

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell 시스템의 환경 전과정평가

김형석¹ · 홍석진¹ · 허 탁^{2,†}

¹(주)에코플러스이앤씨 ESH사업본부, ²건국대학교 융합신소재공학과

Environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) System

HYOUNGSEOK KIM¹, SEOKJIN HONG¹, TAK HUR^{2,†}

¹EHS Division, Ecoplus Enc Corp., 98 Gasan digital 2-ro, Geumcheon-gu, Seoul 08506, Korea

²Department of Material Chemistry & Engineering, Konkuk University, 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Korea

†Corresponding author :
takhur@konkuk.ac.kr

Received 1 February, 2018
Revised 22 February, 2018
Accepted 28 February, 2018

Abstract >> The environmental impacts of a 1 kW polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) system are quantitatively assessed by performing a Life Cycle Assessment (LCA) study. A PEMFC system produces electricity and heat simultaneously, so an appropriate allocation of associated inputs and outputs is performed between the electricity and heat produced. The environmental impacts of the PEMFC system on the impact categories such as global warming (GW), abiotic depletion (AD), acidification (AC), and eutrophication (EU) are assessed from the life cycle impact assessment. The impact indicator results of the impact assessment on these impact categories are obtained as 3.70E-01 kg CO₂ eq./kWh, 1.86E-03 kg Sb eq./kWh, 4.09E-04 kg SO₂ eq./kWh, and 1.88E-05 kg PO₄³⁻/kWh, respectively. For all impact categories studied the most influential stage is the operation stage, which accounts for 98.8%, 98.7%, 70.3%, and 62.3% of the total impact on GW, AD, AC, and EU, respectively. For the impact categories of AD, AC, and EU, most of the environmental impacts during the operation stage is attributed to the production of city gas. However, for the impact category of GW, CO₂ emission from the reforming process of city gas is the main reason for the largest contribution of the operation stage to the total impact results.

Key words : Life cycle assessment(전과정평가), Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질 연료전지), Global warming(지구온난화), Acidification(산성화), Eutrophication(부영양화), Abiotic depletion(자원고갈)

1. 서론

전 세계는 경제의 성장, 인구의 증가, 도시화로 인하여 에너지 소비량이 급격히 증가되고 있다. 우리나라의 전기 소비량은 1999년 235 TWh에서 2016년 540 TWh로 18년간 약 2.3배가 증가하였다¹⁾. 전 세계적 관점에서는 무분별하고 지속적인 화석연료의 사용으로 인하여 화석연료의 매장량이 점차 한계에 이르고 있으며, 연소 시에 발생하는 탄소로 인하여 지구온난화가 야기되는 등 부정적인 환경영향이 증가하고 있다.

이러한 변화 속에서 환경 부담을 줄이고, 인류의 삶을 지금과 같은 수준으로 영위하기 위하여 태양광 혹은 수소와 같은 청정에너지 기술이 중요하다는 인식이 확산되고 있다.

특히, 신에너지 기술 중 하나인 연료전지는 궁극적으로 물을 분해하여 얻을 수 있는 수소를 에너지원으로 활용할 수 있다는 점에서 미래에너지로 주목을 받고 있다. 또한, 연료전지는 발전 용량 변화에 따른 성능의 변화가 없기 때문에 현재의 중앙 집중 방식이 아닌 분산전원으로 역할을 할 수 있어²⁾, 마이크로 그리드와 같은 전원을 구성하기에 적합하다.

현재는 수소를 생산하여 공급하기 위해 필요한 기반시설이 부족하여 도시가스를 원료로 내부 개질하고 있는데, 도시가스 생산 및 개질 등의 공정을 포함하여, 고분자 전해질 연료전지 시스템(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)의 생산 과정에서 환경부하가 발생한다.

따라서, 본 연구에서는 PEMFC의 전과정에 걸쳐서 발생하는 환경영향을 전과정평가(life cycle assessment, LCA) 방법론을 통해 평가함으로써 PEMFC 시스템의 환경성을 규명해보고자 한다.

2. 연구수행

2.1 연구방법론

본 연구에서는 PEMFC 시스템에서 생산되는 전

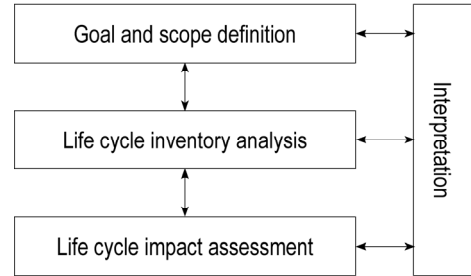


Fig. 1. Life cycle assessment (LCA) framework

기의 환경영향을 평가하기 위하여, 원료의 획득, 제조, 사용, 재활용 및 최종 폐기의 전과정과 관련된 환경영향을 평가하는 기법인 전과정평가를 수행하였다. 이 방법론은 ISO 14040 및 14044로 국제표준으로 제정되어 있는데³⁻⁵⁾, Fig. 1에서 보는 바와 같이 연구 목적 및 범위 정의(goal and scope definition), 전과정 목록분석(life cycle inventory analysis), 전과정 영향평가(life cycle impact assessment) 및 해석(interpretation)의 4단계로 구성되어 있다.

2.2 연구 목적 및 범위

2.2.1. 연구 목적

본 연구의 목적은 다음과 같다: 1) 전과정에 걸친 PEMFC 시스템의 환경성 평가, 2) PEMFC 환경적 핫스팟(hotspot) 규명.

2.2.2. 연구 범위

본 연구의 대상 시스템은 상용화된 1 kW급 PEMFC 시스템이며, 스택(stack), 개질기(reformer), mechanical balance of plant (MBoP) 및 electrical balance of plant (EBoP)로 구성되어 있다.

대상 시스템의 주요 사양은 Table 1과 같으며, 연료전지의 총 사용기간은 20년으로 정의하였다. 스택 1개는 연간 8,000시간 사용되며 총 5년간 40,000시간의 수명을 갖는 것으로 가정하여, 20년 동안 운영되는 본 연료전지 시스템에는 총 4개의 스택이 사용된다. 40,000시간을 발전하는 동안 PEMFC는 초기 효율의 10%의 효율저하가 발생하는 것으로 적용하

Table 1. Specification of the PEMFC system

Parameters	Value
Rated output	1 kW
Electrical efficiency	35%
Thermal efficiency	50%
Total efficiency	85%
Expected service time of system	20 years
Degradation	10%

였다.

본 연구에서 연료전지 시스템의 환경성 평가를 위한 기준인 기능 단위(functional unit)^{3,4)}는 전기 1 kWh로 정의하였다. 전기 생산과 관련된 환경영향만을 평가하기 위하여, 시스템의 전과정과 관련된 모든 투입물과 배출물에 대하여 ISO 14044를 준수하여 전기와 열 사이에 할당(allocation)을 수행하였다.

시스템 경계는 제조 전 단계, 조립 단계, 테스트 단계, 운영 단계로 설정하였으며, 데이터의 생산, 운영 등과 관련된 2014년도 현장 데이터를 수집하였다. 현장 데이터 수집이 어려운 경우 데이터 품질이 높은 데이터베이스 또는 문헌 데이터를 활용하였다.

본 연구에서 환경성 평가 대상으로 선정한 영향 범주는 “FC-Hy 가이드⁶⁾”에서 제시하고 있는 지구 온난화(global warming, GW), 산성화(acidification, AC), 부영양화(eutrophication, EU), 및 자원고갈(abiotic depletion, AD)이며, 각 영향범주의 지표는 global warming potential (GWP), acidification potential (AP), eutrophication potential (EP), abiotic depletion potential (ADP)를 사용하였다.

연구에 적용된 가정 및 제한사항은 다음과 같다.

1) 원료취득, 국가 그리드, 수송 등과 같은 데이터는 국가 life cycle inventory(LCI) database⁷⁾와 ecoinvent database⁸⁾를 활용하였다.

2) 연료전지에 사용되는 도시가스의 밀도 및 열량은 한국가스공사에 공시된 저위발열량(LHV) 자료(밀도: 0.7861 kg/Nm³, 9,420 kcal/m³, 39.4 MJ/m³)를 활용하였다⁹⁾.

3) 도시가스 연소에 따른 CO₂ 배출량은 한국 환

경공단에서 공시한 56,467 kg/TJ(IPCC 기본값: 56,100 kg/TJ) 적용하였다¹⁰⁾.

4) 연소에 따른 대기 배출물 중 CH₄ 및 N₂O는 IPCC(2006)의 에너지 부문 내 에너지산업에서 고정 연소에 대한 기본 배출계수 값을 사용하여, 각 1 kg/TJ 및 0.1 kg/TJ 적용하였다¹¹⁾.

5) 연료전지 시스템의 열 발생량은 스택의 효율저하와 상관없이 유지되며, 발생된 열은 70% 사용하는 것으로 가정하였다.

6) 생산된 전기 중 일부는 MBOP 및 EBOP를 운영하기 위해 사용되며, 이 전기도 손실로 간주하여 전기 생산 효율을 적용하였다. 즉, 운영 단계 중 설비 운영을 위한 외부 에너지 투입은 없는 것으로 가정하였다.

2.3 데이터 수집 및 계산

현장 데이터 수집을 원칙으로 하였으며, 일반 데이터를 활용하여 보완하였다. 데이터 수집은 질의서, 현장 방문, 현장 전문가의 자문을 통해 수행하였다.

제조 전(pre-manufacturing) 단계는 PEMFC 시스템에 투입되는 스택, 개질기, MBOP, EBOP의 제조를 위한 원료 채취부터 원료 생산, 부품 제조를 포함하며, 재질을 기준으로 데이터를 수집하였다. 또한 본 연구 시스템에서 전과정 동안에 사용되는 4개의 스택에 대한 환경부하도 이 단계에 포함되었다. 개질기는 구조물, 커버, 촉매 류, 단열재로 구성되어 있으며, MBOP는 각종 펌프, 밸브 등을 포함하고 있다. EBoP는 인버터, 센서, 보드 류 등으로 구성되어 있다.

조립(assembly) 단계의 데이터는 생산 업체의 1년간 데이터를 수집하였으며, 생산을 위해 사용되는 투입물의 월별 투입량을 토대로 연료전지 시스템 당 에너지 투입량을 도출하였으며, 계산 결과 1대의 PEMFC를 생산하기 위하여 35.29 kWh의 전기를 사용하는 것으로 나타났다.

테스트(test) 단계도 연간 데이터를 수집하였으며, 1대당 22.66 m³ (17.81 kg)의 도시가스를 사용하는

Table 2. Electricity and heat production in the operation stage

Category		PEMFC
Electricity	Initial production per hour	1.00 kW
	Final production per hour ([1-degradation factor] × initial production)	0.90 kW
	Average production per hour	0.95 kW
	Total production (average production×8,000 hour/year ×20 year)	1.52E-01 GWh
Heat	Initial and final production per hour	1.45 kW
	Total production (initial and final production×8,000hour/year×20 year)	2.32E-01 GWh
	Total consumption (total production×70%)	1.62-01 GWh
Allocation factor (total electricity production/total energy [electricity+heat] production)		0.483

것으로 계산되었다. 또한 테스트 단계에서 전기화학 반응에서 발생하는 대기 배출물의 양은 배출물의 분석 결과를 활용하였다.

운영(operation) 단계에서 투입되는 도시가스는 대상 연료전지 시스템 성능 표를 기준으로 작성하였으며, 테스트 단계와 동일한 방법으로 배출량을 계산하였다. 도시가스는 시간당 0.260 m³이 투입되며, 0.254 m³는 개질기로 투입되어 수소로 전환되고 0.06 m³는 버너로 투입되어 연소된다. 연료전지 시스템의 전과정 동안에 투입되는 전체 도시가스 투입량은 3.27E+04 kg이며, 버너로 투입되는 도시가스량은 3.31E+03 kg이다. 이를 기준으로 IPCC 2006의 배출인자를 활용하여 대기 배출물량을 계산하였다. 운영 단계에서 발생하는 전기 및 열의 총 생산량은 Table 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전과정 에너지 자원 사용량

전기 1 kWh를 생산하기 위해서 투입되는 주요 에너지 자원은 석탄, 원유, 천연가스이며, 전과정 목

Table 3. Results of non-renewable resource consumption

Life cycle stage	Coal (kg/kWh)	Crude oil (kg/kWh)	Natural gas (kg/kWh)
Total	2.29E-03	5.80E-03	1.14E-01
Pre-manufacturing	1.10E-03	3.60E-04	3.80E-04
Assembly	2.00E-05	2.40E-06	2.50E-06
Test	6.30E-07	3.00E-06	6.20E-05
Operation	1.20E-03	5.40E-03	1.10E-01

록분석을 통해 계산된 전과정 에너지 자원 소모량은 Table 3과 같다.

이 세 가지 자원의 총 투입량은 석탄 2.29E-03 kg/kWh, 원유 5.80E-03 kg/kWh, 천연가스 1.14E-01 kg/kWh이며, 원유와 천연가스는 총 사용량의 각각 93%, 96.5%가 전기를 생산하는 운영 단계에서 사용된다. 투입되는 양의 대부분은 연료로 사용되는 도시가스 생산과 관련되어 있다.

반면, 석탄은 운영 단계에서 50.4%가 투입되고, 제조 전 단계에서 48.7%가 투입되는 것으로 분석되어 원유와 천연가스에 비해서 제조 전 단계의 영향이 큰 것으로 나타났다. 제조 전 단계 내에서는 스택 제조과 관련된 에너지 사용량의 기여가 약 52.5%로 높았으며, 개질기 제조의 기여가 16.9%로 분석되었다. 또한 기타 부품과 EBOP의 생산과 관련된 기여도는 15.5%와 13.6%로 분석되었다. 스택 제조 과정에서 석탄의 사용량을 세분하여 분석하여 보면 스택 제조에 사용되는 전기로 인한 석탄의 사용이 스택 제조 과정의 48.9%를 차지하고 있으며, 그다음으로 백금 생산과 관련되어 소비되는 석탄의 양이 41.5%를 차지하는 것으로 분석되었다.

3.2 전과정 영향평가

PEMFC 시스템의 영향평가를 위해 전과정 영향평가에 대한 국제표준인 ISO 14044를 준수하여 수행하였다. 그 첫 단계인 영향범주의 선정은 “FC-Hy 가이드⁶⁾”에서 제시하고 있는 GW, AC, EU 및 AD를

Table 4. Category indicator results of the life cycle stages

Life cycle stage	ADP (kg Sb eq./kWh)	AP (kg SO ₂ eq./kWh)	EP (kg PO ₄ ³⁻ eq./kWh)	GWP (kg CO ₂ eq./kWh)
Total	1.86E-03	4.09E-04	1.88E-05	3.70E-01
Pre-manufacturing	2.33E-05	1.21E-04	7.07E-06	4.36E-03
Assembly	3.52E-07	9.36E-08	1.74E-08	5.55E-05
Test	9.99E-07	1.57E-07	6.39E-09	1.85E-04
Operation	1.83E-03	2.88E-04	1.17E-05	3.65E-01

Table 5. Category indicator results of the operation stage

Impact indicator results	Total	Reforming /combustion	City gas production
ADP (kg Sb eq./kWh)	1.83E-03	-	1.83E-03
AP (kg SO ₂ eq./kWh)	2.88E-04	-	2.88E-04
EP (kg PO ₄ ³⁻ eq./kWh)	1.17E-05	-	1.17E-05
GWP (kg CO ₂ eq./kWh)	3.65E-01	3.10E-01	5.46E-02

포함하였으며, 각 영향범주에 지표로 사용된 GWP, AP, EP, ADP의 결과를 요약하면 Table 4와 같다. 보는 바와 같이 연료전지 시스템의 영향은 주로 발전을 하는 운영 단계에서 발생된다.

각 영향 범주에 대해서 압도적인 영향을 미치는 운영 단계의 세부적인 영향평가 결과는 Table 5에서 제공하고 있다. GW를 제외한 나머지 3개 영향 범주 (AC, EU, AD)에서는 20년간 사용되는 도시가스의 생산을 위한 영향이 높았으며, GW에서는 도시가스의 개질시 배출되는 CO₂로 인한 영향이 주요 원인이었다. 개질 및 연소 시에는 CO₂, H₂, O₂, N₂, CH₄, N₂O가 배출되는데, 이 물질들은 GW를 제외한 나머지 영향범주에 영향을 미치지 않았다. 또한, 운영 단계에서 MBOP 및 EBOP 운영을 위해 소내 전기를 사용하여 외부 에너지 투입이 없으므로 에너지 사용으로 인한 영향이 나타나지 않았다.

운영 단계를 제외하고, 가장 높은 영향을 보이는 단계는 제조 전 단계이다. 제조 전 단계 내에서의 세부적인 영향은 Table 6과 같다. 부영양화를 제외한 3개 영향범주에서 스택과 관련된 영향이 높았지만,

Table 6. Category indicator results of the pre-manufacturing stage

Part	ADP (kg Sb eq./kWh)	AP (kg SO ₂ eq./kWh)	EP (kg PO ₄ ³⁻ eq./kWh)	GWP (kg CO ₂ eq./kWh)
Total	1.95E-05	1.19E-04	4.92E-06	2.90E-03
Stack	1.12E-05	1.15E-04	1.21E-06	1.66E-03
Reformer	4.63E-06	1.92E-06	1.10E-06	6.26E-04
MBOP	5.51E-07	2.42E-07	4.62E-08	1.52E-04
EBOP	3.07E-06	2.39E-06	2.57E-06	4.69E-04
Etc.	3.83E-06	1.96E-06	2.14E-06	1.46E-03

Table 7. Category indicator results of stacks

Component	ADP (kg Sb eq./kWh)	AP (kg SO ₂ eq./kWh)	EP (kg PO ₄ ³⁻ eq./kWh)	GWP (kg CO ₂ eq./kWh)
Gasket	2.19E-09	3.35E-09	1.45E-09	3.46E-07
Separator	7.42E-09	5.75E-09	5.78E-10	1.09E-06
Tetrafluoroethylene	1.18E-08	2.09E-08	5.61E-10	1.49E-05
Platinum	3.93E-06	1.13E-04	2.87E-07	5.81E-04
Vinyl acetate	1.00E-08	2.99E-09	3.17E-10	7.22E-07
End plate 1	1.50E-06	4.26E-07	6.37E-08	1.19E-04
End plate 2	5.42E-07	1.65E-07	3.25E-08	1.14E-04
Current collector	1.07E-07	4.55E-08	5.66E-07	1.53E-05
Disk spring	3.18E-09	6.53E-09	1.17E-09	7.99E-06
Gas diffusion layer	1.25E-08	5.46E-09	3.14E-09	2.38E-06
Electricity	5.07E-06	1.35E-06	2.51E-07	8.01E-04

부영양화에서는 EBOP로 인한 영향이 가장 높았다.

EU에 높은 영향을 미치는 EBOP 중에서 electro-magnetic compatibility (EMC) filter와 printed wiring board (PWB)가 높은 영향을 보이는 것으로 나타났으며, EMC filter에서는 부품에 포함된 PWB가 높은 영향을 유발하였다. PWB에서 가장 높은 영향 기여도를 보이는 부품은 integrated circuit (IC) 회로이며, wafer 제조시의 환경부하가 높은 것으로 분석되었다.

스택과 관련된 영향 지표 결과를 구성 부품 별로 분석하여 Table 7에 나타내었다. 스택의 산성화 영향의 기여도가 가장 높은 물질은 membrane electrode assembly (MEA)에 촉매로 투입되는 백금이며, 이 백금은 스택 1개당 3.14E-03 g밖에 첨가되지 않지만

단위 영향이 매우 높아 기여도가 높게 나타났다.

이상으로부터 연료전지 시스템의 환경성을 개선하기 위해서는 우선적으로 운영 단계의 환경부하를 최소화해야 하며, 또한 PEMFC 시스템의 제조 전 단계의 환경성 대한 개선이 필요함을 알 수 있다.

운영 단계의 환경부하를 저감하기 위하여, 내부 개질이 아닌 외부에서 생산된 수소 등도 고려할 만하다. 또한, 제조 전 단계의 환경성을 개선시키기 위해서는 스택의 수명을 증가시키고 촉매(Pt) 사용량을 저감 등에 대한 방안이 강구되어야 할 것이다.

4. 결론

본 연구는 PEMFC 시스템의 전과정에 걸친 환경영향을 평가하였다. 원유 및 천연가스는 도시가스 생산을 위하여 대부분(각각 90% 이상) 소비되었다. 석탄도 운영 단계에서의 소비량이 가장 많았지만 다른 화석 자원과 다르게 제조 전 단계의 영향 기여도가 48.7%로 높게 나타났다. 제조 전 단계에서는 스택 제조 시 투입되는 에너지의 영향 기여도가 높게 도출되었다.

4개의 대상 영향범주(GW, AC, EU, AD) 모두 운영 단계의 환경영향 기여도가 가장 높았으며, GW를 제외한 나머지 영향범주에서는 도시가스 생산 부하가 환경영향의 주요 원인으로 분석되었다. GW 범주에서는 도시가스 개질시 발생하는 CO₂가 주요 원인이었다.

본 PEMFC의 시스템에서 생산된 전기의 환경성 개선을 위하여 운영 단계의 환경영향을 줄이기 위한 노력이 필요하다. 특히, 전기 발전효율의 향상 및 열손실을 저감을 위한 기술 개발과 제조 전 단계의 환경영향을 줄이기 위하여 수명 향상 등의 다양한 접근이 필요하다.

후 기

이 논문은 2015학년도 건국대학교의 연구년 교원 지원에 의하여 연구되었다.

References

1. Korea Electric Power Corporation (KEPCO), "Statistics of Electric Power in Korea", KEPCO, Korea, 2017.
2. T. Honma and H. Uematsu, "Thermal calculations and fuel cell power generation system", Sungandang, Korea, 2014.
3. International Organization for Standardization (ISO), "ISO 14040 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework", ISO, Switzerland, 2006.
4. International Organization for Standardization (ISO), "ISO 14044 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines", ISO, Switzerland, 2006.
5. H. Kim, S. Hong, and T. Hur, "Life Cycle Assessment (LCA) and Energy Efficiency Analysis of Fuel Cell Based Energy Storage System (ESS)", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 2, 2017, pp. 156-165.
6. P. Masoni and A. Zamagni, "Guidance Document or Performing LCA on fuel cells, in Guidance Document for performing LCAs on Fuel Cells and H₂ Technologies", European Commission (EC), 2011.
7. Korea Environmental Industry Technology Institute (KEITI), National LCI Database, <http://www.epd.or.kr>.
8. R. Frischknecht, N. Jungbluth, H. J. Althaus, G. Doka, R. Dones, T. Heck, S. Hellweg, R. Hischier, T. Nemecek, G. Rebitzer, and M. Spielmann, "The ecoinvent database: Overview and methodological framework", International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 10, 2015, pp. 3-9.
9. KOGAS. KOGAS homepage, Gas information 2013. (<http://www.kogas.or.kr>)
10. Korea Environment Corporation (KECO), "Guidelines for local government greenhouse gas inventories (ver 3.0)", KECO, Korea, 2012.
11. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 2: Energy", Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan, 2006.