

교량의 환경부하평가 신뢰성 향상을 위한 교량용 탄성받침 전과정목록 산정방법에 관한 연구

위대형* · 김영춘** · 곽인호*** · 황용우****

Wie, Deahyung* · Kim, Youngchun** · Kwak, Inho*** · Hwang, Yongwoo****

A Study on the Calculation Method of the Elastomeric Bearing Life Cycle Inventory (LCI) Database to Improve Reliability of Evaluation of Environmental Load of Bridges

ABSTRACT

In this research, life cycle inventory database (LCI DB) was developed for elastomeric bearing employing life cycle assessment (LCA) methodology additionally the reliability improvement rate in the evaluation of the environmental load of the bridge was analyzed. As are result of impact assessment by 6 major impact categories, production of elastomeric bearing puts on environmental impact in the order of resource depletion, global warming, photochemical oxidant creation. and among a wide variety of input, steel plates contributes in most of the impact categories. As a result of applying the elastomeric bearing LCI database constructed in this study, the environmental loads increased by 0.53% on average, and the cut-off based on the cost of input materials increased by 11.36%. It is anticipated that it will be possible to improve the credibility and to provide data based on current production technology, such as estimating GHG emissions and evaluating environmental load, by constructing elastomeric bearing LCI DB.

Key words : Elastomeric bearing, LCA (Life cycle assessment), LCI (Life cycle inventory), LCI DB

초록

본 연구에서는 전과정평가 방법론을 활용하여 교량용 탄성받침 제조 공정에 대한 전과정목록(LCI) DB를 구축하고, 교량의 환경부하평가시 신뢰성 향상을 분석하였다. 교량용 탄성받침의 영향평가 결과, 6대 영향범주 중 자원고갈, 지구온난화, 광화학산화물 생성 범주 순으로 주요 영향을 미치는 것으로 나타났다. 투입물의 기여도에서는 대부분의 영향범주에서 후편이 가장 높게 나타났다. 본 연구를 통해 구축된 교량용 탄성받침 전과정목록(LCI) DB를 교량 환경부하평가에 적용한 결과 환경부하량은 평균 0.53% 증가하였으며, 투입자재의 금액기준 Cut-off는 11.36% 증가하였다. 교량용 탄성받침 LCI DB 구축을 통해 향후 온실가스 배출량 산정, 환경부하평가 등의 신뢰성을 향상시키고 현재 생산기술에 기반한 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 교량용 탄성받침, 전과정 평가, 전과정 목록, 전과정 목록 데이터베이스

* 정희원 · 인하대학교 환경연구소 선임연구원 (Inha University · dnleogud@naver.com)

** 한국생산기술연구원 국가청정생산지원센터 수석연구원 (Korea National Cleaner Production Center · chunny@kncpc.re.kr)

*** 정희원 · 인하대학교 환경안전융합 박사과정 (Inha University · dlsgh81@naver.com)

**** 교신저자 · 인하대학교 환경공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Inha University · hwangyw@inha.ac.kr)

Received April 10, 2017/ revised June 8, 2017/ accepted June 23, 2017

1. 서론

1992년 리우에서의 UN 환경개발회의 이후로 전 세계적으로 온실가스 감축 및 지속가능한 발전을 위한 다양한 노력이 기울여지고 있다. 우리나라도 2015년 파리기후협약 이후 국가 온실가스 배출량을 2030년까지 BAU (Business As Usual) 대비 37%까지 감축하는 것을 목표로 설정하였으며, 이에 따라 건설업 분야에서도 온실가스 배출량 관리를 통해 2020년도 까지 7%의 감축목표를 설정하였다. 또한 전 인류는 지구온난화 뿐만 아니라 자원고갈, 수자원고갈, 오존층 파괴 등 다양한 환경문제에 직면하고 있으며, 이에 대응하기 위해 환경적 영향을 평가하고 정량화하는 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)등의 환경영향 평가기법이 개발되어 이용되고 있다.

국내 건설업은 대규모의 에너지와 자원이 투입되는 산업으로 일반 제조업보다 더 많은 환경영향을 나타내며 국제적인 환경영향 최소화 흐름에 맞추어 건축자재의 제조 및 사용 시 발생하는 환경부하를 저감하기 위해 환경영향 발생량을 정량화하는 것이 필요하다. (Hwang, 2000) 따라서 국내 건설업에서는 LCA 기반의 전과정평가를 위해 사용되는 자재 및 장비의 환경영향 발생량에 대한 데이터베이스가 필요하나 환경부 및 산업통상자원부에서 구축된 일부 국가 LCI DB (Life Cycle Inventory Database)를 제외하고는 건설자재의 대한 전과정목록 구축이 미흡한 실정이다. 현재 국토교통부 건설기술연구사업의 일환으로 수행중인 “SOC 시설물의 환경부하 저감을 위한 LCA 기반 의사결정시스템 개발” 연구팀의 1차년

Table 1. List of Insufficient LCI DB in Construction Materials

Category	No.	Construction materials
Common	1	Sheet pile
	2	Prestressing strand
	3	Drain pipe
	4	PVC (Polyvinyl Chloride) pipe
Road	5	Guard rail
	6	Sound proof wall
	7	Safety guard
	8	Coating material
	9	Mat
Tunnel	10	Rock bolt
	11	Steel fiber reinforcement
	12	Sheet waterproofing
	13	Super plasticizer
	14	NATM (New Austrian Tunneling Method) RESIN
Bridge	15	Pot bearing
	16	Elastomeric bearing

도 도로, 터널, 교량 시설의 환경부하평가 결과에 의하면 주요 LCI DB 결핍 건설자재는 Table 1과 같다. 본 연구에서는 도출된 주요 LCI DB 결핍 건설자재 중 최근 국내 지진 발생 빈도 증가로 인한 내진 설계의 중요성 및 면진 규제 강화에 의해 수요가 증가할 것으로 예측되는 교량용 탄성받침 건설자재에 대한 LCI DB 구축을 목표로 하였다.

또한, 교량용 탄성받침 LCI DB 적용을 통한 교량 시설의 환경부하평가 신뢰도 향상율을 비교분석하여 실질적인 LCI DB 구축 효과를 제시하였다.

2. LCA 및 LCI DB 구축 개요

2.1 LCA 개요

전과정평가(LCA)는 제품의 전과정(원료취득, 원료수송, 제조, 제품수송, 유통, 사용, 폐기)에서 발생하는 물질 및 에너지, 스크랩, 폐기물의 양을 정량화하고 이에 따른 환경적인 영향을 총체적으로 평가하는 방법이다. LCA의 국제표준규격은 2006년에 국제표준화기구 환경경영기술위원회(ISO/TC 207)에 의해 제정되었으며, ISO 14040에 기술적인 근간을 이루고 있다. LCA의 구성요소는 Fig. 1과 같이 목적 및 범위설정, 목록분석, 영향평가, 결과해석으로 구분된다.

LCA 구성요소 중 목적 및 범위 설정은 수행하는 연구의 범위와 깊이를 결정하는 단계로 LCA 수행의 이유, 사용 주체 등이 포함되어야 하며 목록분석 단계는 제품 생산 및 제조시 투입물과 배출물에 대한 데이터를 정리하고 정량화하는 단계이다. 영향평가 단계는 목록분석 결과를 이용하여 각각의 물질이 환경에 미치는 영향을 분석하여 환경영향범주별로 정량화된 환경영향을 계산하는 단계이며, 영향평가 단계 내에서 분류화, 특성화, 정규화, 가중화의 4가지 단계로 구분된다. 결과해석 단계는 정량화된 영향평가 결과를 통해 환경개선방안을 모색하고 제품환경전략 수립을 위한 기초자료를 정리하는 단계이다.

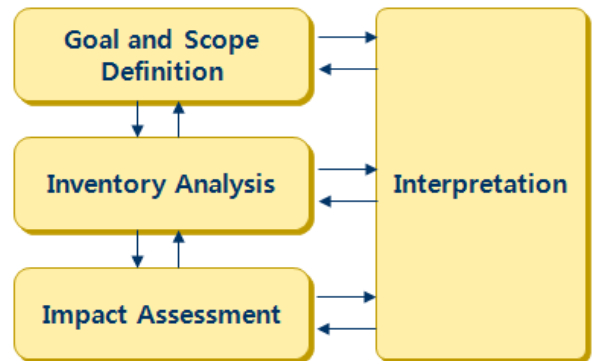


Fig. 1. LCA Process (ISO 14040 Series, 2006)

2.2 LCI DB 구축 개요

2.2.1 LCI DB 개요

LCA 수행을 위해서는 물질별 환경부하량을 목록화한 LCI DB가 필요하며 LCI DB란 제품 1단위(기능단위당)의 생산에 필요한 원자재의 채취 및 소재/부품가공, 수송, 제품사용, 폐기까지의 제품 시스템으로 투입되는 자원의 양과 제품시스템에서 환경으로 버려지는 배출물(대기, 수계)과 폐기물의 발생량을 목록화한 데이터를 말한다. 국내에서 LCI DB는 1998년 제품의 국가기반산업 및 기초 소재별 국가표준 환경성 정보(LCI DB) 구축사업을 시작으로 2004년 국내 LCI DB 구축 방법론 및 관리·보급 확산을 통해 현재까지 약 400개의 국가 LCI DB가 개발되어 이용되고 있다.

2.2.2 LCI DB 구축 방법론 및 구축 절차

LCA 수행을 위한 LCI DB 구축 방법론은 크게 개별적산법(Process Analysis)과 산업연관분석법(Input-output Analysis)으로 구분되며 두 방법을 조합한 혼합법이 있다(Kim et al., 2004). 개별적산법은 검토 가능한 시스템 내의 모든 프로세스에 대한 데이터를 수집하는 방법이며, 산업연관분석법은 산업연관표의 산업간 유발계수를 이용하여 에너지 원료산업과 생산, 제조산업의 관계를 수학적으로 해석하는 방법이다. 현재 대부분의 LCI DB

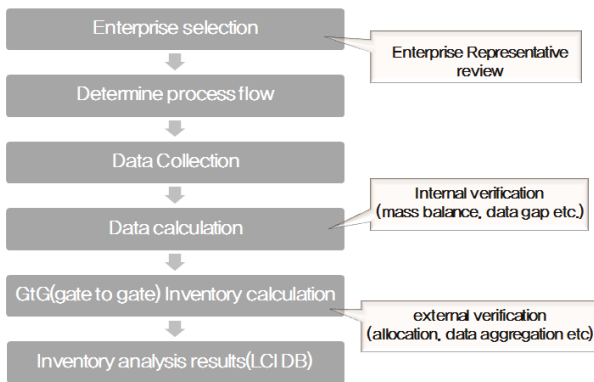


Fig. 2. Flow of LCI DB Development

구축은 데이터의 신뢰성 및 정확도가 높은 개별적산법을 통해 수행되고 있다. LCI DB 구축과 관련된 지침은 2003년 환경부에서 제정된 국가 LCI 데이터베이스 표준지침서가 있으며, 지침서에 따른 LCI DB 구축 절차는 Fig. 2와 같다. 본 연구에서의 교량용 탄성받침 LCI DB 구축 방법론은 제품 LCA에 많이 활용되고 가장 신뢰성이 높으며 현재 실용화된 LCA 분석 S/W (Total, PASS)에 적용된 개별적산법을 이용하였으며, 국가 LCI 데이터베이스 표준지침서를 바탕으로 한 LCI DB 구축 절차를 준용하였다.

2.2.3 건설분야 LCI DB 구축 연구동향

건설분야에서의 초기 LCI DB 구축 연구는 산업연관분석법을 이용한 DB 구축이 주를 이루었으나, 산업연관분석법의 경우 산업연관표에 기재되지 않은 건설자재는 분석할 수 없고 데이터 신뢰성에 한계가 있어서 최근 대부분의 LCI DB 구축 연구는 직접 업체조사를 통해 ISO 14040에 기준한 개별적산법을 이용하여 수행되고 있다. 건설분야 LCI DB 구축 관련 연구 동향은 Table 2와 같다.

3. 교량용 탄성받침 LCI DB 구축

3.1 제품 개요

교량용 탄성받침은 고무와 보강판의 적층으로 이루어진 것으로, 상부구조에 적용되는 모든 하중들을 하부 구조에 전달하고 상부구조와 하부구조 사이에 발생하는 신축과 회전 등을 수용하는 역할을 한다. 교량용 탄성받침은 다른 교량 받침에 비해 비교적 하중전달이 효율적이고 탄성변형에 대한 회전과 전단변형에 의한 이동이 자유로운 특징을 가지며, 설치가 간편하고 부식이 적어 설치 후 유지관리 측면에서도 경제적인 받침이다. 또한 교량이나 건축물의 상부구조에서 작용하는 수직하중을 안전하게 지지함과 동시에 수평이동을 허용함으로써 하부구조에 작용하는 과도한 수평력의 크기를 줄여 주고 또한 완충효과와 기능도 수행하는 적층형 고무탄성체를 말한다. 탄성받침의 제품도는 Fig. 3과 같다.

Table 2. Previous Studies on Building LCI DB in Construction

Title	Institution	Methodology/ Number of development
The study of LCA application schemes on construction industry areas (2003)	Ministry of land, transport and maritime affairs	Input-output analysis/ 540
Standardization development project of LCI DB (2003)	Ministry of environment/ministry of trade, industry and energy	Process analysis/ 24
National D/B for environmental information of building products (2008)	Ministry of land, transport and maritime affairs	Process analysis/ 64
Establishment of emission DB at production stage of material of green building certification (2010)	Ministry of environment	Process analysis/ 4

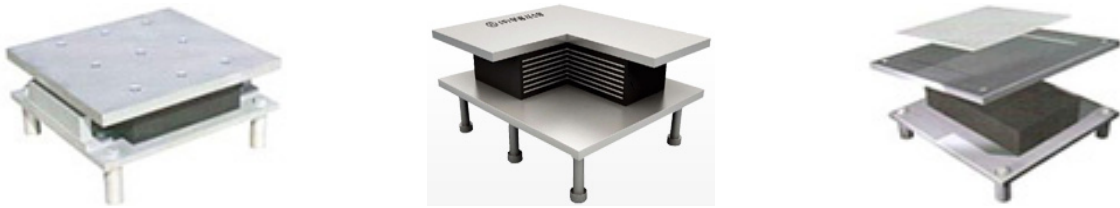


Fig. 3. Elastomeric Bearing

Table 3. Market Share of Elastomeric Bearing

Company	Selection	Market share (%)
Company A	○	Over 50%
Company B	○	
Others	-	Below 50%
Sum		100%

3.1.1 제품 특성

교량용 탄성받침은 내부에 1개 이상의 강판을 보강하여 압축변형 시 고무 측면의 팽출현상을 억제하여 내하력을 증가시킨 받침으로 하중전달이 효율적이며, 다른 받침에 비하여 차량의 충격하중 및 소음에 대한 흡수력이 우수하여 상시 사용성이 우수할 뿐만 아니라 고무의 전단변형에 의한 이동과 회전이 자유로워 곡선교 및 폭이 넓은 교량 등에 사용하면 유리하다. 또한, 부식이 거의 없어 유지관리에 큰 어려움이 없으며 시공이 간편한 경제적이기 때문에 도로공사에서 발주하는 PSC (Pre-Stressed Concrete) 교량 및 고속철도용 교량 등에 많이 사용되고 있다.

3.1.2 시장조사 및 대상업체 선정

국내 교량용 탄성받침은 대부분 중소 및 영세업체에서 취급하고 있으며, 탄성받침 취급업체는 대부분 유통업체이고, 생산업체들 중 일부 업체에서 국내 탄성받침의 대부분을 생산하고 있다. 국내 탄성받침 생산업체의 경우 아래 Table 3과 같이 A사, B사, 그 외 업체를 포함하여 국내 10여개의 업체에서 탄성받침을 생산하고 있으며, 이 중 3~4개 업체에서 국내 생산량의 대부분을 생산하고 있다. 따라서 탄성받침을 생산하고 있는 업체 중 시장조사 결과를 바탕으로 생산점유율이 높은 업체 2곳을 LCI 데이터베이스 구축 대상업체로 선정하였다. 업체별 시장점유율의 경우 명문화된 통계가 부재하나, 업체 사업보고서, 문헌자료, 업체종사자 자문 등을 바탕으로 탄성받침 제품에 대한 대략적인 점유율을 명시하였다. 본 연구에서는 교량용 탄성받침 제조업체인 A사, B사를 참여업체로 선정하여 연구를 진행하였으며, 업체별 공정의 유사성에 대한 자문을 통하여 국가 데이터베이스의 대표성을 확보하였다.

Table 4. Scope Definition

Category	Definition
Function	Support the load of the bridge superstructure and decrease horizontal force magnitude of substructure
Functional unit	Elastomeric bearing 1,350kN, 1,750kN, 2,000kN 1ea Production
Reference flow	Elastomeric bearing 1,350kN, 1,750kN, 2,000kN 1ea

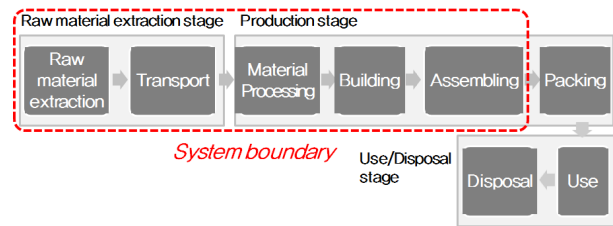


Fig. 4. System Boundary of Elastomeric Bearing

3.2 범위 정의

3.2.1 기능단위 설정

본 연구에서는 기능, 기능단위 및 기준흐름을 Table 4에 정의하였다.

3.2.2 시스템 경계

본 연구의 시스템 경계는 투입되는 철강 및 고무자재의 KS 규정 적합유무를 검사하는 공정인 재료투입 및 재료시험 공정부터 완성된 고무탄성체와 상·하판을 조립하여 최종제품으로 생산하는 조립공정까지를 포함하여 Cradle to Gate (제품의 Life cycle 내에서 원료취득(제품제조전)부터 제품출하전까지의 경계)로 정의하였다. 교량받침 생산에 대한 시스템 경계를 Fig. 4에 나타내었다.

3.2.3 제외 기준

본 연구에서는 투입물의 질량 및 에너지, 환경 관련성에 대한 추가적인 고려를 하지 않고 제품의 생산과정에서 모든 투입물 및 산출물을 포함하는 것을 원칙으로 하였다. 반면 제품 생산과 직접적인 연관이 없는 사무시설 및 편의시설 등은 제외하였다. 또한, 가공/제조단계에서 포장공정은 표준화되어 있지 않고 실제 제품의 기능 및 품질에 영향을 미치는 요인이 아니므로 시스템 경계에서 제외하였다.

3.2.4 데이터 범주

본 연구에서 고려하는 데이터 범주는 일반원칙에 따라 원료물질, 보조물질, 유틸리티, 제품, 대기 배출물, 폐기물로 구분하며, 각 데이터 범주별 투입물과 산출물은 Table 5와 같다.

3.2.5 데이터 품질

데이터는 크게 현장데이터와 공개된 일반데이터(국가 및 해외 LCI 데이터베이스)로 구분된다. 대상 제품을 생산하는 최종 생산단계에 대해서는 현장 데이터를 사용하는 것을 원칙으로 하고, 그 상위 및 하위공정의 기술계 흐름에 대해서는 공개된 일반데이터를 사용하였다. LCI 데이터베이스 구축 시에 적용된 데이터 품질요건을 Table 6에 나타내었다.

3.2.6 가정 및 제한사항

주요 가정 및 제한사항으로 공정데이터 중에서 상위흐름 환경데이터베이스가 없는 경우 데이터 갭(비추적원료물질)으로 표현하였다. 용수 및 산소사용량은 A사에서만 조사되었고, 각 업체의 공정이 동일하므로 용수 및 산소사용량도 동일하다고 가정하였으며. 전력 사용량은 공장동 Press 총 전력 사용량에 전체 생산제품 생산중량 대비 대상제품의 생산중량 비율을 적용하여 산정하였다. 철스크랩 발생량은 A사에서만 조사되었고, 각 업체의 공정이 동일하므로 철스크랩 발생량도 동일하다고 가정하였으며, LPG 사용량은 B사에서만 조사되었고, 각 업체의 공정이 동일하므로 LPG 사용량도 동일하다고 가정하였다.

Table 5. Data Category and Input and Output of the System

Group		Material
Input	Raw material	Steel plates, natural rubber
	Sub material	Solvents, xylene, epoxy paint, toluene
	Utility	Oxygen, electricity, industrial water, LPG
Output	Product	Elastomeric bearing
	Water emission	Waste water
	Air emission	Dust
	Waste	Steel scrap, rubber scrap, waste paint

Table 6. Data Quality Requirements

Group	Up/down stream	Production stage
Temporal scope	Most recent data	2015 Annual data (2015. 1.1~2015. 12.31)
Regional scope	Local data	Local data (Cheonan-si, haman-si)
Technological scope	-	Technologies of the elastomeric bearing production company

원료수송단계에 있어서 페인트 및 솔벤트는 A사에서만 조사되었고, 수송수단 및 수송거리는 양사가 동일하다고 가정하였으며, 톨루엔 및 자일렌은 B사에서만 조사되었고, 수송수단 및 수송거리는 양사가 동일하다고 가정하였다.

3.2.7 할당

교량용 탄성받침 생산 시 단일제품만 생산하는 것이 아니므로 전체 생산중량 대비 대상제품의 생산중량 비율을 이용하여 할당을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 전과정 목록분석

4.1.1 공정흐름도

초기 수집된 업체별 공정흐름도(process flow diagram)를 근거로 현장데이터 수집단위인 단위공정을 결정하였다. 단위공정 결정을 위해 데이터 수집의 용이성, 공정 특성, 부산물의 발생 여부 등을 고려하여 교량용 탄성받침 공정흐름도를 Fig 5와 같이 나타내었다. 교량용 탄성받침 생산의 경우 투입되는 재료의 가공 공정, 가공된 재료를 통해 고무탄성체를 생산하는 성형공정, 탄성받침의 상판을 조립하는 조립공정으로 구분하였다. 생산공정 중 재료 가공 공정은 교량용 탄성받침의 주요 재료가 되는 철판과 고무의 가공 공정으로, 원료를 규격에 맞추어 절단하고 접착이 잘되도록 접착제 및 약품을 도포하는 공정이다. 성형 공정은 교량용 탄성받침의 기능을 수행하는 고무 탄성체를 생산하는 공정으로, 가공된 철판과 고무를 쌓아 열과 압력을 가해 결합시키고 잔재를 제거한 후 KS 규격에 부합하는 고무탄성체를 생산하는 공정이며 조립 공정은 완성된 고무탄성체와 상·하판을 조립하여 최종 제품으로 제조하는 공정이다.

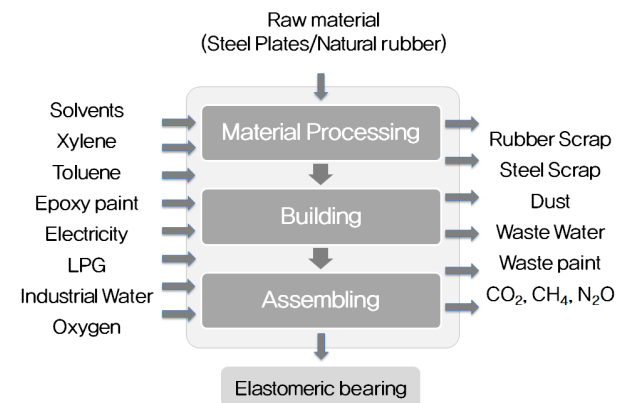


Fig. 5. Material Flow of Elastomeric Bearing Production

4.1.2 데이터 수집 및 계산

데이터 수집은 참여업체의 현장데이터를 우선 적용하는 원칙에 따라 설문서를 통하여 업체 현장데이터를 수집하였다. 데이터 수집이 불가능할 경우 논리적인 계산 및 추정을 통하여 데이터를 수집/보완하였다. 국가 평균 데이터베이스의 사용은 원료물질, 보조물질,

에너지 등의 상위흐름 및 하위흐름 연결을 위한 데이터베이스를 활용하는 것으로 환경부 및 산업통상자원부에서 개발한 LCI 데이터베이스와 Ecoinvent (www.ecoinvent.org) 등의 해외 데이터베이스를 활용하였다. 주요 원료 및 보조물질 등 투입물과 산출물에 대한 데이터 출처 및 수집결과는 Table 7과 같다. 기능단위를

Table 7. Data Sources for LCI of Elastomeric Bearing

Group	Material	Value (Unit/ea)				Data source			LCI Database			
		1,350kN	1,750kN	2,000kN	Unit	A	B	C	Database	Source	year	
Transport	1ton truck	Xylene	82	82	82	km	V			Road transportation (1ton<, <3ton)	Ministry of environment	2012
		Epoxy paint	30	30	30	km	V					
		Toluene	50	50	50	km	V					
	5ton truck	Solvents	92	92	92	km	V			Road transportation (5ton<, <8ton)	Ministry of environment	2012
		Container trailer	Steel Plates	264	264	264	km	V			Road transportation (Container Trailer)	Ministry of environment
	Natural rubber		336	336	336	km	V					
Production	Raw material	Steel Plates	156	190	209	kg	V			Steel plates	Ministry of environment	2005
		Natural rubber	5.8	7.1	7.8	kg	V			Natural rubber-coagulum	Ministry of environment	2003
	Sub-material	Solvents	0.28	0.34	0.37	kg	V			Solvent, organic, unspecified, at plant	Ecoinvent	2007
		Xylene	0.97	1.18	1.29	kg	V			Xylene	Ministry of trade, industry and energy	2000
		Epoxy paint	1.31	1.60	1.76	kg	V			Epoxy paint	Ministry of environment	2003
		Toluene	0.022	0.027	0.030	kg	V			Toluene	Ministry of trade, industry and energy	2000
	Utility	Oxygen	2.35	2.81	2.77	kg		V		Oxygen	Ministry of environment	2003
		Electricity	21.9	26.7	29.4	kWh		V		Electricity	Ministry of trade, industry and energy	2000
		Industrial water	3.4	4.1	4.5	kg		V		Industrial water (EDP2013)	Ministry of environment	2013
		LPG	6.9	8.4	9.2	kg		V		LPG	Ministry of trade, industry and energy	2007
	Air emission	Dust	0.59	0.72	0.79	kg		V		Dust	Elementary flow	-
		CO ₂	12.63	15.40	16.94	kg		V		Carbon dioxide	Elementary flow	-
		CH ₄	0.00020	0.00024	0.00027	kg		V		Methane	Elementary flow	-
		N ₂ O	0.00002	0.00002	0.00003	kg		V		Nitrous oxide	Elementary flow	-
	Water emission	Waste water	3.15	3.85	4.23	kg		V		Water emission (Waste water)	Elementary flow	-
Waste	Steel scrap	3.35	4.09	4.50	kg	V			Industrial waste	Elementary flow	-	
	Rubber scrap	0.49	0.60	0.66	kg	V			Industrial waste	Elementary flow	-	
	Waste paint	0.04	0.05	0.06	kg	V			Industrial waste	Elementary flow	-	

*Data source (A: Survey, B: Calculation, C: Estimation)

기준으로 한 데이터 전환 및 합산은 일반원칙을 따르며, 참여업체별 생산량을 기반으로 평균을 내고, 수직법(단위공정 데이터를 업체별로 계산하여 취합)을 사용하여 합산하였다. 보안상의 문제 또는 데이터 유실 등으로 인해 교량용 탄성받침 생산 시 사용되는 보조물질의 투입량이 누락된 경우, 업체 자문에 따라 공정상의 유사성을 바탕으로 타 업체 데이터 값을 적용하였다. LPG의 경우 연소로 인한 직접 배출량을 IPCC 방법론에 따라 산정하였다.

4.1.3 목록분석 결과

교량용 탄성받침 1개 생산시 데이터 수집 결과를 바탕으로 환경

부의 전과정평가 소프트웨어인 TOTAL을 사용하여 전과정 목록분석을 수행하였다. 주요 파라미터별 목록분석 결과는 Table 8과 같으며, 주요 파라미터는 Crude oil, hard coal, natural gas, NOx, SO₂, CO₂, COD, halon-1301, CFC-12, NMVOC, hydrocarbons로 나타났다. 원인 물질별 평균 기여도 분석 결과 Input의 주요 파라미터인 Crude oil, Hard coal, Natural gas에서는 원인물질 중 후판에 의한 기여도가 가장 높게 나타났으며, Natural gas에서는 후판의 기여도가 97.1%로 매우 높게 나타났다. Output 파라미터의 경우 COD와 CFC-12 파라미터를 제외한 나머지는 파라미터에서는 후판의 기여도가 가장 높게 나타났으며, COD는 천연고무의

Table 8. Result of Life Cycle Inventory Analysis for LCI Parameters

Parameter		Result value				Level of contribution (average of 3 standard)
		1,350kN	1,750kN	2,000kN	Unit	
Input	Crude oil	2.08E+01	2.54E+01	2.79E+01	kg	① Steel plates (58.5%) ② LPG (33.6%) ③ Epoxy paint (2.3%)
	Hard coal	2.40E+01	2.92E+01	3.21E+01	kg	① Steel plates (80.8%) ② Electricity (16.6%) ③ Oxygen (1.7%)
	Natural gas	5.74E+01	7.00E+01	7.70E+01	kg	① Steel plates (97.1%) ② Epoxy paint (1.9%) ③ Electricity (0.8%)
Output	Nox	5.09E-01	6.20E-01	6.82E-01	kg	① Steel plates (82.8%) ② Electricity (5.1%) ③ Epoxy paint (4.4%)
	SO ₂	1.87E-01	2.28E-01	2.51E-01	kg	① Steel plates (75.8%) ② LPG (15.6%) ③ Epoxy paint (7.1%)
	CO ₂	1.64E+02	1.99E+02	2.19E+02	kg	① Steel plates (79.2%) ② Process emission (7.7%) ③ Electricity (6.5%)
	COD	9.83E-02	1.20E-01	1.32E-01	kg	① Natural rubber (59.4%) ② Epoxy paint (32.2%) ③ Solvents (5.0%)
	Halon-1301	7.41E-07	9.03E-07	9.94E-07	kg	① Steel plates (97.0%) ② LPG (1.2%)
	CFC-12	4.00E-06	4.88E-06	5.37E-06	kg	① Solvents (99.9%) ② Epoxy paint (<0.1%)
	NMVOC	9.59E-01	1.17E+00	1.29E-01	kg	① Steel plates (99.7%) ② Transport-steel plates (0.1%)
	Hydrocarbons	1.82E-01	2.21E-01	2.43E-01	kg	① Steel plates (60.1%) ② LPG (26.0%) ③ Electricity (12.2%)

Table 9. Result of Characterization

Impact category	Result value				Level of contribution (average of 3 standard)
	1,350kN	1,750kN	2,000kN	Unit	
ADP	1.58E+00	1.93E+00	2.12E+00	1/yr	① Steel plates (83.3%) ② LPG (11.0%) ③ Electricity (2.4%)
AP	5.44E-01	6.64E-01	7.30E-01	kg SO ₂ -eq.	① Steel plates (80.3%) ② LPG (7.3%) ③ Epoxy paint (5.4%)
EP	7.09E-02	8.64E-02	9.50E-02	kg PO ₄ ³⁻ -eq.	① Steel plates (77.5%) ② Natural rubber (7.8%) ③ Epoxy paint (5.3%)
GWP	1.68E+02	2.05E+02	2.25E+02	kg CO ₂ -eq.	① Steel plates (79.1%) ② Process emission (7.5%) ③ Electricity (6.5%)
ODP	1.15E-05	1.41E-05	1.55E-05	kg CFC-11-eq.	① Steel plates (62.3%) ② Solvents (34.8%) ③ Natural rubber (1.1%)
POCP	4.74E-01	5.78E-01	6.36E-01	kg C ₂ H ₄ -eq.	① Steel plates (93.6%) ② LPG (4.1%) ③ Electricity (1.6%)

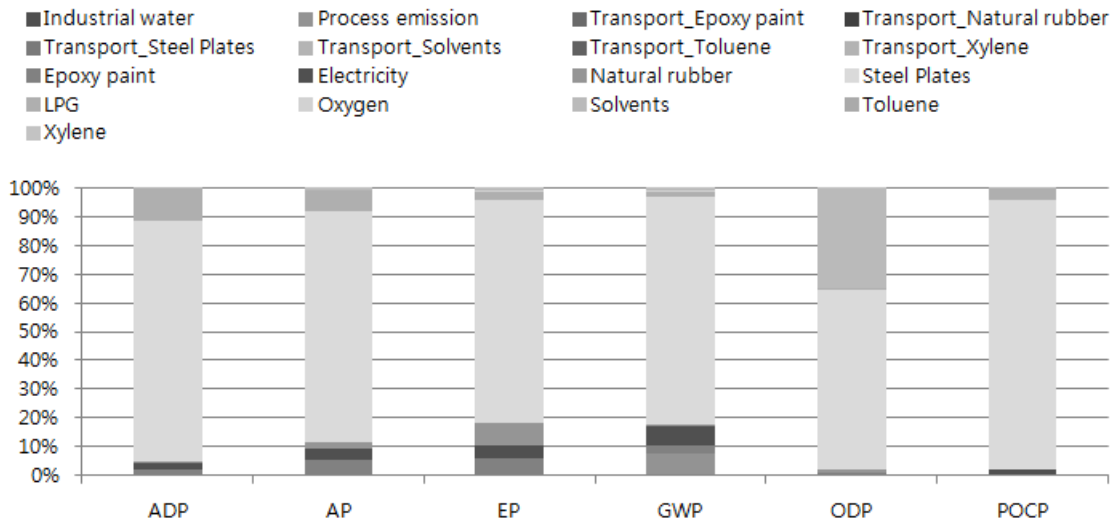


Fig. 6. Contribution Ratio of Substances by 6 Major Impact Category

기여도가 59.4%로 가장 높게 나타났고, CFC-12는 솔벤트의 기여도가 99.9%로 나타났다. 전반적인 교량용 탄성반침의 목록분석 결과 후편에 의한 기여도가 가장 높았으며, 파라미터에 따라 LPG, 전기, 에폭시계 도료 등의 물질의 기여도가 높은 편으로 나타났다.

4.2 전과정 영향평가

교량용 탄성반침 1개 생산시 목록분석 결과를 이용하여 전과정 영향평가를 수행하였다. 영향평가는 TOTAL 프로그램을 이용하여 산업통상자원부 영향평가 방법론을 적용하였으며, 자원고갈 (ADP), 산성화(AP), 부영양화(EP), 지구온난화(GWP), 오존층과 괴(ODP), 광화학산화물생성(POCP)로 총 6개의 영향범주를 고려하였다. 분석은 특성화, 정규화 및 가중화의 순서로 수행하였다.

4.2.1 특성화(Characterization) 결과

주요 6대 영향범주에 대한 특성화 결과를 산정하여 Table 9, Fig. 6에 나타났다. 영향범주별 원인물질에 따른 기여도 분석결과 6대 영향범주 전부 후편에 의한 기여도가 가장 높은 것으로 나타났

다. 자원고갈, 산성화, 광화학산화물생성 영향범주의 경우 후편, LPG 순으로 기여도가 높게 나타났고 부영양화의 경우 후편 다음으로 천연고무, 에폭시계 도료의 순으로 기여도가 높게 나타났다. 지구온난화 영향범주에서는 후편 다음으로 LPG 연소에 의한 공정 배출의 기여도가 약 7.5%로 상대적으로 높게 나타났으며, 오존층과 괴 범주에서는 솔벤트의 기여도가 34.8%로 후편 다음으로 가장 높은 기여도를 나타냈다.

4.2.2 가중화(Valuation and Weighting) 결과

산업통상자원부 영향평가 방법론에 따른 가중화 결과 산정을 위해 Table 10의 정규화 및 가중화팩터를 이용하였으며 세부적인 가중화 결과는 Table 11과 Fig. 7에 나타내었다. 가중화 산정 결과 교량반침 1개 생산시 총 환경영향은 1,350kN, 1,750kN, 2,000kN 각각 2.72.E-02, 3.32.E-02, 3.65.E-02 Eco-point로 나타났으며, 영향범주별로는 자원고갈 및 지구온난화의 점유비율이 54.0%, 32.2%로 가장 높게 나타났다. 이는 가중화 지수 산정을 위한 영향범주 간 상대적 비교시 자원고갈과 지구온난화의 중요도가

Table 10. Normalization and Weighting Factor

Impact category	Normalisation factor	Weighting factor
ADP	2.49.E+01	9.28.E-03
AP	3.98.E+01	9.05.E-04
EP	1.31.E+01	2.90.E-03
GWP	5.53.E+03	5.21.E-05
ODP	4.07.E-02	7.17.E-00
POCP	1.03.E+01	6.31.E-03

Table 11. Result of Valuation and Weighting

Impact category	Result value				Level of contribution
	1,350kN	1,750kN	2,000kN	Unit	
ADP	1.47.E-02	1.79.E-02	1.97.E-02	Eco-point	54.0%
AP	4.92.E-04	6.01.E-04	6.60.E-04	Eco-point	1.8%
EP	2.06.E-04	2.51.E-04	2.76.E-04	Eco-point	0.8%
GWP	8.75.E-03	1.07.E-02	1.17.E-02	Eco-point	32.2%
ODP	8.26.E-05	1.01.E-04	1.11.E-04	Eco-point	0.3%
POCP	2.99.E-03	3.65.E-03	4.01.E-03	Eco-point	11.0%
Total	2.72.E-02	3.32.E-02	3.65.E-02	Eco-point	100.0%

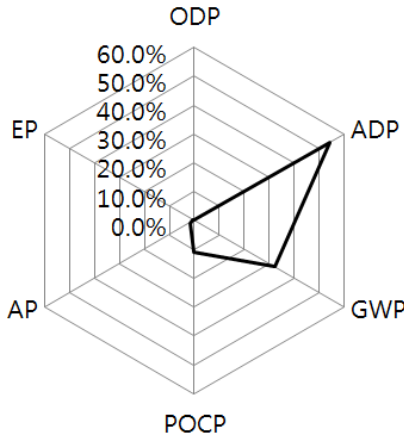


Fig. 7. Result of Weighting for Each Impact Categories

다른 영향범주에 비해 높고 탄성받침의 목록분석 결과 오존층파괴, 부영양화, 산성화에 영향을 주는 물질이 많이 포함되어 있지 않아 상대적으로 자원고갈 및 지구온난화의 가중화 결과가 높게 분석되었다.

4.3 교량의 환경부하평가 신뢰성 향상 결과

본 연구에서 도출된 교량용 탄성받침(1,350kN, 1,750kN, 2,000kN) LCI DB 구축 결과를 바탕으로 “SOC 시설물의 환경부하 저감을 위한 LCA 기반 의사결정시스템 개발” 연구팀의 PSC 교량 환경부하평가 결과(Yun et al., 2016)를 이용하여 교량용

탄성받침 LCI DB 적용 전후 환경부하평가의 신뢰도 향상을 산정하였다. 기존 PSC 교량시설의 사례 분석 결과 교량용 탄성받침의 전체 규격 중 본 연구에서 도출한 1,350kN, 1,750kN, 2,000kN 규격의 점유비율은 약 96% 수준으로 매우 높게 나타났으며 총 172개 사례의 교량용 탄성받침 세부적인 규격 사용 비율은 Table 12와 같다.

172개의 사례분석을 통한 교량용 탄성받침 LCI DB 적용 전후 평균 환경부하량 비교 결과를 Table 13에 나타냈으며, 교량 1개 기준 평균 환경부하량이 1.20E+01 Eco-point만큼 증가하여 적용 전 대비 약 0.53% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 투입자재의 금액 기준 비율(Cut-off)로는 평균적으로 11.36% 증가하는 것으로 나타났으며, 세부적인 결과는 Table 14와 같다.

5. 결론

본 연구에서는 LCI DB 결핍 건설자재 중 교량용 탄성받침에 대해 국가 LCI 데이터베이스 표준지침서를 기준으로 교량용 탄성받침 LCI DB를 신규로 구축하였다. 또한, LCI DB 구축 결과를 바탕으로 산업통상자원부 영향평가 방법론에 의한 전과정평가를 통해 6가지 주요 영향범주의 특성화 및 가중화 환경부하량을 분석하였다. 다음으로 본 연구를 통해 구축된 교량용 탄성받침 LCI DB를 현재 연구수행중인 교량 환경부하평가 적용하여 교량시설에서의 실질적인 환경부하평가 신뢰성 향상 결과를 분석하였다. 교량용

Table 12. Portion of Elastomeric Bearings used in PSC Bridge by Specification

Bridge No.	1,350kN	1,750kN	2,000kN	Other type*	Unit
1	100	-	-	-	ea
2	80	-	-	-	ea
3	60	-	-	-	ea
4	20	-	-	-	ea
5	20	-	-	-	ea
6	-	182	-	-	ea
7	2	-	-	18	ea
8	-	122	10	-	ea
...
170	-	64	-	-	ea
171	-	30	-	-	ea
172	-	16	-	-	ea
Total	4,369	4,706	398	406	ea
ratio	44.2%	47.6%	4.0%	4.1%	%

*500kN, 1,000kN, 2,500kN, 2,230kN, 2,250kN, 2,800kN

Table 13. Comparison of Environmental Load by Application of Elastomeric Bearing LCI DB

Category	Environmental load				
	Non-application	Application	Unit	Rate	
Bridge No.	1	3.86E+02	3.88E+02	Eco-point	0.75% △
	2	3.62E+02	3.65E+02	Eco-point	0.64% △
	3	2.27E+02	2.29E+02	Eco-point	0.76% △
	4	1.77E+02	1.77E+02	Eco-point	0.33% △
	5	1.40E+02	1.41E+02	Eco-point	0.41% △
	6	8.99E+02	9.05E+02	Eco-point	0.70% △

	170	3.17E+02	3.19E+02	Eco-point	0.70% △
	171	4.52E+02	4.53E+02	Eco-point	0.23% △
	172	1.47E+02	1.48E+02	Eco-point	0.38% △
Average	3.19E+02	3.21E+02	Eco-point	0.53% △	
Standard deviation	2.53E+02	2.54E+02	Eco-point	0.27% △	

Table 14. Comparison of Cut-off Growth Rate by Application of Elastomeric Bearing LCI DB

Category	Environmental load			
	Non-application	Application	Unit	Rate
Average	80.92%	89.80%	%	11.36% △
Standard deviation	6.20%	4.14%	%	6.15% △

탄성받침 LCI DB 구축의 기여도 분석결과 주요 파라미터는 Crude oil, Hard coal, Natural gas 등이며 대부분의 투입물질에서 후관에 의한 영향이 가장 높은 것으로 나타났다. 전과정평가에 따른 특성화 결과 6대 영향범주 전부 후관에 의한 기여도가 최소 70.1%에서 최대 93.1%로 높게 나타났으며, 광화학산화물생성 영향범주에서의 후관 기여도가 93.1%로 가장 높게 나타났다. 전과정평가에 따른 가중화 분석결과 교량용 탄성받침 제조시 자원고갈 영향범주의 기여도가 54.0%로 가장 높게 나타났으며, 지구온난화(32.2%), 광화학산화물생성(11.0%) 순으로 높은 기여도를 보였다.

교량용 탄성받침 LCI DB 구축에 따른 환경부하평가 신뢰성 평가결과 DB 적용 후 전체 환경부하량이 평균적으로 0.53% 증가하였으며, Cut off 기준으로 DB 적용 전 대비 약 11.36%의 증가율을 나타내었다.

교량용 탄성받침은 국내의 LCI DB 구축 사례가 존재하지 않고 그와 유사한 기능을 수행하는 포트받침, 스페리컬받침 등의 제품도 LCI DB 구축 사례가 없으므로 향후 교량 받침과 관련된 여러 제품에 대한 LCA 분석 수행에 있어서 기초적인 연구자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 교량용 탄성받침은 PSC 교량을 비롯한 여러 종류의 교량 설계 및 사공시 많이 사용되는 자재이며 최근 들어 지진 발생 빈도 증가 등으로 수요가 계속 증가할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구를 통해 도출된 교량용 탄성받침 LCI DB를 통해 온실가스 배출량 산정, 환경부하평가 등에 대한 신뢰성을 향상시키고 환경적 의사결정을 위한 평가와 각종 인증(탄소성적표지 및 환경성적표지)에서, 현재의 생산 기술 수준이 반영된 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위한 기반을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(16SCIP-C085707-03)에 의해 수행되었습니다.

References

Ecoinvent. (2017). Ecoinvent Version 2.2, Ecoinvent, Switzerland, Available at: www.ecoinvent.org (Accessed: January, 2017).
 Hwang, Y. W. (2000). "The need for LCA for comprehensive environmental load assessment of the construction industry." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 48, No. 1, pp. 13-18.
 IPCC. (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*.
 ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management-life cycle assessment-principles and framework*, ISO, Geneva, Switzerland.
 Kim, J. Y., Kim, S. W., Sohn, J. W. (2004). "a study on the estimation

- of the environmental load intensity of construction materials for the building LCA.” *Journal of the architectural institute of korea*, Vol. 20, No. 7, pp. 208-215.
- Korea Institute of Construction Technology. (2004). *The environmental load unit composition and program development for LCA of building* (in Korean).
- Ministry of Environment. (2003). *LCI database standard guideline* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2003). *The study of lca application schemes on construction industry areas* (in Korean).
- Ministry of Environment. (2006). *Manual for tool of type iii labelling and LCA, total* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2008). *National D/B for environmental information of building products* (in Korean).
- Ministry of Environment. (2010). *Establishment of emission DB at production stage of material of green building certification* (in Korean).
- Yun, W. G., Cho, N. H., Lee, W. R., 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.