

# 전동차 내장패널(Interior Panel)에 대한 비교 전과정평가

## Comparative LCA of three types of Interior Panel (IP) in Electric Motor Unit (EMU)

최요한† · 이상용\* · 김용기\*\* · 이건모\*\*\*

Yo-Han Choi · Sang-Yong Lee · Yong-Ki Kim · Kun-Mo Lee

**Abstract** A comparative Life Cycle Assessment (LCA) among three types of Electric Motor Unit (EMU) Interior Panel (IP) was conducted. A functional unit for comparative LCA is a weight of IP for 1 EMU. It is assumed that Manufacturing stage and its upstream processes, Use stage and End of Life (EoL) stage are included in the boundary of product system. For Use stage, the weight of IP causes electricity consumption. It is assumed that aluminum IP is recycled and the other IPs are incinerated at the EoL stage. As a comparison results, aluminum IP has much larger environmental impact (5.162pt) than others (FRP IP; 4.069pt, Phenol IP; 4.053pt) even though recycling consideration is included. The manufacturing stage of aluminum IP has relative big environmental impact (1.824pt) and this point make the most important difference from other IPs (FRP IP; 0.1617pt, Phenol IP; 0.4534pt)). Despite of large weight difference between FRP IP (888.96kg) and phenol IP (316kg), the final environmental impact result has only little difference (0.016pt, 0.39%). With this result, the EMU designer can choose IP with a consideration of the environmental performance of IP.

**Keywords** : Comparative Life Cycle Assessment, Eco-indicator 99 Methodology, Electric Motor Unit, Interior Panel

**요 지** 전동차 내장패널에 대한 비교전과정평가를 실시하였다. ISO14044 표준과 에코인디케이터 99 방법론, SimaPro 7.0 software, Ecoinvent DB를 이용하여 전과정목록 DB를 구축하고 LCA를 수행하였다. 전동차 내장패널의 환경성 측면에 대한 일반적인 예상에 대하여 LCA를 통한 검증을 수행하였다. 전동차 내장패널의 중량이 환경성과 상관이 있음에도 불구하고 상대적 중요도는 높지 않았으며, AI 내장패널의 경우 사용단계의 환경영향이 가장 큼에도 불구하고 타 재질 내장패널에 비해 제작단계의 환경영향이 주요환경이슈로 도출되었다. AI 내장패널의 경우, 재활용으로 인한 환경편익이 크나, 장기적으로는 제작단계의 환경영향을 저감하여야 타 재질 대비 환경성 측면의 경쟁력을 강화할 수 있다.

**주 요 어** : 비교 전과정평가, 에코인디케이터 99 방법론, 전동차, 내장패널

### 1. 서 론

지난 2003년 대구 지하철 화재 참사 이후로 내장패널에 대한 설계사양에 난연 특성이 추가된 것은 주지의 사실이다. 이는 이전에 고려되지 않거나 중요시 여겨지지 않던 특성을 전동차 설계 시에 반영하게 되는 하나의 사례라 할 수 있다.

마찬가지로 최근 국제철도연합 (Union Internationale Des Chemins De Fer; UIC)을 중심으로, 이전에는 크게 중요시 여겨지 않던 환경성을 전동차 설계에 반영하기 위한 방안들이 고려되고 있다[1]. 이에 발맞춰 최근 전동차의 친환경성을 정량화하기 위한 분석기법으로써 전과정평가(Life Cycle Assessment; LCA)의 적용사례가 증가하고 있다[2],[3].

앞으로 전동차의 환경성을 정량적으로 분석하고 환경성을 개선하는 것에 대한 요구는 지속적으로 제기 되어질 것으로 전망된다.

이 연구는 기존 전과정평가 사례연구[4]가 갖는 대상범주를 제작단계로 제한한 것으로 인한, 결과해석에서의 한계를

† 책임저자 : 아주대학교 환경공학과  
E-mail : aroma4god@ajou.ac.kr  
TEL : (031)219-2409 FAX : (031)215-5145  
\* 일본 산업기술총합연구소 LCA센터  
\*\* 한국철도기술연구소 환경화재팀  
\*\*\* 아주대학교 환경건설교통공학부

인식하고, 이를 개선하기 위해 아래와 같은 연구목적을 정의하였다.

이 연구에서는 세 종류 내장패널(알루미늄 내장패널, FRP 내장패널, 페놀 내장패널)에 대한 비교 전과정평가를 수행하여, 첫째, 전동차 설계자가 내장패널 재질을 선택할 때 정량적 판단의 근거를 제공하고, 둘째, 각 내장패널 제조업자들이 환경성 측면에서 경쟁력을 확보하기 위한 개선방향을 제시하였다[5].

## 2. 문제정의 및 가설

이 연구를 위해 아래와 같은 문제를 정의하고, 이에 따른 가설을 수립하였다.

첫째, 내장패널의 무게와 환경영향은 비례하는가? 즉, 경량화는 환경영향 저감의 주요인자인가? 문헌연구에 따르면 전동차의 사용(운행)단계는 전체 환경영향의 가장 큰 부분을 차지하며, 차량 1톤의 무게 증가는 사용단계에서 0.0259kWh/km의 에너지 소비 증가를 유발한다[3]. 따라서 전동차 내장패널의 전과정에서 무게와 전체 환경영향은 비례할 것이고, 경량화는 주요한 환경영향 저감인자일 것이다.

둘째, 내장패널의 환경성 개선을 위한 가장 효율적인 방법은 사용단계의 환경영향을 저감하는 것인가? 내장패널의 주요 환경성 측면은 사용단계에서 무게증가로 야기되는 전력소비이다. 따라서 각 재질의 내장패널은 모두 동일하게 사용단계의 에너지사용 저감을 환경측면 개선방향으로 설정하는 것이 바람직할 것이다.

셋째, 내장패널의 End-of-Life 단계에서 재활용은, 소각과 대비하여 환경성 개선 측면에서 경쟁력이 있는가? 소각은 환경영향을 증가시키고 재활용은 환경영향을 저감시키므로 환경성 측면에서 경쟁력이 있을 것이다.

## 3. 검증

### 3.1 전과정평가

전동차 내장패널의 환경성을 비교하기 위해 기능, 기능 단위 및 참조 흐름을 Table 1과 같이 설정하였다.

각 내장패널의 시스템 경계를 Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3에 각각 나타내었다.

각 내장패널의 제작단계는 현장데이터를 수집하였고, 상위 공정은 LCI 데이터베이스를 연결하였다. 사용단계는 내장패널이 교체나 수리 없이 전동차와 같은 수명(25년)을 갖는 것으로 가정하였다. 폐기단계에 대해서, 알루미늄 내장패널은 금속부품이 모두 재활용 되는 것으로 가정하였고, FRP 내장

Table 1. Comparative LCA function, functional unit and reference flow

| 기능   | 기능단위                      | 참조흐름                    |
|--|---------------------------|-------------------------|
| 전동차의 차체골조로부터 승객을 보호하고, 차량 내부 부품을 설치 및 고정함과 동시에, 차내 미관을 좋게 하기 위해 전동차 차량 내부에 설치하는 패널 | 전동차 1량에 필요한 내장패널의 무게 (kg) | 알루미늄 내장패널:<br>1119.87kg |
|  |                           | FRP 내장패널:<br>888.96kg   |
|  |                           | 페놀 내장패널:<br>316kg       |

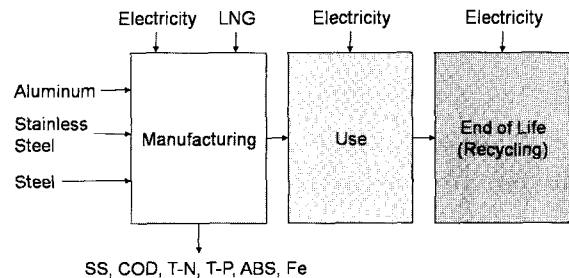


Fig. 1. The system boundary of Al interior panel

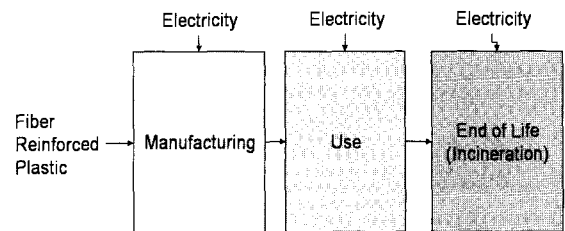


Fig. 2. The system boundary of FRP Interior panel

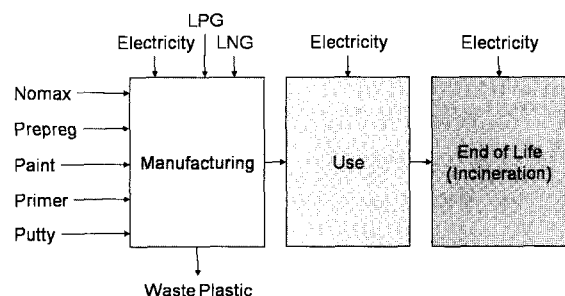


Fig. 3. The system boundary of Phenol interior panel

패널과 페놀 내장패널은 소각되는 것으로 가정하였다. 이 연구에 사용된 방법론, Software, DB를 Table 2에 나타내었다.

Eco-indicator 99 방법론은 ‘환경’을 정의한 후, 이를 크게 다음 세 가지로 구분한다.

- 인간보건
- 생태보건
- 자원

Table 2. Methodology, Software, DB

|             |   |
|-------------|---|
| Methodology | Eco-indicator99(H) V2.03  |
| Software    | SimaPro 7.0, PRe consultant, Netherland   |
| LCI DB      | IDEMAT 2001, Ecoinvent system processes, LCA Food DK, Franklin USA 98, Industry data DB |

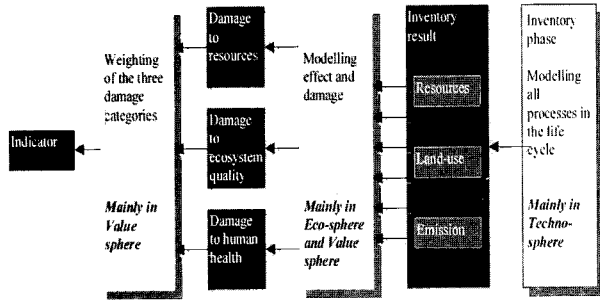


Fig. 4. The main concept of Eco-indicator 99 method

따라서 전과정목록(LCI) DB의 각 환경성 파라미터들이 위 세가지 영역에 미치는 영향을 과학적으로 해석하고, 2차로 각 환경성 파라미터들의 영향의 상대적 중요성을 사회과학적 방법으로 재해석하여 환경영향평가 지수를 도출한다(Fig. 4 참조)[6].

### 3.2 전과정평가 결과

Fig. 5는 전과정평가 수행 결과: 가중치 부여 후 단일 지수로 나타낸 것을 도식화 한 것이다. Table 3은 각 내장패널의 전과정에 따른 환경영향을 표로 정리 한 것이다. Fig. 5와 Table 3에 따르면, 각 내장패널의 주요 환경성 이슈는 사용단계에서의 전력소비이다.

첫째로, Table 3에 따르면 내장패널의 무게가 무겁다고 할 지라도 전과정에서의 환경영향이 반드시 크다고 할 수 없음을 알 수 있다. FRP 내장패널은 페놀 내장패널 보다 약 2.8배나 무겁지만, 전과정에서 갖는 환경영향은 거의 차이가 없음을 알 수 있다. Fig. 5는 이를 잘 보여준다.

둘째로, Table 3에서 보는 것과 마찬가지로 주요 환경성 이슈는 분명 전동차 내장패널의 사용단계에서의 전력소모이다. 하지만 내장 패널 간 사용단계 전력소모에 의한 환경영향은 거의 차이가 나지 않는다. 그 이유로는 전력과 환경영향간의 비례가 성립은 하지만 민감도가 매우 작아서 전력의 변화에 환경영향이 둔감하게 반응하기 때문이다.

셋째로, Table 3에서 보듯이 알루미늄 내장패널의 환경영

Table 3. Comparative LCA results of EMU interior panels

|           | 중량        | 전체 환경영향   | 생산단계 환경영향 | 사용단계 환경영향 | 폐기단계 환경영향 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 알루미늄 내장패널 | 1119.87kg | 5.16E03pt | 1830pt    | 3.74E03pt | -416pt    |
| FRP 내장패널  | 888.56kg  | 4.06E03pt | 342pt     | 3.70E03pt | 21.4pt    |
| 페놀 내장패널   | 315kg     | 4.04E03pt | 454pt     | 3.59E03pt | 5.21pt    |

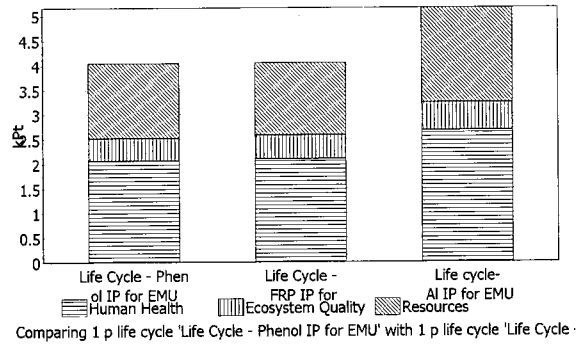


Fig. 5. Comparison among weighted LCA results

향이 재활용을 통하여 저감되었다. 단, 다른 두 내장패널에 비해 전체 환경영향은 여전히 큼을 알 수 있다.

## 4. 토의

### 4.1 토의

전동차 전과정에서의 환경영향저감의 방안으로 경량화가 제안되고 있고, 그 추세에 따라, 구체의 경우를 예로 들자면, Mild강 구체, SUS 구체, 알루미늄 구체, 복합소재 구체 순으로 경량화가 모색되고 있다. 그러나 중량과 환경영향과의 관계가 Table 3에 나타난 것처럼 매우 약한 비례관계를 가진다면 경량화를 위해 투자되는 비용, 경량 소재의 다른 전과정 단계에서 발생하는 환경영향은 경량화로 인한 차량의 환경영향 저감효과를 퇴색시킬 수 있다.

전동차 부품의 환경영향을 개선하고자 할 때에 전과정 이슈를 규명하는 것은 매우 중요하다. 특히 경쟁제품과의 환경성 측면에서 경쟁할 경우, 경쟁력 제고를 위해 효율적인 환경성 측면 제고 방법을 고찰할 필요가 있다. 이 연구에서는 Table 3에 나타난 것처럼, 알루미늄 내장패널의 경우 생산단계, FRP 내장패널의 경우 사용단계, 페놀 내장패널의 경우는 생산단계에서의 환경영향이 경쟁제품에 비해 좋지 않으므로 해당 단계에 대한 환경영향 개선을 경주하여야 한다.

폐기단계에서 재활용은 소각에 비해서 상당한 환경영향 저

감효과를 얻게 한다. 이 연구에서는 알루미늄 내장패널 재활용에 의한 환경영향 저감효과가 FRP 내장패널의 생산단계에서 발생하는 환경영향 보다 큼을 알 수 있다(Table 3 참조). 다만 알루미늄의 생산단계에서 발생하는 환경영향이 워낙 크므로 전체적인 환경성 경쟁력에는 영향을 주지 못했지만 환경영향을 효과적으로 개선시켰음을 알 수 있다

환경영향 분석과 더불어 비용에 대한 분석이 동시에 고려될 필요가 있다. 재활용이나, 경량화, 물질대체 또는 생산단계 전력소비 저감으로 인해 얻어지는 환경영향 저감의 이익이 경제적으로 타당성이 있는지는 반드시 검토 되어야 한다.

내장패널의 실제 수명은 이 연구에서 가정한 수명보다 짧다. 수명이 짧아 질 경우 사용단계의 환경영향 비중은 더 줄어들게 되고 생산단계와 폐기단계의 환경영향 비중이 더 늘어나게 될 수 있다.

#### 4.2 활용방안

이 연구결과는 다음과 같은 시사점을 제공한다.

첫째, 설계자에게, 전동차 내장패널을 선택 시, 환경영향을 고려할 수 있는 정량적이고 객관적인 기준을 제공한다. 즉 Fig. 5와 같이 환경성 비교결과를 정량적으로 제시할 수 있다. 이를 더 유용하게 하기 위해서는 경제성과 연결하는 방안을 검토해야 한다. 설계대안 선정은 기능성, 경제성, 사회성, 환경성 측면 등의 여러 가지 가치들에 대한 가치판단 과정이기 때문이다.

둘째, 제조자가, 전동차 내장패널의 생산 시, 환경영향을 저감시키기 위해서 고려해야 할 점을 제공한다. 제조자의 입장에서 Fig. 5와 Table 3을 통해 경쟁제품과의 환경성 비교 우열을 파악할 수 있다[7].

#### 4.3 후속연구

첫째, 중량과 환경영향 사이의 상관관계 모델링

중량과 환경영향 사이의 상관관계를 모델링 하면, 초기 설계 단계에서 전과정에 걸친 환경영향을 보다 정확하게 예측할

수 있다. 특히 경량화가 환경영향 저감의 주요 방법으로 제안되고 있는 지금 경량화의 가이드라인으로서 사용할 수 있다.

둘째, 한국 전동차 LCI 데이터베이스 구축

이 연구는 국내 DB의 부재로 인하여 국외 DB를 이용하여 수행되었다. 국외 DB는 한국적 상황(예를 들어 전력생산 환경, 소각 및 재활용 환경 등)을 정확히 반영하지 못하고 있다. 따라서 그 결과의 신뢰성에 영향을 미치며, 이에 대한 실증연구가 요구된다. ‘한국철도기술연구원’에서 진행되고 있는 LCI 데이터베이스 구축 과제를 통해서 전동차 LCI 데이터베이스가 구축되고 있지만 양적으로 질적으로 지속적인 보강연구가 필요한 실정이다.

### 5. 감사의 글

이 연구는 건설교통부 국가교통핵심기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. UIC (2006), "CODE 345: Environmental specification for new rolling stock".
2. Siemens (2006), "Metro Oslo; Environmental Product Declaration according to ISO 14021".
3. Ferrer, M.G. et al. (2005), "Composite car bodies for the Korean Tilting Train Express Project Final report", HFG.
4. 김용기 외 (2006), "전동차 내장패널에 대한 전과정평가 연구", 한국철도학회 논문집, 제9권 5호, pp.517-523.
5. 이건모 외 (2006), "전동차 환경성 목록(LCI) DB 구축 및 에코효율성 방법론 개발 최종보고서", pp.94-133.
6. M. Goedkoop and R. Spriensma (2001), "The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology Report (3re ed.)", PRe Consultants.
7. Wimmer, W et al (2004), "Ecodesign Implementation: A Systematic Guidance on Integrating Environmental Considerations into Product Development", pp.19-62.

(2007년 7월 19일 논문접수, 2007년 9월 6일 심사완료)