

메탄올 연료형 SOFC/GT 하이브리드시스템의 성능 평가

오세진³ · 임태우¹ · 김종수² · 길병래¹ · 박상균⁴ · 김만응⁴ · 이경진⁵ · 오진숙⁵ · 김명환[†]

(원고접수일 : 2010년 7월 26일, 원고수정일 : 2010년 11월 1일, 심사완료일 : 2010년 11월 5일)

Performance Analysis of Methanol Fueled Marine Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Hybrid Power System

Sae-Gin Oh³ · Tae-Woo Lim¹ · Jong-Su Kim² · Byung-Lea Kil¹ · Sang-Kyun Park⁴ ·
Mann-Eung Kim⁴ · Kyung-Jin Lee⁵ · Jin-Suk Oh⁵ · Myoung-Hwan Kim[†]

요약 : GHG 및 대기오염물질 배출 규제는 고효율 및 친환경에 적합한 새로운 선박용 동력장치의 필요성을 제기하고 있다. 최근 이와 같은 문제들을 근본적으로 해결하기 위한 지속가능한 방법으로서 연료전지를 선박의 동력발생장치로 도입하고자 하는 검토가 진행되고 있다. 본 논문은 액체연료인 메탄올을 기반으로 한 고체산화물형 연료전지/가스터빈 하이브리드시스템의 성능을 평가한 것으로 스택의 작동온도, 전류밀도, 가스터빈 압력비, 공기예열기 온도효율, TIT(turbine inlet temperature)의 영향을 시뮬레이션으로 검토하고 그 결과를 기체연료인 메탄의 경우와 비교하고 있다.

주제어 : 선박동력시스템, 고체산화물형 연료전지, 가스 터빈, 하이브리드시스템, 성능평가, 메탄올

Abstract: The strengthened regulations for atmospheric emissions from ships have caused a necessity of new, alternative power system in ships for the low pollutant emissions and the high energy efficiency. Recently, new kinds of propulsion power system such as fuel cell system, which use hydrogen as an energy source, have been sincerely considered. The purpose of this work is to predict the performance of methanol fueled SOFC/GT hybrid power system and to analyze the influence of operating temperature of stack, current density of stack, pressure ratio of turbine, temperature effectiveness of recuperator, turbine inlet temperature.

Key words: Ship power system, Solid oxide fuel cell, Gas turbine, Hybrid system, Performance analysis, Methanol

1. 서 론

선박에서도 GHG(greenhouse gas) 및 대기오염물질의 배출을 저감할 수 있는 다양한 방법들의 적용이 검토되고 있다. 그 중의 하나로 공해물질의 배출이 없으면서도 효율을 획기적으로 개선할 수

있는 수소연료전지시스템의 채용이 신중히 검토되고 있으며 상업화를 위한 연구·개발단계가 활발하게 진행되고 있다[1].

많은 연료를 저장해야 하는 대형 선박의 경우에 초저온 수소액체 또는 초고압 수소가스의 직접적인

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail:mhkim@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4267)

1 한국해양대학교 기관시스템공학부

2 한국해양대학교 선박전자기계공학부

3 한국해양대학교 운항훈련원

4 한국선급 에너지환경사업단

5 한국해양대학교 대학원

3.2 수증기개질

메탄올의 수증기 개질반응은 기본적으로 아래와 같은 분해반응과 전이반응으로 이루어진다.

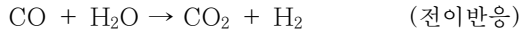
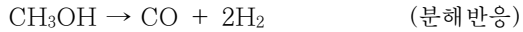


Figure 2는 작동압력=5 atm, S/C=2로 메탄올과 수증기를 개질기에 공급하였을 경우에 대한 메탄올 개질을 및 개질기 출구가스 조성을 반응 온도별로 나타낸 것이다. 그림으로부터 개질률 95% 이상을 위해서는 반응온도가 450 K 이상 되어야 함을 알 수 있다. 또한 개질기 출구가스의 조성은 반응온도 500 K 에서 수소 59.54%, 일산화탄소 0.42%, 이산화탄소 19.57%, 수증기 20.45%, 메탄올 0.02%임을 보인다. 메탄의 개질 결과[8]와 비교하면 비교적 낮은 온도에서 개질반응이 진행되는 메탄올의 특성에 따라 전이반응의 빠른 진행으로 일산화탄소의 농도는 낮고 이산화탄소의 농도는 높게 나타난다. 아울러 같은 비교에서 메탄올은 수증기의 물분율은 낮게 수소의 물분율은 높게 나타난다. 또한 상기의 개질 결과는 참고문헌 [9]의 결과와 잘 일치하고 있다.

3.3 스택 작동온도의 영향

Figure 3-(a),(b),(c),(d)는 전류밀도=3000 A/m², 가스터빈 압력비=4, 예열기 온도효율=0.85, TIT=1448 K인 경우 시스템 특성에 대한 스택 작동온도의 영향을 나타낸 것으로 Figure 3-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을, Figure 3-(b)는 시스템의 효율과 에코노마이저에서의 회수 열량, Figure 3-(c)는 하이브리드 시스템의 전기출력에 대한 스택 및 가스터빈의 부하 분담률을 그리고 Figure 3-(d)는 각부의 온도 변화를 나타낸 것이다. 여기에서 산소 이용률이란 냉각작용도 겸하는 공기량에 대한 전기화학 반응용으로 사용되는 산소분의 공기량 비로 1보다 작은 값을 가진다.

Figure 3-(a)는 스택 작동온도의 증가에 따라 셀의 유기전압과 스택의 산소이용률이 상승함을 보

여준다. 유기전압의 증가는 작동온도 상승에 따른 가역 개회로전압의 감소에도 불구하고 활성화 과전압이 줄어드는 효과가 크게 나타나기 때문이다. 또한 스택의 산소이용률이 증가하는 것은 활성화 과전압의 감소 즉, 전기화학반응의 저항(비가역성)이 줄어들어 스택의 발열량이 감소하는 효과와 더불어 공급 공기온도와 스택의 작동온도의 차가 커져 냉각효과가 증대하여 스택에서 소요되는 공기량이 줄어드는 영향 때문이다. 이것은 Figure 3-(c),(d)에서 공기압축기 소요동력, 예열기 공기 출구온도 즉, 스택 공기 입구온도의 변화로부터 확인할 수 있다.

Figure 3-(b)는 시스템의 전기적 효율과 총 효율이 작동온도의 증가에 따라 높아짐을 보여준다. 이것은 셀 유기전압의 증대, 공기압축기 소요 동력의 감소와 더불어 효율이 높은 스택의 부하 분담률이 늘어나기 때문이다. 총 효율도 전기적 효율과 같은 경향을 보이며 총 효율과 전기적 효율의 차는 에코노마이저의 열 회수량에 기인한다. 열 회수량이 스택 작동온도의 증가에 따라 감소하는 것은 에코노마이저의 거의 일정한 입구온도에도 불구하고 가스 유량이 줄어들기 때문이다.

Figure 3-(c)는 스택의 작동온도가 증가함에 따라 스택의 부하 분담률은 커지고 가스터빈의 부하 분담률은 점차 작아짐을 보여준다. 이것은 작동온도가 상승함에 따라 소요 공기량이 감소하여 가스터빈의 출력이 줄어드는 만큼 스택에서 그 출력을 더 분담하기 때문이다.

Figure 3-(d)에서 시스템 각 부의 온도는 스택 작동온도의 증가에도 불구하고 거의 일정 값을 지시한다. 그림의 참조 온도는 스택 공급유체 최저온도 한계선을 나타내며 셀 내의 불균일한 온도분포 형성에 따른 열적피로와 충격을 완화하기 위하여 스택에 공급되는 연료와 공기의 최저온도로 스택 작동온도(COT)보다 200 K 낮은 온도이다[10]. 그림은 스택 작동온도 1240 K 이상의 영역에서 공기의 입구온도가 스택 공급유체 최저온도 한계선을 하회하여 스택의 안전성에 문제를 초래할 수 있음을 보여준다.

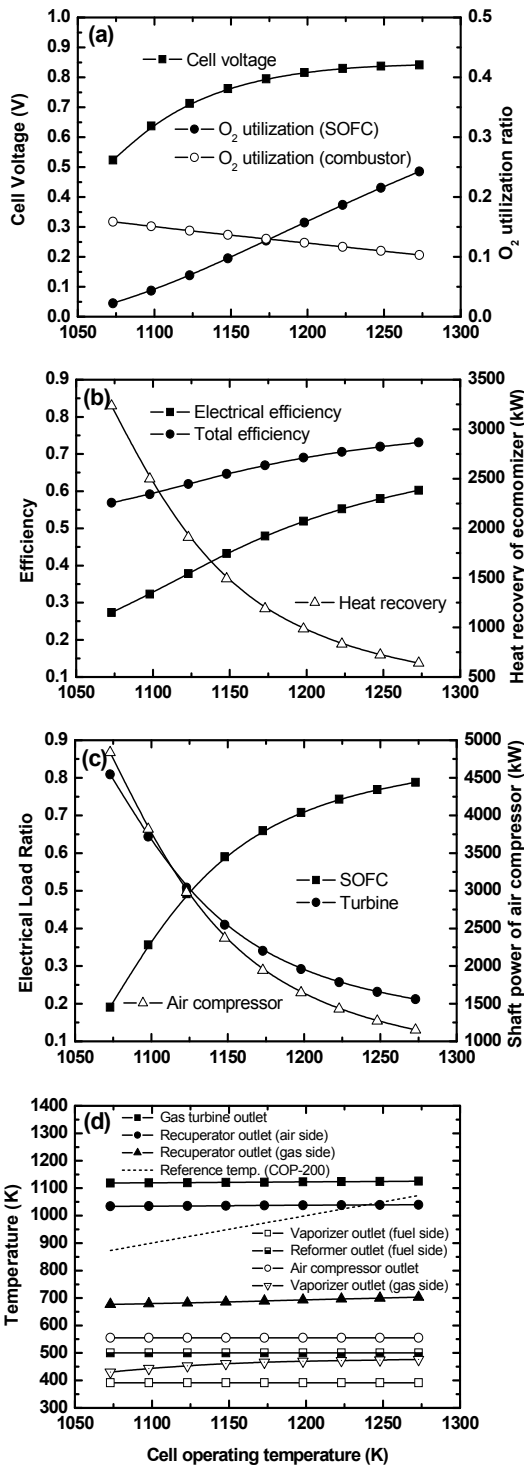


Figure 3: Effect of cell operating temperature

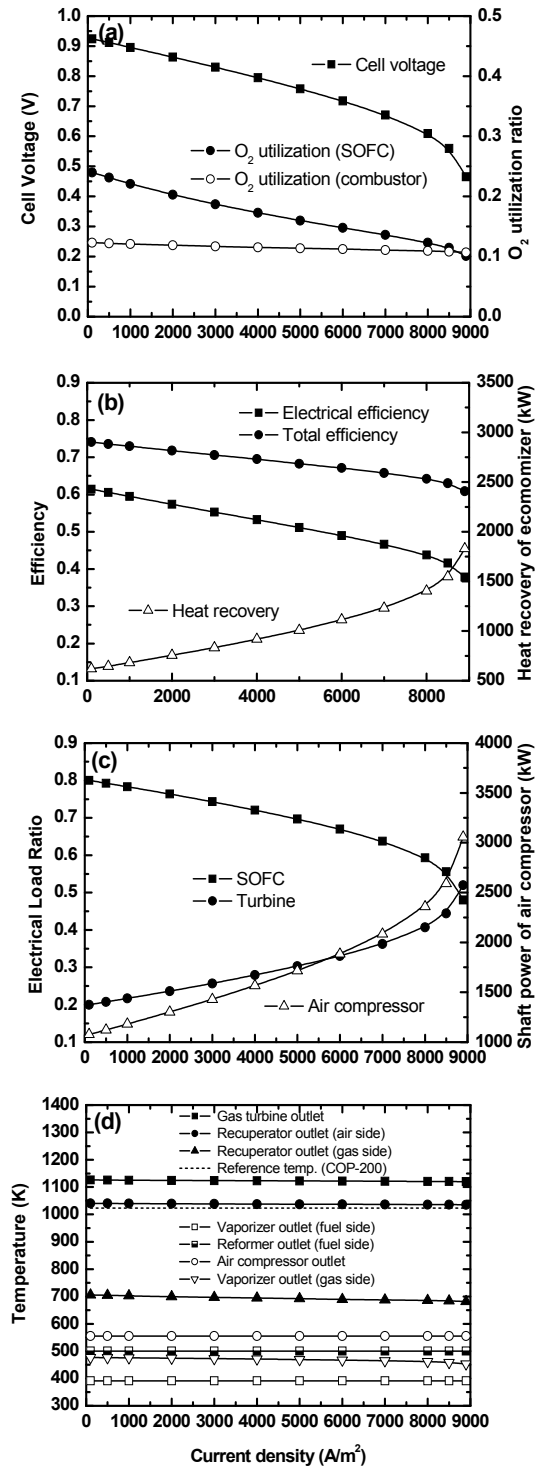


Figure 4: Effect of cell current density

3.4 전류밀도의 영향

Figure 4-(a),(b),(c),(d)는 작동온도=1223 K, 가스터빈 압력비=4, 예열기 온도효율=0.85, TIT=1448 K인 경우 시스템 특성에 대한 셀 전류 밀도의 영향을 나타낸 것이다.

Figure 4-(a)는 전류밀도의 증가에 따라 셀 유기전압과 스택의 산소이용률이 감소함을 보여준다. 전류밀도가 증가한다는 것은 반응 단위면적당 반응량이 늘어난다는 것으로 가역 개회로전압에는 큰 변화는 없지만 과전압이 증가하여 유기전압은 감소하게 된다. 전류밀도의 변화에 따라 스택의 산소이용률이 저하하는 것은 과전압의 증가로 스택의 발열량이 늘어나 더 많은 냉각용 공기가 요구되기 때문(참조 Figure 4-(c))이다.

Figure 4-(b)에서 시스템의 전기적 효율 및 총 효율은 전류밀도의 증가에 따라 감소함을 보여준다. 전기적 효율의 감소는 유기전압이 줄어들고 공기 압축기의 소요 동력과 터빈의 부하분담률이 늘어나는 결과에 기인한다. 그러나 총 효율의 감소율이 전기적 효율보다 크지 않은 것은 전류밀도의 증가와 함께 예코노마이저의 열 회수량이 늘어나기 때문이다.

Figure 4-(c)은 소요 공기량의 증가로 인한 가스터빈의 출력 상승과 부하 분담률의 증가를 설명하고 있다.

Figure 4-(d)는 전류밀도의 변화에도 불구하고 시스템의 각 부는 거의 일정한 온도를 유지하고 최저온도한계선을 초과하는 영역도 나타나지 않음을 보여준다.

3.5 압력비의 영향

Figure 5-(a),(b),(c),(d)는 작동온도=1223 K, 전류밀도=3000 A/m², 예열기 온도효율=0.85, TIT=1448 K인 경우 시스템 특성에 대한 가스터빈 압력비의 영향을 나타낸 것이다.

Figure 5-(a)로부터 압력비가 높아짐에 따라 셀 유기전압과 스택의 산소이용률이 증가함을 알 수 있다. 유기전압의 증가는 내른스트 및 활성화 과전압의 손실이 압력비의 증가와 함께 감소하기 때문이다. 또한 스택의 산소이용률이 커지는 것은 유기

전압의 증가와 함께 스택의 발생하는 열량이 감소하고 스택 작동온도에 대한 공급 공기온도의 차가 커져 냉각효과가 증대되는 이유(참조 Figure 5-(c),(d))로 스택의 소요 공기량이 줄어들기 때문이다.

Figure 5-(b)는 시스템의 전기적 효율과 총 효율이 낮은 압력비 영역에서 크게 증가하다가 압력비=3.0 이상의 영역에 이르러 거의 일정하거나 완만한 상승하게 됨을 보여준다. 이것은 압력비 증가에 따라 소요 공기량의 감소에도 불구하고 압축기의 소요 동력이 크게 증가(참조 Figure 5-(c))하는 영향을 받기 때문이다.

압력비 증가에 따라 가스터빈의 부하 분담률이 감소하고 스택의 부하 분담률은 증가함을 Figure 5-(c)는 보여준다. 이는 압력비의 상승에 따라 연소 가스량의 감소와 압축기 소요 동력이 증가하여 전력화되는 가스터빈의 동력이 줄어들기 때문이다.

Figure 5-(d)는 가스터빈 압력비의 증가에 따라 시스템의 각부 온도가 크게 변한다는 것을 보여준다. 아울러 압력비=4.5 이상의 영역에서 예열기 출구 공기온도가 스택 공급유체 최저온도 한계선을 하회하게 됨을 보여주며 이는 스택의 안전운전을 위하여 제한되어야 한다.

3.6 예열기 온도효율의 영향

Figure 6-(a),(b),(c),(d)는 작동온도=1223 K, 전류밀도=3000 A/m², 가스터빈 압력비=4, TIT=1448 K인 경우 시스템 특성에 대한 예열기 온도효율의 영향을 나타낸 것이다.

예열기 온도효율의 증가는 스택에 공급되는 공기 온도의 상승(참조 Figure 6-(d))을 의미하므로 냉각 공기량이 증가하여 스택의 산소 이용률이 감소하게 됨을 Figure 6-(a)에서 볼 수 있다. 그러나 셀의 유기전압에는 큰 변화가 없다.

Figure 6-(b)는 예열기 온도효율의 증가와 함께 전기적 효율은 거의 변화가 없으나 총 효율은 감소하는 경향을 보여준다. 전기적 효율에 변화가 없는 것은 스택의 유기전압이 거의 일정하고 부하 분담률의 변화도 다른 파라메타에 비하여 크지 않기 때문이다. 반면 총효율이 감소하는 것은 연소

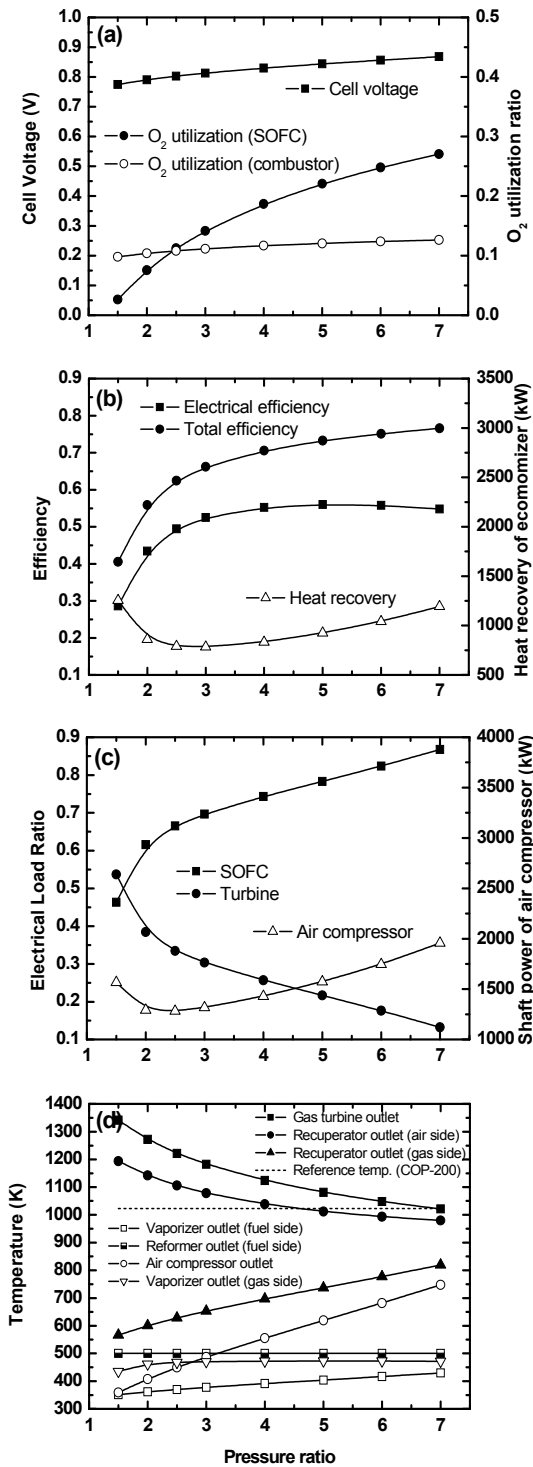


Figure 5: Effect of turbine pressure ratio

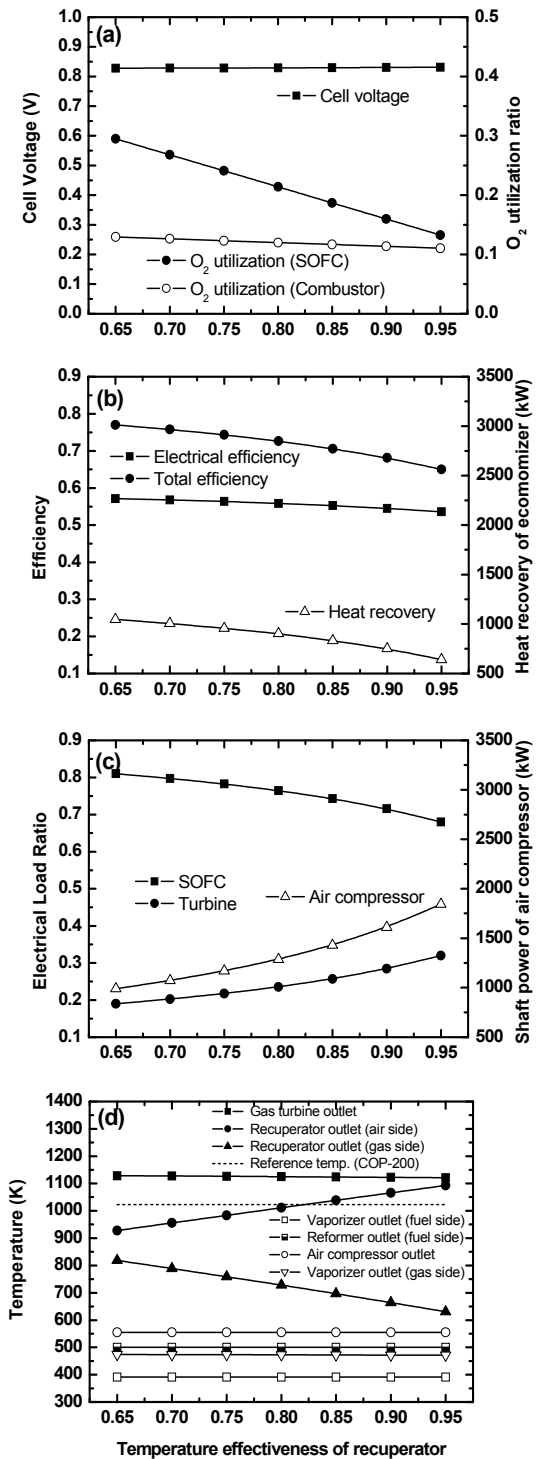


Figure 6: Effect of temperature effectiveness for recuperator

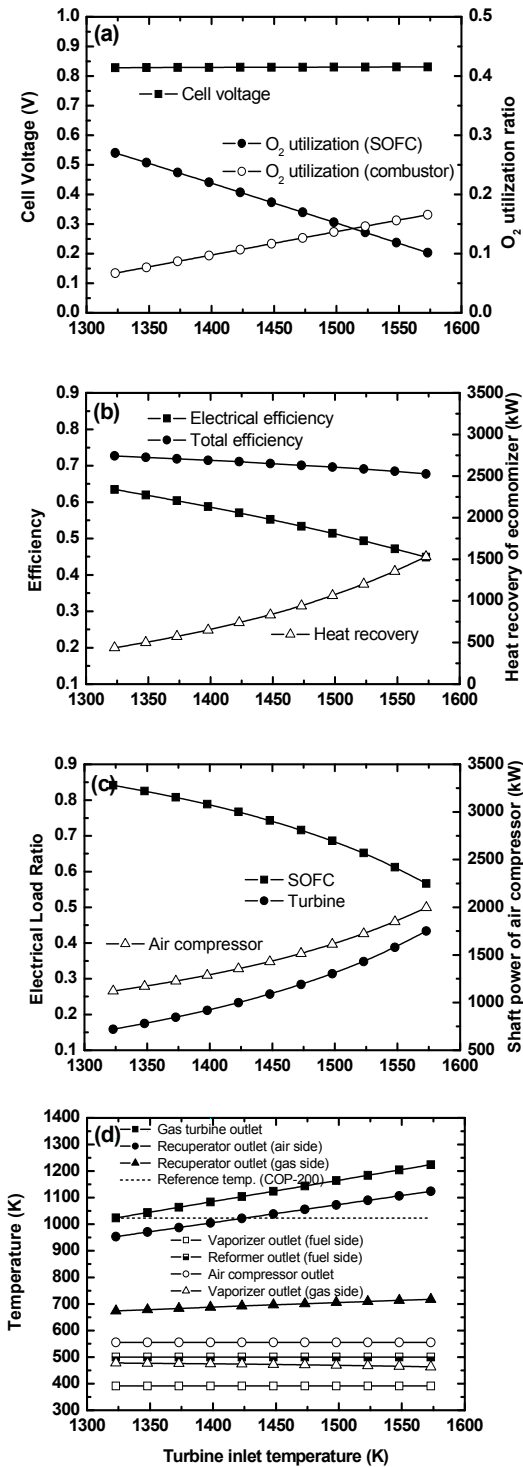


Figure 7: Effect of TIT

가스량의 증가에도 불구하고 에코노마이저 입구 온도가 감소(Figure 6-(d)의 공기예열기 출구 가스 온도 참조)하는 영향이 크게 작용하기 때문이다.

예열기 온도효율이 커짐에 따라 가스터빈에 유입되는 연소 가스량은 늘어나고 가스터빈의 출력과 부하 분담률은 증가하나 그 변화는 다른 변수들의 영향보다 크지 않음을 Figure 6-(c)는 보여준다.

Figure 6-(d)는 예열기 출구 공기온도가 스택 공급유체 최저온도 한계선을 하회하는 온도 효율 0.825 이하 영역에서의 운전이 위험함을 보여준다.

3.7 TIT의 영향

Figure 7-(a),(b),(c),(d)는 작동온도=1223 K, 전류밀도=3000 A/m², 가스터빈 압력비=4, 예열기 온도효율=0.85인 경우 시스템 특성에 대한 TIT의 영향을 나타낸 것이다.

TIT의 상승에 따라 스택의 유기전압은 거의 변화가 없지만 스택의 산소이용률이 감소하게 됨을 Figure 7-(a)는 보여준다. 스택의 산소이용률이 감소하는 것은 스택에 공급되는 공기의 온도가 높아져(참조 Figure 7-(d)) 냉각작용도 겸하는 공기의 소요량이 증가(참조 Figure 7-(c))하기 때문이다.

Figure 7-(b)는 TIT의 상승에 따라 감소하는 전기적 효율과 총 효율의 변화를 보여주나 총 효율의 감소율은 그다지 크지 않다. 전기적 효율이 감소하는 것은 유기전압 일정에도 불구하고 효율이 낮은 스택의 부하 분담률은 작아지고 효율이 낮은 가스터빈의 부하 분담률은 커지기 때문이다. 그러나 총 효율의 감소율이 그다지 크지 않은 것은 가스유량의 증가로 에코노마이저의 회수 열량이 늘어나기 때문이다.

TIT의 증가와 함께 유입되는 가스터빈의 연소 가스량도 늘어나 가스터빈의 출력과 부하 분담률이 상승하게 됨을 Figure 7-(c)는 보여준다.

Figure 7-(d)는 TIT의 변화에 따라 스택에 공급되는 공기 온도가 최저온도한계선을 하회하는 위험한 영역의 존재를 보여준다.

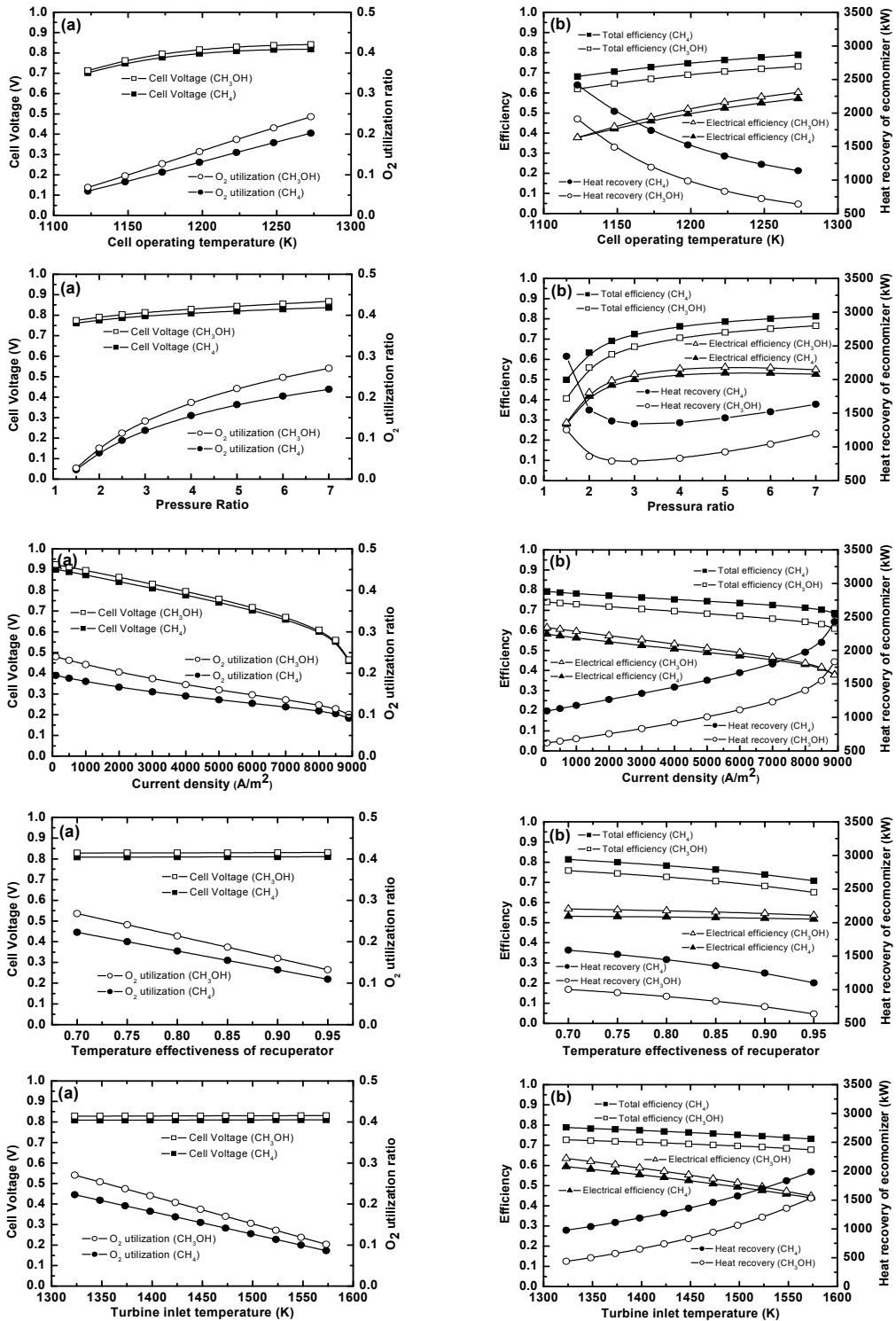


Figure 8: Comparison of performances

3.8 성능비교

Figure 8-(a),(b)는 본 시스템의 성능 특성을 같은 조건에 대한 메탄의 결과[7]와 비교하여 나타낸 것이다. 유기전압, 스택의 산소 이용률, 전기적 효율 및 총 효율의 비교 결과는 성능 검토 변수들과는 무관하게 연료의 종류에 따라 동일한 경향을 보인다.

Figure 8-(a)에서 유기전압이 약간의 다른 것은 두 연료의 개질온도와 양론상의 S/C가 달라 개질기 후단의 가스 조성에 차이를 보이기 때문으로 메탄올의 경우가 전 범위에서 약간 높게 나타난다. 이로 인하여 스택 산소 이용률도 메탄올의 경우가 높게 나타난다.

Figure 8-(b)는 메탄올의 전기적 효율이 메탄보다 높으나 총 효율에서는 반대의 경향으로 나타남을 보여준다. 메탄올 연료가 전기적 효율에서 다소 높게 나타나는 것은 셀의 유기전압이 약간 높은 것과 아울러 메탄의 시스템과 다르게 스택과 연소기 사이에 개질기를 두지 않아도 메탄올 시스템의 구성이 가능하여 TIT 일정을 위한 연소기의 소요 연료량이 감소하기 때문이다. 즉, 메탄 연료는 개질 온도가 높아 개질기와 예열기를 가스터빈 후단에 모두 설치하는 시스템의 구성은 불가능하기 때문이다. 한편 TIT를 높이면 메탄의 경우도 가능하겠지만 본 하이브리드시스템의 검토 범위 내에서는 가스터빈, 예열기, 개질기의 내열 한계에 문제가 발생하게 된다. 또한 메탄 연료의 총 효율이 높게 나타나는 것은 가스터빈 후단의 에코노마이저에서 회수 가능한 열량이 증가하기 때문이다. 즉, 메탄올 시스템의 경우는 가스터빈 후단에서 개질기, 연료 증발기의 추가적인 열원이 요구되기 때문이다.

4. 결 론

본 논문은 액체연료인 메탄올을 수소운반체로 사용한 연료전지(SOFC)와 가스터빈 하이브리드시스템의 구성과 성능평가에 대한 시뮬레이션으로 스택의 작동온도와 전류밀도, 가스터빈 압력비, 공기 예열기 온도효율 그리고 TIT가 시스템의 성능에 미치는 영향 등을 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 메탄올 연료의 성능 특성은 메탄 연료의 경우와 정성적으로 거의 동일한 변화 경향을 보여 준다.

(2) 유기전압과 전기적 효율은 메탄 연료와 비교하여 메탄올 연료가 약간 높게 나타난다.

(3) 총 효율은 메탄 연료와 비교하여 메탄올 연료가 낮게 나타난다.

후 기

본 연구는 국토해양부(한국해양수산기술진흥원) 해양과학기술연구개발사업 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김명환, "선박 동력발생용 연료전지시스템 기술개발의 전망에 대한 고찰", (사)한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 제8호, pp. 924-931, 2007.
- [2] James Larminie, Andrew Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Wiley, 2003
- [3] T. Aicher, B. Lenz, F. Gschnell, U. Groos, F. Feferici, L. Caprile, and L. Parodi, "Fuel processors for fuel cell APU application", Journal of Power Sources, vol. 154, pp. 503-508, 2006.
- [4] Gunther Kolb, Fuel Processing, WILEY-VCH, 2008
- [5] Qimin Ming, Todd Healey, Lloyd Allen, and Patricia Irving, "Steam reforming of hydrocarbon fuels", Catalysis Today, vol. 77, pp. 51-64, 2002.
- [6] Thomas S. Christensen, "Adiabatic preforming of hydrocarbons", Applied Catalysis, vol. 138, pp. 285-309, 1996.
- [7] 김명환, "선박동력용 SOFC/GT 하이브리드 시스템의 성능 및 안전성 해석", (사)한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제4호, pp. 484-496, 2009.
- [8] 김명환, "안전성을 고려한 선박용 SOFC시스템의 성능해석에 관한 연구", (사)한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제2호, pp. 233-243,

2009.

- [9] Finn Joensen, Jens R. Rostrup-Nielsen, "Conversion of hydrocarbons and alcohols for fuel cells", Journal of Power Sources, vol. 105, pp. 195-201, 2002.
- [10] F. Mueller, F. Jabbari, R. Gaynor, J Brouwer, "Novel solid oxide fuel cell system controller for rapid load following", Journal of Power Sources, vol. 172, pp. 308-323, 2007.

저 자 소 개



오세진(吳世眞)

1972년 5월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 2000, 2003년 동 대학원 졸업(석사, 박사), 2월 현재 한국해양대학교 운항훈련원 실습전담교원
 ※ 관심분야: 전동기속도제어, 인버터 및 컨버터



임태우(林兌禹)

1970년생 6월생, 1995년 부경대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1997년 부경대학교 대학원 기관학과 졸업(공학석사), 2002년 일본 큐슈대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 2005년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수



김종수(金宗洙)

1970년 6월생, 1994년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1998, 2002년 동 대학원 졸업(석사, 박사) 현재 한국해양대학교 해사대학 선박전자기계공학부 조교수
 ※ 관심분야: 전동기속도제어, 전력전자, 인버터



길병래(吉炳來)

1957년 11월생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 2000년 부경대학교 음향 진동공학과(공학석사), 1996년~현재, 한국 해양대학교 기관시스템공학부 교수, 관심분야 : 음향진동



박상균(朴相均)

1974년 10월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 2001년 한국해양대학교 대학원 기관학과 졸업(공학석사), 2005년 일본 북해도대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 (사)한국선급 에너지환경사업단 근무



김만응(金晩應)

1980년 한국해양대 기관공학과 졸업, 2005년 한국해양대학교 대학원 기계공학과(공학박사), 현재 (사)한국선급 에너지환경사업단 단장



이경진(李慶眞)

1988년 2월생, 2010년 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 졸업(공학사), 2010년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학과 열·유체전공, 선박용 연료전지시스템 연구실 석사과정



오진숙(吳眞淑)

1987년 4월생, 2010년 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 졸업(공학사), 2010년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학과 열·유체전공, 선박용 연료전지시스템 연구실 석사과정



김명환(金明煥)

1959년생 1월생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업(공학사), 1983년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(공학석사), 1994년 일본 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1984년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수