

연료전지 기반 에너지저장 시스템의 환경 전과정평가 및 에너지 효율성 분석

김형석¹ · 홍석진² · 허 탁^{1,†}

¹건국대학교 융합신소재공학과, ²한국생산기술연구원 국가청정생산지원센터

Life Cycle Assessment (LCA) and Energy Efficiency Analysis of Fuel Cell Based Energy Storage System (ESS)

HYOUNGSEOK KIM¹, SEOKJIN HONG², TAK HUR¹

¹Department of Material Chemistry & Engineering, Konkuk University, 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Korea

²Korea National Cleaner Production Center, Korean Institute of Industrial Technology, 18F, 322 Teheran-ro, Gangnam-gu, Seoul 06211, Korea

†Corresponding author :
takhur@konkuk.ac.kr

Received 7 April, 2017

Revised 24 April, 2017

Accepted 30 April, 2017

Abstract >> This study quantitatively assessed the environmental impacts of fuel cell (FC) systems by performing life cycle assessment (LCA) and analyzed their energy efficiencies based on energy return on investment (EROI) and electrical energy stored on investment (ESOI). Molten carbonate fuel cell (MCFC) system and polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) system were selected as the fuel cell systems. Five different paths to produce hydrogen (H₂) as fuel such as natural gas steam reforming (NGSR), centralized naphtha SR (NSR(C)), NSR station (NSR(S)), liquified petroleum gas SR (LPGSR), water electrolysis (WE) were each applied to the FCs. The environmental impacts and the energy efficiencies of the FCs were compared with rechargeable batteries such as LiFePO₄ (LFP) and Nickel-metal hydride (Ni-MH). The LCA results show that MCFC_NSR(C) and PEMFC_NSR(C) have the lowest global warming potential (GWP) with 6.23E-02 kg CO₂ eq./MJ electricity and 6.84E-02 kg CO₂ eq./MJ electricity, respectively. For the impact category of abiotic resource depletion potential (ADP), MCFC_NGSR(S) and PEMFC_NGSR(S) show the lowest impacts of 7.42E-01 g Sb eq./MJ electricity and 7.19E-01 g Sb eq./MJ electricity, respectively. And, the energy efficiencies of the FCs are higher than those of the rechargeable batteries except for the case of hydrogen produced by WE.

Key words : Life cycle assessment(전과정평가), Life cycle energy efficiency(전과정 에너지 효율성 평가), Molten carbonate fuel cell(용융탄산염 연료전지), Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자전해질 연료전지), Rechargeable battery(이차전지)

1. 서론

우리나라의 국가 전력망은 단순 발전 및 송전으로 운영되는 중앙 집중형 상시전력 공급체계를 유지하고 있다. 이 체계는 공급자(발전소) 중심이며, 단 방향적으로 국가 전력망에서 수요자에게 전력을 전달하는 데에 초점을 맞추고 있다. 중앙 집중형 상시전력 공급체계는 안정적인 전력공급을 위하여 예비전력을 보유하고 있어야 하는데 우리나라는 이 예비전력을 보존하기 위해 발전 효율이 높고 제어가 용이한 화력발전을 주로 활용 중이다. 하지만 화력발전은 자원소모, 미세먼지 및 온실가스 발생의 주원인 중의 하나이므로 친환경에너지 기반의 전력수급 대책이 필요한 상황이다. 이러한 환경 이슈들을 해결하기 위해 정부는 2012년에 신재생에너지 공급 의무화 제도(renewable portfolio standards, RPS)를 시행하여, 국내 신재생에너지 투자 확대, 산업육성 및 기반 구축을 이루어 왔다.

그러나 신재생에너지 발전 기술은 전력 생산과 소비 시점의 불일치, 불확실한 발전량, 전력 변동이라는 문제를 갖고 있으며, 이를 해결하기 위해서는 경부하시 생산되는 잉여 전기를 저장할 수 있는 장치가 필요하다.

에너지저장 시스템(energy storage system, ESS)은 경부하시(야간) 생산되는 전력을 이차전지, 연료전지, 압축공기 에너지 저장, 플라이휠 등과 같은 다양한 장치에 저장하여 과부하시(주간)에 부하 평준화(load leveling)를 통해 전력 공급과 수요의 균형을 맞출 수 있는 전력 공급 체계이다. 국내 에너지저장 시스템 시장은 리튬이온전지로 대표되는 이차전지를 중심으로 형성되었으나, 최근 에너지 손실이 적고 분산전원으로 활용될 수 있는 연료전지에 대한 관심이 높아지고 있다. 실제 연도별 국내 연료전지의 보급용량 역시 증가하고 있는 경향을 보이고 있으며, 특히 RPS 제도가 시행된 2012년 이후로 급격히 증가하고 있다.

연료전지 및 수소기반 에너지저장 시스템은 에너지 전환 효율 측면에서 안정적인 전력 수급의 수

단으로 활용될 수 있는 장점을 가지고 있으나, 온실가스 감축 효과, 자원소모 절감 등의 환경측면 및 환경영향에 대해서 규명할 부분들이 존재하고 있다. 해외의 경우 이미 다양한 에너지저장 시스템, 연료전지, 수소 생산, 수소 저장 등의 전과정과 관련된 환경성 평가 연구를 수행하여 최적의 시스템 기반 구축을 위해 활용하고 있다. 이에 반해 국내 수소기반 에너지저장 시스템의 환경성 평가 연구는 아직 미약한 상황이므로, 최적의 수소기반 에너지저장 시스템의 국내 도입을 위해 우리나라 지역·사회적 특성을 반영한 환경성 평가가 필요한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 연료전지 기반 에너지저장 시스템의 원료 채취 및 부품생산, 제조, 설치 및 운영까지, 전과정 동안에 발생하는 환경영향에 대하여 전과정평가(life cycle assessment, LCA)를 수행하여 정량적으로 평가함으로써 환경성 및 에너지 효율성을 규명하고자 한다.

2. 연구수행

2.1 연구방법론

본 연구에서 선정된 대상 시스템에 대한 환경성 및 에너지 효율성을 평가하기 위하여 전과정평가 방법론을 활용하였다.

전과정평가는 제품의 전과정(원료 획득부터 제조, 사용, 재활용 및 최종 폐기까지) 동안에 자원의 투입량과 환경 배출량을 정량화하고, 이들이 환경에 미치는 영향을 체계적으로 평가하는 도구이다. 전과정평가의 기본구조는 Fig. 1과 같으며, 목적 및

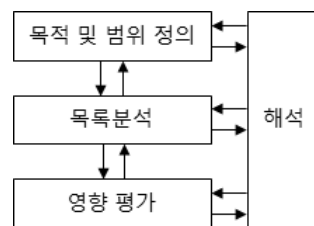


Fig. 1. Life cycle assessment (LCA) framework¹⁾

범위 정의, 목록분석, 영향평가 및 해석으로 구성되어 있다. 이 방법론은 ISO 14040, 14044로 국제 표준으로 제정되어 있다^{1,2)}.

본 연구에서는 연료전지 기반의 에너지 저장 시스템으로 용융탄산염 연료전지 시스템(molten carbonate fuel cell, MCFC), 고분자 전해질 연료전지 시스템(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)을 선정하였고³⁻⁵⁾, 이차전지로는 리튬인산철 이차전지(LiFePO₄, LFP)와 니켈수소 이차전지(Nickel-metal hydride, Ni-MH)를 선정하였다.

연료전지 시스템의 주요기능은 에너지(전기 및 열)의 생산이며, 주변의 가정 및 산업시설에 전기와 열을 공급할 수 있는 시스템이다. 이차전지는 전기 사용량이 적은 시점에서 발생하는 잉여 전기 혹은 일상생활 중의 그리드를 활용하여 전기에너지를 충전하고, 원하는 시점에서 사용할 수 있도록 전기 에너지를 저장하는 시스템이다.

각 연료전지 시스템별 사양은 Table 1에 나타냈다. 대상 MCFC 및 PEMFC 시스템은 각각 시간당 2,500 kW와 1 kW를 생산할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 두 시스템은 FC, MBoP (mechanical balance of plant)와 EBoP (electrical balance of plant)로 구성되어 있다. 본 연구에서는 FC, MBoP, EBoP를 시스템 경계 내에 포함하였으며 시스템의 수명은 20년으로 설정하였다. FC의 발전 시간은 연간 8,000시간으로 40,000시간의 수명을 보증하여, 20년간 총 4회 교체되는 것으로 적용되었다. 40,000시간을 발전하는 동안 FC는 초기 효율의 10%의 효율저하가 발생하는 것으로 적용하였다.

Table 1. Specifications of molten carbonate fuel cell (MCFC) and polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) systems

	MCFC	PEMFC
Rated output	2,500 kW	1 kW
Electrical efficiency	45%	35%
Thermal efficiency	35%	50%
Total efficiency	80%	85%
Expected service time of system	20 years	
Degradation	10%	

Table 2. Specifications of LiFePO₄ (LFP) and Nickel-metal hydride (Ni-MH) systems

	LFP	Ni-MH
Delivered electricity	1,000 kWh	
Charge discharge cycle	500 cycle	
Degradation	20%	

LFP 이차전지와 Ni-MH 이차전지의 사양은 Table 2에 나타냈으며, 총 전달할 수 있는 전기량을 1,000 kWh로 설정하였다. 충전회 횟수는 500회로 설정하였으며, 500회의 충전이 발생했을 때 수명이 종료되는 것으로 적용하였다. 이 때 초기 효율의 20%의 효율저하가 발생하는 것으로 적용하였다.

선정된 MCFC와 PEMFC 시스템에 필요한 수소는 다양한 경로를 통해 생산, 제공될 수 있는데 본 연구에서는 Table 3과 같이 5가지의 수소 생산 방식을 연구에 적용하였다. 크게 화석연료 개질과 물분해로 구분할 수 있는데, 화석연료 개질 방식은 원료에 따라 NGRS(천연가스), LPGSR(액화석유가스), NSR(납사)로 구분하였으며, NSR 방식의 경우 중앙 집중 생산방식(centralized, C)과 분산 생산방식(station, S)으로 구분하였다. 물분해는 국가 그리드 전기를 에너지원으로 물을 분해하여 수소를 생산하는 방식이다⁶⁾.

Table 3. Fuel Cell Systems with different hydrogen pathways

Category	Analyzed system
MCFC	Natural Gas Steam Reforming (Station)_NGSR(S)
	Liquefied Petroleum Gas SR (Station)_LPGSR(S)
	Naphtha SR (Centralized)_NSR(C)
	NSR (Station)_NSR(S)
	Water Electrolysis (WE)
PEMFC	NGSR(S)
	LPGSR(S)
	NSR(C)
	NSR(S)
	WE
Rechargeable battery	LiFePO ₄ (LFP) battery
	Nickel-Metal Hydride (Ni-MH) battery

일반적으로 환경성 평가를 위한 대상 시스템의 시스템 경계는 연료의 생산과 대상 시스템 제조(원료 채취 및 부품 생산, 제품 제조) 및 운영(설치/테스트, 전기 공급)으로 구분된다. 연료전지의 연료는 다양한 경로를 통해 생산된 수소를 사용하며, 이차전지는 그리드를 직접 활용하여 충전하고 필요한 시점에 방전하는 것으로 설정하였다.

본 연구의 각 에너지 저장시스템의 기능은 ‘에너지 저장을 통해 원하는 시점에 1 MJ (0.28 kWh)의 전기를 전달하는 것’으로 정의하였고, 기능을 정량화한 기능단위(functional unit)는 ‘1 MJ’로 설정하였다.

연료전지 시스템은 전기와 열을 동시에 생산하고 있는데, 기능단위로 설정된 1 MJ의 전기생산과 관련된 환경영향만을 고려하기 위하여 전과정평가에 대한 국제표준인 ISO 14040에 따라 모든 투입물과 산출물들을 전기와 열 사이에서 할당(allocation)을 수행하였다.

연료전지 시스템의 데이터는 2014년도 실제 국내 데이터를 수집하였으며, 이차전지의 경우 국내 데이터 수집이 불가능하여 일반 데이터(문헌 자료)를 기반으로 적용하였다.

각 대상 시스템의 운영 단계에 대해서는 현장 데이터를 사용하는 것을 원칙으로 하였으며, 원료 취득과 제품의 폐기 등과 같은 상위 및 하위공정의 기술계 흐름에 대해서는 공개된 일반데이터를 적용하였다.

환경성평가를 위하여 다양한 연료전지⁶⁻¹⁰⁾와 이차전지¹¹⁻¹⁵⁾의 전과정평가 연구에서 고려하고 있는 지구온난화와 자원고갈 영향범주를 평가대상 범주로 선정하였다. 또한 에너지저장 시스템으로서의 효율을 비교하기 위하여, 전과정 에너지 회수율¹⁶⁾과 전기적 에너지 회수율⁴⁾을 고려하였다. 고려한 주요 환경 이슈와 계산 방식은 Table 4와 같다.

LCA에서 수행된 결과의 재현성을 높이기 위한 각 제품별 가정 사항은 다음과 같다.

- 원료취득, 국가 그리드, 수송 등과 같은 상위흐름 데이터는 국가 LCI 데이터베이스¹⁷⁾와 Ecoinvent 데이터베이스¹⁸⁾를 활용하였다.

Table 4. Selected environmental issues and descriptions

Issue	Description
Global Warming Potential (GWP)	$\sum(CF_{es} \times m_s)$ CF _{es} = characterization factor that connects intervention s with impact category c m _s =mass of substance s emitted
Abiotic resources Depletion Potential (ADP)	Total energy generation (MJ) ÷ Non-renewable energy consumption (MJ)
Total Energy Return on Investment (EROI)	Total electricity generation (MJ) ÷ Total electricity consumption (MJ)

- 연료전지에 사용되는 도시가스의 밀도 및 열량은 한국가스공사에 공시된 저위발열량(LHV) 자료를(밀도: 0.7861 kg/Nm³, 9,420 kcal/m³, 39.4 MJ/m³) 활용하였다¹⁹⁾.

- 도시가스 연소에 따른 대기 배출물 중 CO₂ 배출량은 한국환경공단(2012)에 공시된 56,467 kg/TJ (IPCC 기본값: 56,100 kg/TJ) 적용하였다²⁰⁾.

- 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 적용하였다²¹⁾.

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

- 수소의 생산 지역과 에너지 생산을 위해 수소를 소비하는 지역이 명확치 않으므로, 이에 수송과 관련된 환경영향은 제외하였다.

- 배터리 생산과 관련된 데이터는 Liang 등의 연구를 참고하였다¹³⁾.

2.2 데이터 수집 및 계산

2.2.1. 연료전지 시스템

연료전지 시스템의 제조단계에 대한 데이터는 현장 데이터를 직접 수집하였으며, 이를 토대로 각 부품 및 모듈을 구성하고 있는 원료의 재질 및 그 무게에 대한 정보를 분석하였다. 제품 제조 단계에

Table 5. The amount of electricity and heat production in operation stage

Category		MCFC	PEMFC
Electricity	Initial production	2,500 kW	1.00 kW
	Final hourly production (1-degradation factor) × initial production)	2,250 kW	0.90 kW
	Average production	2,375 kW	0.95 kW
	Total production (Average production × 8,000 hour/year × 20 year)	3.80E+02 GWh	1.52E-01 GWh
Heat	Initial and final production	1,941 kW	1.45 kW
	Total production (Initial and final production × 8,000 hour/year × 20 year)	3.11E+02 GWh	2.32E-01 GWh
	Total consumption (Total production × 70%)	2.17E+02 GWh	1.62-01 GWh
Allocation factor (Total electricity production ÷ Total energy (electricity+heat) production)		0.636	0.483

서는 제품 생산 시 투입되는 전기 및 도시가스 소비량 데이터를 측정하였으며, 투입되는 도시 가스량을 기반으로 연소에 의한 대기 배출물을 계산하였다. 설치와 테스트 단계에서는 연료전지 시스템의 특성에 맞게 컨디셔닝 혹은 테스트 공정을 고려해서 필요한 도시 가스량을 계산하였다. 운영 단계에서는 시간당 투입되는 도시 가스량을 기반으로 전기 및 열 생산량, 개질, 연소, 전기화학반응에서 발생하는 대기 배출물 양을 계산하였다. 연료전지 시스템의 전기 및 열 생산량은 Table 5와 같다.

연료전지 시스템은 전기와 열을 동시에 생산하는데 본 연구에서 기능단위로 선정된 1 MJ의 전기 생산과 관련된 환경영향을 계산하기 위하여 전기와 열 사이에 에너지를 기준으로 할당을 수행하였다. 할당계산 과정은 Table 5에 나타냈으며, 계산된 전기의 할당인자는 MCFC와 PEMFC가 각각 0.636 및 0.483이다.

2.2.2. 이차전지

이차전지는 충방전 시 발생하는 손실량을 Table 6과 같이 계산하여 적용하였다. 충방전 사이클은

Table 6. The amount of electricity consumption and delivery of batteries

Category	LFP	Li-MH
Capacity	1,000 kWh	1,000 kWh
Electricity demand	1,111 kWh	1,428 kWh
Delivered Electricity	Initial	1,000 kWh
	Final	800 kWh
	Average	900 kWh
Life cycle electricity consumption	5.55E+05 kWh (1,111 kWh × 500 cycle)	7.14E+05 kWh (1,428 kWh × 500 cycle)
Life cycle electricity delivery	4.50E+05 kWh (900 kWh × 500 cycle)	

500회로 설정하였으며, LFP와 Li-MH의 1회 충전 시에 1,111 kWh와 1,428 kWh가 필요하므로 총 전기 수요량은 각각 5.55E+05 kWh와 7.14E+05 kWh이다. 방전 시에는 최초 전기 전달량이 1,000 kWh이며, 최초의 80%인 800 kWh 이하로 감소했을 때 배터리의 수명이 종료되는 것으로 간주하여, 그 평균인 900 kWh으로 선정하였다. 따라서, 500사이클의 수명 동안에 총 전기 전달량은 4.50E+05 kWh이다.

3. 결과 및 고찰

각 에너지 저장 시스템이 전과정 동안에 지구온난화에 미치는 영향을 GWP (Global Warming Potential, CO₂ equivalents)로 나타내었으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다.

1 MJ의 전기 생산 시에 0.137 kg CO₂ eq./MJ의 온실가스를 배출하는 우리나라 국가 그리드와 비교하여, 연료전지 시스템 기반의 에너지저장 시스템 중

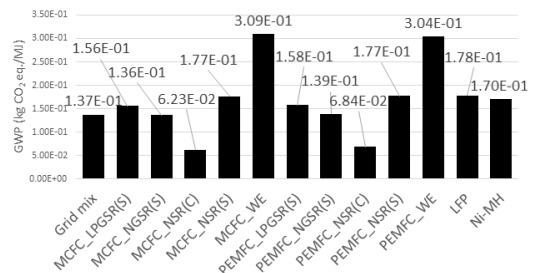


Fig. 2. GWP results of analyzed systems (kg CO₂ eq./MJ)

납사를 이용하여 중앙 집중 방식으로 생산된 수소를 사용하는 연료전지 시스템, NSR(C)은 국가 그리드의 약 51.2% (PEMFC)~약 53.8% (MCFC)로 가장 적은 CO₂를 배출하는 것으로 분석되었다. 그러나, NGSR(S), LPGSR(S), NSR(S), WE의 경로로 수소를 제공하는 연료전지 시스템들은 국가 그리드보다 많은 양의 CO₂를 배출하는 것으로 확인되었다. 특히 WE 방식은 국가 그리드 대비 약 2.4배(PEMFC)~약 2.5배(MCFC)의 CO₂를 배출하는 것으로 나타났는데, WE를 통한 수소 생산과정에서 GWP에 대한 연료전지 시스템 전체 영향의 약 97%를 차지하고 있다. 그 외에 가압을 통한 수소 저장에서 약 2.6%의 영향이 발생되며, 원료 채취 및 부품 제조 단계의 경우 전체 영향의 약 0.2%를 차지하여 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

MCFC와 PEMFC 시스템에서 GWP에 미치는 영향의 대부분은 에너지 전달을 위해 투입되는 원료(수소)를 생산할 때의 영향인 것으로 분석되었다. MCFC와 PEMFC 시스템 모두 WE 방식 다음으로 현장에서 생산하는 NSR(S)의 방식으로 수소를 생산할 때 GWP 영향이 크게 나타났으며 그 뒤로 LPGSR(S), NGSR의 영향이 큰 것으로 분석되었다.

이차전지인 LFP 및 Ni-MH는 1 MJ의 전기 전달을 위해 국가 그리드 대비 약 1.2배 및 약 1.6배의 GWP 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, 이는 충전 시에 필요한 전기가 주요 원인이었다.

Fig. 3은 연료전지 시스템의 GWP 값에 대한 기여도가 높은 수소의 생산에 대하여, 서로 다른 방식으로 생산한 수소를 1 kg 기준으로 비교하였다.

납사를 원료로 중앙 집중 방식, NSR(C)을 통해

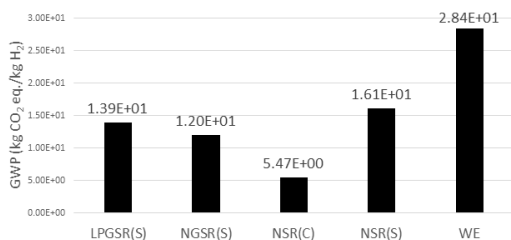


Fig. 3. GWP results of hydrogen production (kg CO₂ eq./kg)

생산된 수소는 GWP 값이 5.47 kg CO₂ eq./kg H₂로 납사로부터 분산된 장소에서 수소를 생산하는 NSR(S)은 물론 다른 모든 방식보다 크게 적게 나타나는데 높은 영향을 미치는 NSR 방식을 중앙 집중 방식으로 전환하면서 수소의 원료로 납사뿐만 아니라 주변 공정에서 배출되는 off-gas를 사용하여 원료의 영향을 크게 감소시키기 때문인 것으로 분석되었다.

NGSR(S) 경로의 경우는 수소 1 kg을 생산하기 위한 지구온난화 영향은 12.0 kg CO₂ eq./kg H₂이며, 그중 약 77.9%에 해당하는 배출이 개질 시 배출되는 것으로 분석되었다. 그 외 14%에 해당하는 배출이 천연가스에서 발생하는 지구온난화 영향으로 분석되었으며, 전기의 영향도 약 7.4%가 발생하는 것으로 분석되었다.

WE에서 수소 1 kg을 생산하기 위한 GWP 영향은 28.4 kg CO₂ eq./kg H₂로 다른 경로들에 비해 압도적으로 높으며, 99.7%의 영향이 물 분해 과정에서 사용되는 국가 그리드 전기의 사용량에 기인한다. WE 방식에 의한 수소생산과 관련된 환경영향은 국가 그리드가 아닌 풍력 또는 태양광과 같이 신재생에너지로 생산한 전기를 사용할 경우에 Fig. 4와 같이 크게 개선될 수 있다.

본 연구에서는 단결정 실리콘 태양전지 시스템보다 풍력 시스템을 도입했을 때 GWP 저감 효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 이 때, 기존대비 96.7% (MCFC)~93.8% (PEMFC)까지 저감할 수 있는 것으로 나타났다.

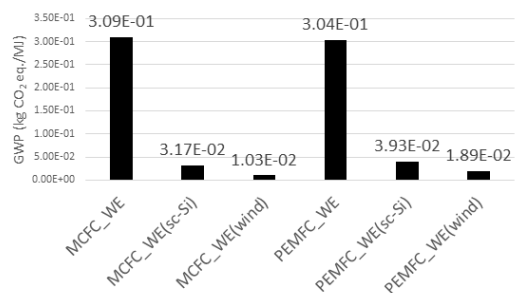


Fig. 4. Changes in GWP results when electricity is replaced by renewable energy (kg CO₂ eq./MJ)

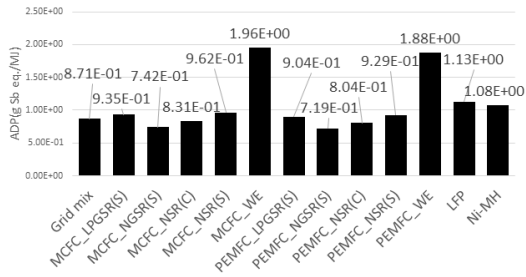


Fig. 5. ADP results of analyzed systems (g Sb eq./MJ)

에너지 저장시스템들의 자원고갈 범주에 미치는 영향을 ADP (Abiotic resource Depletion Potential, Sb equivalents)로 나타낸 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

우리나라 국가 그리드로 1 MJ의 전기를 생산할 때의 ADP의 값은 0.87 g Sb eq./MJ이다. GWP 영향 범주의 경우에는 NSR(C)가 가장 낮은 영향을 미쳤으나, ADP의 경우에는 NSGR(S) 경로로 생산한 수소를 사용하는 연료전지 시스템이 국가 그리드의 약 89.7% (PEMFC)-약 94.5% (MCFC)로 가장 적은 영향을 보였다. LPGSR(S), NSR(S), NSR(C), WE로 생산한 수소를 사용하는 연료전지 시스템은 국가 그리드보다 ADP에 더 많은 영향을 보였으며, 특히 WE를 사용한 방식은 국가 그리드 대비 약 2.4배 (PEMFC)-약 2.5배(MCFC)의 ADP 영향을 미치는 것으로 나타났다. WE 방식의 경우에 물 분해를 통한 수소 생산의 ADP 영향이 전체 영향의 약 97%를 차지했으며, 그 외에 가압을 통한 수소 저장에서 약 2.6%의 영향이 발생되었고 원료 채취 및 부품 제조 단계의 경우 전체 영향의 약 0.2%를 차지하여 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

연료전지 시스템의 ADP에 미치는 영향은 GWP와 동일하게 대부분이 에너지 전달을 위해 투입되는 원료(수소)를 생산할 때의 영향인 것으로 분석되었다. MCFC와 PEMFC에서 모두 WE에 이어 NSR(S) 방식이 두 번째로 크게 나타났으며 그 뒤로 LPGSR, NSR(C)의 순서로 나타났다.

Fig. 6은 연료전지 시스템 전과정과 관련된 ADP 값에 대한 기여도가 높은 수소 생산에 대하여, 각 방식별로 생산한 수소를 1 kg 기준으로 비교하였다.

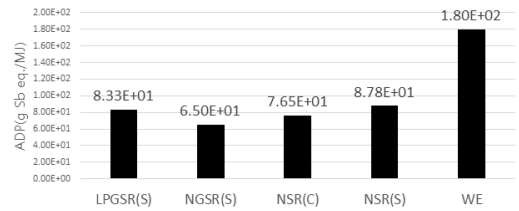


Fig. 6. ADP results of hydrogen production (g Sb eq./kg) pathways

NSR(C)의 경우에 자원고갈 영향은 NSGR(S) 대비 약 1.2배로 도출되었으며, 납사의 사용에 따른 원유 자원의 고갈이 전체의 약 63.6%인 48.7 g Sb eq./kg H₂의 영향을 보였다. 그 뒤로 fuel gas의 영향이 약 31.3%, 납사 개질을 위해 투입되는 전기의 영향이 5%로 나타났다. NSR(S) 방식은 납사의 영향이 82.4 g Sb eq./kg H₂으로 약 93.8%의 영향을 미쳤으며, 납사 개질 시 투입되는 전기의 영향이 약 6.1%로 도출되었다.

LPGSR(S)는 수소 1 kg을 생산하기 위한 ADP 영향은 LPG 생산으로 인한 영향이 약 93.5%로 약 78.0 g Sb eq./kg H₂의 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 그 외 6.43%의 영향이 전기로부터 발생하는 것으로 분석되었다.

WE에서 물 분해를 통해 수소 1 kg을 생산하기 위한 ADP 영향은 180 g Sb eq./kg H₂이었으며, NSGR(S) 대비 약 2.8배의 ADP 영향을 미치는 것으로 나타났다. WE는 모든 다른 방식 대비 2배 이상의 ADP 영향을 미치는 것으로 결과가 도출되었다. WE의 ADP 영향을 저감하기 위하여 에너지원을 국가 전기 그리드를 재생에너지인 태양광(Sc-Si)과 풍력으로 변경했을 때, 환경영향의 변화는 Fig. 7과 같다. 풍력으로 에너지원을 대체함으로써 기존 그리드 대비 약 96.9% (MCFC)-96.3% (PEMFC)의 저감 효과를 얻을 수 있는 것으로 분석되었다.

본 연구의 에너지 저장시스템인 연료전지와 이차전지들에 대하여 투입되는 에너지와 소비자에게 전달되는 에너지(총 에너지, 전기 에너지)를 기반으로 에너지 효율성을 평가하였다.

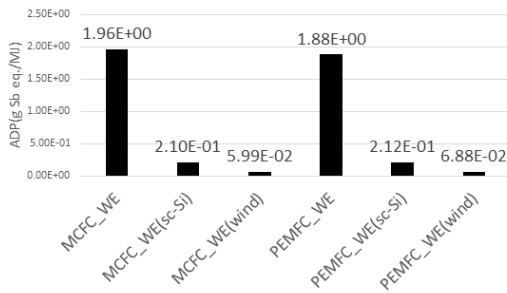


Fig. 7. Changes in ADP results when electricity is replaced by renewable energy (g Sb eq./MJ)

에너지 효율성은 총 에너지 회수율(EROI), 전기적 에너지 회수율(ESOI)을 평가하였으며, Table 4에 기술된 계산식을 활용하였다. 에너지 회수율을 계산하기 위해 사용된 에너지 소비량 및 전기 전달량 정보는 다음 Table 7과 같으며, 이를 기반으로 계산된 에너지 회수율은 Table 8과 같다.

연료전지의 시스템의 EROI는 WE의 경우를 제외하고 약 33~41%로 투입되는 총 에너지 대비 1/3 가량의 에너지가 회수되는 것으로 분석되었다. 반면에 2차전지의 경우 9% (LFP) 및 7% (Ni-MH)로 매우 낮은 에너지 회수율을 보이는데 이는 전기를 생산하는 많은 화석에너지가 투입되기 때문이다. 또한, WE 방식의 경우에는 수소를 생산하기 위해 투입되는 전기로 인해 이차전지의 경우보다도 낮은 에너지 효율을 보였다.

전기적 에너지 회수율인 ESOI에서는 WE 방식을 제외한 연료전지 시스템과 이차전지에서 1보다 큰 값을 보여주고 있는데, 이는 연료전지 시스템의 수소 생산을 위해 투입되는 원료인 LPG, NG 및 납사가 자체적으로 함유하고 있는 에너지 때문이다. 자체적으로 함유하고 있는 에너지가 수소를 생산하고 이를 전기 에너지로 변환시키기 때문에 투입되는 전기 에너지 대비 더 많은 전기에너지가 생성되기 때문이다. 반면에, 이차전지인 LFP와 Ni-MH는 투입되는 전기에너지 대비 약 81%와 63%를 다시 회수시킬 수 있는 것으로 분석되었다. Ni-MH는 충전을 위해 투입되는 전기에너지가 LFP보다 많아 효율이 LFP보다 떨어지는 것으로 분석되었다. ESOI가

Table 7. The amount of energy consumption and production of analyzed systems

Analyzed system	Energy consumption		Energy production		
	Total	Electricity	Total	Electricity	
MCFC	NGSR(S)	6.98E+09	3.00E+08	2.49E+09	1.37E+09
	LPGSR(S)	7.65E+09	3.07E+08		
	NSR(C)	6.66E+09	6.49E+08		
	NSR(S)	7.55E+09	6.52E+08		
	WE	4.99E+10	5.34E+09		
PEMFC	NGSR(S)	3.50E+06	1.56E+05	1.38E+06	5.47E+05
	LPGSR(S)	3.83E+06	1.60E+05		
	NSR(C)	3.34E+06	3.30E+05		
	NSR(S)	3.78E+06	3.32E+05		
	WE	2.50E+07	2.68E+06		
Rechargeable battery	LFP	1.15E+01	1.23E+00	1.00E+00	1.00E+00
	Ni-MH	1.48E+01	1.59E+00	1.00E+00	1.00E+00

Table 8. EROI and ESOI results of analyzed systems

Analyzed system	EROI	ESOI	
MCFC	NGSR(S)	0.36	4.56
	LPGSR(S)	0.33	4.45
	NSR(C)	0.37	2.11
	NSR(S)	0.33	2.10
	WE	0.05	0.26
PEMFC	NGSR(S)	0.40	3.51
	LPGSR(S)	0.36	3.43
	NSR(C)	0.41	1.66
	NSR(S)	0.37	1.65
	WE	0.06	0.20
Rechargeable battery	LFP	0.09	0.81
	Ni-MH	0.07	0.63

가장 높은 방식은 NGSR(S) 연료전지 시스템으로 456% (MCFC)~351% (PEMFC)를 보이고 있으며, NSR의 경우, 중앙 집중 방식과 분산 방식 모두 약 165% (PEMFC)~약 210% (MCFC) 수준이었다.

4. 결론

본 연구를 통하여, 연료전지와 이차전지 에너지

저장 시스템들의 환경성을 평가하고 에너지 효율성을 분석하였다.

1) 1 MJ의 전기를 생산하는 과정에서 MCFC와 PEMFC의 경우에 NSR(C) 방식으로 생산된 수소를 사용하는 것이 국가 그리드 대비 가장 적은 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다. 다음으로 NGSR(S), LFP, LPGSR(S), NSR(S), Ni-MH, WE 순으로 온실가스 배출량이 적은 것으로 나타났다.

2) 자원고갈 영향범주는 지구온난화와 다르게 MCFC와 PEMFC 모두 NGSR(S) 방식이 가장 낮은 자원고갈 영향을 나타내는 것으로 분석되었다. WE 방식이 가장 높은 영향을 보여주고 있으며, 이차전지의 ADP에 대한 영향은 WE를 제외한 모든 연료전지 시스템과 국가 그리드에 비해 높은 영향을 나타내었다.

3) 지구온난화와 자원고갈이 모두 높게 나타나는 WE의 경우 물 분해를 위한 에너지원을 재생에너지로 변환하였을 때 환경성이 크게 좋아지는 것으로 분석되었다.

4) 에너지 효율 측면에서 대부분의 연료전지 시스템이 이차전지보다 효율적으로 나타났으나, WE의 경우는 이차전지보다 효율이 낮았다. 총 에너지 회수율인 EROI는 이차전지의 에너지 충전을 위해 국가 그리드 전기가 사용되므로 연료전지가 높은 효율을 보인다. 또한, 전기적 에너지 회수율인 ESOI의 경우에도 연료전지 시스템에서 수소를 생산하기 위해 투입되는 원료(LPG, NG, 납사)의 feedstock 에너지가 전기 에너지로 전환되므로 순수 전기만을 사용하는 이차전지에 비해 높은 것으로 분석되었다.

후 기

이 논문은 2015학년도 건국대학교의 연구년 교원 지원에 의하여 연구되었다.

References

1. International Organization for Standardization (ISO), "ISO

- 14040 Environmental management -Life cycle assessment -Principles and framework", ISO, Switzerland, 2006.
2. International Organization for Standardization (ISO), "ISO 14044 Environmental management -Life cycle assessment -Requirements and guidelines", ISO, Switzerland, 2006.
3. J. W. Lim, D. Lee, M. Kim, J. Choe, S. Nam, and D. G. Lee, "Composite structures for proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) and energy storage systems (ESS): Review", *Composite Structures*, Vol. 134, 2015, pp. 927-949.
4. M. A. Pellow, C. J. M. Emmott, C. J. Barnhart, and S. M. Benson, "Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis", *Energy & Environmental Science*, Vol. 8, No. 7, 2015, pp. 1938-1952.
5. B. Bendjedja, N. Rizoug, M. Boukhnefer, F. Bouchafaa, and M. Benbouzid, "Influence of secondary source technologies and energy management strategies on Energy Storage System sizing for fuel cell electric vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017.
6. J. Y. Lee, S. An, K. Cha, and T. Hur, "Life cycle environmental and economic analyses of a hydrogen station with wind energy", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 6, 2010, pp. 2213-2225.
7. A. Zucaro, G. Fiorentino, A. Zamagni, S. Bargigli, P. Masoni, A. Moreno, and S. Ulgiati, "How can life cycle assessment foster environmentally sound fuel cell production and use?", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 1, 2013, pp. 453-468.
8. M. Raugei, S. Bargigli, and S. Ulgiati, "A multi-criteria life cycle assessment of molten carbonate fuel cells (MCFC)? a comparison to natural gas turbines", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, No. 2, 2005, pp. 123-130.
9. A. Mehmeti, F. Santoni, M. Della Pietra, and S. J. McPhail, "Life cycle assessment of molten carbonate fuel cells: State of the art and strategies for the future", *Journal of Power Sources*, Vol. 308, 2016, pp. 97-108.
10. P. Masoni and A. Zamagni, "Guidance Document or Performing LCA on fuel cells" European Commission (EC), 2011.
11. Y. Deng, J. Li, T. Li, X. Gao, and C. Yuan, "Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 343, 2017, pp. 284-295.
12. Y. Deng, J. Li, T. Li, J. Zhang, F. Yang, and C. Yuan, "Life cycle assessment of high capacity molybdenum disulfide lithium-ion battery for electric vehicles", *Energy*, Vol. 123, 2017, pp. 77-88.
13. Y. Liang, J. Su, B. Xi, Y. Yu, D. Ji, Y. Sun, C. Cui, and J. Zhu, "Life cycle assessment of lithium-ion batteries for greenhouse gas emissions", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 117, Part B, 2017, pp. 285-293.

14. S. Mellino, A. Petrillo, V. Cigolotti, C. Autorino, E. Jannelli, and S. Ulgiati, "A Life Cycle Assessment of lithium battery and hydrogen-FC powered electric bicycles: Searching for cleaner solutions to urban mobility", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 3, 2017, pp. 1830-1840.
15. M. Zackrisson, K. Fransson, J. Hildenbrand, G. Lampic, and C. O'Dwyer, "Life cycle assessment of lithium-air battery cells", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 135, 2016, pp. 299-311.
16. M. Raugei, P. Fullana-i-Palmer, and V. Fthenakis, "The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles", *Energy Policy*, Vol. 45, 2012, pp. 576-582.
17. KEITI. National LCI Database. 1998-2016 [cited 2016; Available from: <http://www.epd.or.kr/>].
18. Ecoinvent. Ecoinvent. 2003-2016 [cited 2016; Available from: <http://www.ecoinvent.org/>].
19. KOGAS. KOGAS homepage. Gas information 2013 [cited 2016; Available from: <http://www.kogas.or.kr/>].
20. Korea Environment Corporation (KECO), "Guidelines for local government greenhouse gas inventories(Ver 3.0)", KECO, Korea, 2012.
21. IPCC, "2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories - Volume 2. Energy", Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan, 2006.