



암모니아 활용 고체산화물 연료전지 발전시스템의 엑서지 분석

쿠엔 · 배용균 · 안국영 · 이선엽* · †김영상

한국기계연구원 무탄소연료발전연구실, *한국기계연구원 그린동력연구실
(2023년 8월 16일 접수, 2023년 9월 22일 수정, 2023년 9월 24일 채택)

Exergetic Analysis of Ammonia-fueled Solid Oxide Fuel Cell Systems for Power Generation

Thai-Quyen Quach · Young Gyun Bae · Kook Young Ahn
Sun Youp Lee* · †Young Sang Kim

Department of Zero-carbon Fuel and Power Generation, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM), 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

**Department of Mobility Power Research, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM), 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea*

(Received August 16, 2023; Revised September 22, 2023; Accepted September 24, 2023)

요약

고체 산화물 연료전지의 연료로 암모니아를 사용하는 것은 고효율, 환경 친화성, 보관 및 운송의 용이성으로 인해 주목받고 있다. 암모니아 활용 SOFC 시스템의 효율을 더욱 높이면 시스템의 비효율적인 구성 요소를 이해해야 하며 이를 위해 엑서지 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 단순 연료전지 시스템(FC), 연료극 재순환 시스템(RC-FC) 및 수분 제거 재순환 시스템(RC-WR-FC)의 세 가지 시스템에 대해 엑서지 분석을 수행하였다. FC, RC-FC 및 RC-WR-FC의 엑서지 효율은 각각 48.7%, 51.6% 및 58.4%이었으며, 세 시스템 모두에서 SOFC 스택은 엑서지 파괴의 주요 원인이었다. 또한 버너, 공기 열 교환기 및 냉각기/응축기와 같이 낮은 효율을 가진 부품들을 재구성한다면 효율을 높일 수 있다.

Abstract - Using ammonia as fuel for solid oxide fuel (SOFC) cells has become an attractive topic nowadays due to its high efficiency, environmental friendliness, and ease of storage and transportation. Several configurations of ammonia-fed SOFC systems have been proposed and investigated, demonstrating high electrical efficiency. However, to further enhance efficiency, it is crucial to understand the inefficient components of the system. The exergy concept is well-suited for this purpose, making exergetic analysis essential for ammonia-fed SOFC systems. This study conducts an exergetic analysis for three selected systems: a simple fuel cell system (FC), an anode off-gas recirculation system (RC-FC), and a recirculation system with water removal (RC-WR-FC). The results reveal that the exergetic efficiencies of the FC, RC-FC, and RC-WR-FC are 48.7%, 51.6%, and 58.4%, respectively. In all three systems, the SOFC stack is the main source of exergy destruction. However, other components with relatively low exergetic efficiency, such as the burner, air heat exchanger, and cooler/condenser, offer greater opportunities for improvement.

Key words : solid oxide fuel cell, ammonia, exergy, efficiency

†Corresponding author: yskim@kimm.re.kr

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

연료 전지는 공급된 연료의 화학 에너지로부터 전력을 생산하는 에너지 변환장치이다. 다양한 연료전지 중 600~900°C의 고온에서 작동하는 고체산화물연료전지(SOFC)가 가장 높은 에너지 효율을 보인다. SOFC는 수소, 천연 가스, 에탄올, 메탄올 및 암모니아와 같은 여러 유형의 연료를 사용할 수 있어 최근 주목받고 있으며 연료 저장 능력, 전기 효율 및 온실 가스 배출을 고려할 때 암모니아는 SOFC에 가장 적합한 연료 중 하나이다. 암모니아는 25°C의 주변 온도에서 11 bar의 적당한 압력으로 저장할 수 있어 활용에 용이하다. 암모니아 분해 반응은 흡열반응이며, SOFC에서 내부 개질이 이루어지면 열을 흡수하여 연료 전지의 냉각에 필요한 에너지를 절약할 수 있어 시스템의 효율을 높일 수 있다. 또한 암모니아 활용 SOFC는 시스템 구성에서 탄소를 고려하지 않아도 되기에 전체 시스템에서 탄소 관련 열 및 화학 공정이 제거될 수 있다.

이러한 중요한 이점으로 인해 다양한 SOFC 시스템들이 제안되고 있다. 일본에서는 1 kW급 암모니아 활용 SOFC 스택 실험을 수행하였으며, 암모니아 SOFC 시스템에 대한 기초적인 연구도 수행하였다[1,2].

SOFC 시스템의 효율을 높이기 위하여 하이브리드 시스템도 고려되고 있으며, 특히 가스 터빈을 SOFC 스택과 결합하면 각각 75% 및 64%의 발전 효율을 달성할 수 있다[3, 4]. 그러나 가스터빈은 이상적인 작동 조건에 도달하기 위해서는 용량이 커야하고 소규모 시스템에서 효율성이 크게 저하된다[5]. 1 MW 이하 소규모에서 암모니아 SOFC 시스템을 효율적으로 운영하기 위해 SOFC-엔진 하이브리드 시스템(FC-엔진), 응축수가 있는 재순환 시스템(RC-WR-FC) 및 엔진이 있는 재순환 시스템(RC-WR-FC-엔진) 등이 고려되었다[6]. 이들 시스템은 단순 시스템(FC)의 54.7%와 비교하여 각각 60.9%, 67.4% 및 67.5%의 효율을 보였으며 시스템 효율과 단순도를 고려하여 RC-WR-FC 구성이 권장되었다[6].

암모니아 활용 SOFC 시스템을 성공적으로 구현하려면 시스템의 열 손실에 대한 이해가 필요하다. 이러한 맥락에서 열 시스템에서 열역학적으로 비효율적인 구성 요소를 식별하는 엑서지 분석이 매우 적합하다. 이러한 분석은 열역학적으로 비효율적인 부분을 해결하여 시스템을 개선할 수 있도록 도와준다.

시스템을 설계할 때 고려할 부분은 발전 효율과 단순한 구성이다. 따라서 본 연구에서는 SOFC 단독 시스템(Fuel Cell, FC), 재순환이 적용된 SOFC 시스템

(ReCirculation Fuel Cell, RC-FC) 및 수분 제거 재순환 SOFC 시스템(ReCirculation Water Removal Fuel Cell, RC-WR-FC)을 연구 대상으로 하였고 엑서지 분석을 수행하였다. 시스템은 EBSILON®Professional 프로그램을 이용하여 모델링을 한 뒤 열-물질 수지분석을 수행하였다[7]. 이후 MATLAB을 활용하여 시스템의 엑서지 분석을 수행하였다.

II. 시스템 구성

앞서 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 3개의 암모니아 공급 SOFC 시스템에 대해 분석하고자 한다. Fig. 1.a는 FC 시스템의 개략도를 보여준다. 연료와 공기는 모두 동일한 온도에서 연료 전지 스택에 공급된다.

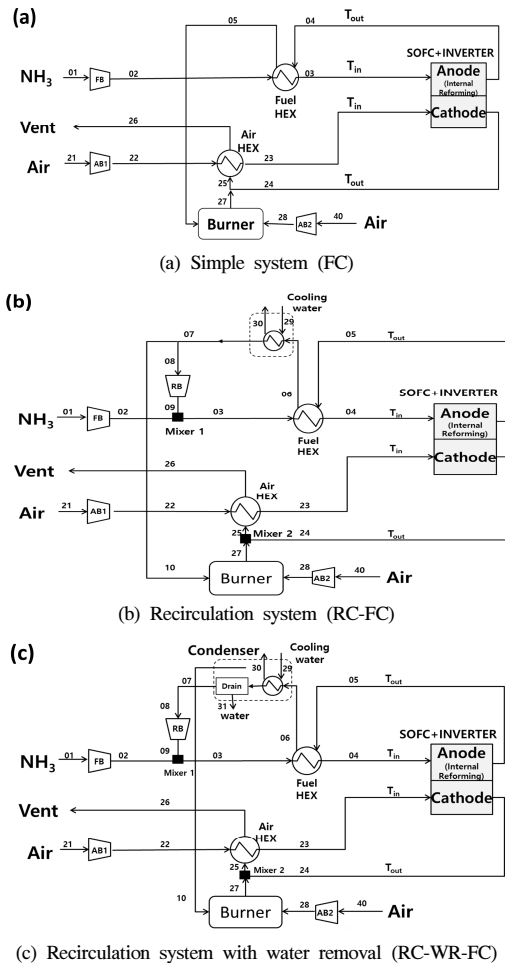


Fig. 1. NH₃-fed SOFC system schematics.

연료극 배출 가스는 연료 열교환기에서 들어오는 연료에 열을 공급한 후 버너에서 연소된다. 공기극 측에서는 스택에서 배출되는 뜨거운 가스가 버너에서 연소된 가스와 혼합된 다음 스택으로 공급되는 공기를 가열하는 데 사용된다. 본 연구에서 시스템에 외부 개질기를 설치하는 경우는 고려하지 않았다. 외부 개질기를 활용하게 되면 열활용이 비효율적으로 이루어져서 전기 효율이 낮기 때문이다.

RC-FC, RC-WR-FC 시스템의 개략도는 Fig. 1.b 및 Fig. 1.c에 나와 있다. 이러한 시스템에서 연료극 배출 가스의 열은 연료 열교환기에 의해 회수된 다음 130°C(RC-FC)로 냉각되거나 45°C(RC-WR-FC)에서 물을 응축되어 연료 농도를 상승시키게 된다. 이러한 시스템 구성은 시스템의 전체 연료 활용도를 향상시켜 시스템 효율을 높일 수 있다.

냉각/응축 후 연료극 배출 가스는 두 개의 유동으로 분리된다. 하나의 유동은 라인 08의 재순환 송풍기(RB)에 의해 들어오는 연료로 재순환되고 다른 유동은 버너(라인 10)에 공급된다. 공기극측 공기는 공기 열교환기에서 연료극측과 동일한 온도로 가열된 후 스택으로 유입되며, 스택에서 배출된 이후에는 연료극 배가스의 혼합되어 열교환기에서 열을 배출하고 외부로 배기된다(라인 26).

III. 엑서지 분석

엑서지 분석에 앞서, 일반적인 운전조건에서 에너지 분석을 수행하였다. SOFC 스택의 전류 밀도는 3000 A/m²이며 스택의 연료 이용률은 0.7, 스택의 입출구 온도차는 80°C이다[6]. 또한 버너의 연소 가스 온도는 버너 재료의 손상을 방지하기 위해 845°C로 제한하였다[8]. 계산을 위한 기타 가정 및 매개변수는 Table 1에 나열하였다.

발전 시스템의 가장 중요한 가치 중 하나는 전기 효율이다. 본 연구에서는 발전 출력을 100 kW로 고정시킨 상태에서 시스템에 투입된 연료의 저위발열량(Lower Heating Value, LHV)를 기준으로 효율을 비교하였으며, 효율 식은 아래와 같다.

$$\eta = \frac{Power_{net}}{(\dot{m}LHV)_{input}} \quad (1)$$

제안된 RC, RC-FC 및 RC-WR-FC 시스템에 대해 공정해석을 수행하였으며 그 결과 전기 효율은 각각 51.71%, 54.83% 및 62.06%이다. RC-FC 및 RC-WR-FC 시스템은 수소극 배출 가스의 재순환률을 조정하여 최적화하였으며[6], 본 연구에서의 재순환률은 각

각 47%와 73%이다. 엑서지 계산은 MATLAB 및 Cantera 툴킷을 사용하여 수행되었다[9]. 세 시스템에 대한 물리적, 화학적 엑서지를 포함한 엑서지 결과는 Table 2~4와 같다.

엑서지 분석을 하기 위해서는 exergy of product ($\dot{E}_{P,k}$)와 exergy of fuel($\dot{E}_{F,k}$)가 각 구성 요소와 전체 시스템에 대해 정의되어야 한다. Bejan 등에 따르면 exergy of product는 구성 요소 또는 시스템에서 생성된 엑서지를 나타낸다[10]. Exergy of fuel는 product를 생성하는 데 소비된 자원을 나타낸다. 엑서지 파괴($\dot{E}_{D,k}$)는 구성 요소 수준에서 exergy of fuel와 exergy of product 간의 차이로 정의된다.

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{P,k} \quad (2)$$

엑서지 효율 ϵ 는 exergy of product와 exergy of fuel의 비율로 정의된다.

Table 1. Operating parameters for ammonia-fed SOFC systems

SOFC Stack	Active cell area (m ²)	0.1x0.1
	Current density (A/m ²)	3000
	Anode inlet temperature (°C)	710
	Cathode inlet temperature (°C)	710
	Anode outlet temperature (°C)	790
	Cathode outlet temperature (°C)	790
	Working temperature (°C)	750
	Working pressure (bar)	1.0
	Fuel utilization (-) [4]	0.7
Inverter efficiency (-)		0.92
Blowers	Isentropic efficiency (-)	0.5
	Mechanical efficiency (-)	0.9
Heat exchangers	Heat loss (%)	5.0
	Maximum effectiveness (-)	0.9
Burner	Max. outlet gas temperature (°C)	845
Surrounding environment	Temperature (°C)	25
	Pressure (bar)	1.0
NH3 fuel	LHV (kJ/kg)	18,673

Table 2. Results of exergy calculation for the simple system (FC)

Stream	Physical exergy (kW)	Chemical Exergy (kW)	Total Exergy (kW)
S01	0.000	205.483	205.483
S02	0.165	205.483	205.648
S03	9.834	205.483	215.317
S04	20.239	56.485	76.724
S05	7.647	56.485	64.133
S21	0.000	0.714	0.714
S22	1.159	0.714	1.873
S23	69.255	0.714	69.969
S24	76.977	0.770	77.747
S25	115.510	1.238	116.748
S26	23.291	1.238	24.529
S27	41.196	1.002	42.198
S28	0.146	0.158	0.304
S40	0.000	0.158	0.158
SOFC power (kW)			103.887
Fuel blower (kW)			0.394
Air blower 1 (kW)			3.137
Air blower 2 (kW)			0.356
Net power output (kW)			100.000

$$\epsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{E_{F,k}} \text{ (for } k^{th} \text{ component)} \quad (3)$$

파괴율 y 는 시스템에서 시급한 개선이 필요한, 가장 중요한 구성 요소를 식별하기 위해 정의된다.

$$y_k = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\sum_k \dot{E}_{D,k}} \quad (3)$$

Fig. 1.c에 나타난 RC-WR-FC의 전체 시스템 및 각 구성요소의 exergy of product 및 exergy of fuel의 상세한 내용은 **Table 5**에 요약되어 있으며 다른 시스템도 이와 유사하다. 믹서에서 엑서지는 오로지 파괴되며 생성되는 엑서지는 없다.

Table 3. Results of exergy calculation for the re-circulation system (RC-FC)

Stream	Physical exergy (kW)	Chemical Exergy (kW)	Total Exergy (kW)
S01	0.000	193.794	193.794
S02	0.184	193.794	193.978
S03	3.871	221.523	225.393
S04	24.180	221.523	245.702
S05	38.194	62.463	100.657
S06	13.503	62.463	75.967
S07	9.406	62.463	71.870
S08	4.421	29.358	33.779
S09	4.788	29.358	34.146
S10	4.985	33.106	38.091
S21	0.000	1.084	1.084
S22	1.761	1.084	2.845
S23	105.204	1.084	106.288
S24	118.870	1.115	119.985
S25	137.571	1.200	138.771
S26	8.928	1.200	10.128
S27	23.070	1.083	24.153
S28	0.035	0.038	0.072
S29	0.000	12.830	12.830
S30	0.159	12.830	12.989
S40	0.000	0.038	0.038
SOFC power (kW)			105.465
Fuel blower (kW)			0.436
Air blower 1 (kW)			4.236
Air blower 2 (kW)			0.085
Recirculation blower (kW)			0.708
Net power output (kW)			100.000

Table 4. Results of exergy calculation for the recirculation with water removal system (RC-WR-FC)

Stream	Physical exergy (kW)	Chemical Exergy (kW)	Total Exergy (kW)
S01	0.000	171.200	171.200
S02	0.162	171.200	171.362
S03	0.541	212.395	212.936
S04	18.393	212.395	230.788
S05	29.604	60.157	89.761
S06	7.126	60.157	67.282
S07	0.283	59.564	59.847
S08	0.206	43.482	43.688
S09	0.440	43.482	43.922
S10	0.076	16.082	16.159
S21	0.000	0.996	0.996
S22	1.617	0.996	2.613
S23	96.611	0.996	97.607
S24	108.973	1.028	110.001
S25	117.506	0.692	118.198
S26	3.177	0.692	3.869
S27	8.770	0.236	9.005
S28	0.029	0.031	0.060
S29	0.000	12.830	12.830
S30	2.154	12.830	14.984
S31	0.032	0.592	0.624
S40	0.000	0.031	0.031
SOFC power (kW)			104.874
Fuel blower (kW)			0.385
Air blower 1 (kW)			3.89
Air blower 2 (kW)			0.07
Recirculation blower (kW)			0.528
Net power output (kW)			100.001

Table 5. Definitions of exergy of fuel and exergy of product of each component and total system

Component	Exergy of fuel	Exergy of product
SOFC	$\dot{E}_4^{CH} + \dot{E}_{23}^{CH} - \dot{E}_5^{CH} - \dot{E}_{24}^{CH}$	$\dot{E}_5^{PH} - \dot{E}_4^{PH} + \dot{E}_{24}^{PH} - \dot{E}_{23}^{PH} + \dot{W}_{SOFC}$
Fuel blower (FB)	\dot{W}_{FB}	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$
Recirculation blower (RB)	\dot{W}_{RB}	$\dot{E}_9 - \dot{E}_8$
Air blower 1	\dot{W}_{AB1}	$\dot{E}_{22} - \dot{E}_{21}$
Air blower 2	\dot{W}_{AB2}	$\dot{E}_{28} - \dot{E}_{40}$
Fuel heat exchanger	$\dot{E}_5 - \dot{E}_6$	$\dot{E}_4 - \dot{E}_3$
Air heat exchanger	$\dot{E}_{25} - \dot{E}_{26}$	$\dot{E}_{23} - \dot{E}_{22}$
Condenser	$\dot{E}_6 - \dot{E}_7 - \dot{E}_{31}$	$\dot{E}_{30} - \dot{E}_{29}$
Burner	$\dot{E}_{10}^{CH} + \dot{E}_{28}^{CH} - \dot{E}_{27}^{CH}$	$\dot{E}_{27}^{PH} - \dot{E}_{28}^{PH} - \dot{E}_{10}^{PH}$
Recirculating mixer (Mixer 1)	$\dot{E}_D = \dot{E}_2 + \dot{E}_9 - \dot{E}_3$	
Blue gas mixer (Mixer 2)	$\dot{E}_{D'} = \dot{E}_{24} + \dot{E}_{27} - \dot{E}_{25}$	
System	\dot{E}_1^{CH}	\dot{W}_{SOFC}

The subscripts represent stream number while the superscripts, CH and PH, represent chemical exergy and physical exergy, respectively; W is the electric power

IV. 결과 및 분석

해석 결과 FC 시스템의 exergy of fuel 총 합이 205.48 kW인 반면 시스템에서 엑서지의 총 파괴는 81.83 kW임을 알 수 있으며 이는 **Table 6**에 요약하였다. 이때 총 엑서지 손실은 23.66 kW이다. 여기에서 엑서지의 손실과 파괴는 구분하여야 한다. 엑서지의 파괴는 공정 과정에서 비가역성으로 인해 파괴되는 엑서지를 의미하며 파괴된 엑서지는 다른 어떤 장치에서도 사용할 수 없다. 한편, 엑서지 손실은 시스템의 최종 배기라인으로 방출되는 엑서지로 정의되며 추가 공정을 통하여 재활용할 수 있다. 이 시스템에서 엑서지 손실은 시스템에 공급된 엑서지의 11.51%를 차지할 정도로 크며, 이는 기존 연구에서 논의된 바와 같

Table 6. Results of exergy analysis for the simple system (FC)

Component	Exergy of fuel (kW)	Exergy of product (kW)	Destruction (kW)	Destruction ratio (%)	Exergy efficiency (%)
SOFC	148.94	122.01	26.93	32.91	81.92
Fuel blower	0.39	0.16	0.23	0.28	41.85
Air blower 1	3.14	1.16	1.98	2.42	36.94
Air blower 2	0.36	0.15	0.21	0.26	41.11
Fuel heat exchanger	12.59	9.67	2.92	3.57	76.79
Air heat exchanger	92.22	68.10	24.12	29.48	73.84

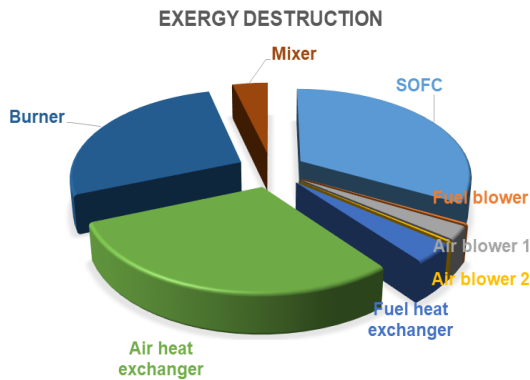


Fig. 2. Exergy destruction ratio in simple system (FC)

이 연료로 활용될 수 있는 배기 가스가 낭비되고 있기 때문이다[11].

Table 6과 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 시스템에서 엑서지의 파괴는 연료전지 스택에서 26.93 kW로 가장 많이 발생하고 그 다음으로 공기 열 교환기와 버너에서 24.12 kW 및 22.24 kW로 발생한다. 그러나 각 구성요소의 엑서지 효율을 보면 SOFC 스택이 가장 많은 양의 엑서지를 파괴함에도 불구하고 엑서지 효율이 81.92%로 상당히 높다는 것을 알 수 있다. SOFC는 내연기관, 터빈 등 기존 발전기술과 같이 중간과정 없이 화학에너지로부터 직접 전기를 생산하는 전기화학소자이기 때문에 이 값은 타당하다.

공기 열교환기와 버너는 상대적으로 높은 엑서지 파괴에도 불구하고 각각 73.84%와 60.03%로 중간 정

Table 7. Results of exergy analysis for the recirculation system (RC-FC)

Component	Exergy of fuel (kW)	Exergy of product (kW)	Destruction (kW)	Destruction ratio (%)	Exergy efficiency (%)
SOFC	159.03	133.15	25.88	29.97	83.72
Fuel blower	0.44	0.18	0.25	0.29	42.09
Recirculation blower	0.71	0.37	0.34	0.39	51.85
Air blower 1	4.24	0.03	4.20	4.87	0.82
Air blower 2	0.09	0.03	0.05	0.06	40.91
Fuel HEX	24.69	20.31	4.38	5.07	82.26
Air HEX	128.64	103.44	25.20	29.18	80.41
Cooler	4.10	0.16	3.94	4.56	3.88
Burner	32.06	18.05	14.01	16.22	56.30
Mixer 1			2.73	3.16	
Mixer 2			5.37	6.22	
System	193.79	100.00	86.36	100.0	51.60

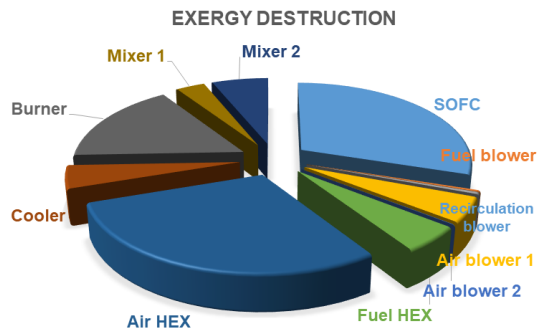


Fig. 3. Exergy destruction ratio in recirculation system (RC-FC)

도의 엑서지 효율을 보였다. 공기 블로우는 효율이 매우 낮지만 시스템의 전체 엑서지 파괴에 대한 기여도는 3% 미만으로 무시할 수 있다. 따라서 단순 암모니아 SOFC 시스템을 개선하려면 공기 열교환기와 버너에 중점을 두는 것이 현명하고 효과적인 선택이다.

RC-FC 시스템의 엑서지 분석 결과는 Table 7에 나열하였으며 시스템의 엑서지 파괴율은 Fig. 3에 표시하였다. 시스템의 exergy of fuel 총 합은 193.79 kW이

며 exergy of product와 시스템의 총 엑서지 파괴량은 각각 100 kW와 86.36 kW이고 엑서지 효율은 51.60%로 FC 시스템보다 약 3% 포인트가 높다. 수소급 배출 가스의 미반응 연료를 재활용하기 때문에 RC-FC 시스템의 총 엑서지 손실(7.44 kW)은 FC 시스템의 총 엑서지 손실(23.66 kW)보다 훨씬 낮다.

엑서지 파괴를 담당하는 주요 구성 요소는 SOFC 스택, 공기 열교환기, 버너, 믹서, 연료 열교환기 및 냉각기이다. 그 중 SOFC 스택과 두개의 열교환기는 80% 이상의 엑서지 효율을 보여 개선의 필요성이 낮다. 그러나 전체 엑서지 파괴의 18.02%를 차지하는 버너의 효율은 56.30%로 상대적으로 낮으며, 특히 냉각기는 엑서지 효율이 3.88%에 불과하고 시스템 전체 엑서지 파괴량의 약 5%를 차지한다. 이 두 구성 요소는 시스템 성능을 향상시키기 위해 개선이 필요한 부분이다.

엑서지 분석에서 도출할 수 있는 시스템 개선 아이디어는 라인 22의 공기를 가열하기 위해 라인 06(냉각기 입구)에서 현열을 회수하기 위한 추가 열교환기를 사용하는 것이다. 이를 통해 냉각기 및 버너 크기를 줄일 수 있으므로 엑서지 파괴가 감소할 것으로 예상되며, 더 높은 배기 가스 온도로 인해 엑서지 손실이 증가할 것이다. 이를 해결하기 위해 제안된 시스템은 열을 이용하는 난방 또는 냉각 장비와 같은 다른 장치를 결합하여 엑서지 손실을 연료 엑서지로 변환할 수 있다. 또한 추가적인 열교환기를 사용하면 시스템의 비용이 증가하기 때문에 엑서지 효율과 경제적 효율을 고려하여 선택해야 한다.

Table 8은 RC-WR-FC 시스템의 엑서지 분석 결과를 나타낸다. 시스템의 exergy of fuel 총 합은 171 kW이며 exergy of product와 시스템의 총 엑서지 파괴량은 각각 100 kW 및 65.58 kW이고 58.4%의 엑서지 효율을 보인다. 이 시스템에서 엑서지 손실은 5.62 kW로 계산되며, 이러한 성능 향상은 암모니아 활용 SOFC 시스템의 연료급 가스 재순환 구성에서 물 응축기의 효율성을 나타낸다.

Fig. 4에서 RC-WR-FC 시스템의 엑서지 파괴율을 보면 SOFC 스택이 36.23%로 가장 많은 부분을 차지하고 있으며, 그 다음으로 공기 열교환기가 29.48%, 버너가 11.00%, 응축기가 7.10%로 나타났다. 수분 응축장치가 없는 RC-FC 시스템에 비해 RC-WR-FC 시스템은 연료 회수로 인한 전압 손실 감소 현상이 줄어들기 때문에 SOFC 스택에서 약 2 kW의 엑서지 파괴를 절감할 수 있다. 또한 73%의 더 높은 재순환율(RC-FC 시스템은 47%)로 인해 버너 및 공기열교환기에서의 엑서지 파괴도 RC-FC 시스템의 경우보다 낮다. 전체적으로 물 제거 기능이 있는 시스템은 물 제거 기능이 없는 재순환에 비해 20.8 kW의 엑서지 파괴를

Table 8. Results of exergy analysis for the recirculation with water removal system (RC-WR-FC)

Component	Exergy of fuel (kW)	Exergy of product (kW)	Destruction (kW)	Destruction ratio (%)	Exergy efficiency (%)
SOFC	152.21	128.45	23.76	36.23	84.39
Fuel blower	0.39	0.16	0.22	0.34	42.13
Recirculation blower	0.53	0.23	0.29	0.45	44.22
Air blower 1	3.89	1.62	2.27	3.47	41.56
Air blower 2	0.07	0.03	0.04	0.06	41.38
Fuel HEX	22.48	17.85	4.63	7.06	79.42
Air HEX	114.33	94.99	19.34	29.48	83.09
Condenser	6.81	2.15	4.66	7.10	31.63
Burner	15.88	8.66	7.21	11.00	54.57
Mixer 1			2.35	3.58	
Mixer 2			0.81	1.23	
System	171.20	100.00	65.58	100.0	58.41

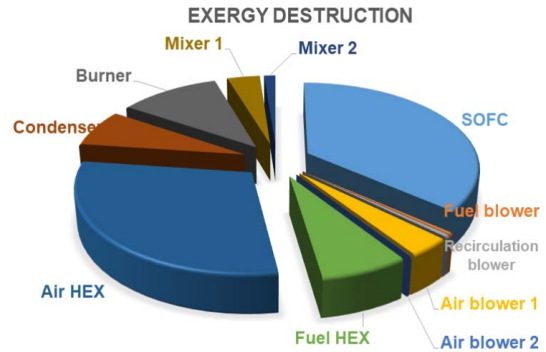


Fig. 4. Exergy destruction ratio in recirculation with water removal system (RC-WR-FC)

낮출 수 있다. 다만 RC-WR-FC 시스템의 경우 FC, RC-FC 시스템에 비해 추가적인 주변장치가 필요하며, 제어의 복잡성이 증가하여 경제적, 제어적 측면에서도 유리한지는 추가적인 연구가 필요하다.

V. 결론

암모니아 활용 SOFC 발전 시스템에서 열역학적으로 비효율적인 구성 요소를 식별하기 위해 엑서지 분석을 수행하였다. 분석을 위해 고려한 시스템은 SOFC 단독 시스템(FC), 연료극 가스 재순환 시스템(RC-FC) 및 수분 제거 재순환 시스템(RC-WR-FC)이며, 주요 결과는 다음과 같다.

(1) RC-FC 및 RC-WR-FC 시스템의 엑서지 효율은 각각 51.6% 및 58.4%로 FC 시스템의 48.7%보다 훨씬 높다. RC-WR-FC 시스템은 시스템에서 엑서지의 총 파괴를 줄여 엑서지 효율을 높이기 때문에 효과적인 시스템이다.

(2) 모든 시스템에서 버너는 비효율적이며 개선이 가장 시급한 부품이다. 또한 시스템의 전체 엑서지 파괴에 크게 기여하는 공기 열교환기(FC) 및 냉각기/응축기(RC-FC, RC-WR-FC)는 비가역적 손실을 줄이고 시스템 효율을 향상시키기 위한 개선이 필요할 수 있다.

본 연구에서 수행한 엑서지 분석은 암모니아 활용 SOFC 시스템 연구의 초기 단계이다. 제안된 시스템들은 효율 높은 시스템이지만, 공기극 및 수소극 배출 가스의 온도가 여전히 높기 때문에 열활용을 극대화시키지 못하고 있으며 이러한 시스템의 비효율적인 부분이 개선된다면 효율을 향상시킬 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었으며 (No. 20213030040110), 한국기계연구원 기관 기본사업 (Project ID: NK237G)의 지원을 받아 수행된 결과다.

REFERENCES

[1] M. Kishimoto, H. Muroyama, S. Suzuki, M. Saito, T. Koide, Y. Takahashi, T. Horiuchi, H. Yamasaki, S. Matsumoto, H. Kubo, N. Takahashi, A. Okabe, S. Ueguchi, M. Jun, A. Tateno, T. Matsuo, T.

Matsui, H. Yoshida, and K. Eguchi, "Development of 1 kW-class Ammonia-fueled Solid Oxide Fuel Cell Stack", *Fuel Cells*, **20**(1), 80-88, (2020)

[2] Okura, A. Srifa, H. Muroyama, T. Matsui, M. Kishimoto, M. Saito, H. Iwai, H. Yoshida, M. Saito, T. Koide, H. Iwai, S. Suzuki, Y. Takahashi, T. Horiuchi, H. Yamasaki, S. Matsumoto, S. Yumoto, H. Kubo, J. Kawahara, A. Okabe, Y. Kikkawa, T. Isomura, and K. Eguchi, "Comparative Study of Ammonia-fueled Solid Oxide Fuel Cell Systems", *Fuel Cells*, **17**(3), 383-390, (2017)

[3] Patel, H.C., T. Woudstra, and P.V. Aravind, "Thermodynamic Analysis of Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine Systems Operating with Various Biofuels", *Fuel Cells*, **12**(6), 1115-1128, (2012)

[4] Ishak, F., I. Dincer, and C. Zamfirescu, "Energy and exergy analyses of direct ammonia solid oxide fuel cell integrated with gas turbine power cycle", *Journal of Power Sources*, **212**, 73-85, (2012)

[5] Boukhanouf, R., *Small combined heat and power (CHP) systems for commercial buildings and institutions, in Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems*, Woodhead Publishing, (2011)

[6] Quach, T.-Q., et al., "High-efficiency ammonia-fed solid oxide fuel cell systems for distributed power generation", *Applied Energy*, **324**, 119718, (2022)

[7] EBSILON®Professional.
Available from: <https://www.ebsilon.com/en/>

[8] Lee, Y.D., *Thermodynamic, Economic and Environmental Evaluation of Solid-Oxide Fuel-Cell Hybrid Power-Generation Systems*, 2015.

[9] Cantera. Available from: <https://cantera.org/>

[10] Bejan, A., G. Tsatsaronis, and M.J. Moran, *Thermal design and optimization*, John Wiley & Sons, (1995)

[11] Quach, T.-Q., et al., "Parametric study of a high-performance ammonia-fed SOFC standalone system". *Journal of Mechanical Science and Technology*, **36**, 3193-3201, (2022)