

이산화탄소 배출을 최소화하는 용융탄산염 연료전지 하이브리드 시스템들의 성능 비교

안지호¹ · 윤석영¹ · 김동섭^{2†}

¹인하대학교 대학원, ²인하대학교 기계공학과

Performance Comparison of Molten Carbonate Fuel Cell Hybrid Systems Minimizing Carbon Dioxide Emissions

JI HO AHN¹, SUK YOUNG YOON¹, TONG SEOP KIM^{2†}

¹Grad. School of Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22212, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22212, Korea

†Corresponding author :
kts@inha.ac.kr

Received 5 January, 2017
Revised 10 January, 2017
Accepted 28 February, 2017

Abstract >> Interests in fuel cell based power generation systems are on the steady rise owing to various advantages such as high efficiency, ultra low emission, and potential to achieve a very high efficiency by a synergistic combination with conventional heat engines. In this study, the performance of a hybrid system which combined a molten carbonate fuel cell (MCFC) and an indirectly fired micro gas turbine adopting carbon dioxide capture technologies was predicted. Commercialized 2.5 MW class MCFC system was used as the based system so that the result of this study could reflect practicality. Three types of ambient pressure hybrid systems were devised: one adopting post-combustion capture and two adopting oxy-combustion capture. One of the oxy-combustion based system is configured as a semi-closed type, while the other is an open cycle type. The post-combustion based system exhibited higher net power output and efficiency than the oxy-combustion based systems. However, the semi-closed system using oxy-combustion has the advantage of capturing almost all carbon dioxide.

Key words : MCFC(용융탄산염 연료전지), CO₂ capture(이산화탄소 포집), Post-combustion capture(연소후 포집), oxy-combustion(순산소연소), semi-closed(반밀폐)

Nomenclature

α : activity
 F : faraday's constant
 E : voltage, V

η : efficiency
 \bar{h} : molar specific enthalpy, kJ/kmol
HRU : heat recovery unit
 I : current, A
 J : current density, A/m²

LHV	: low heating value, kJ/kg
\dot{m}	: mass flow rate, kg/s
\dot{n}	: molar flow rate, kmol/s
P	: pressure, kPa
\dot{Q}	: heat transfer rate, kW
R	: cell resistance, Ω
\bar{R}	: gas constant, kJ/kg-K
T	: temperature, K
\dot{W}	: power, kW

Subscripts

0	: standard condition
an	: anode
aux.	: auxiliary
ca	: cathode
conv.	: conversion
DC	: direct current
FC	: fuel cell
i	: species index
in	: inlet
misc	: miscellaneous
n	: nernst
NG	: natural gas
out	: outlet

1. 서론

분산발전에 대한 관심이 증가하는 가운데 연료전지가 이 같은 수요에 적합할 것으로 기대되고 있다¹⁾. 일반적인 열기관은 여러 단계의 에너지변환을 거치기 때문에 고효율을 달성하기 어렵다. 그러나 연료전지는 화학 반응을 통한 직접적인 발전으로 기존의 열기관에 비해 높은 효율을 달성 가능하다. 또한 연소반응이 없기 때문에 이론적으로 SOx, NOx 그리고 미세먼지 같은 불필요한 물질이 배출되지 않는다. 연료전지는 전해질과 작동온도에 따라 여러 종류로 구분 가능하다. 차량용으로 사용하는 저온형 연료전

지부터 가스터빈(Gas Turbine, GT)과 결합하여 고효율의 하이브리드 시스템(hybrid system)을 구축할 수 있는 고온형 연료전지까지 다양하다. 특히 고온형 연료전지인 용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)는 이미 수 MW급의 제품이 상용화 되어 있는 상태이다. 현재 개발 단계인 MCFC/GT 하이브리드 시스템은 현실적인 설계조건을 반영하여 상압형으로 설계하는 것이 일반적이다. 하이브리드 시스템을 구성하는 방법에 따라 성능이 달라 질 수 있기 때문에 관련 연구가 지속적으로 수행되고 있다²⁾.

국제 에너지 기구(International Energy Agency, IEA)에 의하면 1971년 이래로 화석연료 사용량이 150% 이상 증가함에 따라 이산화탄소 배출 또한 매년 증가 추세이다³⁾. 특히 현재 추세로 이산화탄소의 배출이 지속된다면 하천 및 해안지역의 홍수 발생이 증가하고 가뭄과 식량부족 위험이 심화될 것이라고 예측되고 있다⁴⁾. 이산화탄소 배출의 40%를 차지하고 있는 발전업계에서도 직접적인 이산화탄소 포집 기술을 적용함으로써 온실가스 배출 억제를 위해 노력하고 있다⁵⁾. 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage, CCS)기술은 연소후 포집, 연소 전 포집 그리고 순산소연소로 구분 가능하다⁶⁾. 연소 후 및 연소 전 포집은 가스내 이산화탄소를 분리하기 위해 아민 기반의 흡수식 포집 공정을 사용한다. 연소 전 포집은 연료 개질 후 발생하는 이산화탄소를 연소기로 공급하기 전에 포집하는 기술이다. 연소후 포집을 적용한 시스템은 배기가스로부터 이산화탄소를 포집한다. 마지막으로 순산소연소 방식은 화학적 방법 대신 가스 조성의 응축온도 차이를 이용하여 이산화탄소를 분리한다. 하지만 순산소 공급을 위한 극저온 공기분리기(cryogenic Air Separation Unit, ASU)와 같은 하부시스템이 필요하고 일부 구성품의 개조를 요구한다. 순산소연소 기술을 발전 시스템에 적용하는 방식에 따라 연소기술만 활용하거나 시스템을 반밀폐 형태로 구성이 가능하다. 반밀폐 순산소 연소 사이클은 이산화탄소를 작동유체로 사용하며 배기가스가 압축기 입구로 재순환되기 때문에 대기 중으로 배출이 전무하다. 또한 일반적인 복합화력발

전 시스템과 구성이 유사하기 때문에 상대적으로 타
 른 포집 방법에 비해 구성이 단순한 장점이 있다. 선
 행 연구에서는 가스터빈 규모에 따른 반밀폐 순산소
 연소 복합화력발전(semi closed oxy fuel combustion
 combined cycle)의 성능을 확인하였고 일반적인 복
 합화력발전이 연소후 포집 기술을 적용한 경우와 함
 께 성능을 비교하였다⁷⁾. 또한 MCFC에 순산소연소
 기술을 적용할 때 산소 공급 방식에 따른 성능을 비
 교한 연구⁸⁾도 수행되었다.

MCFC를 기반으로 하는 시스템에서 이산화탄소
 포집을 고려한 다양한 연구가 수행되고 있지만 이를
 반밀폐 순산소연소 사이클로 구성한 사례는 전무하
 다. 따라서 본 연구에서는 반밀폐 사이클로 설계된
 MCFC/GT 하이브리드 시스템의 구성을 제안하였다.
 또한 일반적인 순산소연소 기술 및 연소후 포집 방
 법을 적용한 시스템 등 총 4가지의 시스템들과 비교
 분석함으로써 각각의 특징을 확인하였다.

2. 시스템 구성 및 모델링

2.1 시스템 구성

2.1.1 이산화탄소 포집 공정

시스템 구성에 대한 본격적인 설명에 앞서 이산화
 탄소 포집 및 저장을 위한 주요 기기들을 먼저 다루
 고자 한다. 본 절에서 설명하는 주변기기들은 다음절
 에서 다룰 MCFC 기반 시스템에 적용할 것이다.

이산화탄소 분리를 위해 화학적 방법을 사용하는
 모노에탄올아민(Mono Ethanol Amine, MEA)공정⁹⁾

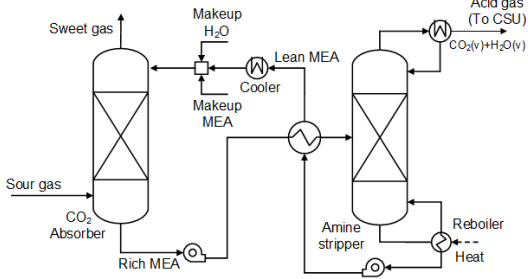


Fig. 1. Configuration of MEA process

의 구성을 Fig. 1에 도시하였다. 크게 흡수탑과 재생
 탑으로 이루어져 있는 본 공정은 수용액 형태의 MEA
 를 이산화탄소의 흡수제로 사용한다. 흡수탑에서 MEA
 와 이산화탄소가 결합하고 나머지는 대기 중으로 배
 출된다. 재생탑에서는 시스템으로부터 열을 공급받아
 MEA 수용액과 이산화탄소가 분리된다. MEA 수용액
 은 흡수탑으로 재순환 되고, 추출된 이산화탄소는 Fig. 2
 의 이산화탄도 분리기(Carbon dioxide Separation Unit,
 CSU)¹⁰⁾로 공급된다. CSU에서 각 성분의 응축온도 차이
 를 이용하여 세차례의 가압 및 응축과정을 거쳐 이산화
 탄소와 수분을 분리하고 최종적으로 이산화탄소를 액화
 상태로 저장한다. 두 공정을 통칭하여 CCS라 명명한다.

2.1.2 MCFC 기반 시스템

Fig. 3에 기준이 되는 MCFC시스템을 나타내었다.
 상용화 되어있는 2.5 MW급 MCFC 시스템의 제품
 카탈로그에 제시되어 있는 입출구 조건을 사용하였
 다. 일부 부족한 설계변수와 구성에 대한 정보는 선
 행연구¹¹⁾를 참고하여 모델링하였다. 본 시스템은 프
 리컨버터, 내부개질기, 셀, 후연소기와 기타 부품으
 로 구성되어 있다. 외부로부터 공급되는 물은 배기가
 스와 열교환을 통해 가열된 후 증기상태로 연료와
 혼합된다. 프리컨버터로 공급된 증기-연료 혼합기체
 는 메탄 외 연료들이 선 개질된다. 일차 개질된 연료
 는 공기극 출가스와 열교환을 통해 가열된 후 내

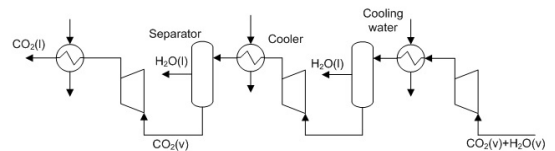


Fig. 2. Configuration of the carbon capture unit

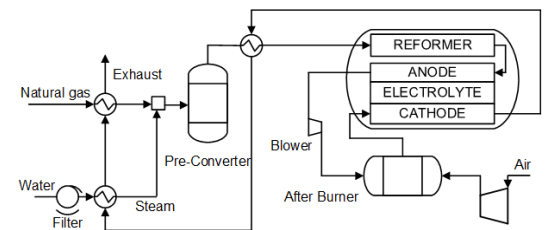


Fig. 3. Configuration of the MCFC system

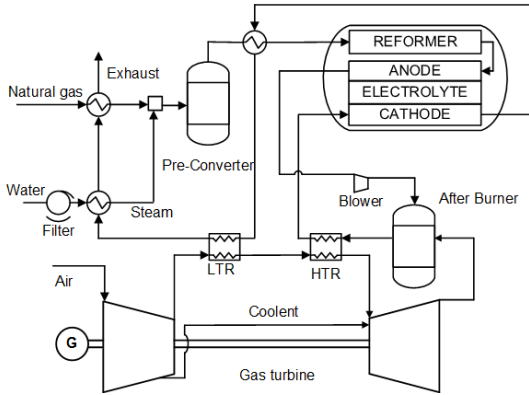


Fig. 4. Configuration of the atmospheric pressure MCFC hybrid system

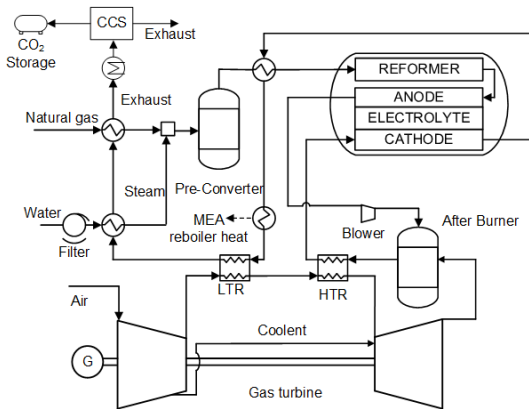


Fig. 5. Configuration of the atmospheric pressure MCFC hybrid system adopting post-combustion capture technology

부개질기로 공급된다. 내부 개질을 적용하였기 때문에 흡열 증기 개질 반응에 필요한 열은 셀에서 직접 전달된다. 개질된 연료는 연료극으로 공급되어 셀 반응을 통해 전기가 만들어진다. 미반응연료는 손실된 압력만큼 블로워에서 가압 후 공기와 함께 후연소에서 연소한다. 공기극으로 공급된 연소가스 내 산소(O₂)와 이산화탄소(CO₂)는 전자(2e-)와 결합하여 탄산이온(CO₃²⁻)이 된다. 전해질을 통과한 탄산이온은 연료극에서 개질된 연료와 반응하여 CO₂, H₂O 및 전자를 생성한다. 연료극 출구가스는 후연소기로 공급되고 공기극 출구가스는 물 및 천연가스와 열 교환 후 대기중으로 배출된다.

MCFC와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템

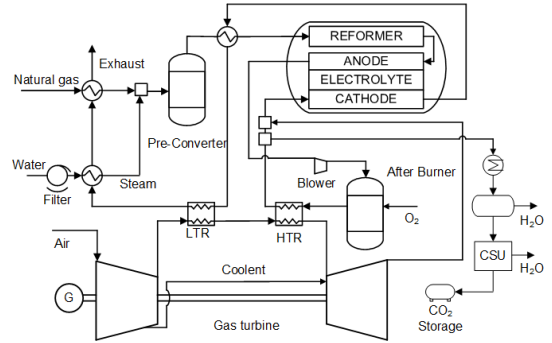


Fig. 6. Configuration of the atmospheric pressure MCFC hybrid system adopting oxy-combustion capture technology(open cycle)

의 구성을 Fig. 4에 나타내었다. 상압형 간접가열식 하이브리드 시스템¹²⁾으로 모델링 하였으며 압력비와 같은 200 kW급 소형 가스터빈(Micro Gas Turbine, MGT)의 주요 설계변수¹³⁾를 차용하였다. 하이브리드 시스템에서 MCFC 부분은 단독 시스템과 유사하나 공기극으로 공기 공급 전 일련의 과정들이 추가된다. 가스터빈 압축기에서 가압된 공기는 온도대별로 두 개의 열교환기로부터 가열되어 터빈으로 공급된다. 가열전 가압 공기의 일부를 추기함으로써 베어링 냉각을 고려하였다. 터빈 배기가스는 미반응 연료와 함께 후연소기에서 연소후 공기극으로 공급된다. 이후 과정은 MCFC 단독 시스템과 유사하다.

Fig. 5에는 연소후 포집 기술을 적용한 하이브리드 시스템을 도시하였다. 앞서 언급한 하이브리드 시스템 후단에 포집 공정을 추가함으로써 이산화탄소의 포집이 가능하다. MEA 공정에서 필요한 열은 저온 열교환기(Low Temperature Recuperator, LTR)로 공급하기 전 공기극 배기가스의 열을 일부 공급하는 것으로 가정하였다.

순산소연소 기술을 적용한 하이브리드 시스템을 Fig. 6과 7에 나타내었다. 일반적인 하이브리드 시스템과 유사하나 몇 가지 다른 점이 존재한다. 먼저 연소 및 반응을 위한 산소는 ASU에서 공급받는다. 미반응 연료와 산소의 연소를 위해 후연소기 대신 순산소연소기가 요구된다. 연소가스는 CO₂와 H₂O로 이루어져 있어 Fig. 2의 CSU에서 기계적으로 분리

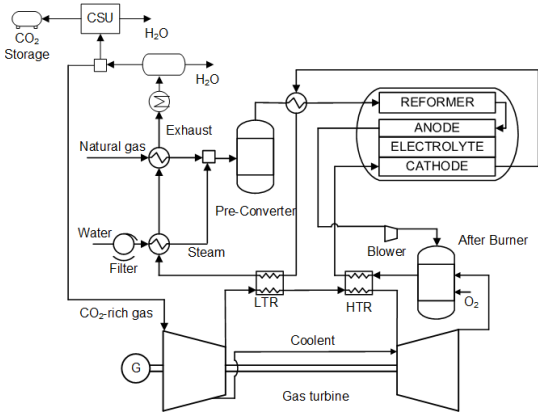


Fig. 7. Configuration of the atmospheric pressure MCFC hybrid system adopting oxy-combustion capture technology (semi-closed cycle)

가 가능하다. Fig. 6은 순산소연소 기술만 적용한 시스템이다. Fig.4의 하이브리드 시스템과 달리 터빈 배기가스를 공기극으로 바로 공급한다. 연소가스는 고온 열교환기(High Temperature Recuperator, HTR)에서 열교환 후 일부는 공기극으로 공급되고 나머지는 CSU를 통해 이산화탄소를 저장한다. Fig. 7은 배기가스를 재순환 시키는 반밀폐 형태로 구성된 시스템(이하 반밀폐 시스템)이다. 일반적인 하이브리드 시스템의 구성과 유사하며 복잡한 후처리 공정이 필요 없고 이산화탄소를 작동유체로 사용하는 것이 특징이다. 열 회수 이후 대기 중으로 배출하는 대신 응축기에서 작동유체 내 H₂O를 응축하여 제거할 수 있을 정도로 충분히 냉각한다. 수분이 제거된 이산화탄소 농후 가스는 압축기로 재순환됨으로써 배기가스 배출이 없다. 산소 및 천연가스 등 일부 추가한 유량만큼 CSU에서 이산화탄소를 저장함으로써 항상 일정한 양의 작동유체를 유지한다.

2.2 모델링

2.2.1 시스템 모델링

해석에는 상용 프로그램¹⁴⁾이 사용되었으며, 표준 대기조건 즉, ISO대기조건(15°C, 101.3kPa, 60% relative humidity)이 사용되었다. 천연가스의 조성구 공급 조건들을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Natural gas properties

Parameters	
Compositions	
Methane	0.8670
Ethane	0.0827
Propane	0.0381
i-Butane	0.0000
n-Butane	0.0111
i-Pentane	0.0000
n-Pentane	0.0004
Nitrogen	0.0008
Lower Heating Value [kJ/kg]	49,158.4
Natural gas inlet temperature [°C]	15.0
Natural gas inlet pressure [kPa]	137.3

Table 2. Performance of the reference MCFC system

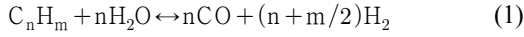
Parameters	Ref.	Model
Steam to carbon ratio*	4.923	4.923
Air Fuel ratio	34.0	34.0
Cathode inlet temperature [°C]	-	628.6
Fuel cell operating temperature [°C]*	-	648.5
Fuel utilization*	-	0.68
Current density [A/m ²]	948.0 ¹¹⁾	948.0
Cell area [m ²]*	-	1.991
Cell voltage [V]	-	0.7396
System exhaust gas temperature [°C]	358±25	325.3
System exhaust flow rate [kg/s]	4.865	4.865
HRU effectiveness*	-	0.5
Pressure losses [%]*	-	0.5~2.0
Inverter efficiency [%]*	-	95.0
Motor efficiency [%]*	-	99.5
MCFC Power [kW]	2500~2800	2652
MCFC efficiency [%]	44.0~49.0	45.75
System net power [kW]	-	2500
System efficiency [%]	-	43.12

*Design parameter of hybrid systems

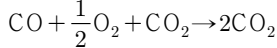
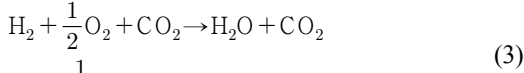
2.2.2 MCFC 모델링

기준이 되는 MCFC 시스템은 입, 출구 조건이 공개되어 있는 제품 카탈로그를 활용하여 모델링하였다. 이밖에 부족한 설계변수는 선행연구¹¹⁾를 참고하였고, 계산된 성능이 Table 2에 나타난 바와 같이 문헌값과 유사하게 되도록 결정하였다. 시스템에서 일어나는 모든 반응은 온도, 압력 조건에 따라 깁스(Gibbs) 자유에너지 최소화 원칙에 따라 계산되었다. 흡열 개질 반응에 필요한 열을 공급할 정도로 MCFC의 작동온도가 충분히 높기 때문에 내부 개질을 고

려하였다. 개질기에서는 증기개질 및 수성가스화 반응이 아래와 같이 발생한다.



수소와 일산화탄소는 셀에서 반응을 통해 전기를 생성하며 전체 반응은 다음과 같다.



셀 반응시 공급된 수소와 일산화탄소 중 반응된 물질의 비율로써 연료이용률을 정의하였다. 셀 반응으로부터 생성된 열은 흡열 증기개질 반응을 위해 내부개질기로 공급된다. 셀과 개질기의 에너지평형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Cell: } \sum_{in} \dot{n}_i \bar{h}_i + \dot{Q}_{cell} = \sum_{out} \dot{n}_i \bar{h}_i + \dot{W}_{FC,DC} \quad (4)$$

$$\text{Reformer: } \sum_{in} \dot{n}_i \bar{h}_i + \dot{Q}_{reformer} = \sum_{out} \dot{n}_i \bar{h}_i \quad (5)$$

where $\dot{Q}_{reformer} = -\dot{Q}_{cell}$

연료전지 출력은 다음과 같이 전압과 전류의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{W}_{FC,DC} = E \cdot I \quad (6)$$

연료량과 페러데이 상수로 전류를 계산할 수 있으며 전류밀도 J 는 전류를 셀 면적으로 나눈 값이다. 셀 전압은 연료전지의 중요한 설계 변수 중 하나로서 연료전지 작동온도, 연료극 및 공기극 내부 조성의 분압 등에 영향을 받는다. 이때 셀 전위는 아래의 네른스트 식을 사용하여 계산하였다.

$$E_n = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[\left(\frac{\alpha_{H_2,an} \cdot \alpha_{O_2,ca}^{1/2}}{\alpha_{H_2O,an}} \right) \left(\frac{\alpha_{CO_2,ca}}{\alpha_{CO_2,an}} \right) \right] \quad (7)$$

where $\alpha = P_i / P_{ambient}$

전압 손실을 고려한 셀 전압은 문헌¹⁵⁾을 참고하여 아래의 식으로 나타내었다.

$$E = E_n - (R_{an} + R_{ca} + R_{ohm})J \quad (8)$$

$$R_{an} = 2.27 \cdot 10^{-9} \cdot \exp\left(\frac{53,500}{RT}\right) \cdot \alpha_{H_2}^{-0.42} \cdot \alpha_{H_2O}^{-1.0} \cdot \alpha_{CO_2}^{-0.17}$$

$$R_{ca} = 7.505 \cdot 10^{-10} \cdot \exp\left(\frac{77,229}{RT}\right) \cdot \alpha_{O_2}^{-0.43} \cdot \alpha_{CO_2}^{-0.09}$$

$$R_{ohm} = 1.1 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left[3,016 \cdot \left(\frac{1}{T_{cell}} - \frac{1}{923.15}\right)\right]$$

직, 교류 변환 손실을 고려하여 연료전지의 출력은 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{W}_{FC} = \dot{W}_{FC,DC} \cdot \eta_{conv.} \quad (9)$$

Table 2에 나타낸 계산 결과는 상용 제품의 출력 및 효율 범위 내에 있으므로 모델링의 신뢰성이 확인되었다.

2.2.3 하이브리드 시스템 및 기타 구성부 모델링

하이브리드 시스템에서도 MCFC의 설계변수는 Table 2의 값들 (* 표시된 값들)을 동일하게 사용하였고 그 외 하이브리드 시스템에 필요한 변수들은 Table 3에 정리하였다. 본 하이브리드 시스템은 상압형이고 간접가열식이기 때문에 터빈입구온도를 유지하기 위해서는 연소기 대신 두 개의 열교환기를 사용한다.

Table 4에는 MEA공정과 CSU 그리고 ASU의 설계변수를 나타내었다. MEA공정은 문헌⁹⁾을 참고하여 모델링 하였다. 초기조건과 동일한 조건(포집률: 82-85%, CO₂: 3.73mole-%, H₂O: 6.71mole-% 등)에서 요구되는 비에너지소모(specific energy consumption)가 3.409-3.636 MJ/kg-CO₂ (문헌: 3.4 - 3.65 MJ/kg-CO₂)

Table 3. Performance of the MCFC hybrid system

Parameters	Model
Pressure ratio	4.2
Compressor isentropic efficiency [%]*	83.0
Turbine isentropic efficiency [%]*	87.8
Mechanical efficiency [%]*	96.0
Generator efficiency [%]*	94.0
DPC efficiency [%]*	96.0
LTR effectiveness	0.5
HTR effectiveness	0.8

Table 4. Performance of auxiliary components

Parameters	Model
MEA process ⁹⁾	
Inlet gas temperature [°C]	40
Number of stage in absorber	10
Murphree efficiency in absorber	0.25
Number of stage in stripper	6
Reflux ratio in stripper	0.3
Reboiler temperature [°C]	120
Minimum DT in heat exchange [°C]	10
CSU ¹⁰⁾	
Each stage (approximately) pressure ratio	8.8
CO ₂ compressor pressure [kPa]	15,000
Cooler outlet temperature [°C]	40
ASU ¹⁶⁾	
O ₂ purity[%]	95
O ₂ delivery pressure [kPa]	2,685
O ₂ Specific power consumption [kWh/ton-O ₂]	245.0

Table 5. Consist of auxiliary power consumption

Systems	ASU	CCS	Misc.
Conventional (Fig. 4)	X	X	O
Post-comb. (Fig. 5)	X	O	O
Oxy-comb. (Fig. 6)	O	O	O
Semi-closed oxy-comb. (Fig. 7)	O	O	O

로써 모델의 신뢰성을 확인하였다. CSU는 문헌¹⁰⁾에 따라 모델링하였으며 가압 및 응축과정을 거친 이산화탄소는 15,000 kPa, 60°C의 액화상태로 저장된다. 연소 및 반응에 필요한 산소량을 계산 한 후 완전한 반응을 위해 계산된 산소량의 3%를 추가로 공급하였다. 산소의 공급량에 따라 ASU의 소모되는 에너지는 문헌¹⁶⁾을 참고하였다.

MGT의 출력은 기계효율, 발전효율, 전력 조정기 (Digital Power Controller, DPC) 효율을 고려하였다. 각 시스템의 성능은 다음과 같이 나타내었다.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{FC} + \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{aux} \quad (10)$$

$$\eta_{net} = \frac{\dot{W}_{net}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{NG}} \quad (11)$$

이때 ब्लॉ우 동력등을 포함한 소모동력은 아래와 같이 계산되며 각각의 대상에 따라 고려되는 소모동력은 Table 5에 나타내었다.

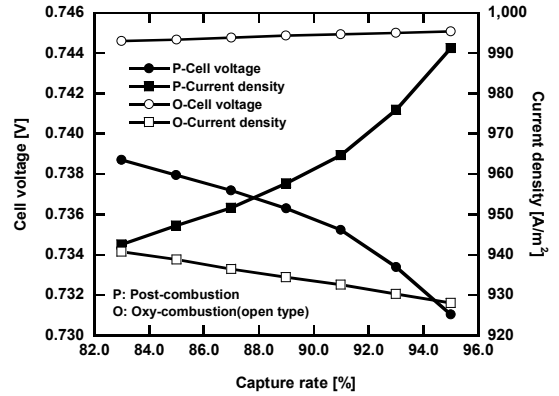


Fig. 8. Variation in cell voltages and current densities with carbon dioxide capture rate

$$\dot{W}_{aux} = \dot{W}_{ASU} + \dot{W}_{CCS} + \dot{W}_{misc} \quad (12)$$

개질과정으로 인해 이산화탄소만의 함수로 포집률을 정의하기에는 무리가 있다. 따라서 연료와 포집된 이산화탄소의 탄소 성분을 바탕으로 포집률을 구하였다. 각 시스템은 동일한 비교를 위해 시스템 공급 유량과 연료전지 작동온도를 일정하게 유지하도록 하였다. 따라서 실제 연료전지를 구현 시 각각의 요구 조건에 따라 셀 내부를 새로 설계하는 것으로 가정할 수 있다.

3. 결과 및 논의

3.1 이산화탄소 포집률에 따른 시스템 분석

연소후 포집 및 일반적인 순산소연소 기술을 적용한 시스템에서 셀 전압과 전류밀도의 변화를 이산화탄소 포집률에 따라 Fig. 8에 나타내었다. MEA는 이산화탄소의 100% 흡착이 불가능 하며, MCFC에서는 셀 반응을 위한 최소한의 이산화탄소가 필요하기 때문에 두 시스템의 포집률은 최대 95%까지 가능하다. 반면에 반밀폐 시스템은 MCFC에서 요구되는 이산화탄소의 공급이 충분하며, 시스템의 구성상 100% 포집만 가능함으로 포집률 변화에 따른 비교는 불가능하다.

연소후 포집을 적용한 시스템은 포집률이 증가할

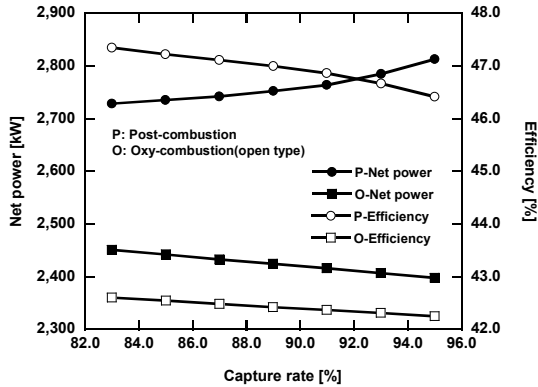


Fig. 9. Variation in net power and system efficiency with carbon dioxide capture rate

수록 MEA공정에서 필요로 하는 열이 증가한다. 연료전지 작동온도를 유지하기 위해서는 연료공급의 증가가 요구되며 따라서 연료전지의 전류밀도가 상승하게 된다. 반면에 증가한 전류밀도로 인해 전압손실이 발생하여 전압은 감소하게 된다. 전류밀도 상승률이 전압 손실보다 우세하기 때문에 이산화탄소 포집률이 상승할수록 연료전지 출력이 증가한다.

순산소연소 기술을 적용한 시스템은 포집률이 상승할수록 공기극 입구유량이 감소하게 된다. 따라서 연료전지 작동 온도 유지를 위한 연료 공급량이 줄어들어 전류밀도가 감소하게 된다. 또한 포집률이 증가함에 따라 공기극 입구유량의 이산화탄소 분압이 떨어진다. 그럼에도 불구하고 감소한 전류밀도로 인해 저항손실이 줄어들어 전압은 미세하게나마 증가한다. 결과적으로 전류밀도의 하락률이 전압 상승률보다 우세하기 때문에 이산화탄소 포집률이 증가할수록 연료전지의 출력이 저하된다.

Fig. 9에는 연소후 포집 및 순산소연소 기술을 적용한 시스템의 총 출력과 시스템 효율을 이산화탄소 포집률에 따라 나타내었다. 순산소연소 기술을 적용한 시스템은 산소공급 시 요구되는 ASU 등의 소모동력으로 인해 연소후 포집을 적용한 시스템보다 총 출력이 낮게 나타난다. 공통적으로 포집률이 증가할수록 효율이 저하되지만, 그 원인은 서로 다르다. 연소후 포집을 적용한 시스템의 효율 저하는 총 출력의 증가에도 불구하고 MEA공정에서 요구되는 에너

Table 6. Performance summary of various systems

	Open type			Semi-closed
	Conventional	Post-comb.	Oxy-comb.	
CO ₂ capture rate [%]	-	95	95	100
CO ₂ fraction in Cathode	0.1172	0.1354	0.0985	0.6156
Cell voltage [V]	0.7600	0.7310	0.7451	0.8028
Current density [A/m ²]	802.7	991.3	928.1	875.9
FC power [kW]	2,307	2,741	2,615	2,659
GT power [kW]	228.3	242.5	467.0	195.2
Gross power [kW]	2,536	2,983	3,082	2,855
Aux. power [kW]	25.64	170.1	684.5	615.3
ASU power [kW]	-	-	434.0	409.6
CCS power [kW]	-	137.2	220.7	178.0
Misc. power [kW]	25.64	32.91	29.79	27.72
Net power [kW]	2,510	2,813	2,398	2,239
NG fuel supply [kg/s]	0.0999	0.1233	0.1155	0.1090
Efficiency [%]	51.14	46.42	42.25	41.82
Compressor inlet flow [kg/s]	4.010	4.010	4.010	4.010
Turbine inlet temp. [°C]	753.2	769.2	1,021.2	742.3
Cathode inlet flow [kg/s]	5.575	5.943	5.706	6.183
Cathode inlet temp. [°C]	636.2	629.4	631.4	644.8
System exhaust temperature [°C]	206.5	66.62	150.2	208.4
Fuel cell temp. [°C]	648.5	648.5	648.5	648.5

지에 기인한다. 상대적으로 많은 양의 연료공급에 비하면 총 출력은 낮은 편이다. 반면에 순산소연소 기술을 적용한 시스템은 포집률이 가스터빈 출력에 영향을 미치지 않는다. 따라서 총 출력의 변화는 연료전지 출력에 기인한다. 포집률이 높아질수록 연료전지 출력이 저하되어 총 출력과 시스템 효율이 유사한 비율로 낮아진다.

3.2 각각의 포집 공정을 적용한 시스템 비교

Table 6에 기준이 되는 MCFC 하이브리드 시스템 및 연소후 포집, 순산소연소 기술을 적용한 시스템들의 성능을 나타내었다. 3.1절의 계산결과를 바탕으로 연소후 포집 및 순산소연소 기술을 적용한 시스템의 포집률은 95%일 때 성능을 나타내었으며, 순산소연소 기술 중 반밀폐 사이클로 구성된 시스템은 100%에 근접하게 이산화탄소 포집이 가능하다.

앞서 언급한 바와 같이 연소후 공정이 적용된 시

시스템은 MEA공정에서 요구되는 열로 인해 연료공급이 증가하게 되어 연료전지의 출력이 향상된다. 또한 증가한 미반응 연료는 터빈 입구온도를 상승시켜 가스터빈 출력을 향상시킨다. 따라서 총 출력이 기준 시스템에 비해 12.1% 증가하지만 증가한 연료 및 CCS 소모동력으로 인해 효율은 9.2% 저하된다.

순산소연소 기술이 적용된 시스템은 증가한 공기극 입구 유량과 감소한 온도로 인해 연료전지 작동 온도를 유지하기 위해서는 기준시스템보다 더 많은 연료가 필요하다. 따라서 연료전지 출력이 향상된다. 후연소기로 공기대신 적은 유량의 산소만 공급되기 때문에 높은 연소기 출구온도를 달성할 수 있다. 높은 연소가스의 온도로 인해 터빈 입구온도가 크게 증가하여 다른 시스템들과 비교하여 가장 큰 가스터빈 출력을 보인다. 하지만 ASU 소모동력이 큰 폭으로 출력을 저하시켜 총 출력은 기준 시스템에 비해 4.5% 감소하고 효율은 17.4% 저하된다.

반밀폐 시스템은 앞선 두 시스템과 달리 작동유체가 대부분 이산화탄소로 구성되어 있다. 이산화탄소의 비열은 공기보다 높아 연소가스의 온도가 기준 시스템보다 낮으며 연료전지의 작동온도의 유지를 위해서는 더 많은 연료가 필요하다. 증가한 연료는 앞서 설명한 바와 같이 전류밀도의 상승을 초래한다. 또한 공기극 입구온도의 이산화탄소 함량이 증가함으로써 다른 시스템들에 비해 전압이 가장 높다. 위 두 가지 요인으로 인해 연료전지 출력이 기준 시스템보다 향상된다. 하지만 낮은 연소가스의 온도는 터빈 입구온도의 저하를 야기하고 또한 작동유체의 비열 증가는 터빈 출구온도의 상승을 초래하여 가스터빈 출력을 저하시킨다. 따라서 다른 시스템들과 비교하여 터빈 출력이 가장 낮다. 순산소연소를 위한 ASU의 소모동력을 반영하여 총 출력은 기준 시스템보다 10.8% 감소하고 효율은 18.2% 저하된다.

4. 결론

본 연구에서는 상용화되어있는 2.5 MW급 MCFC 시스템을 바탕으로 이산화탄소 포집이 결합된 MCFC/GT

하이브리드 시스템을 모사하고 포집 방법에 따른 시스템 성능차이를 비교분석하였다.

1) 이산화탄소 포집률이 상승할수록 연소후 포집을 적용한 시스템에서는 총출력이 향상되나 순산소연소 기술을 적용한 시스템은 저하된다. 포집률의 상승에 따라 모든 시스템들의 효율이 감소하지만 그 원인은 서로 다르다. 연소후 포집을 적용한 시스템에서는 증가한 연료량에 기인하지만 순산소연소 기술을 적용한 시스템에서는 반응 연료량의 감소에 따른 출력 저하와 포집을 위한 소모동력이 증가하기 때문이다.

2) 95%의 포집률을 바탕으로 하는 연소후 포집 사이클과 역시 95% 포집율을 갖는 순산소연소 시스템, 그리고 100%에 가까운 포집이 가능한 반밀폐 시스템의 성능을 일반적인 하이브리드 시스템의 성능과 비교 분석하였다. 연소후 포집 기술을 적용한 시스템은 기준 시스템 대비 12.1%의 출력향상과 9.2%의 효율저하를 보이는데 이는 다른 시스템에 비하여 상대적으로 성능저하폭이 작은 것이다. 반면에 순산소연소 기술을 사용한 시스템들은 산소생산을 위한 소모동력이 커서 상대적으로 성능저하가 크다. 그러나, 반밀폐 순산소연소 사이클은 거의 모든 이산화탄소를 포집할 수 있다는 장점을 보였다.

3) 본 연구 결과에 의하면 MCFC 하이브리드 시스템에서 연소후 포집기술을 적용시 가장 높은 성능을 보인다. 하지만 이산화탄소 분리를 위해 복잡한 화학공정이 요구되며 손실되는 화학물질을 지속적으로 보충해야 하는 문제가 있다. 반면에 순산소연소 기술을 적용한 시스템은 포집공정은 상대적으로 단순하게 구성 가능하나 산소공급을 위한 소모동력으로 인해 효율저하가 크다. 따라서 순산소연소 기술을 적용하면서 성능저하를 최소화할 수 있는 기술, 특히 시스템 인테그레이션 기술에 대한 연구를 통해서 순산소연소 기술의 장점을 살리는 노력이 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 한국산업기술평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구과제

입니다(NO. 10052280, 최고효율 70% 이상 및 CO2 회수 90% 이상 달성하기 위한 기술융합형 발전플랜트 엔지니어링 기초기술 개발).

References

1. H. K. Jun, S. J. Lee, D. H. Lee, M. S. Kim and S. J. Bae, "Trends in Development of Residual Fuel Cell System", Korean Industrial Chemistry News, Vol. 14, No. 2, 2011, pp. 10-25.
2. K. S. Oh and T. S. Kim, "Performance analysis on various system layouts for the combination of an ambient pressure molten carbonate fuel cell and a gas turbine". Journal of Power Sources, Vol. 158, No. 1, 2006, pp. 455-463.
3. Statistics, IEA, "CO2 emissions from fuel combustion-highlights". International Energy Agency, Paris, 2015.
4. R. K. Pachauri, M. R. Allen, V. R. Barros, J. Broome, W. Cramer, R. Christ, and N. K. Dubash, "Climate change 2014: synthesis Report", IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.
5. M. A. González-Salazar, "Recent developments in carbon dioxide capture technologies for gas turbine power generation", International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 34, 2015, pp. 106-116.
6. J. D. Figueroa, T. Fout, S. Plasynski, H. McIlvried, and R. D. Srivastava, "Advances in CO2 capture technology - the US Department of Energy's Carbon Sequestration Program". International journal of greenhouse gas control, Vol. 2 No. 1, 2008, pp. 9-20.
7. H. J. Yang, D. W. Kang, J. H. Ahn and T. S. Kim, "Evaluation of design performance of the semi-closed oxy-fuel combustion combined cycle". Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 134, No. 11, 2012, 111702.
8. L. Duan, L. Yue, W. Qu, and Y. Yang, "Study on CO2 capture from molten carbonate fuel cell hybrid system integrated with oxygen ion transfer membrane". Energy, Vol. 93, 2015, pp. 20-30.
9. L. E. Øi, "Aspen HYSYS simulation of CO2 removal by amine absorption from a gas based power plant," SIMS2007 conference, October 30-31. 2007.
- 10) H. Li and J. Yan, "Preliminary study on CO2 processing in CO2 capture from oxy-fuel combustion," ASME paper, GT2007-27845, 2007.
11. J. H. Choi, T. S. Kim and B. H. Kwak, "Performance Prediction and Economic Assessment of Atmospheric Pressure MCFC/Gas Turbine Hybrid System with Indirect Turbine Firing". Transactions of the KSME B, Vol. 38, No. 1, 2014, pp. 31-39.
12. H. Ghezel-Ayagh, J. Walzak, D. Patel, J. Daly, H. Maru, R. Sanderson and W. Livingood, "State of direct fuel cell/turbine systems development". Journal of Power Sources, Vol. 152, 2005 pp. 219-225.
13. H. D. Shin, D. W. Kang, T. S. Kim, M. K. Choi and P. J. Park, "Design Parameter Sensitivity Analysis of a 200kW Class Micro Gas Turbine System". The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 15 No. 6, 2012, pp. 39-45.
14. Aspen Technology, 2011, Aspen One HYSYS, ver. 7.3.
15. S. Campanari, G. Manzolini and P. Chiesa, "Using MCFC for high efficiency CO2 capture from natural gas combined cycles: comparison of internal and external reforming", Applied energy, Vol. 112, 2013, pp. 772-783.
16. J. M. Amann, M. Kanniche, and C. Bouallos, "Natural gas combined cycle power plant modified into O2/CO2 cycle for CO2 capture", Energy Conversion and Management, Vol. 50, 2009, pp. 510-521.