

리기다소나무 구조용 집성재를 활용한 아치 트러스 목조교량의 전과정평가*¹

손 휘 림*² · 박 주 생*^{2†} · 김 광 모*²

Life Cycle Assessment of Timber Arch-Truss Bridge by Using Domestic *Pinus rigida* Glued-Laminated Timber*¹

Whi-Lim Son*² · Joo-Saeng Park*^{2†} · Kwang-Mo Kim*²

요 약

본 연구에서는 리기다소나무 구조용 집성재를 사용한 국내 최초 차량용 목조교량에 대한 지구온난화 영향을 평가하기 위해 전과정평가를 수행하였다. 교량연장 30 m, 교량폭원 8.4 m, 교량등급 1등급인 아치 트러스 형태의 대상 교량은 원료채취부터 제조, 수송, 시공, 사용, 해체, 건설폐기물 수송, 폐기 및 재활용까지 설계수명 50년간 총 192.56 ton CO₂ eq.의 온실가스를 배출한다. 전과정단계 중 원료채취 및 제조단계에서 총 온실가스 배출량의 81.14%를 배출하며 특히, 콘크리트 사용으로 인하여 82.84 ton CO₂ eq.의 온실가스가 배출된다. 그러나 대상 교량은 116.57 m³의 국산 리기다소나무 집성재를 사용하였으며, 교량을 구성하는 목재에서 104.72 ton의 이산화탄소를 저장하고 있어 이를 적용할 경우, 총 온실가스 배출량의 54.38%를 저감 가능한 것으로 도출되었다. 대상 교량과 동일한 수명과 구조를 갖는 타 교량의 철골자재를 구조용 집성재로 대체할 경우, 원료채취 및 제조단계의 온실가스 배출량을 최소 10.26%에서 최대 23.91%까지 저감 가능한 것으로 도출되었다. 본 연구의 결과는 향후 국산 목재 및 목조교량의 친환경적 우수성을 정량적으로 입증할 수 있는 기반자료로 활용 가능할 것이며, 목조교량의 친환경적 설계와 보급을 위해 활용 가능할 것으로 사료된다.

ABSTRACT

This study carried out life cycle assessment for evaluating environmental impacts of timber Arch-Truss bridge by using domestic *Pinus rigida* Miller glued-laminated timber throughout life cycle such as extraction, manufacturing, transportation, construction, use, dismantlement, transportation of waste, disposal and recycling. The life cycle GHG (GreenHouse Gas) emissions of the target bridge are 192.56 ton CO₂ eq. in 50 years. Especially, the life cycle GHG emissions of concrete used in the target bridge are 82.84 ton CO₂ eq. which accounts for 53.02% of the GWP (Global Warming Potential) in extraction and manufacturing stages. The target bridge is constructed of 116.57 m³ of domestic

*1 접수 2013년 10월 4일, 채택 2013년 12월 9일

*2 국립산림과학원 임산공학부. Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 박주생(e-mail : jusang@forest.go.kr)

Pinus rigida Miller glued-laminated timber and used timber has stored 104.72 ton CO₂. If an effect of carbon storage in timber is applied to the total GHG emissions of the target bridge, the GHG emissions can be reduced by 54.38%. In the case of substitution effect, if domestic *Pinus rigida Miller* glued-laminated timber replaces steel manufactures used in other bridge which has the same structure and life span as the target bridge, the GHG emissions in extraction and manufacturing stages can be reduced by 10.26% to 23.91%.

Keywords : Life Cycle Assessment, GHG emissions, Environmental impact, Timber Bridge, Carbon storage, Environmental assessment

1. 서 론

급속한 산업화와 무분별한 자원사용, 인구증가는 기후변화, 지구온난화와 같은 전 지구적 환경문제를 발생시켰으며, 홍수, 허리케인, 낙뢰, 가뭄, 산사태 등 직접적인 인명에 피해를 주는 원인으로 그 심각성이 점차 확대되고 있다. Climate Vulnerable Forum에서 발간된 보고서에 의하면, 2030년까지 현 상태를 유지할 경우 전 세계적으로 1억 명 이상의 인구가 사망할 것으로 내다보고 있다[1]. 국제적으로 이와 같은 문제를 해결하기 위해 1992년 6월 유엔환경개발회의(UNCED, United Nations Conference on Environment and Development)에서 기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)을 채택하였으며, 각국에서는 국제 또는 국내법을 통하여 온실가스를 저감하기 위해 노력하고 있다. 특히, 국내에서는 온실가스·에너지 목표관리제, 탄소성적표지제도, 저탄소제품인증, 저탄소농작물인증제도, 친환경건축물인증제도, 2015년 시행 예정인 온실가스 배출권 거래제도 등을 통하여 온실가스 배출량 저감뿐만 아니라 저탄소제품의 사용을 장려하고 있다.

전 세계가 저탄소사회를 구현하기 위해 많은 노력을 기울이고 있는 가운데, 목재는 탄소를 흡수하고 저장하는 기능을 가진 친환경 천연소재로서 각광받고 있으며, 기후변화 대응을 위해 목재의 사용이 중요시되고 있다[2]. 또한 목재는 예로부터 가공이 쉽고, 강도가 우수하여 건축이나 토목시설물에 구조재로 흔히 사용되고 있으며, 최근에는 내외장재뿐만 아니라 구조재 용도로도 이용이 확대되고 있다. 이에

국립산림과학원에서는 국내 최초로 국산 리기다소나무 구조용 집성재를 이용한 차량용 목조교량을 설치하였으며 이를 통하여 국내 토목산업에서의 온실가스 저감 및 환경성 개선에 기여하였다[3].

국산 목재를 이용한 국내 최초 차량용 목조교량의 기후변화 대응을 위한 온실가스 저감량을 정량적으로 평가하고 목조교량의 친환경적 우수성을 증명하기 위한 분석이 요구된다. 이를 위해 특정 대상의 환경성을 정량적으로 평가하고 대상 간의 환경성 비교가 가능한 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment)가 필요하다. 그러나 전과정평가를 수행하기 위한 기초자료인 전과정목록(LCI, Life Cycle Inventory) 데이터베이스는 국내 기준 약 360여 개 정도 구축되어 있으나 목재산업에 대한 데이터베이스는 그 수가 10개 미만으로 매우 미흡한 상황이다[4]. 또한 전과정평가 연구는 1990년대부터 지속적으로 일반제품, 전자전기제품, 자동차, 식품, 제조공정, 발전, 신재생에너지 분야 등에서 수행되어 왔으나, 목재 적용분야의 전과정평가 수행사례에는 차(2009), 강(2010), 건설기술연구원(2010) 등의 전과정평가를 통한 목조주택의 환경영향을 도출하고 비교 분석한 연구 등이 있지만 아직까지 타 분야에 비해 적은 편이다[5-7]. 또한 일반교량의 전과정평가 수행사례에는 국내에서 강구조 교량과 콘크리트 교량에 대해 김(2011)과 김(1996) 등이 연구를 하였으며[8-9], 국외에서는 Steele (2002), Martin (2004), Lounis (2007) 등이 연구를 하였으나, 국내 목조교량에 특화된 전과정평가 수행사례는 매우 부족한 실정이다[10-12]. 따라서 목조교량의 친환경적 우수성을 입증하기 위한 전과정평가의 적용 및 정량적인 환경성 자료의 축적이 필요하다

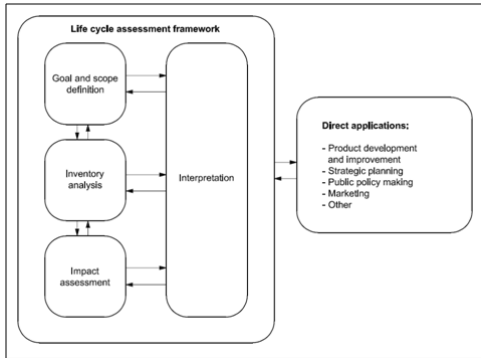


Fig. 1. Stages of an LCA based on ISO 14040[14].

다. 본 연구에서는 국산 리기다소나무를 활용한 목조교량이 지구온난화에 미치는 영향을 평가하기 위해 전과정평가를 실시하였다.

2. 연구방법

2.1. 방법론

본 연구에서는 국산 리기다소나무 구조용 집성재를 이용한 차량용 목조교량의 환경영향을 정량적으로 도출하기 위해 전과정평가(LCA)를 적용하였다. 전과정평가란 정의된 시스템의 전과정에 관련된 투입물과 산출물의 목록을 취합하여 처리하고, 이러한 투입물 및 산출물과 관련된 잠재적 환경영향들을 평가하며, 위의 두 과정을 통해 얻은 결과를 연구의 목적에 맞게 해석함으로써, 제품이나 서비스와 관련된 환경적 측면과 잠재적 영향을 평가하는 기술이다 [13]. 전과정평가는 국제표준화기구(ISO, International Organization for Standardization)의 ISO 14040과 14044에 의거하여 수행되며, 수행단계는 Fig. 1과 같이 목적 및 범위 정의, 전과정 목록분석, 전과정 영향평가, 전과정 해석 총 4단계로 구성되고 각 단계들은 상호보완적으로 수행될 수 있다.

첫 번째 단계는 목적 및 범위 정의(Goal and scope definition)단계이다. 본 단계에서는 연구의 목적을 설정하고, 정의한 목적을 달성하기 위한 타당한 범위를 설정해야 하며, 세부적으로 기능 및 기능단위, 시

스템 경계, 할당규칙, 데이터 요건 및 데이터 품질요건 등을 포함해야 한다. 두 번째 단계는 전과정 목록분석(Inventory analysis)단계이며, 목적 및 범위 정의 단계에서 설정한 연구 대상의 전과정에 관련된 자원 및 에너지 사용과 같은 투입물과 수계, 대기, 토양으로 배출되는 산출물을 수집하고 계산하는 절차를 포함한다. 수집해야 하는 투입물 세부 데이터에는 최종 제품 내에 포함되어 있는 물질을 의미하는 원료물질, 제품에는 포함되지 않으나 제품을 생산하는 단위공정에서 사용되는 물질인 보조물질, 단위공정이나 제품 시스템으로 투입되는 정량화된 에너지가 있으며, 산출물 세부 데이터에는 모든 물품이나 서비스를 포함하는 최종 제품, 최종 제품 외에 동일 공정에서 제품으로 판매될 수 있는 부산물, 대기 및 수계 배출물, 토양으로 배출되거나 처리를 위해 다른 기술계로 이동하는 고형 폐기물이 있다[15]. 전과정평가를 수행하기 위해 수집하는 데이터의 세부 항목은 다음과 같다. 이 단계에서 얻은 데이터와 결과는 전과정 영향평가의 입력자료로 이용된다. 세 번째 단계는 전과정 영향평가(Impact assessment)단계이다. 본 단계는 전과정 목록분석의 결과를 환경적인 측면에서 평가하여 대상의 잠재적 환경영향을 정량적으로 규명할 수 있다. 마지막 단계는 전과정 해석(Interpretation) 단계이며, 전과정 목록분석과 전과정 영향평가로부터 얻은 결과를 정의된 목적과 범위에 맞게 해석하는 과정을 포함한다[13]. 전과정평가는 일반 전기전자제품, 원료, 1차 가공품, 에너지 생산, 폐기물 처리 및 재활용 공정, 서비스 등 다양한 분야에 적용될 수 있으며, 지구온난화뿐만 아니라 자원고갈, 산성화, 부영양화, 오존층고갈, 광화학산화물생성, 인간독성 등 여러 영향범주에 대해 정량적으로 환경영향을 수치화할 수 있다.

2.2. 전과정평가 수행

2.2.1. 목적 및 범위 정의

2.2.1.1. 목적 정의

본 연구에서는 차량용 목조교량을 대상으로 전과정평가를 수행하여 교량의 전과정에 걸쳐 발생하는



Fig. 2. Target of the study.

지구온난화 영향을 정량화하고 분석하였다. 목조교량의 전과정 동안 발생하는 온실가스 배출량과 탄소 저장량 평가를 통해 타 소재 교량 대비 온실가스 대체효과를 분석하였다.

2.2.1.2. 범위 정의

연구 대상으로 선정된 목조교량은 강원도 양양군 미천골 자연휴양림 내에 설치된 국내 최초 차량용 목조교량인 ‘흐아름교’이다(Fig. 2). 대상 교량은 2012년 국립산림과학원에서 설계 시공하였으며, 국산 리기다소나무 구조용 집성재를 사용하였다. 교량등급

은 1등급이며 교량연장 30m, 교량폭원 8.4m, 교량형식은 목재 트러스교로 설계되었다.

본 연구의 시스템 경계는 대상 교량을 구성하는 리기다소나무 구조용 집성재, 철강류, 콘크리트, 플라스틱류 등 건축 자재의 원료채취부터 자재제조, 수송, 교량시공, 사용, 해체, 건설폐기물 수송, 건설폐기물 폐기 및 재활용까지 교량의 전과정을 고려하는 것을 원칙으로 하였으며, 본 연구에서 선정한 시스템 경계는 원활한 데이터의 수집 및 계산, 결과분석을 위해 시스템 경계를 크게 7단계로 구분하여 Fig. 3에 나타내었다.

각 단계마다 투입 및 산출되는 물질 및 에너지는 국가 LCI DB로 고려하여 투입산출물들의 원료채취부터 제조단계에서 발생하는 환경부하를 모두 고려하였으며, 정의된 단계 내에서 화석연료 연소로 인한 대기배출물 발생은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006 가이드라인의 ‘비도로 수송’ 부문 방법론을 적용하여 고려하였다[16]. 시스템 경계의 원료채취단계부터 시공단계까지는 대상 교량의 실제 데이터를 수집 및 적용하였으며, 사용단계 이후부터는 미래 시점의 데이터이므로 대상 교량의 유지보수 계획을 반영하고 일반적인 건축물 폐기 시

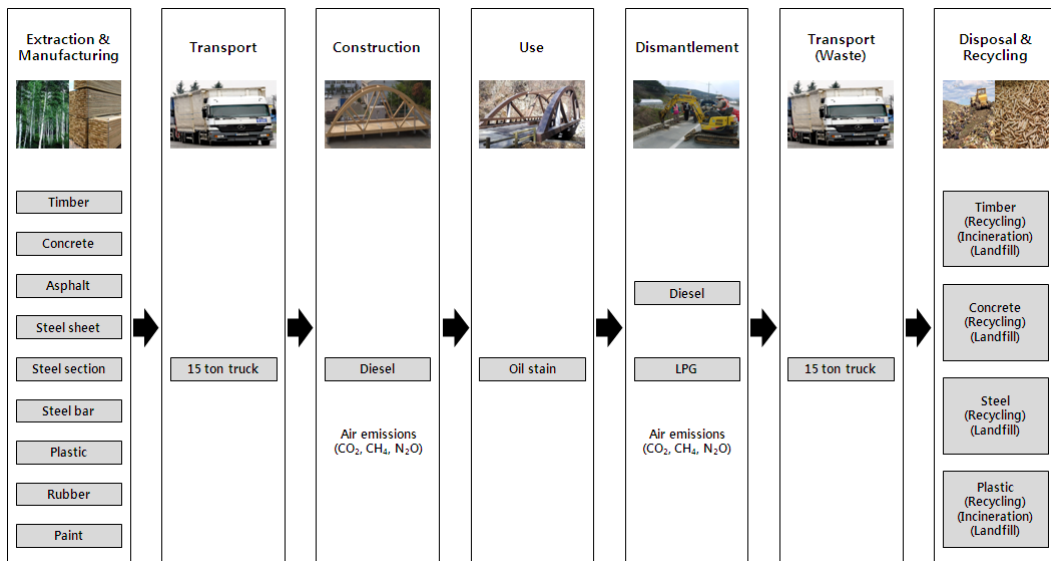


Fig. 3. System boundary of the study.

Table 1. Data quality requirement

Types of boundary	Target (Timber Bridge)
Time-related boundary	2012
Geographical boundary	Korea
Technical boundary	Up-to-date technology

나리오를 가정하여 적용하였다.

전과정평가를 수행하기 위해서 반드시 대상의 기능, 기능단위, 기준흐름을 정의하여야 한다. 대상 교량의 기능은 ‘차량 및 보행자에게 하천, 계곡 등을 건너는 원활한 이동로를 제공’하는 것으로 정의하였으며, 기능단위는 ‘50년간 운영되는 교량연장 30 m, 2차로, 도로교 기준 1등급의 아치 트러스형 차량용 목조교량’, 기준흐름은 ‘차량용 목조교량 1개’로 정의하였다. 또한 ISO 14040에 따르면, 전과정평가 수행 시, 수집데이터에 대한 데이터 품질요건(Data quality requirement)을 명시해야 한다. 본 연구에서 수행한 데이터 품질요건을 Table 1에 나타내었다.

일반적으로 제품에 대한 전과정평가 수행 시, 제품 생산공정에서 최종 제품뿐만 아니라 부산물이 발생하기 때문에 해당 공정에 대한 환경부하를 연구 대상으로 선정할 제품과 기타 부산물에 적절히 할당할 수 있는 방법론을 설정해야만 한다. 그러나 본 연구에서는 계획된 건설자재들을 사용하여 하나의 최종 산물(제품)인 교량을 시공하기 때문에 연구 대상인 목조교량 외에 다른 부산물이 발생하지 않는다. 따라서 대상 교량의 전과정평가 수행 시, 할당문제가 발생하지 않기 때문에 할당을 적용하지 않았다. 이러한 사항들을 포함하여 본 연구에서 적용한 가정 및 제한사항은 다음과 같다.

- 1) 교량에 사용된 볼트, 너트, 못 등 미량 사용 자재들은 시스템 경계에서 제외하였다.
- 2) 시공 시 사용된 에너지를 도출하기 위해 에너지 집약적인 토공과 교량공을 고려하였으며, 굴삭기07, 굴삭기08, 카고크레인, 발전기의 사용 시간을 수집하고 ‘2013 건설공사 표준품셈’의 장비별 시간당 연료사용량을 적용하였다[17].
- 3) 교량의 수명은 설계 수명인 50년으로 가정하였

Table 2. Data collection methods

Life cycle stages	Type of data	Data sources
Extraction		
Manufacturing	Onsite visit	KFRI
Transport		
Construction		
Use	Scenario - Onsite visit	KFRI
Dismantlement		[7], [17], [18]
Transport (Waste)	Scenario - Literature	[7]
Disposal & Recycling		[7], [19]

으며, 유지보수를 위해 2년마다 목재 표면에 오일스테인을 2회 도장하는 것으로 가정하였다.

- 4) 교량 해체 시 압쇄기, 브레이커, 백호를 사용하고 LPG를 이용하여 철골을 절단하는 것으로 가정하였다[18].
- 5) 건설폐기물은 교량 해체 지역과 가장 근접한 건설폐기물 중간처리업체 및 지자체 매립지에 15 ton 트럭이 운송하는 것으로 가정하였다[7].
- 6) 건설폐기물 처리방법은 전국 폐기물 발생 및 처리현황 내의 건설폐기물 처리비율(재활용, 소각, 매립)을 적용하였다[19].

2.2.2. 목록분석

2.2.2.1. 데이터수집

대상 교량의 환경영향을 평가하기 위해 원료채취 단계부터 폐기 및 재활용단계까지 전과정을 고려하여 데이터를 수집하였다. 본 연구에 적용된 대상 교량의 데이터수집 방법은 Table 2와 같다.

원료채취, 제조, 수송, 시공단계는 실제 설계에 적용된 일위대가표, 준공내역서, 설계도면 등을 참조하여 투입된 자재물량, 구매지역, 중장비 사용내역 등을 수집하였으며, 사용단계는 유지보수 계획을 반영하여 사용 시나리오를 선정하고 이에 대한 데이터를 수집하였다. 그러나 대상 교량의 해체, 건설폐기물 수송, 폐기 및 재활용단계의 구체적인 계획이 아직

Table 3. Input materials information of the target

Materials	Amount	Unit	LCI DB information		
			Korean	National	Reference
Glued laminated timber	1.17E+02	m ³		○	<i>Ecoinvent</i>
Ready mixed concrete	1.77E+02	m ³	○		<i>MOTIE*</i>
Asphalt	1.58E+01	m ³		○	<i>Ecoinvent</i>
Steel plates	1.43E+01	ton	○		<i>ME**</i>
Hot-dipped galvanized steel sheet	8.56E+00	ton	○		<i>ME</i>
Electric steel sections	1.62E+00	ton	○		<i>MOTIE</i>
Electric steel deformed bars	1.19E+01	ton	○		<i>MOTIE</i>
Electric steel round bars	8.15E-01	ton	○		<i>MOTIE</i>
Carbon steel	3.21E-01	ton	○		<i>ME</i>
Polyethylene terephthalate	1.06E+00	ton	○		<i>ME</i>
Stainless steel	6.37E-01	ton	○		<i>ME</i>
Low-Density polyethylene	9.11E-02	ton	○		<i>MOTIE</i>
Polybutadiene rubber	1.53E-01	ton	○		<i>ME</i>
Zinc	2.98E-03	ton		○	<i>Ecoinvent</i>
Water type paint	1.69E-02	ton	○		<i>ME</i>
Epoxy type paint	2.57E-02	ton	○		<i>ME</i>
Urethane type paint	1.77E-02	ton	○		<i>ME</i>

* MOTIE : Ministry Of Trade, Industry & Energy

** ME : Ministry of Environment

수립되지 않았기 때문에 이와 같은 경우, 문헌을 토대로 시나리오를 선정하여 데이터를 수집하였다.

전과정동안의 투입물 및 산출물 데이터는 원료채취 및 제조단계에서 11개, 수송단계 6개, 시공단계 2개, 사용단계 1개, 해체단계 2개, 건설폐기물수송 3개, 폐기 및 재활용 18개로 총 43개의 세부단위공정별로 수집되었다. 이렇게 수집된 데이터는 국내 및 해외 LCI 데이터베이스로 고려되어 상위 및 하위흐름의 환경부하를 모두 포함하였으며, 본 연구에서 적용된 대상 교량을 구성하는 자재들의 정보 및 적용 데이터베이스 출처를 Table 3에 나타내었다.

2.2.2.2. 데이터계산

전과정평가는 제품 및 서비스의 기능을 수행하기 위해 투입되는 투입물은 반드시 제품 및 폐기물 형태로 전량 배출되는 것을 기본 원칙으로 한다. 이를 물질수지라 하며 일반적인 전과정평가에서는 물질수지를 계산하기 위해 데이터수집이 반복적으로 수행되는 사례가 많다. 그러나 본 연구의 경우, 설치된 교량을 기준으로 교량의 구성 자재를 수집하고, 설계수명 50년 이후 전량 폐기되는 시나리오를 선정하였기에, 물질수지에 의한 데이터계산 및 재수집은 수행되지 않았다.

수송단계를 고려하기 위해, 데이터수집단계에서

Table 4. Energy consumption in construction and dismantlement stages

Stages	Equipment	Amount of dismantlement	Operating capacity	Operating hours (hr)	Diesel consumption (L/hr)	Energy consumption (L)
Construction	Excavator-07	N/A	N/A	7.38E+01	1.16E+01	8.56E+02
	Excavator-08	N/A	N/A	1.60E+01	1.53E+01	2.45E+02
	Cargo crane	N/A	N/A	1.12E+02	2.90E+00	3.25E+02
	Generator	N/A	N/A	4.80E+01	4.30E+00	2.06E+02
Dismantlement	Crusher					
	Breaker	1.93E+02 m ³	3.50E+00 m ³ /hr	5.51E+01	2.15E+01	1.18E+03
	Backhoe					
	LPG	2.63E+01 ton	2.00E+00 kg/ton	N/A	N/A	5.25E+01 kg

각 자재들의 제조사 정보를 수집하였다. 수집된 제조사와 대상 교량이 설치된 지역 간의 거리(km)를 산정하기 위해 한국도로공사에서 운영하는 웹사이트의 거리산정프로그램을 이용하였으며, 대상 교량에 투입된 주요 자재들의 수송 거리(편도)는 트러스용 리기다소나무 집성재 220 km, 난간 및 바닥용 리기다소나무 집성재 164 km, 철골자재 416 km, 콘크리트 21 km로 산정되었다. 이렇게 도출된 수송 거리에 수송되는 자재들의 무게를 곱한 아래의 식에 따라서 국가 LCI 데이터베이스를 연결하기 위한 수송값을 산정하였다.

$$Transport = Distance \times Weight$$

여기에서, 자재들의 제조사와 대상 교량 설치 지역 간의 거리는 km, 수송되는 자재들의 무게는 ton으로 설정하고, 수송값은 tkm로 계산하였다.

시공단계에서는 굴삭기07, 굴삭기08, 카고크레인, 발전기 가동시간을 수집하고, 건설공사 표준품셈의 운전경비 산정부문에 명시된 장비별 시간당 연료사용량(L/hr)을 곱하여 총 경유사용량을 도출하였다.

해체단계에서는 압쇄기, 브레이커, 백호를 사용하여 콘크리트를 해체하고, LPG를 이용하여 철강류를 절단하는 시나리오를 선정하였다[18]. 그러나 현재

시점에서 해체단계의 장비별 실제 사용시간 도출이 불가능하기 때문에 각 장비의 가동능력과 해체대상의 물질정보를 통하여 사용시간을 계산하였다. 이후 단계는 시공단계의 경유사용량 도출 계산방법과 동일하게 적용되었으며, 시공단계와 해체단계의 경유사용량과 적용된 인자들을 Table 4에 나타내었다.

이와 같이 도출된 경유와 LPG 사용량은 현장 내에서 직접 연소로 인하여 CO₂ (GWP = 1), CH₄ (GWP = 21), N₂O (GWP = 310)와 같은 주요 온실가스를 배출한다. 현장 내에서 사용된 화석연료의 직접 연소로 인한 대기배출물은 아래의 식과 같은 IPCC 2006의 배출량 산정식을 적용하여 도출하였다[16].

$$Emissions = \sum_j (Fuel_j \times Ef_j)$$

여기에서, Fuel_j는 소비된 연료의 양으로 TJ단위이며, EF_j는 연료 j의 온실가스 배출계수, j는 연료 종류를 의미한다. Fuel_j에 해당하는 연료의 양을 적용하기 위해 에너지기본법 제5조제1항의 에너지열량 환산기준을 참조하여, 에너지원별 순발열량을 기준에 수집한 경유 및 LPG 사용량에 적용하여 열량 단위인 TJ로 변환하였다[20]. 본 연구에서 적용한 경유 및 LPG의 순발열량과 CO₂, CH₄, N₂O 배출계수를 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Emission factor and heating value of fuel[16,20]

Fuel types	Heating value	Emission factor (kg/TJ)		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Diesel	35.3 MJ/L	74,100	4.15	28.6
LPG	57.7 MJ/Nm ³	63,100	1.0	0.1

폐기단계에서는 대상 교량의 폐기시 발생하는 건설폐기물들을 자재별로 구분하고 2012년 기준 전국에서 발생한 건설폐기물의 종류별 연간 재활용, 매립, 소각비용에 대한 조사결과[19]를 적용하여 폐기물 종류별 재활용, 매립, 소각량을 추정하였다(폐목재의 경우 처리방식에 따라 재활용 85.12%, 소각 14.88%, 기타 매립 적용). 폐기물 수송에 따른 환경부하는 대상 교량이 설치된 지역에 가장 근접한 건설폐기물 중간처리업체(28.53km)까지의 거리, 중간처리업체에서 최종폐기물 처리업체(7.42 km)까지의 거리를 적용하였다. 최종적으로 각 건설폐기물의 재활용, 소각, 매립에 대한 국가 LCI 데이터베이스를 통하여, 폐기물 처리공정에서 발생하는 지구온난화 영향 등을 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지구온난화

본 연구에서는 대상 교량의 지구온난화 영향을 알아보기 위하여 전과정동안 배출되는 온실가스배출량을 정량적으로 분석하였다. 전과정평가에서 환경영향을 도출하기 위한 분류화(Classification)와 특성화(Characterization)는 세계적으로 널리 사용되고 있는 전과정평가 전용 프로그램인 Sima pro.7을 사용하여 수행하였으며, 본 연구에서는 지식경제부의 특성화인자를 적용하여 결과를 도출하였다. 대상 교량이 지구온난화에 미치는 영향은 GWP (Global warming potential)로 나타내었으며, 전과정단계별 GWP 결과는 Table 6과 같다.

대상 교량의 전과정동안의 온실가스 배출량은 약

Table 6. GWP results in life cycle stages

Life cycle stages	Global Warming Potential	
	ton CO ₂ eq.	%
Extraction & Manufacturing	1.56E+02	81.14
Transport	2.33E+00	1.21
Construction	5.30E+00	2.75
Use	5.47E-01	0.28
Dismantlement	4.03E+00	2.10
Transport (Waste)	1.00E+00	0.52
Disposal & Recycling	2.31E+01	12.00
Total	1.93E+02	100

192.56 ton CO₂ eq.로 도출되었다. 특히, 교량에 투입되는 자재들의 원료채취 및 제조단계에서 156.24 ton CO₂ eq.의 GWP가 나타났으며, 이는 전체의 81.14%에 해당하는 결과이다. 차(2009), 건설기술연구회(2010), 손(2012) 등의 연구에 의하면, 일반 건축물의 경우 사용기간 동안 많은 에너지를 사용하기 때문에 투입되는 자재의 양이 많다 하더라도 사용단계의 지구온난화 영향은 전체의 80% 이상을 차지한다[5,7,21]. 그러나 대상 교량은 일반 건축물과 다른 사용단계에서 수명 동안 에너지를 사용하지 않는 구조물이다. 대부분의 지구온난화 영향은 투입되는 자재들의 원료채취 및 제조단계에서 발생하며, 향후 교량의 환경성 개선을 위해서는 저탄소 자재의 활용 및 구조물의 경량화를 통한 에코디자인 설계가 필요하다.

원료채취 및 제조단계에서 투입되는 자재들은 Table 3과 같이 LCI 데이터베이스 적용 기준 총 17개로 구분된다. 각 자재들의 상위흐름에 대한 환경영향은 전과정동안 발생하는 총 온실가스 배출량의 81.14% (156.24 ton CO₂ eq.)에 해당할 정도로 상당부분 차지하고 있으며, 따라서 각 자재들의 개별적인 GWP를 규명하고 주요 이슈를 규명할 필요가 있다. 재질 종류별로 콘크리트, 철강, 목재, 플라스틱, 도료 총 5개로 분류하였으며, 각각의 GWP 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

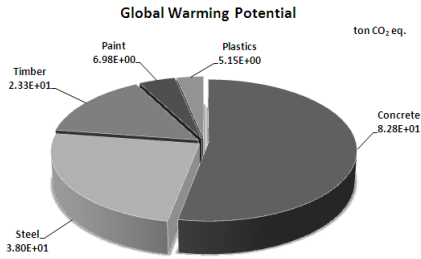


Fig. 4. GWP results of input materials in extraction and manufacturing stages.

대상 교량을 구성하는 자재 중 콘크리트에 의한 GWP는 82.84 ton CO₂ eq.로 총 투입 자재 GWP의 53.02%를 차지하고 있다. 콘크리트는 교량 하부를 지지하고 있는 교대부를 구성하고 있으며 무게 기준으로 교량 무게의 약 3.5배에 달한다. 즉, 대상 교량을 시공하기 위해 무게 기준에서 가장 많이 투입되는 자재인 콘크리트의 GWP가 가장 높게 도출되었다. 철강의 경우, 교량의 정착부, 가로보, 수직재, 연결부를 주로 구성하고 있으며, GWP는 전체의 24.30%를 차지하고 있다. 반면 리기다소나무 구조용 집성재는 바닥판의 응력적층보, 트러스, 난간을 주로 구성하고 있지만 GWP는 전체의 14.91%에 그치고 있다. 이러한 결과는 구조적 성능이 뛰어난 집성재를 개발 및 보급하여 교량에서 목재의 사용을 늘리고 철강 또는 콘크리트의 사용을 대체함으로써, 교량 경량화로 인한 교대부의 콘크리트 사용을 감소시켜 교량의 전과정단계 중 온실가스가 가장 많이 배출되는 원료채취 및 제조단계의 온실가스 배출을 줄일 수 있음을 시사하고 있다.

3.2. 탄소저장효과

목재는 생육기간 동안 이산화탄소를 흡수하고 목재 내에 탄소가 고정된다. 또한 목제품은 사용기간 동안 흡수한 이산화탄소를 제품 내에 고정하고 있는 저장고 역할을 한다. 특히, 목재를 사용한 구조물과 같은 경우 장기간동안 목재 내에 탄소를 고정할 수 있기 때문에 대기 중의 이산화탄소 농도를 줄여 지구온난화에 긍정적인 효과를 미칠 수 있으며, 본 연

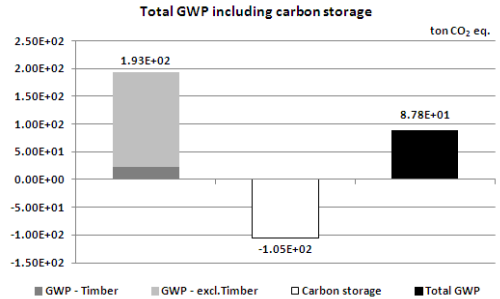


Fig. 5. Comparison of GHG emissions and carbon storage.

구의 대상과 같은 목조교량의 온실가스 배출량 평가 시, 수명 동안 저장하고 있는 탄소저장량 또한 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 목제품 내의 탄소저장량을 도출하기 위해 아래의 식을 적용하였다.

$$CO_2 \text{ storage} = V \times D \times C \times 44/12$$

여기에서, V는 사용한 목재의 입방(m³)이며, D는 목재의 전건비중, C는 목재의 탄소밀도(0.5)를 의미한다. 즉, 목재의 전건중량 대비 50%는 탄소가 이루어졌으며, 흡수한 이산화탄소량을 계산하기 위해 목재를 구성하는 탄소량에 44/12를 곱함으로써, 탄소저장량을 계산하였다. 보다 명확한 탄소저장량을 계산하기 위해 목제품별 반감기가 적용되어 장기간 저장되는 실제 탄소저장량을 계산해야 하지만 현재 국내 수준의 반감기 계수를 개발 중에 있으며, 본 연구에서는 반감기와 시계열적 요소가 포함되지 않은 단순 탄소저장량만을 고려하였다. 본 연구의 대상인 목조교량은 약 116.57 m³의 리기다소나무로 이루어져 있으며, 전건중량을 도출하기 위해 리기다소나무 전건비중 0.49 ton/m³[22], IPCC에서 제안하고 있는 탄소밀도 0.5를 적용하였다. 그 결과, 대상 교량은 수명 50년간 192.56 ton CO₂ eq.의 온실가스를 배출하는 반면, 교량을 구성하고 있는 리기다소나무에서 약 104.72 ton의 이산화탄소를 저장할 수 있다. 이와 같은 목재의 탄소저장량을 고려한 대상 교량의 GWP 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

대상 교량에 사용된 리기다소나무 구조용 집성재

Table 7. Amount of comparison target materials according to tensile strength[25]

Materials	Specific strength (MPa)	Specific gravity (ton/m ³)	Tensile strength (MPa)	Input volume (m ³)	Total tensile strength (MPa)	Input weight (ton)
Timber	125.0	0.49	61.25	116.57	7,139.63	57.12
Steel	74.5	7.85	584.83	12.21	7,139.63	95.83

는 제재목과 같은 타 목재제품에 비하여 공정이 많고 상대적으로 에너지 소비가 크기 때문에 원료채취 및 제조단계에서 많은 양의 온실가스가 발생한다. 본 연구의 대상 교량에서도 이러한 구조용 집성재의 사용으로 인하여 발생하는 GWP는 23.30 ton CO₂ eq.로 교량의 전과정에 걸쳐 발생하는 GWP의 12.10%를 차지하고 있다. 그러나 교량에 사용된 목재는 집성재의 원료채취 및 제조단계에서 발생하는 온실가스의 약 4.5배에 해당하는 이산화탄소를 이미 흡수하여 제품 내에 저장하고 있으며, 이는 대상 교량의 총 GWP의 54.38%에 달한다. 즉, 목재의 탄소저장량을 대상 교량의 온실가스 배출량에서 제외할 경우, 사실상 대상 교량의 전과정동안 발생하는 GWP는 87.84 ton CO₂ eq.로 도출된다.

3.3. 탄소대체효과

목재는 단열성능과 강도가 우수하기 때문에 철 또는 콘크리트와 같은 자재들을 대체할 수 있는 친환경 소재로 널리 알려져 있다[23]. 또한 대기 중의 이산화탄소를 흡수하여 성장하기 때문에 지하자원을 소모하지 않은 천연 소재이다. 이러한 목재는 자원고갈에 영향을 미치지 않으며, 목재제품을 제조하기 위한 공정 또한 간단하여 타 제품에 비해 온실가스 배출량 또한 크지 않다. 이러한 목재의 친환경적 우수성을 정량적으로 입증하기 위해 본 연구에서는 대상 교량에 구조용 집성재가 사용된 경우와 일반 철골자재가 사용된 경우를 비교하여 목조교량의 탄소대체효과를 분석하였다. 대체효과 비교 시, 기능과 구조가 동일한 일반 교량과 비교 연구를 수행해야 하지만, 현실적으로 이러한 비교 대상을 찾기 어려울뿐더러 비교 대상의 전과정평가 수행을 위한 데이터 수

집에서의 비용, 시간, 노력 등 많은 한계점들이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 가정 사항을 설정하였다. 동일한 구조와 설계 수명을 갖는 가상의 교량을 기준으로 비교 자재들의 대체효과만 비교하였으며, 자재의 증감으로 인한 교대부의 변화, 자재에 따른 시공법의 기술적 변화는 고려하지 않았다. 또한 동등한 비교를 위해 목재와 철골자재의 동일중량, 동일부피 기준으로 비교하지 않았으며, 연구 대상인 교량에 사용되는 자재의 주요 기능을 ‘하중을 안전하게 견디는 것’으로 정의하여 비교 자재들의 인장강도 기준으로 대체효과를 비교하였다. 목재와 철골자재의 인장강도를 계산하기 위해 각 자재별 비강도와 비중을 적용하였으며, Table 7에 동일한 인장강도 기준으로 투입되는 목재와 철골자재의 양을 나타내었다.

비강도란 재료의 강도를 비중으로 나눈 값으로 목재의 경우 일반적으로 구조용 재료로 사용되는 철보다 약 1.7배, 콘크리트에 비해 약 7배 이상의 비강도를 갖는다[24]. Table 7과 같이 대상 교량에 투입된 목재 116.57 m³이 갖는 인장강도만큼 철골자재가 대체할 경우, 철골자재는 목재 투입량의 질량대비 약 1.68배 정도 더 많이 요구된다. 즉, 목재 57.12 ton에 해당하는 인장강도를 가지기 위해서는 철골자재 95.83 ton이 필요하며, 이를 동일 교량에 철골자재만 적용한 경우와 목재만 적용한 경우로 가정하였다. 이에 대한 지구온난화 영향은 Fig. 6에 나타내었다.

대체효과 비교를 위해 사용한 국가 LCI 데이터베이스로는 목재의 경우 Ecoinvent의 Glued laminated timber, 철골자재의 경우 지식경제부의 전기로제강_형강 (Electric steel sections), 전기로제강_철근 (Electric steel deformed bars), 전기로제강_봉강 (Electric steel round bars)을 적용하였다. 대상 교량에 투입되는 목

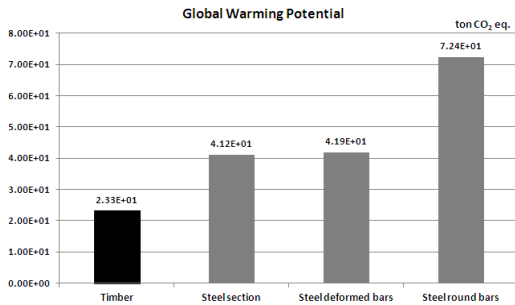


Fig. 6. GWP results of comparison target materials.

재의 인장강도에 부합하는 만큼 철골자재가 투입된 경우, 목재가 철골자재를 대체 할 시 형강류 17.86 ton CO₂ eq., 철근류 18.61 ton CO₂ eq., 봉강류 49.10 ton CO₂ eq.의 GWP를 저감할 수 있는 것으로 도출되었다. 즉, 목재의 탄소대체효과를 적용한 결과 대상 교량의 원료채취 및 제조단계 GWP를 최소 10.26%에서 최대 23.91%까지 저감할 수 있는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 국산 리기다소나무 구조용 집성재를 사용한 국내 최초 차량용 목조교량인 ‘혼아름교’에 대해 전과정평가를 실시하여 목조교량의 원료채취단계부터 폐기 및 재활용단계까지 전과정에 걸쳐 배출되는 온실가스를 규명하고 지구온난화에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통하여 친환경 소재인 목재의 탄소저장효과와 동일한 기능을 가진 철골교량의 대체효과를 비교 분석하여 국산재를 활용한 목조교량의 친환경적 우수성을 정량적으로 입증하기 위한 연구결과를 도출하였다.

대상 교량의 전과정동안 배출되는 온실가스는 총 192.56 ton CO₂ eq.이며 교량에 사용된 재료의 원료채취 및 제조단계에서 81.14%의 온실가스가 배출된다. 특히, 콘크리트의 영향이 가장 높았으며 원료채취 및 제조단계의 온실가스 배출량 중 53.02%를 차지하는 것으로 평가되었다. 대상 교량에 사용된 국산 리기다소나무는 총 116.57 m³이며, 교량의 설계 수명 50년간 총 104.72 ton의 이산화탄소를 저장하고

있어 전과정에 걸쳐 배출되는 온실가스의 54.38%를 저감 가능한 것으로 도출되었다. 또한 대상 교량과 동일한 구조 및 수명을 갖는 일반 철골구조 트러스 교량의 철골자재를 구조용 집성재로 대체할 경우, 원료채취 및 제조단계의 온실가스 배출량을 최소 10.26%에서 최대 23.91%까지 저감할 수 있는 것으로 도출되었다. 향후, 교량 설계 시 철골자재 또는 콘크리트 등을 구조용 목제품으로 대체하여 교량 내의 목재 사용을 늘리고, 교량 경량화에 따른 교대부의 콘크리트 사용을 줄임으로써 전반적인 자재투입량을 감소시키는 설계가 교량의 환경부하를 줄일 수 있는 효율적인 방안이라 판단된다.

연구 결과는 국산 목재를 사용한 교량 등 토목 구조물의 온실가스 배출 저감에 따른 친환경적 우수성을 정량적으로 입증할 수 있는 자료로 활용 가능하며, 전과정동안 지구온난화 영향이 적은 목조교량의 개발 및 보급을 위한 자료로 활용 가능할 것으로 사료된다. 목재의 탄소저장효과와 대체효과를 명확히 규명하기 위해서는 수확된 목제품(HWP, Harvested Wood Products)의 반감기 연구와 대체되는 자재들의 명확한 특성, 자재 대체로 인한 2차 영향, 자재별 시공 특성 등을 고려하여 연구를 수행해야 할 것이다. 현재 교량과 같은 구조물에 대한 환경성 평가 연구는 많지 않으며, 특히 목재를 적용한 분야에서 이와 같은 전과정평가 수행 사례는 매우 미흡한 실정이다. 다양한 구조와 형태의 목조교량에 대한 환경영향 비교 연구를 지속적으로 수행해야 할 것이며, 비교를 위해 타 재료를 사용한 교량의 전과정평가가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 2013년도 국립산림과학원 리서치 펠로 우십의 지원에 의해 이루어진 것임.

참 고 문 헌

1. DARA. 2012. Report: Climate Crisis Already Causing Unprecedented Damage to World Economy;

- Human Impact On Large-Scale.
2. 이동흡. 2012. 목재를 이용한 주거환경이 지구환경 및 인간의 신체발달과 정서에 미치는 영향. 국립산림과학원 연구자료 제477호.
 3. 김광모, 엄창득, 이상준. 2012. 차량용 목조교량의 설계, 시공 및 평가. 국립산림과학원 연구보고 제12-18호.
 4. 손휘림, 강경석, 박주생, 박문재, 차준희. 2013. 지속가능한 산림경영을 위한 주요 수종의 전과정목록 구축 및 환경영향평가. 2013 한국목재공학회 학술발표 요지집: pp. 154~155.
 5. 차준희. 2009. 낙엽송 제재목의 전과정 목록분석과 목조주택의 온실가스 배출저감 효과 평가. 박사학위논문 서울대 대학원.
 6. 강경석. 2010. 기둥보 구조 목조주택의 온실가스 배출 저감량 분석: 전과정 평가 방법의 적용. 석사학위논문 서울대 대학원.
 7. 한국건설기술연구원. 2010. 한옥 환경성 평가 및 한옥건축 활성화 추진방안 연구 I, 한옥환경성 평가. 국토교통부. pp. 133~324.
 8. 김상호, 최문석, 조광일, 윤지현. 2011. 강교량구조물의 환경적합성에 관한 전과정평가. 대한토목학회논문집 31(4): pp. 269~278.
 9. 김도균. 1996. 전과정 평가(LCA) 기법에 의한 강구조 교량과 콘크리트 교량의 환경성과 경제성의 기초적 비교. 석사학위논문 한국과학기술원.
 10. Steele K. N. P., Cole G., Parke G., Clarke B., and Harding J. 2002. The Application of Life Cycle Assessment Technique in the Investigation of Brick Arch Highway Bridges. Proceedings of the Conference for the Engineering Doctorate in Environmental Technology.
 11. Martin A. J. 2004. Concrete bridges in sustainable development. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Engineering sustainability I57, Issue ES4: pp. 219 ~ 230.
 12. Lounis Z. and Daigle L. 2007. Environmental benefits of life cycle design of concrete bridges. Proceedings of the 3rd International Conference on Life Cycle Management. 293: pp. 1~6.
 13. 이건모, 허탁, 김승도. 1998. 환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침. 한국품질환경인증협회.
 14. ISO 14040. 2006. Environmental management - Life cycle assessment- Principles and framework.
 15. ISO 14044. 2006. Environmental management - Life cycle assessment- Requirements and guidelines.
 16. IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2). pp. 3.38~3.47.
 17. 한국건설기술연구원. 2013. 건설공사 표준품셈. 국토교통부. pp. 378~385.
 18. 이홍석. 2002. 건축물 폐기단계에서 에너지소비량과 이산화탄소 발생량에 관한 기초 연구. 석사학위논문 중앙대 대학원.
 19. 환경부. 2013. 2012 전국 폐기물 발생 및 처리 현황.
 20. 산업통상자원부. 2013. 산업통상자원부령 제1호. 에너지법 시행규칙.
 21. 손휘림. 2012. LCA 기법을 이용한 산업용 철골구조 건물의 환경성 평가 및 방법론 개발. 석사학위논문 건국대 대학원.
 22. 정성호, 박병수. 2008. 한국산 유용수종의 목재성질. 국립산림과학원. p. 211.
 23. 이동흡. 2012. 목재를 이용한 주거환경이 지구환경 및 인간의 신체발달과 정서에 미치는 영향. 국립산림과학원. p. 123.
 24. 김광모. 2011. 목재를 이용한 차량용 교량의 설계. 월간 산림과학정보 238: pp. 8~9.
 25. James M. Gere. 2004. Mechanics of materials 6th edition. Thomson Learning. Singapore.