

2 kW급 고체산화물연료전지의 고온배기가스 폐열회수를 위한 일체형 Hot BoP의 설계 및 성능 평가

김영배 · 김은주 · 윤종혁 · 송형운[†]

고등기술연구원 플랜트엔지니어링 센터
(2018년 11월 6일 접수, 2018년 11월 13일 심사, 2018년 11월 29일 채택)

Design and Performance Evaluation of Integral-type Hot BoP for Recovering High-temperature Exhaust Gas in 2 kW Class SOFC

Young Bae Kim, Eun Ju Kim, Jonghyuk Yoon, and Hyoungwoon Song[†]

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28, Goan-ro 51beon-gil, Goan-ri, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17180, Korea
(Received November 6, 2018; Revised November 13, 2018; Accepted November 29, 2018)

초 록

본 연구에서는 2 kW급 SOFC (solid oxide fuel cell)에서 배출되는 고온 배기가스의 폐열회수를 위한 일체형 Hot BoP의 설계와 성능 분석에 대한 연구를 수행하였다. Hot BoP 시스템은 스택 배기가스의 연소를 위한 촉매 연소기와 연소 후 배기가스의 폐열회수를 위한 원통다관형 공기에열기 및 스팀발생기로 구성되었다. 시스템 설계에서 폐열회수 시스템의 배치에 따른 최대 허용열용량을 산출하여 열분배 공정을 분석하였으며, 열전달 방정식을 통하여 공기에열기 및 스팀발생기의 상세설계를 수행하였다. Hot BoP는 방열손실의 저감을 위해 일체형으로 제작되었으며, SOFC와 연계운전을 가정한 스택배기가스를 모사하여 성능실험에 사용하였다. Hot BoP 성능실험에서 부하별 열전달량 및 시스템 효율이 측정 및 분석되었으며, 당량비에 따른 배기가스의 CO 발생량을 측정하여 연소성을 분석하였다. 실험결과로써, 2 kW급 SOFC 정격운전시 배기가스 연소열부하 기준으로 hot BoP의 열적 효율은 약 60%이며, 연소 후 배기가스의 CO 발생량은 당량비 0.25 이상에서 급격히 감소되는 것으로 나타났다.

Abstract

This study was focused on the design and the performance analysis of integral Hot BoP for recovering waste heat from high-temperature exhaust gas in 2 kW class solid oxide fuel cell (SOFC). The hot BoP system was consisted of a catalytic combustor, air preheater and steam generator for burning the stack exhaust gas and for recovering waste heat. In the design of the system, the maximum possible heat transfer was calculated to analyze the heat distribution processes. The detail design of the air preheater and steam generator was carried out by solving the heat transfer equation. The hot BoP was fabricated as a single unit to reduce the heat loss. The simulated stack exhaust gas which considered SOFC operation was used to the performance test. In the hot BoP performance test, the heat transfer rate and system efficiency were measured under various heat loads. The combustibility with the equivalent ratio was analyzed by measuring CO emission of the exhaust gas. As a result, the thermal efficiency of the hot BoP was about 60% based on the standard heat load of 2 kW SOFC. CO emission of the exhaust gas rapidly decreased at an equivalent ratio of 0.25 or more.

Keywords: SOFC, Hot BoP, Catalytic combustor, Air preheater, Steam generator

1. 서 론

연료전지는 높은 효율로 전기를 생산할 수 있는 장점으로 인하여 종래의 화석연료를 대체할 새로운 발전시스템으로 주목되고 있다 [1-3]. 이 연료전지 중, 고체산화물연료전지(solid oxide fuel cell,

SOFC)는 높은 전기 생산 효율과 비극속계의 전극 사용 및 다양한 연료의 적용이 가능한 이점이 있다[4,5]. 그러나 SOFC 시스템은 약 500~1,000 °C 사이에서 작동되는 고온 운전특성과 배기가스로 인한 열적 손실이 크다는 단점이 존재한다[6,7]. 이러한 SOFC의 고온 특성을 보완하기 위해 효율적인 시스템 구성을 통한 다양한 BoP (balance of plant)에 대한 공정연구의 필요성이 증가하고 있다[8]. 현재까지 보고된 BoP의 공정구성은 전력변환 및 시스템 제어를 구성하는 EBoP (electrical balance of plant)와 기계적 시스템 및 유로를 구성하는 MBoP (mechanical balance of plant)로 구분되며, 기계시스템 중 열원 기기 및 열회수 기능을 담당하는 Hot BoP로 구분되고 있다[9].

[†] Corresponding Author: Institute for Advanced Engineering
Plant engineering center, 175-28, Goan-ro 51beon-gil, Goan-ri, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17180, Korea
Tel: +82-31-330-7406 e-mail: hwsong@iae.re.kr

Table 1. Calculating Equation for Hot BoP Design

Air pre-heater	Steam generator
$V_{max} = \frac{S_T}{(S_T - D)} V$ <p>or</p> $\frac{S_T}{2(S_D - D)} V$	$V_{avg} = \frac{Q_{flow}}{A_{cross}}$
$N_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25}$	$Nu = 7.54 + \frac{0.03 \left(\frac{D}{L} \right) Re Pr}{1 + 0.016 \left[\left(\frac{D}{L} \right) Re Pr \right]^{2/3}}$
$h = \frac{k}{D} N_D$	$h = \frac{k}{D} N_u$
$\dot{Q} = h A_s \Delta T$	$\dot{Q} = h A_s \Delta T$

Hot BoP는 연소기, 스팀발생기, 개질기, 공기예열기 등으로 구성되며, SOFC와 연계하여 발생하는 열을 효과적으로 재이용할 수 있는 다양한 연구들이 진행되고 있다[10,11]. Hot BoP에 대한 연구들로서, Yen 등은 1 kW급 SOFC의 배기가스 재이용을 위한 다공성 버너와 개질기를 설계하여 폐열을 회수하는 시스템을 구성하였으며 실험적 검증을 수행하였다[12]. Ghang 등은 Pd/Pt로 구성된 촉매연소기와 개질기를 결합하여 배기가스의 연소와 폐열회수를 동시에 수행할 수 있는 일체형 시스템을 제작하여 반응 특성에 대한 분석을 수행하였다[13]. 한편, 촉매연소와 관련된 연구로서, Lee 등은 MCFC (molten carbonate fuel cell)의 배기가스 재이용을 위해 Pd/Ce 등으로 구성된 촉매연소기를 설계하여 유동균일화 시험을 수행하였으며, 세라믹 허니컴으로 구성된 촉매연소기를 제작하여 반응인자에 따른 촉매연소특성 및 성능평가를 수행하였다[14,15]. Hot BoP 시스템 운전에 대한 연구로서 Lee 등은 10 kW급 건물용 SOFC 스택과 BoP 모델을 개발하였고 연료유량, 전류밀도, 재순환율이 시스템 효율과 성능에 미치는 영향을 분석하였다[16]. Lee 등은 1 kW급 SOFC 시스템의 자연운전을 위해 열교환망을 중심으로 시스템을 설계하고 수소 및 도시가스를 이용한 자연운전 시험을 수행하였으며, 5 kW급 다중모듈 SOFC 시스템의 Hot BoP를 설계 및 제작하여 스택발전효율을 측정하였다[17,18]. 최근에는 고온 열교환기에 발생하는 유동불균일성 및 방열효과의 저감을 목적으로 신형 열교환기의 설계 개발에 대한 도전적인 연구도 수행되고 있다[19]. 이렇듯 열교환기기의 효율적인 설계 및 촉매연소기의 효율성에 대한 연구들이 수행되고 있지만 상용화된 장치로 Hot BoP를 구성하는 연구가 대부분이므로, 설계방법 및 일체화를 통한 시스템의 열적 효율화 향상에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 2 kW급 SOFC 시스템에 구성되는 Hot BoP 구성요소의 설계와 열적 성능 평가를 수행하였다. Hot BoP 구성요소로서 Pd/Pt 촉매연소기를 제작하고, 이론적 설계법을 통해 공기예열기, 스팀발생기의 열교환율을 산출하여 효율적인 구조의 일체형 Hot BoP를 제작하였다. 또한 실험적 검증을 위해 SOFC 후단에서 발생하는 고온 배기가스를 모사하여 성능평가 실험을 진행하고 모사가스의 입력열량 변화에 따른 Hot BoP 내 열전달 매질 간의 온도 변화 및 열용량과 전체 시스템의 열량변화를 분석하였다. 또한 Hot BoP에서 최종 배기되는 일산화탄소의 농도를 측정하여 촉매에 의한 산화특성 효율을 검증하였다.

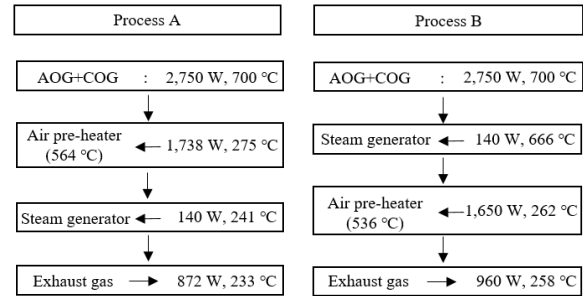


Figure 1. Maximum possible heat transfer rate of heat distribution processes.

2. 실험

2.1. 일체형 Hot BoP 설계 및 제작

본 연구에서는 Hot BoP 내 주요 구성요소 간 방열손실 및 압력강하의 저감을 위해 일체형 시스템을 적용하였으며 주요 구성품으로써 촉매연소기와 공기예열기 및 증기발생기를 설계하였다. 공기예열기와 증기발생기는 고온의 배기가스와 저온의 공기와 물의 열전달상한을 고려하여 공정 구성을 수행하였으며, 열량 산출을 위한 공기와 물의 열용량(Q)과 보유열용량률(Q_{cap}) 및 최대허용열전달률(Q_{max})을 다음 식 (1)~(3)을 통해 산출하였다.

$$Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \tag{1}$$

$$\dot{Q}_{cap} = C_c (T_{c,out} - T_{c,in}) = C_h (T_{h,in} - T_{h,out}) \tag{2}$$

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} (T_{h,out} - T_{c,in}) \tag{3}$$

여기에서, \dot{m} 은 질량유량, C_p 는 정압비열, T 는 유체온도, C_{min} 은 산출되는 유체의 최소 열용량을 나타내며, 물은 끓는점까지의 열용량을 적용하였다.

위의 식 (1)~(3)을 이용하여 동일한 입력열량에서 최대 열전달율을 고려한 공기예열기와 스팀발생기의 위치별 공정구성에 따른 배기가스의 열전달량과 온도를 Figure 1에 나타내었다. 산출결과로서, 공기예열기, 스팀발생기 순서의 공정 (A)와 스팀발생기, 공기예열기 순서의 공정 (B)에서 최종 배출되는 배기가스의 온도는 각각 233, 258 °C로 산출되었다. 공정 (A)의 배기가스 온도가 낮은 이유는 공기예열기가 스팀발생기에 비해 요구되는 온도차와 필요열용량이 높기 때문이다. 따라서 최종 시스템의 구성은 고온의 배기가스와의 예열공기를 우선 열교환하여 최종 배기가스 온도를 보다 낮게 배출할 수 있는 공정 (A)로 시스템을 구성하였다.

공기예열기는 저압력강하와 기체 간의 열교환이 용이한 원통다관형 열교환기로 설계를 진행하였다. 열교환기 내부에서 고온 배기가스는 다관을 통과하고 저온 공기는 다관 사이를 유동하며 배기가스와 열교환 되도록 하였다. 증기발생기는 배기가스 잔열을 활용하여 스팀을 생산하기 위해 매니폴드 형태의 원형직관으로 설계를 진행하였으며, 매니폴드 다관을 따라 물이 유동하며 배기가스와 열교환 되도록 하였다. Table 1은 설계에 사용된 계산식으로써, 공기예열기는 다관 중심간의 피치(S_D)와 직교 간격(S_L)을 변수로써 최대유속(V_{max})을 구하게 되며, 증기발생기는 평균유속(V_{avg})을 구하게 된다. 이후 레이놀즈수(Re)를 이용한 누셀수(N)와 대류열전달계수(h) 및 열전달량(Q)을 산출하여 설계를 진행하였다.

Table 2. Composition and Concentration of Simulated Stack off Gas under Dry Condition

Input gas		Hot air				Gas mixture		
Thermal capacity (W)		1,700	1,950	2,200	2,750 (std.)	3,400	4,250	
AOG (%)	H ₂	-	-	-	5.2	7.2	9.9	
	CO	-	-	-	2.9	2.8	2.7	
	CO ₂	-	-	-	13.5	13.2	12.9	
	Air	25	25	25	-	-	-	
COG (%)	Air	75	75	75	78.4	76.8	74.5	
Equivalence ratio (Φ)		-	-	-	0.25	0.31	0.40	
Water (mL/min)							25	

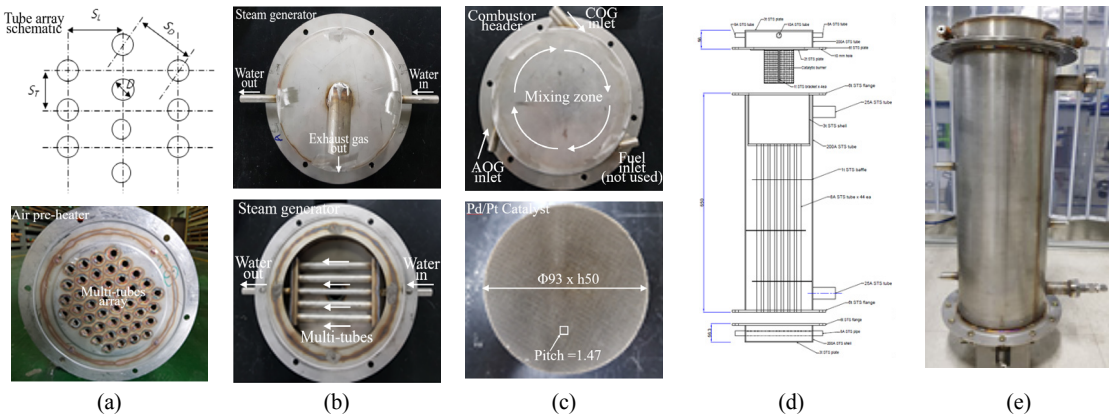


Figure 2. Design of integral-type Hot BoP; (a) Air Pre-heater, (b) Steam Generator, (c) Catalytic Combustor, (d) Assembly Drawing, (e) Prototype Hot BoP.

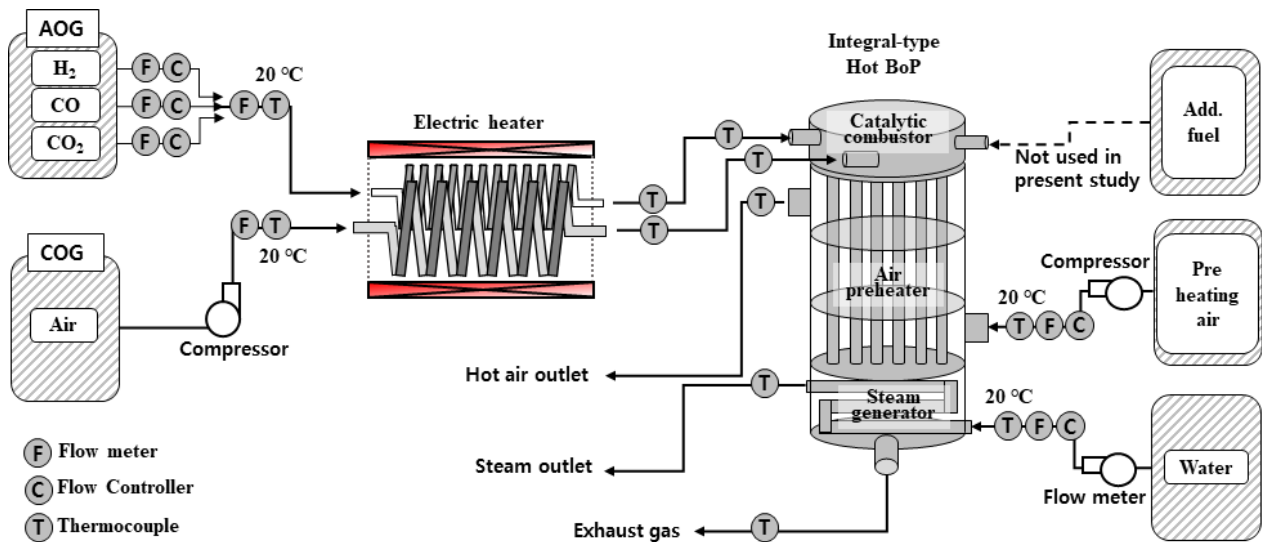


Figure 3. Experimental setup of integral-type Hot BoP system.

Figure 2(a)는 원통다관형 열교환기의 형상을 나타내며 다관튜브는 $\Phi 10 \text{ mm} \times \text{H}500 \text{ mm} \times 44$ ea로 연관열면적은 0.55 m^2 이며 산출된 열전달율은 $2,110 \text{ W}$ 이다. 또한 열전달 촉진을 위해 각 다관에는 와류 발생기(turbulator)를 삽입하여 난류유동을 가속화하였으며, 원통 내부에는 유동의 균등분배를 위해 3단 방패관(baffle)을 등간격으로 설치하여 열전달 성능을 높이도록 하였다. Figure 2(b)는 증기발생기의 형

상을 나타내며 원형직관은 $\Phi 8 \text{ mm} \times \text{L}189 \text{ mm} \times 4$ ea와 $\Phi 6 \text{ mm} \times \text{L}189 \text{ mm} \times 1$ ea이며, 다관열면적은 0.03 m^2 으로 산출된 열전달율은 625 W 이다. Figure 2(c)의 촉매연소기는 AOG (anode off gas)와 COG (cathode off gas) 유입부를 접선방향으로 설계하여 선회유동에 의한 예혼합이 가능하도록 하였으며 가연성 배기가스의 산화를 위해 하단에는 Pd/Pt계 허니컴 촉매를 부착하였다. Figure 2(d)는 Hot BoP

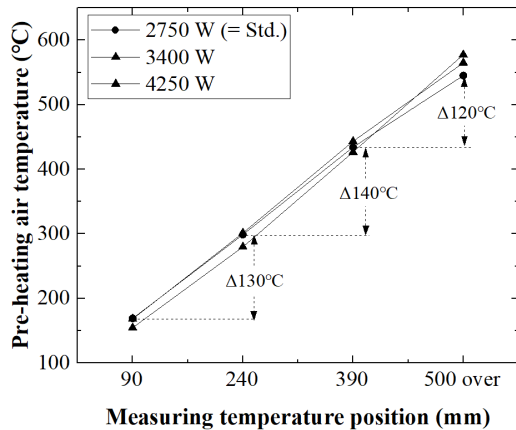


Figure 4. Temperature of pre-heating air at vertical measuring positions.

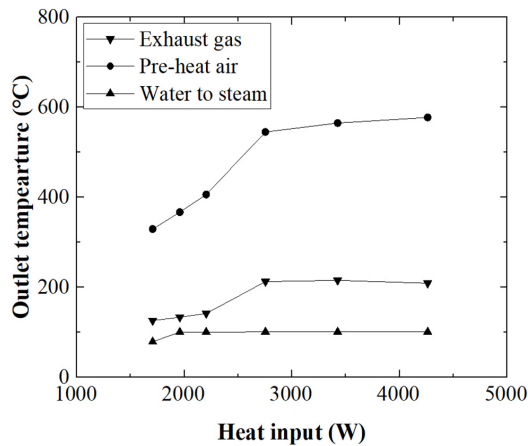


Figure 5. Outlet temperature variation with increasing heat input.

도면으로 상부에는 고온의 AOG 및 COG 유입부와 예혼합챔버 및 허니컴 촉매로 구성된 촉매 연소기, 중간부에는 예열공기 입출구와 연소실 및 원통다관형 열교환기로 구성된 공기예열기, 하부에는 배기관 및 물-증기 입출구가 포함된 매니폴드 형태의 다관형 증기발생기가 위치한다. 완성된 일체형 Hot BoP는 Figure 2(e)와 같으며 전체 크기는 $\phi 216 \text{ mm} \times H750 \text{ mm}$ 이다.

2.2. 실험방법

SOFC 후단 배기가스인 AOG와 COG의 모사를 위해 2 kW급 SOFC 스택 제조사의 정격운전시 건공기 실험데이터를 기반으로 배기가스 연소시 기준입력열량($Q = 2,750 \text{ W}$)을 설정하였으며, 수소 농도를 변수로 다양한 입력열량에 따른 성능 실험 조건을 Table 2에 나타내었다. 여기서, 기준입력열량 보다 낮은 저열량 범위에서는 극희박 조건에 의한 불연소 가능성 때문에 승온된 공기로 모사가스를 대체하였다. 한편, Figure 3은 일체형 Hot BoP의 열적 성능테스트를 위한 실험장치를 나타내었다. 가연성 가스가 포함된 AOG와 COG는 각각의 유로를 통해 전기로로 유입된 후 약 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 가열되어 Hot BoP 상단의 촉매연소부로 유입된다. 촉매연소기 상단에서는 집선방향으로 구성된 유입구로 인해 두 종류의 가스는 예혼합된다. 예혼합된 고온의 모사가스는 촉매연소기에서 산화된 후 공기예열기와 증기발생기에서 배기가스의 열을 전달하게 되며 이후 대기 중으로 방출된다. 공기예열

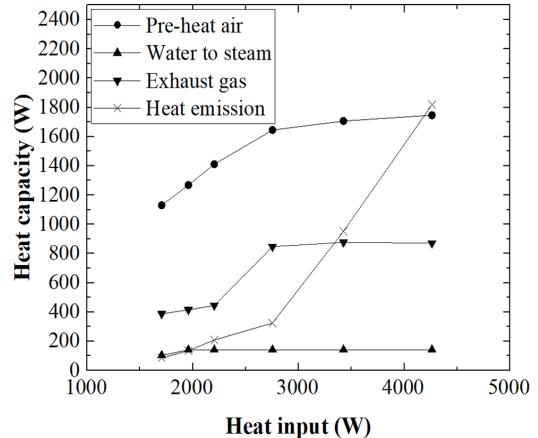


Figure 6. Heat capacity variation with increasing heat input.

기 및 증기발생기의 저온유체는 각각 상온의 공기와 물이 유입되도록 하였다. 한편, 온도 측정을 위하여 k-type 열전대를 사용하였으며 측정 위치는 Hot BoP의 고온유체 유출입 경로 2개소, 저온유체 유출입 경로 4개소, Hot BoP 내부 3단 방해판의 유동경로 3개소이다. 온도 데이터의 측정 및 수집은 데이터수집 디바이스(Labview, NI)를 이용하여 실시간 측정 및 모니터링하였다. 또한 촉매연소기의 산화 성능을 평가하기 위하여 가스분석장치(350 K, Testo)를 최종배기가스 배출구에 위치시켜 가스농도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열교환 설계 검증

설계된 공기예열기의 실험적 검증을 위하여 등간격으로 배치된 3단 방해판과 최종 배출구에서 예열공기의 온도 변화를 Figure 4에 나타내었다. 공기예열기는 하부에서 저온의 예열공기가 유입되고 상부에서 고온의 배기가스가 유입되는 대향류 열교환이므로, 열교환기 하부에서 상부로 갈수록 예열공기의 온도는 높아지는 것으로 나타났다. 또한 입력열량이 증가할수록 도달하는 최종 온도는 소폭 상승하게 되는데, 2 kW급 기준입력열량인 2,750 W에서 예열공기의 최종 온도는 $545 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 측정되었으며 이는 설계시 고려된 예열공기 출구온도 $564 \text{ }^\circ\text{C}$ 와 유사한 결과를 나타낸다. 한편, 3단 등간격의 방해판 위치별 예열공기의 온도는 약 $120\text{--}140 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 균등하게 상승하였으므로 예열공기가 다관 전열표면 위로 고르게 유동하고 있음을 나타낸다.

3.2. 열교환 성능 평가

Figure 5는 입력열량에 따른 예열공기, 증기, 배기가스의 출구온도 변화를 나타내었다. 입력열량이 증가함에 따라 예열공기의 온도는 급격히 증가하며 약 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 점차 완만해진다. 그러나 승온된 예열공기를 약 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 이상의 SOFC 시스템에 적용하기 위해서는 약 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 추가 열량이 필요한데, 이는 연소기에 설계된 보조연료공급관을 통하여 추가열원을 투입함으로써 예열공기의 승온에 필요한 열량 확보가 가능하다. 물의 경우 최저입력열량을 제외한 각 입력열량에서 약 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 일정한 배출온도를 유지하게 되고 추가적인 온도 상승은 없으므로 천이영역에 도달한 것으로 나타났다. 한편, 배기가스의 온도는 입력열량이 증가함에 따라 지속적으로 상승해야 하지만, 초기 상승구간 이후 일정한 온도를 유지하였다. 이는 배기가스의 열량이 증

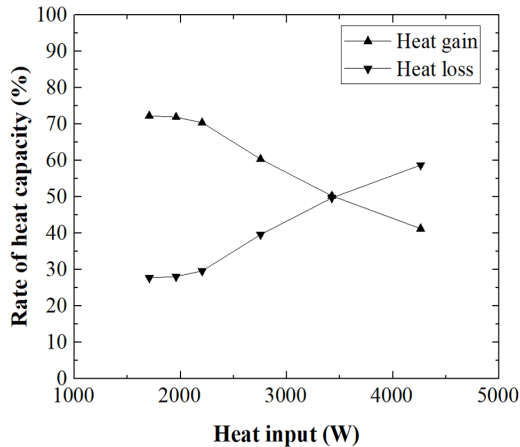


Figure 7. Rate of heat capacity with heat gain and heat loss.

발잠열과 방열손실의 형태로 물과 대기 중으로 열전달된 후 남은 잔 열만이 배기가스로 최종 배출되기 때문이다.

Figure 6에는 입력열량에 따른 각 기체별 열전달량의 변화를 나타내었다. 여기서, 열용량은 측정된 예열공기와 물 및 배기가스의 온도를 기준으로 산출하였으며, 방열손실량은 입력열량과 총 유체열용량들의 차로 산출하였다. 2 kW SOFC 시스템의 기준입력열량인 2,750 W에서, 예열공기의 열용량은 약 1,600 W에서 1,700 W로 완만하게 증가하므로 열전달 상한에 도달한 것으로 나타났다. 증기발생기의 물은 천이영역에서 증발잠열형태로 전달되는 열량이 고려되지 않았으므로, 입력열량의 증가에 관계없이 140 W 수준의 일정한 열용량을 나타내었다. 한편, 대기로 방출되는 배기가스의 열용량은 약 800 W로 유지되는 반면, 추산된 방열손실량은 입력열량의 증가에 따라 급속히 증가하였는데, 최대 입력열량인 4,250 W에서 손실열량은 무려 1,800 W로 가장 높은 열량을 나타내었다. 이는 증기발생기에서 잠열 형태로 수용할 수 있는 최대 열량인 500 W를 고려하더라도 상당히 높은 수준의 손실열량이 된다. 이러한 열량손실의 원인으로써 설계된 일체형 Hot BoP의 고온예혼합공간인 연소기 헤더부분이 적절되어 대기로의 방열손실이 발생한 것으로 확인되었다. 그러나 기준입력열량에서 방열손실량은 320 W 수준으로 증발잠열을 무시하더라도 전체 열용량 대비 크지 않은 손실열량으로 판단된다.

Figure 7은 일체형 Hot BoP에서 공기에열기와 증기발생기에 의한 획득열량과 배기가스와 방열에 의한 손실열량을 열량비율로 나타내었다. 획득열량을 기준으로 열효율은 2,000 W 이하의 저입력열량에서 약 70%이며 기준 및 최대 입력열량에서 열효율은 각각 60, 40%로 나타났다. 또한 3,400 W 이상의 입력열량 범위에서 손실열량비율이 획득열량을 초과하게 되므로 설계된 일체형 Hot BoP의 효율적인 운전조건을 벗어나는 것으로 나타났다. 따라서 본 일체형 Hot BoP 시스템은 최대 3 kW의 입력열량에서 60~70% 수준의 열적 효율을 가지는 것으로 평가되었다.

3.3. 배기가스 분석을 통한 연소성 평가

Figure 8은 촉매산화특성을 평가하기 위하여 당량비 0.21~0.4에서 최종배기가스의 일산화탄소 농도변화를 나타내었다. 당량비가 증가함에 따라 일산화탄소 농도는 825 mg/m³에서 11 mg/m³까지 급격히 감소하였다. 당량비 0.25 미만에서 일산화탄소 배출량이 급격히 증가하는 이유는 초희박(ultra lean-burn) 산화조건으로 촉매산화 효율이 저

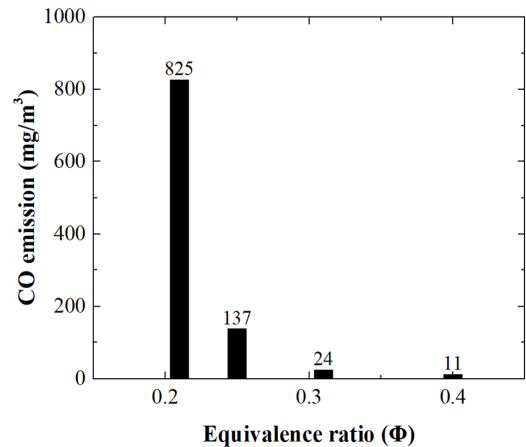


Figure 8. CO emission of exhaust gas.

하되어 공급된 일산화탄소가 미반응 상태로 배출되기 때문이다. 반면, 당량비 0.25 이상에서 일산화탄소 배출량은 급격히 저감되므로 촉매 산화 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 일반예혼합 연소기에 비해 촉매연소기는 넓은 희박영역에서도 배기가스의 안정적인 산화가 가능하므로 다량의 공기를 사용하는 SOFC 시스템에 효과적인 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 2 kW급 SOFC 시스템에 구성되는 Hot BoP의 이론적 설계와 열적 성능 평가를 수행하였다. Hot BoP는 이론적 설계법을 통해 Pd/Pt 촉매연소기, 공기에열기, 스팀발생기를 일체형으로 설계하였으며, SOFC 후단에서 발생하는 고온배기가스를 모사하여 성능평가 실험에 적용하였다. 성능평가실험을 통해 입력열량의 변화에 따른 Hot BoP 내 열전달 매질간의 온도 및 열용량 변화와 시스템의 열량 획득 및 손실을 분석하였으며, 배기가스의 일산화탄소 농도 측정을 통해 연소성 분석을 수행하였다.

- 1) 2 kW급 SOFC 배기가스의 기준입력열량 2,750 W에서 공기에열기와 스팀발생기의 공정구성별 열전달 상한을 추산하였으며, 고 열원을 요구하는 공기에열기를 전단에 스팀발생기를 후단에 구성하는 것이 가장 우수한 열전달율을 가지는 것으로 산출되었다.
- 2) 제작된 공기에열기와 증기발생기의 설계열전달율은 각각 2,110, 625 W이며 예열공기의 열전달 상한과 물의 승온에 필요한 열량을 상회하도록 설계하였다.
- 3) 열적성능시험평가 결과로써 공기 예열기의 경우, 기준입력열량에서 예열공기 온도는 545 °C이며 열전달율은 1,600 W로 측정되었다. 증기발생기는 거의 모든 실험조건에서 증기가 생성되었다. 일체형 시스템의 열적효율은 기준입력열량에서 60%이고 저 입력열량에서 70% 수준이며, 3,400 W 이상의 고입력열량에서는 손실량이 증가하여 효율성이 낮다.
- 4) 촉매연소기 산화특성 시험결과로써 CO의 농도는 당량비 0.25 미만에서 약 800 mg/m³를 초과하여 사용범위에 적합하지 않으며 당량비 0.25 이상에서 급격히 저감되므로 우수한 산화성능을 나타내었다.

감 사

이 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20163030031850, 분산 발전용 고 신 퇴성 SOFC 스택 제조 기술 개발).

References

1. S. H. Jensen, C. Graves, M. Mogensen, C. Wendel, R. Braun, G. Hughes, Z. Gao, and S. A. Barnett, Large-scale electricity storage utilizing reversible solid oxide cells combined with underground storage of CO₂ and CH₄, *J. Energy Environ. Sci.*, **8**, 2471-2479 (2015).
2. K. Lee and J. Kim, Performance enhancement and recovery method of open cathode PEMFC, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **28**(1), 118-124 (2017).
3. K. S. Kim, M. K. Kim, D. K. Noh, Y. Tak, and S. H. Baek, Synthesis of Pt-Bi/carbon electrodes by reduction method for direct methanol fuel cell, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **22**(5), 479-485 (2011).
4. H. R. Ellamla, I. Staffell, P. Bujlo, B. G. Pollet, and S. Pasupathi, Current status of fuel cell-based combined heat and power systems for residential sector, *J. Power Sources*, **293**, 312-328 (2015).
5. T. H. Kim, B. H. Ryu, and I. J. Lee, Ion-beam induced changes in the characteristics of Gd-doped ceria, *Appl. Chem. Eng.*, **21**(4), 401-404 (2010).
6. H. R. Rim, S. K. Jeong, and J. S. Lee, Characteristics of Pr_{1-x}M_xMnO₃ (M = Ca, Sr) as a cathode material of solid oxide fuel cell, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **7**(6), 1125-1131 (1996).
7. S. Wongchanapai, H. Iwai, M. Saito, and H. Yoshida, Selection of suitable operating conditions for planar anode-supported direct-internal-reforming solid-oxide fuel cell, *J. Power Sources*, **204**, 14-24 (2012).
8. S. S. Yu, D. J. Hong, Y. D. Lee, S. M. Lee, and K. Y. Ahn, Development of a catalytic combustor for a stationary fuel cell power generation system, *Renew. Energy*, **35**(5), 1083-1090 (2010).
9. S. Wongchanapai, H. Iwai, M. Saito, and H. Yoshida, Performance evaluation of an integrated small-scale SOFC-biomass gasification power generation system, *J. Power Sources*, **216**(15), 314-322 (2012).
10. H. Yoshida and H. Iwai, Thermal management in solid oxide fuel cell systems, *proceedings of fifth international conference on enhanced, compact and ultra-compact heat exchangers: science, Engineering and Technology*, September 11-16, Hoboken, NJ, USA (2005).
11. R. Payne, J. Love, and M. Kah, Generating electricity at 60% electrical efficiency from 1-2 kWe SOFC products, *J. Electrochem. Soc.*, **25**(2), 231-239 (2009).
12. T. H. Yen, W. T. Hong, W. P. Huang, Y. C. Tsai, H. Y. Wang, C. N. Huang, and C. H. Lee, Experimental investigation of 1 kW solid oxide fuel cell system with a natural gas reformer and an exhaust gas burner, *J. Power Sources*, **195**(5), 1454-1462 (2010).
13. T. G. Ghang, S. M. Lee, K. Y. Ahn, and Y. Kim, An experimental study on the reaction characteristics of a coupled reactor with a catalytic combustor and a steam reformer for SOFC systems, *Int. J. Hydrogen Energy*, **37**(4), 3234-3241 (2012).
14. S. M. Lee, Y. D. Lee, K. Y. Ahn, D. J. Hong, and M. Y. Kim, A study on the design of MCFC off-gas catalytic combustor, *Trans. Korean Hydrogen New Energy Soc.*, **18**(4), 406-412 (2007).
15. S. M. Lee, Y. Lee, K. Y. Ahn, and S. S. Yu, Performance analysis of off-gas/syngas combustor for thermal management of high temperature fuel cell system, *Trans. Korean Hydrogen New Energy Soc.*, **21**(3), 193-200 (2010).
16. Y. Lee, C. Yang, C. Yang, S. Park, and S. Park, Optimization of operating conditions for a 10 kW SOFC system, *Trans. Korean Hydrogen New Energy Soc.*, **27**(1), 49-62 (2016).
17. T. H. Lee, J. H. Choi, T. S. Park, Y. S. Yoo, and S. W. Nam, Design and self-sustainable operation of 1 kW SOFC system, *Trans. Korean Hydrogen New Energy Soc.*, **20**(5), 384-389 (2009).
18. T. H. Lee, Operation Results of the SOFC System Using 2 Sub-Module Stacks, *Trans. Korean Hydrogen New Energy Soc.*, **21**(5), 405-411 (2010).
19. J. P. Janssens, M. Dubuisson, and Y. D. Vos, Entropy considerations leading to a validated to the essence reduced model for SOFC and SOEC high temperature heat exchangers, *Proceedings of 13th European SOFC & SOE Forum*, July 3-6, Lucerne, Switzerland (2018).