

바이모달 트램의 전과정에 걸친 환경영향에 관한 정량적 분석

| 임노현 · 김용기 · 윤희택 · 이재영 · 양인목 · 김지영 |

1. 서론

18세기 이후 급격한 산업화와 더불어 무분별한 자원소비로 인한 환경 파괴는 국제적인 차원에서 통합된 대응이 요구될 정도로 심각해져 가고 있다. 이에 따라 지속가능한 발전(sustainable development)이 21세기에 가장 중요한 이슈로 부각되어 제품과 관련된 각종 환경규제가 생겨나고 기후변화 협약 등의 범국가적인 해결 노력이 진행되고 있다.¹⁾

2005년에 교토의정서가 발효되면서 선진국을 중심으로 이산화탄소 배출량 감축을 위한 국가 목표를 설정하고 이를 달성하기 위한 노력이 급속도로 진행되고 있으며, 현재 우리나라는 감축의무는 없으나 에너지 소비량 및 온실가스 배출량을 고려할 때 2차 온실가스 감축 의무대상국에 추가될 가능성이 매우 높다. 이는 산업 전반에 걸쳐 심각한 타격을 미치고 있으며, 특히 국내 주요한 환경영향 유발 산업인 교통 산업에도 영향을 미치고 있어 새로이 도입되는 교통수단의 환경성평가가 필수적인 항목으로 대두되고 있다. 대상 시스템의 전과정에 걸친 투입물과 산출물을 정량화하고, 이러한 투입물 및 산출물과 관련된 총체적인 잠재적 환경영향을 평가함으로써 환경측면의 주요이슈를 규명할 수 있는 평가 도구인 전과정평가(Life Cycle Assessment; 이후 LCA) 기법은 새롭게 개발되는 교통수단에 대한 환경성 평가를 수행하여 주요 환경 측면을 규명하고 이를 토대로 추가적인 환경영향의 개선기회를 강구할 수 있어 환경 문제에 대한 근본적인 개선안을 제시하는데 활용되고 있다.²⁻⁵⁾

본 연구에서는 버스와 철도의 장점을 통합한 신개념 교통수단인 바이모달 트램에 대한 LCA를 수행하여 주요 환경측면을 규명하고 이를 토대로 추가적인 환경영향의 개선기회를 강구하고자 하였다. 그러나 현재 바이모달트램 차량이 양산 이전의 기획, 설계 단계에 있으므로 폐기에 대한 실적자료 혹은 예상 시나리오 자료가 없는 상태이다. 이는 타 차세대 대중교통 시스템도 마찬가지 상황이며, 따라서 무리한 가정 및 추정사항에 의한 평가 및 비교는 바람직하지 않으므로 원료 단계부터 사용 단계까지를 제품 시스템 경계에 포함시키는 간략화된 전과정평가(simplified LCA) 방법을 이용하여 주요 물질에 대한 환경성 평가 및 영향범주별 기여도를 분석하였다.

2. 간략화 전과정평가의 개요

LCA는 원료 획득으로부터 제조, 사용, 재활용 그리고 마지막 폐기에 이르기까지 제품의 전과정(즉, 요람에서 무덤까지)에 걸쳐 환경 측면과 잠재적인 환경 영향을 정량적으로 평가하는 도구이다. 김용기 외 (2005)와 이재영 외 (2005)에서 simplified LCA에 대한 개요를 소개한 바 있어 이 부분은 생략하겠다.^{3,4)}

3. 바이모달 트램의 환경성평가

† 책임저자 : 정회원 (주)에코시안, 지속가능제품전략사업부(PSSD)

E-mail : noah99@ecosian.com

TEL : (02)890-7560~1 FAX : (02)890-7562

* 한국철도기술연구원

**에코시안

3.1. 목적 및 범위 정의

3.1.1. 목적 정의

본 연구의 목적은 전과정평가를 수행하여 바이모달 트램에 대한 환경영향을 평가하고 이 결과를 통해 바이모달 트램의 환경성 개선 기회를 모색하고자 함에 있다.

3.1.2. 범위 정의

3.1.2.1. 기능 및 기능단위 설정

본 연구의 대상 제품은 바이모달 트램으로, 연구의 목적과 관련된 기능은 이동성, 안전성, 편의성의 제공으로 정의하였다. 기준흐름은 바이모달 트램 1대(2량 1편성) 기준의 18,377kg으로 선정하였으며, 내구연한은 10년으로 고려하였다.

3.1.2.2 시스템경계 설정

본 연구의 시스템경계는 원료단계부터 바이모달 트램이 제조되어 사용되는 단계까지의 과정을 포함한 "cradle to gate"의 범위를 가지고 있다. 따라서 차량의 원료채취, 생산, 사용 단계에서 발생하는 환경영향을 연구에 포함하고 있으며, 폐기되는 부분은 포함하지 않는다. 시스템경계는 그림 1에 도식화하였다.

표 1. Function, functional unit, reference flow

제품명	바이모달 트램
기능	이동성, 안정성, 편의성 등 제공
기능단위	바이모달 트램 1대가 제공하는 기능
기준흐름	바이모달 트램 1대(18,377kg)

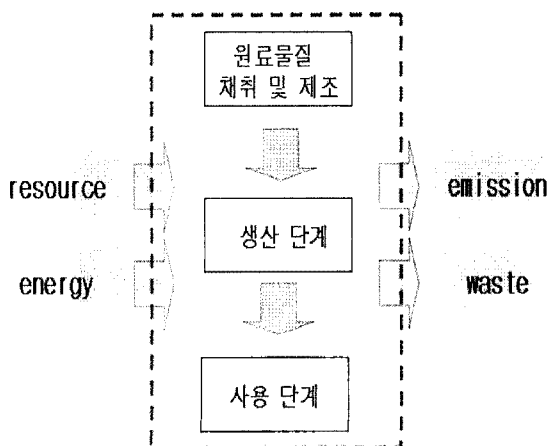


그림 1. System boundary of Bimodal Tram

표 2. Time-related, geographical and technical coverage

대상업체 구분	대상업체 내부	대상업체 외부
시간적경계	2008년	① 2008년 ② 최근 5년 이내 데이터 ③ 가급적 최신 데이터
지역적경계	바이모달 트램 제조사	① 현장데이터 ② 국내데이터 ③ 해외데이터
기술적경계	바이모달 트램의 제조 기술	① 제조공정 ② 동일공정 데이터 ③ 유사공정 데이터

3.1.2.3 초기 데이터 품질 요건

본 연구에서는 초기 데이터 품질 요건을 바이모달 트램의 대상업체 내부와 부품 및 물질의 생산업체를 의미하는 대상업체 외부로 구분하였다. (표 2 참고)

3.1.2.4 할당

본 연구에서 할당은 최대한 피하려고 하였으며, 할당을 피할 수 없을 경우에는 Cut-off 방법을 사용하여 전과정평가의 목적에 맞도록 시스템 경계를 설정하여 경계를 벗어나는 부분에 대한 환경부하를 무시함으로써 실질적인 할당문제를 회피하였다.

3.1.2.5 영향범주 및 영향평가 방법론

본 연구에서는 영향평가 방법론으로 환경부 영향평가방법론을 적용하였다. 환경부 영향평가방법론은 환경성적표지제도(Type III)의 인증 취득을 위한 방법론으로, 2007년 특성화인자 값이 업데이트되었다. 고려된 영향범주와 상응인자 단위는 표 3과 같다.

3.1.2.6 가정 및 제한사항

- 본 연구에서 사용된 주요 가정과 제한사항은 다음과 같다.
- 원재료 및 부품을 비롯한 바이모달 트램의 제조 설비의 인프라를 구축하는데 발생하는 환경영향은 고려하지 않았다.
 - 기술계로 투입되거나 산출되는 데이터 중에서 상위 및 하위흐름 데이터베이스가 존재하지 않을 경우에는 기본흐름(elementary flow)으로 가정하였다.
 - 전과정에서 수송단계에 대한 환경영향의 기여도는 대체

표 3. Characteristics of simplified LCA

환경영향범주	Formula	특성화인자 기준물질및단위
자원소모 (Abiotic Resource Depletion Potentials)	ADP	in kg antimony equiv./ kg-yr
지구온난화 (Global Warming Potentials)	GWP	Kg CO ₂ equiv./kg
오존층 영향 (Ozone Depletion Potentials)	ODP	Kg CFC11 equiv./kg
산성화 (Acidification Potentials)	AP	Kg SO ₂ equiv./kg
부영양화 (Eutrophication Potentials)	EP	Kg Phosphate equiv./kg
광화학적산화물 생성 (Photochemical Oxidant Creation Potentials)	POCP	Kg C ₂ H ₄ equiv./kg

적으로 매우 작아 바이모달 트램 제조과정에서의 내부수송 및 각 단계별 외부수송으로 인한 환경영향은 고려하지 않았다.

- 바이모달 트램의 연료인 CNG의 Database 부재로 인해서 LNG Database로 대체하였다.

3.2 전과정 목록분석

3.2.1 데이터 수집

본 연구에서는 바이모달 트램의 제조공정에 투입되는 원료는 설계데이터를 사용하였으며, CNG 및 전기와 같은 에너지의 상위흐름은 대한민국 산업자원부, 환경부에서 구축한 DB를 우선적으로 사용하였으며, 국내에서 구축되지 않는 일부 하위흐름은 스위스의 전과정목록 센터(ecoinvent center)에서 구축한 ecoinvent DB를 사용하였다.

3.2.2 데이터 검증

본 연구에서는 수집된 데이터의 신뢰성을 평가하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다.

- 물질수지: 질량보존 법칙을 활용하여 검토 실시
- 인과관계의 파악: 전문가를 통한 각 목록의 투입 및 산출에 대해 검토를 실시
- 데이터 값의 누락여부: 국내외 관련 문헌자료를 참조하여 검토 실시

3.2.3 데이터 계산

본 연구는 차량의 제원과 관계된 내용에 대해서는 설계자료를 활용하였으며, 바이모달 트램의 공정데이터 및 사용데이터와 관련해서는 설계데이터, 계산데이터 등을 통해 투입물

표 4. Bimodal Tram composition

구성품	단위	양
Front Module(incl. glazing)	kg	428
Roof, Side, Floor, Cab Mask(A)	kg	1,890
Roof cover assy	kg	250
Drivers-cabine(complete)	kg	194
Diver's seat	kg	80
Doors (front)	kg	240
Doors (middle)	kg	240
Floor Covering (front)	kg	50
HVAC (front)	kg	150
Interior panels	kg	250
Stanchion & Grip	kg	150
Inside Frame	kg	250
Passenger seats	kg	200
Window panes(Glass)	kg	200
Insulation	kg	90
Hinge & Accessory	kg	100
Roof CNG Tank	kg	630
Duble Roof Addition(Front)	kg	57
Axle Module 1st	kg	1,468
Axle Module 2nd	kg	1,532
2nd motor(stator & rotor)	kg	272
2nd gear box	kg	348
Roof,Side,Floor,Cab Mask	kg	1,599
Roof cover assy	kg	200
Dummy for articulation	kg	250
Doors (rear)	kg	240
Floor Covering (rear)	kg	42
HVAC (rear)	kg	150
Interior panels	kg	150
Stanchion & Grip	kg	200
Inside Frame	kg	250
Passenger seats	kg	150
Window panes(Glass)	kg	150
Insulation	kg	90
Hinge & Accessory	kg	100
Articulation Complete	kg	508
Duble Roof Addition(rear)	kg	57
ENGINE(incl. intake & exhaust)	kg	462
Generator(aangedreven)	kg	240
Traxis roof equipment	kg	540
Battery assy(incl. Box & cover)	kg	550
Condenser	kg	50
Cooling Dvice	kg	100
Air-con comp.	kg	50
12V Battery	kg	50
XM3 Box	kg	50
Cable	kg	400
Piping install	kg	200
etc	kg	200
Axle Module 3rd	kg	1,660
3rd motor(stator & rotor)	kg	272
3rd gear box	kg	348

및 산출물에 대한 계산을 수행하였다. 바이모달 트램의 구성 품 목록은 표 4에 제시되어 있다.

3.2.4 목록분석결과

본 연구에서는 바이모달 트램 제조 및 사용단계에서 발생하는 투입물 및 산출물 목록에 대한 분석을 실시하였다. 바이모달 트램 제조단계 및 사용단계에서 구축된 gate to gate 목록에 상위흐름을 통해 발생하는 부품 및 물질의 데이터를 연결하여 cradle to gate 목록을 구축하였다. 구축된 목록 중에 발생량이 많은 항목을 주요 물질로 선정하였으며 그 결과는 표 5와 같다.

3.3 전과정영향평가 및 해석

본 연구는 영향평가 방법론으로 대한민국 환경부 영향평가 방법론을 적용하여 바이모달 트램의 잠재적인 환경영향은 정량적으로 도출하였으며, 전과정영향평가 단계는 분류화를 거쳐 특성화 단계를 수행하였다.

먼저 표 6에서와 같이 특성화 결과는 사용단계가 모든 환경영향범주에서 잠재적인 환경영향이 높게 나타났다. 이

결과는 사용단계에 사용되는 연료(CNG)의 제조 및 사용에 의해 발생하는 물질의 잠재적인 환경영향이 가장 높기 때문이

표 5. Cradle to gate inventory about significant issues parameters

주요 대기 배출물			
물질명	단위	제조단계	사용단계
Nitrogen oxides(NOx)	kg	7.84E+01	1.02E+04
Carbon monoxide(CO)	kg	4.29E+02	6.58E+03
NMVOCS	kg	1.08E+02	5.54E+03
Sulfur dioxide(SOx)	kg	9.66E+01	1.01E+03
Dust	kg	8.31E+01	4.61E+01

지구온난화 가스			
물질명	단위	제조단계	사용단계
Carbon dioxide(CO ₂)	kg	2.86E+04	9.64E+05
Methane(CH ₄)	kg	2.24E+01	1.21E+03
Nitrous oxide(N ₂ O)	kg	1.37E+00	1.74E+01

자원소모 주요 물질			
물질명	단위	제조단계	사용단계
Natural gas	kg	2.08E+03	3.24E+05
Hard coal	kg	1.57E+04	1.70E+05
Copper ore	kg	6.68E+04	1.68E+03
Crude oil	kg	5.80E+03	1.62E+04
Iron ore	kg	1.33E+04	6.12E+03

표 6. Characterization results

영향 범주	단위	전체	제조단계	사용단계
ADP	kg antimony-eq.	7.85E+03	3.59E+02	7.49E+03
AP	kg SO ₂ -eq.	8.22E+03	1.13E+02	8.11E+03
EP	kg PO ₄ -eq.	1.34E+03	1.10E+01	1.33E+03
GWP	kg CO ₂ -eq.	1.02E+06	2.97E+04	9.95E+05
ODP	kg CFC 11-eq.	2.40E-03	9.66E-04	1.44E-03
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq.	5.89E+03	1.19E+02	5.78E+03

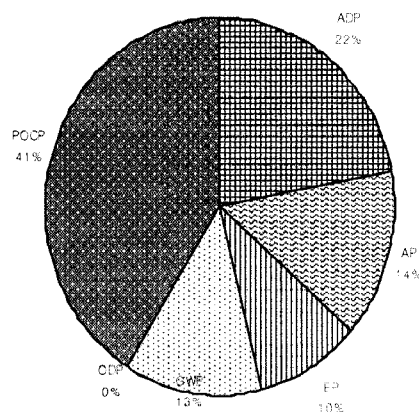


그림 2. Weighting results

었다. 영향 범주별로 살펴보면, 무생물자원고갈 범주에서는 연료사용으로 인한 Natural gas가 62.6%로 주된 인자로 규명되었고 Hard Coal이 31.7%의 기여도를 보였다. Hard Coal은 12v 배터리의 납 제조과정에서 사용되는 물질이다.

산성화 범주에서는 NOx가 87.2%, SOx가 12.8%의 기여도를 보였으며, 모두 사용단계의 연료에 의한 영향을 나타낸다. 즉, NOx는 연료의 연소시 발생하는 물질이며, SOx는 연료의 제조시에 발생한다. 부영양화 범주는 연료의 연소시 발생하는 NOx가 99.6%로 주된 인자로 규명되었다. 또한 지구온난화 범주에서는 연료의 연소시 발생하는 CO₂가 96.9%의 기여도를 보였다. 그리고 오존층영향 범주는 99.9%가 연료 제조시 발생하는 Halon-1301로 규명되었으며, 광화학산화물생성 범주에서는 연료 제조과정에서 발생하는 NMVOC가 95.8%의 기여도를 보였다.

특성화 결과에 산자부 영향평가방법론을 적용하여 정규화 및 가중치부여 단계를 추가적으로 수행하였다.¹¹⁾ 그 결과는 그림 2와 같이 광화학산화물생성 범주에서 환경영향이 가장

크게 나타났다. 따라서 광화학산화물생성 범주에서 가장 큰 기여도를 보인 NMVOCs가 주요 환경 이슈로 규명되었다. 광화학산화물생성 범주의 환경영향을 줄이기 위해서는 연료의 대체나 연료의 효율을 높이는 방법이 제시가 될 수 있으나 현재 상황으로는 연료의 효율을 높이는 방법이 대안으로 제시 될 수 있다.

4. Conclusion

지하철과 버스의 장점을 살린 신개념 교통수단인 바이모달 트램의 환경영향을 평가해 보고자 간략화된 전과정평가 방법을 이용하여 주요 물질에 대한 환경성 평가 및 영향범주별 기여도를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 간략화된 전과정평가 방법을 이용하여 바이모달트램에 대한 정량적인 환경영향을 평가할 수 있었다. 전과정목록분 석을 통해 주요 대기배출물로는 NOx, SOx, NMVOC, CO, Dust 등이 있으며, 온실가스(GHG)는 CO₂, CH₄, N₂O 으로 규명되었다. 이 물질들은 모두 사용단계에서 기여도가 높게 나타났다. 또한 자원소모 주요 인자는 Natural gas, Hard coal, Copper ore, 등으로 나타났으며, Natural gas 는 연료와 관련된 것이고 그 외의 인자들은 바이모달 트램의 부품 제조와 관련된 것이었다.

(2) 특성화 결과는 사용단계의 연료와 관련된 인자들이 대부분 잠재적 환경영향이 높게 분석되었으며, 각 영향범주별 기여 인자들은 모두 전과정목록분석에서 질량비가 높은 인자들이었다. 또한 가중화 결과에서도 광화학산화물생성 범주에서 사용단계의 연료와 관련된 NMVOC가 주요 인자로 확인되

었다.

(3) 전과정목록분석 단계와 영향평가 단계를 통해 사용단계에서 연료에 의한 잠재적인 환경영향이 크게 나타나 에너지 사용이 환경여향과 관련이 있음을 확인하였다. 따라서 바이모달 트램의 환경영향을 개선하고 저감하기 위해서는 바이모달 트램의 연료 사용의 효율성 및 연료 사용 저감 등이 필요하다. S

♣ 참고 문헌

1. 이병욱, 황금주, 김남규(2005), 환경경영, 에코리브르, pp.17-218.
2. Tak Hur, Jiyong Lee, Jiyeon Ryu and Eunsun kwon (2005), "Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system", Journal of Environmental Management, vol.70, pp. 229-327.
3. 김용기, 이재연, 목재균, 정인태(2005), "간략화 전과정평가 기법을 이용한 전동차 구체의 환경성 평가", 한국철도학회 논문집, 제 8권, 제 6호, 한국철도학회, pp.210-215.
4. 이재연, 김용기, 윤희택, 양윤희(2005), "간략화된 전과정평가를 이용한 전동차 대차의 환경영향 진단", 한국철도학회 논문집, 제 8권, 제 5호, 한국철도학회, pp.210-215.
5. 양윤희, 이건모, 정인태, 김용기, (2005.5), "전과정평가와 간략전과정평가의 비교분석 및 철도산업에의 활용방안", 한국철도학회 논문집 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회.
6. ISO(2006) "ISO 14040, Environmental Management-Life Cycle Assessment- Principles and framework", ISO.
7. 2. ISO (2006) "ISO 14044, Environmental Management-Life Cycle Assessment- Requirements and guidelines", ISO.
8. 허택, 안중우, 정재춘 (1995), "전과정평가의 기본원리", 한국경영자총협회
9. 이건모, 허택, 김승도 (1998), "환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침", 한국품질환경인증협회.
10. Kun-Mo Lee, Hauschild (2004), "Life Cycle Assessment Best Practices of ISO 14040 Series", Environmental Science & Technology.
11. 지식경제부(2003) "환경친화적인 산업기반 구축을 위한 환경경영 표준화사업", 지식경제부.