

## 선박 발전기용 연료전지 시스템의 효율에 관한 연구

이정희\*, 곽재섭\*<sup>#</sup>, 김광희\*\*<sup>#</sup>

\*부경대학교 기계공학과, \*\*부경대학교 기계설계공학과

### A Study on the Efficiency of Fuel Cells for Marine Generators

Jung-Hee Lee\*, Jae-Seob Kwak\*<sup>#</sup>, Kwang-Heui Kim\*\*<sup>#</sup>

\*Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l UNIV.

\*\*Dept. of Mechanical Design Engineering, Pukyong Nat'l UNIV.

(Received 14 June 2018; received in revised from 21 June 2018; accepted 25 June 2018)

#### ABSTRACT

Most current ships have adopted on-board diesel generators to produce electricity, but the overall efficiency of equipment is down to about 50% due to thermal losses from operations such as exhaust gas, jacket water cooler, scavenge air cooler, etc. Recently, fuel cells have been highlighted as a promising technology to reduce the effect on the environment and have a higher efficiency. Therefore, this paper suggested a solid oxide fuel cell (SOFC)-gas turbine (GT) using waste heat from a SOFC and SOFC-GT-steam turbine (ST) with Rankine cycle. To compare both configurations, the fuel flow rate, current density, cell voltage, electrical power, and overall efficiency were evaluated at different operating loads. The overall efficiency of both SOFC hybrid systems was higher than the conventional system.

**Key Words** : SOFC Hybrid Generator(고체 산화물 연료전지 하이브리드 발전기), Waste Heat Recovery(폐열 회수 장치), Gas Turbine(가스 터빈), Steam Turbine(스팀 터빈), Overall Efficiency(전체 효율)

#### 1. 서 론

대부분의 선박은 운항 혹은 정박 중에 필요한 전기를 생산하기 위해 효율과 비용 절감적인 측면을 고려하여 디젤 발전기를 사용해왔다<sup>[1,2]</sup>. 하지만 배기가스, 소기, 윤활, 자켓 냉각수 시스템 등과 같은 엔진 내부 시스템을 통해 절반가량 손실되어 전체 효율은 약 50%에 불과하다. 뿐만 아니라 주 연료인 선박용 중유 및 디젤유의 가격 변동성과 연료고갈 등의 문제에 따라 효과적인 연료 사용을 위해 새로운 시스템의 필요성이 대두되고 있다.

연료전지는 화학에너지를 전기에너지로 변환하여 발전하는 장치로써, 수소 및 천연가스를 연료로 사용할 수 있어 친환경적이고 효율이 높기 때문에 기존 발전기를 대체할 시스템으로 주목받고 있다. 연료전지는 출력 밀도, 비용적 측면 등을 고려했을 때 선박에 활용되는 사례는 제한적이지만, 선박의 크기에 따라 PEMFC, MCFC, SOFC를 활용한 연구 및 개발이 이루어지고 있는 추세이다<sup>[3]</sup>.

본 연구에서는 1,000°C의 고온에서 작동하는 SOFC와 연료전지에서 반응 후 발생하는 폐열을 활용하여 가스 터빈(GT)과 스팀 터빈(ST)을 구동하는 하이브리드 발전기 시스템을 구축함으로써 발전기의 전체 효율을 향상시키고자 한다. 모든 발전시스템의 부하조건은 25%, 50%, 75%, 100%

# Corresponding Author : khk@pknu.ac.kr

Tel: +82-51-629-6159, Fax: +82-51-629-6150

로 선정하고, 소모되는 연료량, 연료전지의 전류 밀도, 전압, 전력량을 분석한 뒤 각 조건에 따른 전체 효율을 평가하고자 한다.

## 2. 하이브리드 시스템 구성 및 조건

본 연구에 적용되는 SOFC 하이브리드 시스템은 SOFC-GT 발전기와 SOFC-GT-ST 발전기로서, Fig. 1과 Fig. 2와 같다. SOFC에 사용될 수 있는 연료는 다양하나, 본 연구에서는 비용이 적게 들고 친환경적이며 육상과 선박에 추가적인 기반 시설이 필요 없는 천연가스(NG)를 사용한다. NG의 경우, 전체 성분의 약 95% 이상이 메탄(CH<sub>4</sub>)으로 구성되어 있으므로 본 연구에서 고려되는 NG의 CH<sub>4</sub> 비율은 100%로 가정한다. 고안된 SOFC 발전 시스템은 아래와 같은 조건에서 구동된다.

- (1) SOFC, GT, ST는 정상상태에서 작동된다.
- (2) 모든 가스는 이상기체이다.
- (3) 캐소드와 애노드 입구 측 온도는 동일하다.
- (4) 연료전지 내 모든 반응은 평형 상태이다.
- (5) 유체의 위치 및 운동에너지는 무시된다.
- (6) 모든 유체는 외부로 유출되지 않는다.

### 2.1 SOFC-GT 발전기의 구성

SOFC-GT 발전기는 1,800kW의 전력을 생산하기 위해 공기 압축기(air compressor, AC), 연료 압축기(fuel compressor, FC), 열교환기(heat exchanger, HEX), 내부 개질기(internal reformer, IR)가 장착된 SOFC, 혼합기(mixer), 연소기(combustor), GT로 구성되어 있다. AC로 공급되는 대기 압력과 온도는 1atm과 25°C이며, 압축된 고온-고압의 공기는 HEX를 거쳐 연료전지 캐소드 입구 측에 약 800°C의 온도로 공급된다. FC로 공급되는 연료의 압력과 온도는 AC로 공급되는 공기와 동일하며, 각 압축기의 압축비도 동일하다. FC를 통해 가압된 연료는 SOFC로 공급되기 전, 애노드 출구 측에서 배출되는 소량의 고온 증기와 mixer에서 결합한다. 공급된 CH<sub>4</sub>는 mixer와 IR을 통해 산소와 결합하여 수소가스로 치환된다. 연료의 개질 반응(fuel reforming reaction) 및 전이 반응(water-shift reaction)

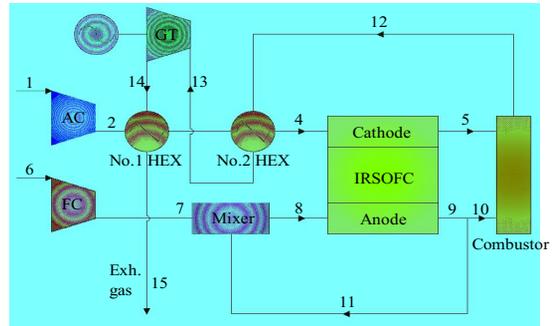


Fig. 1 Schematic diagram of SOFC-GT system

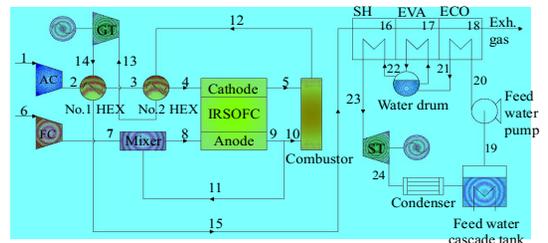
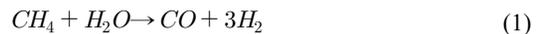


Fig. 2 Schematic diagram of SOFC-GT-ST system

은 식(1)과 식(2)와 같이 이루어진다<sup>[4]</sup>.

Fuel reforming reaction :



Water-shift reaction :



개질 반응과 전이 반응은 주어진 온도와 압력 하에서 평형 상태에 도달할 때까지 진행된다.

SOFC의 스택 온도는 1,000°C로 작동된다. 연료전지 내에서 반응 후 남아있는 산소, 일산화탄소, 수소는 외부에 설치된 연소기(combustor)를 통해 제거되고, 고온의 열에너지를 지닌 배기가스는 공급된 공기와 열 교환을 거쳐 GT로 공급된다.

### 2.2 SOFC-GT-ST 발전기의 구성

SOFC-GT 발전기에서 배출된 열원을 효율적으로 회수하기 위해 랭킨 사이클을 이용한 배열 회수 보일러(heat recovery steam generator, HRSG)와 ST 구

동을 위한 과열 증기를 생성하기 위해, 60°C 청수 (fresh water, FW)를 pump를 이용해 HRSG로 공급한다. FW는 no.1 HEX 출구 측에서 방출된 가스와의 열 교환을 통하여 과열 증기화 되어 ST를 구동하고, 응축기(condenser)를 통해 다시 청수 탱크(feed water cascade tank)로 공급되어 순환하게 된다. 배기가스는 과열히터(superheater, SH), 증발기(evaporator, EVA), 이코노마이저(economizer, ECO)를 통과하여 대기로 방출된다.

2.1과 2.2장에 언급된 SOFC 하이브리드 시스템 구성 요소의 주요 인자는 Table 1과 같다.

### 2.3 SOFC 설계

SOFC로 공급된 CH<sub>4</sub>는 개질 및 전이 반응을 거쳐 수소로 치환되고, 캐소드에 공급된 공기 내 산소와 결합하여 화학 반응 후 전력을 생성한다. 관련 반응식은 식(3)과 식(4)로 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

Overall oxidation reaction :



Overall cell reaction :



2.1장에서 설명한 바와 같이 SOFC 스택 내에서 반응 후 애노드 출구 측으로 배출된 수증기는 연료의 개질과 온도를 상승시키기 위해 mixer에서 혼합된다. 재순환 되는 수증기의 양은 수증기-탄소비  $\gamma_{sc}$ 로 결정되며<sup>[5]</sup>, 본 연구에서는 2.5로 가정한다.

$$\gamma_{sc} = \frac{\dot{n}_{11, H_2O}}{\dot{n}_{8, CH_4} + \dot{n}_{8, CO}} \quad (5)$$

여기서  $\dot{n}$ 은 몰 유량(kmol/s)을 나타낸다.

Mixer의 출구 측 온도는 식(6)과 같이 에너지 평형 방정식에 의해 산출된다.

**Table 1 Parameters of main components**

Parameters	Values
Pressure ratio of compressor	8
Air-fuel ratio	7
Efficiency of compressor (%)	80
Effectiveness of HEX (%)	88
Pressure loss of HEX (%)	1
Inlet temperature of SOFC (°C)	1,000
Outlet temperature of SOFC (°C)	950
Pressure loss of SOFC (%)	2
Pressure loss of combustor (%)	1
Pressure ratio of turbine	7.5
Efficiency of turbine (%)	85
Inlet temperature of GT (°C)	900
Pressure loss of turbine (%)	2
FW inlet pressure (bar)	1.013
FW pump pressure (bar)	7
Inlet temperature of FW (°C)	60
Pinch point temperature of HRSG (°C)	10
Pressure loss of HRSG (%)	2

$$\dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{11} h_{11} \quad (6)$$

여기서  $\dot{m}$ 은 질량 유량(kg/s)을 의미한다.

연료 전지의 스택 내부에서 반응되는 수소의 양은 식(7)의 연료 이용률  $U_f$ 로 결정되며<sup>[5]</sup>, 본 연구에서는 85%로 가정한다.

$$U_f = \frac{\dot{z}}{4\dot{n}_{8, CH_4} + \dot{n}_{8, H_2} + \dot{n}_{8, CO}} \quad (7)$$

여기서,  $\dot{z}$ 는 수소 반응 양(kmol/s)을 나타낸다.

이론적인 셀 전압은 Nerst 식에 의해 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며, 작동온도 및 연료의 분자 조성에 따라 달라진다<sup>[6]</sup>.

$$E = \frac{\bar{g}^\circ}{n_e F} + \frac{RT}{n_e F} \cdot \ln \left( \frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right) \quad (8)$$

여기서,  $\bar{g}^\circ$  는 형상 깎스 자유에너지,  $n_e$  는 전자 수,  $F$  는 페러데이 상수,  $p$  는 분압을 나타낸다.

하지만 실제 셀 전압은 활성화 분극(activation polarization), 저항 분극(ohmic polarization), 농도 분극(concentration polarization)들로 인해 식(9)와 같이 손실이 발생하게 된다<sup>[6]</sup>.

$$V_c = E - (V_{act} + V_{ohm} + V_{conc}) \quad (9)$$

여기서,  $V$  는 전압(V),  $E$  는 개회로 전압(V)을 나타내고, 하첨자  $c$  는 단위 셀,  $act$  는 활성화 분극,  $ohm$  은 저항 분극,  $conc$  는 농도 분극을 의미한다.

전기 화학 반응에 의한 전압 강하를 활성화 분극이라 정의하고, 버틀러-볼머 식을<sup>[6]</sup> 이용하여 나타낸다. 일반적으로 교환 전류 밀도  $i_0$  의 값은 캐소드 2,000-3,000A/m<sup>2</sup>, 애노드 5,300-6,300A/m<sup>2</sup> 이다.

$$V_{act} = \frac{2RT}{n_e F} \sinh^{-1} \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad (10)$$

여기서,  $i$  는 전류 밀도(A/m<sup>2</sup>)이다.

캐소드, 애노드, 전해질에서의 전자 이동 및 이온 이동에 따라 발생하는 저항을 저항 분극이라 정의하고 다음 식(11)로부터 산출된다<sup>[6]</sup>.

$$V_{ohm} = i \sum_k \delta_k A_k \exp \left( \frac{B_k}{T} \right) \quad (11)$$

여기서,  $\delta_k$  각 요소의 두께(m),  $A_k$  는,  $B_k$  는 캐소드, 애노드, 전해질, 연결재의 상수이다. 농도 분극은 반응 물질의 소모로 인해 농도가 변화할 때 발생하는 손실로, 실험 경험 값에 따라 다음과 같이 산출된다.  $m$  과  $n$  은 상수로 각각의 값은  $3.0 \times 10^{-5}$  V와  $8.0 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/mA이다<sup>[6]</sup>.

$$V_{conc} = m \exp(ni) \quad (12)$$

산출된 유효 전압을 기준으로, 연료전지의 출력은 아래의 식으로부터 계산할 수 있다<sup>[6]</sup>. 인버터의 효율은 96%로 가정한다.

$$\dot{W}_{SOFC} = V_c \dot{z} n_e F \eta_{inv} \quad (13)$$

여기서  $\eta$  는 효율, 하첨자  $inv$  는 인버터이다.

전류 밀도  $i$  는 반응되는 수소의 양, 셀의 유효 면적,  $A_c$ , 및 개수,  $N$ ,에 따라 결정되며<sup>[6]</sup> 본 연구에서 적용되는 유효 면적은 0.028m<sup>2</sup>이다.

$$i = \frac{\dot{z} n_e F}{N A_c} \quad (14)$$

## 2.4 시스템의 전체 효율

SOFC 하이브리드 시스템의 전체 효율은 전체 시스템의 출력량, 연료 소모량, 저위 발열량에 따라 결정되며, 식(15)과 같이 정의된다. 전체 출력은 식(16)에 따라 산출되며, FW pump의 일 양은 전체 출력에 영향을 미치지 않을 정도로 작은 값이기 때문에 고려되지 않는다<sup>[7]</sup>.

$$\eta_{elec} = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{n}_f \times LHV_f} \quad (15)$$

여기서,  $\dot{W}$  는 전체 출력(kW), LHV는 저위 발열량(kJ/kg), 하첨자  $f$  는 연료를 의미한다.

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_{SOFC} + \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{ST} - \dot{W}_{AC} - \dot{W}_{FC} \quad (16)$$

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 SOFC-GT 발전기의 효율 분석

2장에 기술된 데이터 바탕으로 발전기 부하 25%, 50%, 75%, 100%에 따른 연료 소모량은 0.0096kg/s, 0.0196kg/s, 0.0302kg/s, 0.0413kg/s로 부

하의 증가에 비례하여 연료를 소모한다. 연료 유량은 전류 밀도, 전압, SOFC와 GT의 출력 값과 밀접한 관련이 있으며, 해석 결과 Table 2와 같은 결과를 도출하였다.

전류 밀도  $i$ 는 식(14)에 나타난 바와 같이 연료 전지 스택 내에서 반응되는 수소의 양에 의해 결정된다. 부하가 높아질수록 전력량을 증대시키기 위해 소모되는 연료의 양이 증가하고, 이에 따라 전류 밀도도 비례하여 상승한다.

반면에 전류 밀도가 증가할수록 손실 전압이 상승되기 때문에 연료전지 셀 전압은 최고 부하인 100%에서 가장 작은 값을 가짐을 확인 할 수 있었다. 즉, 전류 밀도와 전압의 관계는 반비례임을 알 수 있었다.

시스템에서 출력된 총 출력은 최저부하 상태인 25%에서 452kW, 50%일 때 903kW, 75%일 때 1,355kW, 100%일 때 1,805kW로 설계 기준인 1,800kW를 만족한다. 산출된 총 출력에서 AC와 FC가 한 일의 양을 제외한 시스템의 전체 효율은 각 부하에 따라 73%, 70%, 68%, 65%임을 확인할 수 있었다.

### 3.2 SOFC-GT-ST 발전기의 효율 분석

SOFC-GT 발전기에서 모든 열 교환을 마친 후 no.1 HEX 출구 측으로 배출되는 가스는 약 340℃ 상태의 고온으로 HRSG를 이용해 ST를 구동함으로써 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다.

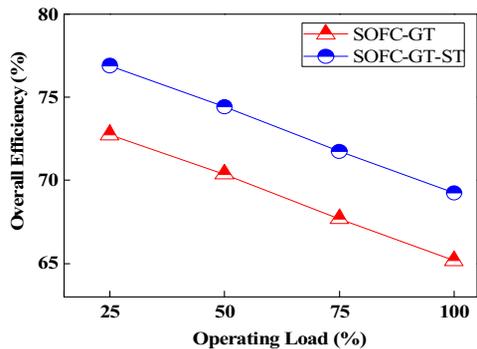
HRSG에서 가스와 열 교환을 거친 FW는 8bar의 포화증기 상태로 변환된다. 추가 전력 생성을 위한 ST를 작동하기 위해 필요한 FW의 양은 부하의 증가에 따라 0.043kg/s, 0.089kg/s, 0.136kg/s, 0.186kg/s로 비례하여 증가함을 알 수 있었다. FW 소모량을 기준으로 산출된 ST의 출력량은 Table 3과 같다. SOFC-GT 발전 시스템과 동일하게 전체 출력량과 한 일의 양을 고려하여 계산된 전체 효율은 77%, 75%, 72%, 70%임을 확인할 수 있었다. 이는 SOFC-GT 발전기 대비 약 4.5% 증가된 것으로 폐열 활용을 통해 시스템의 효율이 향상되었다. Fig. 3은 SOFC-GT 발전기와 SOFC-GT-ST 발전기의 전체 효율을 나타낸 것이다.

**Table 2 Performance of SOFC-GT generator**

Parameters	Load(%)			
	25	50	75	100
$i$ (A/m <sup>2</sup> )	709	1,452	2,234	3,052
$V$ (V)	0.895	0.860	0.826	0.791
$\dot{W}_{SOFC}$ (kW/s)	281	554	818	1,071
$\dot{W}_{GT}$ (kW/s)	171	349	537	734
$\dot{W}_{AC}$ (kW/s)	108	221	340	464
$\dot{W}_{FC}$ (kW/s)	29	60	93	127

**Table 3 Performance of SOFC-GT-ST generator**

Parameters	Load(%)			
	25	50	75	100
$i$ (A/m <sup>2</sup> )	681	1,393	2,138	2,919
$V$ (V)	0.896	0.863	0.830	0.797
$\dot{W}_{SOFC}$ (kW/s)	271	533	787	1031
$\dot{W}_{GT}$ (kW/s)	164	335	514	702
$\dot{W}_{ST}$ (kW/s)	17	35	53	72
$\dot{W}_{AC}$ (kW/s)	103	212	325	444
$\dot{W}_{FC}$ (kW/s)	28	58	89	121



**Fig. 3 Overall efficiency for SOFC hybrid systems**

연료 소모량, 전류 밀도, 전압의 관계는 3.1장에 기술된 바와 동일하며, 배기가스를 추가적으로 활용함으로써 SOFC-GT 시스템의 연료 소모량 대비 약 4%가 절감되었다. 부하에 따른 연료 소모량은

0.0092kg/s, 0.0188kg/s, 0.0290kg/s, 0.0396kg/s 이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 선박용 발전기의 효율을 향상시키기 위해, 1,000℃의 고온에서 작동하는 SOFC-GT와 SOFC-GT-ST 발전 시스템을 제안하였다. 25%, 50%, 75%, 100% 부하에 따른 연료소모량, 전류 밀도, 전압, 전력량, 효율을 분석함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 발전기 부하가 증가함에 따라 연료전지의 전기적 출력이 증가한다. 연료전지의 출력은 화학적 반응 양에 비례하므로, 부하에 따라 소모되는 연료의 양도 증가함을 의미한다.
2. 연료전지의 특성에 따라 연료 소모량과 전류 밀도는 비례하며, 전압과의 관계는 반비례함을 확인할 수 있었다.
3. 전체 효율은 최대 부하인 100%일 때 가장 낮게 분석되었으며, 이에 따라 효율은 연료 소모량과 반비례 관계임을 확인할 수 있었다.
4. SOFC-GT 시스템의 전체 효율은 약 65%에서 73%, SOFC-GT-ST는 약 70%에서 최대 77%로 기존 디젤 발전기 대비 증가됨을 알 수 있었다.
5. 두 시스템의 비교를 통해, GT에서 방출된 폐열을 활용하여 ST를 추가적으로 구동하는 시스템의 전체 효율이 약 4% 증가되었다.

#### 후 기

“이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음”

#### REFERENCES

1. Lee, C. S., and Lee, C. W., "A Study on the Exhaust Gas After Treatment for Small Ship," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 76-81, 2017.
2. Shim, H. S, Lee, M. K., and Lee K. Y. "A

- Development Study on Engine Control Module of an Electronic Marine Diesel Engine," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 134-140, 2015.
3. Van-Biert, L. V., Godjevac, M., Visser, K., and Aravind, P. V., "A Review of Fuel Cell Systems for Maritime Applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 327, No. 30, pp. 345-364, 2016.
4. Akkayaa, A. V., Sahin, B., and Erdern, H. H., "An analysis of SOFC/GT CHP system based on exergetic performance criteria," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 10, pp. 2566-2577, 2008.
5. Meng, Q., Han, J., Kong, L., Liu, H., Zhang, T., and Yu, Z., "Thermodynamic analysis of combined power generation system based on SOFC/GT and transcritical carbon dioxide cycle," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 7, pp. 4673-4678, 2017.
6. Larminie, J. and Dicks, A., *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & Sons Ltd, pp. 14-16, 23, 2003.
7. Aminyavari, M., Manmaghani, A. H., Shirazi, A., Najafi, B., and Rinaldi, F., "Exergetic, Economic, and Environmental Evaluations and Multi-Objective Optimization of an Internal-Reforming SOFC-Gas Turbine Cycle Coupled with a Rankine Cycle," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 108, No. 5, pp. 833-846, 2017.