

연료전지 자동차의 전과정평가

황예원¹ · 김동현¹ · 허 탁²

¹건국대학교 융합신소재공학과

²건국대학교 화학공학부

A Study on the Life Cycle Assessment of Fuel Cell Vehicles

Yewon Hwang¹ · Donghyeon Kim¹ · Tak Hur²

¹Dept. of Material Chemical Engineering, Konkuk University

²Dept. of Chemical Engineering, Konkuk University

ABSTRACT: The development of green mobility and clean energy are the key point for carbon neutrality. Currently, as an alternative of fossil fuel, hydrogen is being produced from various technologies and fuel cell vehicle production is on the rise according to the policies such as hydrogen economy. The LCA is a technique for evaluating the environmental aspects and potential impacts on the life cycle of the product system. The life cycle of the fuel cell vehicle included the following stages: raw material acquisition, pre-manufacturing, manufacturing, WTW(Well-to-Wheel), maintenance, and EoL(End-of-Life). In the WTW stage, the environmental impacts of natural gas steam reforming hydrogen, COG(Coke Oven Gas) steam reforming hydrogen, petroleum refinery hydrogen, PEM(Proton Exchange Membrane) water electrolysis hydrogen, and SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell) water electrolysis hydrogen were compared. As a result, the GWP values were identified in order of petroleum refinery hydrogen(3.67E+02 g CO₂ eq./km), COG(Coke Oven Gas) steam reforming hydrogen(2.39E+02 g CO₂ eq./km), natural gas steam reforming hydrogen(1.75E+02 g CO₂ eq./km), SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell) water electrolysis hydrogen(8.34E+01 g CO₂ eq./km), and PEM(Proton Exchange Membrane) water electrolysis hydrogen(8.31E+01 g CO₂ eq./km). To improve the environmental performance of the vehicle with natural gas steam reforming hydrogen, the recycling scenario of CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) was considered, and the recycling can reduce up to 1.6% of GWP impact.

Key words: LCA(Life Cycle Assessment), FCV(Fuel Cell Vehicle), Hydrogen production, Improvement of Environmental Performances, Recycling

요약문: 그린모빌리티와 청정에너지 기술개발은 탄소중립을 위한 중요한 과제이다. 현재 화석연료를 대체할 차세대 청정에너지원으로 중 하나인 수소의 공급량을 증가시키기 위해 정책에 따라 다양한 수소생산 기술개발 및 연료전지 자동차 보급을 확대하고 있다. 본 연구에서는 수소 제법별 연료전지 자동차의 환경영향을 파악하기 위해 전과정평가(LCA)를 수행하였다. 본 연구에서는 연료전지 자동차의 전과정단계를 원료채취, 제조 전, 조립, 운행(WTW), 유지보수, 폐기 및 재활용(EoL) 단계로 설정하였다. 전세계적으로 널리 사용되고 있는 천연가스 개질수소를 기본 시나리오로 연료전지 자동차의 전과정 환경영향을 확인하였다. 그리고 천연가스 개질수소, COG(Coke Oven Gas) 부생수소, 석유정제 부생수소, PEM(Proton Exchange Membrane) 수전해수소, SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell) 수전해수소에 대한 환경영향을 비교하였다. 그 결과 석유정제 부생수소 3.67E+02 g CO₂ eq./km, COG 부생수소(2.39E+02 g CO₂ eq./km), 천연가스 개질수소(1.75E+02 g CO₂ eq./km), SOEC 수전해수소(8.34E+01 g CO₂ eq./km), PEM 수전해수소(8.31E+01 g CO₂ eq./km)에 대한 GWP 수치가 나타났다. 추가적으로 GWP 기여도가 높은 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)의 재활용을 실시하여 천연가스 개질수소 기준 1.6%의 재활용 효과가 확인되었다.

주제어: 전과정평가, 연료전지 자동차, 수소 제법, 환경성 개선 방안, 재활용

1. 서론

1.1 연구배경

파리협정을 통해 탄소중립은 전세계에서 선언되었고, 각 산업분야에서 이를 실현하기 위한 전략들이 수립되고 있다. 우리나라는 한국판 뉴딜(New Deal)¹⁾을 수립하였으며, 그 중 기후위기에 선제적으로 대응하여 인간과 자연이 공존하는 미래사회를 구현하기 위해 탄소중립을 추진 기

반으로 하는 그린뉴딜이 존재한다. 그린뉴딜은 탄소 의존형 경제를 친환경 신재생에너지 확산 기반 구축, 그린모빌리티, 공공시설 제로 에너지화, 저탄소 및 녹색산업 조성 등을 주요 과제로 선정하였다. 그 중 정부는 온실가스과 미세먼지 배출을 감축하기 위해 그린모빌리티 보급을 확대하고 있다. 그린모빌리티는 전기 자동차, 수소 자동차로 구분되며, 내연기관 자동차와 비교하여 자동차를 운행함에 있어 배출이 “0”으로 나타난다. 그 중 수소 자동차로 정

의된 연료전지 자동차는 대기 중 미세먼지를 제거하고, 전기 자동차 대비 충전이 빠르며, 주행거리가 길다는 장점이 있다. 하지만 전과정 환경영향에서 부품의 생산뿐만 아니라 수소 제법에 크게 의존한다는 단점이 존재한다. 이를 보완하기 위해 국내외적으로 수소 제법에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 환경성과 경제성을 평가하는 연구²⁾도 이루어지고 있다. 본 연구에서는 그린모빌리티로 분류되는 연료전지 자동차의 환경영향을 정량화하고, 전과정단계의 주요 이슈를 규명하는 것을 목적으로 한다. 이를 평가하기 위한 도구로 전과정평가를 적용하였으며, 결과를 바탕으로 분석된 환경이슈를 개선하기 위한 전략을 제시하고 분석하였다.

1.2 연료전지 자동차

현재까지 연료전지 자동차의 보급은 전기 자동차나 하이브리드 자동차에 비해 미미한 수준이다. 연료전지 자동차의 연료로 사용되는 수소는 배출량이 “0”으로 자동차의 배출에 대한 규제³⁾가 강화되고 있는 현재 시점에서 주목할 수 있는 연료라고 할 수 있다.

연료전지 자동차는 연료인 수소를 주입하면 연료탱크를 거쳐 연료전지에서 공기 중 산소와 반응하여 전기를 생산한다.

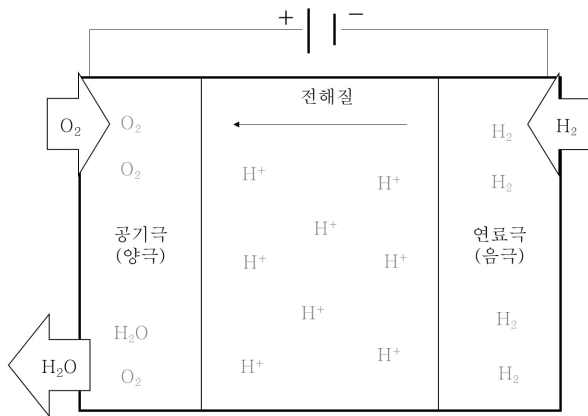
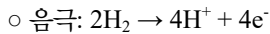


Fig. 1. 연료전지의 전기생산 방법

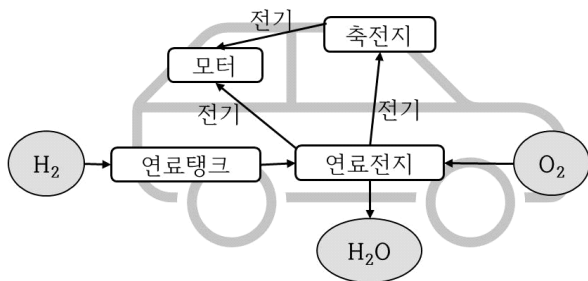


Fig. 2. 연료전지 자동차의 원리

- 양극: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow H_2O$
- 전체반응: $2H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + \text{전기}$

이 반응을 통해 발생하는 물은 배출되고, 전기는 축전지에서 모터로 또는 연료전지에서 모터로 이동한다.

1.3 수소 제법 시나리오 설정

수소사용을 활성화하기 위해서는 수소생산-저장-운송-활용 등 수소 전과정에서 기술개발이 필요하며, 이 중 가장 중요한 것은 사용할 수소 확보를 위한 수소생산이라 할 수 있다. 그렇기에 수소생산 주요국뿐만 아니라 전세계적으로 충분한 수소를 확보하기 위해 수소생산 기술에 노력을 기울이고 있다.

국내의 경우, 2019년 ‘수소경제 활성화 로드맵⁴⁾’을 발표하였으며, 이는 국내에서 생산되는 연료전지 자동차를 강점으로 하여 수소경제를 선도하는 산업생태계를 구축하기 위한 계획을 포함한다. 현재 국내는 연료전지 자동차 등 활용면에서는 경쟁력이 있지만, 수소생산, 저장·운송은 미흡한 상황이다. 또한, 국내에서 현재 생산되는 수소는 개질수소와 부생수소로, 아직 수전해수소에 대한 기술이 부족한 상황이다. 수전해수소에 대한 기술개발을 통해 향후 2040년까지 수전해수소 및 해외생산 수소의 비중을 높은 공급방식을 목표로 하고 있다.

국내뿐만 아니라 국외에서도 수소생산에 대한 활발한 기술개발이 이루어지고 있다. 대표적으로 재생에너지자원이 풍부한 유럽에서는 그린수소 생산을 위해 P2G(Power to Gas) 프로젝트가 진행되고 있다. ‘P2G’란, 신재생에너지를 활용하는 수전해수소 생산 및 CO₂, CH₄ 등을 연료형태로 저장하고 이용하는 기술을 의미한다. 유럽국가 중 독일에서 가장 활발하게 추진되고 있으며, 2030년에는 2020년의 4배 이상의 수소를 생산하는 것을 목표로 하고 있다.

중국은 전세계적으로 가장 많은 수소를 생산하는 국가이며, 생산되는 수소 중 개질수소 생산이 62%를 차지한다. 개질수소를 대체하기 위해 석유화학 시설의 규모 확대에 따른 부생수소 생산 규모 확대 및 수전해수소는 비중을 확대할 예정이다. 또한, 일본에서는 저비용 수소생산을 위해 해외생산 수소 및 자국의 그린수소 생산 병행할 예정이다.

이러한 국내외의 수소생산 상황 및 계획에 따라 본 연구에서 적용할 수소 시나리오는 개질수소, 부생수소, 수전해수소로 설정하였다.

2. LCA 방법론

국제표준인 ISO 14040:2006⁵⁾, 14044⁶⁾에서는 전과정평가란 “제품 시스템 전과정 동안의 투입물과 산출물에 대한 목록을 작성하고, 이와 관련된 잠재적 환경영향을 평가한다”라고 정의하고 있다. 즉, 전과정평가는 원료채취부터 최종 폐기까지의 제품 시스템 전과정에 대한 환경적 측면

과 미래시점에서 발생할 수 있는 잠재적 영향을 평가하는 것이다. 전과정평가를 수행하는 방법은 국제표준이 정한 요구사항에 따라 유연성 있게 적용할 수 있다. 전과정평가 단계는 Fig. 3과 같이 목적 및 범위 정의(Goal and scope definition), 목록분석(Inventory analysis), 영향평가(Impact Assessment), 해석(Interpretation)으로 구성된다. 전과정평가의 각 단계는 다른 단계에서 도출되는 결과를 이용하기 때문에 수행 중 문제가 발견된다면 해당 구성단계로 돌아가 다시 수행하여 연구의 결과에 포괄성과 일관성을 유지해야 한다.

3. 연구수행 및 결과

3.1 목적 및 범위 정의

본 연구에서는 목적은 다음과 같다.

- 수소 제법별 연료전지 자동차에 대한 환경 영향 평가
- 주요이슈를 규명하고, 이슈에 대한 환경적 개선 방안 도출

3.2 범위 정의

3.2.1 대상 시스템

본 연구는 국내 자동차 회사에서 생산하여 판매되고 있는 중형 SUV 연료전지 자동차를 대상으로 하였으며, 연료전지

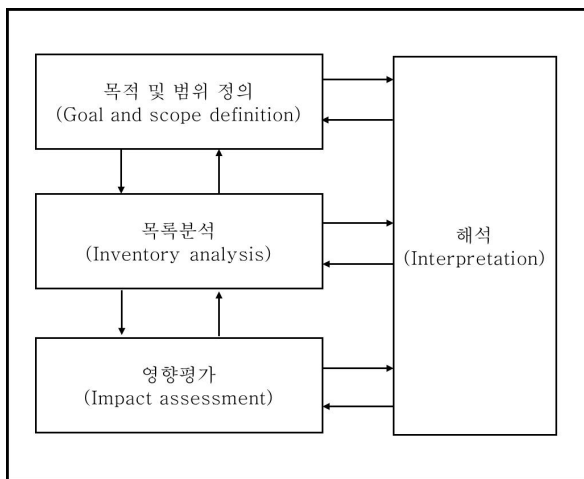


Fig. 3. 전과정평가 단계(ISO 14040, 2006)

Table 1. 기능, 기능단위 및 기준흐름

항목	연료전지 자동차
기능	자동차 운행
기능단위	200,000 km
기준흐름	연료전지 자동차 1대(SUV 중형)

자동차 운행에 사용되는 수소 제법은 천연가스 개질수소, COG (Coke Oven Gas) 부생수소, 석유정제 부생수소, PEM (Proton Exchange Membrane) 수전해수소, SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) 수전해수소 5가지를 선정하였다.

3.2.2 기능, 기능단위 및 기준흐름

연료전지 자동차의 데이터를 수집 및 계산하기 위해 기능을 규명하였고, 이를 정량화하여 기능단위 및 기준흐름으로 설정하였다. 연료전지 자동차의 기능, 기능단위 및 기준흐름은 Table 1과 같다.

3.2.3 시스템 경계

연료전지 자동차의 전과정은 Vehicle chain과 Well-to-Wheel 단계로 구분된다. Vehicle chain은 원료채취, 제조 전, 수송, 조립, 유통, 유지보수, 폐기 및 재활용 단계가 포함되며, Well-to-Wheel은 운행 단계가 포함된다. 본 연구에서는 Fig. 4과 같이 부품의 원료채취부터 제조 전, 조립, 운행, 유지보수, 폐기 및 재활용 단계까지를 시스템 경계로 설정하였다. 수송, 유통 단계는 데이터 부재로 인하여 제외하였다. 전과정단계 중 운행 단계는 수소생산, 수소사용으로 구분되는데, 각 부문별 수소생산에 적용되는 수소 제법은 Table 2와 같다.

Table 2. 부문별 수소 제법

부문	수소 제법
3.4 영향평가	- 천연가스 개질수소
3.5.1 수소제법별 전과정 결과 비교	- 천연가스 개질수소
	- COG 부생수소
	- 석유정제 부생수소
	- PEM 수전해수소
	- SOEC 수전해수소

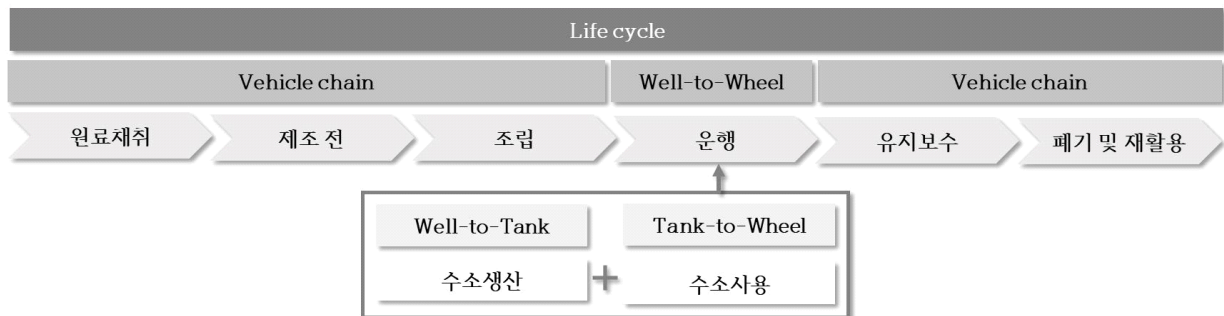


Fig. 4. 시스템 경계

Table 3. 가정 및 제한사항

전과정단계	제한사항
일반	자체 전기 데이터베이스 - 전기 모델링 환경부 LCI 데이터베이스 우선적으로 전기의 상위 흐름 연결
제조 전 단계	- 누적질량기여도 95.0% 이상
조립 단계	- 에너지를 제외한 기타 투입물 제외 - 천연가스 연소 시, 온실가스 배출량만 포함
운영 단계	수소생산 - 수소 유통 및 저장 제외 수소사용 - 냉난방 사용 연비에 포함 - 수소충전에 사용되는 전기 사용 제외
폐기 및 재활용 단계	- 재활용 환경영향 및 크레딧 제외

Table 4. 데이터품질 요건

구분	운영단계	전과정 (운영 단계 제외)	LCI 데이터베이스
시간적 범위	2020년	2020년	2000~2021년
지역적 범위	대한민국	유럽	대한민국, 일본, 독일 등
기술적 범위	개발 및 적용되는 최신 기술		

Table 5. 주요데이터 목록

전과정단계	주요 데이터
일반	운영단계 제외한 모든 전과정단계 GTG 목록수집 - Candelaresi <i>et al.</i> (2021). Comparative life cycle assessment of hydrogen fuelled passenger cars ⁷⁾ LCI 데이터베이스 - Sphera: GaBi LCI 데이터베이스 ⁸⁾ - Ecoinvent LCI 데이터베이스 ⁹⁾ 2020 자체 전기 데이터베이스 - 한국전력공사: 2020년 전력통계월보 ¹⁰⁾ 1월~12월 발전원 비율 통계
조립 단계	천연가스 연소 - 산업통산자원부: 에너지법 시행규칙 ¹¹⁾ - 환경부: 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침 ¹²⁾
운영 단계	수소 제법 - 천연가스 개질수소, COG 부생수소, 석유정제 부생수소 → Argonne: GREET model ¹³⁾ - PEM 수전해수소, SOEC 수전해수소 → NREL: H2Amodel ¹⁴⁾ 수소사용 - 국내 자동차: 회사 카탈로그 ¹⁵⁾
폐기 및 재활용 단계	- 한국환경산업기술원: 폐기물 통계자료 ¹⁶⁾

3.2.4 데이터 품질

본 연구의 데이터 품질 요건은 운영 단계, 운영단계를 제외한 전과정단계, LCI 데이터베이스로 구분된다. 데이터 품질에 대한 내용은 Table 3과 같다.

3.2.5 가정 및 제한사항

본 연구의 가정 및 제한사항은 전과정단계 공통적으로 적용되는 일반, 제조 전 단계, 조립 단계, 운영 단계, 폐기 및 재활용 단계로 구분된다. 가정 및 제한사항의 내용은 Table 3과 같다.

3.3 목록분석

연료전지 자동차의 공통적으로 적용되는 일반, 제조 전 단계, 조립 단계, 운영 단계, 유지보수 단계, 폐기 및 재활용 단계에 대해 수집한 주요데이터 목록은 Table 4와 같다.

3.4 영향평가

전과정 목록분석에서 수집 및 계산된 데이터를 기반으로 Sphera에서 개발한 전과정평가 전용 소프트웨어 ‘GaBis(ver. 10.0.1.92)’를 통해 연료전지 자동차에 대한 영향 평가를 진행하였다. 영향범주는 Leiden University 환경과

학연구소에서 개발한 ‘CML 2001(jan.2016)¹⁷⁾을 사용하였다. 연료전지 자동차의 전과정 결과는 천연가스 개질수소를 연료전지 자동차의 운행 단계에 적용하여 결과를 도출하였다. 결과에서 사용된 단위는 EU 자동차 온실가스 배출규제에서 사용한 g/km 단위를 적용하기 위해 1km당 배출되는 환경영향에 대해 계산하였다. 결과는 Fig. 5와 같다.

그 결과 GWP 영향범주에서 1.75E+02 g CO₂ eq./km의 환경영향이 발생하는 것으로 나타났다. 전과정단계별 GWP 기여도는 운행 단계가 71.5%로 가장 높은 기여도를 차지하는 것을 확인되었다. 또한, ADP (99.1%), EP (69.2%), POCP (55.7%) 영향범주에서도 운행 단계의 기여도가 높게 차지하는 것을 확인할 수 있었고, 그 다음 제조 전 단계와 유지보수 단계가 주요 전과정단계로 확인되었다. 그 외 AP (69.2%), ODP (98.2%) 영향범주에서는 제조 전 단계의 기여도가 높은 것으로 분석되었다.

3.5 해석

3.5.1 수소 제법별 전과정 결과 비교

연료전지 자동차의 전과정 환경영향은 사용되는 수소 제법에 따라 달라진다. 해석에서는 수소 제법이 연료전지 자동차의 전과정에 얼마나 영향을 미치는지 알아보기 위해 천연가스 개질수소, COG 부생수소, 석유정제 부생수소, PEM 수전해수소, SOEC 수전해수소를 사용한 연료전지 자동차의 환경영향을 비교하였다. 그 결과는 Fig. 6과 같다.

수소 제법별 GWP 환경영향 결과는 석유정제 부생수소가 3.67E+02 g CO₂ eq./km로 가장 높은 수치가 높고, 그 뒤로 COG 부생수소, 천연가스 개질수소, SOEC 수전해수소, PEM 수전해수소 순으로 나타났다. ADP 영향범주 결과는 COG 부생수소(7.82E-01 g Sb eq./km), 천연가스 개

질수소, 석유정제 부생수소, PEM 수전해수소, SOEC 수전해수소 순으로 나타났다. EP 환경영향 결과에서는 COG 부생수소(4.10E+00 g PO₄³⁻ eq./km), 석유정제 부생수소, 천연가스 개질수소, SOEC 수전해수소, PEM 수전해수소 순으로 나타났다. POCP 환경영향 결과는 석유정제 부생수소(2.38E+00 g C₂H₄ eq./km), COG 부생수소, 천연가스 개질수소, SOEC 수전해수소, PEM 수전해수소 순으로 나타났다. 다른 영향범주들과 다르게 AP 환경영향 결과는 석유정제 부생수소(3.44E+00 g SO₂ eq./km), COG 부생수소, SOEC 수전해수소 PEM 수전해수소, 천연가스 개질수소 순으로 나타나는데, 이는 수전해수소에서 사용되는 태양광 패널에 의해 개질수소가 가장 낮은 환경영향이 나타나는 것으로 확인되었다. ODP 환경영향 결과는 COG 부생수소(2.83E-07 g R11 eq./km), 천연가스 개질수소, 석유정제 부생수소, PEM 수전해수소, SOEC 수전해수소 순으로 나타났지만, 제조 전 단계의 환경영향이 98% 이상을 차지하여 운행 단계에서는 큰 차이가 나타나지 않는 것으로 확인되었다.

3.5.2 환경성 개선 방안

3.5.2.1 제조 전 단계 이슈 분석

연료전지 자동차의 환경성 개선을 위해 우선 전과정단계의 주요 이슈를 파악하였다. GWP 결과를 토대로 수소 제법에 따라 변동되는 운행 단계를 제외할 때, 가장 높은 영향을 보이는 것은 제조 전 단계로 나타났다. 제조 전 단계의 환경적 이슈를 파악하기 위해 알아보기 위해 Fig. 7과 같이 부품별 질량기여도 대비 GWP 기여도로 나타냈다. 그 결과 바디와 샤시는 질량기여도가 크기 때문에 GWP 기여도가 높은 것으로 확인되었다. 반면, 연료탱크와 연료전지는 질량기여도는 낮지만 GWP 기여도가 높은 것으로 확인되었다. 환경영향이 높게 나타나는 부품을 세분화하

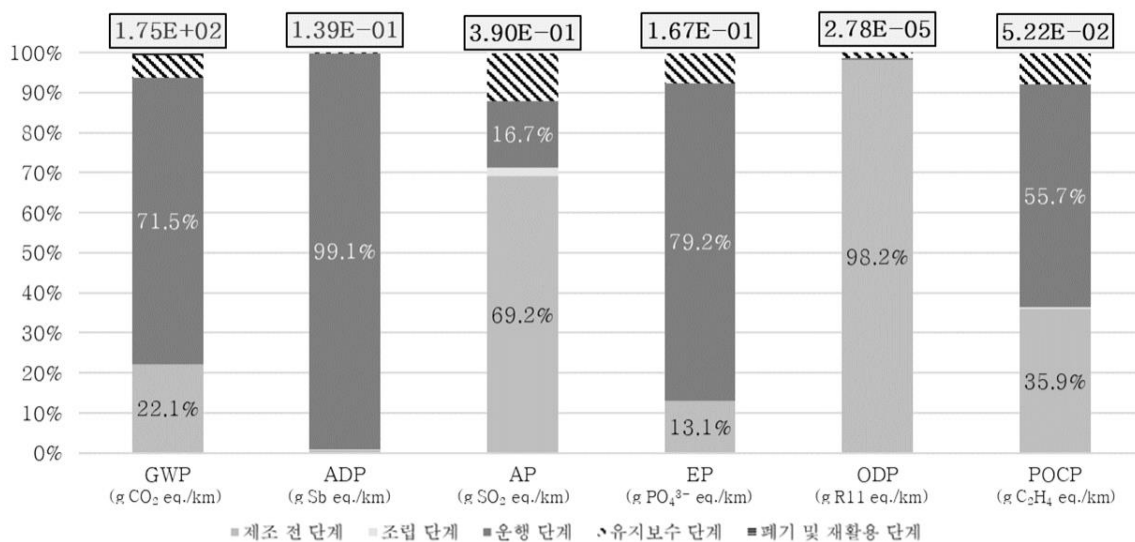


Fig. 5. 연료전지 자동차의 영향범주별 기여도

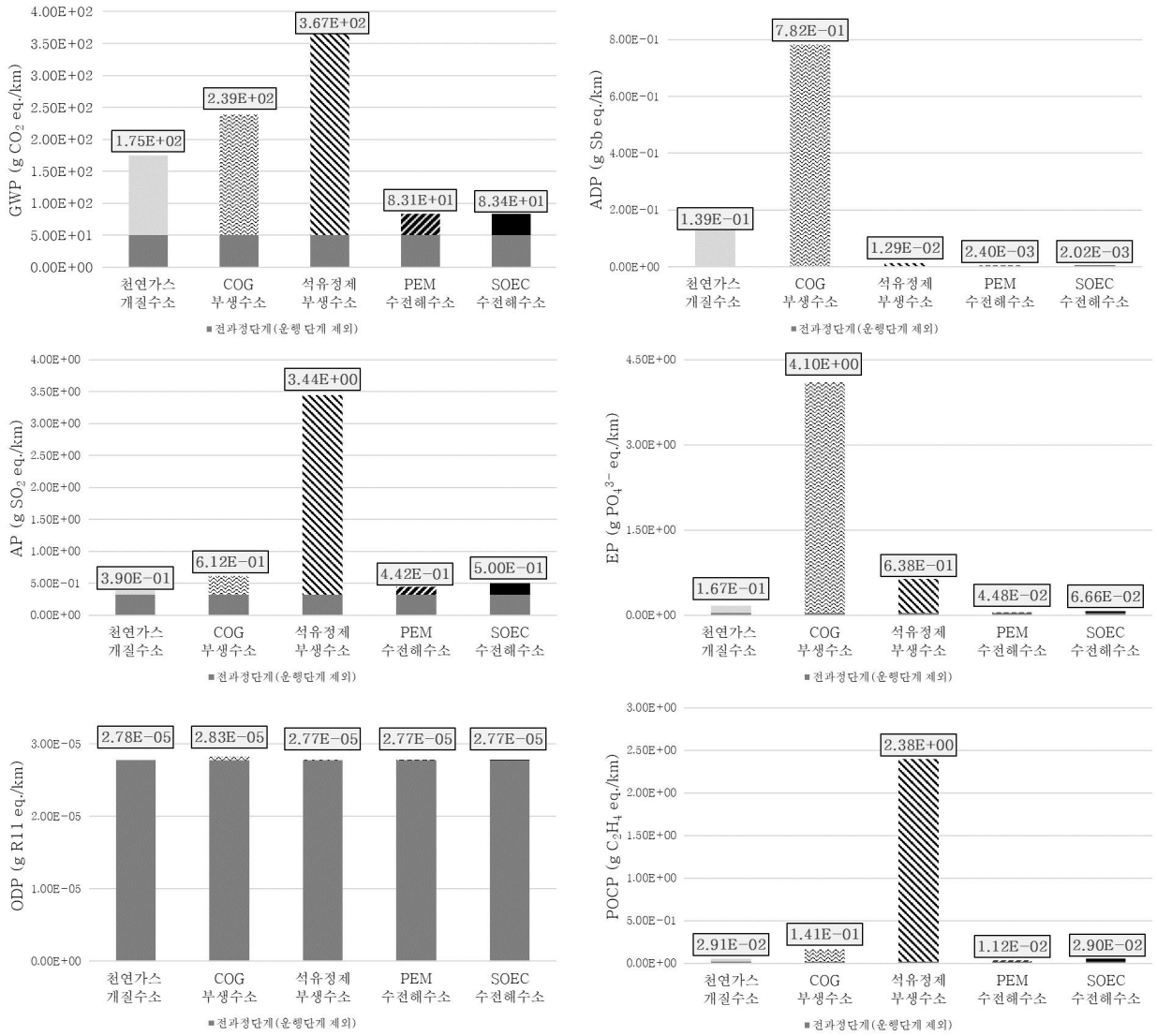


Fig. 6. 수소 제법별 환경영향

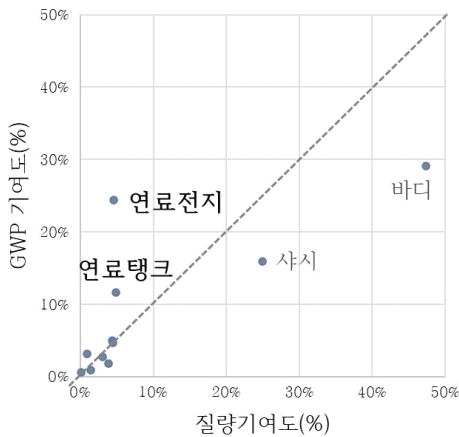


Fig. 7. 부품별 질량기여도 대비 GWP 기여도

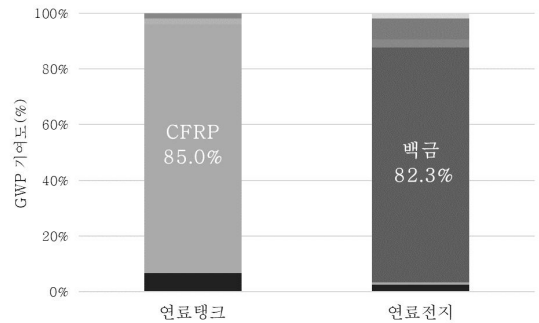


Fig. 8. 연료탱크 및 연료전지의 재질별 GWP 기여도

여 재질별 GWP 기여도를 확인하였고, 그 결과는 Fig. 8과 같다.

연료탱크의 재질별 GWP 기여도는 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics)가 85.9%로 가장 높은 GWP 기여도를 차지하였고, 연료전지의 재질별 GWP 기여도는 백금이 82.3%로 가장 높은 GWP 기여도를 차지하는 것을 확인할 수 있다. 제조 전 단계 이슈 분석을 통해 연료전지 자동차

Table 6. CFRP 열분해 재활용 GTG

투입물	
CFRP	1 kg (탄소섬유 60wt%+Epoxy resin 40wt%)
N ₂	0.94 kg
전기	12.53 MJ
산출물	
탄소섬유	0.60 kg
Pyrolysis gases	0.02 kg
N ₂	0.94 kg
Oil&Wax	0.12 kg
Ash	0.26 kg

의 제조 전 단계에서 연료탱크의 CFRP, 연료전지의 백금에 의해 GWP 기여도가 높은 것으로 확인되었다. 제조 전 단계의 환경성 개선을 위해 재활용 시나리오를 설정하였다. 백금의 경우, 데이터 부족으로 CFRP에 대한 재활용만을 고려하였다.

3.5.2.2 재활용 방법

본 연구에서는 CFRP 재활용 공정에서 많이 사용되고 있는 열분해 재활용 공정¹⁸⁾을 재활용 방법으로 설정하였다. CFRP 열분해 재활용 공정은 폐기 및 재활용 단계에서 나오는 CFRP(탄소섬유 60wt%+Epoxy resin 40wt%)를 연마 후 열분해하여 탄소섬유를 재활용하였다. CFRP 열분해 재활용에 대한 GTG는 Table 6과 같다.

3.5.2.3 재활용 효과

Fig. 9는 CFRP를 열분해하였을 때, 전과정에서 나타나는 GWP 재활용 효과를 보여준다. 천연가스 개질수소를 사용하는 연료전지 자동차에서 1.6% 개선되었고, GWP가 가장 낮았던 PEM 수전해수소를 사용하는 연료전지 자동차에서 3.3%까지 개선되었다.

4. 결론

본 연구에서는 수소 제법별 연료전지 자동차의 환경영향을 도출하고, 환경성을 개선하기 위한 방안에 대하여 논의하였다. 연료전지 자동차의 전과정단계는 전세계적으로 많이 사용되고 있는 천연가스 개질수소를 운행 단계에 사용하여 6가지 영향범주(GWP, ADP, AP, EP, ODP, POCP)에 대해 환경영향을 산정했다.

그 결과 GWP, ADP, EP, POCP는 운행단계, AP, ODP는 제조 전 단계가 주요 전과정단계로 확인되었다. 추가적으로 각 수소 제법별 환경영향을 확인한 결과 AP를 제외한 영향범주에서 화석연료 및 전기를 사용하는 개질수소 및 부생수소가 신재생에너지를 사용하는 수전해수소 대비 높게 나타났다.

연료전지 자동차의 운행 단계 외 제조 전단계가 주요 전과정단계를 규명되었고, 세부적인 분석을 위해 부품 및 재질에 따라 세부분석을 하였다. 제조 전 단계의 11개의 부품 중 연료탱크는 CFRP(85.9%), 연료전지는 백금(82.3%)이 원인으로 확인되었다. 연료전지 자동차의 환경성을 개선하기 위해 CFRP에 대한 열분해 재활용 기술을 적용하였다. CFRP 재활용을 통해 기존의 제조 전 단계에서 7.1%의 GWP 기여도가 개선되었고, 천연가스 개질수소를 사용한 연료전지 자동차에서 GWP 환경영향은 1.6% 감축되었다.

또한, GWP가 가장 낮게 나타난 PEM 수전해수소를 사용한 연료전지 자동차에서는 3.3% 개선효과가 확인되었다.

본 연구에서는 해외 문헌데이터를 기반으로 국가 LCI 데이터베이스를 사용하였다. 데이터 품질 측면에서 국내 현장 데이터를 사용할 수 있다면, 더욱 합리적인 수치를 도출할 수 있을 것이다. 또한, 운행 단계에서 모델링한 수소 제법별 데이터는 시간적·지리적·기술적 경계에서 민감도가 크기 때문에 보완이 필요하다. 환경성을 분석하기 위해 CFRP 재활용 기술은 적용·분석했지만, 향후 백금 재활용 기술까지 고려하여 수소 연료전지 자동차의 순환성을

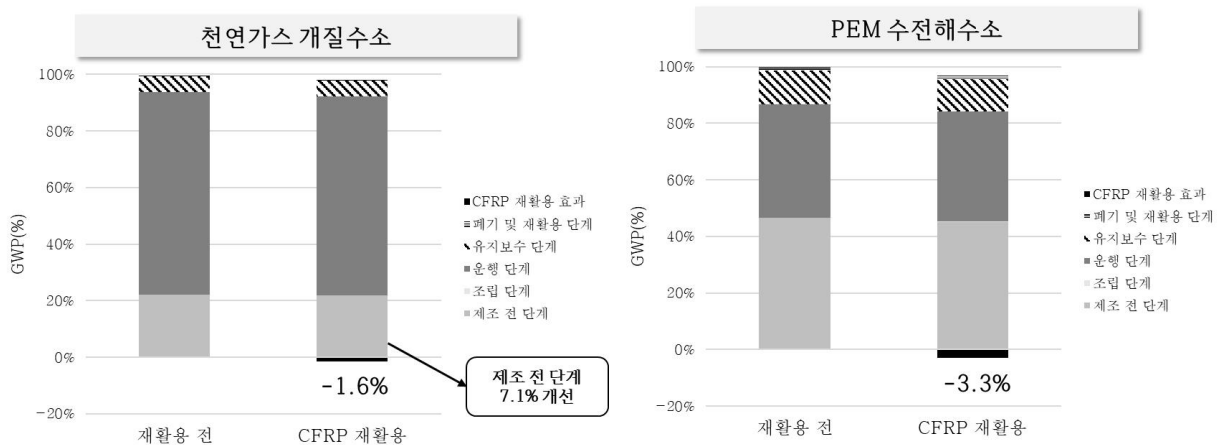


Fig. 9. CFRP 재활용 재활용 효과

향상시키고, 그 효과를 전과정평가를 통해 확인해야 한다. 본 연구결과는 그린 모빌리티 전과정평가 연구와 여러 의사결정의 기반 데이터로 사용될 수 있으며, 배터리·자동차 산업의 전과정 관점의 규제가 가시화되고 있는 현재, 그 활용성은 더욱 증가될 것으로 전망된다.

사 사

본 연구는 환경부 지식기반 환경서비스 특성화대학원 지원사업(지속가능제품 설계 분야)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- 1) 관계부처 합동, 「한국판 뉴딜」 종합계획 (2020. 07. 14).
- 2) 이지용, 차경훈, 유무상, 이수연, 허탁, 임태원, 자동차 연료로서 수소의 전과정 환경성/경제성 분석, 신재생에너지 Vol.3, P. 31-39 (2007).
- 3) EU, CO₂ emission performance standards for cars and vans, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en.
- 4) 관계부처 합동, 수소경제 활성화 로드맵 (2019. 01).
- 5) ISO 14040:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (2006).
- 6) ISO 14044:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (2006).
- 7) Daniele Candelaesia, Antonio Valenteb, Diego Iribarrenc, Javier Dufoured, Giuseppe Spazzafumo, Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars, International journal of hydrogen energy Vol.46, 35961-35973 (2021).
- 8) Sphera, GaBi Software, <https://gabi.sphera.com/international/index/>.
- 9) Ecoinvent, <https://ecoinvent.org/>.
- 10) 한국전력공사, 2020년 1월 ~ 12월 전력통계월보 <https://home.kepco.co.kr>.
- 11) 산업통산자원부, 에너지법 시행규칙 (2021).
- 12) 환경부, 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침 (2016. 12).
- 13) Argonne, GREET model, <https://greet.es.anl.gov/>.
- 14) NREL, H2A: Hydrogen Analysis Production Models, <https://www.nrel.gov/hydrogen/h2a-production-models.html>.
- 15) 현대자동차(주), 카탈로그, <https://www.hyundai.com/kr/ko/e/vehicles/catalog-price-download>.
- 16) 한국환경산업기술원, 폐기물 통계자료 (2018).
- 17) Leiden University, Institute of Environmental Sciences (CML), <https://www.universiteitleiden.nl/en/science/environmental-sciences>.
- 18) Khalil. Y. F, Comparative environmental and human health evaluations of thermolysis and solvolysis recycling technologies of carbon fiber reinforced polymer waste, Waste Management Vol.76, p. 767-778 (2018).