

PSC Beam 교량의 설계단계 환경부하량 산정을 위한 공종 및 설계정보 특성 분석

윤원건* · 하지광** · 김경주***

Yun, Won Gun*, Ha, Ji Kwang**, Kim, Kyong Ju***

An Analysis of the Characteristics of Standard Work and Design Information on Estimating Environmental Loads of PSC Beam Bridge in the Design Phase

ABSTRACT

As many environmental pollution problems have arisen, various studies related to the environmental evaluation have been carried out in the construction industry. However, there is no methodology for estimating the environmental load quickly for design alternatives of civil facilities in the design phase. This study aim to establish criteria of works information and designed parts which can efficiently estimate environmental loads of PSC beam bridge based on standard quantity at the early design phase. For this purpose, a detailed environmental loads database was constructed by performing Life Cycle Assessment (LCA) based on detailed design data of 25 bridges. In addition, major work with high impact on environmental load were selected, and the analysis of characteristics of environmental load according to the required materials and 8 impact categories were conducted. As a result, the superstructure accounted for 42.91%. In the superstructure, remicon of the material base and PSC beam work occupied 53.13% and 31.25%. In the substructure, remicon, rebar, and cement, which are material base, accounted for more than 93%. It is expected that this major work and material information for each part of bridge can be utilized in the construction of the model, which can estimate the approximate environmental load, reflecting the characteristics of the structure in the design phase.

Key words : LCA (Life Cycle Assessment), LCI (Life Cycle Inventory), Environmental load, PSC beam bridge, Standard work type

초록

산업화 시대를 지나며 많은 환경오염문제가 발생함에 따라, 친환경적이며 지속 가능한 발전을 위해 건설 산업계에도 환경성 평가 관련한 다양한 연구가 수행되고 있다. 그러나 설계단계 활용을 목적으로 토목시설물의 부위별 설계 대안에 대한 신속한 환경부하 산정 방법론은 부재하다. 이에 본 연구는 Pre-Stressed Concrete (PSC) beam교량을 대상으로 구조물 주요 부위별 표준단면을 이용한 환경부하 산정을 위한 선행연구로서, 설계초기 단계에서의 대표물량정보 기반 환경부하량을 효율적으로 산정할 수 있는 설계부위 및 공종정보 기준을 구축하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 25개 PSC Beam교량 사례에 대한 상세설계자료를 기반으로 ISO 14040의 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 수행절차를 통한 상세환경부하량 데이터베이스를 구축하였으며, 목적 및 범위는 교량의 자원제조 및 수송단계와 시공단계만으로 한정하였다. 또한, 환경부하발생에 영향이 높은 부위별 대표공종을 선정하여, 이러한 부위 및 공종분류에 따른 소요자원 및 8대 영향범주 별 환경부하량 특성분석을

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

** 중앙대학교 토목공학과 석사과정 (Chung-Ang University · wlrhkd29@gmail.com)

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

Received March 9, 2017/ revised April 18, 2017/ accepted May 30, 2017

수행하였다. 그 결과 교량의 특성상 상부공이 전체 42.91%의 환경부하량으로, 상부공중에서는 주요 자재인 레미콘이 53.13%, PSC beam공이 31.25%로 나타났다. 또한, 하부 교대·교각공에서는 주요 자재인 레미콘, 철근, 시멘트가 93%이상으로 대부분을 차지하였다. 향후 이러한 교량 부위별 대표공종 및 자재 정보들은 설계단계에서 구조물의 특성이 반영된 개략 환경부하량 모델 구축시 활용될 수 있을 것이다.

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

1. 서론

산업화 시대를 지나며 2,3차 산업의 발전으로 인류는 양적 질적 번영을 이루었다. 그러나 동시에 많은 환경오염문제를 야기하여 기후변화, 사막화, 오존층파괴 등의 부작용을 앓고 있다. 이에 따라 ‘환경 보호와 경제개발의 양립’과 ‘친환경적이며 지속 가능한 발전’의 개념들이 등장하였고 1992년 “리우회의” 개최, 1997년 “교토의 정서” 체결 등 국제적으로 환경보호를 위한 정책과 활동이 시행되었다. 최근에는 2015년 “파리협정(Paris Agreement)”을 통하여 세계 온실가스 배출량의 90%를 차지하는 195개국(유엔 기후변화협약 당사국총회)이 온실가스 배출 감축 목표를 설정하고 이를 지킬 것을 합의하였다. 국내에서도 2009년 국가발전 전략으로서 “저탄소 녹색성장기본법”을 시행하여 국토·도시공간구조와 건축·교통체계의 저탄소 녹색성장을 추진하였고(Korea Ministry of Government Legislation, 2016), “파리협정”에 따라 2030년 까지 온실가스 배출량 37% 감축 목표를 선언하는 등(UNFCCC, 2015), 선진국으로서 국제사회적인 책임을 다하고 환경과 산업의 균형 있는 발전을 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

국내의 환경 정책에 맞춰 건설산업계에도 친환경관련 다양한 연구가 수행되고 있으며, 대표적으로 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)기법을 통하여 다수의 환경성 평가 연구가 진행되었으나 일부 한계를 가진다. LCA를 통해 건축물을 대상으로 원단위 탄소배출량 산정 연구를 하였으나(Kim et al., 2004; Bae et al., 2015), 산출 과정에서 시설물의 구조적인 특성을 고려하지 않아 공학적인 결과분석이 어려우며, 탄소배출 외의 다양한 환경부하 특성을 고려하지 못하였다. 국토교통부는 도로, 철도, 건축물 등을 대상으로 시설물별 탄소배출량 산정가이드라인(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012)을 제시하였으나, 이 방법은 상세설계가 완료된 이후에 적용이 가능하기에 설계 초기 의사결정이 이루어지는 단계에서의 활용이 제한된다. 한편, 건축물을 대상으로 설계 단계의 의사결정시기를 겨냥한 환경성 평가모델 연구가 일부 진행되었으나(Li et al., 2014; Hong and Ji, 2015) 토목시설물 대상으로 구조물 부위별 설계 대안에 대한 환경성 의사결정지원 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구는 국내 교량 형식 중 가장 일반적으로 활용되고 있는 Pre-Stressed Concrete (PSC) Beam교량을 대상으로 설계

초기단계의 소수 가용정보만으로 구조물의 특성이 반영된 공종별 환경부하량을 효율적으로 산정할 수 있는 설계부위 및 대표공종정보 기준을 구축하는 것을 목표로 설정하였다. 세부 연구내용은 크게 두 단계의 프로세스로 수행되며, 우선 각 교량의 설계보고서, 내역서 등의 기초 설계자료와 8대 환경부하 영향범주로 구성된 Life Cycle Inventory Data Base (LCI DB)를 수집하였다. 이를 토대로 ISO (International Organization for Standardization) 14040의 LCA 방법론을 준용한 사례별 환경부하량 산출을 통해 지원 데이터베이스를 구축하였으며, 목적 및 범위는 교량의 자원제조 및 수송단계와 시공단계만으로 한정하였다. 마지막으로 이를 기반으로 환경부하 발생에 높은 비중을 차지하는 대표공종을 선정하여 공중 및 자재별 환경부하량을 산출함으로써 설계부위 및 공종간 환경부하량 배출 특성들 및 설계정보와의 상관성을 비교·분석한 결과를 제시하였다.

2. 예비적 고찰

2.1 LCA

건설부문에서 LCA는 시설물의 소요되는 자재 및 에너지의 제조 단계부터 시공단계, 운영 및 유지 단계, 폐기 단계까지 전 과정에 걸쳐 투입물과 배출물로 인해 발생하는 환경부하를 정량화하여 평가하는 기법이다. LCA 수행과정은 목적 및 범위 설정 (Goal and Scope Definition), 목록분석(Inventory Analysis), 영향평가(Impact Assessment), 결과해석(Interpretation)의 4단계로 구성된다(ISO 14040, 2006). 다음 Fig. 1은 LCA 수행절차를 보여준다. 첫째, 목적 및 범위 설정 단계는 LCA를 수행하는 시작단계로 연구목적과 범위가 무엇이며, 얻어지는 평가를 어떻게 사용하는가를 정의하는 단계이다. 연구의 범위에는 시스템 경계, 기능단위

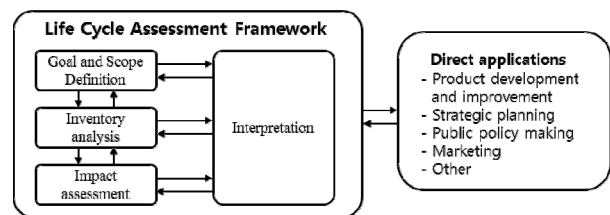


Fig. 1. Stages of an LCA

(Function Unit), 영향평가 방법, 데이터의 요구조건, 연구의 가정 및 제한요인 등이 포함된다. 둘째, 목록분석 단계는 선정된 시스템을 대상으로 해당 시스템에 투입되는 에너지 및 원료, 그리고 배출되는 제품, 부산물, 오염물질 등의 종류와 양을 파악하여 정량화하는 과정이다. 셋째, 목록분석 결과를 분석하고자 하는 환경영향의 범주로 분류화 특성화 가중화 등의 과정을 거쳐 영향해석을 실시하는 단계이다. 넷째, 결과해석단계는 목록분석 및 환경영향 평가로부터의 고찰 결과를 목적과 범위에 맞추어 결합하는 단계이다.

2.2 LCI DB

LCI DB란 제품 기능단위의 생산에 필요한 원자재의 채취 및 소제/부품가공, 수송 제품사용, 폐기(제품 시스템 전과정)까지의 제품 시스템으로 투입되는 자원의 양과 제품시스템에서 환경으로 버려지는 배출물, 폐기물의 발생량을 목록화한 데이터로서 LCA를 수행하는데 기초데이터로 활용된다. 본 연구에서는 수집된 건설프로젝트 사례 LCA DB화에 산업자원부와 환경부에 의해 구축된 LCI DB를 사용하였다.

2.3 건설분야의 LCA 연구동향

건설분야의 환경부하 저감을 위해서 LCA를 적용한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 먼저, 몇몇 연구들에서는 대상 시설물의 환경성능을 이산화탄소 배출량 위주로 정량적 평가하는 연구를 수행했다. 예를 들어 Kim et al. (2004)은 건축물을 대상으로 산업연관표를 이용하여 자재 제조단계 및 시공단계에서 장비 사용으로 인한 이산화탄소 배출량을 산출하여 단계별 원단위 이산화탄소 배출량을 도출하였다. Jeong and Huh (2011)은 친환경 건축물 설계 활성화를 위해 건축물의 전생애주기에 걸쳐 발생시키는 이산화탄소배출량 산출 프로세스를 제안하였다. 프로세스 구축 과정 중 전과정 목록분석은 건축물의 라이프사이클에 따라 단계별로 분류하여 요구데이터 및 목록분석 방안을 제시하였다. 위 연구들은 환경성능을 정량화하여 환경성평가 연구의 기초자료 형성에 기여하였지만, 탄소배출량만을 고려하여 다양한 환경부하 특성을 고려하지 못한다는 한계점이 있다.

Hammervold et al. (2013)은 규모가 비슷한 Steel box girder, wooden arch, concrete box girder 교량 사례에 대해 환경부하량을 산출하여 교량 형식별로 비교 분석 분석하였으며, Bae et al. (2015)는 서울시에 기 건설된 아파트를 빌딩 타입, 열 시스템, 연료에 따라 열 가지로 분류하여 건설, 운영, 폐기 단계의 이산화탄소 배출량을 개별적산법과 산업연관법을 혼합한 LCA기법을 이용하여 원단위 탄소배출량을 산출하였다. 기존의 연구에서 제시하는 환경성 평가는 단위면적당 환경부하량을 도출하는 원단위 평가 방식이다. 원단위 평가 방식은 단순하고 신속하게 환경성을 평가할

수 있다는 장점이 있지만, 구조물은 부위별 공중에 따라 환경부하량을 방출하는 요인들이 다르기 때문에 면적이나 연장을 이용한 원단위 분석만으로는 공학적인 결과분석이 제한적이다.

국토교통부는 도로, 항만, 철도, 건축물 등을 대상으로 시설물별 탄소배출량 산정가이드라인(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012)을 제시하였다. 이러한 연구는 시설물에 실제 투입된 자원을 활용하여 환경부하량을 비교적 정확하게 산출할 수 있으나, 상세설계가 완료된 이후 투입 자원의 내역이 완성되어야지만 환경부하량을 산정할 수 있다. 그러므로 설계 대안평가가 이루어지는 설계 초기단계에서는 적용하기 어려운 한계를 지니고 있다.

Li et al. (2014)은 설계 단계에서 건축물을 대상으로 업무 분해 구조(Work Breakdown Structure, WBS)를 기반 탄소배출량 산정 모델을 구축하였다. 물량내역서(Bill of Quantity, BOQ)와 carbon footprint factor database를 연계하여 모델을 탄소배출량을 산정하는 방식을 제안하였고, 설계 단계에서 탄소배출량을 정량화하여 환경성능평가를 효과적으로 할 수 있음을 나타냈다. Hong and Ji (2015)는 산업연관법을 활용한 I-O LCA 모델과 산업연관법과 개별적산법을 혼합하여 개발한 Hybrid LCA 모델을 비교평가 하였다. 이처럼 건축물 대상으로 건설 프로젝트 초기적용 연구는 다수 진행되었다. 또한, SOC 시설물에 대한 연구는 주로 도로, 터널 등 소수의 시설물의 대해서만 생애주기 및 공중별 분석 연구가 수행되었으며(Surawong and Soralum, 2014; Lee et al., 2016), 설계단계에서의 구체적 적용성에 대한 검토는 미흡하였다.

따라서 본 연구는 국내에서 수행된 국도건설 프로젝트 설계 자료를 수집하였으며, 교량 형식 중 가장 일반적으로 적용되는 PSC Beam교량을 대상으로 연구를 진행하였다. 또한 ISO LCA의 8대 영향범주별로 환경부하량을 산출하여 폭넓은 환경성 평가를 가능하게 하였으며, 향후 설계초기 단계에서 활용할 수 있는 대표물량정보 기반 환경부하량 산정 모델 구축을 위한 기준을 제시할 수 있는 기초 연구를 수행하고자 하였다.

3. PSC beam교 환경부하량 특성 분석

본 연구는 다음의 Fig. 2와 같이 크게 두 단계로 수행되었다. 첫 번째는 LCA기법을 활용하여 교량사례의 총 환경부하량을 산출하고 부위 분개 기준에 따라 교량의 부위별로 분기하는 단계이며, 두 번째 단계는 부위별 환경부하량 산출결과를 기준으로 대표공종을 선정하고 이에 대한 분석을 수행하는 단계이다.

첫 번째 부위별 공중별 환경부하량 데이터베이스 구축 단계는 수집한 교량사례의 총 환경부하량을 산출하여 데이터베이스화 하는 단계이다. 우선 PSC Beam교량 사례의 수량산출서와 내역서등

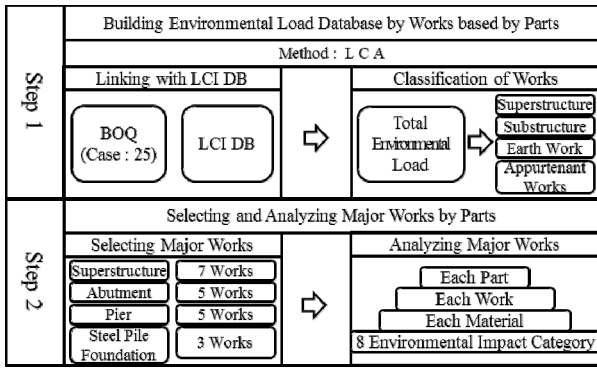


Fig. 2. Process of Study

의 수집한 설계자료를 활용하여 공종별 소요자원을 추출하고 이를 LCI DB와 연계하여 환경부하량을 산출한다. 산출한 공종별 환경부하량은 교량의 부위 구조적 특성에 따른 물량산출 특성을 적용하기 위해서 부위 분개 기준 즉, 설계도면 및 수량산출기준을 기준으로 상부, 하부(교대, 교각, 기초), 토공, 부대공 4가지 부위로 집계하여 부위별 환경부하량 데이터베이스를 구축한다.

두 번째, 부위별 대표공종 선정 및 분석단계는 환경부하량 발생의 주요한 몇 가지 공종을 파악하기 위하여 수행하는 단계이다. 구축된 데이터베이스를 분석하여 부위별 전체 환경부하량에 대한 점유 비율을 도출하고 환경부하량을 많이 발생시키는 공종을 우선순위로 대표공종을 선정한다. 선정된 부위별 대표공종에 투입되는 자원을 8대 영향범주별로 분석하며, 설계조기단계 의사결정 가능정보로 공종수량 추정 가능성이 여부와 가능정보와 환경부하량간의 상관성을 분석하였다.

3.1 연구대상범위 설정 및 기초자료 수집

분석 대상은 2001~2010년 사이에 설계된 한국의 국도 도로건설 프로젝트를 대상으로 하였으며, 사례의 특수성을 최소화하기 위해 서울, 부산, 대전, 원주, 익산청을 대상으로 25개의 실제 설계자료를 수집하였다. 본 연구는 향후 구축될 모델을 고려하여 가장 일반적으로 적용되는 폭원 20.9m 4차로를 표준단면으로 설정하고 분석 대상 교량을 선정하였으며, 실제 교량에 투입된 소요자원의 수량을 통해 환경부하량을 도출 하는 개별적산법을 통한 LCA 정보를 활용하였다. 따라서 수집한 교량의 물량내역서(Bill Of Quantity, BOQ)와 적산자료를 토대로 공종별 소요자원별 데이터를 집계 및 분석하여 LCI DB와 연계하는 방식으로 최종 사례별 환경부하량을 산출하였다. 본 연구에서는 ISO 14040의 LCA 수행절차를 준용하였으며 특히, 목적 및 범위 설정에서는 건설 자원의 제조 및 수송 단계와 시공단계에서 투입된 에너지를 대상으로 하였다. 유지관리 단계와 폐기단계에 대한 분석은 대상 사례에 대한 기초자

료 수집의 어려움으로 고려하지 않았다. 또한 환경부하량 분석은 ISO기준의 8대 환경부하 영향범주 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)로 결과를 도출하여 기존 대부분의 연구에서 탄소배출량을 기초로 적용한 지구온난화뿐만 아니라 여러 환경오염인자를 고려하여 다차원적인 환경성 분석이 가능한 방법론을 구축하고자 하였다.

3.2 LCA기반 환경부하량 산출 데이터베이스

본 연구에서시설물의 세부 특성별 분석을 위해 환경부하량을 부위별 공종 단위로 집계하였다. 본 연구는 PSC Beam교를 설계단계에서의 구조와 기능을 고려하여 상부, 하부(교대, 교각, 강관파일 기초), 토공, 부대공 4가지 부위로 나누었으며, 부위에 따른 공종은 일반적인 공사수행 관점의 분류인 작업분류체계(Work Breakdown Structure)와는 다르지만 설계단계 수행업무 기준을 고려하여 기존 설계시 표준적으로 활용되는 국도설계기준과 표준품셈, 수량산출기준 등의 자료를 참고하여 다음 아래의 Table 1과 같이 분류 하였다.

이를 기준으로 수집한 25건 사례의 BOQ를 토대로 소요자원의 수량을 파악한 후 LCI DB와 연계하여 전체 공종별 환경부하량을 산출하였으며, 연계방식은 LCI DB Inventory 항목의 주요 용도를 고려하여 소요자원과 연계하는 방식을 적용하였다(Cho et al., 2016).

또한 각 영향범주별로 산출된 환경부하량은 측정단위가 서로 상이하기 때문에 상호 비교평가가 가능하도록 하나의 환경영향 평가지표를 적용할 필요가 있다. 이를 위하여 목록분석을 통해 산출한 여덟 가지 영향범주의 특성화 값을 정규화 및 가중화 과정을 통해 하나의 환경영향 평가지표로 통일 하였으며, 본 연구에서는 다음의 Table 2과 같이 “산업통상자원부”에서 제공하는 정규화 및 가중화 값을 통해 변환된 단위(Eco-point)로 변환하여 각 영향범주별 결과값을 동등한 수준으로 비교 평가하였다.

그리고 제시한 분류기준에 따라 공종별 환경부하량을 부위별로 분개하여 부위별 공종별 환경부하량을 산출하였다. 구축한 데이터베이스를 분석하여 각 부위별로 환경부하량을 차지하는 점유비율을 구하였다(Fig. 3 참조). 그 결과 교량 전체 환경부하량 대비 상부공 42.91%, 하부공 48.80% (교대 : 22.31%, 교각 : 21.90%, 강관파일기초 : 4.58%), 부대공 7.38%, 토공 0.91%를 차지하는 것으로 나타났으며, 상부공과 하부공이 교량 전체 환경부하량의 91.71%를 차지하는 것으로 나타났다.

Table 1. Classification of Works by Parts (Kang, 2009)

Parts	Works by parts
Superstructure	Deck, Girder, Pier table, Deck finisher, PSC tendon installing and tensioning work, Superstructure (Pier table, Side span, Key-Seg, Form Traveler, Temporary bent, etc.) Temporary Facility, Steel structure, Steel bridge painting, Staging/Scaffolding (common work), Scrap metal payment, Construction joint (Styrofoam), Bridge deck waterproofing (Coating), Surface treatment, Slab Curing/concrete finishing, Cover Plate, Reinforcing bar work (common work), Spacer (common work)
Substructure	Pier, Abutment, Foundation work (including Footing), Approach Slab (including Dowel bar), Bridge bearing, Staging/Scaffolding (common work), Scrap metal payment, Construction joint (Styrofoam) (common work), Asphalt waterproofing, Concrete Curing (Substructure), Spacer (common work), Reinforcing bar work (common work)
Earth	Trech, Embankment from Excavation, Banking, Refilling and Compacting, Water drain, Concrete finishing and Cleaning, Riprap filling for scour protection Etc
Appurtenant	Bridge railing and Median, Bridge-decks surfacing, Bridge drainageway work, bridge attached facility, Expansion joint, Temporary bridge for work/Temporary road for Work, Inspection stairs, Abutment protection work, Notch, Guard Fence, Temporary Foundation facility, Nameplate, Drainageway work
Steel Pile Foundation	Steel pile material base, boring, Head and toe reinforcement, Load test cost (Dynamic, Static)
Note	Nonshrinkage : Bridge bearing (Abutment, Pier) Nonshrinkage : Expansion joint equipment (Appurtenant work)

Table 2. Environmental Impact Categories

Impact Category	ARD	AD	EU	GW	OD	POC	TET	HT
Unit	l/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

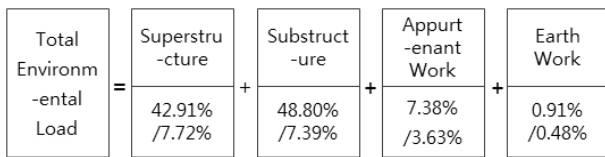


Fig. 3. Occupancy Ratio of Environmental (Env.) Load by Parts

3.3 대표공종 선정 분석

구축한 25개 사례의 환경부하량 데이터베이스를 기반으로 부위별로 환경부하량을 많이 발생시키는 공종들을 우선순위로 나열하여 대표공종을 선정하였다. 대표 공종 선정 시 에너지 사용으로 인한 환경부하량이 자재에서 기인한 환경부하량에 비해 미미하여 에너지측면에서의 분석이 누락되는 경향이 발생하였다. 이에 따라 환경부하량 집계 시에 소요자원을 배출원 특성에 따라 자재와 에너지로 분류하여 환경부하량을 집계하였고 자재와 에너지 부문 각각 환경부하량을 많이 발생시키는 공종을 우선순위로 하여 공종을 뽑아 조합하는 형식으로 대표공종을 선정하였다.

다음의 Table 3에서와 같이 상부공은 총 7개의 공종이 대표공종으로 선정되었으며 7개의 대표공종의 상부 전체 환경부하량의 99.99%를 차지하는 것으로 나타났다. 하부공은 구조적 독립성으로 인해 교대·교각·기초 별로 물량산출 체계가 다른점을 고려하여

각각 대표공종을 선정하였다. 여기서, 교대공과 교각공은 세부구성상 동일한 5개의 공종이 대표공종으로 선정되었으며 5개의 대표공종의 교대, 교각 전체 환경부하량의 98.71%, 99.50%를 차지하는 것으로 나타났다. 또한, 강관파일기초공은 3개의 공종이 대표공종으로 선정되었으며, 기초 전체 환경부하량의 99.46%를 차지하는 것으로 나타났다. 이처럼 소수 대표공종 분석만으로 상부, 하부 환경부하량의 99% 이상 추정이 가능하였다.

마지막으로, 토공과 부대공의 경우에는 교량 사례별 특성에 따라 포함된 공종이 매우 다양하고, 공사장의 위치에 따라 사용된 에너지량이 상이하기 때문에 대표공종을 선정하는데 한계가 있어 제외하였다.

3.4 부위별 대표공종의 환경부하량 분석

위와 같이 선정한 대표공종에 대하여 소요자원의 환경부하량을 집계하였으며, 이때 규모가 다른 25개 사례 특성들을 같은 수준으로 비교·분석하기 위해 교량의 상부면적(m²)을 원단위로 환경부하량을 산출하였다.

3.4.1 상부공

상부공 분석 결과 Fig. 4와 같이 대표공종 중 자재대 레미콘이

Table 3. Result of Environmental Load Analysis on Major Works by Parts of PSC Beam Bridge

Parts	Major Works	Cumulative Rate of Environmental Load		Cut-Off ¹⁾	
		Average (%)	Min~Max (%)	Average (%)	Standard Deviation (%)
Super Structure	Material base (Remicon, Rebar, Cement), PSC Beam, Form, Staging, Rebar assembly, Surface treatment, Pouring of concrete	99.99	99.97 ~ 100.00	81.92	4.11
Abutment	Material base (Remicon, Rebar, Cement), Form, Rebar assembly, Pouring of concrete, Bridge bearing	98.71	91.24 ~ 99.97	75.04	10.75
Pier	Material base (Remicon, Rebar, Cement), Form, Rebar assembly, Pouring of concrete, Bridge bearing	99.50	99.24 ~ 100.00	60.45	9.46
Steel Pile Foundation	Material base (Steel pile), Boring and pile driving, Head and toe reinforcement	99.46	87.94 ~ 100.00	93.53	3.46
Earth Work	Managed by ratio	-	-	69.18	28.80
Appurtenant Work	Managed by ratio	-	-	78.66	20.81
Total	-	-	-	77.60	6.35

¹⁾ The current level of LCI DB does not include all the materials on the construction field. Therefore, the ratio of materials that can be linked with the LCI DB is presented, and this is defined as the cut-off level.

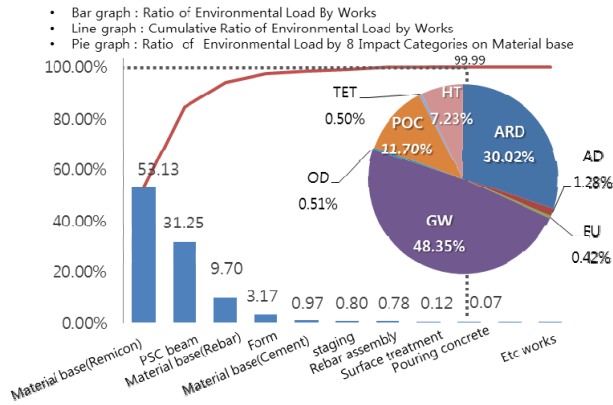


Fig. 4. Ratio of Env. Load by Works and Ratio of Env. Load by 8 Impact Categories of Material Base on Superstructure

53.13%로 환경부하량을 가장 많이 발생시키는 것으로 나타났으며, 다음으로 PSC beam공(31.25%), 자재대 철근(9.70%), 거푸집(3.17%) 순으로 나타났다.

1) 주요 자재대

주요 자재대인 레미콘, 철근, 시멘트가 상부공의 66%이상의 환경부하량을 발생시키는 것으로 나타나 주요 자재대의 투입 물량이 가장 큰 영향요인인 것으로 판단된다. 또한, 주요 자재대는 8가지 영향범주 중 지구온난화(GW) (48.35%), 자원고갈(ARD) (30.02%) 및 광화학산화물생성(POC) (11.69%)범주에서 높은 점유비율을 차지하는 것으로 나타났다(Fig. 4, Table 4).

2) PSC beam공

PSC beam공의 경우, 4개의 세공종 중 PSC beam 제작 공종에서 가장 많은 환경부하량이 발생하였으며(90.10%), PSC beam 제작 공종 내에서는 10개의 소요자원 중 선재로 인한 환경부하량이 공종 내 82.08%를 차지하여 환경부하량을 발생에 가장 큰 요인으로 판단된다. 선재는 8대 영향 범주 중 지구온난화(GW)에 75.73%로 가장 큰 영향을 끼치며, 자원고갈(ARD) (18.56%), 산성화(AD) (2.50%) 순으로 점유비율을 나타냈다. 이에 따라 PSC beam공은 지구온난화(GW) (64.70%), 자원고갈(ARD) (23.56%), 부영양화(EU) (3.26%) 순으로 부하량을 배출하는 것으로 나타났다(Table 5).

3) 거푸집, 동바리, 철근가공조립등 기타 공종

상부에 사용된 거푸집은 모두 합판 거푸집이 쓰였으며, 거푸집 공종에서는 합판이 93.68%로 대부분의 환경부하 방출 재료인 것으로 나타났다. 또한 동바리는 모두 목재동바리였으며, 합판이 97.76%로 나타났다. 이 두 공종에서 합판의 환경부하량 점유비율이 높음에 따라 지구온난화(GW)와 자원고갈(ARD)에서 약 40%, 20%로 높은 비율을 차지하였으며, 다음으로 부영양화(EU) (약 17%)와, 생태계독성(TET) (약 12%) 순으로 점유비율을 나타냈다. 철근가공조립과, 표면처리, 콘크리트타설 공종은 가용한 LCI DB 내에서 모두 한 가지 자원만 사용된 공종이다. 철근가공조립의 경우 결속선이 사용되어 선재로 인한 환경부하량이 발생하였고, 콘크리트타설과 표면처리의 경우 장비 사용으로 인한 경우 소비만 환경부하량 집계에 포함되었다. 즉, 경유의 환경부하는 자원고갈(ARD) 범주가 98.47%로 부하경향을 나타냈다. 위의 세 가지 공종

Table 4. Environmental Load of 8 Impact Categories by Materials of Material Base on Superstructure

Upper Works	Sub Works	Materials	Unit	ARD	AD	EU	GW	OD	POC	TET	HT	Total	
1) Material Base	Remicon Work	Remicon	Ep/m ² ¹⁾	9.57.E-03	4.51.E-04	1.68.E-04	1.58.E-02	1.94.E-04	4.27.E-03	1.47.E-04	2.71.E-03	3.33.E-02	
			% ²⁾	28.74%	1.35%	0.50%	47.41%	0.58%	12.83%	0.44%	8.15%	100.00%	
	Rebar Work	Rebar	Ep/m ² ¹⁾	2.36.E-03	5.52.E-05	4.30.E-07	3.13.E-03	8.56.E-06	2.75.E-04	5.43.E-05	1.67.E-04	6.06.E-03	
			% ²⁾	39.02%	0.91%	0.01%	51.73%	0.14%	4.53%	0.90%	2.76%	100.00%	
	Cement Work	Cement	Ep/m ² ¹⁾	8.54.E-05	4.53.E-06	1.55.E-08	4.38.E-04	9.08.E-07	1.36.E-04	1.17.E-06	1.34.E-05	6.79.E-04	
			% ²⁾	12.57%	0.67%	0.00%	64.44%	0.13%	20.04%	0.17%	1.97%	100.00%	
	Total			Ep/m ² ¹⁾	1.20.E-02	5.10.E-04	1.68.E-04	1.94.E-02	2.03.E-04	4.68.E-03	2.02.E-04	2.89.E-03	4.00.E-02
				% ²⁾	30.02%	1.27%	0.42%	48.35%	0.51%	11.69%	0.51%	7.23%	100.00%

¹⁾ Env. load (Eco-point) per slab area (m²) : (Eco-point/m²)

²⁾ Occupancy ratio by 8 environmental impact categories for total env. load by works

Table 5. Environmental Load of 8 Impact Categories by Materials of PSC Beam Work on Superstructure

Upper Works	Sub Works	Materials	Unit	ARD	AD	EU	GW	OD	POC	TET	HT	Total		
2) PSC Beam	PSC Beam Fabrication	Wire Rod	Ep/m ¹⁾	2.57.E-03	3.46.E-04	7.31.E-05	1.05.E-02	1.08.E-05	4.87.E-05	3.04.E-05	2.81.E-04	1.38.E-02		
			% ²⁾	77.62%	80.04%	15.63%	89.93%	58.21%	40.05%	9.14%	63.28%	82.08%		
		Plywood	Ep/m ¹⁾	4.90.E-04	8.50.E-05	4.64.E-04	9.64.E-04	8.18.E-06	2.40.E-05	3.41.E-04	1.63.E-04	2.54.E-03		
			% ²⁾	14.02%	18.36%	83.95%	8.00%	39.17%	18.48%	86.56%	32.89%	14.24%		
		Hot Rolled Steel	Ep/m ¹⁾	1.98.E-04	2.89.E-06	7.90.E-09	1.55.E-04	4.36.E-08	4.84.E-05	5.41.E-07	7.88.E-07	4.05.E-04		
			% ²⁾	6.20%	0.71%	0.00%	1.40%	0.25%	35.85%	0.17%	0.19%	2.53%		
		Steel Sections	Ep/m ¹⁾	3.76.E-05	2.15.E-06	9.17.E-07	4.00.E-05	3.06.E-07	3.45.E-06	6.02.E-07	4.65.E-06	8.96.E-05		
			% ²⁾	1.22%	0.54%	0.20%	0.37%	1.75%	2.99%	0.19%	1.11%	0.57%		
		Aluminium Plate	Ep/m ¹⁾	1.58.E-05	5.41.E-07	2.37.E-07	6.77.E-06	9.89.E-08	9.64.E-07	2.21.E-07	8.73.E-06	3.34.E-05		
			% ²⁾	0.54%	0.14%	0.05%	0.07%	0.56%	0.82%	0.06%	2.01%	0.23%		
		Etc	Ep/m ¹⁾	1.19.E-05	8.79.E-07	7.72.E-07	2.44.E-05	1.07.E-08	2.24.E-06	1.31.E-05	2.34.E-06	5.57.E-05		
			% ²⁾	0.41%	0.22%	0.17%	0.23%	0.06%	1.81%	3.88%	0.53%	0.36%		
	Sub Total			Ep/m ¹⁾	3.32.E-03	4.37.E-04	5.39.E-04	1.17.E-02	1.95.E-05	1.28.E-04	3.86.E-04	4.61.E-04	1.70.E-02	
				% ³⁾	19.58%	2.58%	3.18%	68.80%	0.11%	0.75%	2.28%	7.22%	100.00%	
	PSC Beam Erection	Diesel (Energy)	Ep/m ¹⁾	8.11.E-04	4.20.E-07	9.21.E-08	1.18.E-05	2.50.E-09	2.33.E-07	1.46.E-09	5.09.E-08	8.24.E-04		
			% ³⁾	98.47%	0.05%	0.01%	1.43%	0.00%	0.03%	0.00%	0.01%	100.00%		
	Overturning Prevention	Plywood	Ep/m ¹⁾	7.37.E-05	1.28.E-05	6.97.E-05	1.45.E-04	1.23.E-06	3.61.E-06	5.13.E-05	2.45.E-05	3.82.E-04		
			% ²⁾	59.03%	66.02%	77.25%	54.35%	70.56%	58.54%	77.46%	69.66%	61.41%		
		Wire Rod	Ep/m ¹⁾	2.63.E-05	3.54.E-06	7.49.E-07	1.07.E-04	1.11.E-07	4.99.E-07	3.11.E-07	2.88.E-06	1.42.E-04		
			% ²⁾	17.48%	18.89%	17.28%	25.71%	10.92%	9.52%	5.07%	12.21%	18.90%		
		Rebar	Ep/m ¹⁾	1.00.E-05	2.34.E-07	1.82.E-09	1.33.E-05	3.63.E-08	1.16.E-06	2.30.E-07	7.10.E-07	2.57.E-05		
			% ²⁾	23.49%	15.09%	5.47%	19.95%	18.52%	31.95%	17.47%	18.12%	19.68%		
		Sub Total			Ep/m ¹⁾	1.10.E-04	1.66.E-05	7.05.E-05	2.66.E-04	1.38.E-06	5.27.E-06	5.18.E-05	2.81.E-05	5.49.E-04
					% ³⁾	20.04%	3.01%	12.83%	48.36%	0.25%	0.96%	9.44%	5.12%	100.00%
Sole Plate		Hot Rolled Steel	Ep/m ¹⁾	1.51.E-04	2.20.E-06	6.02.E-09	1.18.E-04	3.33.E-08	3.69.E-05	4.13.E-07	6.01.E-07	3.09.E-04		
			% ²⁾	64.54%	54.46%	1.93%	59.18%	46.72%	65.98%	8.97%	31.72%	61.80%		
		Wire Rod	Ep/m ¹⁾	6.45.E-06	8.68.E-07	1.83.E-07	2.63.E-05	2.72.E-08	1.22.E-07	7.62.E-08	7.07.E-07	3.47.E-05		
			% ²⁾	20.16%	33.24%	36.48%	30.10%	44.11%	5.76%	1.09%	30.66%	22.95%		
	Electricity (Energy)	Ep/m ¹⁾	4.80.E-06	2.27.E-07	1.36.E-07	7.73.E-06	2.45.E-11	6.49.E-07	7.95.E-13	2.35.E-09	1.35.E-05			
		% ²⁾	13.89%	8.52%	24.28%	8.67%	0.04%	22.09%	0.00%	0.10%	8.76%			
	Acetylene	Ep/m ¹⁾	2.87.E-12	7.59.E-08	1.77.E-07	9.83.E-07	4.85.E-09	7.27.E-08	6.30.E-06	8.21.E-07	8.43.E-06			
		% ²⁾	0.00%	2.90%	35.26%	1.13%	7.87%	3.43%	89.82%	35.60%	5.57%			
	Etc	Ep/m ¹⁾	7.64.E-07	2.74.E-08	1.11.E-08	1.12.E-06	1.36.E-09	9.62.E-08	8.63.E-09	4.95.E-08	2.08.E-06			
		% ²⁾	1.41%	0.88%	2.06%	0.92%	1.27%	2.74%	0.13%	1.92%	0.91%			
	Sub Total			Ep/m ¹⁾	1.63.E-04	3.40.E-06	5.13.E-07	1.54.E-04	6.67.E-08	3.78.E-05	6.79.E-06	2.18.E-06	3.68.E-04	
				% ³⁾	44.25%	0.92%	0.14%	41.94%	0.02%	10.28%	1.85%	0.59%	100.00%	
Total			Ep/m ¹⁾	4.40.E-03	4.58.E-04	6.10.E-04	1.21.E-02	2.09.E-05	1.71.E-04	4.45.E-04	4.91.E-04	1.87.E-02		
			% ³⁾	23.56%	2.45%	3.26%	64.70%	0.11%	0.91%	2.38%	2.63%	100.00%		

¹⁾ Env. load (Eco-point) per slab area (m²) : (Eco-point/m²)

²⁾ Occupancy ratio of materials for total env. load by 8 impact categories on works

³⁾ Occupancy ratio by 8 environmental impact categories for total env. load by works

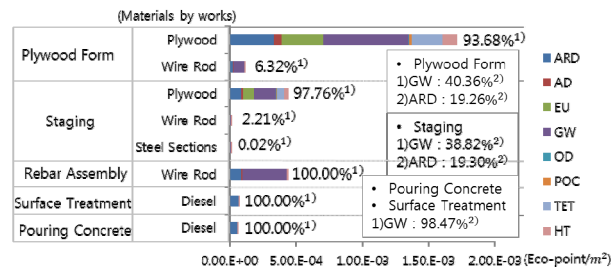
은 상부 환경부하량의 2%이하의 점유율을 차지하는 것으로 나타났다(Fig. 5).

상부공 7개의 대표공종의 전체 환경부하량을 8대 영향범주별로 분석하였을 때, 지구온난화(GW) (53.06%)와 자원고갈(ARD) (27.74%)에 대한 환경부하량이 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났으며, 이는 두 영향범주에 집중적인 영향을 끼치는 레미콘, 철근, 선재, 합판, 경유 등의 자원을 주요 자원으로써 사용하는 것에 따른 결과로 판단된다.

3.4.2 하부 : 교대공

1) 주요 자재대

하부 교대공 분석 결과 Fig. 6과 같이 주요 자재대인 레미콘 (84.54%), 철근(8.49%), 시멘트(0.10%)가 교대공 전체 대비 93% 이상으로 상부공 보다는 약 27% 높게 점유하는 것으로 나타났으며, 영향범주별 분석결과 지구온난화(GW)와 자원고갈(ARD) 범주에서 47.86%, 29.75%로 높은 점유비율을 차지하였다(Table 6).



1) Occupancy ratio of environmental load by materials on works
2) Occupancy ratio of environmental load by 8 impact categories on works

Fig. 5. Environmental Load per Slab Area (m²) of 8 Impact Categories by Works on Superstructure

2) 거푸집, 철근가공조립, 콘크리트 타설, 교량받침

거푸집의 경우 세공종인 합판 거푸집과 무늬거푸집 모두 합판이 93.46%, 80.71%로 환경부하 영향의 대부분을 차지하였다. 교량받침은 제품에 대한 LCI DB가 구축 되지 않아 설치 작업에 쓰인 경유만 분석에 포함하였다. 교대공 전체 환경부하량을 8대 영향범주 별로 분석 결과 지구 온난화(GW) (47.69%)에 가장 큰 영향을 끼쳤으며 다음으로는 자원고갈(ARD) (29.37%), 광화학산화물 생성(POC) (11.38%) 순으로 나타났다. 이 같은 결과는 주요 자재대와 거푸집에 투입되는 합판이 주요한 영향 요인으로 판단된다 (Table 7).

3.4.3 하부 : 교각공

교각공에 대해 분석한 결과 Figs. 6 and 7과 같이 교대공과 마찬가지로 다섯 가지 대표공종 중 자재대 레미콘이 85.51%로서 환경부하량을 가장 많이 발생시키는 것으로 나타났다. 다음으로는 자재대 철근(10.21%), 거푸집(2.00%) 순으로 나타났다. 또한, 8대

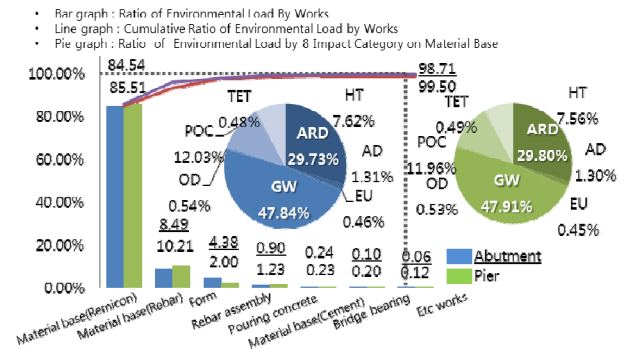


Fig. 6. Ratio of Environmental Load by Works and Ratio of Environmental Load by 8 Impact Categories of Material Base on Abutment and Pier of Superstructure

Table 6. Environmental Load of 8 Impact Categories by Materials of Material Base on Abutment of Substructure

Upper Works	Sub Works	Materials	Unit	ARD	AD	EU	GW	OD	POC	TET	HT	Total	
1) Material Base	Remicon Work	Remicon	Ep/m ¹)	1.07.E-02	5.04.E-04	1.88.E-04	1.77.E-02	2.17.E-04	4.78.E-03	1.64.E-04	3.04.E-03	3.73.E-02	
			% ²)	28.74%	1.35%	0.50%	47.41%	0.58%	12.83%	0.44%	8.15%	100.00%	
	Rebar Work	Rebar	Ep/m ¹)	1.62.E-03	3.78.E-05	2.94.E-07	2.14.E-03	5.85.E-06	1.88.E-04	3.72.E-05	1.14.E-04	4.14.E-03	
			% ²)	39.02%	0.91%	0.01%	51.73%	0.14%	4.53%	0.90%	2.76%	100.00%	
	Cement Work	Cement	Ep/m ¹)	5.37.E-06	2.85.E-07	9.75.E-10	2.75.E-05	5.70.E-08	8.55.E-06	7.35.E-08	8.39.E-07	4.27.E-05	
			% ²)	12.57%	0.67%	0.00%	64.44%	0.13%	20.04%	0.17%	1.97%	100.00%	
	Total			Ep/m ¹)	1.23.E-02	5.42.E-04	1.88.E-04	1.98.E-02	2.23.E-04	4.98.E-03	2.01.E-04	3.15.E-03	4.14.E-02
				% ²)	29.75%	1.31%	0.45%	47.86%	0.54%	12.00%	0.49%	7.60%	100.00%

1) Env. load (Eco-point) per slab area (m²) : (Eco-point/m²)

2) Occupancy ratio by 8 environmental impact categories for total env. load by sub-works

Table 7. Environmental Load of 8 Impact Categories by Materials of Abutment on Substructure

Upper works	Sub works	Materials	Unit	ARD	AD	EU	GW	OD	POC	TET	HT	Total
2) Form	Plywood Form	Plywood	Ep/m ¹)	2.91.E-04	5.04.E-05	2.75.E-04	5.72.E-04	4.85.E-06	1.42.E-05	2.02.E-04	9.67.E-05	1.51.E-03
			% ²)	93.69%	95.03%	99.80%	87.77%	98.33%	97.46%	99.89%	97.83%	93.46%
		Wire Rod	Ep/m ¹)	1.99.E-05	2.68.E-06	5.65.E-07	8.11.E-05	8.38.E-08	3.77.E-07	2.35.E-07	2.18.E-06	1.07.E-04
			% ²)	6.31%	4.97%	0.20%	12.23%	1.67%	2.54%	0.11%	2.17%	6.54%
		Sub-Total	Ep/m ¹)	3.11.E-04	5.31.E-05	2.76.E-04	6.53.E-04	4.93.E-06	1.46.E-05	2.03.E-04	9.89.E-05	1.61.E-03
			% ³)	19.26%	3.29%	17.08%	40.48%	0.31%	0.91%	12.55%	6.13%	100.00%
	Checked Form	Plywood	Ep/m ¹)	4.52.E-05	7.84.E-06	4.28.E-05	8.89.E-05	7.54.E-07	2.21.E-06	3.14.E-05	1.50.E-05	2.34.E-04
			% ²)	70.36%	90.93%	99.71%	80.40%	93.10%	39.13%	99.55%	59.78%	80.71%
		Foamed Polystyrene	Ep/m ¹)	1.70.E-05	3.69.E-07	3.28.E-08	9.11.E-06	4.47.E-08	3.79.E-06	1.08.E-07	1.06.E-05	4.11.E-05
			% ²)	24.66%	4.07%	0.07%	7.80%	5.24%	59.80%	0.33%	38.83%	13.35%
		Wire Rod	Ep/m ¹)	3.20.E-06	4.31.E-07	9.10.E-08	1.31.E-05	1.35.E-08	6.07.E-08	3.78.E-08	3.51.E-07	1.72.E-05
			% ²)	4.98%	5.00%	0.21%	11.80%	1.66%	1.07%	0.12%	1.39%	5.94%
	Sub-Total	Ep/m ¹)	6.54.E-05	8.64.E-06	4.29.E-05	1.11.E-04	8.12.E-07	6.06.E-06	3.16.E-05	2.60.E-05	2.93.E-04	
		% ³)	22.36%	2.95%	14.66%	37.98%	0.28%	2.07%	10.80%	8.90%	100.00%	
	Total	Ep/m ¹)	3.76.E-04	6.17.E-05	3.18.E-04	7.64.E-04	5.75.E-06	2.07.E-05	2.34.E-04	1.25.E-04	1.91.E-03	
		% ³)	19.73%	3.24%	16.71%	40.09%	0.30%	1.08%	12.28%	6.55%	100.00%	
3) Rebar Assembly	Wire Rod	Ep/m ¹)	8.24.E-05	1.11.E-05	2.35.E-06	3.36.E-04	3.47.E-07	1.56.E-06	9.75.E-07	9.03.E-06	4.44.E-04	
		% ¹)	18.56%	2.50%	0.53%	75.73%	0.08%	0.35%	0.22%	2.03%	100.00%	
4) Pouring Concrete	Diesel (Energy)	Ep/m ¹)	7.69.E-05	3.98.E-08	8.73.E-09	1.12.E-06	2.37.E-10	2.21.E-08	1.39.E-10	4.82.E-09	7.81.E-05	
		% ²)	83.79%	81.80%	89.39%	82.46%	78.11%	80.64%	78.11%	79.19%	83.77%	
	Gasoline (Energy)	Ep/m ¹)	5.34.E-06	3.64.E-09	2.03.E-10	9.39.E-08	3.32.E-11	2.34.E-09	1.94.E-11	6.02.E-10	5.44.E-06	
		% ²)	16.21%	18.20%	10.61%	17.54%	21.89%	19.36%	21.89%	20.81%	16.23%	
Sub-Total	Ep/m ¹)	8.23.E-05	4.35.E-08	8.93.E-09	1.21.E-06	2.70.E-10	2.45.E-08	1.58.E-10	5.42.E-09	8.36.E-05		
	% ³)	98.45%	0.05%	0.01%	1.45%	0.00%	0.03%	0.00%	0.01%	100.00%		
5) Bridge bearing	Diesel (Energy)	Ep/m ¹)	2.37.E-05	1.23.E-08	2.69.E-09	3.45.E-07	7.31.E-11	6.83.E-09	4.28.E-11	1.49.E-09	2.41.E-05	
		% ³)	98.47%	0.05%	0.01%	1.43%	0.00%	0.03%	0.00%	0.01%	100.00%	

¹) Env. load (Eco-point) per slab area (m²) : (Eco-point/m²)

²) Occupancy ratio of a materials for total env. load by 8 impact categories on works

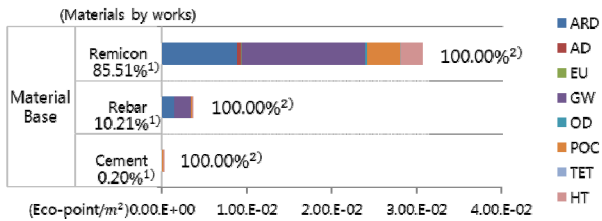
³) Occupancy ratio by 8 environmental impact categories for total env. load by works

영향범주 별 분석 결과 지구온난화(GW) (47.93%)에 가장 큰 영향을 끼쳤으며 다음으로는 자원고갈(ARD) (29.82%), 광화학산 화물 생성(POC) (11.63%) 순으로 나타났다. 거푸집의 경우 새공종 인 합판 거푸집이 85.11%, 강제거푸집이 14.89%를 차지하는 것으로 나타났으며, 이중 합판거푸집의 합판이 93.38%로 환경부하 영향의 대부분을 차지하였다(Figs. 7 and 8).

3.4.4 하부 : 강관파일 기초공

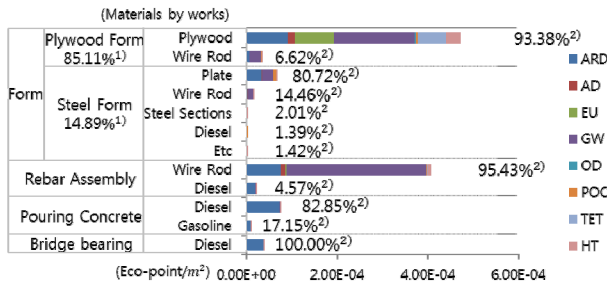
강관파일 기초공에 대해 분석한 결과 Fig. 9와 같이 세 가지 대표공종 중 강관파일 자재공종이 전체 대비 63.28%로서 환경부하 량을 가장 많이 발생시키는 것으로, 다음으로는 강관파일 천공

및 항타(28.62%), 두부 및 선단보강(7.55%) 순으로 나타났다. 강관파일 천공 및 항타 공종의 경우 투입된 자원이 모두 에너지이며, 영향범주 중 자원고갈(ARD)범주에 대해 95.67%로 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 두부 및 선단 보강 공종에서 후환이 가장 높은 부하 비율(56.61%)을 차지하였으며, 특히 광화학산화물 생성 (POC) 범주에서 86.89%로 막대한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 아세틸렌의 경우 사용량은 다른 자원에 비해 상대적으로 소량이었으나 생태계독성(TET)범주에서 91.76%의 점유율을 차지하였다. 강관파일 기초공 전체 환경부하량에 대해 8대 영향범주 별로 분석한 결과 자원고갈(ARD) (53.95%)에 가장 큰 영향을 끼쳤으며 다음으로는 지구온난화(GW) (35.59%), 인체독성(HT)



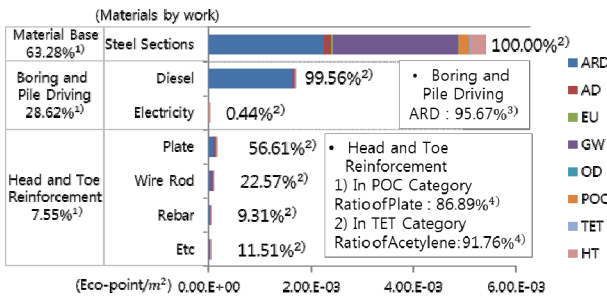
- 1) Occupancy ratio of env. load by materials on a part
- 2) Occupancy ratio of env. load by materials on works

Fig. 7. Environmental Load per Slab Area (m²) of 8 Impact Categories by Materials on Material Base of Pier



- 1) Occupancy ratio of env. load by sub works on upper works
- 2) Occupancy ratio of env. load by materials on works

Fig. 8. Environmental Load per Slab Area (m²) of 8 Impact Categories by Works on Pier



- 1) Occupancy ratio of env. load by materials on a part
- 2) Occupancy ratio of env. load by materials on works
- 3) Occupancy ratio of env. load by 8 impact categories on works
- 4) Occupancy ratio of env. load by 8 impact categories of materials on works

Fig. 9. Environmental Load per Slab Area (m²) of 8 Impact Categories by Works on Steel Pile Foundation

(3.80%) 순으로 나타났다. 이 같은 결과는 형강, 경유 등의 자원이 원인인 것으로 판단된다.

토공 부대공의 경우 교량 전체에 대해 점유하는 비율이 적을 뿐 만 아니라 교량 사례별 특성에 따라 공종과 소요자원의 종류와 환경부하량의 편차가 매우 다양하여 결과분석이 제한적이었기 때문에 분석범위에서 제외하였다(Fig. 3).

3.5 환경부하량 산정 영향요인 분석

본 연구에서 이용한 개별적산법은 실제 투입된 자원의 수량에 LCI DB를 연계하여 환경부하량을 산출하는 방식이다. 그러므로 물량 산정 영향요인을 통제하기 위한 표준단면 환경을 기반으로 설계입력 변수를 설정하여 투입자원의 수량을 추정함으로써 환경 부하량 산정이 가능하다. 예를 들어, 교량상부 PSC beam공의 경우 설계초기단계에서 얻을 수 있는 경간장, 연장 정보를 통해 표준단면에 해당하는 교량 전체의 빔 본 수를 도출 할 수 있다. 도출된 빔의 본 수(개)는 본 당 투입 자원의 수량과 연계하여 총 수량 파악이 가능하다. 즉 경간장과 연장 정보만으로 PSC beam공의 환경부하량을 추정 할 수 있게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 향후 구축될 설계단계 환경부하량 모델을 고려하여, 부위별 대표공 종 물량 추정에 매개변수 역할을 할 수 있는 설계초기단계 가용정보 (연장, 경간장, 경간수, 하부높이 등)를 도출 하였으며, 도출한 요인들과 앞서 산출한 교량 공종별 환경부하량과 관계의 유의성을 검증하기 위하여 Table 8과 같이 상관성분석을 수행하였다.

상·하부 대표공종, 토공, 부대공의 환경부하량과 설계단계 가용 정보 5개(경간수, 경간장, 연장, 육상/하상, 기초형식, 하부높이)에 대해 상관성 분석을 수행한 결과 각 영향요인과 환경부하량이 양의 상관관계를 보이고 있었으며, 모든 부위에서 경간수와 연장이 높은 설명력을 보였다. 하부 대표공종 환경부하량에 대해서는 하부 전체 높이(단경간 : 교대 총높이, 다경간 : 교각 총높이) 또한 높은 설명력을 보였다. 반면에 육상/하상과 기초형식에 대해서는 설명력이 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다.

위와 같이 설계단계의 일부 가용정보가 부위별 환경부하량에 유의한 영향을 미치는 것을 확인 하였으며, 이에 따라 설계 초기단계 의사결정에서 활용할 수 있는 가용정보를 입력변수로 설정하고 부위별 대표공종정보를 이용하여 신속하게 환경부하량을 산출할 수 있는 모델 개발이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 PSC Beam교량을 대상으로 설계 초기단계 의사결정에서 활용 가능한 LCA기반 환경부하량 산정 모델 구축의 선행연구로서 구조물 부위 및 공종별 환경부하 특성분석을 수행하였다. 이를 위해 기존 25개 PSC Beam교의 기초 설계자료들을 수집·분석하여, 4개 부위의 공종별 환경부하량 점유비율을 산출하였으며, 전체 교량 환경부하량의 91.71%를 차지하는 상·하부 대표공종을 도출하여, 이러한 공종들만으로 교량 전체 환경부하량의 90%이상을 설명할 수 있는 것을 파악하였다.

구조물 주요 부위별 환경부하 특성을 비교분석하기 위해 부위에 따른 대표공종의 자원별 환경부하량을 8대 영향변수로 산출하여

Table 8. Correlations of Available Information in Early Design Phase

Attribute		Number of Span	Span Length	Total Length	On Land or Over Water	Foundation Type	Total Height of Pier
Env. Load of Works	Coefficient of Correlation	.993**	.368	.996**	.493*	.444*	-
	P-value (2-tailed)	.000	.071	.000	.012	.026	-
Environmental Load of Major Works on Superstructure	Coefficient of Correlation	.954**	.312	.959**	.488*	.429*	.907**
	P-value (2-tailed)	.000	.128	.000	.013	.033	.000
Environmental Load of Major Works on Substructure	Coefficient of Correlation	.801**	.355	.813**	.428*	.454*	.797**
	P-value (2-tailed)	.000	.081	.000	.033	.023	.000
Environmental Load of Earth Works	Coefficient of Correlation	.851**	.379	.863**	.519**	.312	.836**
	P-value (2-tailed)	.000	.062	.000	.008	.129	.000
N		25	25	25	25	25	25

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).
 * . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 교량의 특성상 상부공이 전체 42.91%의 환경부하량으로, 상부공중에서는 주요 자재 레미콘이 53.13%, PSC beam공이 31.25%로, 이중 PSC beam 제작 공중(90.10%)에서는 PS강연선인 선재로 인한 환경부하량이 공중 내 82.06%로 가장 높게 나타났다.
- (2) 하부 교대·교각공에서는 주요 자재인 레미콘, 철근, 시멘트가 93%이상으로 대부분을 차지하였으며, 강관파일 기초공에서는 강관파일 자재공중이 63.28%을 차지하여 가장 높게 나타났다.
- (3) 공중별 다소 차이는 있으나 전체적으로 8대 영향범주 중 지구온난화(GW)와 자원고갈(ARD)이 약 75%이상으로 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났으며, 이는 레미콘, 철근, 선재, 경유, 합판 등의 자원이 집중적으로 투입된 것에 기인한 것으로 확인하였다.

위와 같이 영향범주별 환경부하에 주된 요인을 부위, 공중, 자원 단위에서 종합적으로 분석한 결과 주로 공중별 자재량의 영향력이 크다는 것을 알 수 있었다. 또한, 설계단계 환경부하량 산정 영향요 인들과 부위별로 산출한 환경부하량과 관계를 분석한 결과 경간수, 연장, 하부구조 높이 등이 높은 상관성을 나타내었으며, 이는 이러한 설계정보들이 부위별 단면에 따른 공중별 자원들의 물량산출에 직접적으로 연관되기 때문이다. 이러한 결과들을 종합하여 궁극적으로 설계단계에서 구조물 특성이 반영된 환경부하량 산정시 본 연구에서 제시된 설계부위 및 공중정보들이 활용될 수 있다고 판단된다.

다만, 연구를 수행하는 과정에서 수집한 사례들의 수량산출서의

공중분류체계의 일관되지 않아 데이터 집계 과정에서의 불일치가 발생하여 일관된 기준 하에 약간의 보정이 불가피하였으며, 제조산업에 비해 LCI DB 적용 가능 인벤토리에 한계가 존재하였다.

향후에는 본 연구에서 제시한 상·하부공의 대표공중 정보와 부위별 환경부하량과 높은 상관관계를 보이는 설계단계 소수 가용 정보만을 바탕으로 표준단면정보기반의 부위 및 대표공중별 개략 물량을 추정하는 방법론을 적용하여 신속·정확하게 환경부하량을 산정하는 모델을 구축하고자 한다. 또한 이러한 방법론을 기반으로 실시단계 단계에서 PSC Beam교와 대안 비교가 가능한 타 형식의 교량으로 연구대상을 확장함으로써 형식에 따른 부위별 공중별 환경성능 비교 평가 연구를 수행하고자 하며, 분석 범위에 있어서도 시설물 유지관리단계 특성까지 고려한 모델로도 확장하여 전생애 주기적 분석이 가능하게하는 지속적인 연구도 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(16SCIP-C085706-03)에 의해 수행되었습니다.

References

Bae, E. S. and Oh, K. S. (2015). "An analysis of carbon dioxide emission from apartment housings in seoul by Life Cycle Assessment (LCA)." *J. of Korea Planners Association*, Vol. 50, No. 3, pp. 335-354.

Cho, N. H., 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." *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 2, pp. 297-305.

Hammervold, J., Reenaas, M., and Brattebø, H. (2013). "Environ-

- mental life cycle assessment of bridges.” *J. of Bridge Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 153-161.
- Hong, T. H. and Ji, C. Y. (2014). “Comparison of the CO₂ emissions of buildings using input-output LCA model and hybrid LCA model.” *J. of Korea Constrction Engineering Management*, Vol. 15, No. 4, pp. 119-127.
- ISO 14040. (2006). *Environmental management-life cycle assessment-principles and framework, international organization for standardization*, Geneva, Switzerland.
- Jeong Y. S. and Huh J. H. (2011). “A study on the calculation process of carbon dioxide emission for buildings with life cycle assessment.” *J. of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 31, No. 1, pp. 23-30.
- Kang, C. S. (2009). *Approximate cost estimating model for PSC beam bridge at the designing stage based on quantity of standard work*, Master’s Thesis, The Chung -Ang University.
- Kim, J. Y., Kim, S. W. and Sohn, J. Y. (2004). “A study on the estimation of the environmental load intensity of construction materials for the building lca-focused on the amount of energy consumption and CO₂ emission by I/O table.” *J. of The Architectural Institute of Korea Planning & Design*, Vol. 20, No. 7, pp. 208-215.
- Korea Ministry of Government Legislation (KMGL). (2016). *Low carbon green growth basic law*. 14122. (in Korean).
- Lee, J. H., Shim, J. A. and Kim, K. J. (2016). “Analysis of environmental load by work classification for NATM tunnels.” *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 2, pp. 307-315
- Li, C., Yang, F., Zhu, Y. and Gao, Y. (2014). “An assessment framework for analyzing the embodied carbon impacts of residential buildings in China.” *J. of Energy and Buildings. Elsevier*, Vol. 85, pp. 400-409.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2012). *Guideline of calculation of carbon emission* (in Korean).
- Surawong, W. and Soralum, C. (2014). “Life cycle assessment of expressway passenger transport service: a case study of Thailand.” *J. of Environmental Chemical Ecological Geological and Geophysical Engineering, World Academy Science Engineering Technology*, Vol. 8, No. 9, pp. 690-698.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015). *Submission by the Republic of Korea intended nationally determined contribution*.