



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

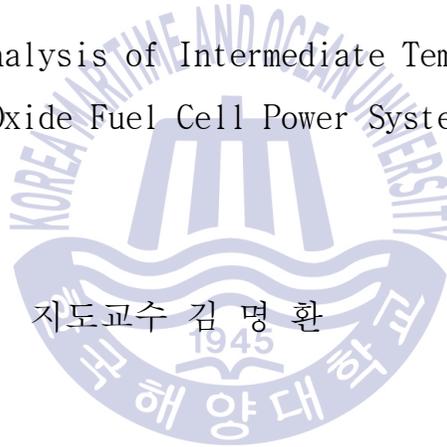
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# 선박 동력용 중온형 고체산화물연료전지 시스템 성능평가에 대한 연구

Performance Analysis of Intermediate Temperature  
Solid Oxide Fuel Cell Power System



2018년 2월

한국해양대학교 대학원

기관공학과  
정창식

2018년 2월

정창식



공학석사 학위논문

선박 동력용 중온형 고체산화물연료전지 시스템  
성능평가에 대한 연구

Performance Analysis of Intermediate Temperature  
Solid Oxide Fuel Cell Power System



지도교수 김 명 환

2018 년 2 월

한국해양대학교 대학원

기관공학과

정 창 식

본 논문을 정창식의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 : 박상균



위원 : 김명환



위원 : 길병래



2017 년 12 월 15 일

한국해양대학교 일반대학원

# 목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
사용기호	X

## 제 1 장 서론

1.1 연구배경	1
1.2 연료전지란	4
1.3 연구목적 및 범위	8

## 제 2 장 선박 동력용 중온형 SOFC 시스템 요소의 모델링

2.1 중온형 SOFC 셀 및 스택	10
2.1.1 구조 및 작동원리	10
2.1.2 셀과 스택의 출력	12
2.1.3 셀의 이론전압	13
2.1.4 셀의 손실전압	15
2.1.5 연료(수소 및 일산화탄소) 균형 반응량	18
2.1.6 중온형 SOFC 스택 IV-curve 검증	20
2.1.7 효율 및 공기량	21
2.2 개질기	22
2.2.1 개질 원리	22
2.2.2 수증기 개질	24
2.3 압축기 및 터빈	28
2.3.1 압축기	28
2.3.2 가스터빈	29
2.3.3 스팀터빈	29

2.4 기타 MBOP.....	30
2.4.1 펌프.....	30
2.4.2 연소기.....	30
2.4.3 열교환기.....	31
2.4.4 혼합기 및 분배기.....	31
2.4.5 이코노마이저.....	32

### 제 3 장 선박 동력용 중온형 SOFC 시스템 성능평가 방법

3.1. 성능평가를 위한 가정.....	33
3.2. 성능평가 방법.....	34

### 제 4 장 선박 동력용 중온형 SOFC 시스템 성능 평가

4.1 중온형/고온형 SOFC 시스템 성능비교.....	41
4.2 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC 시스템.....	48
4.2.1 SOFC 단독시스템.....	48
4.2.2 SOFC/GT 하이브리드시스템.....	55
4.2.3 SOFC/ST 하이브리드시스템.....	67
4.2.4 SOFC 단독 및 하이브리드 시스템 전기적 효율 비교.....	74
4.3 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC 시스템.....	76
4.3.1 SOFC 단독시스템.....	76
4.3.2 SOFC/GT 하이브리드시스템.....	86
4.3.3 SOFC/ST 하이브리드시스템.....	97
4.3.4 SOFC 단독 및 하이브리드 시스템 전기적 효율 비교.....	104

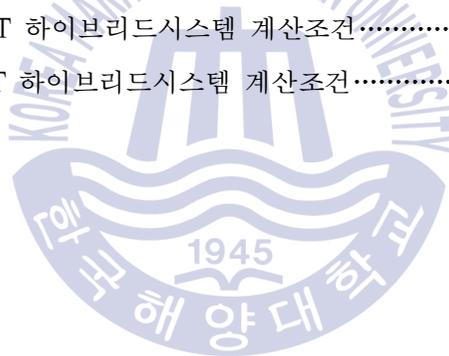
제 5 장 결 론 .....	106
-----------------	-----

참고 문헌.....	110
------------	-----

감사의 글.....	112
------------	-----

## List of Tables

Table 1.1	배기가스 배출 규제 및 발효시기.....	1
Table 1.2	해외 연료전지 탑재 선박 개발 현황.....	3
Table 1.3	연료전지의 종류 및 특성.....	7
Table 2.1	SOFC 시스템에 사용되는 연료와 수소운반체의 특성.....	23
Table 2.2	메탄과 메탄올의 개질반응식.....	24
Table 4.1	고온형/중온형 SOFC 단독시스템 계산조건.....	44
Table 4.2	중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템 계산조건.....	57
Table 4.3	중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템 계산조건.....	69
Table 4.4	중온형 SOFC 단독시스템 계산조건.....	78
Table 4.5	중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템 계산조건.....	88
Table 4.6	중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템 계산조건.....	99



## List of Figures

Fig. 1.1	연료전지 자동차.....	2
Fig. 1.2	하이브리드(엔진+모터) 자동차.....	2
Fig. 1.3	동력장치의 출력 및 효율 비교.....	3
Fig. 1.4	Grove의 연료전지 실험.....	5
Fig. 1.5	연료전지 기본 원리 .....	5
Fig. 2.1	SOFC 구조 및 작동원리.....	11
Fig. 2.2	활성화에너지 개념도.....	16
Fig. 2.3	SOFC 저항 개념도.....	19
Fig. 2.4	중온형 SOFC 실험 및 시뮬레이션 값 비교.....	20
Fig. 2.5	온도에 따른 메탄 수증기 개질의 개질률 및 물조성.....	26
Fig. 2.6	온도에 따른 메탄올 수증기 개질의 개질률 및 물조성.....	27
Fig. 3.1	연료전지 스택 모델.....	34
Fig. 3.2	개질기 모델.....	35
Fig. 3.3	압축기 모델.....	35
Fig. 3.4	가스터빈 모델.....	36
Fig. 3.5	스팀터빈 보텔.....	36
Fig. 3.6	펌프 모델.....	37
Fig. 3.7	연소기 모델.....	37
Fig. 3.8	열교환기 모델.....	38
Fig. 3.9	혼합기 모델.....	38
Fig. 3.10	분배기 모델.....	39
Fig. 3.11	이코노마이저 모델.....	39
Fig. 3.12	중온형 SOFC 하이브리드시스템 모델.....	40
Fig. 4.1	중온형 SOFC 단독시스템 구성도.....	43
Fig. 4.2	고온형 SOFC 단독시스템 구성도.....	43
Fig. 4.3	스택 작동온도에 따른 성능 비교.....	46

Fig. 4.4	스택 전류밀도에 따른 성능 비교	46
Fig. 4.5	스택 수소이용률에 따른 성능 비교	47
Fig. 4.6	스택 작동온도에 따른 성능 특성	49
Fig. 4.7	스택 전류밀도에 따른 성능 특성	51
Fig. 4.8	개질기 S/C에 따른 성능 특성	52
Fig. 4.9	스택 수소이용률에 따른 성능 특성	54
Fig. 4.10	중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템 구성도	56
Fig. 4.11	스택 작동온도에 따른 성능 특성	60
Fig. 4.12	스택 전류밀도에 따른 성능 특성	63
Fig. 4.13	가스터빈 압력비에 따른 성능 특성	66
Fig. 4.14	중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템 구성도	68
Fig. 4.15	스택 작동온도에 따른 성능 특성	71
Fig. 4.16	스택 전류밀도에 따른 성능 특성	72
Fig. 4.17	스택 작동온도에 따른 시스템 전기적 효율	75
Fig. 4.18	스택 전류밀도에 따른 시스템 전기적 효율	75
Fig. 4.19	중온형 SOFC 단독시스템 구성도	76
Fig. 4.20	스택 작동온도에 따른 성능 특성	80
Fig. 4.21	스택 전류밀도에 따른 성능 특성	81
Fig. 4.22	개질기 S/C에 따른 성능 특성	83
Fig. 4.23	스택 수소이용률에 따른 성능 특성	84
Fig. 4.24	중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템 구성도	86
Fig. 4.25	스택 작동온도에 따른 성능 특성	90
Fig. 4.26	스택 전류밀도에 따른 성능 특성	92
Fig. 4.27	가스터빈 압력비에 따른 성능 특성	95
Fig. 4.28	중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템 구성도	98
Fig. 4.29	스택 작동온도에 따른 성능 특성	101
Fig. 4.30	스택 전류밀도에 따른 성능 특성	102
Fig. 4.31	스택 작동온도에 따른 시스템 전기적 효율	105
Fig. 4.32	스택 전류밀도에 따른 시스템 전기적 효율	105

<국문초록>

## 선박 동력용 중온형 고체산화물연료전지 시스템 성능평가에 대한 연구

정 창 식

기관공학부  
한국해양대학교 대학원

초록

친환경적인 신재생에너지의 개발,  $NO_x/SO_x/CO_2$ 의 배출저감 및 대기오염물질의 배출 규제는 육상만의 문제가 아니며, 해상에서 항행하는 선박에서도 해결되어야 하는 중요한 과제이다. 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)에서는 황 함유량 0.5%를 초과하는 연료유에 대한 사용을 규제 하도록 하였으며, 2016년 1월 이후 건조되는 130 kW 이상 출력 선박에 대해서는  $NO_x$  규제를 위해 Tier-III를 적용하였다. 이러한 추세를 고려 할 때 배출규제는 더욱 확대 적용될 것임이 분명하다.

최근 대기오염 배출 감소를 위해 친환경연료 엔진(MEGI), 이중연료 전기추진(DFDE), 연소가스 후처리장치(EGR) 장착 등 많은 기술들이 개발되고 있으나, 이러한 기술들은 시스템을 복잡하게 만들고 온실가스 배출 및 대기오염에 대한 근본적인 해결책이 되지 못하고 있다. 이러한 문제들에 대한 근본적이고 지속 가능한 해결책 중 하나가 연료전지이다.

수소와 산소의 화학반응으로부터 생성되는 전기와 열에너지를 사용하는 연료전지는 친환경적이고 고효율적인 특성 때문에 최근 많은 주목을 받고 있다. 연료전지를 선박의 동력장치로 채택한다면, 중대형 선박의 크기와 특성을 고려할 때 에너지 효율 및

폐열의 활용도가 높은 고체산화물형 연료전지(SOFC)와 같은 고온형 연료전지가 적합하다. 그러나 SOFC는 높은 에너지 효율을 얻기 위해 800~1000°C의 고온에서 작동하도록 설계가 되어 다공성 전극의 소결 현상 및 내구성 감소로 심각한 사고를 초래할 수도 있다. 최근 SOFC의 작동온도를 600~800°C 또는 그 이하로 낮추려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 온도영역은 연료의 개질을 위한 열원을 공급해 줄 수 있고, 기존의 SOFC보다 사용재료에 대한 선택의 폭을 넓혀주어 비용 절감을 할 수 있으며, 시동 시간을 단축시킬 수 있는 많은 장점을 가진다.

본 논문의 목적은 다양한 선박동력용 중온형 SOFC 시스템의 시뮬레이션 모델링을 통해 성능을 평가하는 것이다. 첫째 메탄 수증기개질 중온형 SOFC 단독시스템을 개발하였고, 시뮬레이션 모델링을 통해 스택 작동온도, 전류밀도, 개질기 수증기/탄소비 및 수소이용률이 성능에 미치는 영향을 고온형 SOFC 단독시스템과 비교하여 평가하였다. 둘째 연료전지의 폐열을 활용하기 위해 가스터빈 또는 스팀터빈을 결합한 하이브리드시스템을 개발하였다. 다양한 상태나 조건을 기반으로 하이브리드시스템의 성능을 평가하였다. 셋째 메탄올을 연료로 하는 단독시스템 및 하이브리드시스템을 개발하여 메탄연료 중온형 SOFC 시스템과 동일한 방법으로 성능을 평가하였다.

본 논문은 시뮬레이션을 통해 효율적인 개질과 시스템의 안정성을 위한 이상적인 중온형 SOFC 시스템들을 제안한다. 그리고 메탄 수증기개질 중온형 SOFC는 적당한 개질온도를 얻기 위해 개질기가 연소기 후단에 개질기가 위치하며, 추가적인 열교환기가 필요하였다. 또한 중온형 SOFC시스템의 높은 효율과 성능을 보장하는 스택 작동온도 및 전류밀도 범위를 확인하였다. 마지막으로 메탄연료 중온형 SOFC 단독시스템이 높은 효율을 가지나, 메탄올연료 하이브리드시스템이 단독시스템에 비해 효율의 개선이 더 높은 것을 알 수 있다.

**KEY WORDS:** 중온형 SOFC, 고체산화물형 연료전지, 선박 동력시스템, 하이브리드시스템, 수증기 개질

<영문초록>

# Performance Analysis of Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell Power System

Jung, Chang-sik

Department of Marine Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

Developing eco-friendly renewable energy sources, reducing emissions of  $CO_2/NO_x/SO_x$  and emission control of air pollutants are not only a matter of land, but also an important task that should be addressed in offshore navigation ships. The International Maritime Organization (IMO) has regulated the use of fuel oil for exceeded sulphur content by 0.5% and applied Tier-III to vessels above 130kW output since January 2016. These regulations are clearly more applicable when considering trends.

Recently, although a variety of technologies are developed and applied such as Main engine Electronic control Gas Injection(MEGI), Dual Fuel Diesel Electric(DFDE), and post-combustion equipment that reduce the emission of air pollutants and enhance the energy efficiency of power engines, these technologies make the system complicated and are not a fundamental solution to greenhouse gases and air pollution. One of the fundamental and sustainable solutions to these problems is fuel cell.

Because fuel cell which uses electricity and thermal energy from the chemical reactions of hydrogen and oxygen is eco-friendly and high efficiency, it has been

receiving much attention lately. If fuel cell is applied to large ship, considering the magnitude and characteristics of the power, high temperature fuel cell such as Solid Oxide Fuel Cell(SOFC) is more suited because it is highly efficient and waste heat utilization. However, because SOFC is designed to operate at temperatures above  $800 \sim 1000^{\circ} \text{C}$  for high efficiency, resulting in a considerable number of obstacles such as durability reduction and sintering of porous electrode that can cause serious accident. Many studies are actively conducted on the intermediate temperature( $600 \sim 800^{\circ}\text{C}$ ) SOFC(It-SOFC) to reduce the use of special heat resistant materials and operate the system safely.

The objective of this thesis is to evaluate by simulation the performance of various It-SOFC system for ship. First of all, we built a methane fueled It-SOFC single system equipped with external and recycled reforming fuel processor. And then, thorough simulation and modeling, we examined the effects of cell operating temperature(COT), cell current density(CD), reformer steam carbon ratio(S/C) and hydrogen utilization rate on the performance compared to high temperature SOFC single system. Second, in order to use the waste heat from fuel cell we built a hybrid system that combined a gas turbine or steam turbine. We evaluated the performance of the hybrid system on the basis of various condition and variables. Third, we built a methanol fueled It-SOFC single and hybrid system equipped with external and recycled reforming fuel processor. And we evaluated the performance in the same way before.

Through simulation, we proposed ideal system arrangements for each It- SOFC system considering efficient reforming and stability. And we discovered that methane fueled It-SOFC system have a reformer where is behind the combustor and need more recuperator for obtaining the appropriate reforming temperature. We also found that range of stack operating temperatures and current densities for operating the various It-SOFC system under the high efficiency and performance. Moreover although methane fueled It-SOFC single system had higher efficiency, methanol fueled hybrid system is highly efficient in improving efficiency.

**KEY WORDS:** It-SOFC, Solid Oxide Fuel Cell, Ship power system, Hybrid system, Steam reforming

## 사용기호

$A$	:	유효반응 면적	( $m^2$ )
$C_p$	:	정압비열	( $kJ/kg \cdot K$ )
$E$	:	셀의 이론전압	(V)
$E_a$	:	애노드 활성화에너지	( $kJ/kmol$ )
$E_c$	:	캐소드 활성화에너지	( $kJ/kmol$ )
$F$	:	페러데이 상수	(C/mol)
$G$	:	깁스에너지	(kJ)
$H$	:	증기터빈의 출력	(kW)
$HC_{fuel}$	:	연소엔탈피	(kJ)
$i$	:	전류	(A)
$i_L$	:	한계전류밀도	( $A/m^2$ )
$I$	:	전류밀도	( $A/m^2$ )
$K$	:	평형상수	
$m$	:	유량	( $kmol/s$ )
$m_f$	:	물의 질량유량 (증기발생량)	( $kmol/s$ )
$MW$	:	분자량	
$n$	:	발생하는 전자의 몰수	
$P$	:	각 성분의 분압	(kPa)
$R_a$	:	활성화 저항	( $\Omega$ )
$R_\Omega$	:	옴 저항	( $\Omega$ )
$R_c$	:	농도 저항	( $\Omega$ )
$R$	:	기체상수	( $kJ/kmol \cdot K$ )
$T$	:	온도	(K)
$V$	:	셀 동작전압	(V)
$W_{sofc}$	:	스택의 전기적 출력	(kW)
$W_{aux}$	:	보조기기 운전을 위한 소요동력	(kW)
$W_{egen}$	:	하이브리드 시스템 발전전력 (터빈)	(kW)
$W_{eco}$	:	이코노마이저에서 회수된 열에너지	(kW)
$W_{comp}$	:	압축기의 축마력	(kW)

$W_{motor}$	:	전동기의 소요동력	(kW)
$W_{turbine}$	:	터빈의 축마력	(kW)
$\delta$	:	두께	(m)
$\Delta g$	:	깁스 자유에너지 변화	(kJ/kmol)
$\Delta h$	:	반응(생성) 엔탈피 변화	(kJ/kmol)
$\Delta H$	:	엔탈피 변화	(kJ/kg)
$\Delta s$	:	반응 엔트로피 변화	(kJ/kmol · K)
$\Delta V$	:	손실전압	(V)
$\Delta V_{act}$	:	활성화 손실전압	(V)
$\Delta V_{ohm}$	:	저항 손실전압	(V)
$\Delta V_{trans}$	:	농도 손실전압	(V)
$\Delta V_{etc}$	:	기타 손실전압	(V)
$\eta_{egen}$	:	발전효율	
$\eta_{mech}$	:	기계효율	
$\eta_{motor}$	:	모터효율	
$\eta_{conv}$	:	컨버터 변환효율	
$\eta_{pump}$	:	펌프 변환효율	
$\eta_e$	:	전기적 효율	
$\kappa$	:	단열비	
$\lambda_n$	:	부하분담률	
$\rho$	:	저항률	
$\Omega_\Omega$	:	전기 저항식	

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

최근 인류는 자원의 고갈과 지속적인 화석 에너지의 사용으로 인한 환경오염 및 기후변화로 큰 문제에 당면해있다. 1997년 12월 일본 교토에서 열린 기후변화협약 당사국 총회에서 이산화탄소( $CO_2$ ), 메탄( $CH_4$ ), 아산화질소( $N_2O$ ), 불화탄소( $PFC$ ) 등 온실가스의 배출량을 줄이기 위해 교토의정서가 채택되었으며, 2015년 12월 프랑스 파리에서 지구 평균기온 상승폭을 줄이기 위해 미국과 중국을 포함한 총 195개 국가가 파리기후변화협약을 채택하였다. 우리나라 또한 이러한 협약을 지키기 위해 많은 노력을 하고 있다. 친환경적인 신재생에너지의 개발,  $NO_x/SO_x/CO_2$ 의 배출저감 및 대기오염물질의 배출 규제는 육상만의 문제가 아니며, 해상에서 항행하는 선박에서도 해결되어야 하는 중요한 과제이다[1]. 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)에서는 Table 1.1과 같이 황 함유량 0.5%를 초과하는 연료유에 대한 사용을 규제 하도록 하였으며, 2016년 1월 이후 건조되는 130 kW 이상 출력 선박에 대해서는  $NO_x$  규제를 위해 Tier-III를 적용하도록 하고 있다[2]. 이러한 배출규제는 추세를 고려할 때 더욱 확대 적용될 것임이 분명하다.

Table 1.1 배기가스 배출 규제 및 발효시기[2]

규제 물질	규정	운항 지역	년도										비고
			2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
NO <sub>x</sub> (질소산화물)	MARPOL Annex VI Regulation 13	ECA	14.4 g/kWh, n=130		3.4 g/kWh, n=130								신조 선박의 Keel Laying 기준
		GLOBAL	Tier II										
SO <sub>x</sub> (황산화물)	MARPOL Annex VI Regulation 14	ECA	1.0 %S		0.1 %S								0.5% 추가저감 REVIEW (2016년)
		GLOBAL	3.5 %S		0.5 %S								
CO <sub>2</sub> (EEDI)	MARPOL Annex VI	ECA/ GLOBAL	Phase 0		Phase 1				Phase 2				
PM (Particulate Matters)	US-EPA	ECA/ GLOBAL	논의 중										US-EPA는 정량적 규제 시행 중

육상의 수송수단인 자동차는 대부분 내연기관을 동력장치로 사용하고 있으나, 최근 Fig. 1.1과 1.2와 같이 연료전지, 전기구동, 하이브리드 등의 고효율 및 친환경적인 동력장치로 패러다임이 변화하고 있다. 해상의 수송수단인 선박도 많은 국가와 국제기관의 배기가스 배출 제한에 대처하기 위해 신기술 개발 및 적용에 박차를 가하고 있다. 메탄올, LNG 등의 친환경연료 엔진(MEGI), 이중연료 전기추진(DFDE), 연소가스 후처리장치(EGR) 장착 등 많은 기술들이 적용되고 있으며, 이에 따라 향후 친환경 기술이 곧 경쟁력이 되는 조선·해운 시장으로 재편될 것으로 예상된다. 그러나 이러한 기술들은 비용의 증가, 효율의 감소 등을 동반하며, Fig. 1.3에서 볼 수 있듯이 기존의 중·대형 선박용 디젤엔진은 효율이 상당히 높아(40~45%) 이를 대체할 선박동력 장치들의 등장을 억제하고 있다. 하지만 최근 이와 같은 문제들을 근본적으로 해결하기 위해 연료전지를 선박의 동력발생장치로 적용하고자 하는 시도가 진행되고 있다. 연료전지는 수소와 산소의 화학반응에서 생기는 전기 및 열에너지를 사용하여 효율이 높고 유해 배출물질도 거의 없는 장치이다. Table 1.2와 같이 연료전지를 적용한 선박용 동력장치 개발은 유럽 및 미국을 중심으로 활발히 진행되어 수년간의 해상시운전을 마무리 하는 단계이며, 실제 선박이 연료전지 시스템을 적용할 수 있도록 국제 규정도 제정되고 있다. 하지만 우리나라의 선박용 연료전지 기술 개발 및 적용은 걸음마 단계라 선진 각국의 선박용 연료전지 기술 개발에 대한 투자와 실적은 장차 이와 관련된 특허 확보로 이어질 수 있으며, 이는 신조 가격의 60~70%에 이르는 조선기자재 산업의 국제 경쟁력의 약화를 초래할 수 있다. 이러한 상황을 막고 조선 강국이라는 위치를 고수하기 위해서는 선박용 연료전지 시스템 개발이 절실히 필요한 실정이다.

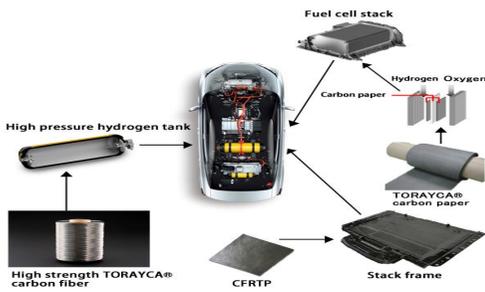


Fig. 1.1 연료전지 자동차

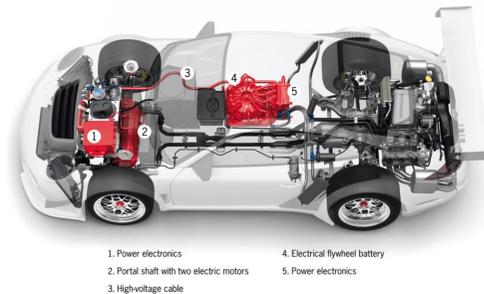


Fig. 1.2 하이브리드(엔진+모터) 자동차

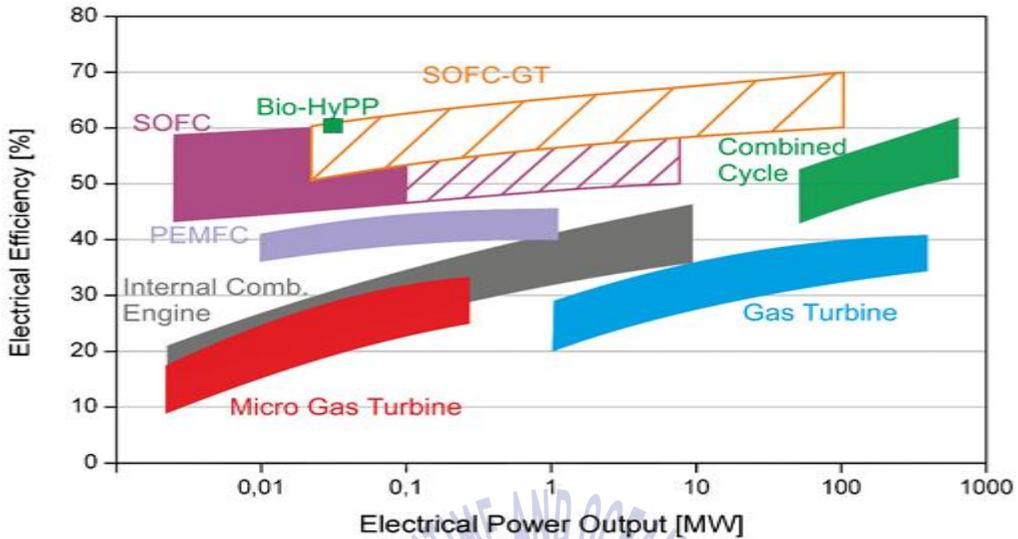


Fig. 1.3 동력장치의 출력 및 효율 비교[3]

Table 1.2 해외 연료전지 탑재 선박 개발 현황[4]

프로젝트	개념	연도	연료전지	용량	연료
212/214급 잠수함	함추진용 PEMFC & 디젤엔진 하이브리드시스템	2003 ~ 현재	PEMFC	306 kW	수소
RiverCell	유람선 전원공급용 PEMFC 시스템	2015 ~ 2022	PEMFC	250 kW	메탄올
SF-BREEZE	중형 여객선 추진 및 전원공급용 PEMFC 시스템	2003 ~ 현재	PEMFC	2500 kW	수소
ZemShip	소형 여객선 추진용 PEMFC 시스템	2006 ~ 2013	PEMFC	96 kW	수소
US SSFC	군함 전원공급용 복합 연료전지 시스템	2000 ~ 2011	PEMFC MCFC	2500 kW	디젤
FellowSHIP	해상보급선박 전원공급용 MCFC 시스템	2003 ~ 2011	MCFC	320 kW	천연가스
E4Ships	상선 전원공급용 SOFC 시스템	2009 ~ 2022	SOFC	100 kW	디젤
FELICITAS	해상 발전용 SOFC 시스템	2005 ~ 2008	SOFC	250 kW	천연가스

## 1.2 연료전지란?

연료전지의 최초 실험은 1893년 윌리엄 그로브(William Grove)에 의해 Fig. 1.4와 같이 수행되었다. Fig. 1.4 첫 번째 그림에서 전류가 물속을 흘러 물을 수소와 산소로 전기분해 시킨다. 두 번째 그림에서 전원 대신 전류계를 연결하면 전류가 흐르는데, 이는 전기분해의 역반응이 일어나서 수소와 산소가 재결합하여 전류를 발생시켰기 때문이다. 하지만, 두 번째 그림에 표시된 것과 같이 수소이온, 산소 및 전자가 반응하는 공간(3상계면)의 면적이 적기 때문에 큰 용량의 전류를 얻는 것이 어려워 연료전지는 이와 같은 형태로 더 이상 발전되지 못하였다.

이러한 점을 보완하여 Fig. 1.5와 같은 양극판형 연료전지가 등장하였다. 연료전지의 구성을 살펴보면, 수소가 공급되는 애노드(연료극), 산소가 공급되는 캐소드(공기극)가 있으며, 이를 양극판이라고 한다. 연료극과 공기극 사이에는 수소이온이 이동할 수 있는 전해질이 있으며, 양극판은 전자가 이동할 수 있는 도체로 연결되어 있다.

세부적인 반응은 연료전지의 종류에 따라 다르지만, Fig. 1.5에 나타난 것과 같이 기본 원리는 연료극에 공급된 수소가 전극과 전해질의 계면인 촉매층에서 전기화학 반응을 통해 수소이온( $H^+$ )과 전자( $e^-$ )로 분리되고, 수소이온은 전해질을 가로질러 공기극으로 이동한다. 공기극에 공급된 산소는 외부회로를 거쳐 이동한 전자와 전해질을 통해 이동한 수소이온과 결합하여 물이 된다. 즉, 수소와 산소가 반응하여 물이 되는 과정을 통해 Gibbs 에너지가 유효한 전기적 에너지로 변환되는 것이다.[5]

연료전지는 연료가 공급되는 한 계속 전기를 생산하기 때문에 연속적인 동력 생산이 가능한 연소기관과 비슷한 특성을 가지고 있으며, 전기화학 반응에 의존하는 장치기 때문에 배터리와도 비슷한 특성을 가지고 있다. 연료전지는 화학적 에너지로부터 직접 전기를 발생시키기 때문에 연소기관보다 더 효율적이고, 움직이는 구성품이 없어 높은 신뢰성, 지속성 및 정숙성을 가진 시스템이다. 아울러 대기오염의 주범인  $NO_x$ ,  $SO_x$  및 PM 등의 배출 물이 거의 없어 친환경적인 시스템이라고도 할 수 있다. 또한 일반적인 배터리와는 다르게 전력과 용량이 서로 종속적인 관계를 가지고 있지 않기 때문에 체적을 키워도 출력의 변화가 거의 없어 1 W급 휴대폰에서 수 MW급 발전소까지 다양하게 구성할 수 있다.

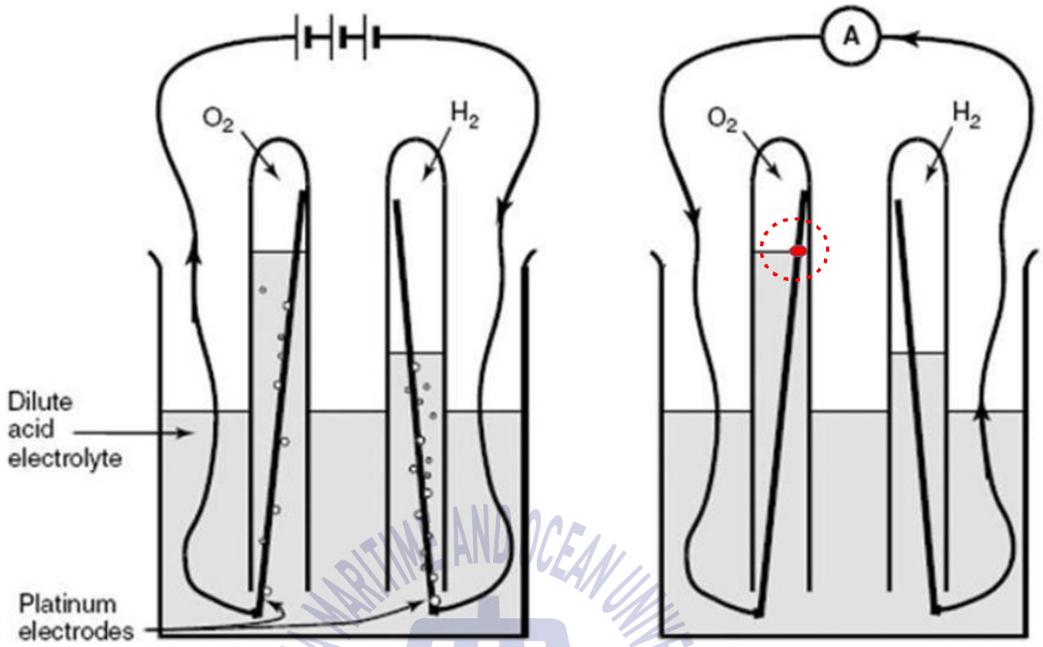


Fig. 1.4 Grove의 연료전지 실험[5]

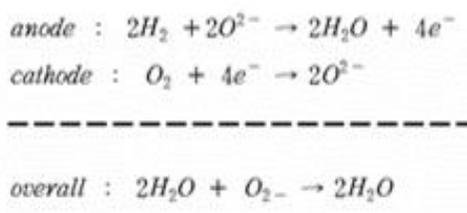
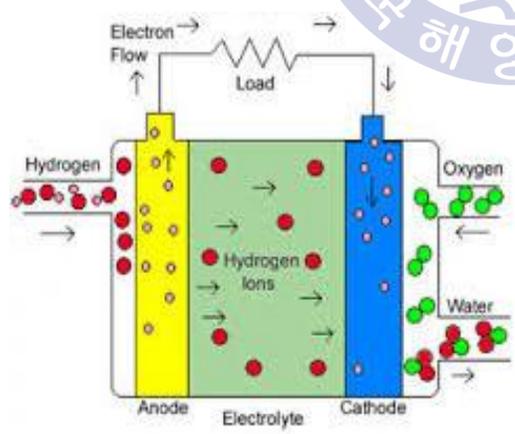


Fig. 1.5 연료전지 기본 원리

연료전지는 뛰어난 장점에도 불구하고 단점이 존재한다. 수소연료는 안전성과 저장 방법에 제한이 있다. 연료전지의 연료로는 수소기체가 가장 좋으나 수소기체는 폭발의 위험으로 인하여 사용하기가 어렵고, 체적당 에너지 밀도가 낮으며, 저장이 어렵다. 대체로 가솔린, 메탄, 메탄올과 같은 연료들은 직접적으로 사용하기 어려우며 수소를 분리해 내기 위해 개질(reforming) 과정을 거쳐야 한다. 이것은 연료전지의 성능과 효율을 감소시키며, 부수적인 장치들을 필요로 한다. 또한 연료전지의 높은 가격으로 인해 실용화하기가 어렵다. 하지만 현재 연료전지가 지속적으로 개발이 되고 있으며, 그 추세를 볼 때 가격 또한 상당한 경쟁력을 갖출 수 있는 날이 멀지 않아 보인다[6].

연료전지는 전해질의 종류에 따라 알칼리형 연료전지(AFC : Alkaline Fuel Cell), 고분자전해질형 연료전지(PEMFC : Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell), 인산형 연료전지(PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell), 용융탄산염형 연료전지(MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell), 고체산화물형 연료전지(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell, 이하 SOFC)가 있으며, 작동온도에 따라 AFC, PEMFC, PAFC의 저온형, MCFC, SOFC의 고온형 연료전지로 분류된다. Table 1.3에 연료전지의 종류와 특성에 대하여 비교하였다.

Table 1.3 연료전지의 종류 및 특성[7]

구분	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
개질방식	외부			내부 및 외부	
연료	H <sub>2</sub>			H <sub>2</sub> , CO	
전해질	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
연료극 배출물질	미반응 연료, H <sub>2</sub> O	미반응 연료		미반응 연료, H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>	미반응 연료, H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>
공기극 배출물질	미반응 공기	미반응 공기, H <sub>2</sub> O		미반응 공기	
작동온도	50 ~ 200 °C	30 ~ 100 °C	205 ~ 220 °C	650 °C	600 ~ 1000 °C
장점	낮은 활성화 손실	휴대용으로 적합	습기관리 용이	250kW 이상의 출력 가능	고온에서 낮은 저장 손실
	전해질이 저가	고체형 전해질	전해질 저가	CO도 연료 사용가능	
		초기시동 용이	높은 안정성	폐열을 이용한 복합발전 가능	
단점	고가의 촉매 물질 불필요	높은 전류밀도	성숙된 기술	고가의 내열 재료 불필요	높은 전류밀도
	전해질 증발로 인한 주기적인 보충 필요	전극에서의 flooding 예방을 위한 철저한 수분관리 필요	부식성이 강한 전해질 사용 및 증발로 인한 주기적인 보충 필요	시동을 위한 예열 필요	
				시동 및 정지간 전해질의 상변화로 인한 스트레스가 강함	높은 작동온도 인한 시동시간 과다 소요 및 재료의 손상 초래
전해질 회석 예방을 위한 수분제거 필요	양극판 분리형은 고가	스택 냉각 필요	CO <sub>2</sub> 순환장치 필요	평판형은 크기 및 밀봉 제한	
		CO 피독 현상		재료가 상대적으로 고가	
	황 허용치가 낮음				

### 1.3 연구 목적 및 범위

앞에서 기술한 바와 같이 연료전지는 친환경적이면서 경제적인 특성을 가지고 있어 많은 주목을 받고 있다. 중·대형 선박용 동력장치로써 채용되려면 적합한 연료전지와 시스템 구성요소가 고려되어야 하며, 그 시스템의 가능성 및 성능은 어떠한지에 대해 검토가 필요하다.

중대형 선박의 큰 동력 부하를 고려하였을 때 MCFC와 SOFC와 같은 고온형 연료전지가 적합할 것으로 판단된다. 그 중 SOFC는 고온(600~1,000°C)에서 작동하여 고가의 촉매장치가 필요하지 않으며, 개질을 통해 다양한 연료를 이용하여 발전을 할 수 있고, 연료전지 중 가장 높은 에너지 효율을 가진다. 또한 고온형 연료전지인 MCFC와 같이 부가적으로 CO<sub>2</sub>를 처리할 장치가 필요하지 않으며, 저온형 연료전지인 PEMFC와 같이 가습을 할 필요도 없어 시스템을 간단하게 구성을 할 수가 있다. 그리고 고체를 전해질로 사용하기 때문에 부식성이 낮고, 액체 전해질로 인한 누설의 위험이 없어 안정적이다. 부수적으로 생기는 열을 이용하여 하부사이클도 가능하다는 장점이 있다. 따라서 선박 공간의 제약, 안정성 및 경제성을 고려할 때 SOFC가 중대형 선박의 동력장치로 가장 적합하다고 판단이 된다.

그러나 기존의 SOFC는 높은 에너지 효율을 위해 800~1000°C 이상의 고온에서 작동하도록 설계가 되어있어 다공성 전극의 소결현상, 전극의 내구성 저하로 장시간 운전시 성능저하와 수명단축이라는 단점을 가지고 있다. 그리고 연료전지의 재료가 취성에 약한 세라믹으로 제작되어 급격한 온도변화나 온도의 불균일한 분포로 인하여 심각한 사고를 유발할 수 있다. 최근 SOFC의 작동온도를 600~800°C 또는 그 이하로 낮추려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 온도영역은 연료의 개질을 위한 열원을 공급해 줄 수 있고, 기존의 SOFC보다 사용재료에 대한 선택의 폭을 넓혀주어 비용 절감을 할 수 있으며, 시동 시간을 단축시킬 수 있는 많은 장점을 가진다.

본 연구에서는 중·대형선박의 공간, 효율, 안정성을 고려하여 600~800°C에서 작동하는 중온형 SOFC로 채택하고, 극저온 및 고압상태로 수소를 직접 저장하여 사용하는 방법대신 연료를 외부에서 개질하는 방식으로 채택하였다.

개질용 연료로는 압축천연가스(CNG), 액화천연가스(LNG), 액화석유가스(LPG), 메탄

을, DME, 가솔린, 디젤 등이 있다. 선박용 연료는 안전성과 저장성이 좋은 액체연료가 적합하지만 수소로 쉽게 개질할 수 있는 액화천연가스(LNG) 및 메탄올과 연료의 보급이 용이한 디젤을 적용할 수 있다. 개질 방식에는 수증기, 직접산화, 부분산화, 열분해, 가스화 개질법 등이 있으나 대규모의 수소생산이 가능하고, 상업적으로 실용화 된 수증기 개질법을 채택하였다.

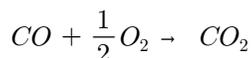
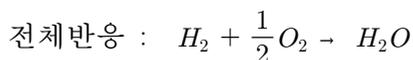
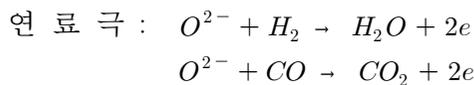
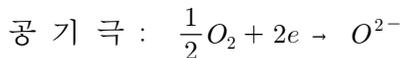


## 제 2 장 선박 동력용 중온형 SOFC 시스템 요소의 모델링

### 2.1 SOFC 셀 및 스택

#### 2.1.1 SOFC 구조 및 작동원리

Fig. 2.1은 SOFC의 구조와 작동원리를 보여주는 모식도이다. 구조는 산소 이온전도성 전해질(electrolyte)이 가운데 위치하고, 그 양쪽에 연료극(anode)과 공기극(cathode)이 위치한다. 공기극에 산소를 공급하면 공기극과 연료극 간에 산소 분압 차이가 형성되어 전해질을 통해 산소가 이동하려는 구동력이 생기게 된다. 공기극에 공급된 산소(공기)가 전극과 전해질의 계면인 촉매층에서 전자와 결합하여 산소음이온으로 되고 산소음이온은 전해질을 거쳐 연료극 계면에서 수소 또는 일산화탄소와 결합하여 수증기 또는 이산화탄소로 변환된다. 이 과정에서 분리된 전자는 외부회로를 거쳐 공기극으로 이동하게 된다. 결국 아래와 같이 수소 또는 일산화탄소가 산소와 반응하여 수증기 또는 이산화탄소로 산화되는 과정을 통해 깎스에너지를 유효한 전기적 에너지로 변환시키는 것이다.



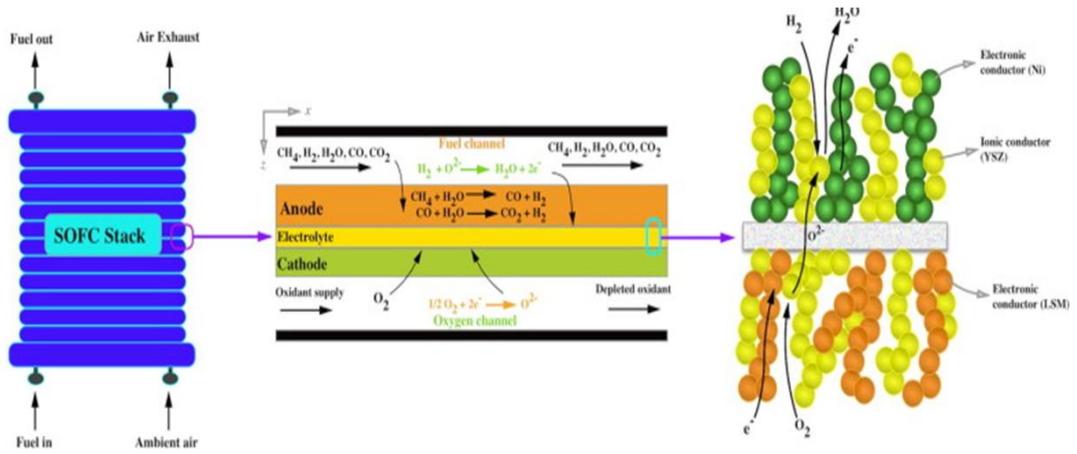


Fig. 2.1 SOFC의 구조 및 작동원리



## 2.1.2 SOFC 셀과 스택의 출력

SOFC 셀 출력은 아래의 식 (1)으로 계산된다.

$$W = I \cdot V = (i \cdot A) \cdot V \quad (1)$$

I : 전류(A)

V : 셀 동작전압(V)

i : 전류밀도(A/m<sup>2</sup>)

A : 유효 반응면적(m<sup>2</sup>)

적층된 스택의 출력은 단일 셀 출력에 적층 수를 곱하고 적층으로 인한 약간의 손실을 반영하여 산출한다. 출력은 합당한 최적의 셀 크기와 적층수를 결정하고 사용하는 목적, 환경 등에 따라 다양하게 구성이 가능하다.

셀의 출력전압은 아래의 식 (2)으로 산출된다.

$$V = E - \Delta V \quad (2)$$

E : 셀의 이론전압(V)

$\Delta V$  : 셀 손실전압(V)

셀의 이론전압은 열역학적으로 이상적인 개회로전압이며 실제로 셀에 유기되는 전압은 이론전압에서 활성화 손실전압, 저항 손실전압, 농도 손실전압 등의 손실전압을 빼준 값이다.

### 2.1.3 SOFC 셀의 이론전압

셀의 개회로전압은 열역학적 동온과정에서 깃스에너지와 관련된 아래의 식 (3)과 같이 유도된다.

$$E = -\frac{\Delta g}{nF}, \quad \Delta g = \Delta h - T \cdot \Delta s \quad (3)$$

$\Delta g$  : 깃스 자유에너지 변화(kJ/kmol)

$n$  : 연료 1몰당 발생하는 전자의 몰수(-)

$F$  : 패러데이 상수(-)

$\Delta h$  : 반응(생성) 엔탈피 변화(kJ/kmol)

$\Delta s$  : 반응 엔트로피 변화(kJ/kmol · K)

$T$  : 온도(K)

그리고 셀의 개회로전압은 Balmer의 열역학이론 식을 식 (3)에 대입하면 아래의 식 (4)로 유도된다.

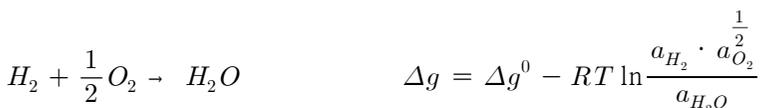
$$\Delta g = \Delta g^0 + RT \ln \frac{a_J^j \cdot a_K^k}{a_M^m} \quad (4)$$

$\Delta g^0$  : 표준압력에서의 1 mol 깃스 생성 자유에너지 변화량(kJ/kmol)

$a_J^j = \frac{P_J}{P^0}$  : 특정 온도, 압력에서의 j mol J물질의 활성도(-)

$P^0$  : 표준압력

예를 들어 수소 연료전지의 경우 아래와 같이 나타낼 수 있다.



식 (4)를 식 (3)에 대입시키고 기체는 이상기체로 가정할 때,  $P^0=1 \text{ atm}$  이므로 아

래와 같은 네른스트 식 (5)으로 유도된다.

$$\begin{aligned}
 H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O & \quad E_{H_2} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \\
 CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 & \quad E_{CO} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{P_{CO} \cdot P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{CO_2}}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$E_{H_2/CO}$  : 수소/일산화탄소에 의한 개회로전압(V)

$E^0 = -\frac{\Delta g^0}{2F}$  : 온도에 따른 깁스에너지 변화(V)

$R$  : 기체상수(-)

$P$  : 가스의 분압(-)



## 2.1.4 SOFC 셀의 손실전압

셀의 손실전압은 활성화 손실전압, 저항 손실전압, 농도 손실전압, 기타 손실전압이 있으며, 식 (2)에 대입하여 셀의 동작전압을 아래의 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$V = E_{H_2, CO} - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{trans} - \Delta V_{etc} \quad (6)$$

$\Delta V_{act}$  : 활성화 손실전압(V)

$\Delta V_{ohm}$  : 저항 손실전압(V)

$\Delta V_{trans}$  : 농도 손실전압(V)

$\Delta V_{etc}$  : 기타 손실전압(V)

셀을 구성하는 재료가 달라지면 각각의 손실전압도 바뀌게 되며, 본 논문에서는 기존에 연구되어진 고온형 SOFC 셀의 손실전압식[8]에 최근에 연구되고 있는 중온형 SOFC 셀의 특성[9][10]을 참고하여 새로운 식을 개발 및 적용하였다.

### 2.1.4.1 활성화 손실전압

활성화 손실전압은 연료전지의 손실전압 중 가장 큰 손실을 일으킨다. 전극(공기극, 연료극)과 전해질 계면에서 전기화학반응을 일으키기 위해서는 Fig. 2.2와 같이 부가적인 에너지 언덕인 활성화에너지가 필요하며, 이것으로 인한 전압강하를 활성화 손실전압이라고 한다. 연료극의 수소, 일산화탄소에 의한 활성화 손실전압, 공기극의 활성화 손실전압을 아래와 같이 나타내었다.

$$\frac{1}{\Omega_{a, H_2}} = D_{a, H_2} \frac{2F}{RT} \left( \frac{P_{H_2}}{P^o} \right)^{0.25} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

$$\frac{1}{\Omega_{a, CO}} = D_{a, CO} \frac{2F}{RT} \left( \frac{P_{CO}}{P^o} \right)^{0.25} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

$$\frac{1}{\Omega_c} = D_c \frac{4F}{RT} \left( \frac{P_{O_2}}{P^o} \right)^{0.25} \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right) \quad (9)$$

$\Omega_{a,H_2/CO}$  : 연료극 수소/일산화탄소 활성화 손실전압(V)

$\Omega_c$  : 공기극 활성화 손실전압(V)

$E_a$  : 연료극 활성화에너지(11 kJ/mol)

$E_c$  : 공기극 활성화에너지(16 kJ/mol)

$D_{a,H_2}, D_{a,CO}, D_c$  : 계수( $2.13 \times 10^8, 2.98 \times 10^8, 1.49 \times 10^{10}$  A/m<sup>2</sup>)

### 2.1.4.2 저항 손실전압

저항 손실전압은 전극에서의 전자 이동과 전해질에서의 산소음이온 이동에 대한 저항으로 발생하는 손실이며, 셀의 적층으로 인한 손실도 포함된다. 저항 손실전압은 옴의 법칙과 저항률( $\rho$ )에 관한 식으로부터 아래와 같이 산출한다.

$$\Delta V_{ohm} = i \cdot \Omega_{ohm}, \quad \Omega_{ohm} = \rho \cdot \delta$$
$$\rho_a = 0.002483 \exp(-1392/T) \tag{10}$$

$$\rho_c = 0.00245 \exp(600/T) \tag{11}$$

$$\rho_e = 0.006762 \exp(10350/T) \tag{12}$$

$\rho_{a/c/e}$  : 연료극/공기극/전해질 저항률( $\Omega/m$ )

$\delta$  : 두께(m)

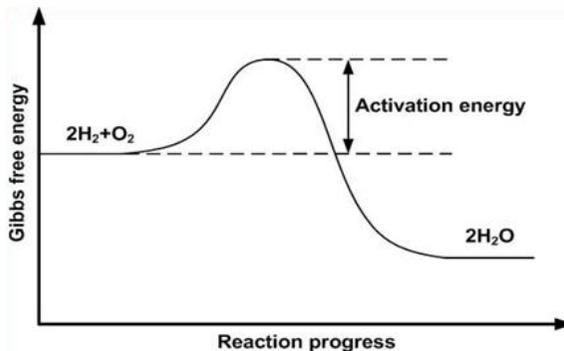


Fig. 2.2 활성화에너지 개념도

### 2.1.4.3 농도 손실전압

농도 손실전압은 셀에서 부하로 전류가 흐르면서 공급된 물질이 소비되어 연료 및 산소의 압력 강하로 발생하는 손실 전압이다. 연료 및 산소의 압력감소는 셀로부터 흘러나오는 전류의 크기에 따라 변화하므로, 아래와 같은 한계전류밀도 모델식 (13) 으로부터 농도 손실전압을 산출한다. 여기에서 한계전류밀도( $i_L$ )는 Yuan Tian, Ao Wang, Lichao Jia, Dong Yan, Bo Chi, Jian Pu & Jian Li(2017)의 연구 결과를 인용하여 25000 A/m<sup>2</sup>로 선정하였다[9].

$$\Delta V_{trans} = \frac{RT}{2F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (13)$$

$i_L$  : 한계전류밀도(A/m<sup>2</sup>)

### 2.1.4.4 기타 손실전압

연료전지 셀과 스택에는 전류 누수, 연료 투과 등으로 인한 기생 손실이 발생하며 이것은 기존의 출력 전류( $i$ )에 기생 손실전류( $i_{parasitic}$ )를 더하여 아래와 같이 손실전압을 산출할 수 있으나, 그 수치가 미세하여 본 연구에서는 무시하였다.

### 2.1.5 연료(수소 및 일산화탄소)의 균형 반응량

Fig. 2.3-(a)는 SOFC의 셀의 출력 계산을 위해 나타낸 저항개념도이다. SOFC는 공급되는 연료가 2가지이므로 활성화 손실전압, 농도 손실전압을 그림과 같이 병렬로 고려해야 하며, 그에 따른 수소 및 일산화탄소의 반응량이 다르게 된다. 그러나 본 연구에서는 공기는 셀의 냉각을 위해 셀에서 필요한 산소량보다 훨씬 많은 양이 공급되므로 산소의 농도 손실전압은 무시하였으며, 연료의 농도손실전압은 전술한바와 같이 전류에 관한 한계전류밀도 모델식 (13)으로 단순화하여 Fig. 2.3-(b)과 같이 적용하였다. Fig. 2.3-(b)으로부터 연료극의 수소와 일산화탄소는 각각의 반응에서 식 (6)에 대입하여 식 (14), 식 (15)를 산출 후 유기되는 셀 전압이 동일해야 하므로 식 (16)을 이용하여 출력에 대한 수소와 일산화탄소 각각의 반응량( $i_{H_2}$ ,  $i_{CO}$ )을 산출할 수 있다. 수소의 반응량은 연료극 출구에서 제어되는 수소이용률에 의하여 결정된다.

$$V = (E_{H_2} - i_{H_2} \cdot R_{a,H_2}) - i(R_{\Omega,a} + R_{\Omega,e} + R_{\Omega,c}) - i \cdot R_{a,O_2} - i \cdot R_{c,a-c} \quad (14)$$

$$V = (E_{CO} - i_{CO} \cdot R_{a,CO}) - i(R_{\Omega,a} + R_{\Omega,e} + R_{\Omega,c}) - i \cdot R_{a,O_2} - i \cdot R_{c,a-c} \quad (15)$$

$$E_{H_2} - i_{H_2} \cdot R_{a,H_2} = E_{CO} - i_{CO} \cdot R_{a,CO} \quad (16)$$

$R_a$  : 활성화저항( $\Omega$ )

$R_{\Omega}$  : 음 저항( $\Omega$ )

$R_c$  : 농도 저항( $\Omega$ )

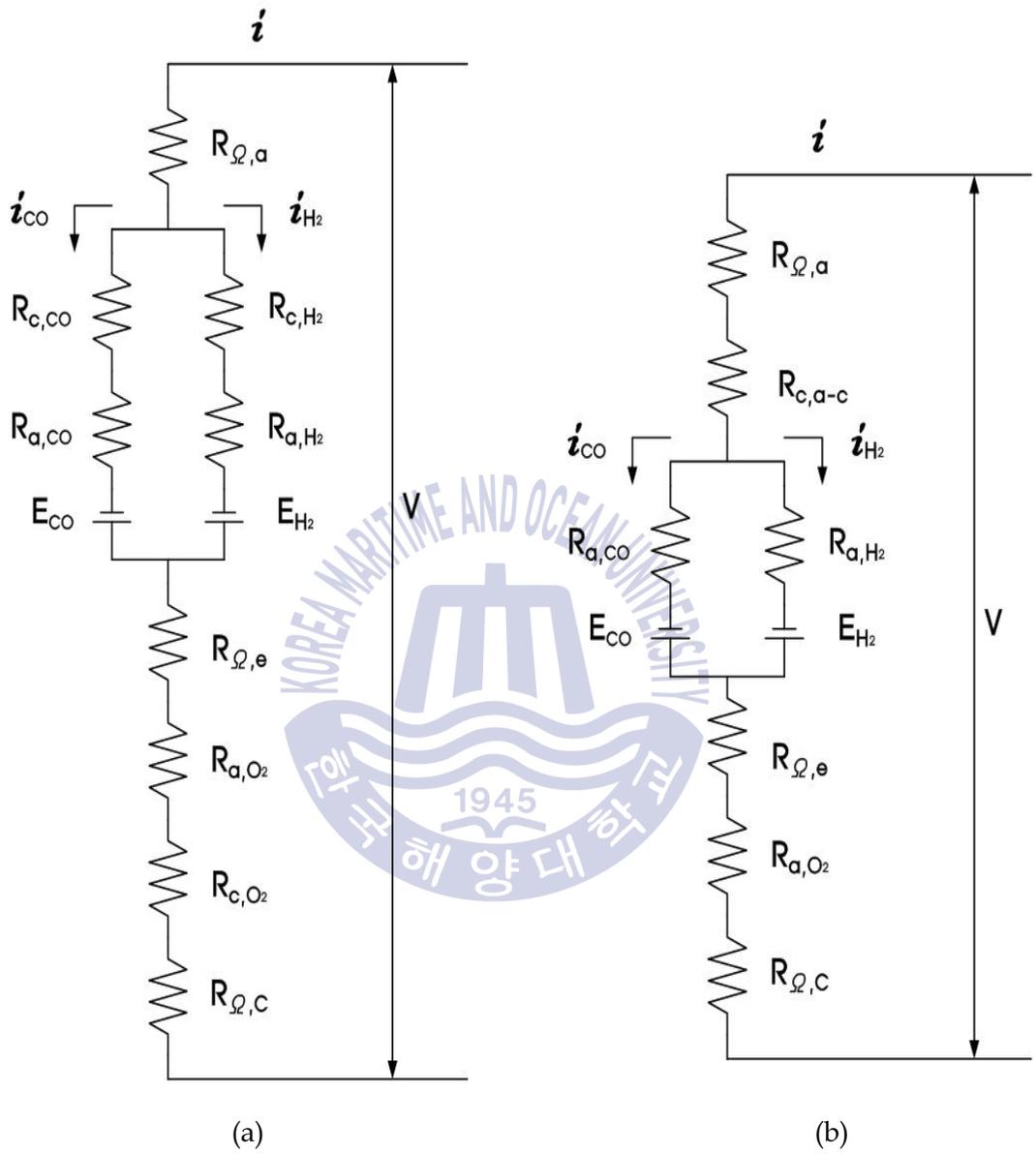


Fig. 2.3 SOFC 저항 개념도

### 2.1.6 중온형 SOFC 스택 IV-curve 검증

Fig. 2.4는 스택 연료극 두께=776  $\mu\text{m}$ , 전해질 두께=20  $\mu\text{m}$ , 공기극 두께=20  $\mu\text{m}$ , 연료극 수소공급량= $2.23214 \times 10^{-8}$  kmol/s 그리고 대기노출형 공기극의 경우에 대한 최근 연구된 공기극 기반 중온형 SOFC 셀의 실험적 I-V 특성 곡선[9]과 본 모델링을 통한 결과 값을 작동온도별로 비교하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 시뮬레이션 결과가 실험치보다 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.

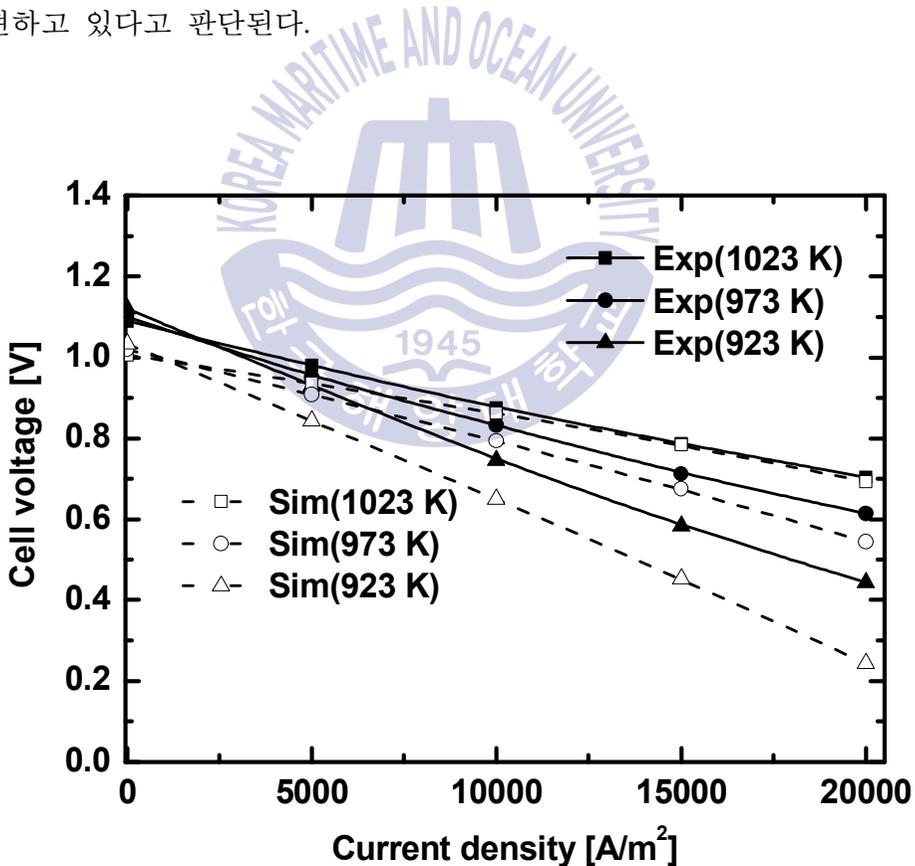


Fig. 2.4 중온형 SOFC 실험 및 시뮬레이션 값 비교

### 2.1.7 시스템효율 및 공기 공급량

반응 연료량(수소, 일산화탄소)에 따른 전류량에 식 (6)에서 산출된 전압과 직교류 변환효율을 곱하면 스택의 전기적 출력( $W_{sofc}$ )이 산출된다. 시스템의 전기적 효율( $\eta_e$ )은 반응된 연료(메탄, 메탄올)의 저위발열량( $HC_{CH_4, CH_3OH}$ ) 기준의 식 (17)로 나타낸다.

$$\eta_e = \frac{W_{sofc} + W_{egen} - W_{aux}}{HC_{CH_4, CH_3OH}} \quad (17)$$

$\eta_e$  : 시스템 전기적 효율(-)

$W_{sofc}$  : 스택 전기적 출력(kW)

$W_{egen}$  : 하이브리드시스템(가스터빈, 스팀터빈)의 발전출력(kW)

$W_{aux}$  : 보조기기 운전을 위한 소요동력(kW)

$HC_{CH_4, CH_3OH}$  : 반응된 연료(메탄, 메탄올)의 저위발열량(kW)

총 효율( $\eta_t$ )은 이코노마이저에서 회수된 열에너지와 급수펌프의 동력을 포함시켜 산출한다.

$$\eta_t = \eta_e + \frac{W_{eco} - W_{pump}}{HC_{CH_4, CH_3OH}} \quad (18)$$

$\eta_t$  : 시스템 총 효율(-)

$W_{eco}$  : 이코노마이저에서 회수된 열에너지(kW)

$W_{pump}$  : 이코노마이저 작동용 급수펌프 소요동력(kW)

공기극에 공급되는 산소량 즉 공기량은 스택의 냉각을 위한 공기량을 기준으로 에너지 보존법칙으로부터 아래의 식 (19)와 같이 계산한다.

$$(\Delta H_a + \Delta H_c) - HC_{H_2+CO} - W_{sofc} = 0 \quad (19)$$

$\Delta H_{a/c}$  : 연료극/공기극 입출구 엔탈피 변화량(kJ)

$HC_{H_2+CO}$  : 수소와 일산화탄소 발열량(kJ)

## 2.2 개질기

### 2.2.1 SOFC 개질 원리

SOFC의 연료로는 수소와 일산화탄소를 사용한다. 그러나 수소는 가스연료로서 자연적으로 존재하지 않기 때문에 탄화수소계 또는 알코올계의 수소운반체로부터 제조해야 한다. 본 연구에서 다루어질 대표적인 연료의 기본적인 화학적 및 물리적 데이터를 Table 2.1에 나타내었다. 수소와 일산화탄소를 제조하는 일반적인 방법은 수증기 개질(Steam Reforming, SR), 부분산화 개질(Partial Oxidation, POX), 자열 개질(Autothermal Reforming, ATR) 등이 있으며 반응과정은 아래와 같다.

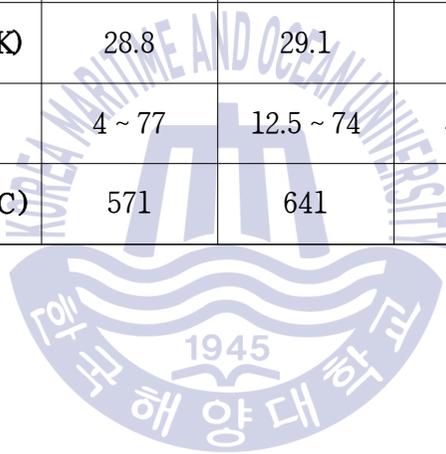


중대형 선박 시스템은 보일러 사용으로 자유로운 수증기의 사용이 가능한 점을 고려하고, 스택에서 발생하는 열원을 이용하여 수소화가 우수한 수증기 개질 방식을 채택할 시 SOFC 시스템의 높은 시스템 효율을 얻을 수 있다.[5][12].

SOFC와 같은 고온형 연료전지는 수소를 제조하는 개질기를 스택내부에 위치시키는 방식의 내부 개질(Internal Reforming, IR)이 가능하다. 이 방식은 수증기 개질에서 필요한 열원을 셀의 비가역과정에서 발생하는 열로 사용하므로 냉각부하가 줄어들어 효율이 크게 상승하기 때문이다. 하지만 스택 내의 탄소의 침적과 스택의 불균일한 온도분포로 인한 안전성을 고려할 시 중대형 선박용은 안정성이 우수하고 유지보수가 용이한 외부 개질형(External Reforming, ER)이 적합하여 본 연구에서는 외부개질 방식을 채택하였다.

Table 2.1 SOFC 시스템에 사용되는 연료 및 수소운반체의 특성[5]

특 성	수소 ( $H_2$ )	일산화탄소 ( $CO$ )	메탄 ( $CH_4$ )	메탄올 ( $CH_3OH$ )
분자량	2.016	28.01	16.04	32.04
빙점 온도(°C)	-259.2	-205	-182.5	-98.8
비등점 온도(°C)	-252.8	-191.5	-161.5	64.7
25°C 순수 엔탈피(kJ/mol)	241.8	110.5	802.5	638.5
STP에서의 비열(J/mol · K)	28.8	29.1	34.1	76.6
공기 중 연소 한계(%)	4 ~ 77	12.5 ~ 74	4 ~ 16	6 ~ 36
공기 중 자연 점화온도(°C)	571	641	632	464



### 2.2.2 수증기 개질

기체화된 메탄 또는 메탄올 연료가 적당한 비율의 S/C(Steam/Carbon ratio, 수증기/탄소비)로 수증기와 혼합하여, 주어진 온도와 압력에서 개질반응이 일어나고, 생성물인 수소, 일산화탄소, 이산화탄소와 미반응된 연료와 수증기가 출구로 토출된다. 메탄 및 메탄올의 반응식은 **Table 2.2**와 같으며 주어진 S/C, 온도와 압력에서 메탄과 메탄올의 수증기 개질에 의한 혼합가스 조성은 평형정수(K)와 깃스에너지(G)의 관계인 다음의 화학 평형식 (21)으로부터 계산하였다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G}{RT}\right) \quad (21)$$

$\Delta G$  : 깃스에너지 변화(kJ)

$R$  : 기체상수(-)

**Table 2.2** 메탄과 메탄올의 개질반응식

구 분	반 응 식
메탄(CH <sub>4</sub> )	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ (개질반응) $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ (전이반응)
메탄올(CH <sub>3</sub> OH)	$CH_3OH \rightarrow CO + 2H_2$ (분해반응) $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ (전이반응)

평형정수는 반응식에 따라 달라지며, 개질반응 평형정수( $K_r$ )와 전이반응 평형정수( $K_s$ )는 아래와 같다.

$$K_r = \frac{P_{H_2}^{(n+\frac{m}{2})} \cdot P_{CO}^n}{P_{C_nH_m} \cdot P_{H_2O}^n} = \frac{P_{H_2}^3 \cdot P_{CO}}{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}} \text{ (메탄)} = \frac{P_{H_2}^2 \cdot P_{CO}}{P_{CH_3OH}} \text{ (메탄올)} \quad (22)$$

$$K_s = \frac{P_{H_2} \cdot P_{CO_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}} \text{ (메탄, 메탄올)} \quad (23)$$

$P$  : 각 가스의 분압

메탄 연료를 예로 들어 설명하면 개질반응과 전이반응의 화학 평형식은 아래와 같다.

$$K_r = \exp\left(-\frac{\Delta G_r}{RT}\right)$$

$$K_r = \frac{P_{H_2}^3 \cdot P_{CO}}{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}}$$

$$\Delta G_r = G_{CO} + 3G_{H_2} - G_{CH_4} - G_{H_2O}$$

$$K_s = \exp\left(-\frac{\Delta G_s}{RT}\right)$$

$$K_s = \frac{P_{H_2} \cdot P_{CO_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}$$

$$\Delta G_s = G_{CO_2} + G_{H_2} - G_{CO} - G_{H_2O}$$

여기에서 개질반응과 전이반응은 동시반응이며, 이 반응들의 생성 혼합가스 조성에 대한 계산 방법은 다음과 같다. 먼저 주어진 초기 계산 조건으로부터 개질반응이 평형상태에 도달할 때의 생성물의 몰농도를 구하고, 동시에 전이반응도 만족해야 하므로 전이반응이 평형상태에 도달하는 생성물의 몰농도를 다시 구한다. 이들 생성물 조건에 대한 결과는 다시 개질반응과 전이반응의 반복적 수렴 계산에 반영되어 두반응을 동시에 만족하는 생성물의 조건을 찾는다. 즉, 반응들이 서로 평형상태에 도달할 때까지 수렴 계산을 반복한다.

개질률은 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{개질률}(\text{conversion}) = \frac{\text{투입 연료량} - \text{개질후남은 연료량}}{\text{투입 연료량}} \quad (24)$$

### 2.2.2.1 메탄 수증기 개질 특성

Fig. 2.5는 S/C=3, 압력=1 atm에서 온도에 따른 개질기 출구에서의 메탄의 개질률과 개질가스 물조성을 나타내었다. 주어진 조건에서 메탄이 개질률 98% 이상을 얻기 위해서는 1000 K 이상의 온도가 필요함을 알 수 있다. 또한 수소 생성률은 개질반응이 진행됨에 따라 메탄 개질률과 온도가 상승할수록 증가하며, 수증기는 감소한다. 일산화탄소의 생성은 전이반응의 영향으로 700 K 이하의 온도에서는 거의 발생되지 않았으나, 700 K 이상의 온도에서는 지속적으로 증가한다. 그리고 850 K 이상의 온도에서 전이반응이 억제되어 이산화탄소는 줄어들고 일산화탄소는 지속적으로 상승한다. 수소의 물조성이 높게 나타나는 950 K 이상의 온도영역에서는 일산화탄소 물조성은 높게 이산화탄소 물조성은 낮게 나타난다.

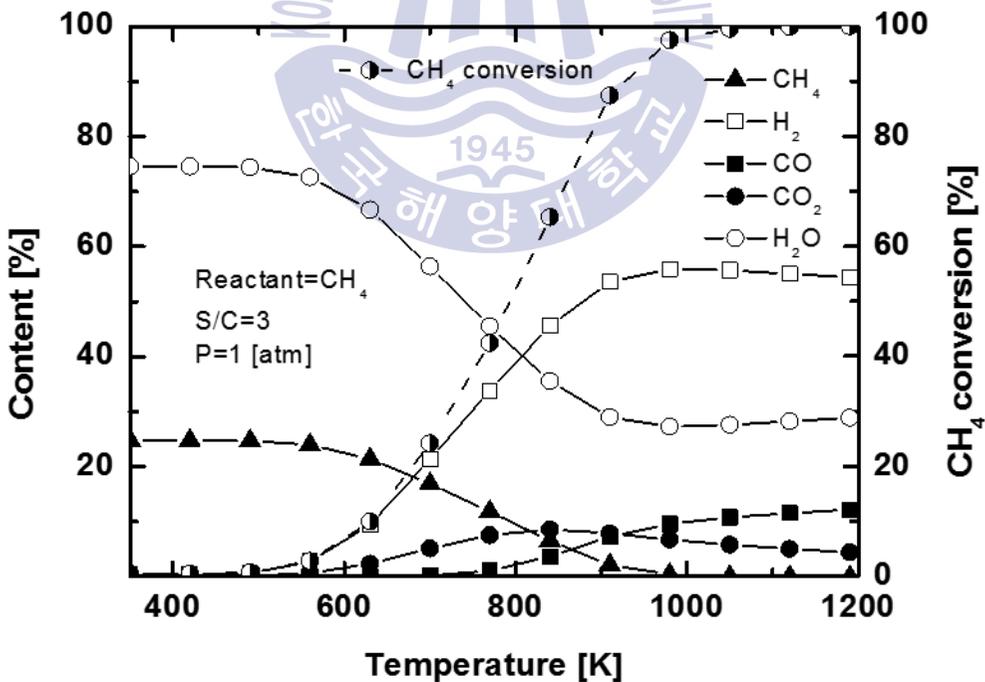


Fig. 2.5 온도에 따른 메탄 수증기 개질의 개질률 및 물조성

### 2.2.2.2 메탄올 수증기 개질 특성

Fig. 2.6은 S/C=3, 압력=1 atm에서 온도에 따른 개질기 출구에서의 메탄올의 개질률과 개질가스의 물조성을 나타내었다. 주어진 조건에서 메탄올이 개질률 98% 이상을 얻기 위해서는 380 K 이상의 온도가 필요함을 알 수 있다. 이것은 전술한 메탄올 연료보다 낮은 온도에서도 충분한 개질이 가능함을 의미하며, 개질을 위한 높은 열원이 필요하지 않아 하부사이클이나 이코노마이저를 통하여 메탄올 연료에 비해 높은 시스템 효율의 향상을 기대할 수 있다.

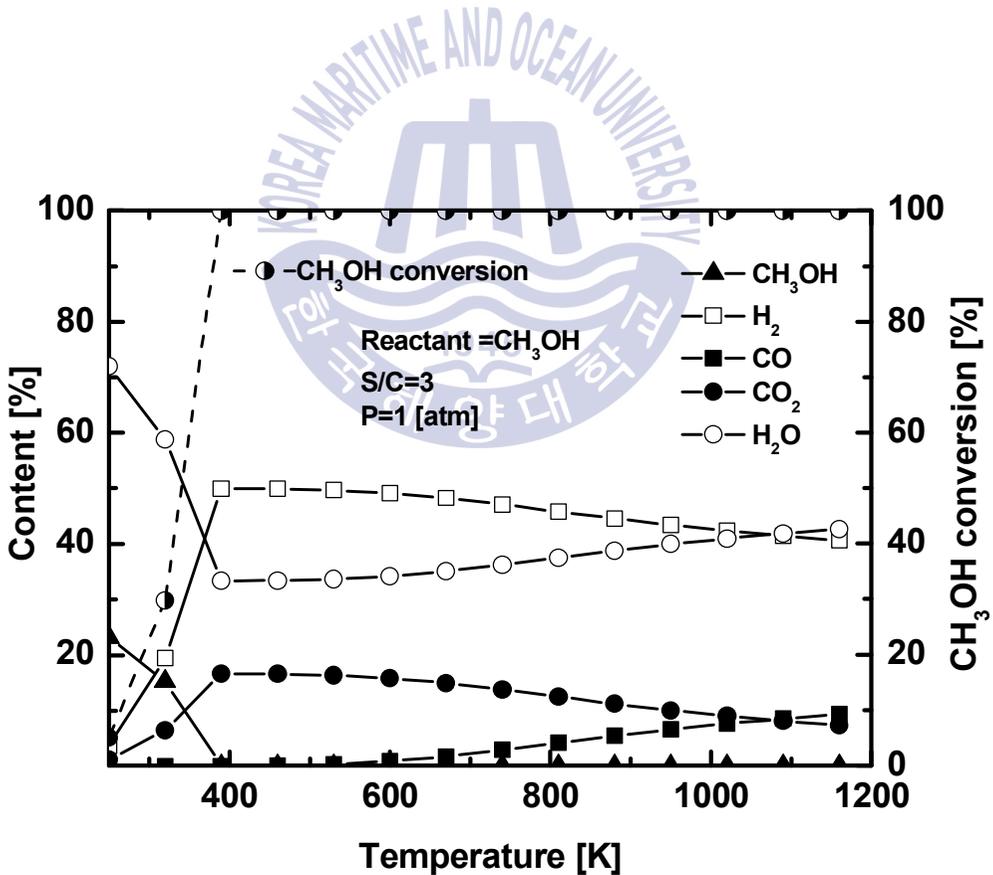


Fig. 2.6 온도에 따른 메탄올 수증기 개질의 개질률 및 물조성

## 2.3 압축기 및 터빈

### 2.3.1 압축기

압축기 출구온도( $T_o$ )는 유체의 종류, 입구 온도( $T_i$ ), 압축비( $\kappa = \frac{P_o}{P_i}$ ), 단열 효율( $\eta_c$ )에 따라 아래의 식으로 계산된다.

$$T_o = T_i \left( 1 + \frac{R^{(\kappa-1)/\kappa} - 1}{\eta_c} \right) \quad (25)$$

$$(\kappa - 1)/\kappa = \frac{R}{MW \cdot C_p} \quad (26)$$

$\kappa$  : 압축비(-)

$\eta_c$  : 단열효율(-)

압축기의 축마력( $W_{comp}$ )은 아래의 식 (27)으로 계산된다.

$$W_{comp} = m \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad (27)$$

압축기의 축마력은 유량이 많고 출구온도가 높을수록 커진다. 대부분의 압축기들은 전동기에 의하여 구동되므로 전동기의 소요동력( $W_{motor}$ )은 아래와 같이 계산된다.

$$W_{motor} = \frac{W_{comp}}{\eta_{mech} \cdot \eta_{motor}} \quad (28)$$

$\eta_{mech}$  : 기계효율(-)

$\eta_{motor}$  : 모터효율(-)

### 2.3.2 가스터빈

가스터빈 출구온도( $T_o$ )는 아래의 식 (29)으로 계산된다.

$$T_o = T_i \left( 1 - \eta_t + \frac{\eta_t}{R^{(\kappa-1)/\kappa}} \right) \quad (29)$$

$\eta_t$  : 단열효율, 등엔트로피 효율(-)

가스터빈의 축마력( $W_{turbine}$ )은 아래의 식 (30)으로 결정된다.

$$W_{turbine} = m \cdot C_p \cdot (T_i - T_o) \quad (30)$$

가스터빈의 축마력은 유량이 많고 입구온도가 높고 출구온도가 낮을수록 커진다. 가스터빈에 의하여 구동되는 발전기의 순 출력( $W_{egen}$ )은 다음과 같이 계산한다.

$$W_{egen} = W_{turbine} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{egen} \quad (31)$$

### 2.3.3 스팀터빈

스팀터빈의 출력( $W_{st}$ )은 아래의 식 (32)으로 계산된다.

$$W_{st} = \Delta H \cdot \eta_{st} \quad (32)$$

$\Delta H$  : 엔탈피 차(kJ/kmol)

$\eta_{st}$  : 스팀터빈 효율(-)

증기터빈에 의한 순수 발전 출력( $W_{est}$ )은 아래의 식 (33)으로 계산된다.

$$W_{est} = W_{st} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{egen} \cdot \eta_{conv} \quad (33)$$

$\eta_{conv}$  : 컨버터 변환 효율

## 2.4 기타 MBOP

### 2.4.1 펌프

펌프의 발생 출력( $W_{pump}$ )은 아래의 식 (34)과 같이 계산된다. 이 때 펌프의 출구온도의 변화는 송출 유체가 액체이므로 무시하였다.

$$W_{pump} = \frac{V \cdot \Delta P}{\eta_{pump} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{motor}} \quad (34)$$

V : 유량( $m^3/s$ )

$\Delta P$  : 승압(kPa)

$\eta_{pump}$  : 펌프효율(-)

### 2.4.2 연소기

연소기의 연소가스 조성과 출구온도는 다음과 같이 계산된다. 먼저 연료와 산화제에 의한 혼합물의 평균온도를 계산하고, 이 온도에서 반응이 전부 진행된다고 가정하여 연소가스의 조성 and 연소 엔탈피( $HC_{fuel}$ )를 산출한다. 마지막으로 연소 엔탈피는 연소가스의 현열 상승량과 같으므로 최종 연소가스의 출구온도가 이로부터 결정된다.

$$H_{fuel} + H_{air} \rightarrow H_{mixture} \quad (35)$$

$$Mixture \rightarrow Combustion\ gas$$

$$HC_{fuel} = \Delta H_{gas}$$

### 2.4.3 열교환기

열교환기의 출구온도( $T_o$ ) 계산을 위해 열교환기에서 최대 수열이 가능한 열량 ( $T_{h,i} - T_{c,i}$ )에 대한 실제 수열량( $T_{c,o} - T_{c,i}$ )의 비율을 나타내는 온도효율( $\eta_t$ )을 사용하였다.

$$\eta_t = \frac{(T_{c,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (36)$$

$T_{h,i}$  : 고온측 입구온도(K)

$T_{c,i}$  : 저온측 입구온도(K)

$T_{c,o}$  : 저온측 출구온도(K)

온도효율( $\eta_t$ )은 시스템의 설계자가 정하며 온도 효율이 증가할수록 열교환기의 외형과 전열면적은 커지게 된다. 따라서 온도효율은 주어지며 이로부터 에너지보존의 아래 식과 각 물질들의 비열 식으로부터 고온 및 저온 유체의 출구온도가 계산된다.

$$\Delta H_h = \Delta H_c \quad (37)$$

### 2.4.4 혼합기 및 분배기

시스템에는 관이 합쳐지거나 나누어지는 부분이 존재하므로 각 지관에서의 열·물질에 대한 계산이 요구된다. 이젝터와 같은 합지관인 혼합기는 반응이 없다는 전제 하에 질량 보존과 에너지 보존으로부터 혼합 후의 온도를 계산하는 것이 중요하다. 혼합기 출구온도 계산은 아래와 같다.

$$H_{mix} = H_{in1} + H_{in2} \quad (38)$$

$H_{mix}$  : 합지관 엔탈피(kJ/kmol)

$H_{in1/in2}$  : 분지관1/분지관2 엔탈피(kJ/kmol)

분지관인 분배기는 온도변화는 없지만 분지의 상태에 따라 유량이 변하게 된다. 분지관에서의 유량은 밸브 등에 의해 제어되는 조건이므로 분지율에 따라 각 지관의 유량을 계산한다.

### 2.4.5 이코노마이저

이코노마이저는 시스템에서 발생하는 폐열을 이용하여 과열·포화 증기를 만드는 장치로 주어진 고열원의 입·출구온도로부터 증기 발생량이 다음과 같은 식 (39) 으로부터 계산된다.

$$\Delta H_{gas} = m_f \cdot (\Delta h_f + \Delta h_{fg} + \Delta h_g) \quad (39)$$

$\Delta H_{gas}$  : 연소가스의 엔탈피 변화량(kJ)

$m_f$  : 증기 발생량(kmol)

$\Delta h_f$  : 과냉-포화액의 엔탈피 변화(kJ/kmol)

$\Delta h_{fg}$  : 증발잠열(kJ/kmol)

$\Delta h_g$  : 포화-과열증기의 엔탈피 변화(kJ/kmol)

## 제 3 장 선박 동력용 중온형 SOFC 시스템 성능평가 방법

### 3.1 성능평가를 위한 가정

본 연구의 시스템 성능평가는 적절한 단순화 과정을 통하여 해석 시간이 과도하게 소요되는 것을 방지하였다. 상기 모델링의 단순화는 아래와 같다.

- 실제 공기와 가스들은 이상기체로 간주되어 이상기체 방정식을 사용하였다.
- 정상상태에 대하여 성능평가를 하였다.
- 시스템의 운전환경은 정지되어 있거나 정속 운동상태로 볼 수 있다고 가정하였으며, 위치에너지와 운동에너지를 무시하였다.
- 시스템의 각 장치 및 관 계통에 의한 방열손실은 무시하였다.
- 모든 반응은 이론평형 상태로 가정하였다.
- 유체 흐름방향으로 온도와 조성은 1차원으로 가정하였다.
- 스택 출구가스의 온도는 작동온도와 동일한 것으로 가정하였다.

### 3.2 성능평가 방법

선박 동력용 중온형 SOFC시스템을 평가하기 위해서 Matlab & Simulink 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 Mathwork사에서 개발한 수치 해석 및 프로그래밍 환경을 제공하는 공학용 소프트웨어이다. Matlab을 이용하여 스택 및 각 MBOP를 코드화 하였으며, 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic User Interface)인 Simulink를 이용하여 코드화된 각 장치들의 입·출력을 서로 연결하였다. Fig. 3.1 ~ 3.10은 SOFC 시스템의 각 장치들을 모델링한 것이며, 입·출력 값은 다음과 같다. Fig. 3.11은 중온형 SOFC 하이브리드시스템을 모델링한 것을 나타내었다.

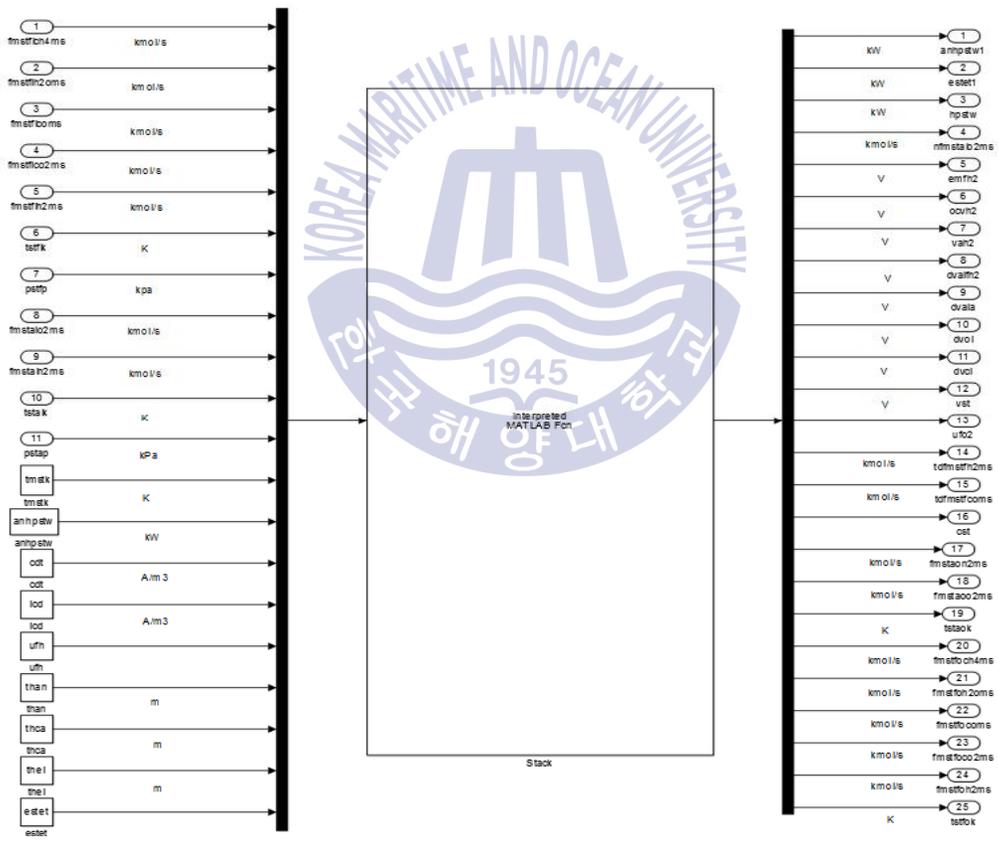


Fig. 3.1 연료전지 스택 모델

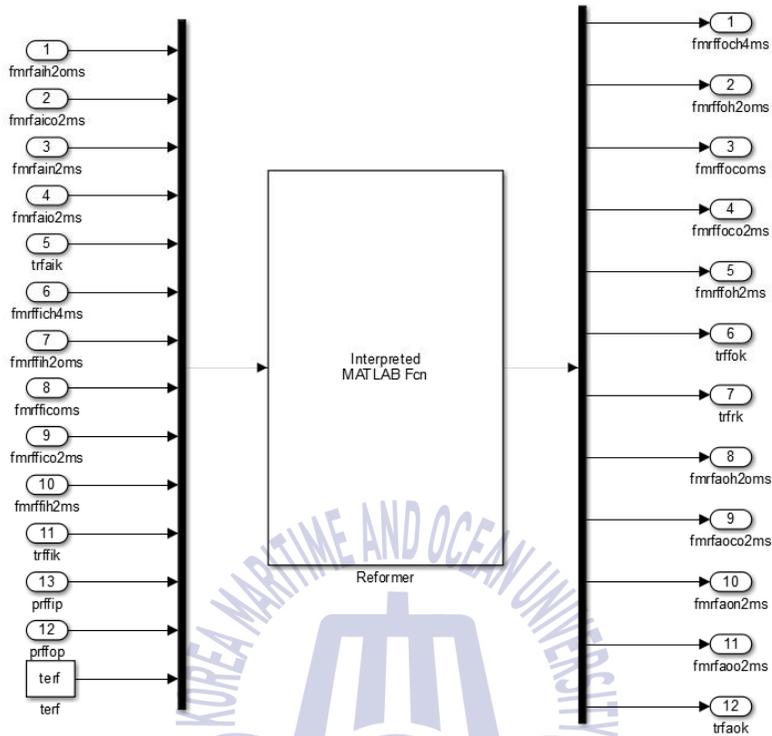


Fig. 3.2 개질기 모델

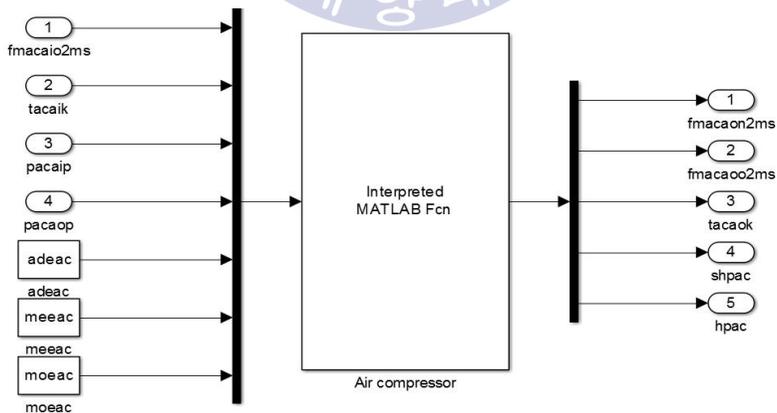


Fig. 3.3 압축기 모델

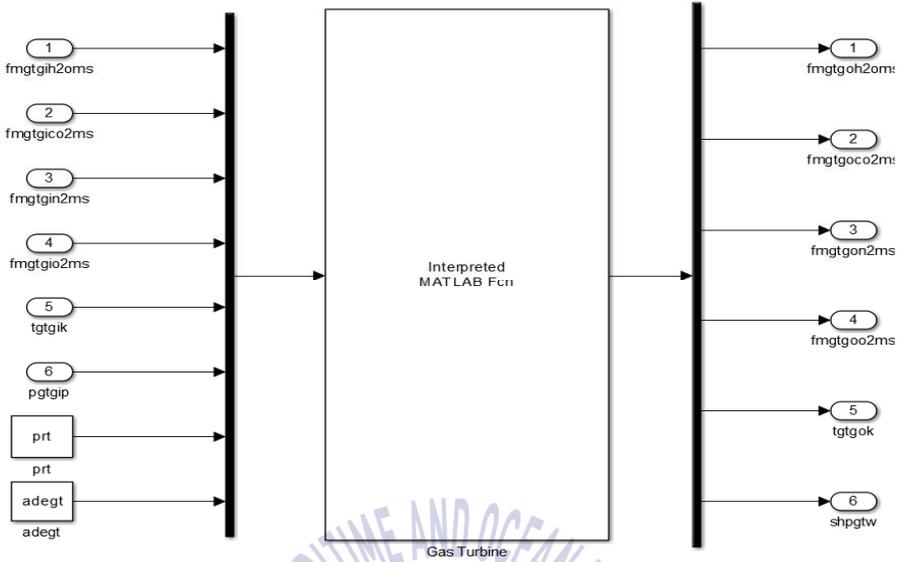


Fig. 3.4 가스터빈 모델

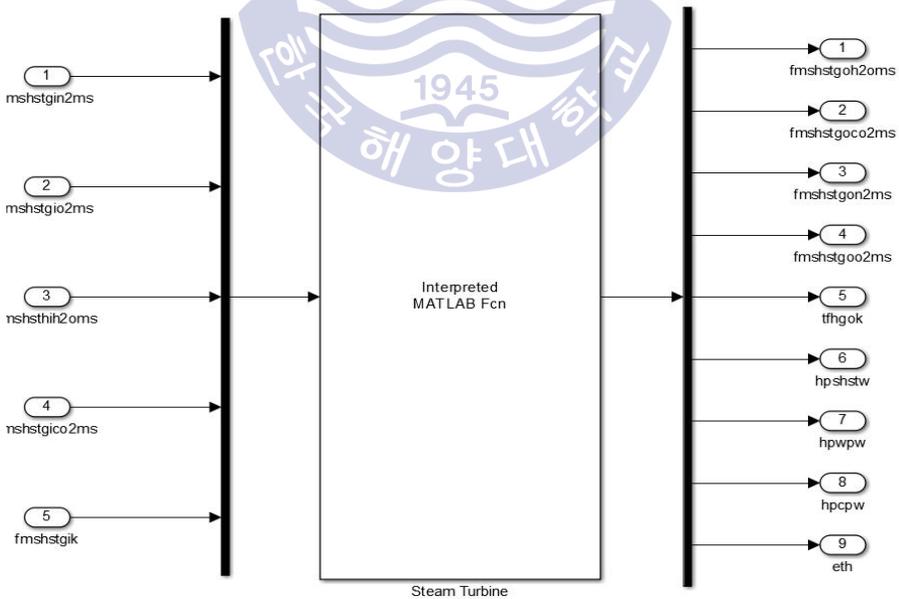


Fig. 3.5 스팀터빈 모델

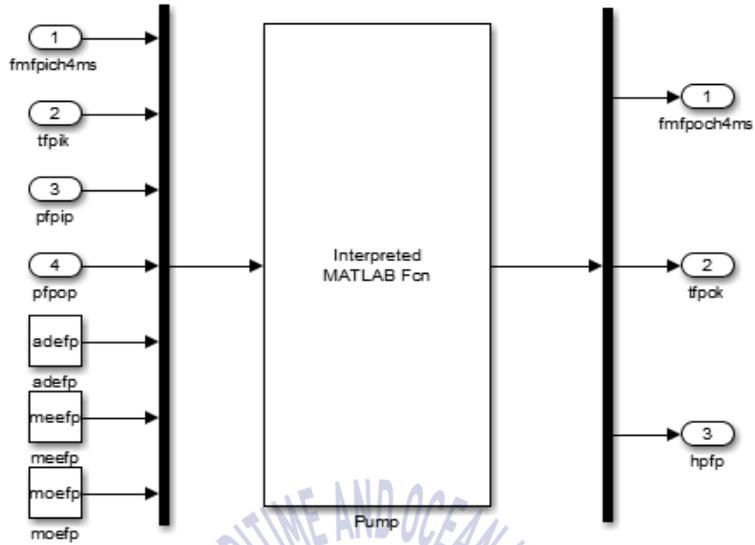


Fig. 3.6 펌프 모델

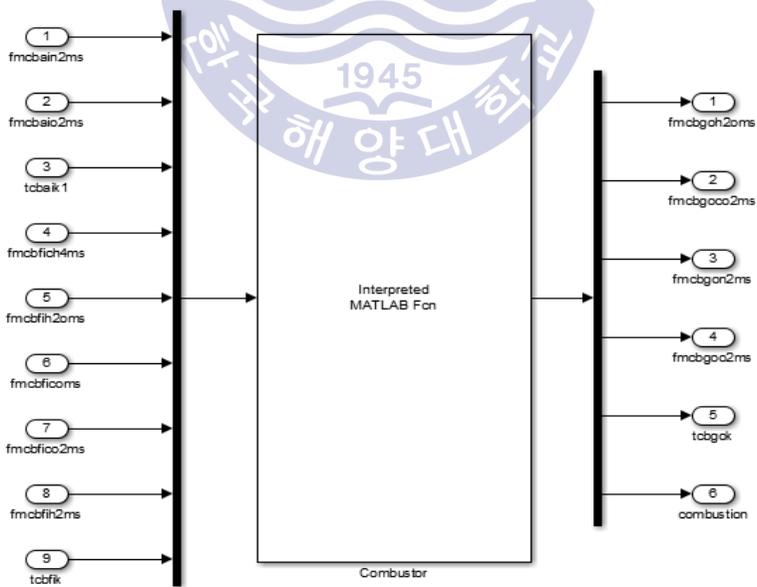


Fig. 3.7 연소기 모델

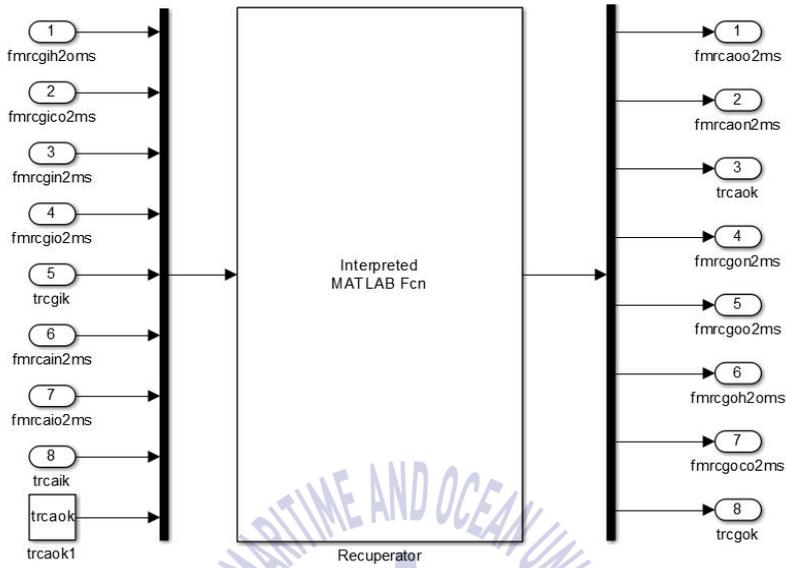


Fig. 3.8 열교환기 모델

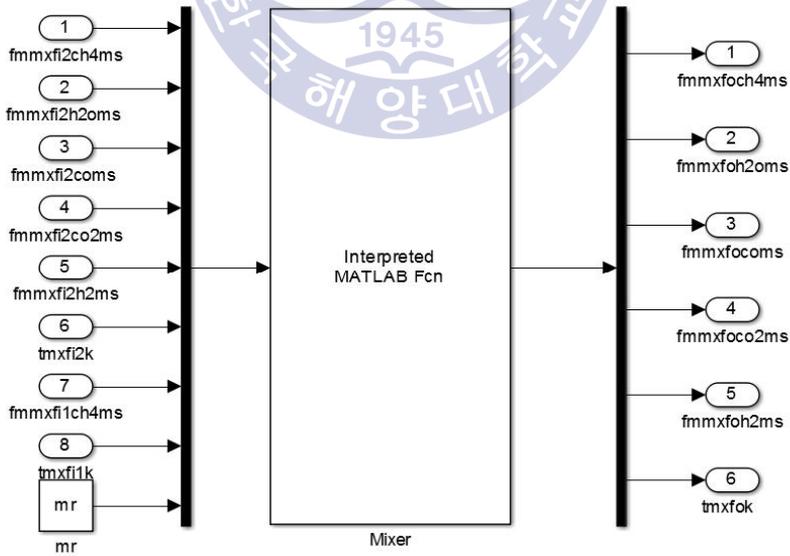


Fig. 3.9 혼합기 모델

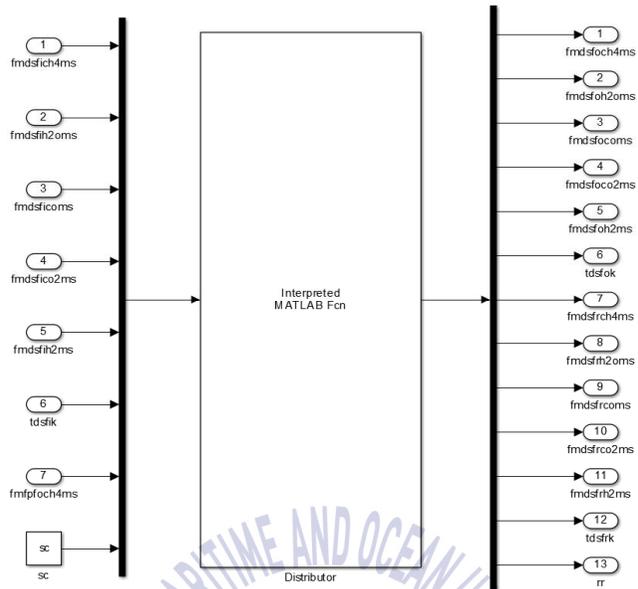


Fig. 3.10 분배기 모델

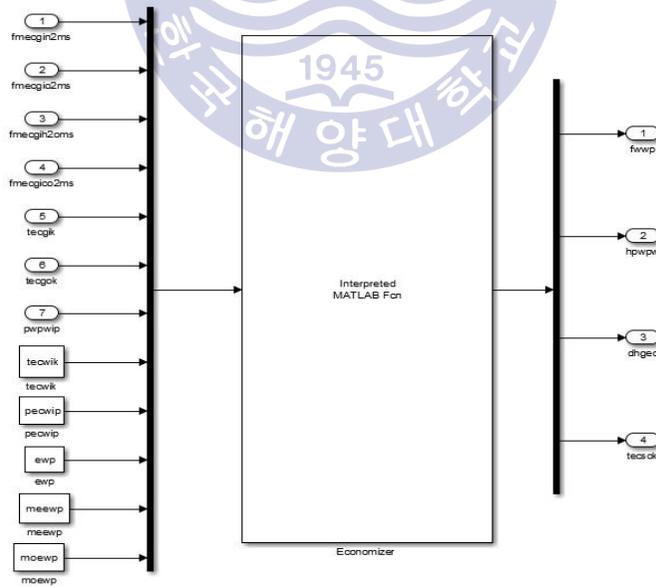


Fig. 3.11 이코노마이저 모델

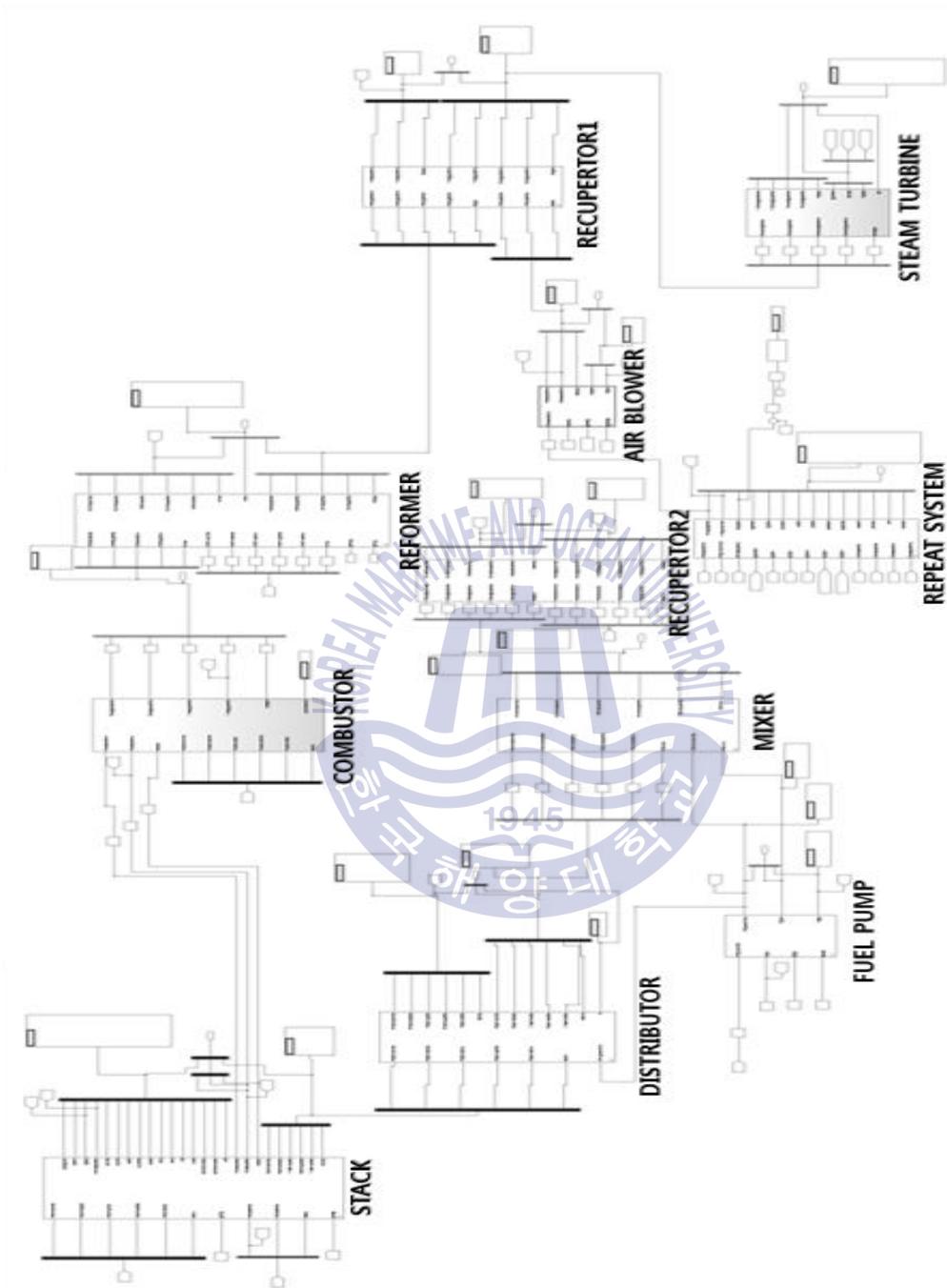


Fig. 3.12 중온형 SOFC 하이브리드시스템 모델

## 제 4 장 선박 동력용 중온형 SOFC 시스템 성능 평가

본 장에서는 메탄 또는 메탄올을 연료로 하는 중온형 SOFC(It-SOFC) 단독시스템과 하이브리드시스템의 성능 특성을 평가하고 있다. 4.1은 중온형과 고온형 SOFC(Ht-SOFC) 시스템의 성능을 비교한 것이고, 4.2는 메탄 연료 중온형 SOFC 단독 시스템 및 하이브리드 시스템, 4.3은 메탄올 연료 중온형 SOFC 단독 시스템 및 하이브리드 시스템의 성능을 평가하였다.

### 4.1 중온형과 고온형 SOFC 단독시스템의 성능비교

#### 4.1.1 시스템 구성 비교

연료전지시스템의 주요 구성 요소는 스택, 개질기, 예열기, 연소기, 연료 및 공기 공급 장치 등이며 시스템은 다양한 조합이 가능하다. 본 연구에서는 Fig. 4.1이 스택 작동온도가 600~800°C인 중온형 SOFC시스템으로써 가장 효과적이라 판단하여 제시한다. 시스템의 비교를 위하여 Fig. 4.2를 800~1000°C에서 스택이 작동되는 고온형 SOFC시스템으로 나타내었다[8]. Fig. 4.1과 Fig. 4.2의 상호 비교에서 시스템의 상이점은 개질기의 위치와 예열기2의 신설이 중온형 SOFC시스템에 나타난다. 중온형 SOFC시스템에서 개질기가 연소기의 하류에 배치된 것은 고온형 SOFC시스템과 같이 스택 공기극 후단의 반응 및 냉각용 공기의 온도와 열량이 메탄의 수증기개질에 충분하지 못하므로 연료극 후단에서 토출되는 가연성 혼합가스를 연소시켜 얻어진 고온과 열량을 이용해야하기 때문이다. 2.2.2.1에서 전술하였듯이 98% 이상의 메탄 개질률을 얻기 위해서는 반응온도가 1000 K 이상 유지되어야 함을 알 수 있다. 즉, 중온형 SOFC 스택 공기극의 출구온도가 873~1073 K이므로 이 열원만으로는 개질기의 반응온도를 1000 K 이상으로 유지시키기에는 부족하다. 또한, 예열기2가 개질기와 스택 연료극 사이에 신설된 것은 개질기를 통과한 고농도 수소혼합가스의 온도가 스택의 작동온도 보다 높아 스택이 가열되는 것을 막고 그 열원을 개질기로 들어가는 메탄의 예열에 사용하기 위함이다.

Fig. 4.1의 메탄 수증기개질 중온형 SOFC시스템에서 메탄은 예열기2로 유입되기 전에 수증기가 풍부한 스택 연료극 출구의 재순환 가스와 소정의 S/C(Steam/Carbon ratio) 비율로 혼합된다. 메탄과 수증기 등의 가스는 예열기2를 거쳐 개질기에서 수소가 농후한 일산화탄소, 이산화탄소, 수증기 및 메탄을 포함한 혼합가스로 변환되며, 이 혼합가스는 스택 연료극의 전기화학반응을 거쳐 수소와 일산화탄소의 농도는 감소하고 수증기의 농도가 증가된 형태로 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 출구 온도는 스택 작동온도보다 최대 200 K 낮은 온도(COT-200)로 조절된다[12][13]. 스택의 연료극 출구 혼합가스에 포함된 미반응 수소 및 일산화탄소 그리고 소량의 메탄은 공기극 출구 공기와 함께 연소실에서 연소된다. 연소기 출구의 고온가스는 공기 예열기1의 열원으로 사용되고, 이코노마이저에서 증기발생용 열에너지로 회수된다.

#### 4.1.2 성능비교

중온형과 고온형 SOFC 단독시스템의 성능비교를 위해 사용한 조건들은 Table 4.1과 같으며 시뮬레이션 계산에 사용된 모델링 방법은 2, 3장에서 전술한 바와 같다. 4.1.2.1은 스택 작동온도, 4.1.2.2는 스택 전류밀도, 4.1.2.3은 스택 수소이용률이 시스템의 성능에 미치는 영향을 조사하여 시스템들을 비교하였다.

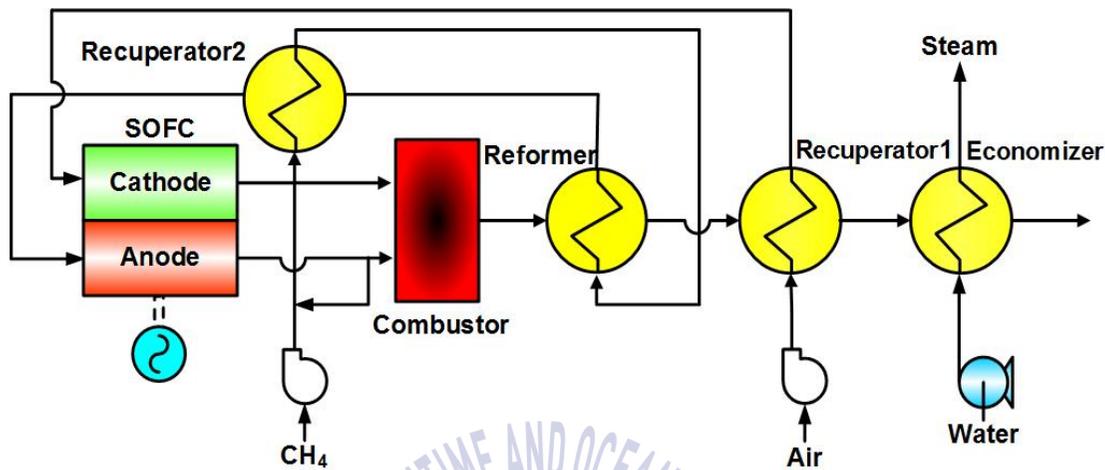


Fig. 4.1 중온형 SOFC 단독시스템 구성도

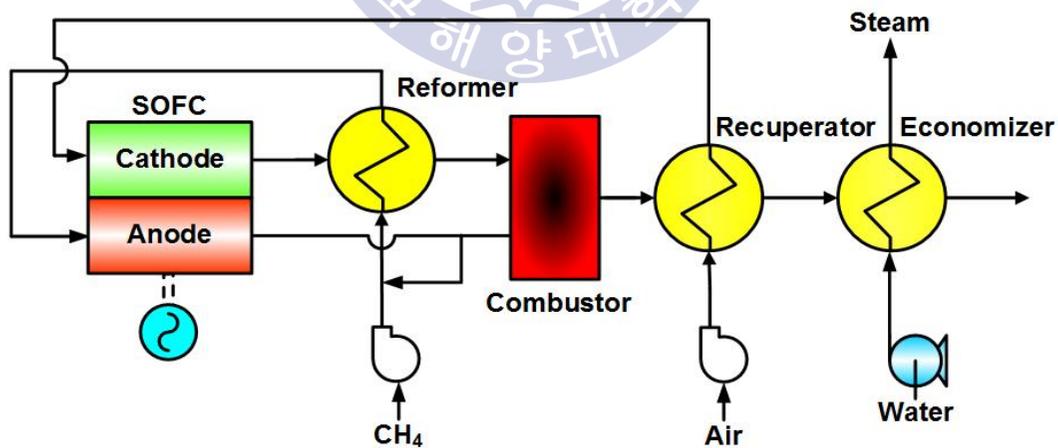


Fig. 4.2 고온형 SOFC 단독시스템 구성도

**Table 4.1** 고온형/중온형 SOFC 단독시스템 계산조건

contents	Ht-SOFC	It-SOFC
Electrical output (kW)	3000	
Anode thickness ( $\mu\text{m}$ )	200	
Cathode thickness ( $\mu\text{m}$ )	2000	
Electrolyte thickness ( $\mu\text{m}$ )	20	
Limiting current density ( $\text{A}/\text{m}^2$ )	9000	25000
Inverter efficiency (%)	95	
Reformer temperature effectiveness (%)	50	85
Economizer gas outlet temperature (K)	423.15	
steam 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) (%)	4	3
Reformer pressure drop(fuel side) (%)	2	3
Recuperator1 pressure drop(air side) (%)	4	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	

#### 4.1.2.1 스택 작동온도 영향

Fig. 4.3은 스택 전류밀도=3,000 A/m<sup>2</sup>, S/C=3, 수소연료 이용률=80%인 경우 스택 작동온도가 중온형과 고온형 SOFC 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 셀 유기전압과 시스템 전기적 효율로 나타낸 것이다. 그림으로부터 셀의 유기전압은 중온형의 작동온도범위 내에서 0.78 ~ 0.88 V 정도이며, 중온형이 낮은 작동온도에도 불구하고 고온형에 비해 셀 유기전압이 높게 나타난다. 이것은 2.1에서 전술한 것과 같이 중온형이 연료극 및 공기극의 활성화에너지와 전해질의 저항물이 고온형 SOFC 셀에 비해 낮아 손실전압이 낮은 것으로부터 예상할 수 있다. 또한 중온형은 작동온도가 감소함에 따라 유기전압도 낮아지나 그 감소율이 고온형에 비해 많이 완만하다. 이것은 최근 중온형 SOFC는 신재료 개발의 약진으로 넓은 전류밀도 범위(0~25000 A/m<sup>2</sup>)를 가지는 특징을 가지며, 비교군이 되는 전류밀도 3000 A/m<sup>2</sup>에서는 작동온도 감소에 따른 저항 손실전압 증가보다는 재료에 따른 활성화 손실전압 감소의 영향이 우세하게 나타나기 때문이다. 반면 고온형 SOFC는 중온형의 개발 확대에 의해 개발의 필요성이 떨어져 사용 전류밀도 범위의 향상이 현저하게 나타나지 않고 있다. 시스템의 전기적 효율도 작동온도의 하강에 따라 셀 유기전압과 함께 비슷한 경향으로 감소한다. 또한, 그림에서 시스템의 전기적 효율은 중온형의 작동온도 범위 내에서 최소 60% 이상 유지되고 있음을 알 수 있다. 이것은 중온형 SOFC가 대형저속 디젤기관과 같은 타 동력장치와 비교하여 효율적 측면에서의 경쟁력이 충분함을 의미한다.

#### 4.1.2.2 스택 전류밀도 영향

Fig. 4.4는 스택 작동온도 고온형=1223 K, 중온형=1023 K, S/C=3, 수소연료 이용률=80%인 경우 스택 전류밀도가 고온형과 중온형 SOFC 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 셀 유기전압과 시스템 전기적 효율로 나타낸 것이다. 그림에서 중온형의 셀 유기전압은 스택 작동온도의 영향과 마찬가지로 넓은 전류밀도 범위에서 높게 나타난다. 이것은 4.1.2에서 기술한 동일한 이유에 기인하는 결과이다. 시스템 전기적 효율은 셀 유기전압과 함께 비슷한 경향을 나타내며, 중온형이 고온형보다 10% 이상 높게 나타난다.

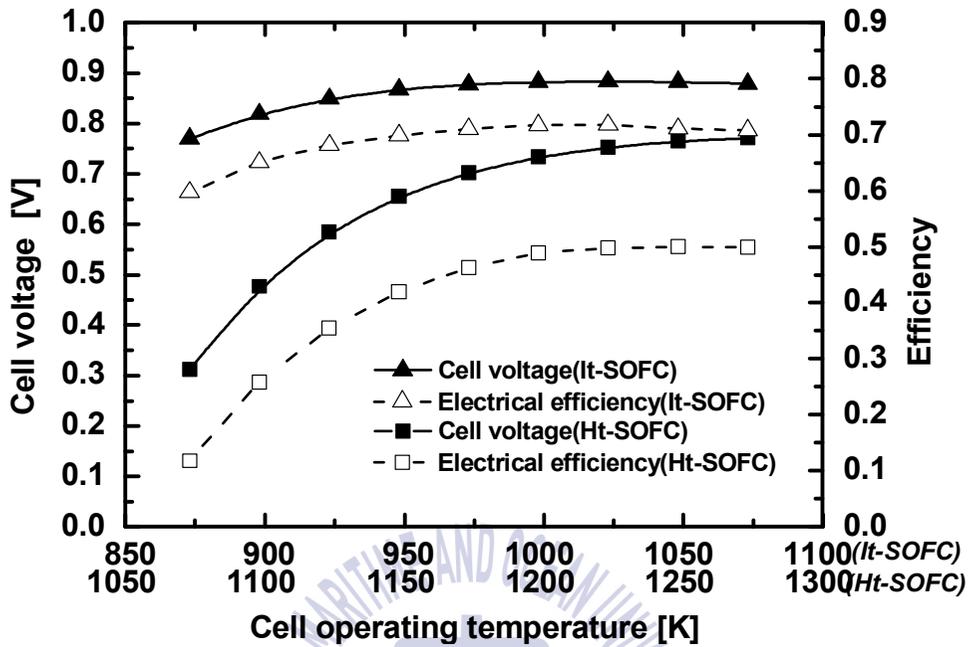


Fig. 4.3 스택 작동온도에 따른 성능 비교

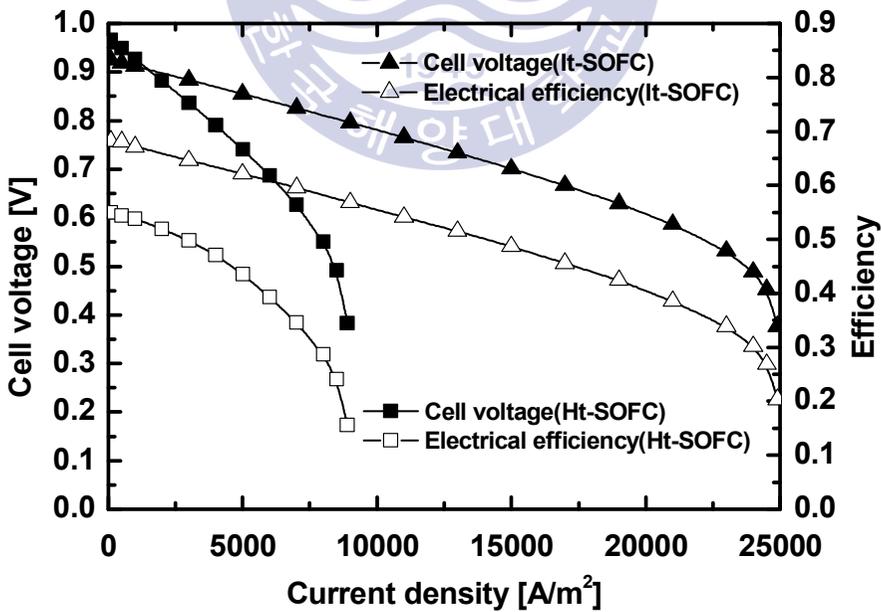


Fig. 4.4 스택 전류밀도에 따른 성능 비교

### 4.1.2.3 스택 수소이용률 영향

Fig. 4.5는 스택 작동온도 고온형=1223 K, 중온형=1023 K, 스택 전류밀도=3,000 A/m<sup>2</sup>, S/C=3인 경우 스택 수소이용률이 고온형과 중온형 SOFC 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 셀 유기전압과 시스템 전기적 효율로 나타낸 것이다. 중온형의 셀 유기전압 및 전기적 효율이 고온형보다 높게 나타나며, 이것은 4.1.2.1에서 전술한 것과 동일하다. 그리고 두 방식 모두 수소이용률이 증가할수록 셀 유기전압은 감소하고, 전기적 효율은 증가한다. 이것은 수소이용률이 증가할수록 스택 출구의 수소분압이 낮아져 스택에서 반응하는 수소의 평균 몰분율이 낮아지기 때문에 식 (5)에 의해 셀 유기전압은 감소한다. 또한 수소이용률이 증가할수록 투입되는 연료의 양이 줄어들기 때문에 식 (17)에 의해 전기적 효율은 증가한다.

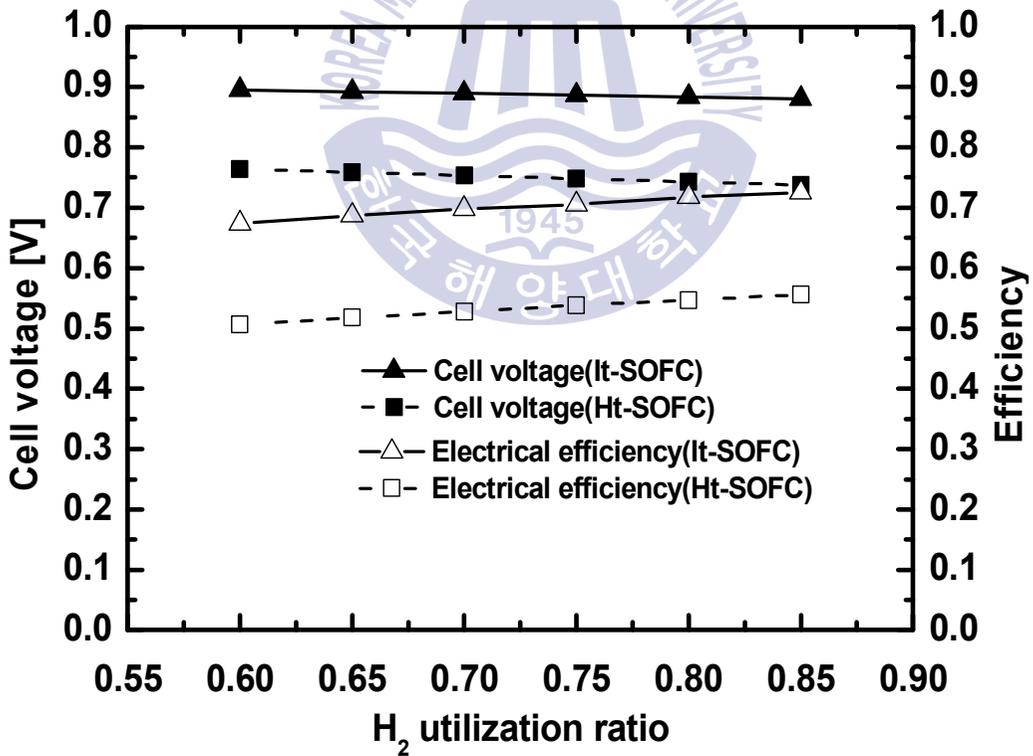


Fig. 4.5 스택 수소이용률에 따른 성능 비교

## 4.2 메탄 수증기 개질 기반 중온형 SOFC 시스템

### 4.2.1 SOFC 단독시스템

#### 4.2.1.1 시스템 구성

메탄 수증기 개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템의 구성 및 계산조건은 4.1에서 전술한바와 같다. 4.2.1에서는 스택의 작동온도, 전류밀도, 개질기의 S/C, 스택의 수소이용률이 시스템의 성능에 미치는 영향을 조사하여 시스템의 특성을 분석하였다.

#### 4.2.1.2 스택 작동온도에 따른 성능 특성

Fig. 4.6은 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>, S/C=3, 수소이용률=80%인 경우 스택 작동온도가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.6-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.6-(b)는 시스템의 효율과 출력량을 나타낸 것이다. 여기에서 공급공기의 산소이용률이란 공급된 공기의 총 산소량에 대한 스택의 전기화학반응에서 사용된 산소량의 비를 말하며, 총효율은 식 (18)에서 전술한 바와 같이 이코노마이저에서 회수된 열에너지와 급수펌프의 동력을 출력 및 소요동력으로 포함시켜 정의하였다.

Fig. 4.6-(a)로부터 작동온도가 높아짐에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 증가하는 것을 알 수 있다. 셀 유기전압의 증가는 작동온도 상승에 따른 가역 개회로전압의 감소에도 불구하고 활성화 손실전압이 작아지는 효과가 크게 작용하기 때문이다. 산소이용률이 증가하는 것은 활성화 손실전압이 감소하여 셀에서 발생하는 열량이 감소하는 것과 스택 작동온도에 대한 공급 공기온도의 차가 커져 냉각작용이 증대되기 때문에 스택에서 소요되는 공기량이 줄어들기 때문이다. 이것은 Fig. 4.6-(b)의 공기량에 따른 송풍기 소요동력의 감소로부터 확인 할 수 있다.

Fig. 4.6-(b)에서 시스템의 전기적 효율은 작동온도가 높아짐에 따라 함께 상승하는데 이는 셀 유기전압의 증가와 송풍기 소요동력이 감소하기 때문이다. 총효율도 같은 경향을 보이며, 전 온도 범위에서 스팀을 발생시키므로 전기적 효율보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

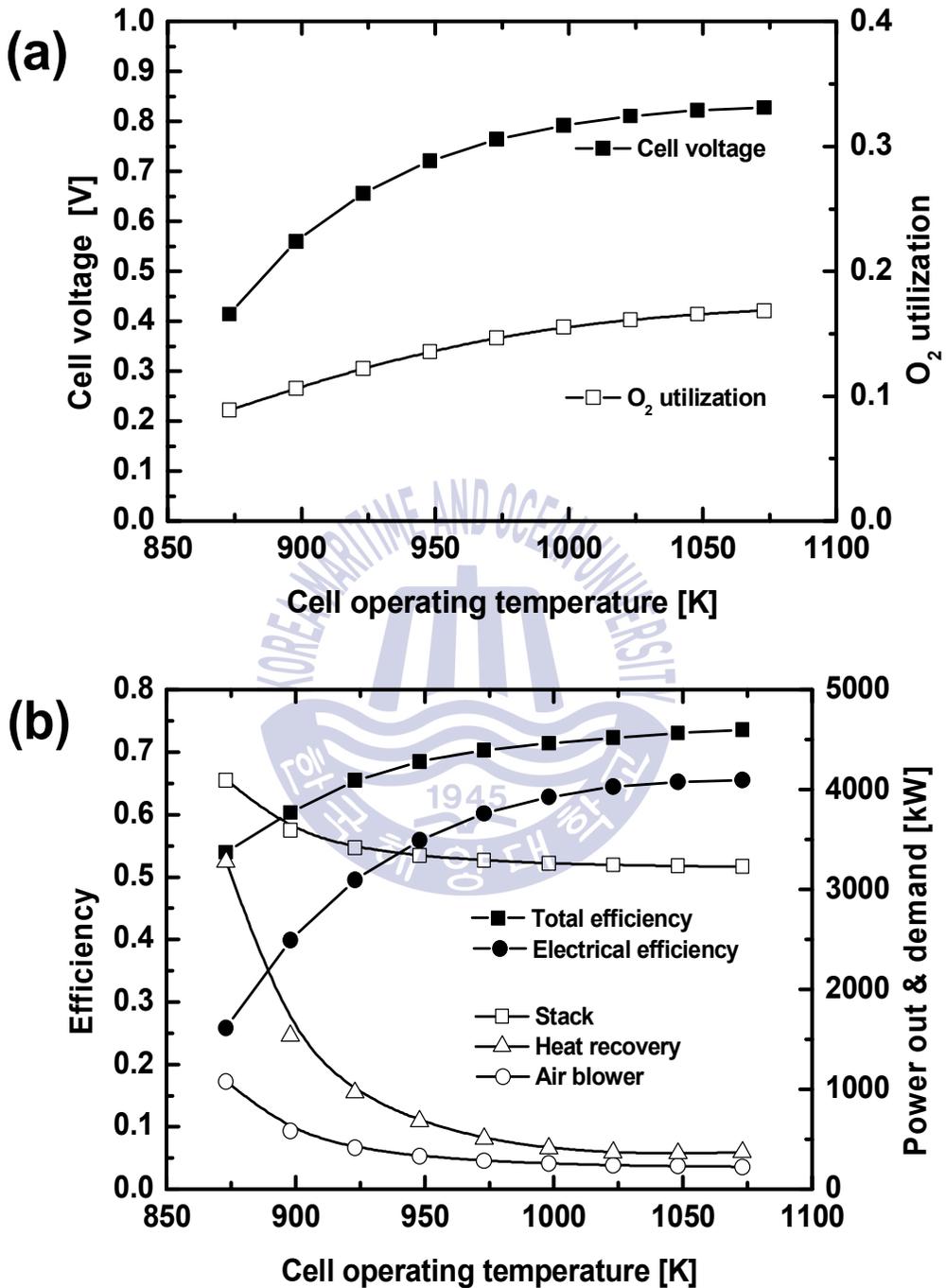


Fig. 4.6 스택 작동온도에 따른 성능 특성

### 4.2.1.3 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

Fig. 4.7은 스택 작동온도=1023 K, S/C=3, 수소이용률=80%인 경우 스택 전류밀도가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.7-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.7-(b)는 시스템의 효율과 출력량을 나타낸 것이다.

Fig. 4.7-(a)로부터 전류밀도가 높아짐에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 감소하는 것을 알 수 있다. 전류밀도가 커지는 것은 반응 단위면적당 반응량의 증가를 의미하는 것이므로 가역 개회로전압에는 큰 변화가 없지만 손실전압이 증가하여 셀 유기전압을 감소시킨다. 유기전압의 감소와 더불어 산소이용률이 감소하는 것은 손실전압의 증가로 스택의 발열량이 증가해 스택 냉각을 위한 공기량이 증가하기 때문이다. Fig. 4.7-(b)에서 전류밀도 증가에 따른 송풍기 소요동력의 증가를 확인할 수 있다.

### 4.2.1.4 개질기 S/C에 따른 성능 특성

Fig. 4.8은 스택 작동온도=1023 K, 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>, 수소이용률=80%인 경우 개질기 S/C가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.8-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.8-(b)는 시스템의 효율과 출력량을 나타낸 것이다.

Fig. 4.8-(a)로부터 S/C가 높아짐에 따라 셀 유기전압은 미세하게 감소하는 것을 알 수 있다. S/C가 커지는 것은 스택 연료극 출구가스의 재순환율이 증가하는 것을 의미하는 것이므로 스택 연료극 입구 가스조성에서 수증기, 이산화탄소의 비율이 늘어나 셀 전기화학반응의 네른스트 손실이 증가하여 셀 유기전압이 감소하게 된다. 셀의 비가역적 요소에 의해 스택 발열량은 늘어나지만 S/C 증가로 인한 연료극에 공급되는 개질가스의 양도 많아지게 되어 냉각 공기량의 양은 같게 된다. 그로인해 송풍기 소요동력 및 산소이용률은 변화가 없다.

Fig. 4.8-(b)로부터 S/C가 효율과 출력에 미치는 영향은 아주 작다는 것을 알 수 있다.

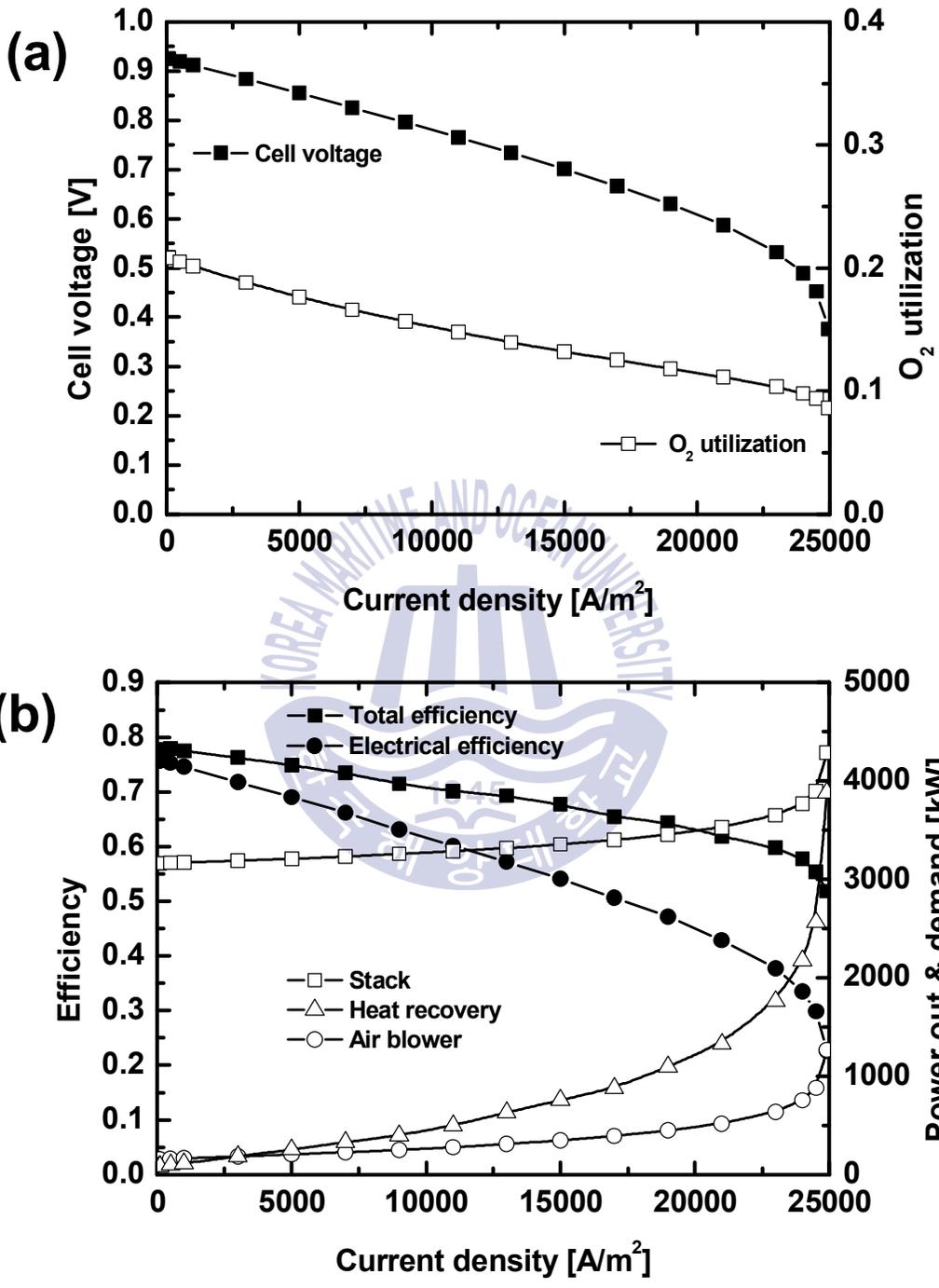


Fig. 4.7 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

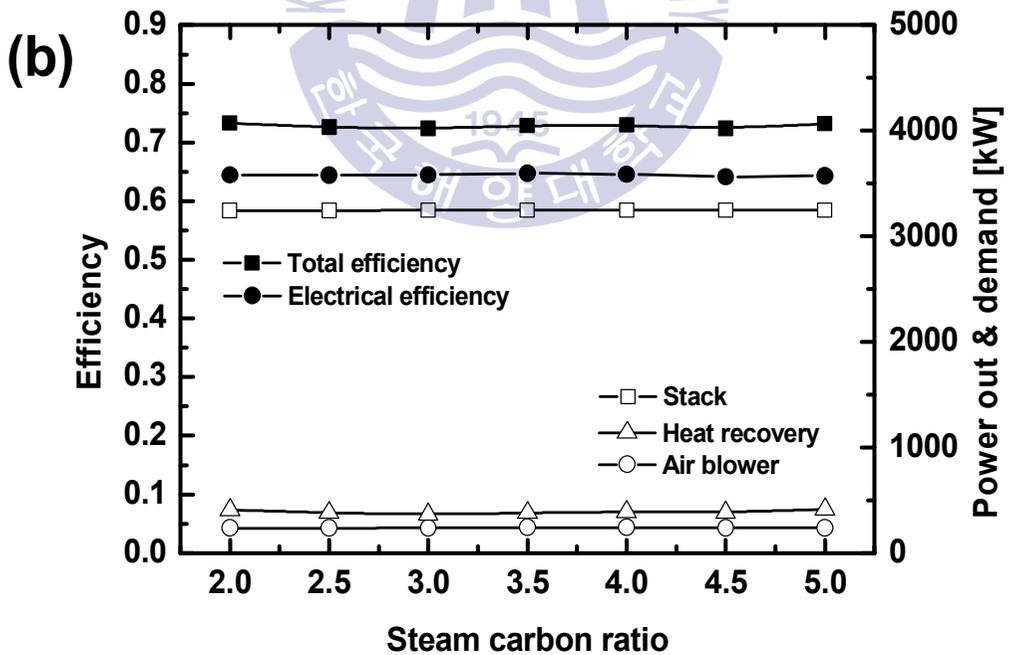
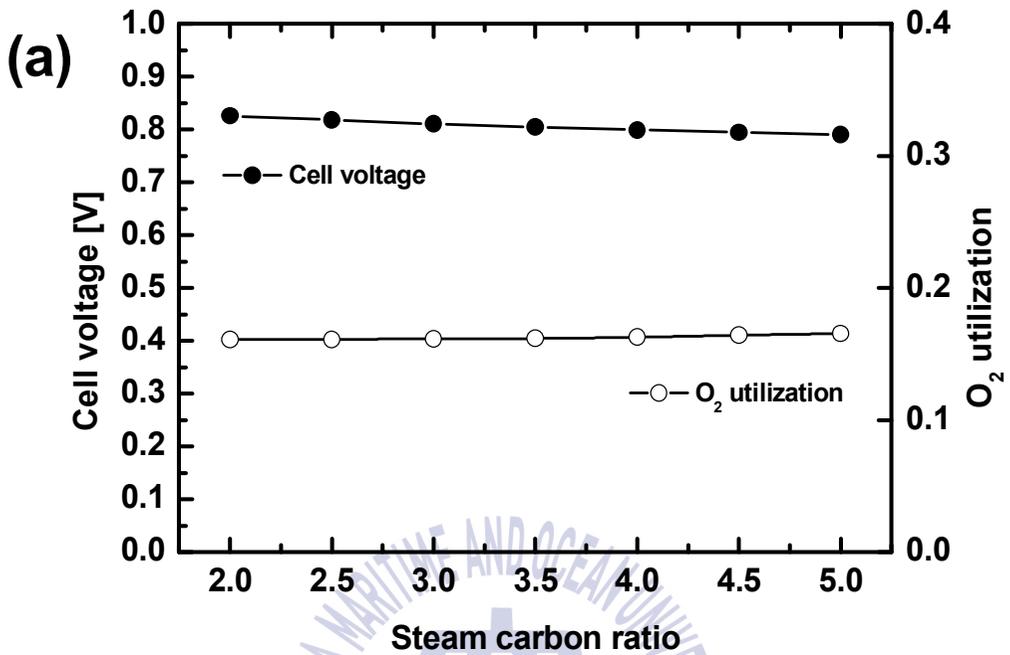


Fig. 4.8 개질기 S/C에 따른 성능 특성

#### 4.2.1.5 스택 수소이용률에 따른 성능 특성

Fig. 4.9는 스택 작동온도=1023 K, 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>, S/C=3인 경우 스택 수소이용률이 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.9-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.9-(b)는 시스템의 효율과 출력량을 나타낸 것이다.

Fig. 4.9-(a)로부터 수소이용률 높아짐에 따라 셀 유기전압은 미세하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 수소이용률이 증가하면서 스택 출구측 수소농도가 감소하여 네른스트 손실이 증가하기 때문이다. 산소이용률은 미세하게 감소하는데, 네른스트 손실로 인한 발생하는 열이 커져 공급되는 냉각공기량이 작으나 많아지기 때문이다.

Fig. 4.9-(b)로부터 수소이용률의 증가에 따른 유기전압의 감소에도 불구하고 전기적 효율이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 수소이용률이 증가됨에 따라 개질용 메탄 공급량이 감소하기 때문이다. 반대로 총효율은 감소한다. 이는 수소이용률이 증가하면서 연소기의 연료인 수소의 공급량이 줄어들어 연소기의 가스온도가 낮아지고, 이코노마이저에서 회수되는 열량이 감소하기 때문이다.

#### 4.2.1.5 결과 정리

메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템의 시뮬레이션을 통해 스택 작동온도, 전류밀도, 개질기 S/C, 스택 수소이용률이 시스템 성능에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템은 Fig. 4.1과 같다.
- (2) 셀 유기전압과 산소이용률은 시스템 효율에 큰 영향을 주며, 이 값이 클수록 효율은 증가한다.
- (3) 시스템 효율은 스택 작동온도가 클수록 전류밀도가 낮을수록 증가하지만 개질기의 S/C에 의한 영향은 크지 않다.
- (4) 스택의 수소이용률이 높을수록 시스템의 전기적 효율은 증가하지만 총효율은 감소하므로, 시스템의 사용 목적에 따라 수소이용률의 결정이 필요하다.

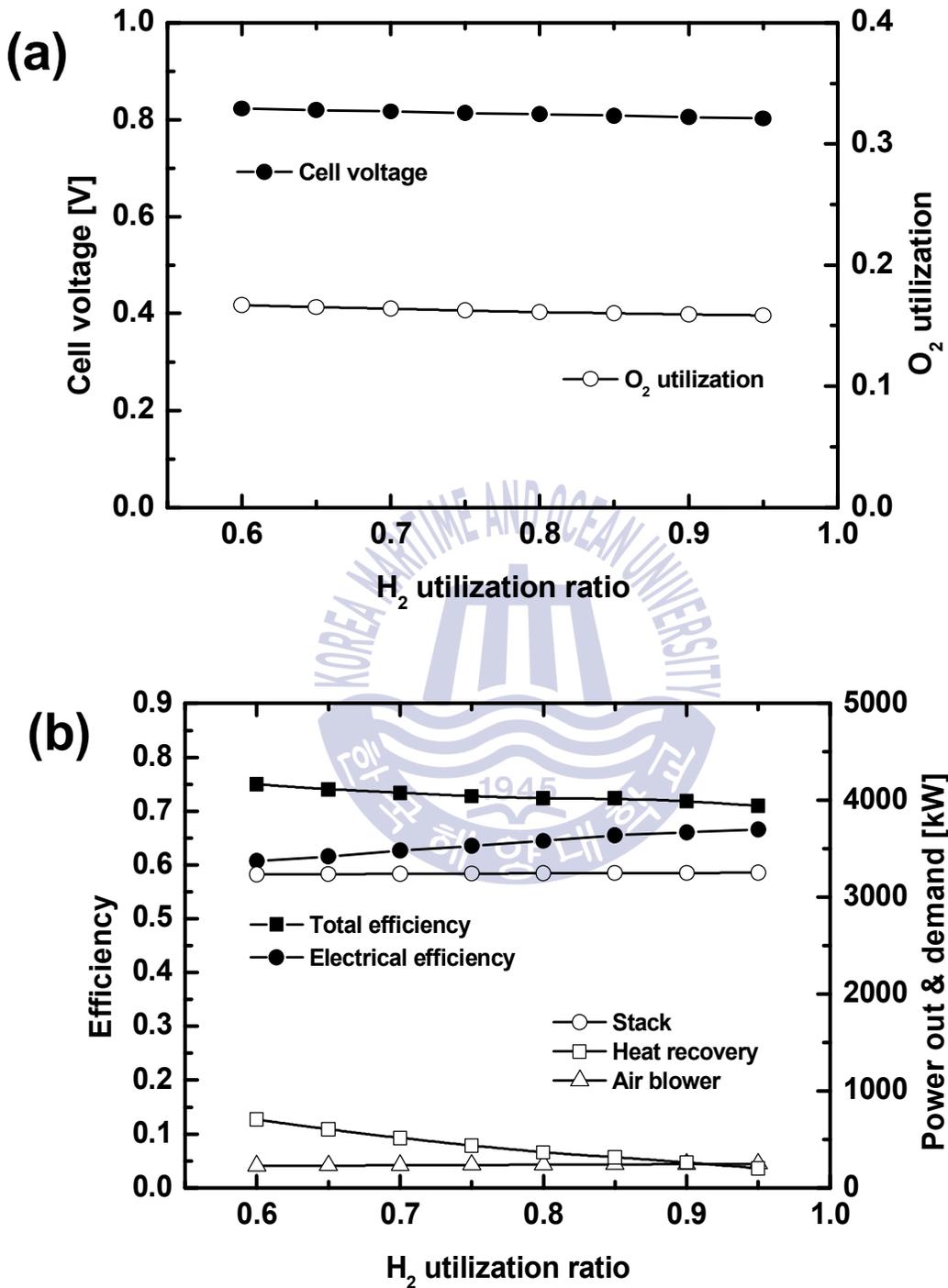


Fig. 4.9 스택 수소이용률에 따른 성능 특성

## 4.2.2 SOFC/GT 하이브리드시스템

SOFC 하이브리드시스템에는 다양한 장치들의 구성이 가능하다. 본장에서는 중온형 SOFC/GT(가스터빈) 하이브리드시스템의 구성 및 성능 특성에 대해 기술하였다.

### 4.2.2.1 시스템 구성

Fig. 4.10은 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템의 구성도이다. 전술하였듯이 연료전지는 수소와 일산화탄소의 화학적 에너지를 전기적 에너지로 변환하며, 비가역적 에너지를 열로 방출한다. 또한 스택내에서 미반응된 수소, 일산화탄소 및 미량의 메탄은 연소기로 공급되어 고온의 열로 토출된다. 이러한 폐열을 활용하기 위하여 가스터빈과 이코노마이저를 복합하였다. 개질방식은 시스템의 효율과 수증기 재활용의 측면에서 외부 수증기 개질방식을 채용하였다. 개질용 수증기는 스택 연료극 출구가스에 포함된 수증기를 재순환하여 사용하므로 다량의 물을 저장할 필요가 없으며, 별도의 증발 및 수처리 장치도 요구되지 않는다. 중온형 SOFC의 스택 출구온도가 873~1073 K이므로 98% 이상의 메탄 개질률을 얻을 수 있는 개질 반응온도인 1000 K 이상을 유지시키기에는 열원이 부족하였다. 따라서 개질기를 연소기 후단에 설치하여 고온의 폐열을 이용하도록 고려하였다. 스택 내의 불균일한 온도분포 형성에 따른 열적피로와 충격을 완화하고 스택 냉각을 고려하여 스택에 공급되는 연료와 공기 온도를 스택 작동온도(COT)의 -200 K로 하였다.

저장탱크로부터 송출된 메탄가스는 수증기가 풍부한 스택 연료극 출구에서 토출되는 가스와 소정의 S/C 비율로 혼합되어 예열기2로 유입된다. 이 혼합가스는 예열기2에서 가열되어 개질기에서 수소가 농후한 일산화탄소, 이산화탄소, 수증기 및 미개질된 소량의 메탄을 포함한 혼합가스로 변환되고 스택의 연료극으로 공급된다. 공기는 전기화학반응용과 스택 냉각용으로 사용되며 압축기와 예열기1을 거쳐 스택의 공기극으로 공급된다. 연료극에서 수소와 일산화탄소는 공기극과 전해질을 거쳐 온 산소이온과 반응하여 수증기와 이산화탄소를 생성하고 전자를 방출한다. 스택에 공급된 잉여 공기는 비가역과정을 통해 발생된 열을 흡수하여 토출된다.

미반응된 수소와 일산화탄소, 이산화탄소, 수증기 및 메탄은 스택 연료극 출구로 토출되며, 소정의 S/C 비율을 제외한 나머지는 공기극의 토출 공기와 함께 연소된다. 고온의 연소가스의 열원은 개질기 열원으로 사용된 뒤 터빈으로 유입되어 단열 팽창된다. 터빈에서 발생한 동력은 공기의 압축과 발전에 사용되고 터빈의 출구가스는 공기 예열용 예열기1과 이코노마이저의 열원으로 재활용된 뒤 대기로 방출된다.

본 시스템 성능해석에 사용한 조건들은 Table 4.2와 같으며 시뮬레이션 계산에 사용된 시스템의 모델링 방법은 2, 3장에서 전술한 바와 같다.

4.2.2에서는 시뮬레이션 모델을 사용하여 스택의 작동온도와 전류밀도, 가스터빈의 압력비가 시스템의 성능에 미치는 영향을 조사하여 시스템의 특성을 분석하였다.

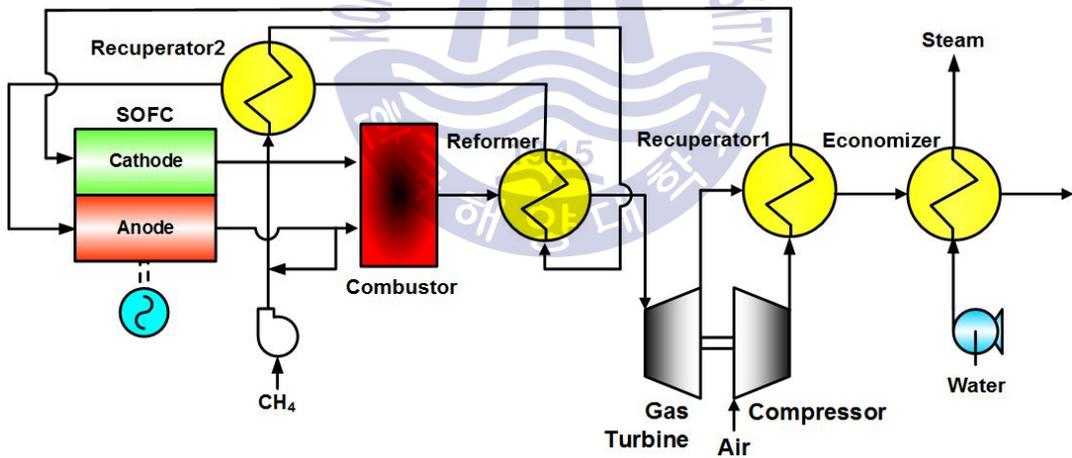


Fig. 4.10 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템 구성도

**Table 4.2** 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템 계산조건

Electrical output (kW)	3000
Anode thickness ( $\mu\text{m}$ )	200
Cathode thickness ( $\mu\text{m}$ )	2000
Electrolyte thickness ( $\mu\text{m}$ )	20
H <sub>2</sub> utilization ratio	0.8
Limiting current density (A/m <sup>2</sup> )	25000
Inverter efficiency (%)	95
Reformer temperature effectiveness (%)	85
Steam carbon ratio	3
Economizer gas outlet temperature (K)	373.15
Steam pressure (kPa)	300
Air compressor adiabatic efficiency (%)	75
Gas turbine adiabatic efficiency (%)	82
Gas turbine mechanical efficiency (%)	93
Generator efficiency (%)	97
Converter 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) (%)	6
Recuperator1 pressure drop(gas side) (%)	3
Stack pressure drop(air side) (%)	6
Stack pressure drop(fuel side) (%)	2
Recuperator2 pressure drop(fuel side) (%)	2
Recuperator2 pressure drop(gas side) (%)	2
Combustor pressure drop(air side) (%)	4
Combustor pressure drop(fuel side) (%)	4
Gas turbine pressure drop (%)	8
Mixer pressure drop (%)	1
Economizer pressure drop(gas side) (%)	4
Ambient temperature (K)	298.15
Ambient pressure (kPa)	101

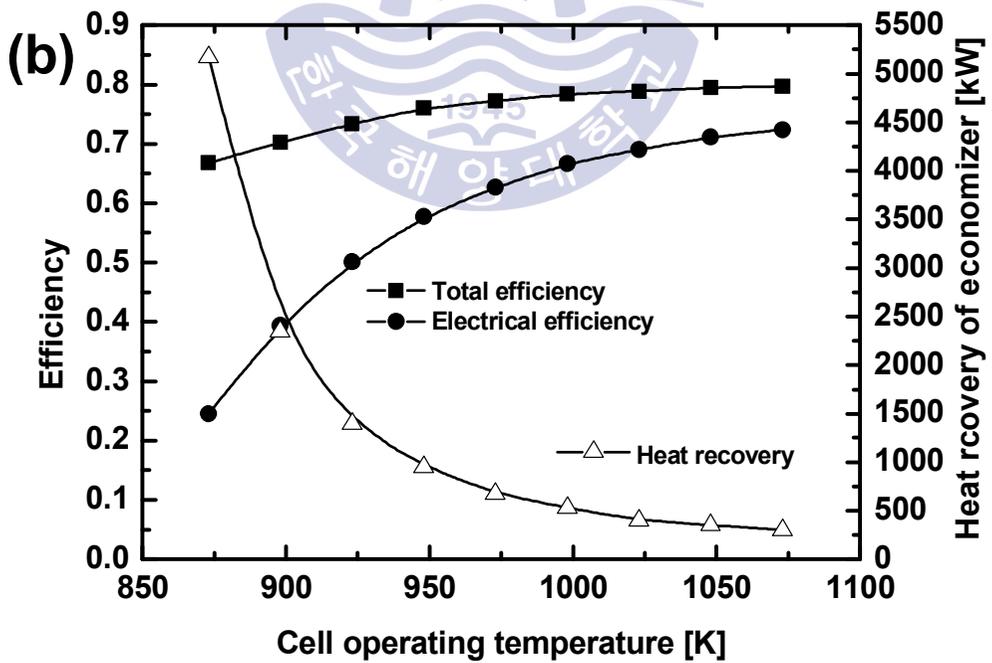
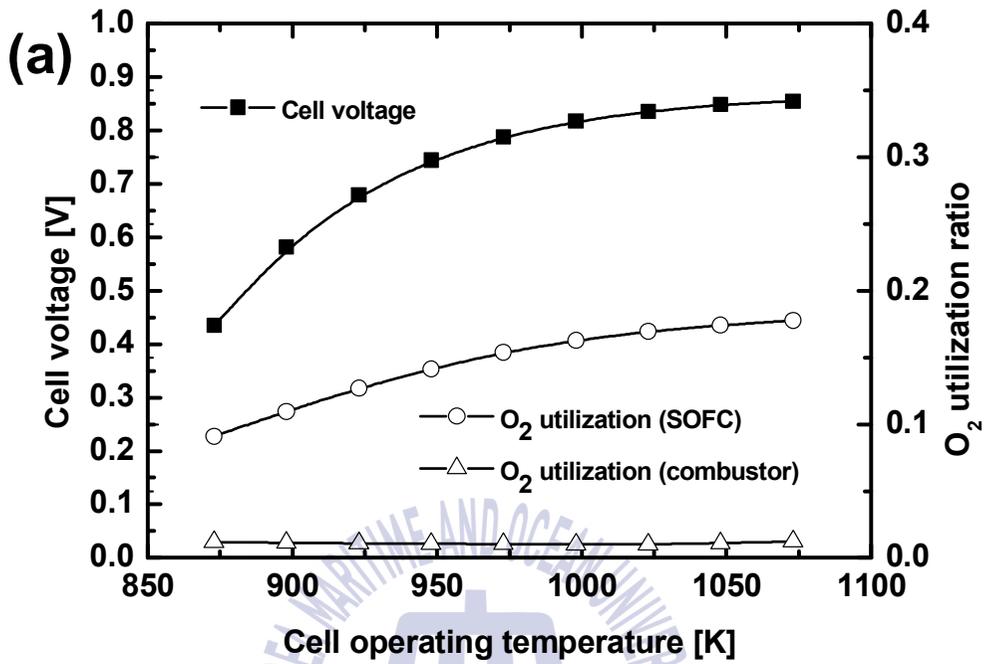
#### 4.2.2.2 스택 작동온도에 따른 성능 특성

Fig. 4.11은 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>, 가스터빈 압력비=3인 경우 스택 작동온도가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.11-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.11-(b)는 시스템의 효율과 이코노마이저에서 회수한 열량, Fig. 4.11-(c)는 하이브리드 시스템의 전기출력에 대한 스택 및 가스터빈의 부하분담률과 공기압축기의 소요동력을 나타낸 것이다. 여기에서 공급공기의 산소이용률이란 공급된 공기의 총 산소량에 대한 스택과 연소기의 전기화학 및 연소 반응에 사용된 산소량의 비이며, 부하분담률이란 시스템 총 출력에 대한 스택 및 가스터빈이 발생시킨 출력의 비로 정의하였다.

Fig. 4.11-(a)로부터 스택 작동온도가 증가할수록 셀 유기전압과 스택의 산소이용률은 증가하나, 연소기의 산소이용률은 스택 작동온도에 거의 영향을 받지 않는다. 셀 유기전압의 증가는 스택 작동온도 상승에 따른 가역 개회로전압의 감소에도 불구하고 활성화 손실전압의 감소의 영향이 더 크게 작용하기 때문이다. 또한 스택의 산소이용률이 증가하는 것은 활성화 손실전압의 감소로 인해 화학반응의 비가역성이 줄어들어 셀에서 발생하는 열량이 감소하고 그로 인해 스택에서 소요되는 냉각공기량이 감소하기 때문이다. 또한 스택의 부하 분담률이 증가하여 시스템에 공급되는 연료량이 감소하는 영향 때문이다. 이것은 Fig. 4.11-(c)에서 공기압축기 소요동력 및 부하분담률로부터 확인할 수 있다.

Fig. 4.11-(b)로부터 스택 작동온도가 증가할수록 시스템의 전기적 효율과 총효율은 증가하는 것을 알 수 있다. 스택 작동온도의 상승에 따른 셀 유기전압의 상승과 공기압축기 소요동력의 감소효과와 더불어 효율이 높은 스택의 부하분담률이 증가하기 때문에 시스템의 전기적 효율은 증가한다. 시스템 총 효율은 전기적 효율과 유사한 경향을 보이나, 스택 작동온도에 대한 증가율은 이코노마이저에서의 열회수량의 감소에 따라 전기적 효율보다 작아진다. 이코노마이저에서 열회수량이 감소하는 것은 이코노마이저 입구온도가 낮아지고, 통과하는 가스량이 줄어들기 때문이다.

Fig. 4.11-(c)로부터 스택 작동온도의 증가에 따라 스택의 부하 분담률은 증가하고, 가스터빈의 부하 분담률은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 스택 작동온도가 증가함에 따라 스택 소요공기량이 감소하여 가스터빈 출력이 줄어들고, 그만큼의 스택 분담률이 늘어나기 때문이다.



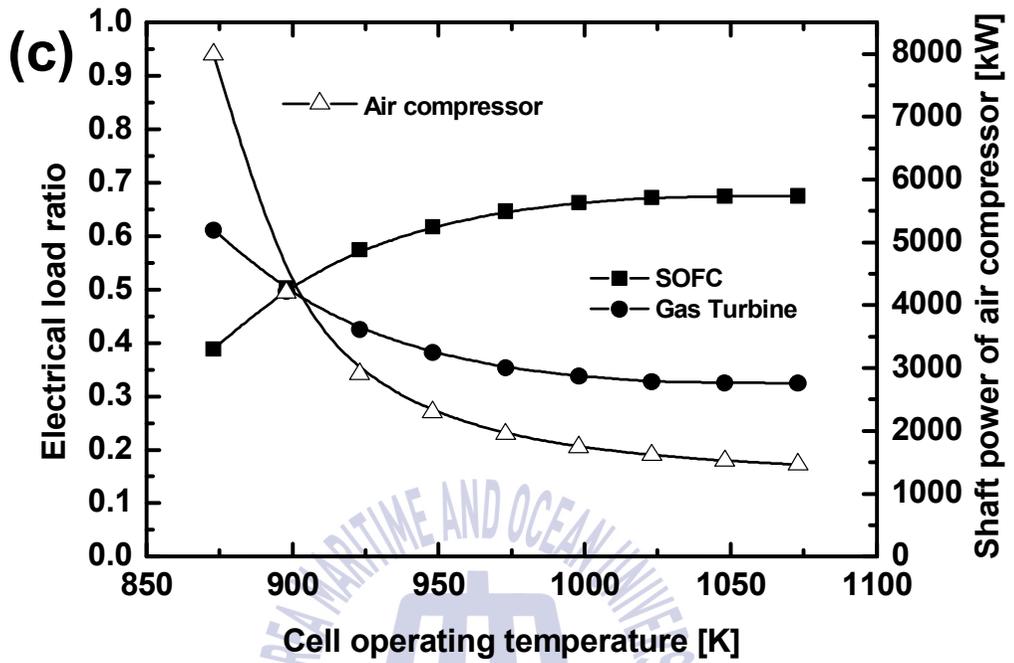


Fig. 4.11 스택 작동온도에 따른 성능 특성

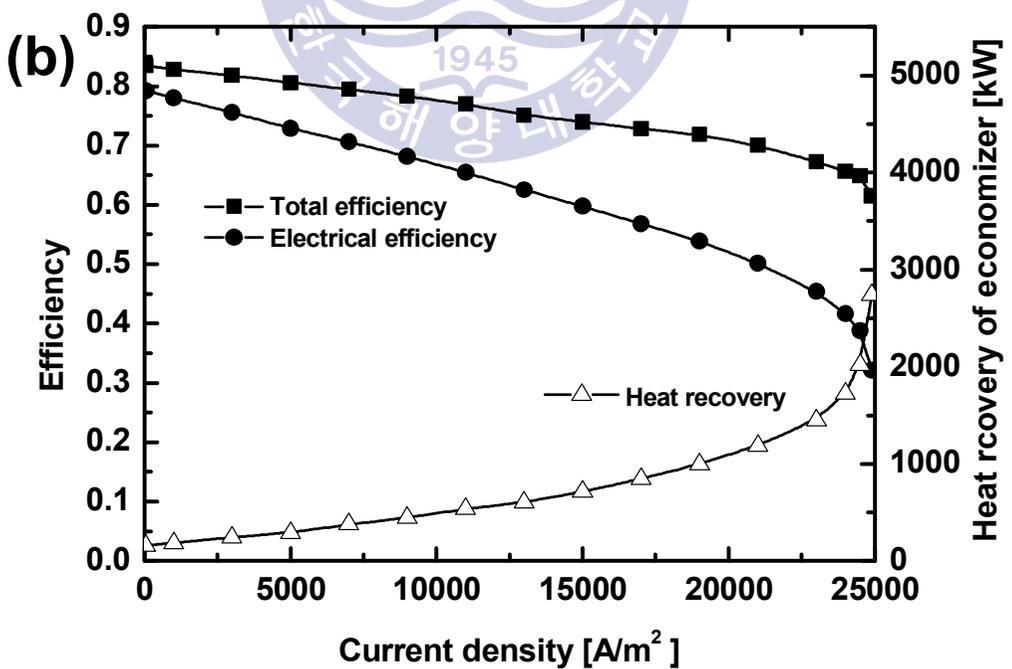
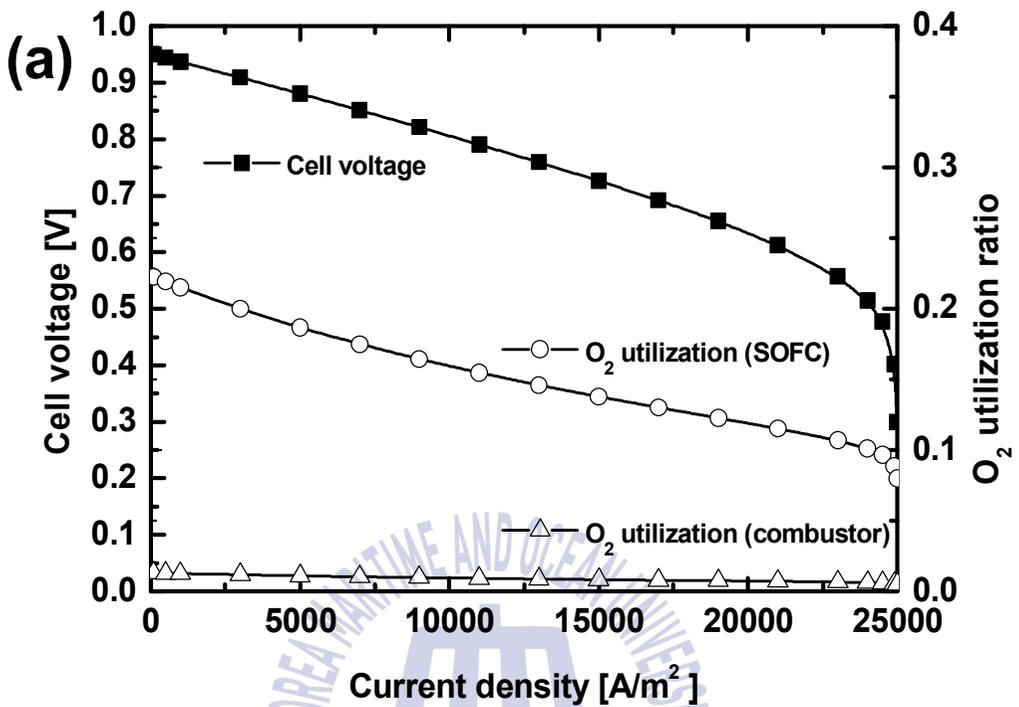
### 4.2.2.3 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

Fig. 4.12는 작동온도=1023 K, 가스터빈 압력비=3인 경우 스택 전류밀도가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.12-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.12-(b)는 시스템의 효율과 이코노마이저에서 회수한 열량을, Fig. 4.12-(c)는 하이브리드 시스템의 전기출력에 대한 스택 및 가스터빈의 부하분담률과 공기압축기의 소요동력을 나타낸 것이다.

Fig. 4.12-(a)로부터 스택 전류밀도가 증가함에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 감소하나, 연소기의 산소이용률은 미세하게 감소하는 것을 알 수 있다. 전류밀도가 증가하는 것은 셀의 반응 단위면적 당 반응량의 증가를 의미하기 때문에 가역 개회로전압에는 큰 변화가 없지만 손실전압이 증가하여 셀 유기전압을 감소를 초래한다. 유기전압의 감소와 스택의 산소이용률이 감소하는 것은 손실전압의 증가로 인해 스택의 발열량이 증가하여 더 많은 냉각공기가 필요하기 때문이다. 전류밀도가 증가하면서 냉각공기량의 증가량보다 미반응된 메탄, 수소 및 일산화탄소의 증가량이 더 크기 때문에 연소기의 산소이용률은 미세하게 감소한다. 이것은 Fig. 4.12-(c)에서 부하분담률, 공기압축기 소요동력으로부터 확인할 수 있다.

Fig. 4.12-(b)로부터 스택 전류밀도가 증가함에 따라 시스템의 전기적 효율과 총 효율은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 전류밀도가 증가하면서 셀 유기전압이 감소하며 공기압축기의 소요동력이 증가하고 평균적으로 효율이 낮은 가스터빈의 부하 분담이 증가하기 때문이다. 그리고 이코노마이저를 통과하는 혼합가스 온도와 양의 증가로 열회수량은 증가하게 된다.

Fig. 4.12-(c)로부터 스택 전류밀도가 증가함에 따라 스택의 부하 분담률은 감소하고, 가스터빈의 부하 분담률은 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 전류밀도의 증가에 따라 스택의 소요 공기량이 증가하여 가스터빈의 출력이 증가하는 만큼 스택에서 출력이 감소하기 때문이다.



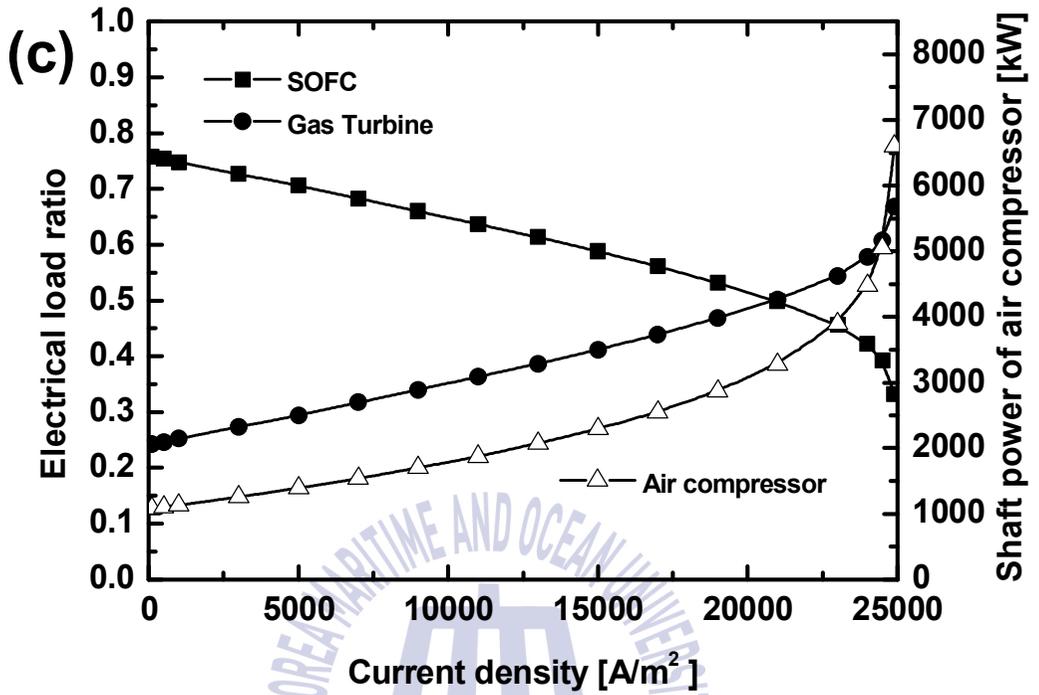


Fig. 4.12 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

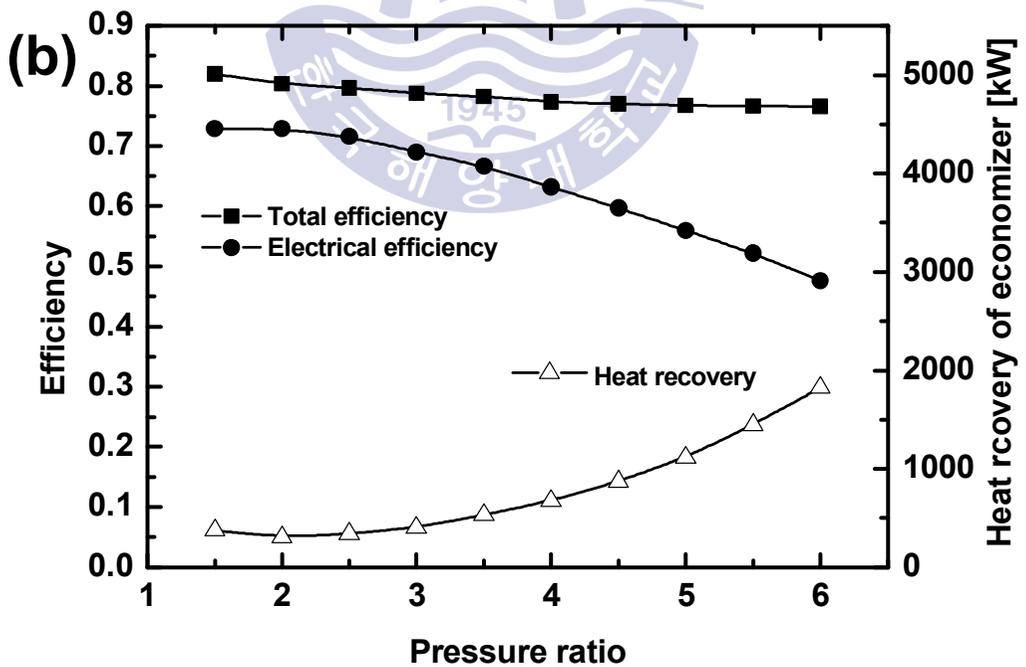
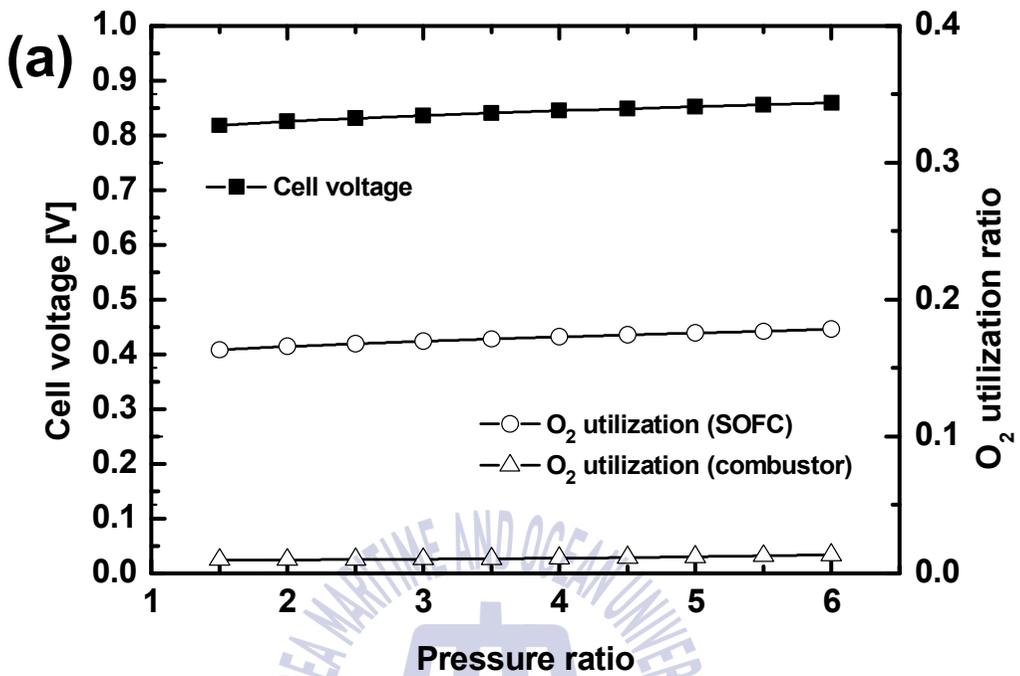
#### 4.2.2.4 가스터빈 압력비에 따른 성능 특성

Fig. 4.13은 스택 작동온도=1023 K, 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>인 경우 가스터빈 압력비가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.13-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.13-(b)는 시스템의 효율과 출력량을 Fig. 4.13-(c)는 하이브리드 시스템의 전기출력에 대한 스택 및 가스터빈의 부하분담률과 공기압축기의 소요동력을 나타낸 것이다.

Fig. 4.13-(a)로부터 가스터빈 압력비가 증가함에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 미세하게 증가하는 것을 알 수가 있다. 셀 유기전압의 증가는 네른스트 손실과 활성화 손실전압이 압력비의 증가와 함께 감소하기 때문이다. 스택의 산소이용률이 증가하는 것은 셀 유기전압의 증가와 더불어 전기화학 반응의 비가역성의 감소로 스택에서 발생하는 열량 감소에 의한 냉각공기량이 감소하기 때문이다. 이것은 Fig. 4.13-(c)에서 부하분담률 및 공기압축기 소요동력으로부터 확인할 수 있다.

Fig. 4.13-(b)로부터 가스터빈 압력비가 증가함에 따라 시스템의 전기적 효율과 총 효율은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 압력비가 증가하면서 셀 유기전압은 증가하나 공기압축기의 소요동력이 급격히 늘어나기 때문이다. 이것은 Fig. 4.13-(c)에서 공기압축기 소요동력으로부터 확인할 수 있다. 또한 압력비가 증가할수록 전기적 효율은 급격히 감소되나, 총 효율은 완만하게 감소한다. 이것은 압력비가 클수록 이코노마이저에서 회수되는 열량이 많아지기 때문이다.

Fig. 4.13-(c)로부터 가스터빈 압력비가 증가함에 따라 가스터빈의 부하 분담률이 증가하고 스택의 부하 분담률은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 가스터빈 축마력 식 (30)에서 압력비가 증가할수록 가스터빈에 공급되는 고온의 가스의 양이 증가하기 때문에 가스터빈의 출력이 증가하고, 가스터빈의 출력이 증가하는 만큼 스택의 출력은 감소하기 때문이다.



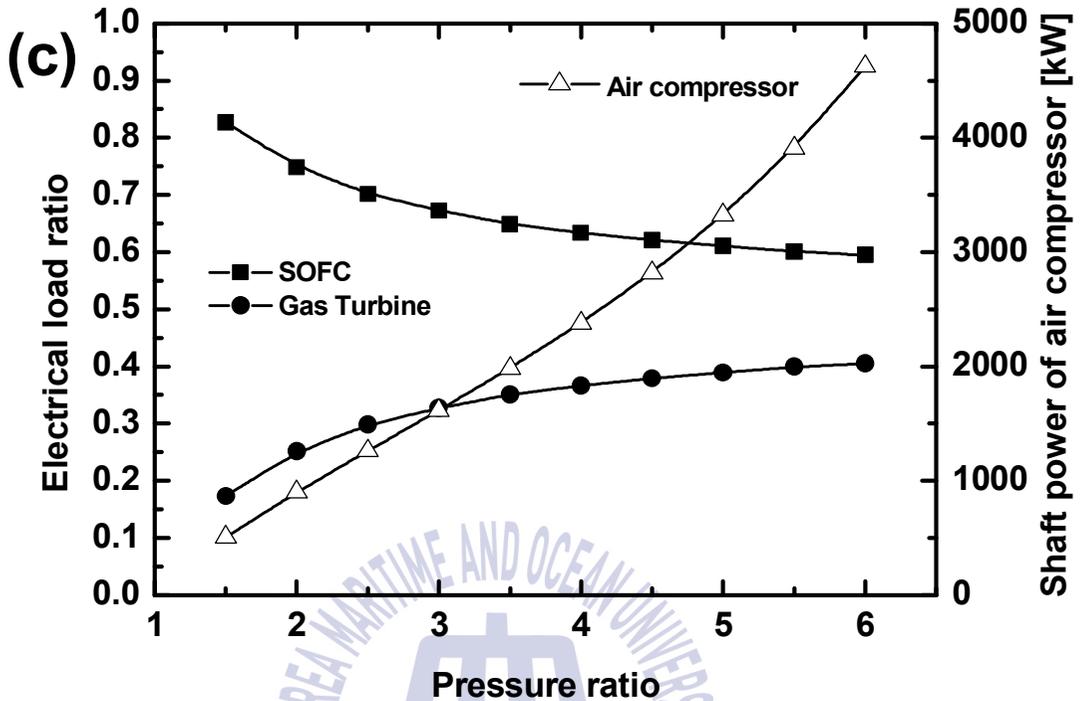


Fig. 4.13 가스터빈 압력비에 따른 성능 특성

#### 4.2.2.5 결과 정리

메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템의 시뮬레이션을 통해 스택 작동온도, 전류밀도, 가스터빈 압력비가 시스템 성능에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템은 Fig. 4.10과 같다.
- (2) 스택 작동온도가 증가할수록 셀 유기전압, 시스템 효율 및 스택 부하분담률은 증가한다.
- (3) 스택 전류밀도가 증가할수록 시스템 효율과 스택 부하분담률은 감소한다.
- (4) 가스터빈 압력비가 증가할수록 시스템의 효율과 스택 부하분담률은 감소한다.

### 4.2.3 SOFC/ST 하이브리드시스템

SOFC/ST 하이브리드시스템은 SOFC/GT 하이브리드시스템과는 달리 상압 하에서 안전한 방식으로 스택과 연소기의 폐열을 사용할 수 있다. 이 폐열을 이용하여 과열증기를 발생시켜 증기터빈을 구동하여 전기를 생산하는 방식이다. 본장에서는 중온형 SOFC/ST(스팀터빈) 하이브리드시스템의 구성 및 성능 특성에 대해 기술하였다.

#### 4.2.3.1 시스템 구성

Fig. 4.14는 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템의 구성도이다. 폐열을 최대한 활용하고 시스템의 안전을 고려하여 가스터빈의 고압이 아닌 상압방식이 가능한 스팀터빈을 복합하였다. 개질방식은 시스템의 효율과 수증기 재활용의 측면에서 외부 수증기 개질방식을 채용하였다. 저장탱크로부터 공급된 메탄가스는 수증기가 농후한 스택 연료극의 토출가스와 소정의 비율로 혼합되고 예열기2에서 가열되어져 개질기로 보내진다. 개질기에서 스택 연료인 수소와 일산화탄소가 생성이 되고, 개질가스에는 이산화탄소, 수증기 및 개질되지 않은 미량의 메탄도 포함된다. 고온의 개질가스는 스택으로 보내지기 전에 개질가스의 냉각과 개질연료의 가열을 위해 예열기2로 보내진다. 공기는 화학반응 산소와 스택 냉각용으로 사용되며, 송풍기와 예열기1을 거쳐 예열되어 스택으로 보내진다. 스택 내의 불균일한 온도분포 형성에 따른 열적피로와 충격을 완화하고 스택 냉각을 고려하여 스택에 공급되는 연료와 공기 온도를 스택 COT-200 K로 하였다. 셀의 연료극에서 수소와 일산화탄소는 공기극과 전해질을 거쳐 온 산소이온과 전기화학 반응으로 수증기와 이산화탄소를 생성하고 전자를 방출한다. 스택에 공급되는 공기는 산소이온으로 변환되고 잉여공기는 비가역과정에서 발생한 열을 흡수하여 토출된다. 스택에서 토출되는 가스는 연소기에서 연소되어 개질기, 예열기1 및 스팀터빈 시스템의 열원으로 사용되고 외부로 배출된다. 스팀터빈 시스템은 랭킨사이클을 기본으로 하여 재열이 없는 1단 재생사이클로 구성하였다. 스팀터빈 시스템은 급수 예열기, 증기 발생기, 증기 과열기로 구성되는 보일러, 스팀터빈, 콘덴서, 냉각시스템 및 급수장치로 구성되어 있다.

본 시스템 성능해석에 사용한 조건들은 Table 4.3과 같으며 시뮬레이션 계산에 사용된 시스템의 모델링 방법은 2, 3장에서 전술한 바와 같다.

4.2.3에서는 시뮬레이션 모델을 사용하여 스택의 작동온도와 전류밀도가 시스템의 성능에 미치는 영향을 통해 시스템의 특성을 분석하였다.

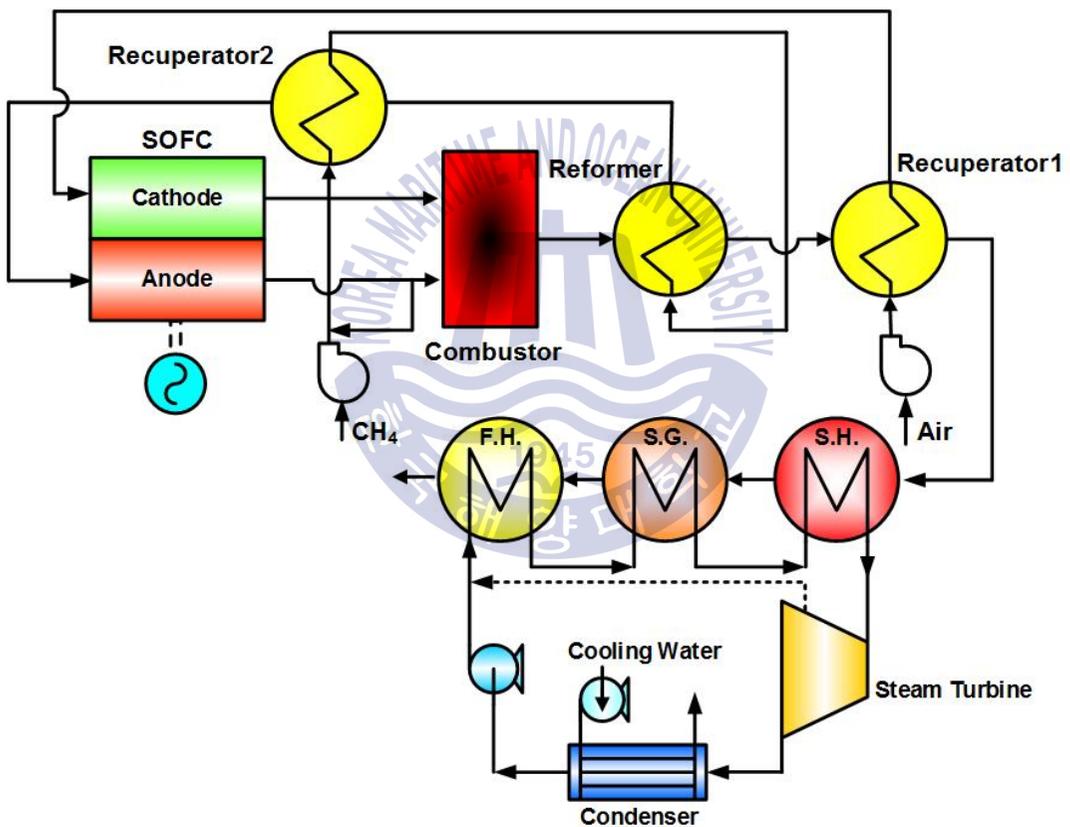


Fig. 4.14 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템 구성도

**Table 4.3** 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템 계산조건

Electrical output (kW)	3000
Anode thickness ( $\mu\text{m}$ )	200
Cathode thickness ( $\mu\text{m}$ )	2000
Electrolyte thickness ( $\mu\text{m}$ )	20
H <sub>2</sub> utilization ratio	0.8
Limiting current density (A/m <sup>2</sup> )	25000
Inverter efficiency (%)	95
Reformer temperature effectiveness (%)	85
Steam carbon ratio	3
Steam turbine inlet pressure (kPa)	300
Steam turbine inlet temperature (K)	428
Steam turbine outlet pressure (kPa)	10
Steam turbine efficiency (%)	80
Water pump efficiency (%)	85
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) (%)	2.1
Recuperator1 pressure drop(gas side) (%)	2
Stack pressure drop(air side) (%)	5
Stack pressure drop(fuel side) (%)	5
Recuperator2 pressure drop(fuel side) (%)	4
Recuperator2 pressure drop(gas side) (%)	4
Combustor pressure drop(air side) (%)	3
Combustor pressure drop(fuel side) (%)	4
Mixer pressure drop (%)	2
Superheater pressure drop(gas side) (%)	3
Steam generator pressure(gas side) (%)	3
Feedwater heater pressure(gas side) (%)	1
Ambient temperature (K)	298.15
Ambient pressure (kPa)	101

#### 4.2.3.2 스택 작동온도에 따른 성능 특성

Fig. 4.15는 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>인 경우 스택 작동온도가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.15-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.15-(b)는 시스템의 효율과 출력량을 나타낸 것이다. 여기에서 스택터빈의 효율은 추가로 공급되는 연료가 없으므로 스택자체 전기적 효율과 스택터빈의 출력을 추가 하였을 때의 전기적 효율을 나타내었다.

Fig. 4.15-(a)로부터 작동온도가 높아짐에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 증가하는 것을 알 수 있다. 셀 유기전압 및 산소이용률의 증가는 4.2.2.2에서 기술한 바와 같이 활성화 손실전압이 작아지는 효과가 크게 작용하기 때문이다.

Fig. 4.15-(b)에서 시스템의 전기적 효율은 스택 작동온도가 높아짐에 따라 함께 상승하는데 이는 셀 유기전압의 증가와 송풍기 소요동력이 감소하기 때문이다.

#### 4.2.3.3 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

Fig. 4.16은 스택 작동온도=1023 K인 경우 스택 전류밀도가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.16-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.16-(b)는 시스템의 효율과 출력량을 나타낸 것이다.

Fig. 4.16-(a)로부터 전류밀도가 높아짐에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 감소하는 것을 알 수 있다. 셀 유기전압 및 산소이용률의 감소는 4.2.2.3에서 기술한 바와 같이 전류밀도의 증가에 따른 활성화, 저항 및 농도 손실전압의 증가와 냉각공기량이 늘어나기 때문이다.

Fig. 4.16-(b)로부터 스택 전류밀도가 증가함에 따라 시스템의 전기적 효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 전류밀도가 증가하면서 셀 유기전압이 감소하며 송풍기의 소요동력이 증가하고 평균적으로 효율이 낮은 스택터빈의 부하 분담이 증가하기 때문이다.

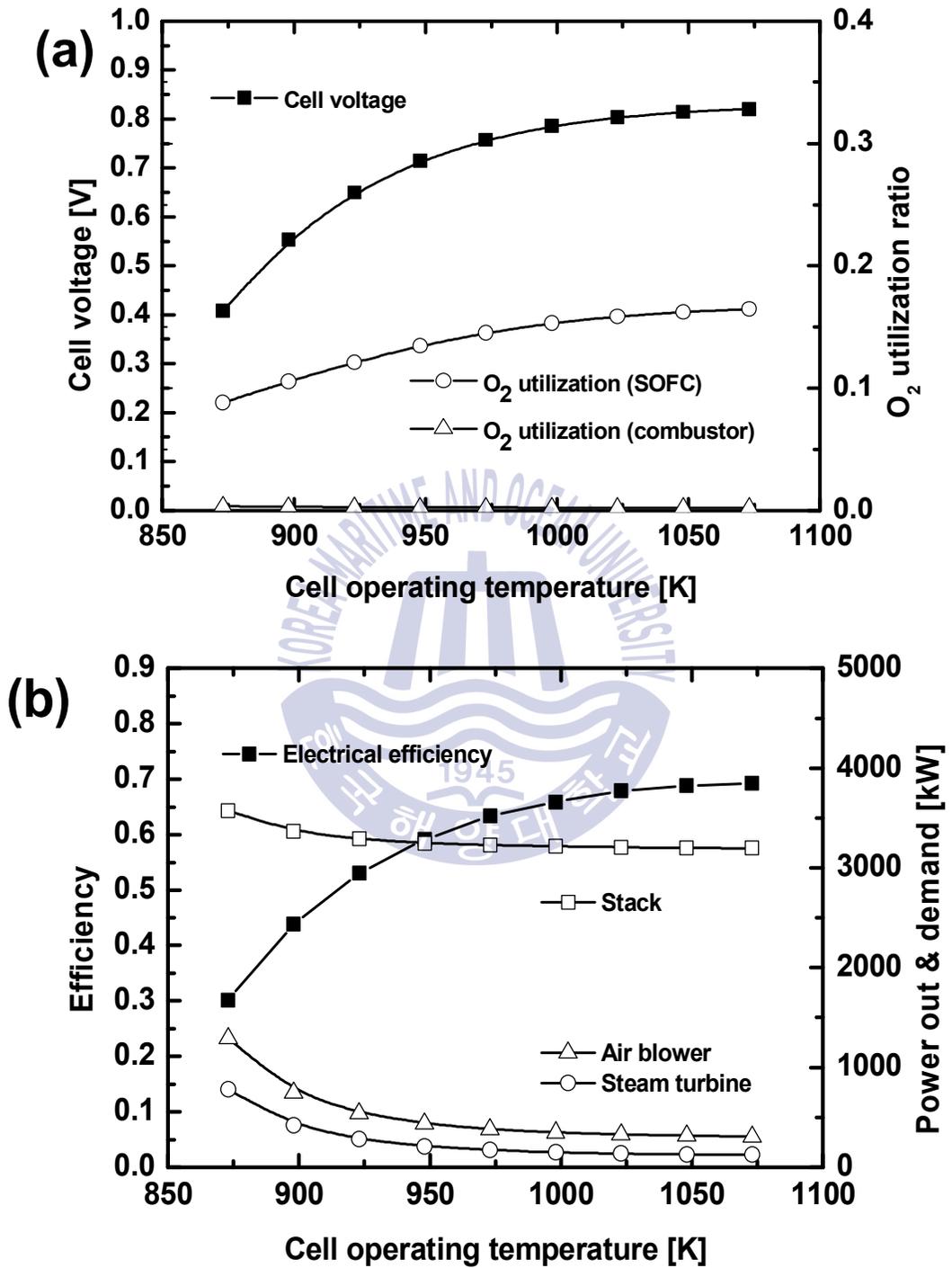


Fig. 4.15 스택 작동온도에 따른 성능 특성

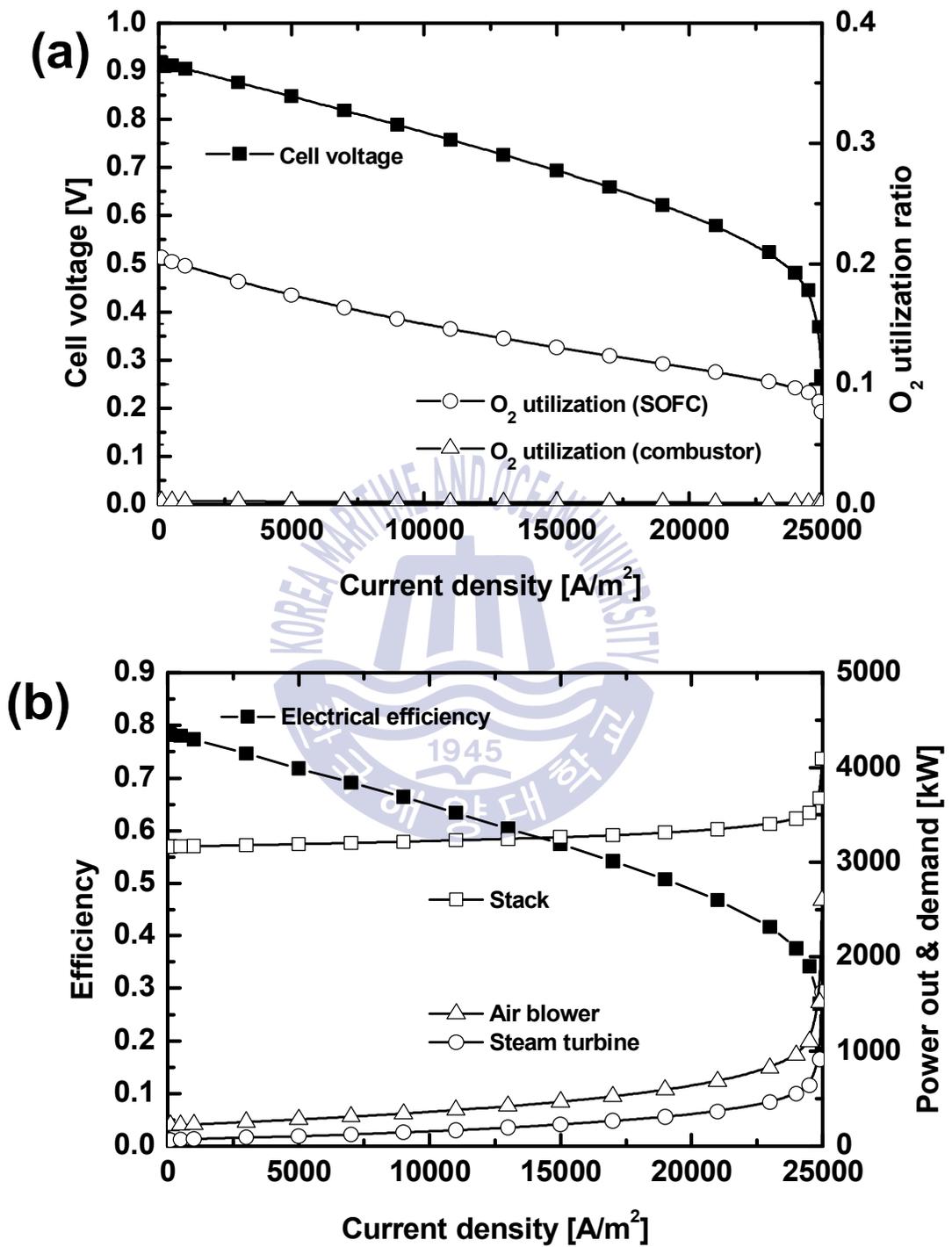


Fig. 4.16 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

#### 4.2.3.4 결과 정리

메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템의 시뮬레이션을 통해 스택 작동온도, 전류밀도가 시스템 성능에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템은 Fig. 4.14와 같다.
- (2) 스택 작동온도가 증가할수록 셀 유기전압, 시스템 효율은 증가한다.
- (3) 스택 전류밀도가 증가할수록 셀 유기전압 및 시스템 효율은 감소한다.



#### 4.2.4 SOFC 단독 및 하이브리드 시스템 전기적 효율 비교

4.2.4에서는 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독 및 하이브리드 시스템의 전기적 효율을 종합하여 비교한다. 비교를 위해 사용한 조건들은 전술한 것과 동일하다. 4.2.4.1은 스택 작동온도, 4.2.4.2는 스택 전류밀도가 시스템의 전기적 효율에 미치는 영향을 조사하여 시스템들을 비교하였다.

##### 4.2.4.1 스택 작동온도에 따른 시스템 효율 비교

Fig. 4.17은 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>, S/C=3, 수소이용률=0.8인 경우 스택 작동온도가 시스템 전기적 효율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 모든 시스템은 스택 작동온도가 증가할수록 전기적 효율이 상승하는 것을 알 수 있다. 그림에서 GT 하이브리드시스템은 873 K이하에서, ST 하이브리드시스템은 973 K이하에서 단독시스템보다 전기적 효율이 더 낮다. 이것은 2.2.2.2에서 전술한 것과 같이 메탄 연료의 높은 개질률을 얻기 위해서는 1000 K 이상의 큰 열원이 필요하기 때문에 낮은 스택 작동온도 영역에서는 스택 및 연소기에서 발생하는 열원이 개질기에서 거의 사용되어 하이브리드시스템 구동에 사용될 열원이 부족하였고, 하이브리드시스템의 구동을 위한 부가적인 동력의 소모가 컸기 때문이다. 또한 높은 스택 작동온도영역에서도 GT 하이브리드시스템은 최대 6.8%, ST 하이브리드시스템은 최대 1%의 효율 향상을 보였다. 선박 특성과 시스템 안정성, 공간성 및 초기 투자비 등 다양한 측면을 고려할 때 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC 시스템에서는 하이브리드시스템이 바람직하지 못한 것을 알 수 있다.

##### 4.2.4.2 스택 전류밀도에 따른 시스템 효율 특성

Fig. 4.18은 스택 작동온도=1023 K, S/C=3, 수소이용률=0.8인 경우 스택 전류밀도가 시스템 전기적 효율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 주어진 조건하에서 G/T 하이브리드시스템, ST 하이브리드시스템, 단독시스템 순으로 전기적 효율이 높으며, 단독시스템의 전기적 효율에 비해 G/T 하이브리드시스템은 최대 9.6%, S/T 하이브리드시스템은 최대 4.6% 높았다. 전술한 바와 같이 모든 시스템은 스택 전류밀도가 증가할수록 전기적 효율이 감소하는 것을 알 수 있다.

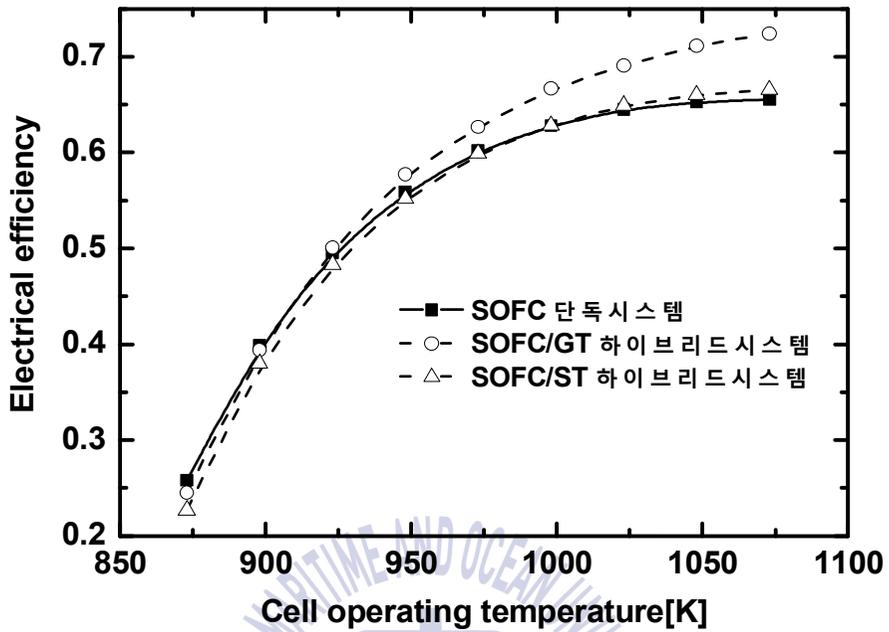


Fig. 4.17 스택 작동온도에 따른 시스템 전기적 효율

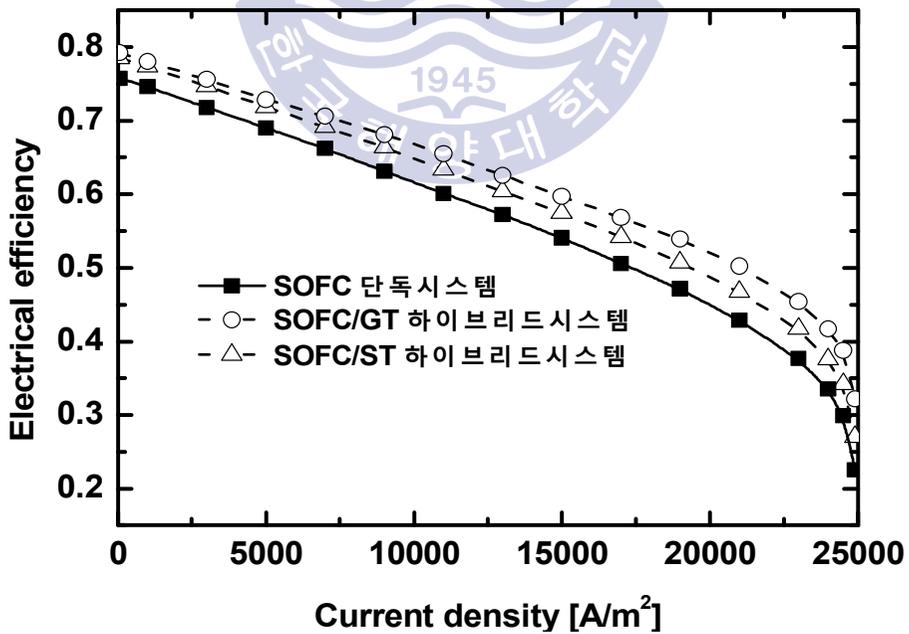


Fig. 4.18 스택 전류밀도에 따른 시스템 전기적 효율

### 4.3 메탄올 수증기 개질 기반 중온형 SOFC 시스템

#### 4.3.1 SOFC 단독시스템

##### 4.3.1.1 시스템 구성

Fig. 4.19는 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템의 구성도이다. 본 시스템은 수증기의 효율적 확보를 고려하여 재순환 수증기 외부개질방식을 채택하였다. 증발기로 공급된 메탄올은 기화하여 다량의 수증기를 함유하고 있는 연료극 출구가스와 혼합기에서 혼합되어 개질기와 예열기2를 거쳐 연료극으로 송출된다. 고온의 연료극 출구가스는 연료극에 보내지는 연료의 예열원으로 사용되고 소정의 비율(S/C)에 따라 개질기 및 연소기로 보내진다. 전기화학 반응용 산소는 공기의 형태로 송풍기와 예열기1을 거쳐 공기극으로 송출된다. 연료극에 공급된 수소와 일산화탄소는 공기극과 전해질을 통과한 산소 음이온과 전기화학 반응하여 수증기와 이산화탄소를 생성하고 전자를 방출하게 된다. 연료극 출구의 미반응 가스는 공기극의 출구가스와 연소기에서 혼합 연소되며, 고온의 연소가스는 공기에열용 예열기1, 개질기, 이코노마이저 및 메탄올 증발기의 열원으로 재사용되고 외부로 토출된다. 스택 내의 불균일한 온도분포 형성에 따른 열적피로와 충격을 완화하고 스택 냉각을 고려하여 스택에 공급되는 연료와 공기 온도를 스택 COT-200 K로 하였다.

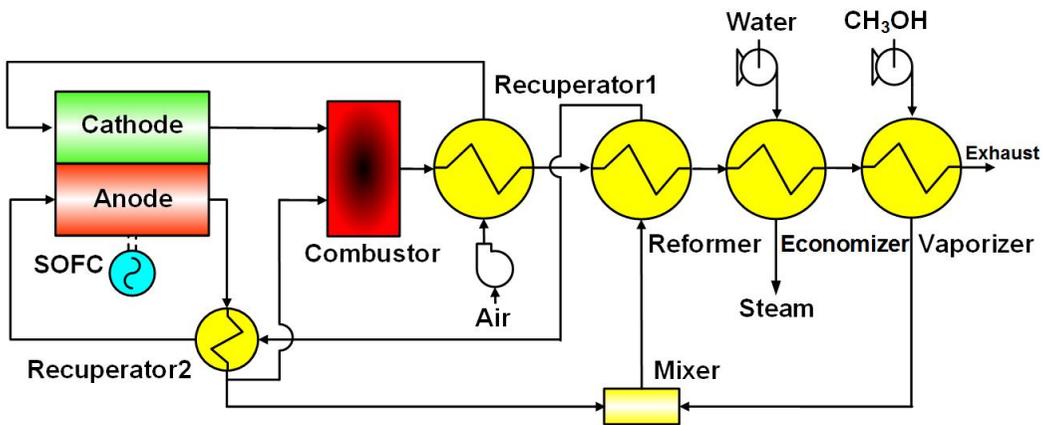


Fig. 4.19 중온형 SOFC 단독시스템 구성도

본 시스템 성능해석에 사용한 조건들은 **Table 4.4**와 같으며 시뮬레이션 계산에 사용된 시스템의 모델링 방법은 2, 3장에서 전술한 바와 같다.

4.3.1에서는 시뮬레이션 모델을 사용하여 스택의 작동온도, 전류밀도, 개질기의 S/C, 스택의 수소이용률이 시스템의 성능에 미치는 영향을 조사하여 시스템의 특성을 분석하였다.



**Table 4.4** 중온형 SOFC 단독시스템 계산조건

Electrical output (kW)	3000
Anode thickness ( $\mu\text{m}$ )	200
Cathode thickness ( $\mu\text{m}$ )	2000
Electrolyte thickness ( $\mu\text{m}$ )	20
Limiting current density (A/m <sup>2</sup> )	25000
Inverter efficiency (%)	95
Reformer temperature effectiveness (%)	85
Economizer gas outlet temperature (K)	473.15
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) (%)	2
Reformer pressure drop(fuel side) (%)	2
Recuperator1 pressure drop(air side) (%)	2
Recuperator1 pressure drop(gas side) (%)	3
Stack pressure drop(air side) (%)	6
Stack pressure drop(fuel side) (%)	4
Recuperator2 pressure drop(fuel side) (%)	1
Recuperator2 pressure drop(gas side) (%)	1
Combustor pressure drop(air side) (%)	3
Combustor pressure drop(fuel side) (%)	2
Mixer pressure drop (%)	2
Economizer pressure drop(gas side) (%)	2
Vaporizer pressure drop(fuel side) (%)	0.5
Vaporizer pressure drop(gas side) (%)	1
Ambient temperature (K)	298.15
Ambient pressure (kPa)	101

#### 4.3.1.2 스택 작동온도에 따른 성능 특성

Fig. 4.20은 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>, S/C=2, 수소이용률=80%인 경우 스택 작동온도에 따른 시스템의 특성을 나타낸 것으로 Fig. 4.20-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을 Fig. 4.20-(b)는 시스템 전기적 효율, 열회수 및 총효율을 나타낸 것이다.

Fig. 4.20-(a)로부터 스택 작동온도가 증가함에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 증가하는 것을 알 수 있다. 셀 유기전압의 증가는 작동온도 상승에 따른 개회로전압 감소와 저항 손실전압의 증가에도 불구하고 활성화 손실전압이 감소하는 효과가 더 크기 때문이며, 작동온도 1000 K 이상시 저항 손실전압의 효과가 커져 셀 유기전압이 더 이상 증가하지 않는다. 산소이용률 또한 활성화 손실전압의 감소로 열 발생이 줄어들어 소요되는 냉각공기량이 감소하기 때문이며 작동온도 1000 K 이상시 저항 손실전압의 효과가 커지면서 산소이용률은 더 이상 증가하지 않는다. Fig. 4.20-(b)에서 냉각 공기량에 따른 소요동력의 변화에서도 이 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 4.20-(b)로부터 스택 작동온도가 증가함에 따라 시스템의 전기적 효율과 열회수를 포함한 총 효율이 증가한다. 이것은 셀 유기전압의 증가와 송풍기 소요동력 감소로 인하여 효율이 증가하기 때문이다. 또한 스택 작동온도가 낮을수록 전기적 효율과 총효율의 차가 커지는 것을 알 수 있는데 이것은 이코노마이저에서 회수되는 열량이 커지기 때문이다.

#### 4.3.1.3 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

Fig. 4.21은 스택 작동온도=1023 K, S/C=2, 수소이용률=80%인 경우 전류밀도에 따른 시스템의 특성을 나타낸 것이다.

Fig. 4.21-(a)로부터 전류밀도가 증가함에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 전류밀도가 증가할수록 활성화, 저항, 농도 손실전압이 증가하여 셀 유기전압이 감소하였기 때문이며, 손실전압이 증가할수록 셀의 발열량의 증가로 냉각용 공기량이 증가하기 때문이다. 이것은 Fig. 4.21-(b)에서 전류밀도 증가에 따른 동력이 증가하는 것에서도 이 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 4.21-(b)로부터 전류밀도가 증가함에 따라 셀 유기전압이 감소하고, 소요동력이 증가하여 전기적 효율과 총 효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 전류밀도가 증가할수록 전기적 효율과 총효율의 차가 커지는데 이것은 이코노마이저에서 회수되는 열량이 커지기 때문이다.

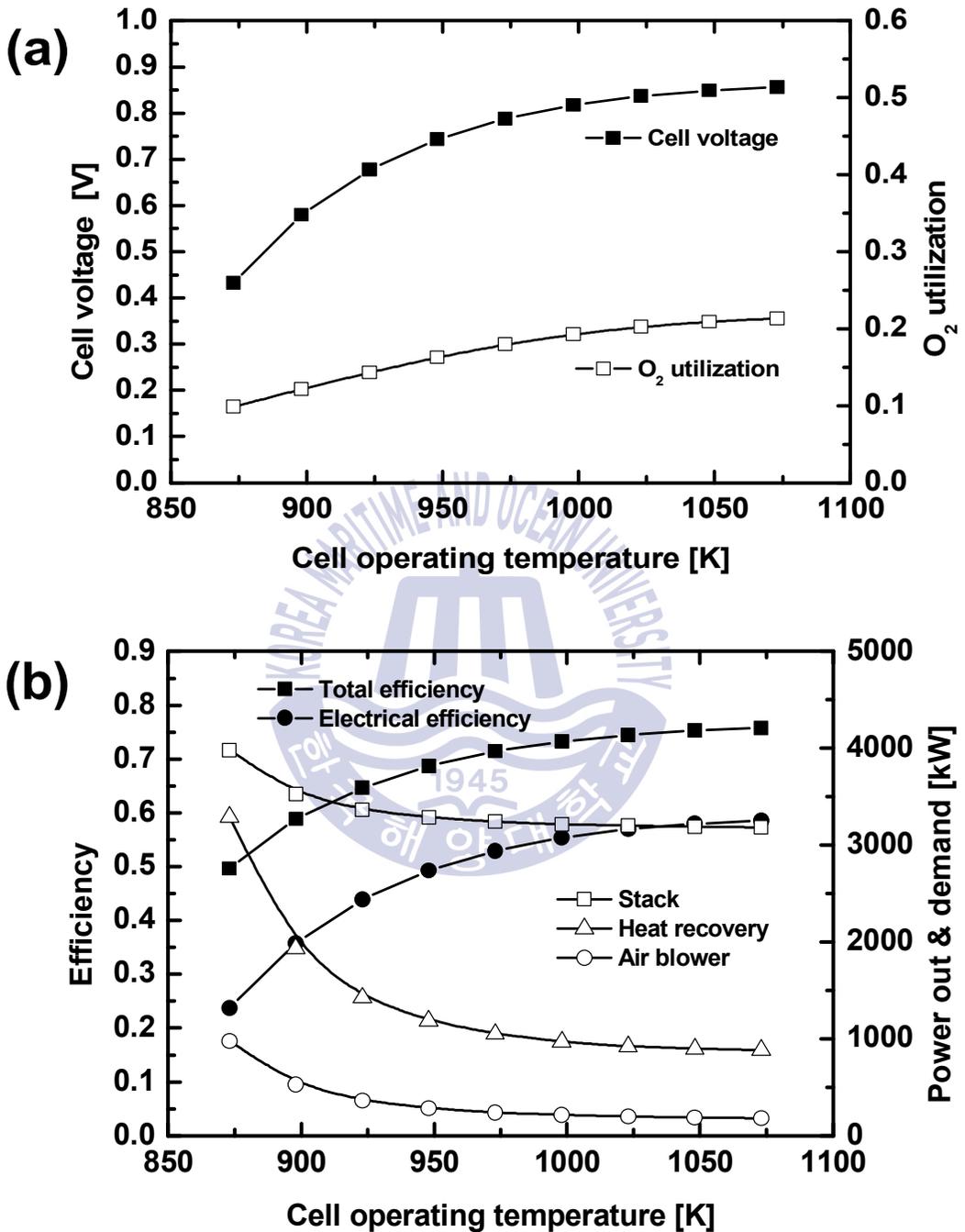


Fig. 4.20 스택 작동온도에 따른 성능 특성

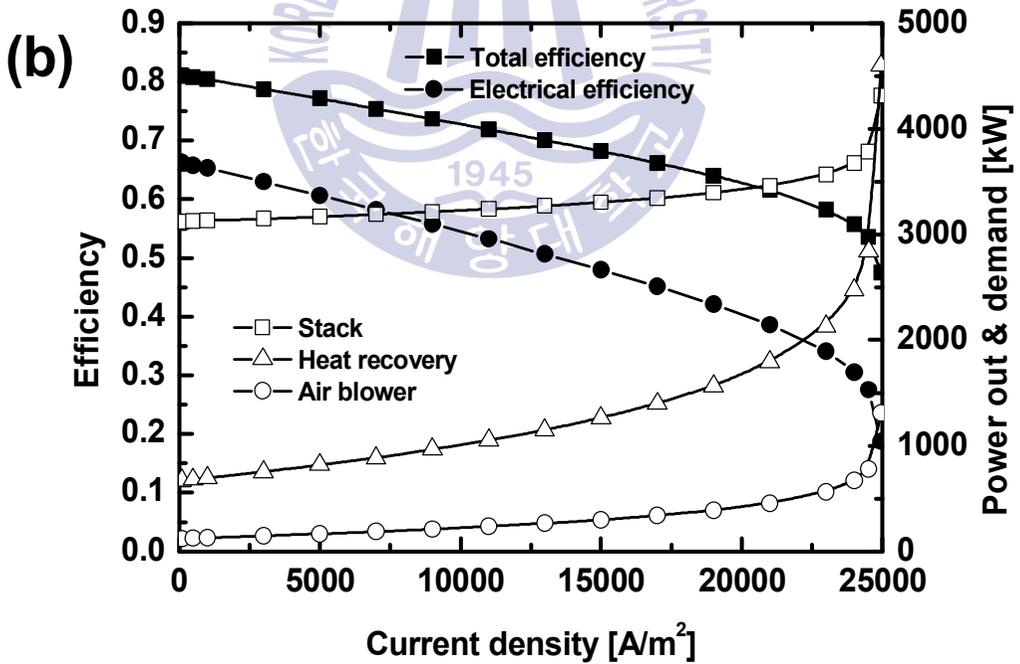
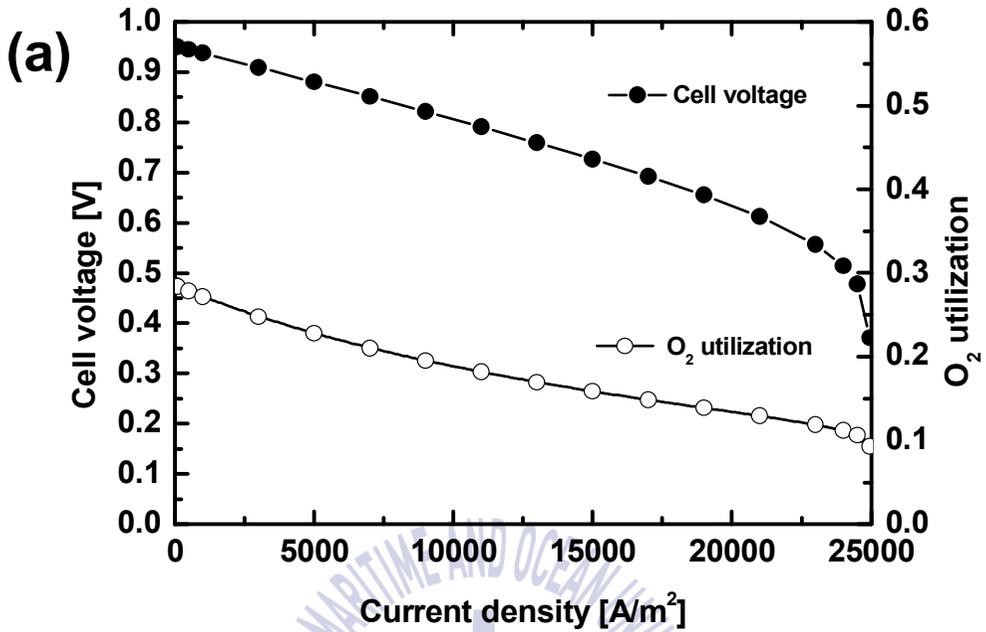


Fig. 4.21 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

#### 4.3.1.4 개질기 S/C에 따른 성능 특성

Fig. 4.22는 스택 작동온도=1023 K, 전류밀도=8,000 A/m<sup>2</sup>, 수소이용률=80%인 경우 S/C 따른 시스템의 특성을 나타낸 것이다.

Fig. 4.22-(a)로부터 S/C가 커짐에 따라 셀 유기전압은 감소하나 산소이용률은 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 S/C의 증가로 스택 연료극 출구가스의 재순환율이 높아져 셀 연료극 입구 가스조성에서 수소, 일산화탄소뿐만 아니라 메탄올, 수증기, 이산화탄소의 농도도 늘어나 네른스트 손실을 증가시키고 셀 유기전압을 감소시켰기 때문이다. S/C가 증가할수록 COT=200 K로 연료극에 공급되는 혼합가스의 질량이 커지고, 그로인한 스택의 냉각작용이 향상되어 공기극에서 소요되는 냉각공기량이 줄어들어 산소이용률은 증가한다.

Fig. 4.22-(b)로부터 S/C가 전기적 효율과 총효율에 미치는 영향이 미미하다는 것을 알 수 있다. 하지만 낮은 S/C 영역에서는 전기적 효율은 낮지만, 총효율은 높는데 이것은 낮은 S/C 영역에서는 개질을 위한 수증기량이 부족하여 전이반응이 감소하고, 스택의 연료로 사용되는 일산화탄소의 증가량보다 수소의 감소량이 더 크게 되고, 연료극 출구의 혼합가스의 재순환율이 감소하기 때문에 연소기에 공급되는 미반응 연료량의 증가로 열회수량이 늘어나 총효율이 증가되는 것을 알 수 있다.

#### 4.3.1.5 스택 수소이용률에 따른 성능 특성

Fig. 4.23은 스택 작동온도=1023 K, 전류밀도=8,000 A/m<sup>2</sup>, S/C=2 경우 수소이용률에 따른 시스템의 특성을 나타낸 것이다.

Fig. 4.23-(a)로부터 수소이용률이 증가함에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2.1.5에서 전술한바와 같다.

Fig. 4.23-(b)로부터 수소이용률이 높을수록 셀 유기전압이 감소하나 전기적 효율은 증가하고 총효율은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2.1.5에서 전술한바와 같다

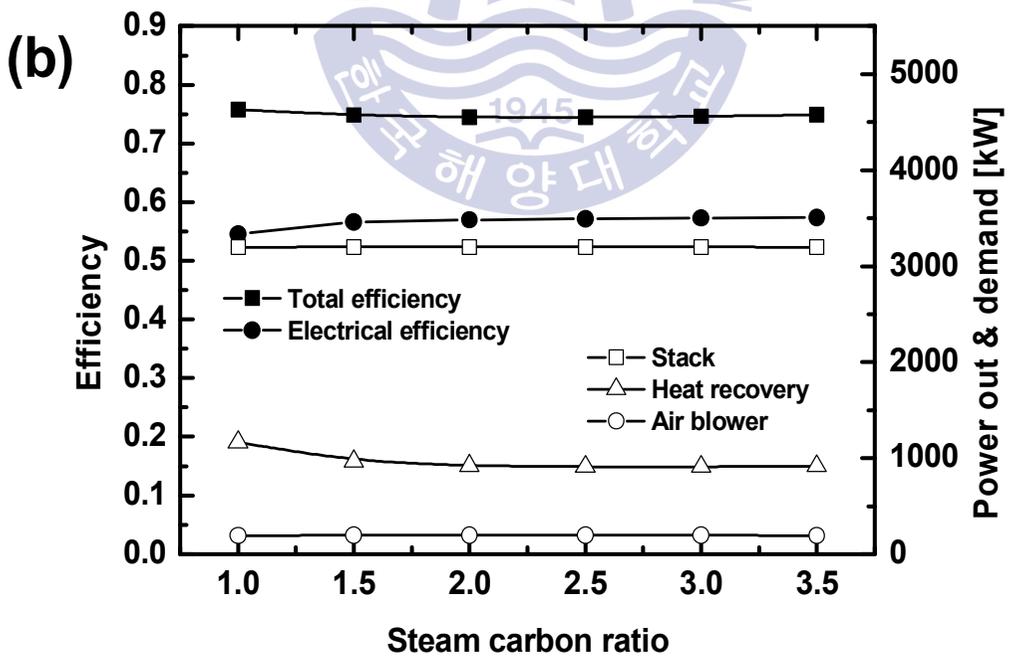
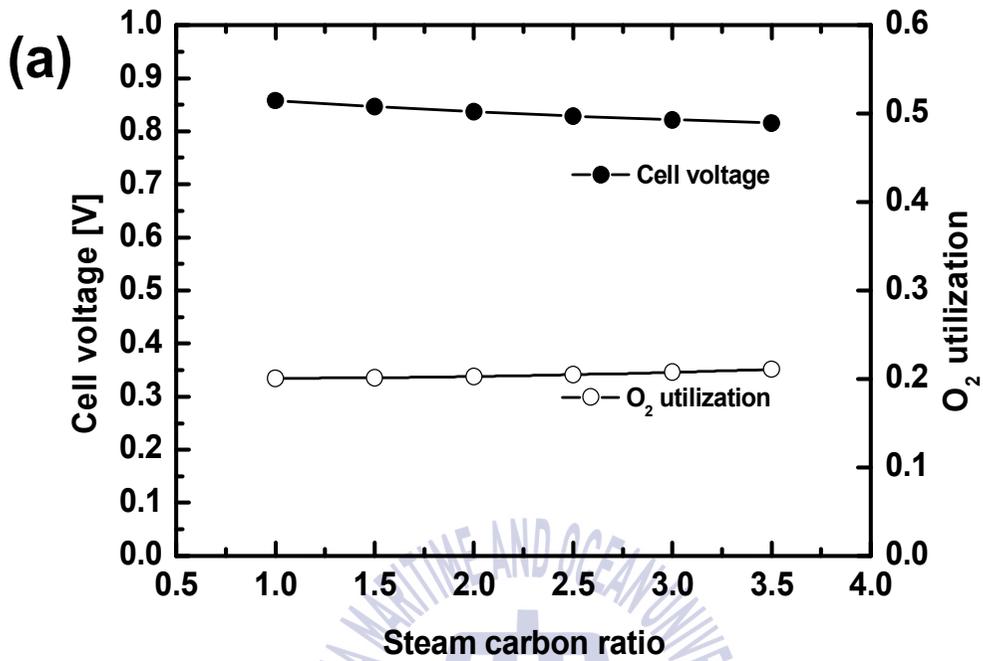


Fig. 4.22 개질기 S/C에 따른 성능 특성

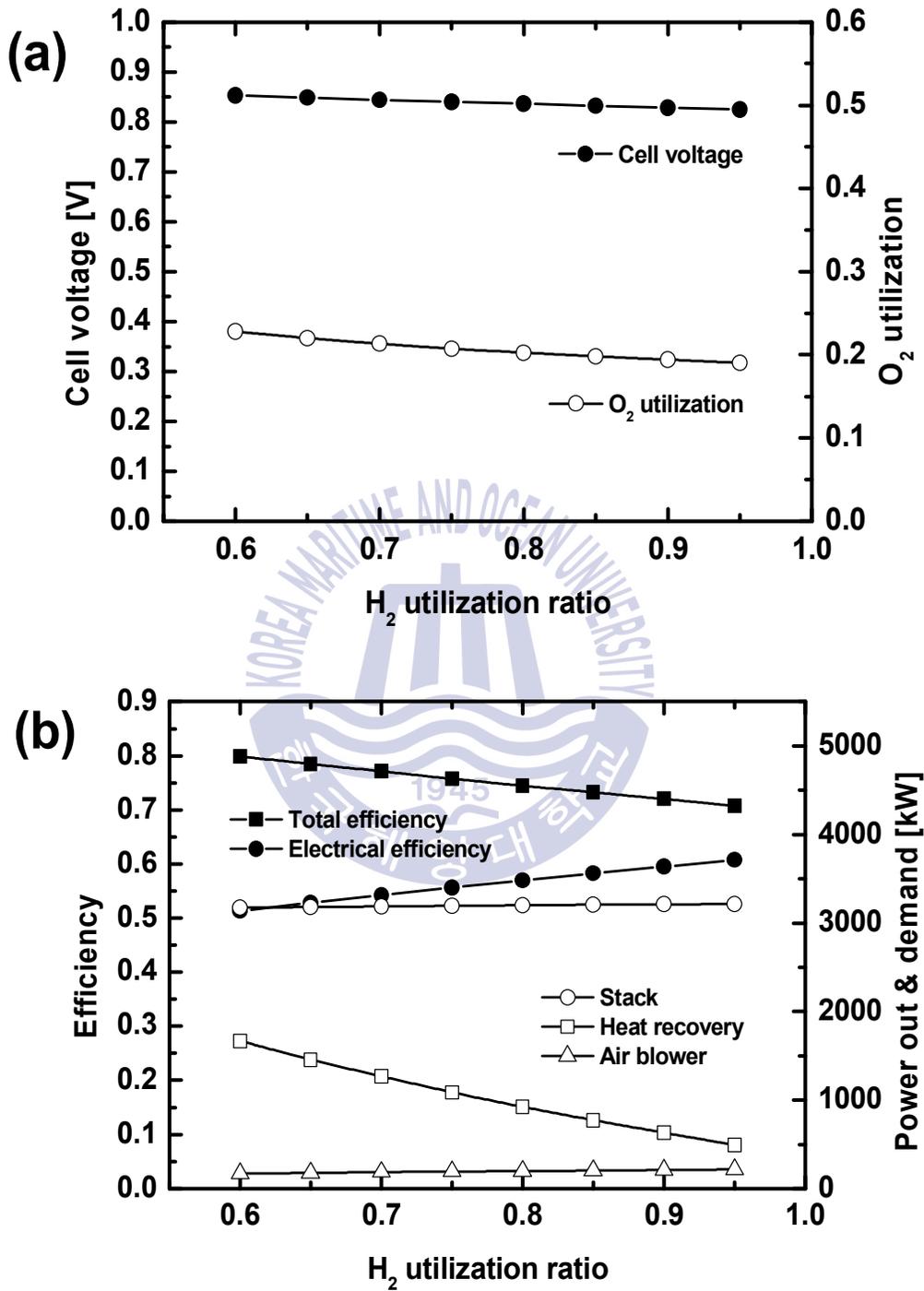
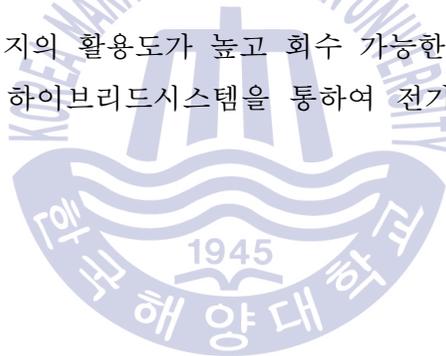


Fig. 4.23 스택 수소이용률에 따른 성능 특성

#### 4.3.1.5 결과 정리

메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템의 시뮬레이션을 통해 스택 작동온도, 전류밀도, 개질기 S/C, 스택 수소이용률이 시스템 성능에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템은 Fig. 4.19와 같다.
- (2) 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템의 성능특성은 4.2.1의 메탄의 경우와 정성적으로 거의 동일한 변화 경향을 보여준다.
- (3) 시스템 전기적효율과 총효율은 메탄의 경우와 비교하여 메탄올 연료의 개질 특성에 따라 약간 낮게 나타난다.
- (4) 메탄올의 경우 열에너지의 활용도가 높고 회수 가능한 열량이 크기 때문에 가스 또는 스팀터빈을 복합한 하이브리드시스템을 통하여 전기적 효율의 개선 가능성이 높다.



### 4.3.2 SOFC/GT 하이브리드시스템

#### 4.3.2.1 시스템 구성

Fig. 4.24는 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템의 구성도이다. 증발기로 공급된 메탄올은 기화하여 다량의 수증기를 함유하고 있는 연료극 출구가스와 혼합기에서 혼합되어 개질기와 예열기2를 거쳐 연료극으로 송출된다. 고온의 연료극 출가스는 연료극에 보내지는 연료의 예열원으로 사용되고 소정의 비율(S/C)에 따라 개질기 및 연소기로 보내진다. 전기화학 반응용 산소는 공기의 형태로 압축기와 예열기1을 거쳐 공기극으로 송출된다. 연료극에 공급된 수소와 일산화탄소는 공기극과 전해질을 통한 산소 음이온과 전기화학 반응하여 수증기와 이산화탄소를 생성하고 전자를 방출하게 된다. 연료극 출구의 미반응 가스는 공기극의 출가스와 연소기에서 혼합 연소되며, 고온의 연소가스는 가스터빈, 공기에열용 예열기1, 개질기, 이코노마이저 및 메탄올 증발기의 열원으로 재사용되고 외부로 토출된다. 스택 내의 불균일한 온도분포 형성에 따른 열적피로와 충격을 완화하고 스택 냉각을 고려하여 스택에 공급되는 연료와 공기 온도를 스택 COT-200 K로 하였다.

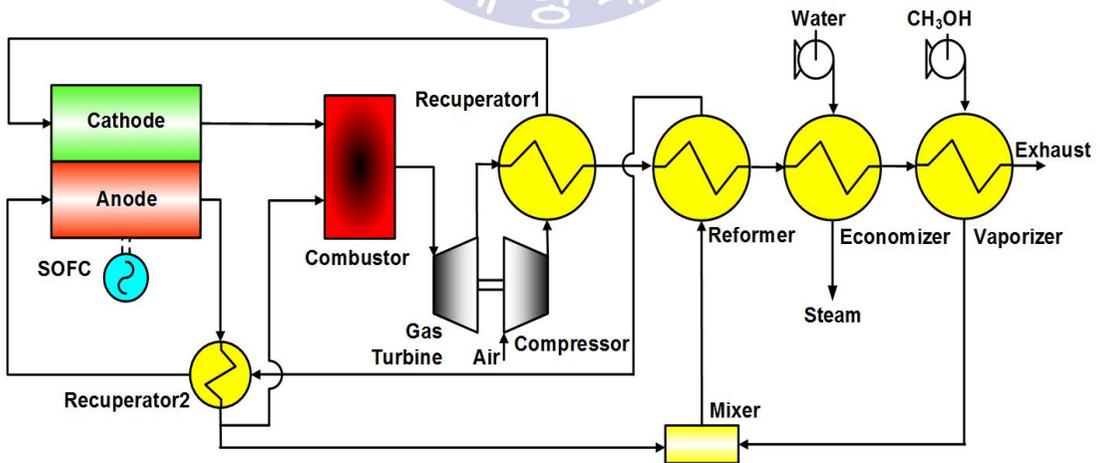


Fig. 4.24 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템 구성도

본 시스템 성능해석에 사용한 조건들은 **Table 4.5**와 같으며 시뮬레이션 계산에 사용된 시스템의 모델링 방법은 2, 3장에서 전술한 바와 같다.

4.3.2에서는 시뮬레이션 모델을 사용하여 스택의 작동온도와 전류밀도, 가스터빈의 압력비가 시스템의 성능에 미치는 영향을 조사하여 시스템의 특성을 분석하였다.



**Table 4.5** 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템 계산조건

Electrical output (kW)	3000
Anode thickness ( $\mu\text{m}$ )	200
Cathode thickness ( $\mu\text{m}$ )	2000
Electrolyte thickness ( $\mu\text{m}$ )	20
H <sub>2</sub> utilization ratio	0.8
Limiting current density (A/m <sup>2</sup> )	25000
Inverter efficiency (%)	95
Reformer temperature effectiveness (%)	85
Steam carbon ratio	3
Economizer gas outlet temperature (K)	473.15
Steam pressure (kPa)	300
Air compressor adiabatic efficiency (%)	75
Gas turbine adiabatic efficiency (%)	82
Gas turbine mechanical efficiency (%)	93
Generator efficiency (%)	97
Converter 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) (%)	6
Recuperator1 pressure drop(gas side) (%)	3
Stack pressure drop(air side) (%)	6
Stack pressure drop(fuel side) (%)	2
Recuperator2 pressure drop(fuel side) (%)	2
Recuperator2 pressure drop(gas side) (%)	2
Combustor pressure drop(air side) (%)	4
Combustor pressure drop(fuel side) (%)	4
Gas turbine pressure drop (%)	8
Mixer pressure drop (%)	1
Economizer pressure drop(gas side) (%)	4
Ambient temperature (K)	298.15
Ambient pressure (kPa)	101

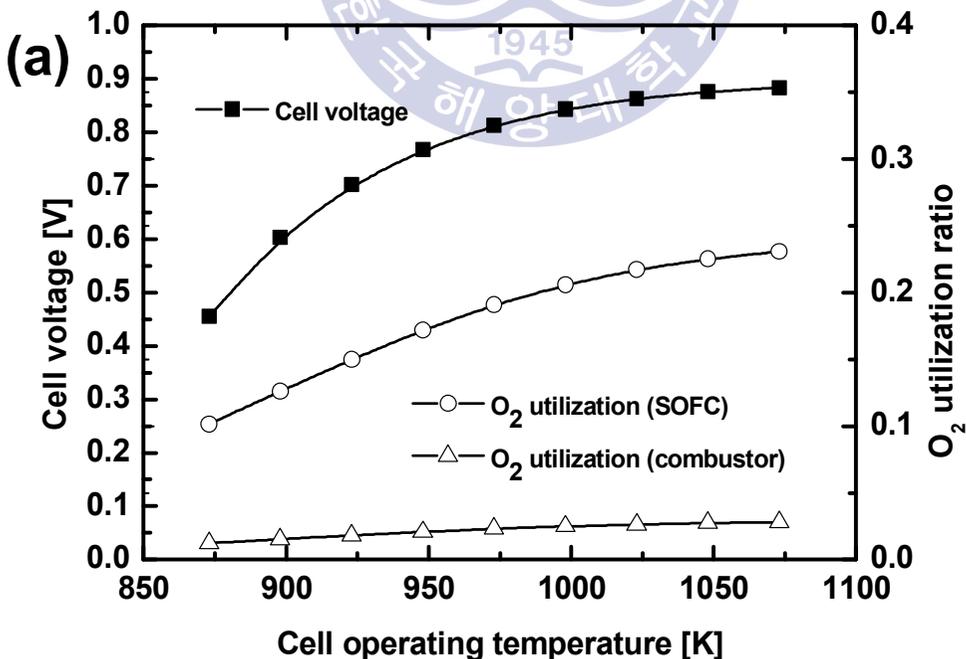
### 4.3.2.2 스택 작동온도에 따른 성능 특성

Fig. 4.25는 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>, 가스터빈 압력비=3인 경우 스택 작동온도가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.25-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.25-(b)는 시스템의 효율과 이코노마이저에서 회수한 열량, Fig. 4.25-(c)는 하이브리드 시스템의 전기출력에 대한 스택 및 가스터빈의 부하분담률과 공기압축기의 소요동력을 나타낸 것이다.

Fig. 4.25-(a)로부터 스택 작동온도가 증가할수록 셀 유기전압 및 스택의 산소이용률은 증가하나 연소기의 산소이용률은 스택 작동온도에 거의 영향을 받지 않는다. 이것은 4.2.2.2에서 전술한바와 같다.

Fig. 4.25-(b)로부터 스택 작동온도가 증가할수록 시스템의 전기적 효율과 총효율은 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 총 효율은 전기적 효율과 유사한 경향을 보이나, 스택 작동온도에 대한 증가율은 이코노마이저에서의 열회수량의 감소에 따라 전기적 효율보다 작아진다. 이것은 4.2.2.2에서 전술한바와 같다.

Fig. 4.25-(c)로부터 스택 작동온도의 증가에 따라 스택의 부하 분담률은 증가하고, 가스터빈의 부하 분담률은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2.2.2에서 전술한바와 같다.



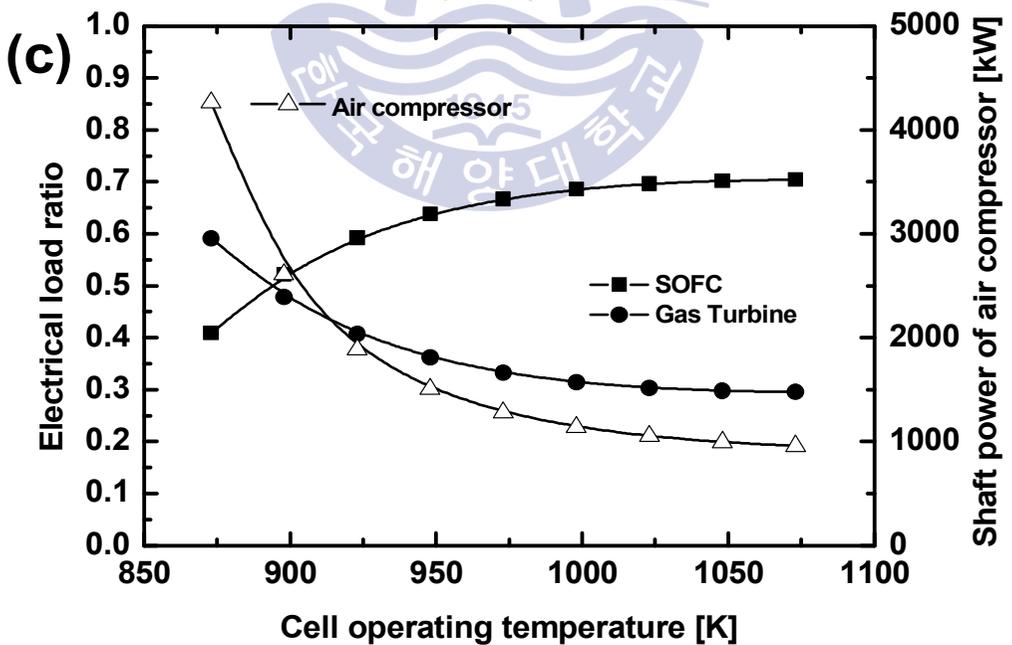
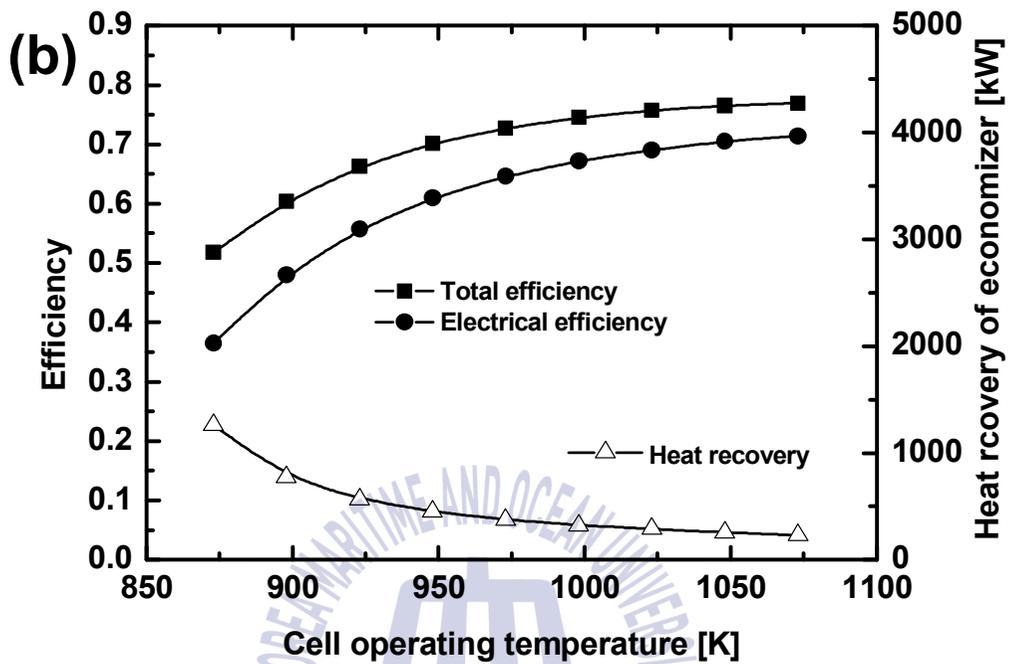


Fig. 4.25 스택 작동온도에 따른 성능 특성

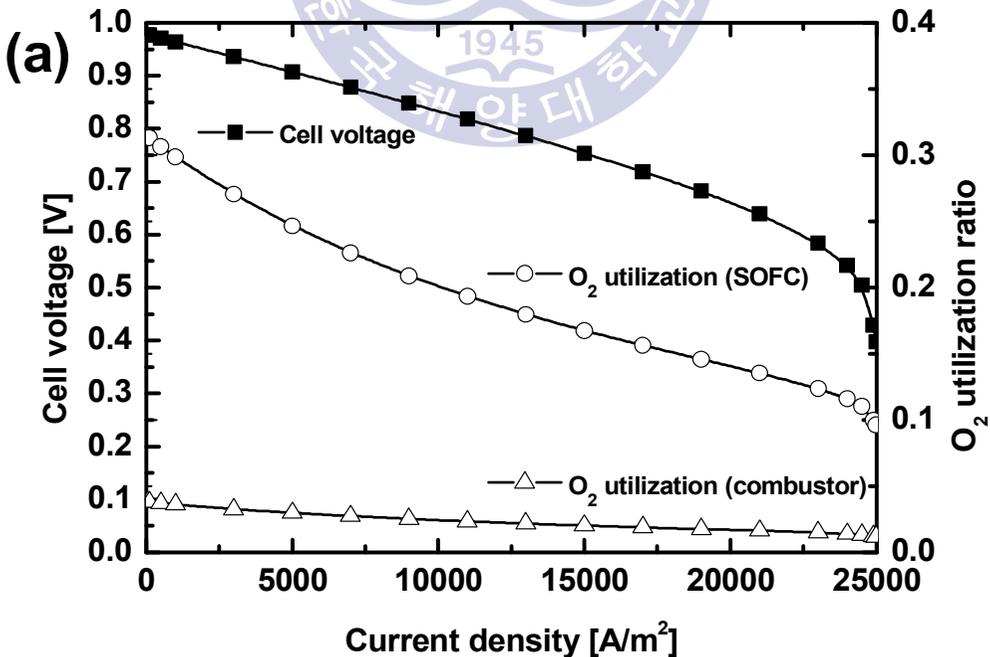
### 4.3.2.3 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

Fig. 4.26은 작동온도=1023 K, 가스터빈 압력비=3인 경우 스택 전류밀도가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.26-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.26-(b)는 시스템의 효율과 이코노마이저에서 회수한 열량을, Fig. 4.26-(c)는 하이브리드 시스템의 전기출력에 대한 스택 및 가스터빈의 부하분담률과 공기압축기의 소요동력을 나타낸 것이다.

Fig. 4.26-(a)로부터 스택 전류밀도가 증가함에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 감소하며, 연소기의 산소이용률도 미세하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2.2.3에서 전술한바와 같다.

Fig. 4.26-(b)로부터 스택 전류밀도가 증가함에 따라 시스템의 전기적 효율과 총 효율은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2.2.3에서 전술한바와 같다.

Fig. 4.26-(c)로부터 스택 전류밀도가 증가함에 따라 스택의 부하 분담률은 감소하고, 가스터빈의 부하 분담률은 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2.2.3에서 전술한바와 같다.



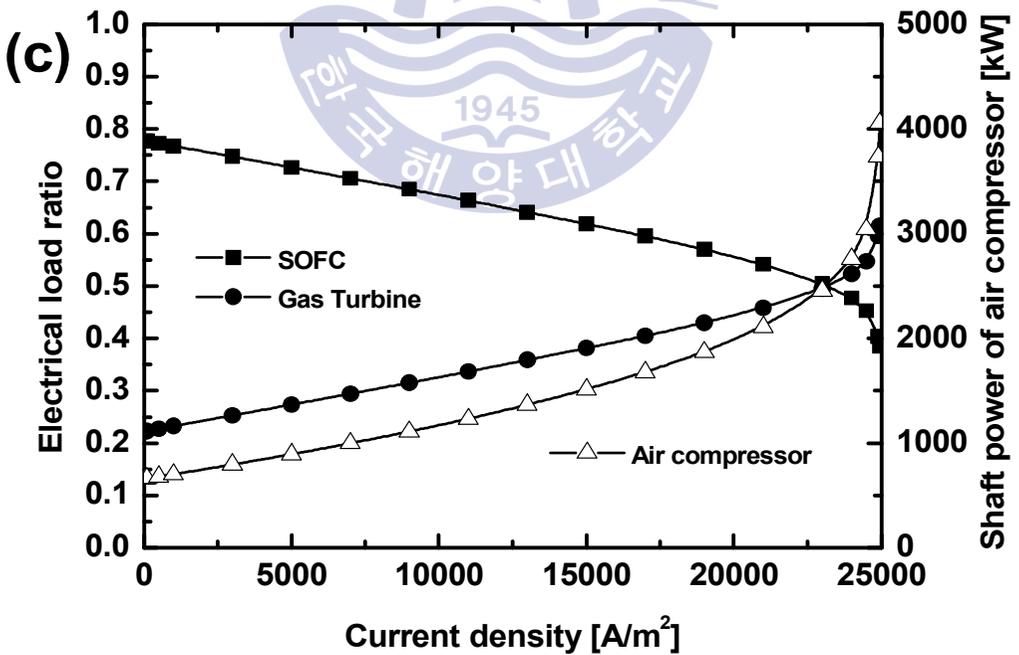
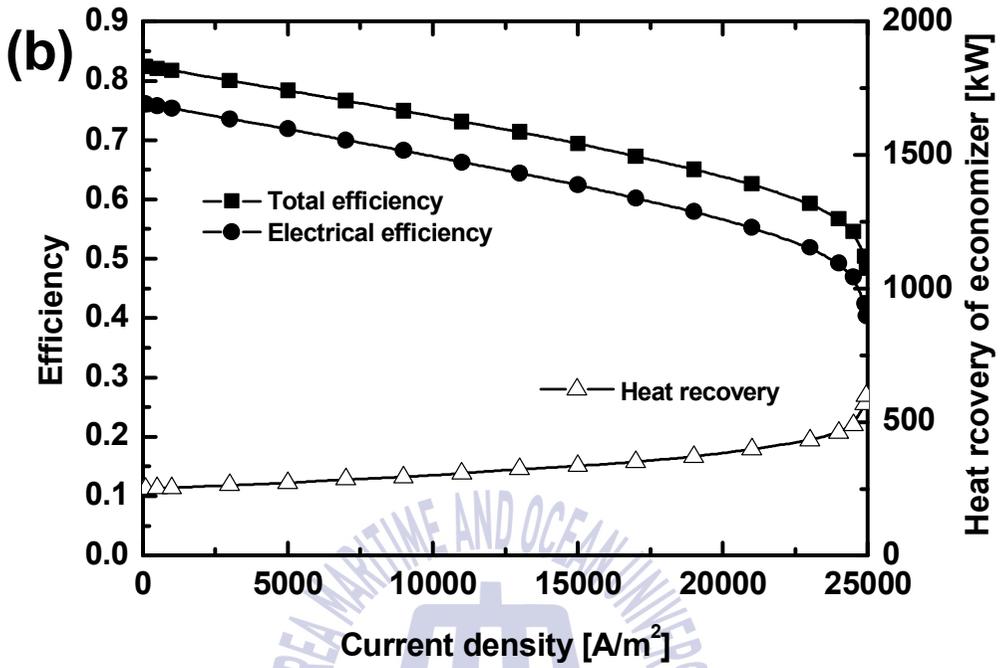


Fig. 4.26 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

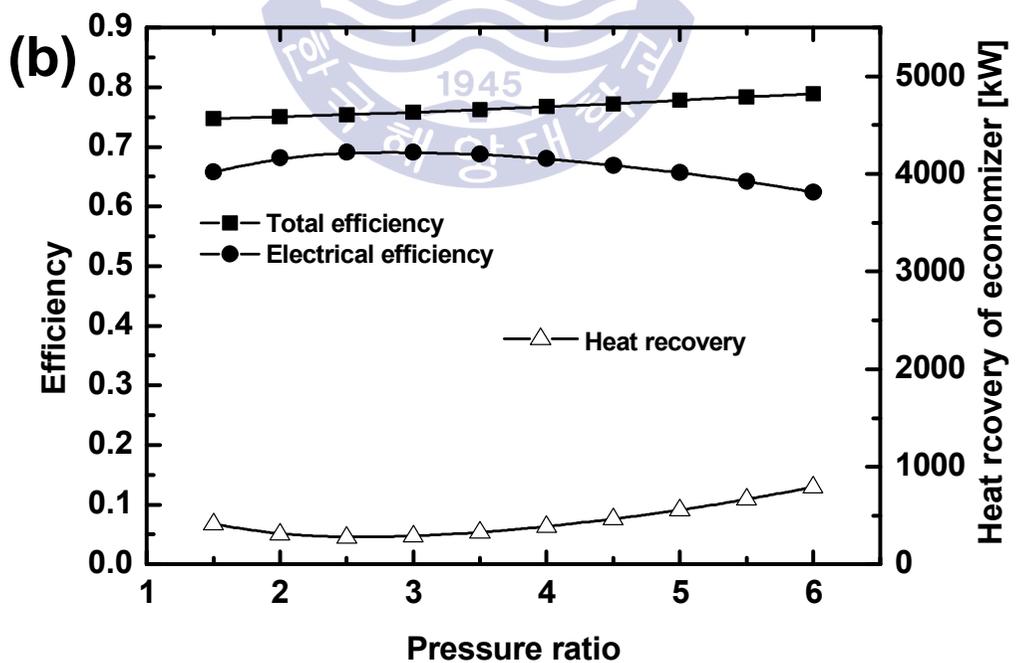
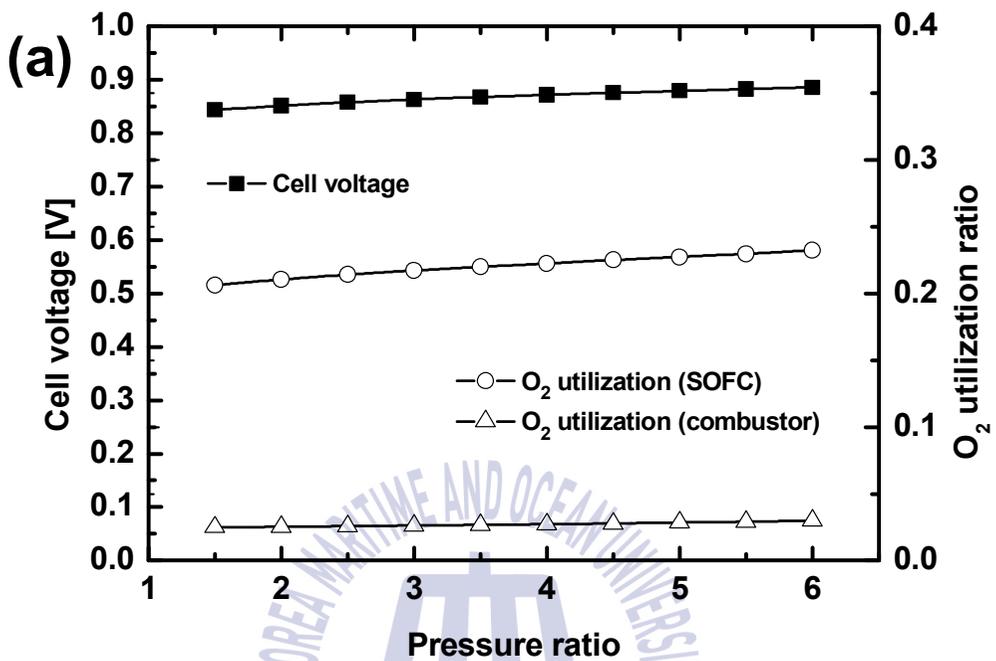
#### 4.3.2.4 가스터빈 압력비에 따른 성능 특성

Fig. 4.27은 스택 작동온도=1023 K, 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>인 경우 가스터빈 압력비가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.27-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.27-(b)는 시스템의 효율과 출력량을 Fig. 4.27-(c)는 하이브리드 시스템의 전기출력에 대한 스택 및 가스터빈의 부하분담률과 공기압축기의 소요동력을 나타낸 것이다.

Fig. 4.27-(a)로부터 가스터빈 압력비가 증가함에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 미세하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2.2.4에서 전술한바와 같다.

Fig. 4.27-(b)로부터 가스터빈 압력비가 증가함에 따라 시스템의 전기적 효율은 압력비=2.5까지 증가하다가 이후 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 압력비=2.5 이하에서는 스택에서 필요한 공기량의 증가에 따른 공기압축기 소요동력 증가율보다 가스터빈의 출력의 증가율이 더 크기 때문이며, 압력비=2.5이상에서는 공기압축기 소요동력 증가율이 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 그러나 가스터빈 압력비가 증가할수록 총 효율은 미세하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 압력비=2.5이하에서는 감소되는 열회수량의 영향보다 증가되는 전기적효율의 영향이 더 크게 작용하기 때문에 총효율이 상승하였고, 압력비=2.5이상에서는 감소되는 전기적효율의 영향보다는 증가되는 열회수량의 영향이 더 크게 작용하기 때문에 총효율이 상승하였다.

Fig. 4.27-(c)로부터 가스터빈 압력비가 증가함에 따라 가스터빈의 부하 분담률이 증가하고 스택의 부하 분담률은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2.2.4에서 전술한바와 같다.



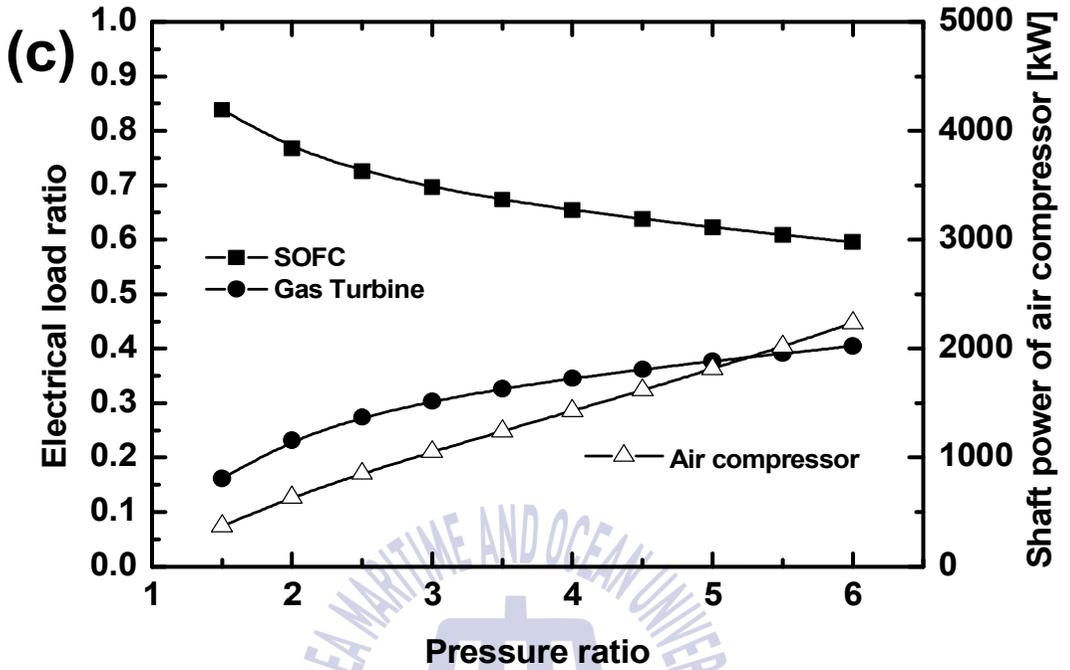
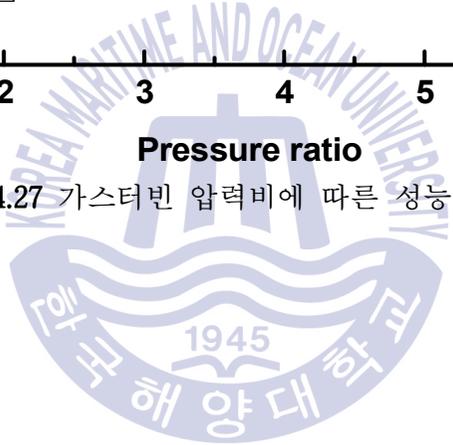


Fig. 4.27 가스터빈 압력비에 따른 성능 특성



#### 4.3.2.5 결과 정리

메탄을 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템의 시뮬레이션을 통해 스택 작동온도, 전류밀도, 가스터빈 압력비가 시스템 성능에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄을 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템은 Fig. 4.24와 같다.
- (2) 메탄을 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템의 성능특성은 4.2.2의 메탄의 경우와 정성적으로 거의 동일한 변화 경향을 보여준다.
- (3) 가스터빈 압력비가 낮은 영역에서는 시스템의 효율은 증가하지만 높은 영역에서는 시스템 전기적 효율은 감소하며, 압력비가 높을수록 총효율은 완만히 상승한다.



### 4.3.3 SOFC/ST 하이브리드시스템

#### 4.3.3.1 시스템 구성

Fig. 4.28은 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템의 구성도이다. 개질방식은 시스템의 효율과 수증기 재활용의 측면에서 외부 수증기 개질방식을 채용하였다. 저장탱크로부터 증발기로 공급된 메탄올은 기화하여 다량의 수증기를 함유하고 있는 스택 연료극의 토출가스와 소정의 비율로 혼합되고 개질기로 보내진다. 개질기에서 스택 연료인 수소와 일산화탄소가 생성이 되고 이외에도 이산화탄소, 수증기 및 개질되지 않은 미량의 메탄올도 포함되어 있다. 저온의 개질가스는 스택으로 보내지기 전 예열기2에서 가열되어 스택 연료극으로 보내진다. 공기는 화학반응 산소와 스택 냉각용으로 사용되며, 송풍기와 예열기1을 거쳐 스택으로 보내진다. 스택 내의 불균일한 온도분포 형성에 따른 열적피로와 충격을 완화하고 스택 냉각을 고려하여 스택에 공급되는 연료와 공기 온도를 COT-200 K로 하였다. 셀의 연료극에서 수소와 일산화탄소는 공기극과 전해질을 거쳐 온 산소이온과 전기화학 반응으로 수증기와 이산화탄소를 생성하고 전자를 방출한다. 스택에 공급되는 공기는 산소이온으로 변환되고 잉여공기는 비가역과정에서 발생한 열을 흡수하여 토출된다. 스택에서 토출되는 가스는 연소기에서 연소되어 예열기1, 스팀터빈, 개질기 및 증발기의 열원으로 사용되고 외부로 배출된다. 스팀터빈시스템은 랭킨사이클을 기본으로 하여 재열이 없는 1단 재생사이클로 구성하였다. 스팀터빈시스템은 급수 예열기, 증기 발생기, 증기 과열기로 구성되는 보일러, 스팀터빈, 콘덴서, 냉각시스템 및 급수장치로 구성되어 있다.

본 시스템 성능해석에 사용한 조건들은 Table 4.6과 같으며 시뮬레이션 계산에 사용된 시스템의 모델링 방법은 2, 3장에서 전술한 바와 같다.

4.3.3에서는 시뮬레이션 모델을 사용하여 스택의 작동온도와 전류밀도가 시스템의 성능에 미치는 영향을 통해 시스템의 특성을 분석하였다.

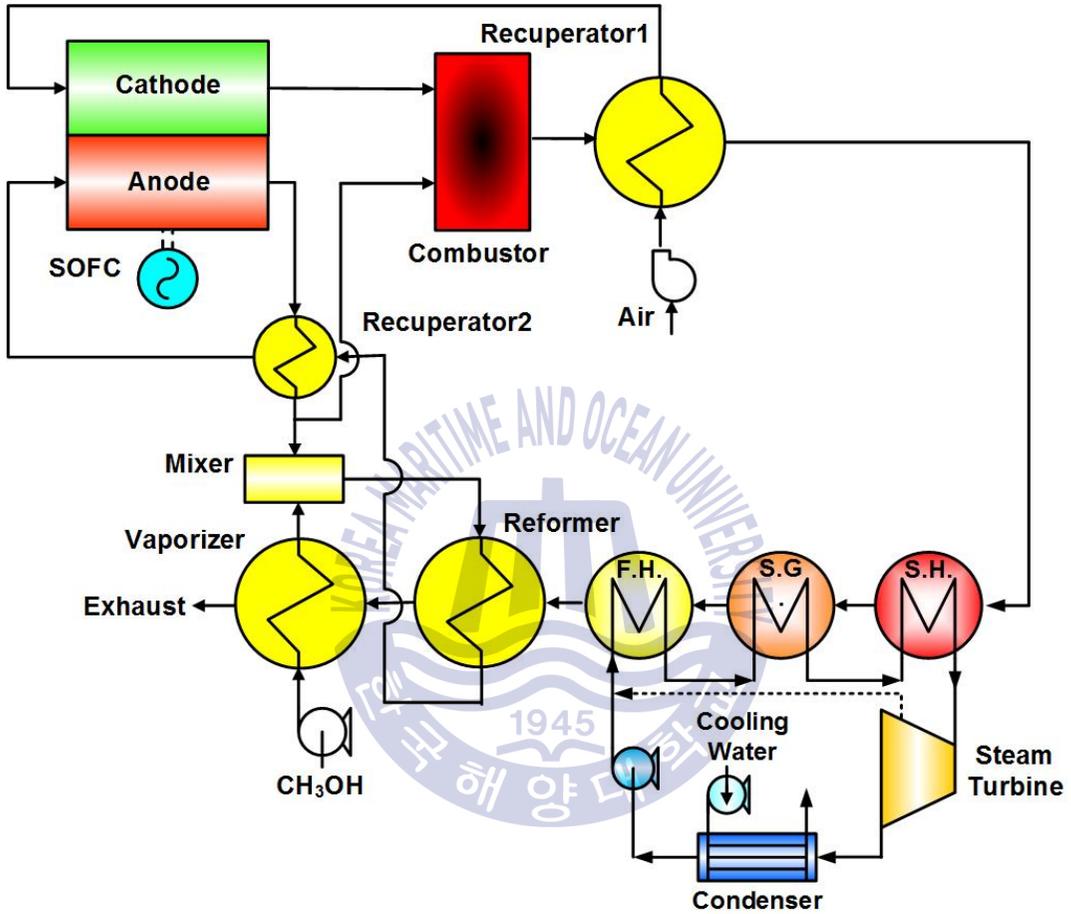


Fig. 4.28 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템 구성도

**Table 4.6** 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템 계산조건

Electrical output (kW)	3000
Anode thickness ( $\mu\text{m}$ )	200
Cathode thickness ( $\mu\text{m}$ )	2000
Electrolyte thickness ( $\mu\text{m}$ )	20
H <sub>2</sub> utilization ratio	0.8
Limiting current density (A/m <sup>2</sup> )	25000
Inverter efficiency (%)	95
Reformer temperature effectiveness (%)	85
Steam carbon ratio	2
Steam turbine inlet pressure (kPa)	1600
Steam turbine inlet temperature (K)	600
Steam turbine outlet pressure (kPa)	10
Steam turbine efficiency (%)	80
Water pump efficiency (%)	85
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) (%)	2
Reformer pressure drop(fuel side) (%)	2
Recuperator1 pressure drop(air side) (%)	3
Recuperator1 pressure drop(gas side) (%)	3
Stack pressure drop(air side) (%)	5
Stack pressure drop(fuel side) (%)	4
Recuperator2 pressure drop(fuel side) (%)	1
Recuperator2 pressure drop(gas side) (%)	1
Combustor pressure drop(air side) (%)	3
Combustor pressure drop(fuel side) (%)	2
Mixer pressure drop (%)	2
Superheater pressure drop(gas side) (%)	3
Steam generator pressure(gas side) (%)	3
Feedwater heater pressure(gas side) (%)	1
Ambient temperature (K)	298.15
Ambient pressure (kPa)	101

#### 4.3.3.2 스택 작동온도에 따른 성능 특성

Fig. 4.29는 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>인 경우 스택 작동온도가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.29-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.29-(b)는 시스템의 효율과 출력량을 나타낸 것이다. 여기에서 스택터빈의 효율은 추가로 공급되는 연료가 없으므로 스택자체 전기적 효율과 스택터빈의 출력을 추가 하였을 때의 전기적 효율을 나타내었다.

Fig. 4.29-(a)로부터 작동온도가 높아짐에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2.2.2에서 기술한 바와 같이 활성화 손실전압이 작아지는 효과가 크게 작용하기 때문이다.

Fig. 4.29-(b)에서 시스템의 전기적 효율은 스택 작동온도가 높아짐에 따라 함께 상승하는데 이는 셀 유기전압의 증가와 소요동력이 감소하기 때문이다.

#### 4.3.3.3 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

Fig. 4.30은 스택 작동온도=1023 K인 경우 스택 전류밀도가 시스템 성능 특성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4.30-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Fig. 4.30-(b)는 시스템의 효율과 출력량을 나타낸 것이다.

Fig. 4.30-(a)로부터 전류밀도가 높아짐에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2.2.3에서 기술한 바와 같이 전류밀도의 증가에 따른 활성화, 저항 및 농도 손실전압의 증가와 냉각공기량이 늘어나기 때문이다.

Fig. 4.30-(b)로부터 스택 전류밀도가 증가함에 따라 시스템의 전기적 효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2.2.3에서 전술한바와 같다.

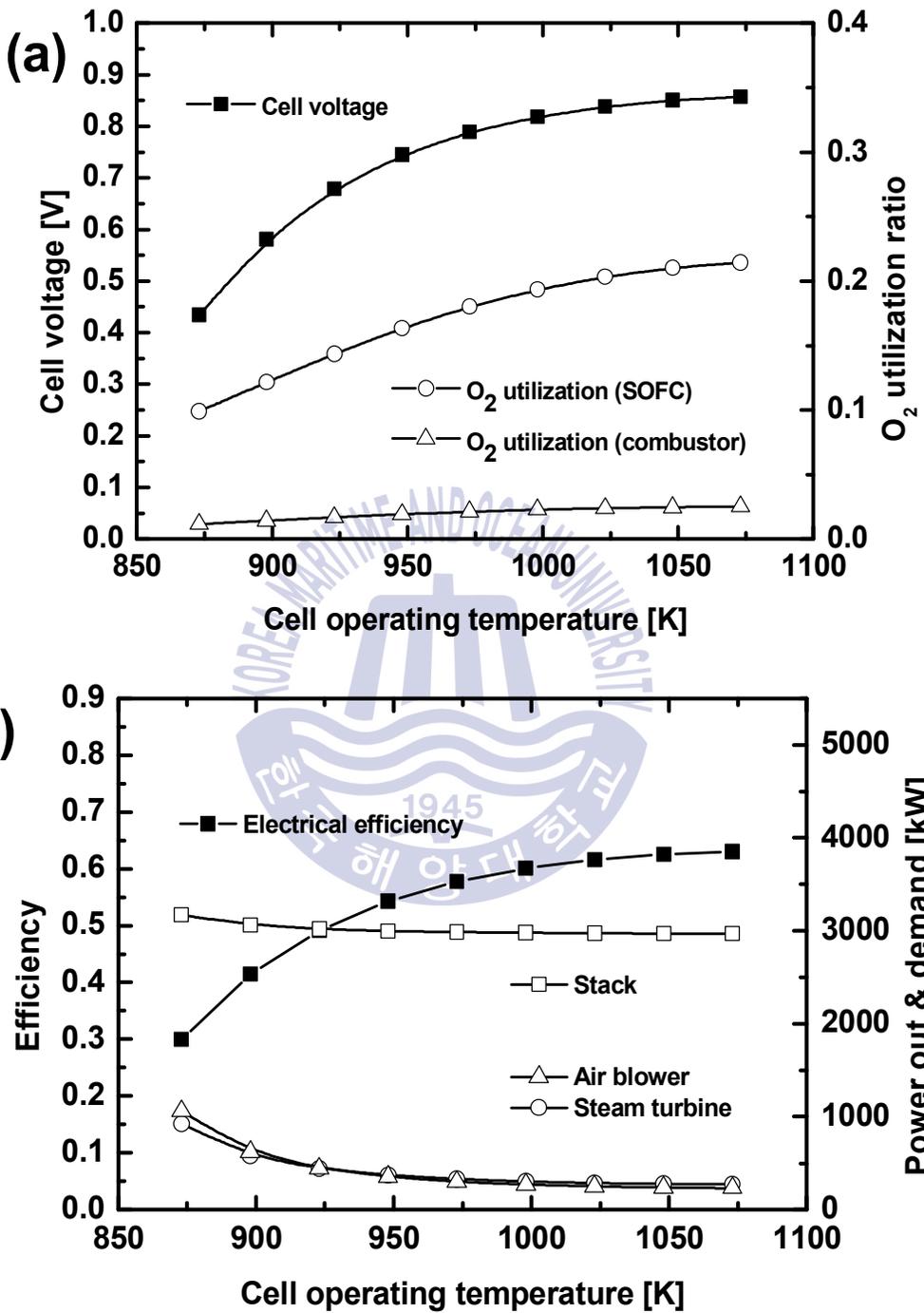


Fig. 4.29 스택 작동온도에 따른 성능 특성

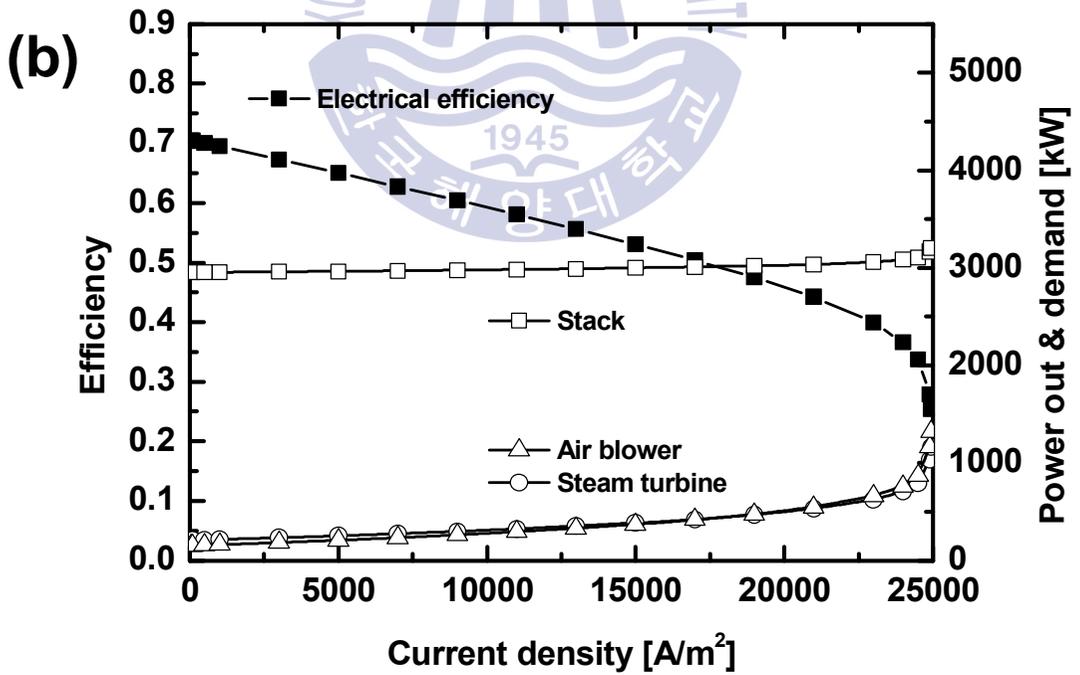
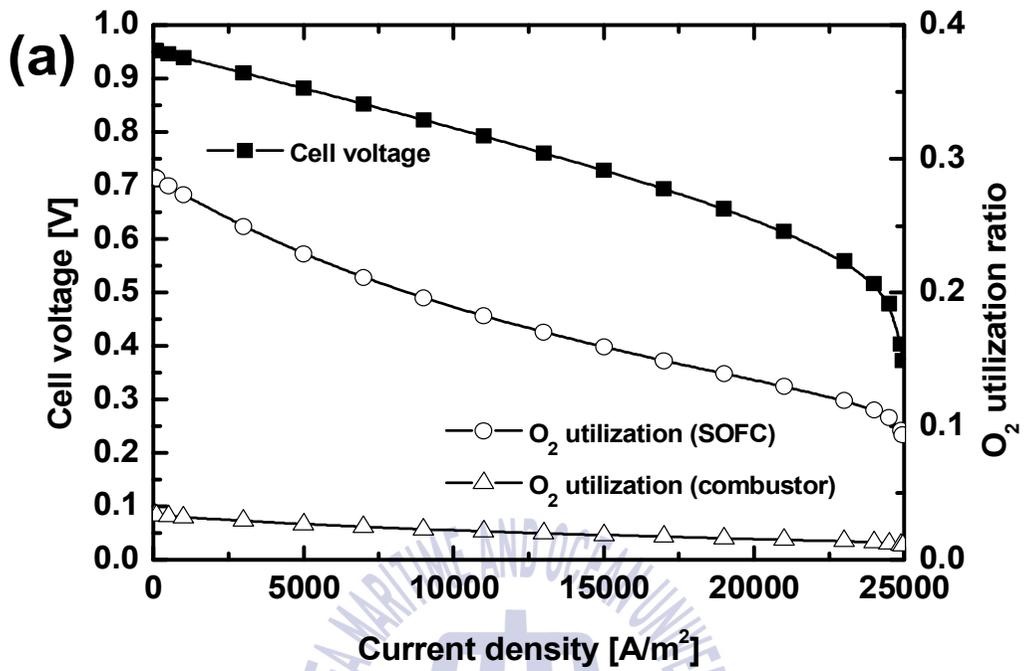


Fig. 4.30 스택 전류밀도에 따른 성능 특성

#### 4.3.3.4 결과 정리

메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템의 시뮬레이션을 통해 스택 작동온도, 전류밀도가 시스템 성능에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄을 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템은 Fig. 4.28과 같다.

(2) 메탄을 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템의 성능특성은 4.2.3의 메탄의 경우와 정성적으로 거의 동일한 변화 경향을 보여준다.



### 4.3.4 SOFC 단독 및 하이브리드 시스템 전기적 효율 비교

4.3.4에서는 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독 및 하이브리드 시스템의 전기적 효율을 종합하여 비교한다. 비교를 위해 사용한 조건들은 전술한 것과 동일하다. 4.3.4.1은 스택 작동온도, 4.3.4.2는 스택 전류밀도가 시스템의 전기적 효율에 미치는 영향을 조사하여 시스템들을 비교하였다.

#### 4.3.4.1 스택 작동온도에 따른 시스템 효율 비교

Fig. 4.31은 전류밀도=8000 A/m<sup>2</sup>, S/C=2, 수소이용률=0.8인 경우 스택 작동온도가 시스템 전기적 효율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 모든 시스템은 스택 작동온도가 증가할수록 전기적 효율이 상승하는 것을 알 수 있다. 주어진 조건하에서 G/T 하이브리드시스템, ST 하이브리드시스템, 단독시스템 순으로 전기적 효율이 높으며, 단독시스템의 전기적 효율에 비해 G/T 하이브리드시스템은 최대 12.9%, S/T 하이브리드시스템은 최대 6.2% 높았다. 또한 4.2.4.1에서 전술한 메탄 연료와는 다르게 전 온도영역에서 하이브리드시스템의 전기적 효율의 향상 효과가 높은 것을 알 수 있다. 이것은 메탄올은 높은 개질률을 얻기 위해 개질온도가 400 K 정도의 낮은 열원이 필요하기 때문에 낮은 스택 작동온도 영역에서도 스택 및 연소기에서 발생하는 열원으로 하이브리드 구동과 개질기에서 사용될 열원을 충분히 공급 할 수 있었기 때문이다. 메탄올 수증기개질 기반 SOFC 단독시스템은 연료의 수증기개질 특성에 의해 메탄에 비해 수소 및 일산화탄소량의 생성물이 작아 메탄 단독시스템에 비해 전 온도영역에서 낮은 전기적 효율을 보이나, 하이브리드시스템은 전기적 효율의 상승효과가 높으므로 하이브리드시스템이 바람직한 것을 알 수 있다.

#### 4.3.4.2 스택 전류밀도에 따른 시스템 효율 특성

Fig. 4.33은 스택 작동온도=1023 K, S/C=2, 수소이용률=0.8인 경우 스택 전류밀도가 시스템 전기적 효율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 모든 시스템은 스택 전류밀도가 증가할수록 전기적 효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 주어진 조건하에서 G/T 하이브리드시스템, ST 하이브리드시스템, 단독시스템 순으로 전기적 효율이 높으며, 단독시스템의 전기적 효율에 비해 G/T 하이브리드시스템은 최대 21.7%, S/T 하이브리드시스템은 최대 6.7% 높았다.

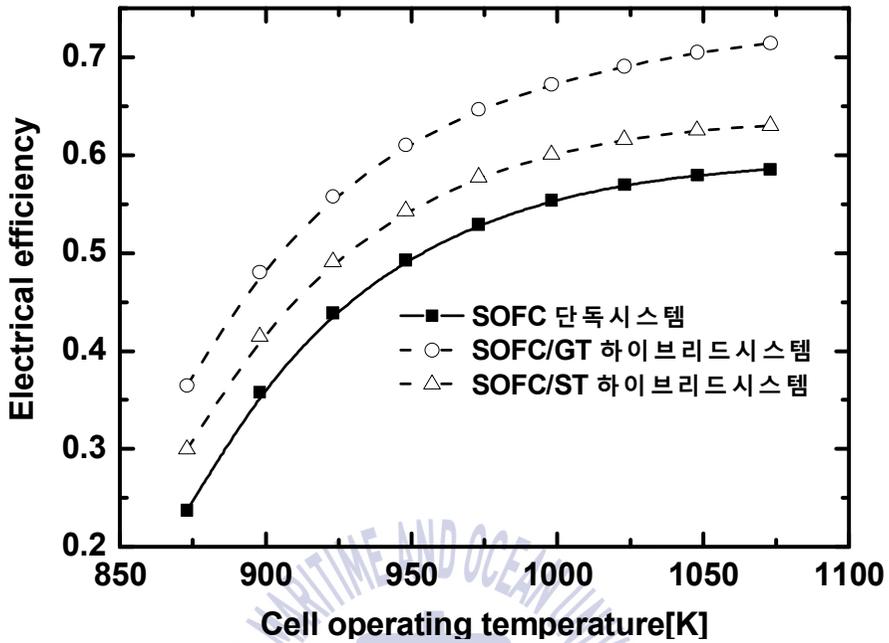


Fig. 4.32 스택 작동온도에 따른 시스템 전기적 효율

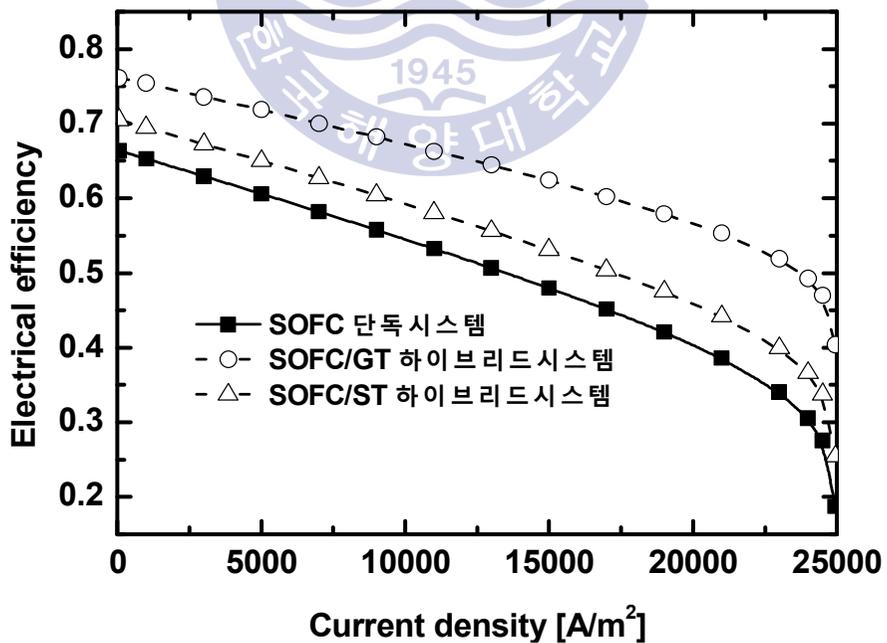


Fig. 4.32 스택 전류밀도에 따른 시스템 전기적 효율

## 제 5 장 결론

본 연구는 메탄 및 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC 시스템을 중·대형 선박용 동력장치로 적용시 시스템의 가능성, 구성 요소 및 성능 특성에 대한 검토를 위해 시뮬레이션 모델링을 수행하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 4.1에서 기술한 중온형/고온형 SOFC 단독시스템 성능비교에 대한 주요결과는 다음과 같이 요약된다.

- 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템은 Fig. 4.1과 같다.
- 중온형 SOFC 단독시스템은 기존에 연구되어진 고온형 시스템과 상이한 구성 요소를 가지며, 충분한 개질온도를 얻기 위해 개질기는 연소기 하류에 배치하며, 개질 연료의 예열과 스택에 공급되는 연료의 냉각을 위한 예열기2의 신설이 필요하였다.
- 중온형 SOFC 단독시스템은 고온형에 비해 낮은 온도에서도 셀 유기전압 및 시스템 효율이 뛰어났으며, 사용가능한 전류밀도 범위도 넓었다.

(2) 4.2.1에서 기술한 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템에 대한 주요결과는 다음과 같이 요약된다.

- 셀 유기전압과 산소이용률은 시스템 효율에 큰 영향을 주며, 이 값이 클수록 효율은 증가한다.
- 시스템 효율은 스택 작동온도가 클수록 전류밀도가 낮을수록 증가하지만 개질기의 S/C에 의한 영향은 크지 않다.
- 스택의 수소이용률이 높을수록 시스템의 전기적 효율은 증가하지만 총효율은 감소하므로, 시스템의 사용 목적에 따라 수소이용률의 결정이 필요하다.

(3) 4.2.2에서 기술한 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템에 대한 주요결과는 다음과 같이 요약된다.

- 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템은 Fig. 4.10과 같다.
- 스택 작동온도가 증가할수록 셀 유기전압, 시스템 효율 및 스택 부하분담률은 증가한다.
- 스택 전류밀도가 증가할수록 시스템 효율과 스택 부하분담률은 감소한다.
- 가스터빈 압력비가 증가할수록 시스템의 효율과 스택 부하분담률은 감소한다.

(4) 4.2.3에서 기술한 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템에 대한 주요결과는 다음과 같이 요약된다.

- 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템은 Fig. 4.14와 같다.
- 스택 작동온도가 증가할수록 셀 유기전압, 시스템 효율은 증가한다.
- 스택 전류밀도가 증가할수록 셀 유기전압 및 시스템 효율은 감소한다.

(5) 4.2.4에서 기술한 메탄 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독 및 하이브리드 시스템의 전기적 효율 비교에 대한 주요결과는 다음과 같이 요약된다.

- 모든 시스템은 스택 작동온도가 증가할수록, 전류밀도가 감소할수록 전기적 효율이 상승하였다.
- GT 하이브리드시스템은 873 K이하에서, ST 하이브리드시스템은 973 K이하에서 단독시스템보다 전기적 효율이 더 낮다.
- 높은 스택 작동온도영역에서도 GT 하이브리드시스템은 최대 6.8%, ST 하이브리드 시스템은 최대 1%의 효율 향상을 보였다.

- 스택 전류밀도에 따른 시스템 효율에 미치는 영향을 보면, G/T 하이브리드시스템, ST 하이브리드시스템, 단독시스템 순으로 전기적 효율이 높으며, 단독시스템의 전기적 효율에 비해 G/T 하이브리드시스템은 최대 9.6%, S/T 하이브리드시스템은 최대 4.6% 높았다.

(6) 4.3.1에서 기술한 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템에 대한 주요결과는 다음과 같이 요약된다.

- 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템은 Fig. 4.19와 같다.
- 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독시스템의 성능특성은 4.2.1의 메탄의 경우와 정성적으로 거의 동일한 변화 경향을 보여준다.
- 전기적 효율과 총효율은 메탄의 경우와 비교하여 메탄올 연료의 개질 특성에 따라 약간 낮게 나타난다.
- 메탄올의 경우 열에너지의 활용도가 높고 회수 가능한 열량이 크기 때문에 가스터빈 또는 스팀터빈을 복합한 하이브리드시스템을 통하여 전기적 효율의 개선 가능성이 높다.

(7) 4.3.2에서 기술한 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템에 대한 주요결과는 다음과 같이 요약된다.

- 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템은 Fig. 4.24와 같다.
- 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC/GT 하이브리드시스템의 성능특성은 4.2.2의 메탄의 경우와 정성적으로 거의 동일한 변화 경향을 보여준다.
- 가스터빈 압력비가 낮은 영역에서는 시스템의 효율은 증가하지만 높은 영역에서는 시스템 전기적 효율은 감소하며, 압력비가 높을수록 총효율은 완만히 상승한다.

(8) 4.3.3에서 기술한 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템에 대한 주요결과는 다음과 같이 요약된다.

- 효율적인 연료의 개질과 시스템 안정성을 고려한 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템은 Fig. 4.28과 같다.
- 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC/ST 하이브리드시스템의 성능특성은 4.2.3의 메탄올의 경우와 정성적으로 거의 동일한 변화 경향을 보여준다.

(9) 4.4.4에서 기술한 메탄올 수증기개질 기반 중온형 SOFC 단독 및 하이브리드 시스템의 전기적 효율 비교에 대한 주요결과는 다음과 같이 요약된다.

- 모든 시스템은 스택 작동온도가 증가할수록, 전류밀도가 감소할수록 전기적 효율이 상승하였다.
- 작동온도에 따른 시스템 비교시 전기적 효율은 G/T 하이브리드시스템, ST 하이브리드시스템, 단독시스템 순으로 높으며, 단독시스템에 비해 G/T 하이브리드시스템은 최대 12.9%, S/T 하이브리드시스템은 최대 6.2% 높았다.
- 전류밀도에 따른 시스템 비교시 전기적 효율은 G/T 하이브리드시스템, ST 하이브리드시스템, 단독시스템 순으로 높으며, 단독시스템에 비해 G/T 하이브리드시스템은 최대 21.7%, S/T 하이브리드시스템은 최대 6.7% 높았다.

## 참고문헌

- [1] 김명환, 2007, 선박 동력발생용 연료전지시스템 기술개발의 전망에 대한 고찰. 한국마린엔지니어링학회지. 31(8), pp.924-931.
- [2] LNG 연료추진선박포럼 기술현황과 발전 전략 pp.39(2015)
- [3] Electrical efficiency of the SOFC/MGT Hybrid Power plant concept compared to other powerplant concepts depending on installed power output : <<http://www.bio-hypp.eu/system/>>[Accessed 26. June. 2017]
- [4] Tomas Tronstad, Hanne Hogmoen Astrand, Gerd Petra Haugom, Lars Langfeldt, Study on the use of fuel cells in shipping, DNV GL(2017)
- [5] James Larminie, Andrew Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Wiley(2003)
- [6] Ryan O' Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B. Prinz, Fuel Cell Fundamentals, John Wiley & Sons(2008)
- [7] Bao C, Cai NS, Croiset E. "A multi-level simulation platform of natural gas internal reforming solid oxide fuel cell gas turbine hybrid generation system e part I. Balancing units model library and system simulation" J Power Sources pp. 1-5 (2011)
- [8] 오진숙, 정창식, 박상균, 김명환, 2016, 재순환수증기 연료개질형 SOFC시스템의 효율성 평가. 한국마린엔지니어링학회지. 40(7), pp.569-573.
- [9] Yuan Tian, Ao Wang, Lichao Jia, Dong Yan, Bo Chi, Jian Pu, Jian Li "High-performance oxygen electrode for reversible solid oxide cells with power generation and hydrogen production at intermediate temperature" International Journal of Hydrogen Energy 42 pp.4456-4464, 2017
- [10] Chenghao Yang, Cong Ren, Liang Yu, Chao 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, Volume 38, Issue 35, pp 15348–15353, 2013

- [11] Ning Zuo, Milin Zhang, Zongqiang Mao, Zhan Gao, Fucheng Xie, “Fabrication and characterization of composite electrolyte for intermediate-temperature SOFC” Journal of the European Ceramic Society, Volume 31, Issue 16, December 2011, Pages 3103–3107
- [12] 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
- [13] Myoung-Hwan 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).
- [14] 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, pp. 308–323, 2007
- [15] 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

## 감사의 글

먼저 늘 저와 동행하시고 바른길로 인도해주시는 하나님께 감사드립니다.

논문이 완성되기까지 부족한 저를 따뜻한 관심과 격려로 학문적, 정신적으로 많은 가르침을 주신 김명환 교수님께 진심으로 감사드립니다.

논문의 심사를 맡아주시고 많은 조언과 세심한 관심을 보여주신 길병래 교수님, 아낌없는 격려와 지도를 해주신 박상균 교수님, 그리고 논문에 유익한 정보와 영감을 주신 최재성 교수님, 오철 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

2년간의 위탁교육 기간 동안 보조기계 연구실에서 즐겁고 보람찬 시간을 보낼 수 있도록 많은 도움을 준 장혜수, 황대중, 박성철 님께 감사드리며, 친환경선박 전공을 선택함에 있어 많은 도움을 주고, 대학원 생활의 멘토 역할을 해준 김영근, 백현민 소령님께 진심으로 감사의 인사를 드립니다. 또한 함께 대학원 생활을 하며 많은 도움을 준 임안 소령님, 김병화 소령(진), 김다름 대위에게도 감사의 말을 전합니다.

항상 자식을 위해 기도해주시고 따뜻한 응원을 보내주시는 아버지, 어머니, 곁에서 많은 도움을 주시는 장인어른, 장모님 그리고 누나, 자형, 성식, 제수씨, 형님, 처형, 조카들 언제나 존경하고 사랑합니다.

늘 옆에서 챙겨주고 많은 힘이 되어준 아내 손은영. 고맙고 사랑합니다. 그리고 존재만으로도 삶의 활력소가 되어준 아들 지훈이께 깊은 사랑을 전합니다.

마지막으로 지면을 통해서 일일이 언급하지 못했지만 저를 아끼고 베풀어 주신 관심, 감사합니다.

해군본부 보안성 검토필, 해군본부 인사참모부 인사기획과-6171호('17.12. 8.)