

전과정평가(LCA)를 이용한 EPS (Electric Power Steering)에 대한 환경영향 평가 연구

정진원 · 안희철*
HL만도

In-Depth Study for Environmental Impact Assessment of EPS (Electric Power Steering) using Life Cycle Assessment (LCA)

Jin Won Chung · Hee Chul An*
HL Mando

ABSTRACT: This study was quantified using LCA about EPS limited system boundary from raw material extraction until it leaves the factory and assessed six environmental impact categories; Abiotic depletion; Acidification; Eutrophication; Global warming; Ozone layer depletion; and Photochemical oxidants creation. The contributions of raw material extraction to the six environmental impact categories were determined to be as follows: Abiotic depletion 85.2%, Acidification 93.8%, Eutrophication 89.7%, Global warming 86.3%, Ozone layer depletion 99.5%, and Photochemical oxidants creation 93.1%. Sensitivity analysis was performed for data and assumptions to confirm the results reliability of this study. The results of this study confirmed that raw material extraction stage and aluminum material part is the most important environmental impact factors in EPS.

Key words: Life Cycle Assessment(LCA), Environmental Product Declaration(EPD), Automotive System, EPS(Electric Power Steering)

요약문: 본 연구에서는 원료 채굴 단계부터 제품의 사용 전 단계까지 시스템 경계를 설정한 전동식 조향 장치에 대하여 전과정평가 기법을 적용하여 환경영향을 정량화하였다. 환경성적표지제도에서 고려하는 자원고갈, 산성화, 부영양화, 지구온난화, 오존층고갈, 광화학 산화물생성에 대한 환경영향을 평가하였다. 6개 환경영향 범주에서 원료 채굴 단계가 차지하는 기여도는 자원고갈이 85.2%, 산성화 93.8%, 부영양화 89.7%, 지구온난화 86.3%, 오존층고갈 99.5%, 광화학 산화물은 93.1%로 확인되었다. 연구 결과의 신뢰도를 확인하기 위해 주요 데이터 및 가정에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 이 연구 결과를 통해 전동식 조향 장치에서 환경영향이 가장 큰 인자가 원료 채굴 단계이고, 알루미늄 재질의 부품인 것을 확인하였다.

주제어: 전과정평가, 환경성적표지, 자동차 부품, 전동식 조향 장치

1. 서론

탄소중립 달성을 위한 전 지구적 환경문제에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 지구온난화의 국제적인 영향이 증가함에 따라 기후변화에서 기후위기의 시대로 접어들었다. 2016년 파리기후변화협약에서 전 세계의 온도 상승을 2도보다 낮은 수준에서 유지하고, 더 나아가 1.5도 상승까지 억제하도록 전 세계적인 대응을 강화하고 있다. 탄소중립이 글로벌 패러다임으로 대두됨에 따라 우리나라에서도 「2050 탄소중립 추진전략」을 발표하였다. 탄소중립 추진전략에서도 수송부문에서의 탄소 배출량 감축을 위하여 미래 모빌리티로의 전환을 10대 과제 중 하나로 선정하였다.¹⁾ 하지만 자동차 부품 분야에서 배터리²⁾를 제외한 부품에 대해서 온실가스 배출과 같은 환경영향을 산정하고 개선하는 연구는 미비하다. 이 연구는 전과정평가

(LCA) 방법론을 기반으로 전동식 조향 장치의 잠재적 환경영향을 평가하는 것을 목적으로 설정하였다. 구체적으로는 첫째, 원료 채굴 단계부터 제품의 사용 전 단계까지 발생하는 잠재적인 환경영향을 정량적으로 평가하였고, 둘째로는 환경부의 환경성적표지에서 제시한 6대 환경영향 범주에 대한 주요이슈를 분석하였다. 마지막으로 민감도 분석을 통해 연구결과의 신뢰도를 확인하였다.³⁾

2. 전과정평가 수행

이 연구는 국제 표준화 기구인 ISO(International Organization for Standardization) 14040과 14044의 표준에 근거한 전과정평가 방법론을 적용하였고, 스피라(sphera)에서 출시한 LCA 전용 소프트웨어인 GaBi를 활용하여 전과정평가를 수행하였다.⁴⁾

2.1 목적 및 범위정의

연구 대상은 자동차 부품 중 운전자의 조타력을 감지하여 조향에 필요한 출력을 발생시키는 전동식 조향 장치이고, 해당제품 1대를 기준흐름으로 정의하였다. 전과정평가를 위한 시스템 경계는 원료 채굴 단계부터 제품의 사용 전 단계인 Cradle-to-Gate로 정의하였다. Fig. 1에 전과정 단계별 시스템 경계 범위를 도식화하였고, Table 1에 해당 사항을 설명하였다.

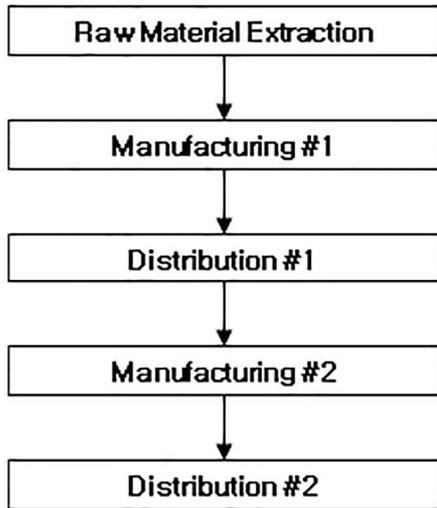


Fig. 1. Process flow diagram of the EPS

Table 1. System boundaries of the EPS

Stage	System boundaries
Raw Material Extraction	Raw material acquisition and production
Manufacturing #1	Assembly process for each part
Distribution #1	Transport from each part maker to the EPS maker
Manufacturing #2	Assembly process for the EPS
Distribution #2	Transport from the EPS maker to the vehicle maker

2.2 전과정 목록분석

전동식 조향장치의 부품목록(Bill of Material), 개별 부품과 최종 제품인 전동식 조향장치의 운송거리 정보, 개별 부품과 최종 제품인 전동식 조향장치의 제조공정에 대한 생산데이터를 수집하였다. 데이터 수집은 기본적으로 현장 데이터 수집을 원칙으로 하였지만 이것이 불가능한 경우 원료물질, 보조물질, 에너지, 배출물, 폐기물 등 투입물과 산출물에 대한 환경영향을 산출하기 위해 LCI 데이터베이스를 활용하였다. 요구되는 LCI 데이터베이스가 부재한 경우 유사 물질 및 공정에 대한 LCI 데이터베이스로 대체하였다. Table 2에는 전과정 단계별로 사용한 대표적인 LCI 데이터베이스를 나타내었다.

Table 2. LCI database lists

Stage	Items	LCI DB	Source
Raw Material Extraction	냉연강판	Steel cold rolled coil	Sphera
	열연강판	Steel hot rolled coil	Sphera
	스테인리스	Stainless steel cold rolled coil	Sphera
	특수강	Steel plate	Sphera
	알루미늄 주조재	Aluminum ingot mix	Sphera
	플라스틱	Polyamide 6.6 granulate	Sphera
	플라스틱	Polybutylene terephthalate granulate	Sphera
	플라스틱	PP/EPDM elastomer	Sphera
	고무	NBR, 33% acrylonitrile	Sphera
	오일	Lubricants at refinery	Sphera
Manufacturing #1	접착제	TPU, TPE-U adhesive	Sphera
	전자재료	Epoxy resin mix Printed wiring	Sphera
	전자재료	board 2-layer	Sphera
	스틸 스탬핑	Steel sheet stamping	Sphera
	스틸 딥드로잉	Steel sheet deep drawing	Sphera
	스틸단조	Steel forging part	Sphera
	스틸 머시닝	Steel high alloyed machining	Sphera
	알루미늄 다이캐스팅	Aluminum die-cast	Sphera
	알루미늄 머시닝	Aluminum cast machining	Sphera
	플라스틱 사출	Plastic injection moulding	Sphera
Distribution #1	플라스틱 압출	Plastic extrusion	Sphera
	한국육상 이동	Truck, Euro 4, JP	Sphera
	유럽육상 이동	Truck, Euro4, EU-28	Sphera
Manufacturing #2	유럽해상 이동	Container ship, EU-28	Sphera
	한국공장 전기	Electricity grid mix Thermal energy from natural gas	Sphera
	한국공장 LNG	Process water from ground water Hazardous waste Used oil	Sphera
	한국공장 용수	Municipal waste water treatment	Sphera
	폐기물처리		Sphera
	폐유처리		Sphera
	폐수처리		Sphera
	Distribution #2	한국육상 이동	Truck, Euro 4, JP

2.2.1 원재료 채굴 단계(Raw material extraction stage)

전동식 조향장치의 BOM(Bill of Material)을 기준으로 투입되는 부품의 재질 및 중량을 IMDS(International Material Data System)를 활용하여 수집하였고, 누락되는 부품 없이 누적질량비율 100%를 분석에 포함하였다.⁵⁾

2.2.2 제조 단계 #1(Manufacturing #1)

제조 단계 #1은 전동식 조향장치의 부품을 제조하는 과정을 포함하고 있다. 각 부품의 제조 공정을 확인한 후, 연계 가능한 LCI 데이터베이스를 조사하였다.

2.2.3 수송 단계 #1(Distribution #1)

수송 단계 #1은 각 부품이 전동식 조향장치를 제조하는 제조 공장까지 도달하는 거리 정보를 수집하였고, 거리 정보는 최단 거리를 기준으로 조사하였다. 국내 수송의 경우 한국육상이동과 연계된 데이터베이스를 활용하였고, 국외 수송의 경우 해당 대륙과 연계된 육상이동과 해상이동의 데이터베이스를 활용하였다.

2.2.4 제조 단계 #2(Manufacturing #2)

제조 단계 #2는 전동식 조향장치를 조립하는 과정을 포함하고 있다. 투입물로는 개별 부품 제조사로부터 납품된 부품, 전기에너지, 조립 공정에서 사용되는 원료 및 보조 물질, 설비 운용에 사용되는 용수 및 압축공기가 있고, 대기 및 수계 배출물과 폐기물이 발생하는 것을 확인하였다. 본 공정과 관련된 투입물과 산출물의 현장데이터를 수집하였고, 전동식 조향장치 1대 기준으로 데이터 수집이 어려운 항목의 경우 해당 기간 전체 생산 댓수를 기준으로 할당하였다.

2.2.5 수송 단계 #2(Distribution #2)

수송 단계 #2는 전동식 조향장치를 제조하는 제조 공장

에서 자동차를 생산하는 공장까지 도달하는 거리 정보를 수집하였고, 거리 정보는 최단 거리를 기준으로 조사하였다. 본 수송 단계는 국내 수송이라 한국육상이동과 연계된 데이터베이스를 활용하였다.

3. 전과정 영향평가 및 전과정 해석

본 연구에서는 전동식 조향장치의 전과정 영향평가를 도출하기 위하여 ISO 14040과 14044에 의거하여 분류화 및 특성화를 수행하였다. 환경부 환경성적표지에서 고려하는 6가지 환경영향 범주인 자원고갈, 산성화, 부영양화, 지구온난화, 오존층고갈, 광화학 산화물생성에 대해 환경영향을 평가하였고, 각 영향 범주별 사용된 특성화 인자는 전과정평가 연구에 범용적으로 사용되는 CML방법론의 특성화 인자를 이용하였고, Table 3과 같이 나타내었다.

전동식 조향 장치 1개의 환경영향 범주별 특성화 결과는 Table 4에 나타난 바와 같이 자원고갈이 1.55E+03 kg Sb-eq., 산성화가 6.16E-01 kg SO₂-eq., 부영양화가 5.86E-02

Table 3. Characterization model of environmental impact category

Impact category	Unit	Source
Abiotic resource depletion potential (ADP)	kg Sb-eq.	CML 2001 - Aug 2016
Acidification potential (AP)	kg SO ₂ -eq.	CML 2001 - Aug 2016
Eutrophication potential (EP)	kg PO ₄ ³⁻ -eq.	CML 2001 - Aug 2016
Global warming potential (GWP)	kg CO ₂ -eq.	CML 2001 - Aug 2016
Ozone depletion potential (ODP)	kg CFC11-eq.	CML 2001 - Aug 2016
Photochemical oxidation creation potential (POCP)	kg C ₂ H ₄ -eq.	CML 2001 - Aug 2016

Table 4. Characterization results for the entire life cycle of the EPS

Impact category	Characterization factor	Raw material extraction	Manufacturing #1	Distribution #1	Manufacturing #2	Distribution #2	Total
ADP	kg Sb-eq.	1.32E+03 85.2%	1.53E+02 9.9%	1.43E+01 0.9%	5.71E+01 3.7%	4.89E+00 0.3%	1.55E+03 100.0%
AP	kg SO ₂ -eq.	5.78E-01 93.8%	1.36E-02 2.2%	1.85E-02 3.0%	5.07E-03 0.8%	1.36E-03 0.2%	6.16E-01 100.0%
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq.	5.26E-02 89.7%	2.45E-03 4.2%	2.35E-03 4.0%	9.00E-04 1.5%	3.39E-04 0.6%	5.86E-02 100.0%
GWP	kg CO ₂ -eq.	1.22E+02 86.3%	1.33E+01 9.4%	1.05E+00 0.7%	4.76E+00 3.4%	3.41E-01 0.2%	1.42E+02 100.0%
ODP	kg CFC11-eq.	4.94E-08 99.5%	1.33E-10 0.3%	1.45E-13 0.0003%	1.05E-10 0.2%	8.33E-14 0.0002%	4.96E-08 100.0%
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq.	5.31E-02 93.1%	1.25E-03 2.2%	1.68E-03 3.0%	4.61E-04 0.8%	5.32E-04 0.9%	5.70E-02 100.0%

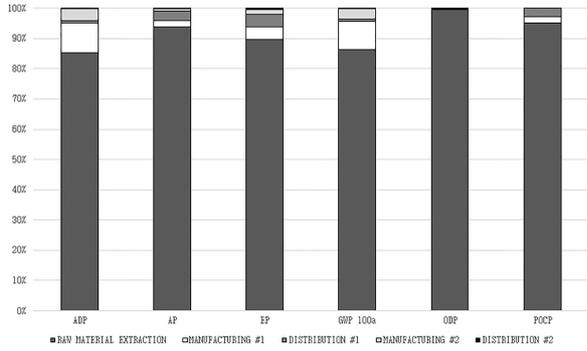


Fig. 2. Characterized environmental impact of the five life cycle stages

kg PO₄³-eq., 지구온난화가 1.42E+02 kg CO₂-eq., 오존층 고갈이 4.96E-08 kg CFC11-eq., 광화학 산화물이 5.70E-02 kg C₂H₄-eq.이었다. 각 영향 범주별로 5가지 단계에서 해당 영향범주가 미치는 기여도를 파악하여 Fig. 2에 나타내었고, 영향 범주별로 기여도를 분석한 결과 5가지 단계 중 원재료 채굴 단계가 모든 환경영향 범주에서 가장 주요한 환경영향을 차지하는 것으로 나타났다.

이는 전동식 조향장치를 구성하는 주요 원료물질인 스틸, 알루미늄, 플라스틱을 제조하는 과정에서 환경에 영향을 미치는 물질이 다량 배출되는 것을 알 수 있고, 수송의 경우 대부분의 부품이 국내 육상 수송 위주로 구성되어 있어 가장 적은 환경영향을 차지하는 것으로 나타났다.

자원고갈은 원재료 채굴 단계가 85.2%, 제조 단계 #1이 9.9%, 수송 단계 #1이 0.9%, 제조 단계 #2가 3.7%, 수송 단계 #2가 0.3%를 차지하였고, 산성화는 원재료 채굴 단계가 93.8%, 제조 단계 #1이 2.2%, 수송 단계 #1이 3.0%, 제조 단계 #2가 0.8%, 수송 단계 #2가 0.2%를 차지하였다. 또한, 부영양화는 원재료 채굴 단계가 89.7%, 제조 단계 #1이 4.2%, 수송 단계 #1이 4.0%, 제조 단계 #2가 1.5%, 수송 단계 #2가 0.3%를 차지하였고, 지구온난화는 원재료 채굴 단계가 86.3%, 제조 단계 #1이 9.4%, 수송 단계 #1이 0.7%, 제조 단계 #2가 3.4%, 수송 단계 #2가 0.2%를 차지하였다. 마지막으로 오존층고갈은 원재료 채굴 단계가 99.5%, 제조 단계 #1이 0.3%, 제조 단계 #2가 0.2%를 차지하였고, 광화학 산화물은 원재료 채굴 단계가 93.1%, 제조 단계 #1이 2.2%, 수송 단계 #1이 3.0%, 제조 단계 #2가 0.8%, 수송 단계 #2가 0.9%를 차지하였다.

전동식 조향장치의 경우 BOM 기준 100여개가 넘는 부품으로 구성되어 있다. 전동식 조향장치를 구성하고 있는 부품 중 오존층고갈을 제외한 환경영향이 가장 큰 부품을 분석하였고, Fig. 3과 같이 알루미늄 재질의 하우스링으로 확인되었다. 하우스링의 환경영향이 가장 큰 이유로 중량에 의한 영향도 있지만 알루미늄 원재료의 제조 공정은 보크 사이트 채굴, 정련 및 제련 과정으로 분류할 수 있다. 이 중 제련(Smelting) 공정에서 다량의 전기에너지가 필요하고, 전기 분해 반응에 의해 환경에 영향을 미치는 물질이 다량

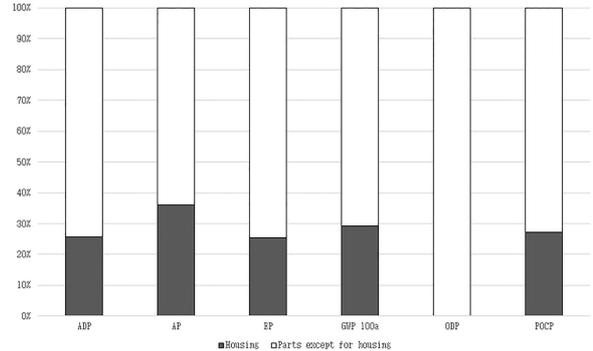


Fig. 3. Characterized environmental impact of Housing

발생하기 때문에 전동식 조향장치의 주요물질인 스틸이나 플라스틱에 비해 환경에 영향을 미치는 물질을 많이 배출하게 된다.

다음으로 이 연구를 위해 수집된 현장데이터 및 적용된 가정에 대한 불확실성을 평가하고 연구결과의 신뢰도를 확인하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 사용된 데이터를 일정 범위인 10% 만큼 변화시켰을 때 각 영향범주 별 특성화 결과값의 변화율을 확인하고 결과값의 변화량이 큰 데이터나 가정사항에 대해서는 데이터를 재수집하여 신뢰성을 높이기 위한 것이다. 이 연구에서는 특성화 결과값의 변화율이 10% 이상 차이 나는 경우 민감한 데이터로 판단하였다.

민감도 분석 대상은 수집한 데이터를 기반으로 Table 5와 같이 제조 단계 #1에서는 전력, 폐수 및 폐기물 데이터를 선정하였고, 제조 단계 #2에서는 전동식 조향 장치의 중량, 전력, 지하수, 폐수 및 폐기물 데이터를 선정 하였다. 수송 단계 #1과 #2의 경우 수송거리를 민감도 분석 대상에 포함시켰다.

이를 대상으로 10%의 입력 데이터 변화에 대한 영향 범주별 특성화값의 변화율을 계산 하여 Table 6에 나타내었다. 민감도 분석 결과 데이터 변화량은 자원고갈에 0.6%, 산성화에 0.2%, 부영양화에 0.4%, 지구온난화에 0.6%, 오존층고갈에 0.002%, 광화학 산화물에 0.2% 변화를 유발

Table 5. Input data changed in sensitivity analysis

Stage	Items	Change in data
Manufacturing #1	Electricity (kwh)	10%
	Waste water (L)	10%
	Hazardous waste (kg)	10%
Distribution #1	Logistic distance (km)	10%
Manufacturing #2	Raw material (kg)	10%
	Electricity (kwh)	10%
	Ground water (L)	10%
	Compressed air (m ³ /day)	10%
	Waste water (L)	10%
Distribution #2	Hazardous waste (kg)	10%
	Logistic distance (km)	10%

Table 6. Sensitivity analysis results

Input data	Change in result					
	ADP	AP	EP	GWP	ODP	POCP
Initial	-	-	-	-	-	-
Alt.	0.6%	0.2%	0.4%	0.6%	0.002%	0.2%

하였다. 영향 범주별 환경영향값의 변화량은 10% 미만으로 본 연구에서 수집된 데이터 및 가정의 불확실성이 연구 결과에 미치는 영향은 크지 않으므로 연구 결과의 신뢰성이 있다고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전동식 조향장치에 대한 전과정 평가를 수행하였으며, 수행 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 전동식 조향장치 1대에 대한 원료 채굴 단계부터 제품의 사용 전 단계까지 환경영향 범주별 특성화 결과를 도출하였고, 자원고갈이 1.55E+03 kg Sb-eq., 산성화가 6.16E-01 kg SO₂-eq., 부영양화가 5.86E-02 kg PO₄³-eq., 지구온난화가 1.42E+02 kg CO₂-eq., 오존층고갈이 4.96E-08 kg CFC11-eq., 광화학 산화물이 5.70E-02 kg C₂H₄-eq.로 확인되었다.

2) 본문에 정의되어 있는 5가지 단계에서 각 영향 범주별 기여도를 분석한 결과 원료 채굴 단계가 차지하는 기여도는 자위고갈이 85.2%, 산성화 93.8%, 부영양화 89.7%, 지구온난화 86.3%, 오존층고갈 99.5%, 광화학 산화물은 93.1%로 원료 채굴 단계가 가장 주요한 환경영향을 차지

하는 것으로 확인되었다.

3) 연구결과와 신뢰도를 확인하기 위해 민감도 분석을 실시하여 영향 범주별 환경영향값의 변화량이 10% 미만인 것으로 확인되었고, 연구결과에 미치는 영향이 크지 않으므로 연구 결과의 신뢰성이 있다고 판단하였다.

이 연구결과를 토대로 전동식 조향장치는 원료 채굴 단계에서 가장 큰 환경성 개선 노력이 필요한 것을 확인하였다. 전동식 조향장치의 환경성 개선을 위해서는 환경영향이 큰 알루미늄 재질을 환경영향이 상대적으로 적은 재질로 변경하거나 스크랩 재활용, 재생에너지에 대한 도입, 신 합금 개발과 같은 친환경 기술 개발 도입이 필요한 것으로 확인되었다. 확인된 설계 인자가 향후 전동식 조향장치의 친환경성 개선에 활용될 수 있기를 기대한다.

REFERENCES

- 1) 2050 탄소중립 추진전략. 관계부처 합동, (2020.12.7).
- 2) Evangelos Kallitsis, Anna Korre, Geoff H. Kelsall, Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs, JCP Vol.371, 133636.
- 3) KATS, KS I ISO 14044, 환경경영 - 전과정평가 - 요구사항 및 지침, (2019.8.8).
- 4) Xian Xu, Jianzhou You, Yafeng Wang, Yaozhi Luo, Analysis and assessment of life-cycle carbon emissions of space, JCP Vol.385, 135521.
- 5) Felipe Bitencourt de Oliveira, Anders Nordelof, Bjorn A. Sanden, Anna Widerberg, Anne-Marie Tillman, Exploring automotive supplier data in life cycle assessment - Precision versus workload, Transportation Research Part D Vol.105, 103247.