

선박동력용 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC 시스템의 효율성 평가

정창식¹ · 박상균² · 김명환[†]

(Received August 21, 2017 ; Revised October 16, 2017 ; Accepted November 17, 2017)

Availability of intermediate-temperature SOFC system with methane steam reforming for marine power applications

Chang-Sik Jung¹ · Sang-Kyun Park² · Myoung-Hwan Kim[†]

요약: 선박에 기인하는 온실가스 및 대기오염물질의 배출규제는 날로 강화하고 있으며, 이러한 문제의 근본적 해결방안 중의 하나로 수소연료전지를 동력발생장치로 채용하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 본 논문은 중대형 선박 적용으로 메탄 수증기개질방식과 중온형 고체산화물 연료전지를 기반으로 효과적이고 안정적인 시스템을 구성하고 그 시스템의 기본적인 성능특성을 시뮬레이션의 방법으로 검토한 것이다. 그 결과로 구축된 시스템에서 개질기는 적절한 개질반응온도를 얻을 수 있도록 연소기 후단에 위치해야 하며, 예열기의 추가적 설치도 요구됨을 알았다. 또한 중온형 고체산화물 연료전지시스템을 고효율, 고성능의 조건에서 운전하기 위한 스택의 작동온도와 전류밀도의 범위를 알 수 있었다.

주제어: 선박동력시스템, 중온형 고체산화물 연료전지, 수증기개질, 시스템 효율성

Abstract: The atmospheric emission regulations with regard to ships have been strengthened considerably to address the problem at its source. Therefore, new types of propulsion power systems such as fuel cell systems have recently been considered. The objective of this study is to certify the possibility and availability of the intermediate-temperature SOFC (IT-SOFC) system with the recycled methane steam reforming fuel processor via simulation methods. The results showed that the IT-SOFC system had a reformer where is behind the combustor and required more recuperators to obtain the appropriate reforming temperature. Moreover, we realized the range of stack operating temperatures and the current densities for operating the IT-SOFC system under high efficiency and performance.

Keywords: Ship power system, It-SOFC, Steam reforming, System availability

1. 서론

온실가스 배출저감 및 대기오염물질 배출규제 강화는 해상에서 활동하는 선박에 있어서도 해결되어야 하는 중요한 과제 중의 하나이다. 최근 선박은 천연가스 엔진(MEGI), 이중연료 전기추진방식(DFDE), 연소가스 후처리장치 장착 등 동력기관의 에너지효율을 제고하고 대기오염물질의 배출을 줄이는 다양한 기술이 개발, 적용되고 있으나 시스템이 복잡해지는 반면 온실가스 및 대기오염물질에 대한 근본적인 해결책이 되지 못하고 있다. 이 문제들에 대한 근본적이며 지속가능한 해결책 중의 하나로 수소연료전지가 있다 [1][2]. 연료전지는 수소와 산소의 화학반응에서 생기는 전기 및 열에너지를 이용하는 장치로 친환경적이면서도 효율이 높아 최근 많은 관심을 받고 있다. 중대형 선박에 연료

전지를 채용한다면 동력의 크기와 특성 등을 고려하여 고체산화물 연료전지(SOFC)와 같이 효율이 높고, 폐열에 대한 효율성이 큰 고온형 연료전지가 더 적합하다고 판단된다. 그러나 SOFC는 높은 효율을 위해 800~1000℃ 이상의 고온에서 작동하도록 설계되어, 다공성 전극의 소결현상, 전극의 내구성 저하로 인하여 스택 수명의 단축 등 심각한 사고를 초래할 수 있으므로 안전성을 우선시 하는 선박의 동력장치로는 채용에 많은 난관이 예상된다[3]. 따라서 최근 특수한 내열재료의 사용을 지양하고 시스템을 보다 안전하게 동작시키기 위하여 작동온도 600~800℃의 중온형 SOFC에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 2011년 N. Zuo *et al.* [4]는 550~700℃에서 작동하는 K₂CO₃ 전해질 기반 중온형 SOFC의 단일 셀 특성을 연구하였고 2013년 C. Yang

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4679-8092>): Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: mhkim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4267

¹ Department of Marine Engineering, Graduate School, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: severalpoint@naver.com, Tel: 051-410-4871

² Division of Marine Information Technology, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: skpark@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4579

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

et al. [5]는 550~650°C에서 작동하는 BaCo 공기극 기반 중온형 SOFC의 단일 셀을 개발하여 그 특성을 검토한 바 있다. 또한 2015년 M. J. López-Robledo et al. [6]는 650~800°C에서 작동하는 다공성 산화세륨 전해질 기반 중온형 SOFC 단일 셀을 그리고 2017년 Y. Tan et al. [7]은 650~800°C에서 작동하는 공기극 기반 중온형 SOFC 단일 셀을 개발하여 그 특성을 보고하고 있다. 위의 연구 결과들은 중온형 SOFC가 고온형 SOFC와 경쟁하거나 또는 그 이상의 성능도 가능함을 보여 주고 있다.

본 논문은 메탄을 수소원반체로 하는 수증기개질방식과 중온형 SOFC를 기반으로 효과적이고 안정적인 시스템을 구성하고 그 시스템의 기본적 성능특성을 시뮬레이션 모델링을 통하여 검토한 것이다.

2. 시스템 구성

연료전지시스템의 주요 구성요소는 스택, 개질기, 예열기, 연소기, 연료 및 공기 공급장치 등이며 이들의 조합으로 다양한 시스템이 가능하나, 본 연구에서는 Figure 1과 같은 시스템을 중온형 SOFC시스템으로 가장 효과적이고 안정적이라 판단하여 제시한다. 시스템의 비교를 위하여 800~1000°C에서 스택이 작동되는 고온형 SOFC시스템을 Figure 2에 나타낸다. Figure 1과 Figure 2의 비교에서 개질기의 위치와 예열기2의 신설이 상이한 점으로 나타난다. 중온형 SOFC시스템에서 개질기가 연소기의 하류에 배치된 것은 공기극 후단의 온도가 메탄의 높은 개질률을 위해 충분하지 못하기 때문이다. 참고로 Figure 3에 메탄과 수증기를 1:3으로 혼합하여 개질기에 공급한 경우에 대한 메탄 개질률 및 개질기 출구가스조성을 반응온도별로 나타내었다. 그림으로부터 98% 이상의 메탄 개질률을 얻기 위해서는 반응온도가 1000 K 이상 유지되어야 함을 알 수 있다. 즉, 중온형 SOFC 스택 공기극의 출구온도가 600~800°C이므로 이 열원만으로는 개질기의 반응온도를 1000 K 이상 유지시키기 어렵다. 또한, 예열기2가 개질기와 스택 연료극 사이에 신설된 것은 개질기를 통과한 고농도 수소혼합가스의 온도가 스택의 작동 온도보다 높아 스택이 가열되는 것을 막고 그 열원을 개질기로 들어가는 메탄의 예열에 사용하기 위함이다.

Figure 1의 메탄 수증기개질 중온형 SOFC시스템에서 메탄은 예열기2로 유입되기 전에 수증기가 풍부한 스택 연료극 출구의 재순환가스와 소정의 S/C(Steam/Carbon ratio) 비율로 혼합된다. 메탄과 수증기 등의 가스는 예열기2를 거쳐 개질기에서 고농도의 수소와 함께 일산화탄소, 이산화탄소, 수증기 및 메탄이 혼합된 가스로 변환되며, 이 혼합가스는 스택 연료극의 전기화학반응을 거쳐 수소와 일산화탄소의 농도는 감소하고 수증기의 농도가 증가된 상태로 연료극에서 토출된다. 공기는 스택의 공기극 전기화학 반응용 및 냉각용으로 사용되며 송풍기와 예열기1을 거쳐 스택의 공기극으로 보내어진다. 여기에서 예열기1은 스택과 공기의 과도한 온도차로 인한 열응력의 발생을 억제하기 위한 것으로

예열기2와 마찬가지로 예열기 출구온도는 스택 작동 온도보다 최대 200 K 낮은 온도(COT-200)로 조절된다[8][9]. 스택 연료극의 출구 혼합가스에 포함된 미반응 수소 및 일산화탄소 그리고 소량의 메탄은 공기극 출구공기와 함께 연소실에서 연소된다. 연소기 출구의 고온가스는 개질기, 예열기1 그리고 증기발생용 에코노마이저의 열원으로 사용되고 배출된다.

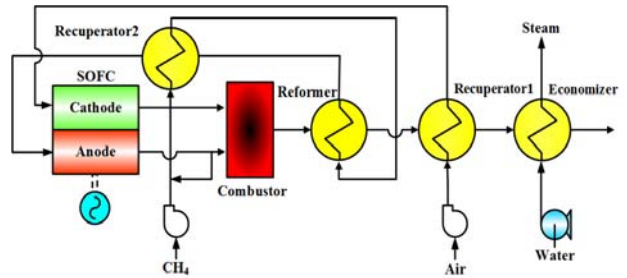


Figure 1: Layout of intermediate temperature SOFC system with methane steam reforming

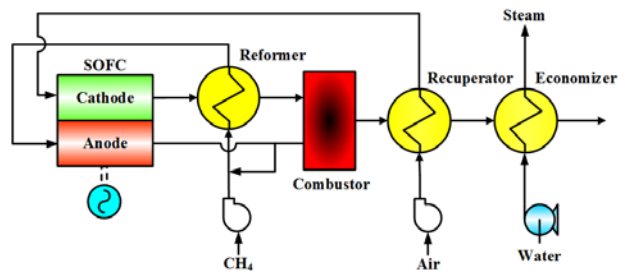


Figure 2: Layout of high temperature SOFC system with methane steam reforming

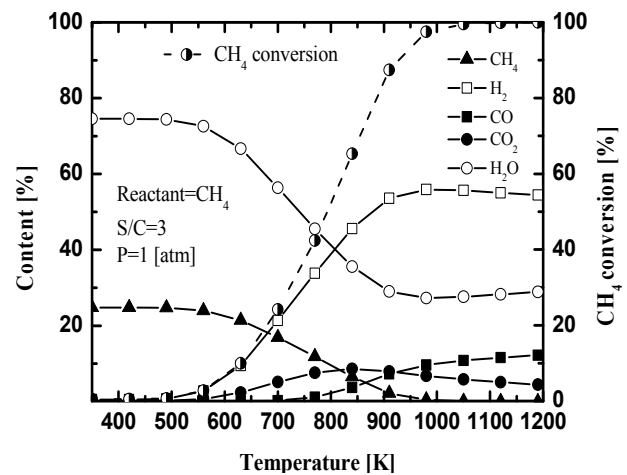


Figure 3: Equilibrium composition and conversion rate for methane steam reforming

3. 시스템 모델링

시스템의 성능해석은 다음과 같은 가정 하에서 수행되었다.

- ① 정상상태

- ② 방열손실 무시
 - ③ 반응은 이론평형 상태
 - ④ 유체 흐름방향으로 온도 및 조성은 1차원
 - ⑤ 스택 출구가스 온도는 작동온도와 동일
- 그리고 본 시스템 성능평가에 사용한 계산 조건들은 Table 1과 같다.

Table 1: Setting parameters for the lumped analysis

Electrical output (kW)	3000
Anode thickness (μm)	200
Cathode thickness (μm)	2000
Electrolyte thickness (μm)	20
Limiting current density (A/m ²)	25000
Inverter efficiency (%)	95
Reformer temperature effectiveness (%)	50
Economizer gas outlet temperature (K)	423.15
Steaming pressure (kPa)	700
Air blower adiabatic efficiency (%)	75
Air blower mechanical efficiency (%)	90
Air blower motor efficiency (%)	95
Fuel pump adiabatic efficiency (%)	75
Fuel pump mechanical efficiency (%)	90
Fuel pump motor efficiency (%)	95
Reformer pressure drop(air side) (%)	3
Reformer pressure drop(fuel side) (%)	3
Recuperator1 pressure drop(air side) (%)	2
Recuperator1 pressure drop(gas side) (%)	2
Stack pressure drop(air side) (%)	6
Stack pressure drop(fuel side) (%)	6
Recuperator2 pressure drop(fuel side) (%)	2
Recuperator2 pressure drop(gas side) (%)	3
Combustor pressure drop(air side) (%)	2
Combustor pressure drop(fuel side) (%)	4
Mixer pressure drop (%)	2
Economizer pressure drop(gas side) (%)	2
Ambient temperature (K)	298.15
Ambient pressure (kPa)	101

3.1 개질기

메탄가스는 소정의 비율(S/C)로 수증기와 혼합하여 주어진 온도와 압력에서 개질반응이 진행되고, 수소, 일산화탄소, 이산화탄소 및 미반응된 메탄과 수증기의 혼합가스가 개질기 출구로 토출된다. 수증기개질의 주반응은 아래와 같은 개질반응과 전이반응으로 이루어진다.



주어진 반응온도와 반응압력 하에서 수증기개질에 의한 혼합가스의 조성은 주반응들이 평형에 도달할 때까지 진행 되는 것으로 가정하여 평형정수(K)와 깁스 자유에너지(G)의 관계인 다음의 화학평형식으로부터 계산하였다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G}{RT}\right) \tag{3}$$

여기에서 R 은 기체정수이고, T 는 온도(K)이다.

3.2 SOFC

3.2.1 회로전압

연료전지 셀 연료극의 수소 및 일산화탄소의 전기화학반응과 이에 따른 유기전압(V)은 다음 식으로 계산된다.



$$V = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{trans} \tag{6}$$

여기에서 E 는 이론적 개회로전압이고 V_{act} , V_{ohm} , V_{trans} 는 각각 활성화, 저항, 농도 손실전압이다.

이론적 가역 개회로전압은 작동온도, 작동압력 및 연료의 조성에 따라 달라지며 깁스의 자유에너지와 네른스트 식으로부터 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{-\Delta G}{2F} = \frac{-\Delta G^\circ}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}}\right) \tag{7}$$

여기에서 F 는 패러데이 상수이고 p 는 각각의 분압을 그리고 상첨자 °는 표준상태를 의미한다.

3.2.2 손실전압

식 (6)에서 나타낸 바와 같이 부하운전의 경우에 유기되는 실제 전압은 비가역성 요인들로 인하여 손실이 발생하며 그 주요한 손실로는 활성화 손실전압, 저항 손실전압, 농도 손실전압이 있다.

전극에서는 전기화학반응을 일으키기 위한 활성화 에너지가 필요하며 이로 인한 전압강하를 활성화 손실전압이라 한다. 본 연구에서는 활성화 손실전압 계산에 전기저항(Ω)의 개념으로 정리된 아헨바흐 식을 사용하였다[10].

$$\frac{1}{\Omega_{a,H_2}} = D_{a,H_2} \frac{2F}{RT} \left(\frac{p_{H_2}}{p^\circ}\right)^m \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \tag{8}$$

$$\frac{1}{\Omega_{a,CO}} = D_{a,CO} \frac{2F}{RT} \left(\frac{p_{CO}}{p^\circ}\right)^m \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \tag{9}$$

$$\frac{1}{\Omega_c} = D_c \frac{4F}{RT} \left(\frac{p_{O_2}}{p^\circ}\right)^m \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right) \tag{10}$$

여기에서 성능특성에 영향력이 큰 연료극 및 공기극의 활성화 에너지(E_a , E_c)는 최근 개발 및 연구되고 있는 중온형 SOFC 셀의 특성[4]-[7]을 반영하여 각각 11, 16 kJ/mol로 하였다. 또한 이식들에서 사용한 계수 D_{a,H_2} , $D_{a,CO}$, D_c 는 각각 2.13×10^8 , 2.98×10^8 , 1.49×10^{10} A/m²이고 m 은 0.25이다. 여기에서 하첨자 a , c 는 각각 연료극과 공기극을 의미한다.

저항 손실전압은 전극에서의 전하이동 및 전해질에서의 이온이동에 대한 저항(Ω_{ohm})으로 발생하는 손실을 말하며 전기저항식과 저항률(ρ)에 관한 다음의 식으로부터 산출하였다.

$$V_{ohm} = i \cdot \Omega_{ohm}, \quad \Omega_{ohm} = \rho \cdot \delta \quad (11)$$

$$\rho_a = F_a \exp(-1392/T) \quad (12)$$

$$\rho_c = F_c \exp(600/T) \quad (13)$$

$$\rho_e = F_e \exp(10350/T) \quad (14)$$

여기에서 i 는 전류밀도, δ 는 두께이고 하첨자 e 는 전해질층을 의미한다. 또한 중온형 SOFC 셀에 대한 이 식들에서의 계수 F_a , F_c , F_e 는 각각 0.002483, 0.00245, 0.006762이다.

농도 손실전압은 전해질과 전극 사이의 반응영역에서 반응물질이 소모됨에 따라 연료 및 산소의 농도가 변화하는 것으로부터 발생하는 손실로 아래와 같은 한계전류밀도 모델로부터 계산한다[11]. 중온형 SOFC 셀에 대한 한계전류밀도(i_L)는 25000 A/m²이다.

$$V_{trans} = \frac{RT}{2F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (15)$$

3.3 시스템 효율 및 공기량

연료극의 수소와 일산화탄소는 각각의 반응에 의하여 유기되는 셀 전압이 동일해야 하므로 이로부터 각각의 반응량을 산출할 수 있으며, 반응량에 따른 전류량에 식 (6)의 전압과 직교류 변환효율을 곱하면 스택의 출력(W_{sofc})이 산출된다. 시스템의 전기적 효율(η_e)은 메탄 저위발열량(HC_{CH_4})에 대하여 아래의 식과 같이 정의되며, 보조기기 운전을 위한 소요 동력(W_{aux})은 연료와 공기 공급장치 동력의 합으로 계산한다.

$$\eta_e = \frac{W_{sofc} - W_{aux}}{HC_{CH_4}} \quad (16)$$

공기극의 공기는 전기화합반응용 산소의 공급과 스택의 냉각작용을 겸하고 있으나 그 공기량은 냉각을 위한 공급량에 의하여 결정된다. 따라서 공기량은 스택에서의 에너지 밸런스 식 (17)로부터 계산한다.

$$(\Delta H_a + \Delta H_c) - HC_{H_2+CO} - W_{sofc} = 0 \quad (17)$$

여기에서 ΔH_a , H_c 는 각각 연료극, 공기극의 입·출구 엔탈피 차이이고 HC_{H_2+CO} 는 수소와 일산화탄소 연료의 총저위발열량이다.

4. 시스템의 성능 특성

4.1 시뮬레이션 모델링의 신뢰성 평가

Figure 4는 스택 연료극 두께 776 μ m, 전해질 두께 20 μ m, 공기극 두께 20 μ m, 연료극 수소공급량 2.23214×10^{-8} kmol/s 그리고 대기노출형 공기극의 경우에 대한 최근 연구된 공기극 기반 중온형 SOFC 셀의 실험적 I-V 특성 곡선[7]과 본 모델링을 통한 결과 값을 작동온도별로 비교하여 나타낸 것이다. 그림은 시뮬레이션 결과가 실험치의 것보다 다소 작은 값을 지시함을 보여준다. 이것은 재료 및 셀 구성의 차이에 따른 중온형 SOFC 셀의 다양한 성능으로부터 현 기술단계에서 가장 합리적이라 판단되는 결과를 기준으로 전술한 모델링의 계수들을 보완하여 사용했기 때문이다. 그러나 매우 폭넓은 전류밀도 범위 내에서 시뮬레이션 결과는 실험치의 전반적인 경향을 잘 표현하고 있다고 판단된다.

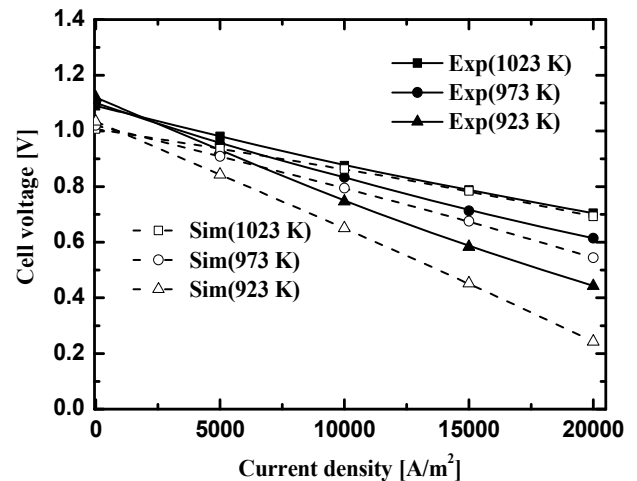


Figure 4: Comparison of simulated I-V curves with experimental I-V curves for It-SOFC

4.2 스택 작동온도에 따른 성능 특성

Figure 5는 스택 전류밀도 = 8000 A/m², S/C = 3, 수소연료 이용률 = 80%인 경우 스택 작동온도가 중온형 SOFC 시스템 성능특성에 미치는 영향을 셀 유기전압과 시스템 전기적 효율로 나타낸 것이다. 그림으로부터 전류밀도 8000 A/m²에 대한 셀의 유기전압은 중온형의 작동온도범위 내에서 0.41~0.83 V 정도이며, 작동온도가 감소함에 따라 유기

전압도 낮아지고 감소율도 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 작동온도가 감소할수록 가역 개회로전압의 증가에도 불구하고 활성화 손실전압이 커지는 효과가 더 크게 작용하기 때문이다. 시스템 전기적 효율도 작동온도에 따라 유기전압과 함께 비슷한 경향을 나타낸다. 또한 그림에서 시스템의 전기적 효율을 50% 이상 유지하기 위한 스택의 작동온도는 최소 923 K가 되어야 하며, 이보다 낮은 작동온도에서는 대형저속 디젤기관과 같은 타 동력장치와 비교하여 효율적 측면에서의 경쟁력이 급속히 저하된다.

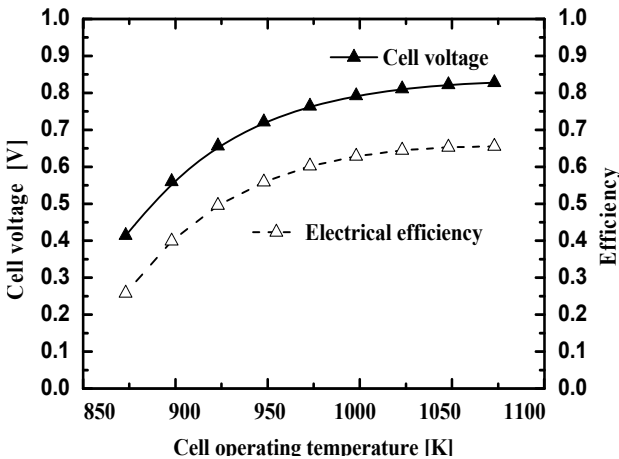


Figure 5: Cell voltage and electrical efficiency of It-SOFC system on cell operating temperature

4.3 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

Figure 6은 스택 작동온도 = 1023 K, S/C = 3, 수소연료 이용률 = 80%인 경우 스택 전류밀도가 중온형 SOFC시스템 성능특성에 미치는 영향을 셀 유기전압과 시스템 전기적 효율로 나타낸 것이다. 그림으로부터 셀 유기전압은 전류밀도의 증가와 함께 한계전류밀도 근방까지 거의 선형적으로 감소하다가 한계전류밀도 근방에서 급격히 줄어든다. 이 한계전류밀도 근방에서의 급격한 변화는 식 (15)에 의한 농도 손실전압이 크게 증대되는 영향 때문이다. 시스템의 전기적 효율도 셀 유기전압의 변화와 비슷한 경향을 보인다. 또한, 그림에서 한계전류밀도는 25000 A/m²에 이르지만 시스템의 전기적 효율을 50% 이상 유지하기 위한 스택의 전류밀도는 최대 14000 A/m²이며, 이보다 높은 전류밀도에서는 대형저속 디젤기관과 같은 타 동력장치와 비교하여 효율적 측면에서의 경쟁력이 저하되며 특히, 한계전류밀도 근방에서는 더욱 나빠진다. 즉, 그림은 중온형 SOFC시스템의 전류밀도를 높여 스택을 고성능화하면 시스템의 효율이 어떻게 변하는가를 보여준다.

4.4 스택 수소연료 이용률에 따른 성능 특성

Figure 7은 스택 작동온도 = 1023 K, 스택 전류밀도 = 8000 A/m², S/C = 3인 경우 스택 수소연료 이용률이 중온형 SOFC시스템 성능특성에 미치는 영향을 셀 유기전압과 시

스템 전기적 효율로 나타낸 것이다. 그림으로부터 셀의 유기전압은 수소연료 이용률이 증대함에 따라 작으나마 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이것은 수소연료 이용률의 증가에 따라 셀 출구측 수소농도가 감소하여 네른스트 손실이 증가하기 때문이다. 그러나 본 수소연료 이용률 범위 내에서는 셀 유기전압의 변화는 대단히 미미하다. 또한 그림에서 수소연료 이용률의 증가에 따른 유기전압의 감소에도 불구하고 시스템의 전기적 효율이 오히려 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 수소연료 이용률이 증대됨에 따라 개질을 위한 메탄의 공급량이 감소하기 때문이다.

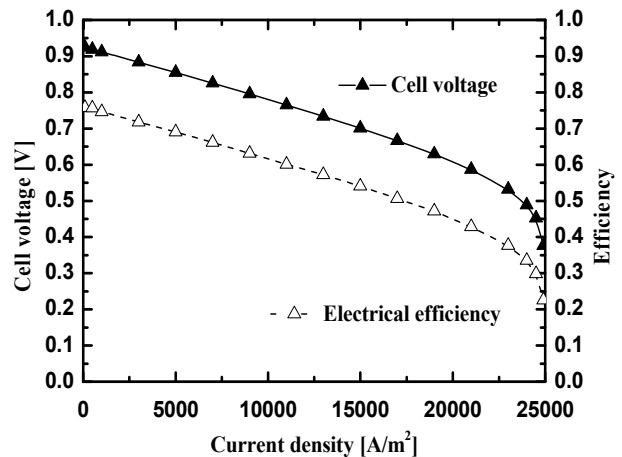


Figure 6: Cell voltage and electrical efficiency of It-SOFC system on cell current density

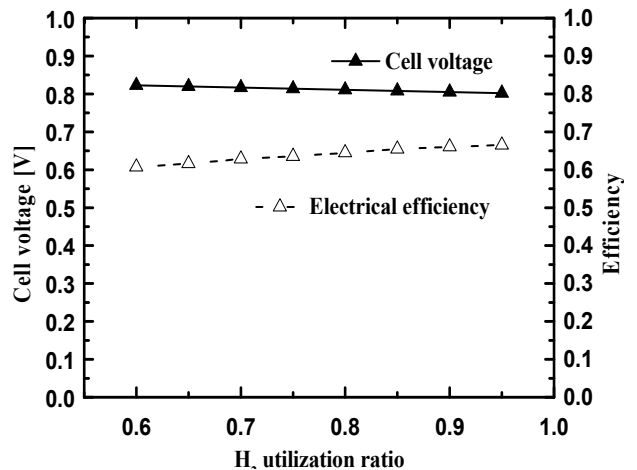


Figure 7: Cell voltage and electrical efficiency of It-SOFC system on H₂ utilization ratio

5. 결 론

본 논문은 메탄을 공급연료로 하는 수증기개질방식과 중온형 SOFC를 기반으로 효과적이고 안정적인 시스템을 구성하고 그 시스템의 기본적인 성능특성을 시뮬레이션 모델링을 통하여 검토한 것으로 본 시스템 그리고 계산 조건과 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 중온형 SOFC시스템의 효과적 작동을 위하여 수증기 개질기는 연소기 출구에 위치해야 하며, 스택 연료의 적절한 공급 온도 조절을 위한 냉각 또는 예열용의 열교환기가 개질기와 스택 연료극 사이에 설치되어야 한다.
- (2) 작동온도가 감소함에 따라 셀의 유기전압과 시스템의 전기적 효율이 낮아지며, 시스템의 전기적 효율을 50% 이상 유지하기 위한 소정의 작동온도 범위가 존재한다.
- (3) 전류밀도가 증가함에 따라 셀의 유기전압과 시스템의 전기적 효율이 한계전류밀도 근방까지 거의 선형적으로 감소하다가 한계전류밀도 근방에서 급격히 줄어들며, 시스템의 전기적 효율을 50% 이상 유지하기 위한 전류밀도의 최대치가 존재한다.
- (4) 연료극의 수소 반응률을 늘릴수록 셀 유기전압은 감소하고 시스템의 전기적 효율은 증가하나 그 변화량은 그다지 크지 않다.

References

- [1] M. H. Kim, "Analysis on the technology R&D of the fuel cell systems for power generation in ships," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 31, no. 8, pp. 924-931, 2007 (in Korean).
- [2] M. H. Kim, "Performance and safety analysis of marine solid oxide fuel cell power system," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 233-243, 2009 (in Korean).
- [3] R. O'Hayre, S. W. Cha, Whitney Colella and Fritz B. Prinz *Fuel Cell Fundamentals*, John Wiley & Sons, 2008.
- [4] N. Zuo, M. Zhang, Z. Mao, Z. Gao, and F. Xie, "Fabrication and characterization of composite electrolyte for intermediate-temperature SOFC," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 31, no. 16, pp. 3103-3107, 2011.
- [5] C. Yang, C. Ren, L. Yu, and C. Jin "High performance intermediate temperature micro-tubular SOFCs with $Ba_{0.9}Co_{0.7}Fe_{0.2}Nb_{0.1}O_{3-\delta}$ as cathode," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, NO. 35, pp. 15348-15353, 2013.
- [6] M. J. López-Robledo, M. A. Laguna-Bercero, J. Silva, V. M. Orera, and A. Larrea, "Electrochemical performance of intermediate temperature micro-tubular solid oxide fuel cells using porous ceria barrier layers," *Ceramics International*, vol. 41, no. 6, pp. 7651-7660, 2015.
- [7] Y. Tan, A. Wang, L. Jia, D. Yan, B. Chi, J. Pu, and J. Li "High-performance oxygen electrode for reversible solid oxide cells with power generation and hydrogen production at intermediate temperature," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 7, pp. 4456-4464, 2017.
- [8] F. Mueller, F. Jabbari, R. Gaynor, and J. Brouwer, "Novel solid oxide fuel cell system controller for rapid load following," *Journal of Power Sources*, vol. 172, no. 1, pp. 308-323, 2007.
- [9] A. F. Massardo and F. Lubelli, "Internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycles : Part A-Cell model and cycle thermodynamic analysis," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 122, pp. 27-35, 2000.
- [10] E. Achenbach, "Three-dimensional and time-dependent simulation of a planar solid oxide fuel cell stack," *Journal of Power Sources*, vol. 49, no. 1-3, pp. 333-348, 1994.
- [11] F. Calise, A. Palombo, and L. Vanoli, "Design and partial load exergy analysis of hybrid SOFC-GT power plant," *Journal of Power Sources*, vol. 158, no. 1, pp. 225-244, 2006.