

## LNG운반선 적용을 위한 고체산화물형 연료전지(SOFC) 시스템 모델링

김시원<sup>1</sup> · 김명환<sup>2</sup> · 박상균<sup>†</sup>

(Received August 27, 2018 ; Revised September 13, 2018 ; Accepted September 17, 2018)

### Modeling of solid oxide fuel cell (SOFC) system for LNG carrier applications

Si-Won Kim<sup>1</sup> · Myoung-Hwan Kim<sup>2</sup> · Sang-Kyun Park<sup>†</sup>

**요약:** 본 연구에서는 177k MarkIII LNG 선박에 메탄(CH<sub>4</sub>, Methane)을 연료로 사용하는 3,500kW급 고체산화물 연료전지(SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)와 가스터빈을 적용할 경우에 대한 하이브리드 시스템을 제안하였다. 하이브리드 시스템의 연료 공급 유량, 공기 공급 유량 및 수증기 공급 유량에 따른 SOFC 스택의 전압과 전류 특성 및 SOFC 스택과 하이브리드 시스템의 효율에 대하여 검토하여 적절한 공급 유량을 도출하였다. 본 연구에서 제안한 하이브리드 시스템의 운전 조건에서 SOFC 스택의 전압은 457.2V, 전류는 7669A에서 SOFC 스택의 효율은 54.09%임을 알 수 있었다. 또한 가스터빈을 이용한 하이브리드방식을 적용함으로써 3979kW의 출력을 얻을 수 있었으며 하이브리드 시스템의 효율은 65.0%임을 알 수 있었다.

**주제어:** 선박, 고체산화물형 연료전지, 액화천연가스, 성능해석, 시스템 모델링

**Abstract:** This study proposes a hybrid system comprising a 3500 kW solid oxide fuel cell (SOFC) and a gas turbine. The proposed system was employed for the 177K Mark III liquefied natural gas (LNG) vessel, while using methane as the fuel. The appropriate supply flow rate for the SOFC stack was determined by simulating and reviewing various parameters such as the voltage, current, and performance efficiency that depend on the fuel, air, and vapor flow rate of the hybrid system. Results obtained under the operating conditions of the proposed hybrid system showed that the SOFC stack voltage was 457.2 V and the corresponding efficiency was 54.09% at the current intensity of 7669 A. Furthermore, incorporation of the gas turbine in the hybrid system resulted in an output of 3979 kW and an efficiency rate of 65.0%.

**Keywords:** Ship, Solid oxide fuel cell, Liquefied natural gas, Performance analysis, System modeling

## 1. 서론

현재 인류가 당면하고 있는 가장 큰 문제는 에너지 자원의 한계성과 화석 에너지 사용에 의한 환경오염 및 기후변화의 문제이다. 국제적으로 기존 화석연료 중심의 에너지 시스템을 큰 충격 없이 흡수할 수 있는 새로운 에너지의 개발이 활발히 진행되고 있으며 그 기술 중의 하나로 연료전지(Fuel Cell)가 주목 받고 있다. 이러한 연료전지 기술을 선박에 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다[1]. 연료전지는 경제적으로 친환경적인 특성을 가지고 있어 주목을 받고 있는 가운데 선박용으로 적용 가능한 다양한 시스템의 구성 및 성능에 대한 검토가 필요하다. 다양한 연료전지 중에서 연료전지 시스템이 약 800~1,000℃의 고온에서 운전되는 SOFC(Solid Oxide Fuel Cell)는 PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)나 MCFC(Molten Carbonate Fuel Cell)와 비교하여 현재 기술개발 수준이 가장 낮은 단

계로 선박의 전원 공급 또는 추진시스템에 적용하기 위해서는 보다 많은 연구 개발을 통한 안정성 확보가 필요할 것으로 판단된다. 고온에서 운전되는 SOFC의 특성상 연료전지를 단독으로 운전하는 경우 보다 연료전지 스택에서 배출되는 미반응 가스 및 고온의 배기열을 이용할 수 있는 하이브리드 시스템을 구성하여 구동시 전체 시스템 효율의 향상을 기대할 수 있다. SOFC 하이브리드 시스템의 효율은 기존의 디젤기관보다 높으며 향후 MCFC를 대체할 수 있는 고온형 연료전지로 기대되어지고 있으며 시스템 모델링 관점에서의 다양한 연구가 진행되고 있다[1]-[10].

액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas) 운송 선박에서는 화물에서 자연적으로 발생하는 BOG(Boiled Off Gas)와 화물인 LNG를 기화시켜 연료로 사용할 경우 기존의 석유계 연료인 HFO(Heavy Fuel Oil)나 MDO(Marine Diesel Oil)를 사용할 경우 보다 이산화탄소 배출량을 20%이상 감축할 수 있고 질

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9981-6250>): Associate Professor, Division of Marine Information Technology, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: skpark@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4579

<sup>1</sup> Commissioning Engineer, Service Division, Wartsila Japan, E-mail: withcool@naver.com, Tel: +81 78 304 7514

<sup>2</sup> Professor, Division of Marine Engineering, Korea Marine and Ocean University, E-mail: mhkim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4267

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.

소산화물과 황산화물을 거의 배출하지 않는 장점과 낮은 연료비용으로 효율적인 운항을 할 수 있다는 이점이 있다. 기존의 LNG 운반선의 DFDE 시스템에 화물인 LNG를 연료로 사용하여 선박의 기저부하로 사용하기 위하여 선행연구에서 177K LNG 운반선의 데이터를 참고하여 3,500kW급 SOFC를 제안하였고 SOFC 스택의 특성에 관하여 연구를 진행하였다 [11]. 본 연구에서는 Matlab/Simulink 및 Thermolib[12] 상용프로그램을 활용하여 177K LNG 운반선에서 적용하기 위한 메탄을 연료로 하는 3,500kW급 SOFC + 가스터빈 하이브리드 시스템을 제안하였다. 또한 SOFC + 가스터빈 하이브리드 시스템의 SOFC 스택에서 3,500kW급의 출력을 얻기 위해서는 SOFC 스택으로 공급되는 연료 유량, 공기 유량 및 수증기 공급이 적절하게 이루어져야 한다. 3,500kW급 SOFC 스택에 관한 선행연구[11]결과를 바탕으로 스택 출력에 밀접한 영향을 끼치는 연료 공급 유량, 공기 공급 유량 및 수증기 공급 유량에 따른 SOFC 스택의 전압과 전류 특성 및 SOFC 스택과 하이브리드 시스템 효율에 대하여 검토하여 본 연구에서 제안한 하이브리드 시스템의 운전조건을 도출하였고 하이브리드 시스템 출력에 관하여 검토하였다.

## 2. 해석모델 및 모델링 조건

### 2.1 해석 모델

본 연구에서 사용된 3,500kW급 SOFC 스택의 모델은 선행연구에서 개발한 모델을 사용하였다[11]. 하이브리드 시스템을 구성하기 위한 가스터빈, 공기압축기, 연료압축기, 펌프 및 열교환기의 해석 모델은 다음과 같이 정의된다.

가스터빈에서는 연소기에서 배출되는 고온 고압의 가스가 터빈을 통과하여 동력 출력을 생성하며, 등엔트로피 팽창, 질량 유량에 따른 등엔트로피 효율은 70%로 일정하다고 가정하였다. 터빈에서의 동력 출력은 다음과 같이 정의된다[8].

$$P_{turbine} = \dot{m}(h_{in} - h_{out}) \quad (1)$$

$$\eta_s = \frac{\Delta h}{\Delta h_s} \quad (2)$$

$$P_{turbine} = \dot{m} \cdot \eta_s \cdot \Delta h_s \quad (3)$$

여기서,  $\dot{m}$ 은 질량 유량(g/s),  $\eta_s$ 는 등엔트로피 효율(-),  $h_{in}$ 은 터빈 입구 엔탈피(J/kg),  $h_{out}$ 은 터빈 출구 엔탈피(J/kg)이다.

공기압축기 및 연료압축기는 연료전지 캐소드로 공기 및 애노드로 연료를 공급하는 기기이며 소요 동력은 다음과 같이 정의된다[12].

$$P_{compressor} = \dot{m}(h_{out} - h_{in}) \quad (4)$$

$$\eta_s = \frac{h_{out,s} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}} \quad (5)$$

$$P_{compressor} = \frac{\dot{m}(h_{out,s} - h_{in})}{\eta_s} \quad (6)$$

여기서,  $\dot{m}$ 은 질량 유량(g/s),  $h_{in}$ 은 입구 엔탈피(J/kg),  $h_{out}$ 은 출구 엔탈피(J/kg),  $\eta_s$ 는 등엔트로피 효율(-)이다.

펌프는 애노드로 유체(H<sub>2</sub>O)를 공급하며 소요 동력과 펌프 출구 엔탈피는 다음과 같이 정의된다[12].

$$\dot{m}(h_{in} + \frac{1}{2}v_{in}^2) = \dot{m}(h_{out} + \frac{1}{2}v_{out}^2) + \dot{W} \quad (7)$$

$$\dot{m}(h_{out} - h_{in}) = (p_{out} - p_{in})/\rho \quad (8)$$

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \frac{h_{out} - h_{in}}{\eta} = \left( \frac{p_{out} - p_{in}}{\eta\rho} \right) \quad (9)$$

$$P_{pump} = \frac{\dot{m}(p_{out} - p_{in})}{\rho\eta} \quad (10)$$

$$\dot{H}_{out} = \dot{H}_{in} + P_{pump}$$

여기서,  $\dot{m}$ 은 질량 유량(g/s),  $p_{in}$ 은 펌프 입구 압력(Pa),  $p_{out}$ 은 펌프 출구 압력(Pa),  $\rho$ 는 밀도(g/m<sup>3</sup>),  $\eta$ 는 펌프 효율(-),  $\dot{H}_{in}$ 는 펌프 입구 엔탈피 흐름(J/s),  $\dot{H}_{out}$ 는 펌프 출구 엔탈피 흐름(J/s)이다.

열교환기는 유용도-NTU(number of transfer units)법을 기반으로 대향유동(counter flow)으로 설정하여 계산된다[12].

$$\epsilon = \left( \frac{Q}{Q_{max}} \right) \quad (11)$$

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]} \quad (12)$$

여기서,  $\epsilon$ 은 유용도(-),  $C_r$ 은 열용량비(-),  $NTU$ 는 전달단위수(-)이다.

3-Way 밸브는 터빈의 배기가스를 활용하여 연료전지로 공급되는 유체의 가열원으로 사용하기 위하여 분배하는 역할을 하고 SOFC 스택 애노드와 캐소드로 공급되는 가스의 온도를 조절하는 기능도 동시에 한다[12].

$$\begin{aligned} \dot{m}_{out1} &= pos \dot{m}_{in} \\ \dot{m}_{out2} &= (1 - pos) \dot{m}_{in} \\ \dot{m}_{in} h_{in} &= \dot{m}_{out1} h_{out1} + \dot{m}_{out2} h_{out2} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $\dot{m}_{in}$ 은 밸브로 들어오는 질량 유량(g/s),  $\dot{m}_{out1}$ 은 1번 분배기로 배출되는 질량 유량(g/s),  $\dot{m}_{out2}$ 은 2번 분배기로 배출되는 질량 유량(g/s),  $h_{in}$ 은 밸브 입구 엔탈피(J/kg),  $h_{out1}$ 은 1번 분배기 출구 엔탈피(J/kg),  $h_{out2}$ 은 2번 분배기 출구 엔탈피(J/kg),  $pos$ 는 밸브의 열림 정도를 나타내며 0~1의 값을 가진다.

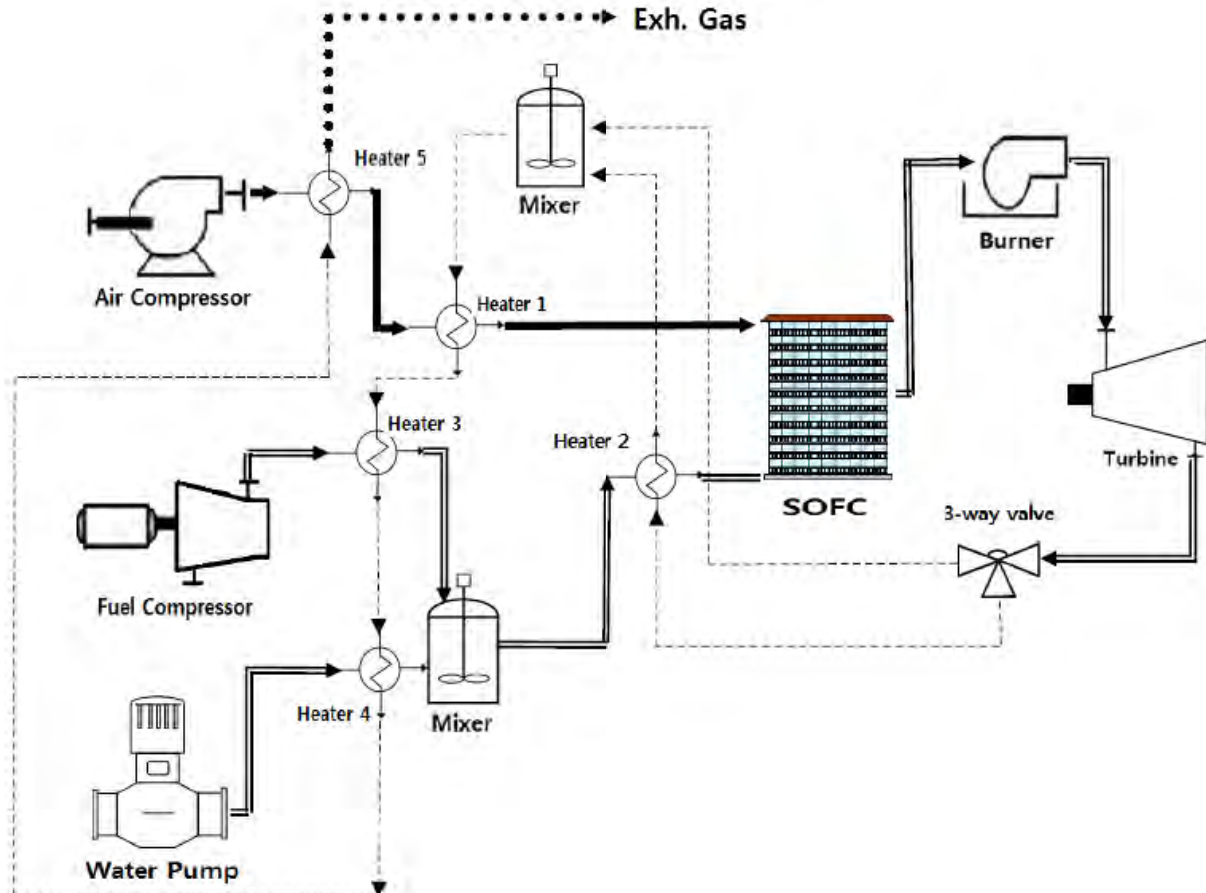


Figure 1: Layout of 3,500kW SOFC + G/T Hybrid System

SOFC 스택의 효율은 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta_{stack} = \frac{P_{stack}}{m_{CH_4} \cdot LHV_{CH_4}} \quad (14)$$

여기서,  $P_{stack}$ 는 SOFC 스택 출력(kW),  $m_{CH_4}$ 는 메탄 공급 유량(mol/s),  $LHV_{CH_4}$ 은 메탄 저위발열량(kJ/mol)이다.

SOFC 하이브리드 시스템의 전체 효율은 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta_{system} = \frac{P_{stack} - P_{aircomp} - P_{fuelcomp} - P_{waterpump} + P_{turbine}}{m_{CH_4} \cdot LHV_{CH_4}} \quad (15)$$

여기서,  $P_{stack}$ 는 SOFC 스택 출력(kW),  $P_{aircomp}$ 는 공기압축기 소비 전력(kW),  $P_{fuelcomp}$ 는 연료펌프 소비 전력(kW),  $P_{waterpump}$ 는 펌프 소비 전력(kW),  $P_{turbine}$ 는 가스터빈 출력(kW)이다.

## 2.2 시스템 구성

Figure 1은 SOFC 스택과 주변 기기 모델을 결합한 SOFC + 가스터빈 하이브리드 시스템의 구성도를 보여주고 있다. SOFC 스택은 LNG를 수소 제조용 연료로 사용하여 수증기 직접 내부 개질 방식을 채택하고 있다. 연료 압축기와 펌프

에 의해 공급된 메탄과 수증기는 열교환기를 통과하면서 적절한 온도까지 가열이 되어서 SOFC 스택으로 공급된다. 스택 내부에서 개질반응에 의해서 수소가 생산되고 화학반응에 의해 소비된다. 스택 내부에서 소비되지 못한 가스는 버너로 공급된다. 버너에서는 미 개질된 메탄과 미 반응된 수소가 전부 연소하게 된다. 이 연소 가스는 터빈으로 공급되어 전력을 얻는다.

공기는 캐소드측 전기화학 반응용 및 SOFC 스택 냉각용으로 사용되며 공기압축기에 의해 공급된 공기는 열교환기를 통과하면서 적절한 온도까지 가열이 되어서 SOFC 스택의 공기극으로 공급된다. 터빈 출구의 배기가스는 3-Way 밸브를 통해 유량이 조절되어 애노드 및 캐소드 공급 유체를 가열하기 위한 가열원으로 사용되고 난 후 외기로 배출된다.

## 3. 해석결과

SOFC 하이브리드 시스템의 효율은 연료, 수증기 및 공기의 공급 유량에 따라 변화하게 된다. 3,500kW급 SOFC 하이브리드 시스템에서 최대의 효율을 얻기 위한 적절한 연료, 수증기 및 공기의 공급 유량을 도출하였다.

### 3.1 연료압축기의 유량변화에 따른 영향

Figure 2는 SOFC 스택의 출력 값을 3,500kW급으로 유지하

기 위하여 공기압축기의 공기 공급 유량은 2304g/s, 펌프의 물 공급 유량은 378g/s로 충분한 양이 일정하게 공급된다고 가정하여 연료압축기의 메탄 공급 유량을 110g/s~150g/s로 변화한 경우의 SOFC 스택 전압과 전류 특성, SOFC 하이브리드 시스템전체 출력, SOFC 스택 출력, 가스터빈 출력, SOFC 스택 및 하이브리드 시스템 효율에 대한 결과를 나타낸 것이다.

메탄 공급 유량이 증가 할수록 스택의 전압은 감소하며 스택의 전류는 증가함에 따라 스택의 출력이 증가하다가 일정 유량 이상의 영역에서는 전압 및 전류가 거의 일정한 값을 유지함을 알 수 있다. 이는 SOFC 스택 내부에서의 개질반응을 통한 수소 변환율이 일정한 상태에서 메탄의 공급량이 증가하면 화학반응에 필요한 수소의 양이 증가하여 스택의 전류는 증가하게 되고 과전압의 증가로 전압은 낮아지기 때문이다. 메탄 공급 유량이 약 129.6g/s 이상에서는 스택의 전압과 전류가 거의 일정하게 유지되어 SOFC 스택 출력에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 메탄 공급 유량이 증가 할수록 SOFC 스택 효율은 서서히 감소하며 하이브리드 시스템 효율은 거의 일정하게 유지되다가 일정한 유량 이상에서는 급격하게 낮아짐을 알 수 있다. 위의 계산 결과에서 3,500kW급 SOFC 스택의 출력을 얻기 위한 적정 메탄 공급 유량을 129.6g/s로 도출하였다.

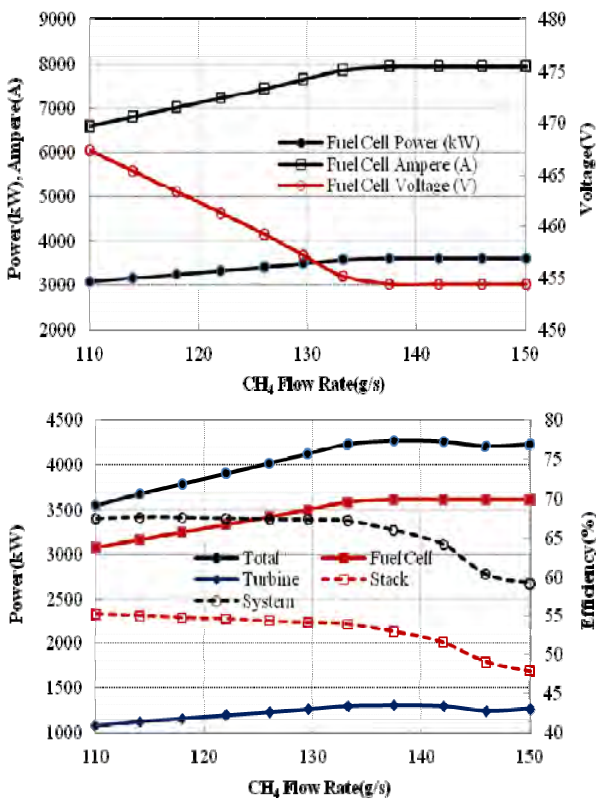


Figure 2: Effect of anode fuel flow rate

### 3.2 펌프의 유량변화에 따른 영향

Figure 3은 SOFC 스택의 출력 값을 3,500kW급으로 유지하기 위하여 공기압축기의 공기 공급 유량은 2304g/s로 충분한 양이 일정하게 공급된다고 가정하고, 연료압축기의 메탄 공급 유량은 전 절에서 도출된 129.6g/s로 일정하게 유지한 상태에서 펌프의 물 공급 유량을 215g/s~315g/s로 변화한 경우의 SOFC 스택 전압과 전류 특성, SOFC 하이브리드 시스템전체 출력, SOFC 스택 출력, 가스터빈 출력, SOFC 스택 및 하이브리드 시스템 효율에 대한 결과를 나타낸 것이다.

물 공급 유량이 증가 할수록 스택의 전압은 감소하며 전류는 증가함에 따라 SOFC 스택과 하이브리드 시스템의 효율은 증가하지만 약 304.5g/s 이상의 유량에서는 스택의 전압과 전류가 거의 일정하게 유지되면서 SOFC 스택과 하이브리드 시스템 효율도 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이는 공급되는 메탄량이 일정한 상태에서 물 공급량이 증가하게 되면 S/C(Steam/Carbon ratio)의 증가를 의미하며 개질율은 S/C가 높을수록 증가하기 때문이다. 위의 계산 결과에서 3,500kW급 SOFC 스택의 출력을 얻기 위한 물 공급 유량을 304.5g/s로 도출하였다.

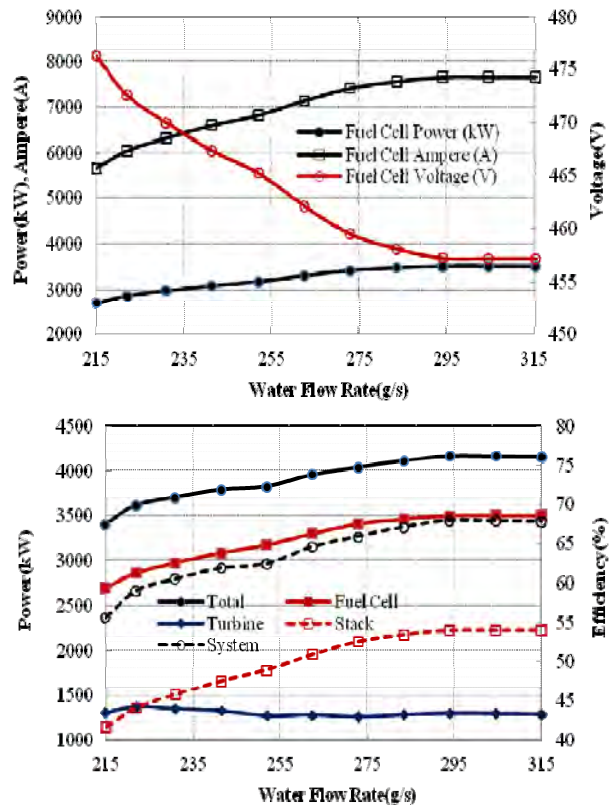


Figure 3: Effect of anode water flow rate

### 3.3 공기압축기의 유량변화에 따른 영향

Figure 4는 SOFC 스택의 출력 값을 3,500kW급으로 유지하기 위하여 전 절에서 도출된 값들인 연료압축기의 메탄 공급 유량은 129.6g/s, 펌프의 물 공급 유량을 304.5g/s로 일정하게 유지한 상태에서 공기압축기의 공기 공급 유량을 2300g/s~3080g/s로 변화한 경우의 SOFC 스택 전압과 전류 특성, SOFC 하이브리드 시스템 전체 출력, SOFC 스택 출력, 가스터빈 출력, SOFC 스택 및 하이브리드 시스템 효율에 대한 결과를 나타낸 것이다.

공기 유량이 증가하여도 스택의 전압과 전류는 거의 일정하게 유지되어 SOFC 스택 효율도 거의 일정하게 유지되지만 공기 압축기의 소비동력 증가로 인하여 하이브리드 시스템 효율은 서서히 감소함을 알 수 있다. 위의 계산 결과에서 3,500kW급 SOFC 스택의 출력을 얻기 위한 공기 유량은 시스템 효율이 낮아지기 시작하는 공기 유량인 2880g/s로 설정하였다.

Table 1은 상기 계산에서 도출된 값들을 바탕으로한 SOFC + 가스터빈 하이브리드 시스템 모델링을 계산하기 위한 입력 값들을 나타내고 있다. Table 2는 본 연구에서 제안한 3,500kW급 SOFC + 가스터빈 하이브리드 시스템에 Table 1의 값을 입력하여 계산된 결과를 나타내고 있다. SOFC 스택의 전압은 457.2V, 전류는 7669A 일 때 SOFC 스택의 효율은 54.09%임을 알 수 있다. 가스터빈을 이용한 하이브리드방식을 적용함으로써 3979kW의 출력을 얻을 수 있었으며 하이브리드 시스템의 효율은 65.0%임을 알 수 있다.

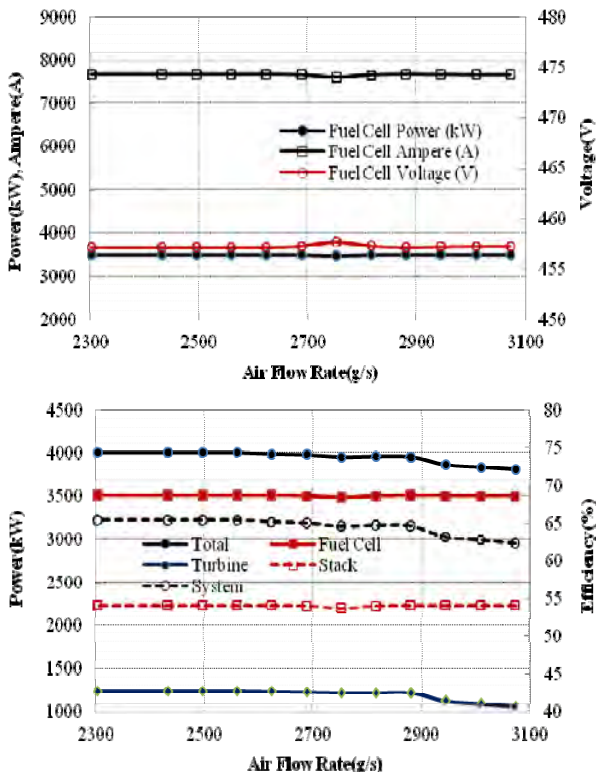


Figure 4: Effect of cathode air flow rate

Table 1: Input value of hybrid system

System	unit	input
Fuel Cell	Number of cells [-]	650
	Maximum hydrogen conversion rate	0.80
	Initial temperature of stack [K]	323
	Active cell area of one cell [m <sup>2</sup> ]	2.7
Turbine	Turbine efficiency [%]	70
Fuel Compressor	Temperature [K]	298.15
	Pressure [bar]	3.0
	Flow Rate (g/s)	129.6
	Isentropic efficiency (%)	70
Water Pump	Temperature [K]	298.15
	Pump efficiency (%)	80
	Pressure (bar)	3.0
	Flow Rate (g/s)	304.5
Air Compressor	Temperature [K]	298.15
	Isentropic efficiency (%)	70
	Pressure (bar)	3.0
	Flow Rate (g/s)	2880
3-Way Valve	Position	0.9645

Table 2: Results of hybrid system

Efficiency Calculation		
Description	Unit	Result
Fuel Cell Power	kW	3506
Hybrid System Power	kW	3979
Fuel Cell System Efficiency	%	54.09
Hybrid System Efficiency	%	65.0
Fuel Cell Voltage	V	457.2
Fuel Cell Ampere	A	7669
Air Comp. Power	kW	455.8
Fuel Comp. Power	kW	35.6
Water Pump Power	kW	0.06782
Turbine Power	kW	784.7
Single cell voltage	V	0.7034
Cell Area	A/m <sup>2</sup>	2840
Anode Inlet Temp	K	1090.63
Cathode Inlet Temp	K	1090.63
Stack Outlet Temp	K	1375.63
3-way vlave position	-	0.9645

## 4. 결 론

본 논문에서는 177K LNG 운반선의 데이터를 참고하여 메탄을 연료로 사용하는 3,500kW급 SOFC + 가스터빈 하이브리드 시스템을 제안하였고 본 연구의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) LNG 운반 선박에 적용하기 위한 3,500kW급 SOFC + 가스터빈 하이브리드 시스템에서 3979kW의 출력을 얻을 수 있었다.
- (2) 본 연구에서 제안한 하이브리드 시스템의 운전 조건에서 SOFC 스택의 효율은 54.09%, 하이브리드 시스템 효율은 65.0%로 나타났다.
- (3) SOFC + 가스터빈 하이브리드 시스템 출력에 가장 큰 영향을 주는 요인은 연료 공급 유량임을 알 수 있었고, 연료 유량이 증가하면 SOFC 스택 전압은 감소하고 전류는 증가하여 일정한 유량까지는 스택의 출력은 증가하지만 SOFC 스택 및 하이브리드 시스템 효율은 감소함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 김시원의 석사학위논문(“LNG 운반선의 3,500kW급 고체산화물형 연료전지 시스템 성능평가 시뮬레이션, 한국해양대학교 대학원”)을 개선한 것이다.

## References

- [1] L. van Biert, M. Godjevac, K. Visser, and P. V. Aravind “A review of fuel cell systems for maritime applications,” *Journal of Power Sources*, vol. 327, pp. 345-364, 2016.
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] J. S. Oh, K. J. Lee, S. H. Kim, S. G. Oh, T. W. Lim, J. S. Kim, S. K. Park, M. E. Kim, and M. H. Kim, “Thermodynamic analysis on steam reforming of hydrocarbons and alcohols for fuel cell system,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 388-396, 2011 (in Korean).
- [5] S. K. Park, “A study on temperature characteristic of the gases supplied to SOFC system by utilizing the ship exhaust gas,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 8, pp. 822-828, 2013 (in Korean).
- [6] S. K. Park and M. E. Kim, “A study on thermal management of stack supply gas of solid oxide fuel cell system for ship applications,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 6, pp. 765-772, 2011 (in Korean).
- [7] F. Zabihian and A. Fung, “A review on modeling of hybrid solid oxide fuel cell systems,” *International Journal of Engineering (IJE)*, vol. 3, no. 2, pp. 85-119, 2009.
- [8] C. Strazza, A. Del Borghi, P. Costamagna, A. Traverso, and M. Santin., “Comparative LCA of methanol-fuelled SOFCs as auxiliary power systems on-board ships,” *Applied Energy*, vol. 87, no. 5, pp. 1670-1678, 2010.
- [9] L. K. C. Tse, S. Wilkins, N. McGlashan, B. Urban, and R. Martinez-Botas, “Solid oxide fuel cell/gas turbine trigeneration system for marine applications,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 6, pp. 3149-3162, 2011.
- [10] W. Jiang, R. Fang, J. A. Khan, and R. A. Dougal, “Parameter setting and analysis of a dynamic tubular SOFC model” *Journal of Power Sources*, vol. 162, no. 1, pp. 316-326, 2006.
- [11] S. W. Kim, M. H. Kim, and S. K. Park, “Study of solid oxide fuel cell (SOFC) stack characteristics for LNG carrier applications,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 41, no. 7, pp. 626-631, 2017 (in Korean).
- [12] EUTECH Scientific Engineering, *Simulation Toolbox for the Design and Development of Thermodynamic System in MATLAB/Simulink*, 2009.