



[2017-3-FC-005]

# 용융탄산염연료전지(MCFC) 시스템의 전과정평가: 국내 2.5MW 연료전지 시스템을 대상으로

정재형<sup>1)</sup> · 김기만<sup>1)\*</sup>

## Life Cycle Assessment of Molten Carbonate Fuel Cell System: A Case Study of 2.5 MW Fuel Cell System in Korea

Jaehyung Jung<sup>1)</sup> · Kiman Kim<sup>1)\*</sup>

Received 2 November 2016 Revised 12 January 2017 Accepted 16 January 2017

**ABSTRACT** The environmental impacts of a 2.5 MW molten carbonate fuel cell (MCFC) system in Korea using life cycle assessment (LCA) were analyzed. Simapro version 7.0 to calculate the environmental impacts of the MCFC system, and operating data for one year (2014). LCA that the global warming potential (GWP) and abiotic depletion potential (ADP) 3.05E-01 kgCO<sub>2eq</sub>/KWh<sub>e</sub> and 1.65E-03kgSb<sub>eq</sub>/kWh<sub>e</sub>, respectively. Operational phase was the most significant contributor to the environmental impacts showing that GWP and ADP were 3.02E-01 kgCO<sub>2eq</sub>/KWh<sub>e</sub> (98.9%) and 1.63E-03kgSb<sub>eq</sub>/kWh<sub>e</sub> (99.1%), respectively. Natural gas reforming phase was the main reason for the environmental impacts related to the whole life of the MCFC system. MCFC stack was a dominant contributor to the environmental impacts. In detail, among MCFC stack components, MCFC cell appeared to 68% environmental impact. In addition, Nickel was a dominant contributor to the environmental impact of MCFC cell. Finally, as scenario-based results, the end of life MCFC system found that usage rate of heating, operating time period and recycling rate were significant factors the environmental impact.

**Key words** Environmental impact(환경영향), Global warming potential(지구온난화), Life cycle assessment(전과정평가), Molten carbonate fuel cell(용융탄산염연료전지), Abiotic depletion potential(자원고갈), Scenario analysis(시나리오분석)

### 1. 서론

연료전지는 전기 및 열에너지를 생산하고, 부산물로 물을 생산하는 기술적인 특징으로 다양한 활용분야에 있어 환경적인 장점을 가지는 것으로 알려져 있다. 연료전지는 활용분야에 있어 정지형(stationary)과 이동형(mobile)으로 구분할 수 있으며<sup>[1]</sup>, 연료전지는 고효율이면서 적은 오염물질을 배출하며, 특히 정지형의 활용에 있어 열병합 발

전으로서의 가능성 등으로 많은 관심을 받는 기술이다<sup>[2]</sup>. 특히, 정지형으로서 연료전지는 많은 전력을 생산하는 발전용으로 활용이 가능하며, 현재 우리나라의 경우 발전부문에 상용화가 되어있는 연료전지는 대부분 용융탄산염연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)이다. MCFC 시스템은 천연가스 개질을 통해 직접적으로 수소가스를 얻을 수 있으며, 전력생산을 위한 발전소로서의 기능을 수행하며, 안정적이면서 계속적으로 운영될 수 있는 특징을 가진다<sup>[3]</sup>.

한편, 연료전지의 친환경적인 장점을 객관적으로 파악하기 위하여 친환경성에 대한 정량적인 분석이 필요하며, 연료전지의 어떠한 환경적인 영향도 간과하지 않도록 전체 생

1) Division of Policy Research, Green Technology Center, Program in Science & Technology Studies, Korea University

\*Corresponding author: kkim@gtck.re.kr

Tel: +82-2-3393-3925 Fax: +82-2-3393-3919~20

애주기의 관점으로 분석하는 것이 중요하다. 이러한 분석을 위한 적절한 방법이 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)이다<sup>[1]</sup>. 연료전지의 친환경적인 기술적 특징이 반영된 운영적 측면 이외에도 시스템 자체의 생산, 폐기와 연료의 생산 등에 의한 환경영향이 발생할 수 있으며, 연료전지의 환경적인 장점을 평가하기 위해서 전체 생애주기를 고려해야 하는 것이 중요하다<sup>[2]</sup>. 특히, 혁신적인 에너지 시스템의 환경적인 분석을 위해서는 시스템의 전체 생애주기를 고려하는 것이 필수적이다<sup>[4]</sup>. 이러한 전체 생애주기를 분석하는 전과정평가를 통해 시스템의 어떠한 부분이 환경적으로 영향을 미치는지 판단할 수 있으며, 환경적인 개선을 위한 해결책을 찾을 수 있다.

이러한 맥락에서 MCFC 시스템에 대한 친환경성에 대한 평가와 개선점을 찾아내기 위해 전과정평가를 활용한 연료전지 시스템의 환경성 분석 연구가 수행되었다<sup>[3,5-11]</sup>. 기존 연구들은 분석의 대상과 범위가 연료전지의 핵심적인 구성요소인 스택에 초점을 맞추거나<sup>[5,6]</sup>, 500kW급 이하<sup>[3,7-10]</sup> 프로토타입 또는 상용화 연료전지 시스템이며, 최근 1.4MW급 상용화 연료전지 시스템에 대한 연구가 이루어졌다<sup>[11]</sup>. 이와 같이, 최근의 기술발전 정도를 반영한 상용화 연료전지 시스템에 대한 전과정평가를 수행한 연구는 부족한 실정이다. 특히, 연료전지의 발전을 위한 전략적인 측면에서 반복적인 전과정평가와 함께 전과정평가 결과를 고려한 연구개발을 지속적으로 수행하는 것이 필요하며, 이를 통해 정책결정자는 물론 연료전지 R&D를 수행하는 산업분야 발전부분의 기술, 연료 선택, 물질 재료, 운영 조건 등에 대한 제한된 정보의 제약 하에 의사결정을 내릴 수 있도록 도움을 줄 수 있다<sup>[1]</sup>.

따라서 본 연구는 전과정평가를 이용하여 국내 상용화되어 있는 2.5MW MCFC 시스템의 환경영향을 분석하였으며, 이를 바탕으로 기술의 사양의 변화에 따른 환경영향의 민감도를 분석하기 위하여 할당인자변화, 촉매무게변화, 수명증가, 컴포넌트와 원료물질 재활용율의 변화를 고려한 시나리오 분석을 수행하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 전과정평가 및 연구대상

전과정평가는 제품, 공정 및 시스템에 대해 원료, 생산,

수송 및 폐기까지 전과정에 걸친 환경영향을 평가하고, 제품시스템의 투입물과 산출물에 대한 환경부하를 정량화하고 환경영향을 평가하여 환경적 개선의 기회를 찾아 평가하는 과정을 의미한다<sup>[12]</sup>. 또한, 목록분석에서 규명된 자원소요량과 환경부하를 기술적, 정량, 정성분석과 평가하는 단계로 목록분석을 영향범주로 분류화와 분류화된 목록의 매개변수가 영향범주에 끼치는 영향을 정량화하는 특성화, 영향범주별 환경영향을 구분하는 정규화, 영향범주에 대한 상대적 가중치를 결정하는 가중치 순서로 영향평가가 진행된다. 분류화와 특성화는 필수적으로 진행하고, 정규화와 가중치는 선택사항이다<sup>[12]</sup>. 전과정평가는 국제표준화기구 ISO 14040과 14044로 제정되어 있으며<sup>[12,13]</sup>, 현재 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission, IEC)에서는 연료전지에 대한 전과정평가 방법을 표준화하기 위해 실무그룹을 운영 중에 있다<sup>[14,15]</sup>. 전과정평가의 분석은 4단계로 구성되며, 목적 및 범위의 설정, 목록분석, 환경영향평가 및 결과해석 순으로 분석을 진행하게 된다<sup>[16]</sup>.

Table 1은 본 연구에 적용한 MCFC 시스템 대상기술을 나타낸 것으로 본 연구에 적용한 MCFC 시스템 용량은 2.5 MW로 전기와 열에너지를 포함하고, 자료 수집은 2014년(1년) 실측자료를 이용하였다. 기능단위는 전기와 열을 포함한 생산량이며, 기준흐름은 기능단위로 정의된 필요한 에너지 혹은 엑서지(exergy) 양으로 연료전지 시스템 전체를 포함하였다. 연료전지 시스템 분석조건에서 MCFC 시스템의 열효율은 370°C의 열 온도에서 회수온도 120°C를 기준으로, 주로 산업체를 대상으로 공급하고 있으며, 특히 고온으로 운영되는 MCFC 시스템의 경우 회수온도에 따라 열효율이 달라지며, 회수온도 169°C(스팀)는 약 27%, 120°C

Table 1. Conditions for MCFC system

구분	연구대상 시스템	
발전용량	2.5 MW MCFC	
열에너지	포함	
투입연료	도시가스(LNG)	
효율	전기	47%
	열	33%
	종합	80%
기능	분산전원으로 전기와 열을 공급하는 기능	
기능단위	40,000 시간의 수명을 가진 연료전지로 20년 동안 전기와 열에너지를 공급(1 KWh <sub>전기+열</sub> )	
기준흐름	기능단위를 만족시키기 위한 연료전지 시스템	

(중온수)는 33%, 60°C(저온수)는 38%의 열효율을 나타내며, 본 연구에서는 120°C의 중온수 열효율을 적용하여 분석하였다.

전과정평가 계산은 전과정평가 소프트웨어인 Simapro ver. 7.0을 이용하여 분석하였으며<sup>[17]</sup>, 환경영향평가는 한국환경산업기술원에서 제공하는 탄소(환경)성적표지 방법을 적용하였다<sup>[18]</sup>.

## 2.2 연료전지 시스템경계

연료전지의 일반적 시스템경계는 Fig. 1과 같이 제조, 제조, 운영 및 폐기단계로 구분되며, 본 연구에서는 설치단계를 포함하여 시스템경계를 설정하였다. 또한, 본 연구의 MCFC 시스템의 운영 단위공정도는 22개로 구축하였으며, 폐기단계는 시나리오분석으로 추가하였다.

## 2.3 가정 및 제한사항

본 연구에 적용한 MCFC 시스템의 가정 및 제한사항은 단계별 설정하였다.

가정은 운영단계에서 적용되었으며, 3가지의 가정 사항을 포함하고 있다. 가정 1은 스택의 수명은 40,000시간(5년), 시스템 수명은 20년, 가정 2는 발생된 전기와 열은 모두 사용(열이용률 100%), 가정 3은 효율 저하율(열화율)은 5년간 10%로 하였다. 개질기(reforming)는 외부개질기로 전기화학적 개질효율은 100%를 적용하였다.

제한사항은 모든 단계에서 적용되었으며, 단계별 제한사항은 다음과 같다. 제조전단계와 제조단계의 제한사항은 실제 생산 데이터 적용 및 부품별 재질 적용하였다. 설치단계에서의 제한사항으로는 start-up에 필요한 용수 및 도시가스 사용량은 실측자료를 적용하였고, 연료에 의한 온

실가스 배출량은 IPCC 및 국가 배출계수를 적용하였다<sup>[19,20]</sup>. 운영단계의 제한사항에서 도시가스는 한국가스공사에 공시된 자료 활용(밀도: 0.7861kg/Nm<sup>3</sup>, 열량: 39.4MJ/Nm<sup>3</sup> or 9,420kcal/m<sup>3</sup>)과<sup>[21]</sup> 연료사용량은 507m<sup>3</sup>/hr, 열생산량은 1,941kwh/hr(1.67Gcal/hr)의 실측데이터를 적용하였다. 폐기단계에서의 제한사항은 통계자료 및 선행연구를 활용하여 시나리오를 구성하였다<sup>[22]</sup>.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 MCFC 시스템의 환경영향

MCFC 시스템 단계별 환경영향 평가는 영향평가는 연료전지 시스템의 지구온난화와 자원고갈로 분류하여 물질별 당량 값으로 환산하여 분석하였다. 지구온난화는 온실가스로 인한 잠재적인 환경영향을 설명하기 위해 사용하며, 지구온난화 영향평가의 영향범주는 특성화인자(kgCO<sub>2eq</sub>)를 이용하여 표현된다. 또한, 자원고갈은 화석연료의 소비량(석유, 원유, 천연가스 등)으로 인한 자원의 잠재적인 환경영향을 설명하기 위해 사용되며, 자원고갈의 영향평가는 특성화인자(kgSb<sub>eq</sub>)를 이용하여 표현된다. Table 2는 MCFC 시스템의 배출원별 환경영향 평가 결과를 나타내었으며, 직접, 간접 및 기타배출원으로 구분하여 환경영향을 평가하였다. 분석결과, MCFC 시스템의 지구온난화는 도시가스(LNG) 연료개질로 인하여 운영단계의 직접배출원이 가장 높은 수치를 보였다. 자원고갈도 운영단계에서 가장 높은 수치를 보인 반면 배출원은 도시가스(LNG)의 연료생산으로 인하여 기타배출원에서 가장 높은 수치를 보였다.

Fig. 2는 MCFC 시스템 단계별 환경영향을 나타낸 것

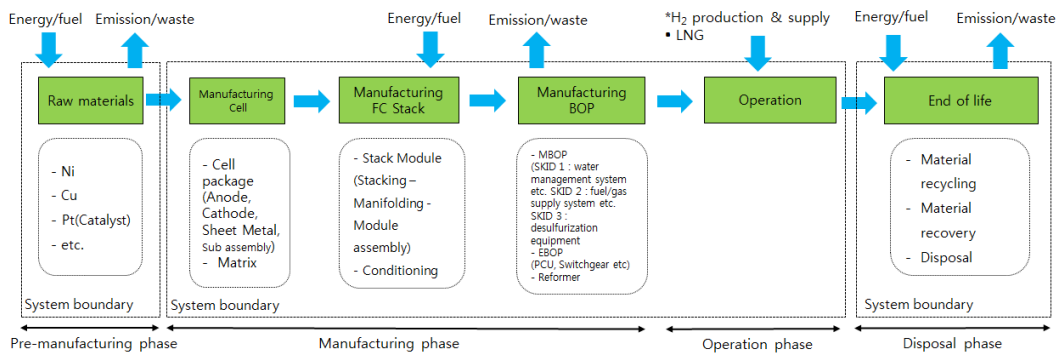


Fig. 1. Fuel cell boundary and process

Table 2. Environmental impact by phase and source of MCFC system

구분	단위	발생원	제조전단계	제조단계	설치단계	운영단계	합계
지구온난화	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>e</sub>	직접	2.74E-03	2.84E-06	4.43E-04	2.53E-01	3.05E-01
		간접		2.20E-05	-	-	
		기타		4.14E-07	3.57E-05	4.86E-02	
		소계	2.74E-03	2.53E-05	4.78E-04	3.02E-01	
자원고갈	KgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>e</sub>	직접	1.32E-05	-	-	-	1.65E-03
		간접		-	-	-	
		기타		1.53E-07	1.53E-07	1.53E-07	
		소계	1.32E-05	1.53E-07	1.20E-06	1.63E-03	

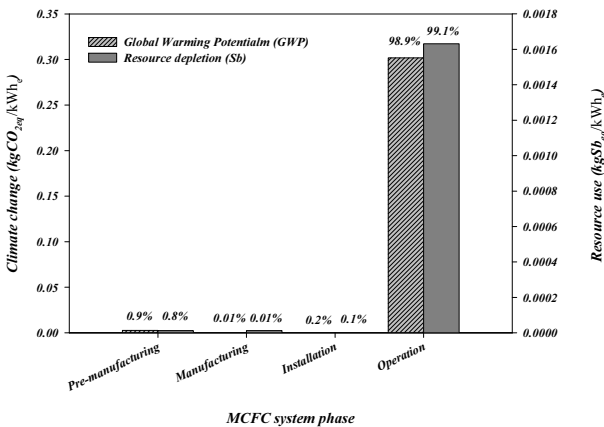


Fig. 2. Environmental impact of MCFC system

이다. MCFC 시스템의 지구온난화 영향은 운영단계에서 3.02E-01 kgCO<sub>2eq</sub>/kWh<sub>e</sub>로 도시가스(LNG)의 연료개질에 의한 직접배출량과 연료생산에 의한 온실가스 배출량에 기인한 것으로 분석되었다. 이는 운영단계에서 전력 및 열(스팀)을 생산하기 위한 투입되는 도시가스(LNG)가 개질 과정에서 온실가스를 배출하게 되며, 간접적으로 공정에 필요한 전기를 사용함으로써 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다.

MCFC 시스템별 자원고갈도 지구온난화 영향과 동일하게 운영단계의 연료생산에 의한 영향이 1.63E-03 kgSb<sub>eq</sub>/kWh<sub>e</sub>로 가장 높게 나타났다. 운영단계에서 자원고갈에 가장 영향을 많이 미치는 물질은 이산화탄소로 나타났으며, 이는

전기와 열(스팀)을 생산하는 과정에서 투입되는 도시가스(LNG) 때문으로 분석되었다.

### 3.2 제조전단계의 환경영향

Table 3은 MCFC 시스템의 제조전단계에서의 환경영향을 나타낸 것으로, 지구온난화는 2.74E-03 kgCO<sub>2eq</sub>/kWh<sub>e</sub>, 자원고갈은 1.32E-05 kgSb<sub>eq</sub>/kWh<sub>e</sub>로 나타났다. 제조전단계는 스택, 기계주변장치(Mechanical Balance of Plant, M-BOP), 전기주변장치(Electrical Balance of Plant, E-BOP)로 구성되며, 스택에서 지구온난화와 자원고갈에서 70% 이상으로 가장 큰 환경영향이 있는 것으로 분석되었다.

제조전단계의 스택제조에 대한 환경영향이 가장 크게 나타났는데, 이는 스택 수명에 따라 20년간 4회가 교체되는 데 이로 인해 발생하는 환경부하를 모두 포함하고 있기 때문으로 분석되었다.

### 3.3 제조단계의 환경영향

Fig. 3은 MCFC 시스템의 제조단계에서 발생하는 환경영향을 단위공정별로 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 스택에 의한 환경영향으로 셀에 의한 환경영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 스택에 의한 지구온난화의 영향은 1.44E-03 kgCO<sub>2eq</sub>/kWh<sub>e</sub>, 자원고갈은 6.31E-06 kgSb<sub>eq</sub>/kWh<sub>e</sub>의 환경영향을 보였으며, 지구온난화와 자원고갈은 스택 전체 환

Table 3. Environmental impact of MCFC system in pre-manufacturing phase

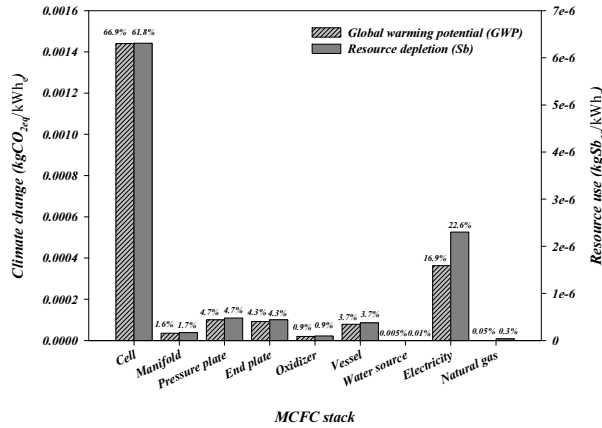
구분	단위	Stack(%)	M-BOP(%)	E-BOP(%)	계(%)
지구온난화	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>e</sub>	2.15E-03(78.7)	2.15E-04(7.9)	3.67E-04(13.4)	2.74E-03(100)
자원고갈	KgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>e</sub>	1.02E-05(77.4)	5.84E-07(4.4)	2.39E-06(18.1)	1.32E-05(100)

경영향의 66.9%, 61.8%를 각각 보였다. 그 다음으로 전기, press plate, end plate, vessel 등에 의한 환경영향이 비교적 높은 것으로 분석되었다.

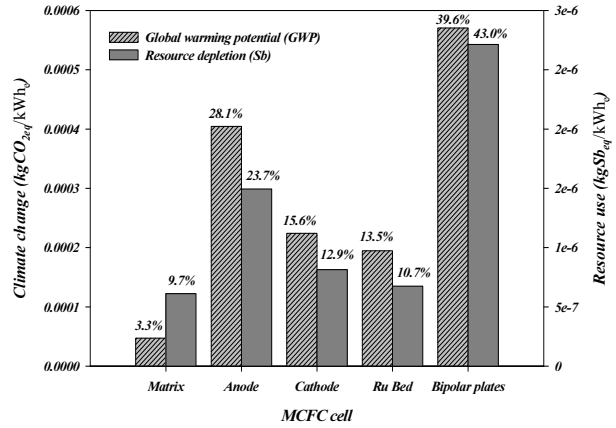
Fig. 3(b)는 셀에 의한 환경영향을 나타내었는데 Fig.

3(c)에서 보는바와 같이 주요재질인 스테인레스강인 분리판이 셀 전체 환경영향의 약 40%를 차지하는 것으로 나타났다.

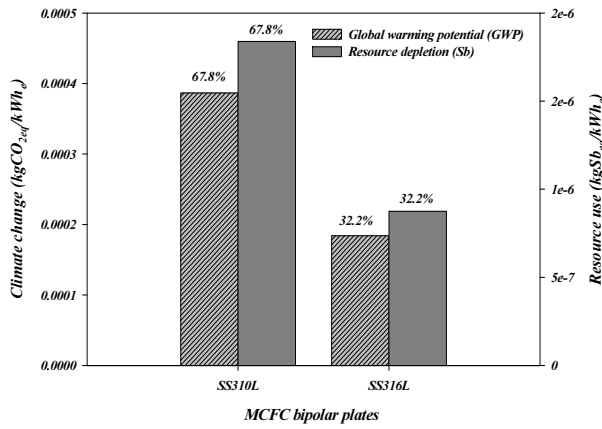
Fig. 3(d)와 Fig. 3(e)는 MCFC 시스템의 연료극(anode)



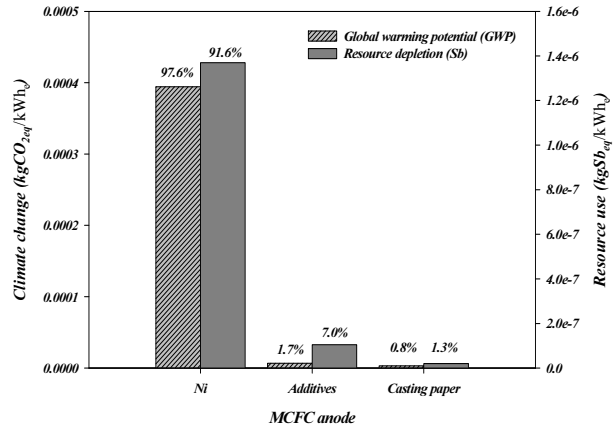
(a)



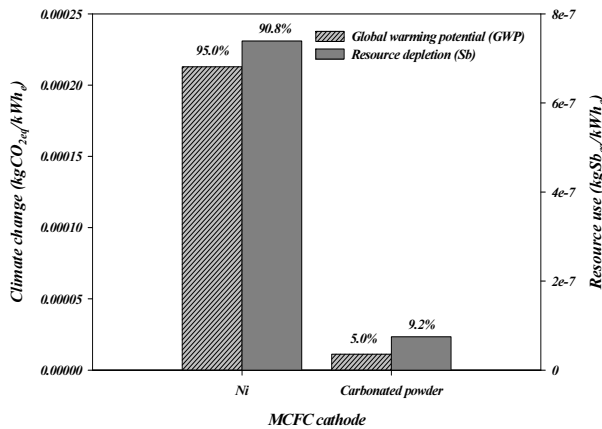
(b)



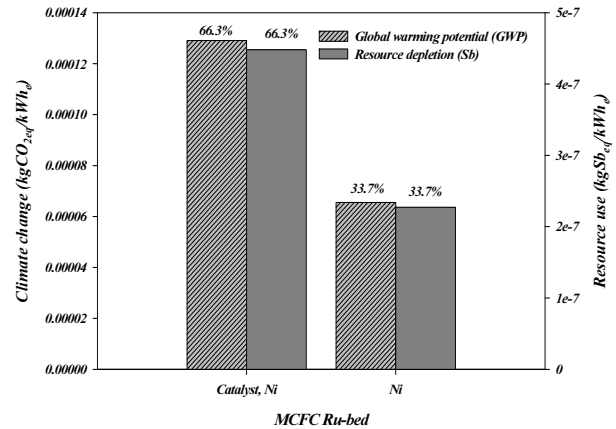
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 3. Environmental impacts of MCFC system in manufacturing phase

과 공기극(cathode)에 의한 환경영향을 나타낸 것으로, Anode와 cathode는 니켈(Ni) 촉매에 의해 환경영향이 높은 것으로 분석되었다. 특히, 지구온난화 영향은 anode 97.6%, cathode 95%로 높은 환경영향을 보였다.

Fig. 3(f)는 MCFC 시스템의 RU-bed에 의한 환경영향을 나타낸 것으로, Anode와 cathode와 동일하게 Ni로 인하여 발생된 환경영향으로 나타났다.

MCFC 시스템의 전과정 측면에서 환경영향은 스택의 셀에서 가장 큰 것으로 나타났으며, 분리판>anode>cathode>RU-bed 순으로 환경영향이 높게 나타났다. 원인물질로는 Ni에 의한 환경영향이 큰 것으로 분석되었다.

### 3.4 설치단계의 환경영향

Table 4는 MCFC 시스템의 설치단계에서 발생하는 환경영향을 나타낸 것이다. 직접배출은 연료전지를 설치할 때 이용되는 기계설비와 연료전지 시범가동(conditioning)에 이용되는 도시가스(LNG) 사용에 의한 것이며, 간접배출은 전기사용에 의한 것이다. 전과정 측면에서 설치단계는 0.1~0.2%의 낮은 수준으로 환경영향이 있는 것으로 나타났다.

Table 4. Environmental impact of MCFC system in installation phase

구분	단위	직접배출	간접배출
지구온난화	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>e</sub>	3.25E-06	2.20E-05
자원고갈	KgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>e</sub>	1.39E-08	1.40E-07

Table 5. Environmental impact of MCFC system in operation phase

구분	단위	LNG	수자원
지구온난화	kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>e</sub>	3.02E-01	6.28E-05
자원고갈	KgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>e</sub>	1.63E-03	4.03E-07

Table 6. Construction of scenario analysis

시나리오	구분	시나리오분석 내용	
1	할당인자변화	열이용률의 감소	열이용률 100% → 70%
2	촉매무게변화	MEA 내 Ni 촉매 무게 감소	Ni 무게 2,486.2 kg → 1,243.1 kg
3	수명증가	운영시간의 증가	5년간 40,000시간 → 6년간 48,000시간
4	재활용률의 변화	컴포넌트(제품)의 재활용률 증가	금속류: 0% → 99.7%, 100% 합성수지: 0% → 58.8, 85%, 100%
5		원료물질(Ni)의 재활용률 증가	Ni 재활용: 0% → 70%, 90%

### 3.5 운영단계의 환경영향

Table 5는 운영단계에서의 환경영향을 나타낸 것으로 전기와 열에너지를 생산하는 과정에서 투입되는 도시가스(LNG) 때문으로 분석되었으며, 운영단계에서 발생하는 환경영향은 MCFC 시스템의 전과정 측면에서 약 99% 수준으로 대부분 운영 시에 환경영향이 있는 것으로 나타났다.

### 3.6 시나리오분석

시나리오 분석의 구성은 Table 6과 같이 할당 인자 변화, 촉매 무게 변화, 수명증가, 컴포넌트와 원료물질 재활용률의 변화 총 5개로 구성하였으며, 시나리오 결과해석은 지구온난화와 자원고갈을 중심으로 하였다.

#### 3.6.1 시나리오 1: 할당 인자 변화

시나리오 1은 MCFC 시스템의 열사용률 할당인자의 변화에 따른 환경영향을 살펴보았다. Table 6과 같이 베이스라인의 열사용률을 100%로 적용하고, 이때의 전기와 열의 할당 비율은 55:45로 계산 되었다.

본 연구에서 시나리오분석에 이용된 열사용률은 실측평균치를 이용하였으며, 열이용률은 70%를 적용하고, 이때의 전기와 열의 할당 비율은 63.6:36.4로 계산되었다. 열사용률 변화에 따른 시나리오 결과는 Table 7에 나타내었으며, 결과해석은 베이스라인을 100%로 하여 이상이면 환경영향이 증가되는 것을 의미하며, 이하이면 환경영향이 감소되는 것을 의미한다. 시나리오 1 분석결과 MCFC 시스템의 열사용률이 70%로 저하됨에 따라 지구온난화 영향과

Table 7. Results of scenario 1 analysis

구분	베이스라인	시나리오1
지구온난화	100%	115.6%
자원고갈	100%	115.6%

자원고갈은 동일하게 15.6% 상승하였으며, 연료전지 시스템 운영 시 열을 기반으로 연료전지를 운영하게 되면 지구 온난화 영향을 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

### 3.6.3 시나리오 2: 촉매 무게 변화

시나리오 2는 MEA 내 촉매(Ni)의 무게변화량에 따른 시나리오 구성으로 베이스라인의 Ni 무게는 본 연구에서 적용한 실측무게를 적용하였으며, MCFC 시스템의 경우 Ni 저감량 목표치가 명확히 설정되어 있지 않아 Ni의 촉매무게 변화량 시나리오 구성은 베이스라인 기준 50%를 적용하였다. 시나리오 2의 분석결과는 Table 8에 나타내었으며, MCFC 시스템의 전과정 측면에서 Ni 촉매의 기여도가 낮은 것으로 나타나 원료사용량 저감에 따른 환경부하도 낮은 것으로 도출되었다.

### 3.6.3 시나리오 3: 수명증가

시나리오 3은 연료전지의 효율개선을 위한 컴포넌트의 최적화에 필요한 시설연속운전 기간의 변화에 따른 환경영향을 분석하였다. Table 9에 수명증가에 따른 시나리오 분석결과를 제시하였으며, MCFC 시스템 관점에서 시설연속운전 기간의 변화에 따른 지구온난화 영향과 자원고갈은

Table 8. Results of scenario 2 analysis

구분	베이스라인	시나리오1
지구온난화	100%	100%
자원고갈	100%	100%

Table 9. Results of scenario 3 analysis

구분	기준	베이스라인	시나리오1
지구온난화	시스템	100%	99.8%
	스택	100%	83.3%
자원고갈	시스템	100%	99.8%
	스택	100%	83.3%

Table 10. Results of scenario 4 analysis

구분	기준	베이스라인	시나리오1 (국가통계 활용)	시나리오2 (금속 100%)	시나리오3 (합성수지 85%)	시나리오4 (합성수지 100%)
지구온난화	시스템	100%	99.4	99.4	99.4	99.4
	스택	100%	23.2	23.1	-	-
자원고갈	시스템	100%	99.8	99.8	99.8	99.8
	스택	100%	73.8	73.8	-	-

미미한 것으로 나타난 반면 스택에 한정하여 6년간 48,000 시간의 시설운전에 대한 지구온난화 영향과 자원고갈은 각각 16.7%가 저감되는 결과를 보였다.

### 3.6.4 시나리오 4: 컴포넌트(제품) 재활용률의 변화

시나리오 4는 연료전지 시스템과 스택에 대한 컴포넌트의 재활용에 대한 시나리오로 구성하여 분석하였다. 연료전지 재활용 컴포넌트의 금속류는 철, 스테인리스스틸, 알루미늄, 구리 등이며, 합성수지는 PE, PP, PET 등의 플라스틱류로 구분된다. 국가통계에 의한 재활용에서 금속류는 99.7%, 합성수지는 58.8%이며, 매립에서 금속류는 0.3%, 합성수지는 1.4%, 소각에서 금속류는 0%, 합성수지는 39.8%의 비율을 적용하였다<sup>[22]</sup>. 재활용률의 변화 시나리오 수행 방법은 한국산업 기술원의 탄소성적표지 안내서에 고시된 재활용, 소각, 매립 비율을 적용하여<sup>[18]</sup>, 재활용되는 물질의 회피효과를 기반으로 환경영향 시나리오를 분석하였다. Table 10은 컴포넌트의 재활용률 변화에 따른 분석결과로, MCFC 시스템의 지구온난화 영향은 전과정 측면에서 스택 기준 스택에 투입되는 물질을 재활용을 할 경우, 스택제조와 비교하면 약 76%의 환경영향이 저감되었으며, 자원고갈은 약 23%의 환경영향이 저감되었다. 이와 같은 결과를 바탕으로, MCFC 시스템 제품의 재활용에 따른 환경영향은 큰 것으로 분석되어, 사용 후 폐기단계에서 제품에 대한 재활용이 반드시 필요할 것으로 사료된다.

### 3.6.5 시나리오 5: 원료물질 재활용률의 변화

시나리오 5는 MCFC 시스템의 원료물질인 Ni의 재활용 시나리오로, Ni의 공정회수율은 90%로 고정하고<sup>[1]</sup>, 재활용의 변화에 따른 환경영향의 변화에 따른 시나리오 분석을 수행하였다. Table 11은 원료물질의 재활용률 변화에 따른 시나리오 분석결과로 MCFC 연료전지 시스템의 원료물질에 대한 지구온난화 영향은 스택 기준 투입되는 물질을 재활용할 경우, 스택제조와 비교하면 약 75%의 지구온난화 영

Table 11. Results of scenario 5 analysis

구분	기준	베이스라인	시나리오1	시나리오2
지구온난화	시스템	100%	100%	99.4%
	스택	100%	23.2%	15.7%
자원고갈	시스템	100%	99.8%	99.8%
	스택	100%	73.8%	68.3%

향이 저감되었으며, 특히 MCFC 스택의 Ni은 환경영향에 대해 민감도가 큰 것으로 나타났다. 자원고갈은 지구온난화 대비 환경영향 저감은 작은 것으로 나타났지만, 약 30% 수준의 환경영향 저감효과가 있는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

본 연구는 LCA 방법론을 활용하여 MCFC 시스템에 대하여 전과정평가와 시나리오 분석을 수행하였다. MCFC 시스템경계는 제조전단계, 제조단계, 설치단계, 운영단계 및 폐기단계로 구성하여 시스템 전체를 대상으로 환경영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

MCFC 시스템의 지구온난화와 자원고갈은 각각  $3.05E-01$  kgCO<sub>2eq</sub>/kWh<sub>e</sub>,  $1.65E-03$  kgSb<sub>eq</sub>/kWh<sub>e</sub>로 나타났으며, 지구온난화와 자원고갈의 주요원인은 도시가스(LNG) 개질에 의한 운영단계에서 약 99%의 환경영향이 있는 것으로 분석되었다.

MCFC 스택 중 셀에서 지구온난화 영향은 66.9%, 자원고갈은 61.8%의 환경영향이 발생하였으며, 원인물질로는 Ni의 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다.

시나리오 분석결과, MCFC 시스템에서 생산되는 열이용률의 감소는 환경영향의 증가, 시설연속운전 기간의 증가는 환경영향의 감소, MEA 내 촉매무게는 환경영향에 미미한 것으로 분석되었다. 특히, 시설운전시간의 증가는 MCFC 시스템의 수명과 내구성 향상 등의 효율성 향상 측면에서 중요한 요인으로 분석되었다. 폐기단계의 폐기물 재활용 시나리오 분석에서는 제품과 원료물질의 재활용률이 증가함에 따라 환경영향은 저감되는 결과를 보였다.

본 연구결과 전과정 측면에서 MCFC 시스템의 환경영향을 저감하기 위해서는 운영단계, 스택, Ni, 시스템 수명 및 제품과 원료물질의 재활용이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2015년도 녹색기술센터 주요사업으로 수행한 연구과제(2015-005)의 일환으로 수행되었으며, 본 논문은 과제내용을 수정·보완하여 작성하였습니다.

#### References

- [1] Pehnt, M., 2003, "Life cycle analysis of fuel cell system components", Handbook of Fuel Cells.
- [2] Lunghi, P., Bove, R., Desideri, U., 2004, "Life-cycle-assessment of fuel-cells-based landfill-gas energy conversion technologies", Journal of Power Sources, 131(1): 120-126.
- [3] Raugei, M., Bargigli, S., Ulgiati, S., 2005, "A multi-criteria life cycle assessment of molten carbonate fuel cells (MCFC)—a comparison to natural gas turbines", International Journal of Hydrogen Energy, 30(2): 123-130.
- [4] Pehnt, M., 2001, "Life-cycle assessment of fuel cell stacks", International Journal of Hydrogen Energy, 26(1): 91-101.
- [5] Desideri, U., Zepparelli, F., 2005, "A comparison between the LCA of a PEMFC and an MCFC system for the production of electric energy, and traditional energy conversion systems", In ASME 2005 3rd International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, American Society of Mechanical Engineers, pp. 683-690.
- [6] Lunghi, P., Bove, R., 2003, "Life cycle assessment of a molten carbonate fuel cell stack", Fuel Cells, 3(4): 224-230.
- [7] Alkaner, S., Zhou, P., 2006, "A comparative study on life cycle analysis of molten carbon fuel cells and diesel engines for marine application", Journal of power sources, 158(1): 188-199.
- [8] Monaco, A. and Di Matteo, U., 2011, "Life cycle analysis and cost of a molten carbonate fuel cell prototype", International Journal of Hydrogen Energy, 36(13): 8103-8111.
- [9] Strand, K. H. and Aarskog, K. J., 2010, "Life cycle



- assessment of Fuel Cells onboard ships. Master Thesis”, Norwegian University of Science and Technology.
- [10] Zucaro, A., Fiorentino, G., Zamagni, A., Bargigli, S., Masoni, P., Moreno, A., Ulgiati, S., 2013, “How can life cycle assessment foster environmentally sound fuel cell production and use”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(1): 453-468.
- [11] Agll, A. A. A., Hamad, Y. M., Hamad, T. A., Thomas, M., Bapat, S., Martin, K. B., Sheffield, J. W., 2013, “Study of a molten carbonate fuel cell combined heat, hydrogen and power system: energy analysis”, *Applied Thermal Engineering*, 59(1): 634-638.
- [12] ISO(International Organization for Standardization), 2006, “14040: Environmental management–life cycle assessment–principles and framework”, London: British Standards Institution.
- [13] ISO(International Organization for Standardization), 2006, “14044: Environmental management–life cycle assessment–principles and framework”, London: British Standards Institution.
- [14] IEC(International Electrotechnical Commission), 2015, “Fuel cell technologies: TC 105, <http://www.iec.ch/>.
- [15] 녹색기술센터, 2015, “LCA 기반 기후변화대응 기술의 지속가능 발전전략 도출”, 녹색기술센터, pp. 73-123.
- [16] Pehnt, M., 2002, “Life cycle assessment of fuel cell systems”, *Erscheint in fuel cell handbook*, 3.
- [17] Pré consultants, 2007, “Simapro tutorial”, Simapro ver. 7.0, <https://www.pre-sustainability.com/simapro>.
- [18] 한국환경산업기술원, 2015, “탄소성적표지”, [http://www.edp.or.kr/lci/lci\\_intro01.asp](http://www.edp.or.kr/lci/lci_intro01.asp).
- [19] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006, “2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories”, IGES(Institute for Global Environmental Strategies), Japan.
- [20] 한국환경공단, 2016, “지자체 온실가스 배출량 산정지침 ver. 4.0”, 한국환경공단.
- [21] 한국가스공사, 2015, “가스정보”, <http://www.kogas.or.kr/>.
- [22] 환경부, 2013, “전국 폐기물 발생 및 처리현황”, 환경부.