCA 관련 연구동향 분석

건설 분야에서 수행된 환경부하 평가 관련 연구개발 동향은 LCA 방법론을 적용하여 환경부하량을 평가하고자 하는 연구부터 환경부하량을 줄이기 위한 적용성 연구로 분류된다. 본 연구에서는 환경부하량 평가 관련 기존연구를 고려하였다. 다음의 Table 2는 환경부하량 평가방법론을 건설 현장에 적용한 사례를 나타낸다. 초기 연구에서는 우선적으로 지구온난화를 평가하기 위한 CO₂ 배출량을 산정하는 연구가 주로 수행되었다. 그러나 최근 연구에서는 대상물의 환경부하 영향범주를 고려하여 환경부하량을 산정하

기 위한 연구가 수행되고 있다.

Table 2. LCA Executed Researches

Author	Application	Method / Object
Seo, S. W. and Hwang, Y. W (1998)	Residential Building	LCA / CO ₂ Emissions
Park, Kwang Ho et. al. (2000)	Highway	LCA / Environmental load
Hwang, Yong Woo et. al. (2000)	Road Construction	CO ₂ Emissions
Lee Seung-Min et. al. (2006)	Building Structure	Assessment Program
Min, S. G. and Kim, S. K. (2013)	Airport Pavement	LCA / Environmental load
Jang, Joo-Hwan et. al. (2013)	Concrete Panels of Flat Plate	LCA / Construction Wastes
Strogen, B. and Horvath, A (2013)	Distribution Infrastructure for Petroleum and Biofuels	LCA / CO ₂ Emissions
Lee, Cheol et. al (2014)	High-Speed Railway	LCA/ Environmental Load

3. PSC 교량 환경부하 평가 프로세스

3.1 연구대상범위 설정

본 연구에서는 전과정 중 가공, 수송, 시공항목을 고려하여 PSC

beam교의 환경부하량을 평가하는 것을 목표로 하였다. 다음의 Fig. 2는 본 연구의 연구대상범위를 나타낸다. 본 연구에서는 건설 자재 및 에너지 투입량을 산출하여 PSC beam 교량의 환경부하량을 평가하고자 하였다. 따라서 각 교량의 내역서와 수량산출서에 근거하여 자재목록을 산출하였으며, 휘발유, 경유 및 전기료를 바탕으로 에너지 소비량을 판단하였다.

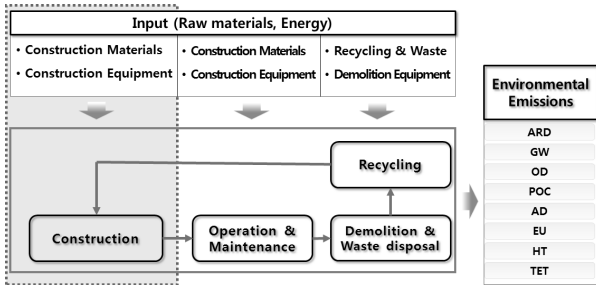


Fig. 2. Research Scope

본 연구에서는 환경부하 영향범주로 자원고갈, 산성화, 부영양화, 지구온난화, 오존층과괴, 광화학산화물생성, 생태계독성, 인체 독성의 8가지를 고려하였다. 각 영향범주를 통해 산정되는 환경부하량의 측정단위가 서로 상이하기 때문에, 각 환경부하 영향범주를 동등 수준으로 비교할 필요성이 있다. 따라서 다음의 Fig. 3과 같이 분류화, 특성화, 정규화 및 가중화 과정을 통해 특성화값을 가중값으로 변환한 Eco-point 단위를 통해 환경영향 평가지표를 평가하였다.

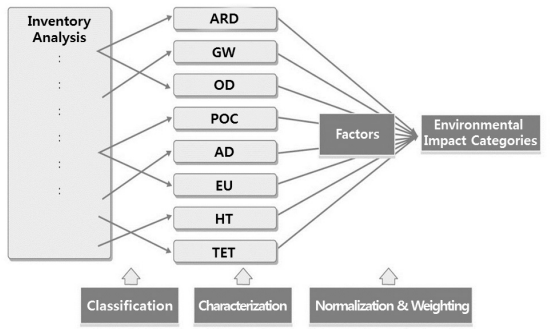


Fig. 3. Environmental Impact Normalization

Table 3. Environmental Impact Categories

Impact Category	ARD	AD	EU	GW	OD	POC	TET	HT
Unit	1/yr	kg SO ₂ -eq	kg PO ₄₃ -eq	kg CO ₂ -eq	kg CFC ₁₁ -eq	kg C ₂ H ₄ -eq	kg 1,4 DCB eq	kg 1,4 DCB eq
Normalization Factor	24.9	39.8	13.1	5530	0.0407	10.3	1.63	1480
Weight Factor	0.231	0.036	0.038	0.288	0.292	0.065	0.216	0.105
Converted Unit	Eco-point	Eco-point	Eco-point	Eco-point	Eco-point	Eco-point	Eco-point	Eco-point

“산업통상자원부”에서는 8개 환경부하 영향인자에 대해 비교할 수 있는 환경영향 평가지표를 제시하고 있다. 목록분석 결과로 산출된 환경영향을 분석하기 위해 8개 환경지표를 구성한 후, 각 환경지표를 특성물질(예를 들어, 산성비는 SO₂, 지구온난화는 CO₂)의 양으로 특성화할 수 있다. 그러나 특성화된 환경지표에 대한 단위물질의 양이 서로 다르기 때문에 영향범주의 상대적인 영향을 정량화 하는데 있어서 정규화 과정은 매우 중요하다. Heo et al. (2000)에 의하면, 국내에서 적용되는 정규화 방법은 Dutch Eco-Indicator 95 (Goedkoop, 1995)와 Environmental Design of Industrial Product (EDIP) (Hauschile and Wenzel, 1998) 방법에 근거한다. 또한 8개 부문별로 환경에 미치는 정도를 계수로 정하는 가중화 과정(Lee, 1999)을 통해 최종적으로 Eco-point로 변환된 단위를 활용하여 8개 환경부하 영향범주를 비교할 수 있다. Eco-point로 변환된 가중값의 수치는 국가에 따라 다르지만, 국내에서는 다음의 Table 3과 같이 “산업통상자원부”에서 제공하는 정규화 및 가중화 값을 통해 변환된 값을 적용하였다.

3.2 교량 시설물 내역체계 분석

시공단계에서 발생하는 환경부하량은 투입자재와 장비 운용으로 인한 에너지 소모를 통해 발생한다. 따라서 내역을 통해 작업된 BOQ (Bill of Quantity)를 기준으로 하여 LCI DB와 연계시킨다면, 시공 단계에서 발생하는 환경부하량을 산출할 수 있다. 본 연구에서는 우선적으로 내역을 통해 일위대가를 산출하고, 산출된 일위대가 목록에서 투입되는 자원 및 에너지를 환경부하량으로 변환하는 방법을 적용하였다.

그러나 내역서를 통해서 자원을 산정할 때, 일부 항목의 경우 실적공사비(Lump-Sum, 1식)로 적용되어 있다. 실적공사비로 내역 항목의 경우 자재비, 노무비, 경비 항목이 비용으로 처리되어 있기 때문에 일반적인 방법으로 이 항목에 대한 자원을 산정하는 것이 불가능하다. 또한 프로젝트에 따라서 실적공사비로 적용된 아이템의 종류가 매우 상이하다. 따라서 이 항목에 대한 적정한 자재 및 투입장비(에너지)를 산출하기 위해 “국도건설공사 설계실 무요량” 및 “표준품셈”을 참고하여 동일 공종의 항목을 적용함으로써 투입 자재 및 장비를 산출하였다.

다음의 Table 4는 PSC beam을 제작할 때 투입되는 장비목록을

나타낸다. 장비의 경우 장비 자체의 환경부하량은 발생하지 않지만, 장비를 사용함으로써 소모되는 휘발유 및 경유, 전기료를 산정하여 환경부하량을 평가했다.

Table 4. Equipment List for Manufacturing PSC Beam

Equipment	specification	Unit
Loader	1.72 M3	HR
Excavator+Breaker	0.7 M3	HR
Dump Truck	15 Ton	HR
Concrete Pumping Vehicle	80 M3/hr	HR
Internal Vibrator Concrete	45 D(3.5HP) Engine	HR
Welding Machine	200 AMP	HR
Internal Vibrator Concrete	Rod Type	HR

또한, 다음의 Table 5은 PSC beam 제작시 투입되는 자재목록을 나타낸다. 공중에 포함된 자재들의 규격 및 단위를 확인하여, 연계 LCI DB에 연결시키는 작업을 통해 환경부하량을 산출할 수 있다. 특히 자재의 경우 투입자재 자체의 환경부하량만을 고려하였으며, 가설로 인한 환경부하량은 장비의 연료소모량으로 분석하였다.

Table 5. Materials List for Manufacturing PSC Beam

Materials	Specification	Unit	Connected LCI DB
Rebar	D=13m/m (SD30A)	M/T	Rebar
Angles	75x75x6M/M 6.85KG/M	M/T	Steel Sections
Hot Rolled Steel	3.0 ≤ T < 4.00 219x2438M/M SS41	M/T	Hot Rolled Coil
Steel Wire	#8 4.0M/M 10.1M/KG	KG	Wire Rod
Binding Wire	#20 4.5M/M	KG	Wire Rod
PC Strand	12.7M/M 3twisted wire 774.0KG/KM	KG	Wire Rod
Nail	N75 75x3.25M/M 25KG/Box	KG	Wire Rod
Hex Bolt	M16x50mm	EA	Wire Rod
Hex Bolt	M16x60mm	EA	Wire Rod
Hex Bolt	M16x70mm	EA	Wire Rod
Timber	3.6x9.0cmx4.5cm	M3	Plywood
Wood Board	3.6m x 30cm x 2.4cm	M3	Plywood
Spiral Tube	65MM	M	DB X
PVC Pipe	100mm x 4m (VG2)	M	PVC
Welding Rod	3.2mm KSE4301	KG	Wire Rod
Oxygen	99% 6000 L (Air) 40 L	EA	Oxygen
Acetylene	98% (Welding) 1kg=853 L	KG	Acetylene
Metal Cramp	(150 m/m)	EA	DB X
Fly Ash		KG	DB X
PC Cone	Φ12.7MM	SET	DB X
Aluminium Powder	-	KG	Aluminium

3.3 환경부하가치 연계방안

투입된 자재 및 에너지에 대한 환경부하량을 산출하기 위해서 LCI DB와 자재목록을 연계하는 작업을 수행하였다. 투입된 자재량과 국가 LCI DB의 환경부하량을 곱하면 환경부하량이 산출된다. 따라서 8개의 환경부하 영향범주에 맞춰 환경부하량을 산출하도록 하였으며, Eco-Point를 활용하여 총 환경부하량을 산출할 수 있도록 하였다.

다음의 Table 6은 본 연구에서 적용한 LCI DB와 자재의 연계방안을 보여준다. 국가 LCI DB에는 구축된 LCI DB 항목과 어떠한 자재 항목과 연계해야 하는지 설명하고 있다. 따라서 기본적으로 국가 LCI DB를 준용할 수 있지만, 모든 항목의 DB가 구축된 것이 아니기 때문에 유사DB와 해외DB를 적용하여 전체 Cut-off 수준을 통제할 수 있다. 예를 들어, 선재(Wire Rod)의 경우 국가 LCI DB에서 “나사, 못, 철조망, 용접철망, 특수나사, 너트, 타이어 코드, 정밀기계류의 제조 등에 사용”하도록 주요용도를 명기하고 있기 때문에, 강연선(PC Strand) 및 철선(Steel Wire) 뿐만 아니라, 나사(Bolt), 못(Nail) 등에도 적용하였다. 또한 열연코일(Hot Rolled Steel Coil)의 경우도 기본 적용은 코일에 한정되지만, 유사DB로 판단하여 열연후판 등의 모든 열연제품에 적용하였다.

4. PSC 교량 환경부하 특성 분석

4.1 데이터 특성

PSC 교량의 환경부하 특성을 분석하기 위해 경간장과 폭원이 유사한 25개의 PSC beam교 사례에 대해 LCA 분석을 수행하였다. 다음의 Table 7은 본 연구에서 분석한 교량의 특성을 보여준다. 본 연구에서 분석한 교량은 총 25개 교량이며, 교량의 경간길이는 30m와 35m에 분포하여 있다. 또한 폭원은 4차로 교량만을 고려하여 약 21m의 폭원으로 구성되어 있으며, 기초형식은 대부분이 말뚝기초 혹은 혼합기초(말뚝기초 및 직접기초)로 구성되었다. 또한 분석한 교량의 Cut-off level은 80.51~94.18%, 평균 86.88%, 표준편차 3.75%내에서 산출되었다.

본 연구에서는 PSC beam 교량의 다양한 사례를 검토하여 환경부하량을 분석하기 위해 국토해양부에서 제시한 “시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인”을 준용하였다. 이 기준에 의하면 “시공단계 온실가스 배출량 산정 시 Cut-off level (제외기준)은 재료비 기준으로 90%, 장비사용량(총량 기준) 90% 이상이 분석되도록 하되, 사업 특성을 고려하여 평가자가 조정하여 결정할 수 있다.”고 명시되어 있으며, “국내외 DB를 모두 적용하였을 시 금액 기반 Cut-off level(제외기준)이 달성되지 않는 경우, 최소 80% 이상은 달성되어야 탄소배출량을 산정했다고 공표할 수 있으며, 이 경우 분석물을 명확히 제시하여야 한다.”고 제시되어 있다. 따라서 이 기준을

Table 6. Connection List Between LCI DB and Resource Inventory

National LCI DB Category	Unit	Materials	Unit	National LCI DB Category	Unit	Materials	Unit
Wire Rod	kg	PC Strand	kg	Stainless Steel	kg	Stainless Pipe	m
		Wire Rope	kg			Stainless Round Bar	kg
		Welding Rod	kg			Stainless Steel Sheet	kg
		Bolt/Nail/Nut	kg			Welding Rod(Stainless)	kg
			set			Stainless Steel Sections	kg
		Steel Wire	kg	Remicon 25-240-15	m ³	All Type of Remicon	m ³
		Binding Wire	kg			Concrete Products	EA
Ring	kg	(Hume Pipe, PC Block, etc.)	m ²				
Electric Steel Sections	kg	Steel Sections	M/T	HDPE Film	kg	Grid	m ²
		Steel Pipe	m	Electric Steel Deformed Bars	kg	All Type of Rebar	kg
		Round Bar	ton	Electricity	kwh	Electricity	kwh
		Steel Rod	M/T	Portland Cement_type 1	kg	Cement	ea
		Channels	m				kg
		Sheet Piles	m	Oxygen, O ₂	ton	Oxygen	L
		scaffold pipes	m				bt
		Metal Cramp	kg	Epoxy Adhesive	kg	All type of Achesive	kg
		Angles	kg	Hot Rolled Steel Coil	ton	Hot Rolled Steel	ton
		Wide Flange Beams	M/T	Steel Plates	ton	Flat Steel, Steel Plates	kg
Steel Pipe Piles	m	ton					
EPS	kg	Pattern Mold	m ²	PVC	kg	PVC Pipes	m
		Styrofoam	m ²	Aluminum Strip	kg	Aluminum Sheet	kg
Paint_Urethane Type	ton	Sealant	kg			Aluminum Powder	kg
		Asphalt	kg			Blown Asphalt	kg
Diesel	kg			Asphalt Primer	kg	Carbon Steel	kg
		Gasoline	kg	Diesel	L		
				Gasoline	L		

Table 7. Bridge Characteristics

Bridge No.	Span	Span Length (m)	Total Length (m)	Width (m)	Foundation Type	Cut-off Level (%)	Bridge No.	Span	Span Length (m)	Total Length (m)	Width (m)	Foundation Type	Cut-off Level (%)
1	1	30.0	30.0	20.9	Pile	87.82	14	1	35.0	35.0	21.4	Pile	92.98
2	1	30.0	30.0	20.9	Pile	86.23	15	4	35.0	140.0	21.4	Both	89.36
3	1	35.1	35.1	20.9	Pile	83.82	16	3	35.0	105.0	21.4	Both	86.86
4	4	35.0	140.0	20.9	Pile	83.32	17	3	35.0	105.0	21.4	Both	89.12
5	5	35.0	175.0	20.9	Pile	84.47	18	1	30.0	30.3	20.9	Pile	88.61
6	1	35.0	35.0	20.9	Pile	93.13	19	1	25.0	25.5	21.0	Footing	83.19
7	1	35.0	35.0	21.7	Pile	94.18	20	1	35.0	35.3	20.9	Both	86.67
8	1	30.0	30.0	20.4	Pile	91.13	21	1	30.0	30.3	20.9	Both	84.46
9	1	30.0	30.0	20.6	Pile	92.22	22	1	30.0	30.0	20.9	Both	87.69
10	7	35.0	245.0	22.8	Both	84.40	23	3	30.0	90.0	20.9	Both	80.51
11	4	35.0	140.0	22.8	Both	85.57	24	1	35.0	35.0	20.9	Both	82.94
12	3	35.0	105.4	21.1	Both	86.58	25	2	35.0	70.0	20.9	Footing	81.17
13	3	30.0	90.5	21.0	Both	85.52	-	-	-	-	-	-	-

만족하는 25개 사례에 대해 분석하였다.

또한, PSC beam교에 대한 환경부하량을 일관성 있도록 분석하기 위하여, 교량의 총길이를 기준으로 하여 단위 연장(m)당 환경부하량 및 비용을 산출하여 비교하였다.

4.2 주요 자재별 특성 분석

다음의 Table 8은 PSC beam 교량에 대한 자재별 환경부하량 특성을 나타낸다. 비용 비중은 레미콘, 철근, 장비, 형강 항목이 전체의 87.16%를 차지하고 있었다. 이 항목의 전체 환경부하량은 71.34%를 차지한다. 그러나 각 자재별 환경부하 배출특성을 살펴 보면, 레미콘의 경우 비용비중 19.22%임에 반하여 환경부하량 비중은 53.29%를 차지하고, 선재의 경우도 비용비중 4.15%임에 반하여 환경부하량 비중은 9.64%로 비용에 비해 높은 수준의 환경부하량을 발생시키는 것으로 분석되었다. 또한 철근의 경우 비용비중이 24.29%로 높는데 반하여 환경부하량 비중은 7.76%로 상대적으로 낮은 수준으로 분석되었다.

Table 8. Materials Analysis Result

Major Materials	Environmental Load Ratio (%)	Cost Ratio (%)	Major Materials	Environmental Load Ratio (%)	Cost Ratio (%)
Remicon	53.29	19.22	Equipment	5.19	25.23
Wire Rod	9.64	4.15	Steel Sections	5.10	19.42
Rebar	7.76	24.29	PET	3.80	0.14
Cement	6.78	1.63	Stainless Steel	0.87	0.75
Plywood	5.48	3.50	Hot Rolled Steel	0.87	0.52
Sub Total	82.95	52.79	Sub Total	15.83	46.06
Total	98.78	98.85	etc.	1.22	1.15

다음의 Table 9은 위에서 분석된 환경부하 비중을 분석하기 위해 LCI DB를 Eco-Point로 분석한 가중화값을 나타낸 표이다. LCI DB를 구축하기 위한 분석단위가 서로 다르기 때문에, 모든 항목을 산술적으로 분석하는 것은 불가능하다. 그러나 동일한 수준의 단위를 가진 철근과 선재를 비교하면, 같은 kg 단위로 분석했을 때, 철근의 총 가중화값은 4.41E-02 Eco-point이며, 선재의 경우는 6.54E-01 Eco-point임을 알 수 있다. 즉, 선재의 경우, 같은 무게에서 철근에 비해 약 14.8배의 환경부하량을 가지고 있는 것으로 판단된다.

LCI DB 상에서 자재별로 환경부하량에 차이가 발생하는 이유는 자재를 제작하기 위한 공정의 차이에서 발생한다. 다음의 Figs. 4 and 5는 선재와 철근의 생산공정의 차이를 보여준다. 철근의

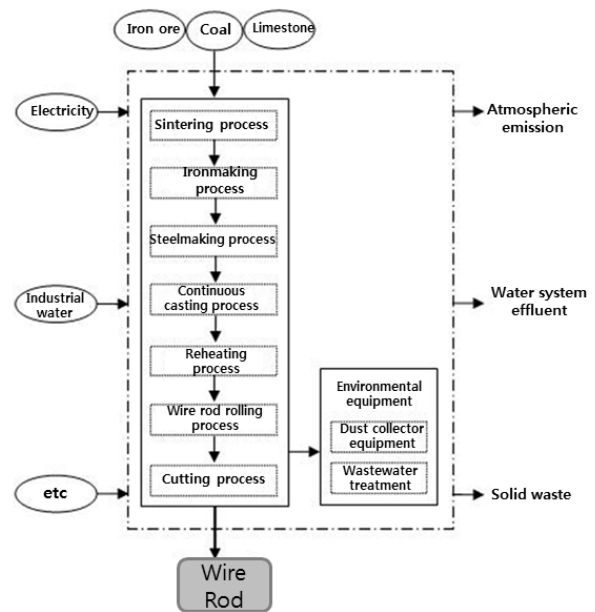


Fig. 4. Assessment Process for Wire Rod (KEITI, <http://www.edp.or.kr>)

Table 9. Weighted Values on LCI DB items

LCI DB Category	Unit	ARD	AD	EU	GW	OD	POC	TET	HT	Total
		Eco-point	Eco-point	Eco-point	Eco-point	Eco-point	Eco-point	Eco-point	Eco-point	Eco-point
Remicon	m ³	1.36E-02	6.38E-04	2.38E-04	2.24E-02	2.74E-04	6.05E-03	2.08E-04	3.84E-03	4.71E-02
Wire Rod	ton	1.21E-01	1.64E-02	3.46E-03	4.95E-01	5.12E-04	2.30E-03	1.44E-03	1.33E-02	6.54E-01
Rebar	kg	1.72E-05	4.02E-07	3.13E-09	2.28E-05	6.23E-08	2.00E-06	3.95E-07	1.22E-06	4.41E-05
Plywood	m ³	2.17E-02	3.76E-03	2.05E-02	4.26E-02	3.62E-04	1.06E-03	1.51E-02	7.21E-03	1.12E-01
Gasoline	kg	2.46E-04	1.68E-07	9.35E-09	4.33E-06	1.53E-09	1.08E-07	8.96E-10	2.78E-08	2.51E-04
Diesel	kg	2.44E-04	1.26E-07	2.77E-08	3.55E-06	7.52E-10	7.03E-08	4.40E-10	1.53E-08	2.48E-04
Cement	kg	9.64E-06	5.11E-07	1.75E-09	4.94E-05	1.02E-07	1.54E-05	1.32E-07	1.51E-06	7.66E-05
Stainless Steel	kg	2.15E-04	4.17E-06	4.54E-07	1.68E-04	8.93E-06	7.51E-07	2.45E-04	3.32E-04	3.57E-05
Steel Sections	kg	2.11E-05	1.20E-06	5.13E-07	2.24E-05	1.71E-07	1.93E-06	3.37E-07	2.60E-06	5.02E-05
PET	kg	2.55E-04	7.35E-06	8.08E-06	2.14E-04	7.90E-06	5.51E-06	4.85E-03	1.19E-01	1.24E-01
Hot Rolled Steel	ton	1.16E-01	1.70E-03	4.64E-06	9.11E-02	2.56E-05	2.84E-02	3.18E-04	4.63E-04	2.38E-01

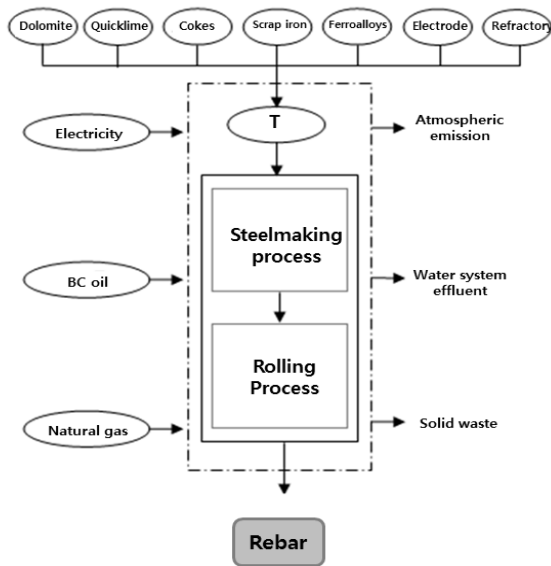


Fig. 5. Assessment Process for Rebar (KEITI, <http://www.edp.or.kr>)

경우 제강 및 압연공정을 거쳐 자재가 생성되지만, 선재의 경우 제강공정 및 선재압연 공정 전후로 소결 공정, 제선공정, 연주 공정, 재가열 공정, 절단공정을 추가적으로 거쳐야 되기 때문에 상대적으로 많은 공정을 거쳐야 한다. 따라서 PSC 교량에서 차지하는 선재의 비용비중은 4.15%밖에 되지 않지만, 강연선 등을 많이 사용하는 PSC 교량의 특성상 환경부하 비중 9.64% 정도로 높은 것으로 측정된다.

4.3 환경 부하 범주별 특성 분석

현재 국가 LCI DB에 근거하여 분석한 환경부하 범주는 총 8가지로 구성된다. 다음의 Table 10은 PSC beam 교량의 환경부하량을 각 환경부하 범주별로 분석한 결과를 보여준다. 대부분의

환경부하량은 지구온난화 및 자원고갈에 치우쳐져 있으며, 자원고갈, 지구온난화 2개 항목이 전체의 75.88%의 환경부하량을 대표하는 것으로 분석되었다.

Table 10. Environmental Load Ratios for Impact Category

Impact Category	Environment Load Ratio (%)	Impact Category	Environment Load Ratio (%)
GW	45.46	TET	1.55
ARD	30.42	AD	1.39
HT	10.52	EU	1.34
POC	8.93	OD	0.39
Sub Total	95.33	Sub Total	4.67

이러한 환경부하의 특성은 건설에 적용되는 각 자재의 환경부하 발생특성에 기인하는 것으로 분석된다. 다음의 Table 11은 PSC beam에서 주로 사용되는 LCI DB의 환경부하량 분포를 보여준다. 가장 많은 환경부하량을 차지하는 레미콘의 경우, 47.56%의 환경부하량이 지구온난화와 관련이 있으며, 자원고갈에 28.87%, 광화학산화물생성에 12.85%의 환경부하량이 분포되어 있다. 또한 PSC beam교에 들어가는 대다수의 LCI 아이템의 환경부하량이 지구온난화와 관련이 있는 것으로 파악되었다. 따라서 이러한 LCI DB의 성향이 전체 환경부하량 중 약 46.24%가 지구온난화 항목에 기인하는 것으로 분석할 수 있다. 또한 자원고갈의 경우 대부분의 환경부하량이 연료(에너지)와 금속제품(철근, 형강, 열연코일) 및 레미콘으로 인해 발생하는 것으로 분석된다.

5. 결론

본 연구는 PSC beam 교량의 환경부하 특성을 분석하기 위해

Table 11. Percentage of LCI DB on Environmental Impact Categories

LCI DB Category	ARD (%)	AD (%)	EU (%)	GW (%)	OD (%)	POC (%)	TET (%)	HT (%)
Remicon	28.87	1.35	0.51	47.56	0.58	12.85	0.44	8.15
Wire Rod	18.50	2.51	0.53	75.69	0.08	0.35	0.22	2.03
Rebar	39.00	0.91	0.01	51.70	0.14	4.54	0.90	2.77
Plywood	19.38	3.36	18.30	38.04	0.32	0.95	13.48	6.44
Gasoline	98.01	0.07	0.00	1.73	0.00	0.04	0.00	0.01
Diesel	98.39	0.05	0.01	1.43	0.00	0.03	0.00	0.01
Cement	12.58	0.67	0.00	64.49	0.13	20.10	0.17	1.97
Stainless Steel	22.09	0.43	0.05	17.28	0.92	0.08	25.12	34.04
Steel Sections	42.03	2.39	1.02	44.62	0.34	3.84	0.67	5.18
PET	0.21	0.01	0.01	0.17	0.01	0.00	3.91	95.97
Hot Rolled Steel	48.74	0.71	0.00	38.28	0.01	11.93	0.13	0.19

수행되었다. 현재까지 토목 구조물의 환경부하 특성을 분석하고자 하는 연구가 지속되고 있지만, PSC beam 교량에 대해서 환경부하 특성을 분석하지 않았다. 본 연구에서는 ISO 14040의 LCA 분석 프로세스에 의거하여 수행하였으며, 환경부하량을 평가하기 위해 한국환경산업기술원에서 제공하는 국가 LCI 데이터베이스 정보망을 활용하였다. 본 연구의 결과, PSC 교량의 환경부하량을 자재별로 분석하면, 53.29%가 레미콘에 의해 발생하였으며, 선재(9.64%), 철근(7.76%), 시멘트(6.78%) 합판(5.48%), 에너지(5.19%) 순으로 분포한 것을 파악했으며, 이는 개별 자재의 공사비 비율과는 다른 성향을 보인 것으로 분석되었다. 또한 환경부하 영향범주로 분석하면, 지구온난화(45.46%), 자원고갈(30.42%), 인체독성(10.52%), 광화학산화물(8.93%) 순으로 분석되었다. 이는 기존 연구들이 지구온난화를 일으키는 탄소배출량에 집중하여 수행되었지만, 기타 환경부하 영향범주를 고려할 필요성이 있다는 것을 시사한다. 향후 본 연구에서 도출한 환경부하 특성을 기반으로 기획 및 설계단계에서 환경부하량을 고려한 의사결정을 지원할 수 있는 모델을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(15SCIP-C085707-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Construction Association of Korea (2015). *Standard of Construction Estimate 2015*, KICT (in Korean).
- Ecoinvent (2015). *Ecoinvent Version 3*, Ecoinvent, Switzerland, Available at: www.ecoinvent.org (Accessed: November 1, 2015).
- Goedkoop, M. (1995). *The Eco-Indicator 95*, Pré Consultants, Amersfoort, The Netherlands.
- Hauschile, M. and Wenzel, H. (1998). *Environmental Assessment of Products. Scientific background*, Vol. 2, Chapman & Hall, London, UK.
- 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.
- Hwang, Y. W., Park, K. H. and Seo, S. W. (2000). "Assessment of CO₂ emissions from road construction activities." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 20, No. 1-B, pp. 113-121.
- ISO (2006). *ISO 14040:2006 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and framework*, ISO, Geneva, Switzerland.
- Jang, J. H., Jee, N. Y. and Roh, S. Y. (2013). "An plan for the reduction of construction wastes by applying the extruded concrete panels of flat plate apartment housing." *Journal of AIK*, AIK, Vol. 29, No. 5, pp. 105-112.
- Korea Environmental Industry Technology Institute (KEITI) (2015). Korea LCI Database Information Network, KEITI, Available at: http://www.edp.or.kr/lci/lci_db.asp (Accessed: November 1, 2015).
- KICT (2015). Korea LCI Database for Construction Materials, KICT, Available at: <http://apess.kict.re.kr> Accessed: November 1, 2015).
- KICT (2015). Korea LCI Database Information Network, KEITI, Available at: http://www.edp.or.kr/lci/lci_db.asp (Accessed: November 1, 2015).
- Kwon, S. H. (2008). *Development of Assessment Model for Environmental Economics of Construction Projects*, Ph.D. Dissertation, Chung-Ang University.
- Lee, K. M. (1999). "A weighting method for the Koran eco-indicator." *The International Journal of LCA*, Vol. 4, No. 3, pp. 161-165.
- Lee, C., Lee, J. Y., Jung, W. S. and Hwang, Y. W. (2014). "A study on the characteristics of environmental impact in construction sector of high-speed railway using LCA." *Journal of KSR*, KSR, Vol. 17, No. 3, pp. 178-185.
- Lee, S. M., Park, S. D. and Choi, M. H. (2006). "A study on the development of an assessment program for green building certification." *Journal of AIK*, AIK, Vol. 22, No. 8, pp. 251-258.
- Min, S. G. and Kim, S. K. (2013). "A study on an environmental-load analysis for airport pavement." *Journal of KOSHAM*, KOSHAM, Vol. 13, No. 5, pp. 355-363.
- Ministry of Environment (2006). *Manual for Tool of type III labelling and LCA, TOTAL* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008). *Construction Design Practice for National Highway 2008* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011). *Guide-line to Assessment of Environmental Load for Facilities - Road* (in Korean).
- Park, K. H., Hwang, Y. W., Seo, S. W. and Park, J. H. (2000). "Environmental load evaluation through the life cycle of highway." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 20, No. 3-D, pp. 311-321.
- Seo, S. W. and Hwang, Y. W. (1998). "Life cycle CO₂ assessment of residential building." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 18, No. II-5, pp. 521-529.
- Strogen, B. and Horvath, A. (2013). "Greenhouse gas emissions from the construction, manufacturing, operation and maintenance of U.S. distribution infrastructure for petroleum and biofuels." *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, Vol. 19, No. 4, pp. 371-383.