

메탄올 연료형 SOFC 시스템의 성능 평가

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

(원고접수일: 2010년 2월 5일, 원고수정일: 2010년 5월 11일 심사완료일: 2010년 5월 11일)

Performance Analysis of Methanol Fueled Marine Solid Oxide Fuel Cell System

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

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 연료전지시스템의 성능 특성을 분석한 것으로 공기극 입구온도 일정의 조건에서 스택의 작동온도, 전류밀도, S/C, 수소연료 이용률의 영향을 시뮬레이션으로 검토하고 있으며, 그 결과를 기체연료인 메탄의 경우와 비교하고 있다.

주제어: 선박동력시스템, 고체산화물형 연료전지, 시스템 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 system and to analyze the influence of operating temperature, current density, S/C, and H₂ utilization ratio.

Key words: Ship power system, Solid oxide fuel cell, System performance analysis, Methanol

1. 서론

GHG 및 대기오염물질 배출 규제는 선박에서도 예외가 아니며 다양한 극복 방법이 검토되고 있다. 가능한 화석에너지의 사용량을 줄이기 위하여 태양광, 풍력 등과 같은 재생에너지의 이용이 고려되고 있지만 선박의 추진 출력을 대신하기에는 부족함이

크다. 원자력의 이용도 재검토되고 있으나 안전상의 문제를 극복하기는 힘들 것으로 보인다. 최근 친환경적이며 효율을 획기적으로 개선할 수 있는 방법 중의 하나로 연료전지시스템을 선박동력발생용으로 채용하는 방안이 신중히 검토되고 있으며 상업화를 위한 움직임도 활발해지고 있다[1].

[†] 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

많은 연료를 저장해야 하는 대형 선박의 경우에는 초저온의 액체 또는 초고압 가스 상태의 수소를 직접 저장하는 방식은 안전성, 간편성, 용량성의 측면에서 바람직하지 못하며 부하에 따라 쉽게 수소화할 수 있는 상온 액체상태의 연료 저장이 더욱 효과적일 것으로 보인다. 수소화가 쉬운 액체연료(수소운반체)로는 LNG가 있으나 상압 하에서 -162°C의 저온을 취급해야 하므로 특수한 선박(LNG선)을 제외하고 일반적인 사용은 제한될 것 같다. 따라서 상온, 상압에서 액체 상태이고 저장성이 좋으며 수소화 개질이 용이한 물질로 메탄올, 에탄올, DME 등과 같은 수소운반체들이 연료로 검토되고 있다[2, 3].

본 논문은 메탄올을 연료로 한 고체산화물형 연료전지(SOFC) 시스템의 구성과 성능평가에 대한 시뮬레이션 모델링으로 공기극 입구온도 일정 조건하[4]에서 스택의 작동온도(COT)와 전류밀도, S/C(Steam/Carbon ratio, 수증기 몰수/연료 중 탄소 몰수), 수소연료 이용률이 시스템의 특성에 미치는 영향 등을 검토한 것이다.

연료극의 출기가스는 예열기의 현열 열원으로 사용되고 S/C의 비율에 따라 개질기 및 연소기로 송출된다. 전기화학 반응용 산소는 공기의 형태로 송풍기와 1, 2단의 예열기를 거쳐 셀의 공기극으로 보내어진다. 또한 공기는 스택의 냉각작용도 겸하게 된다. 연료극에 공급된 수소와 일산화탄소는 공기극과 전해질 층을 통과한 산소 음이온과 전기화학 반응하여 수증기와 이산화탄소를 생성하면서 전자를 방출하게 된다. 연료극 출구의 미반응가스는 2단 공기예열기를 거친 공기극의 출기가스와 연소기에서 혼합 연소되며 고온의 연소가스는 1단 공기예열기, 개질기, 증기발생기, 메탄올 증발기의 열원으로 재사용되고 외부로 토출된다. 공기극 및 연료극 입구온도는 효율, 냉각성, 열적 균열 파손 등을 고려하여 스택 공급유체 최저온도(COT-200 K)로 하였고[5, 6], 1단 공기예열기의 출구 온도는 예열부하의 적절한 분담에 따라 COT-500 K로 하였다. 개질기 작동온도는 500 K 그리고 본 연료전지 시스템의 전기적 출력은 3,000 kW를 기준으로 하였다.

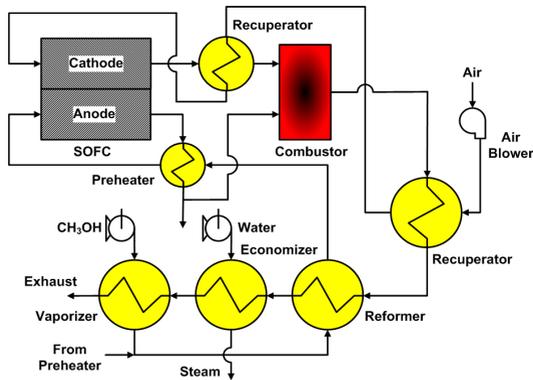


Figure 1: Layout of methanol fueled SOFC system

2. 메탄올 연료형 SOFC시스템

Figure 1은 본 연구의 메탄올 연료형 SOFC 시스템의 구성도이며 개질기는 재순환 수증기 외부개질방식을 채택하고 있다.

증발기로 공급된 메탄올은 기화하여 다량의 수증기를 함유하고 있는 연료극 출기가스와 혼합되며 개질기와 예열기를 거쳐 연료극으로 보내어진다.

3. 시스템 성능평가 결과

3.1 시스템 모델링 및 계산 조건

시스템의 성능평가를 위한 해석 모델링과 조건은 참고문헌 [7]과 같으므로 기술을 생략한다.

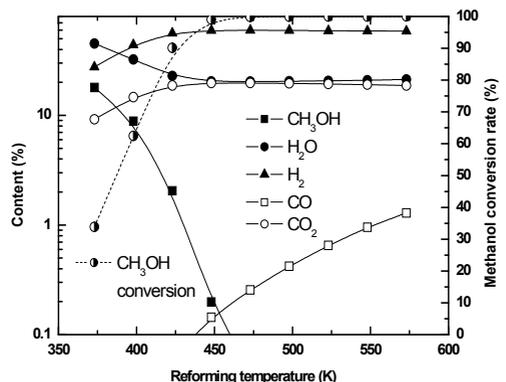


Figure 2: Reforming characteristics

3.2 수증기개질

메탄올의 수증기 개질반응은 기본적으로 아래와

같은 분해반응과 전이반응으로 이루어진다.

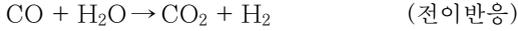


Figure 2는 S/C=2로 메탄올과 수증기를 개질기에 공급하였을 경우에 대한 메탄올 개질물 및 개질기 출구가스 조성을 반응 온도별로 나타낸 것이다. 그림으로부터 개질물 95% 이상을 위해서는 반응온도가 450 K 이상 되어야 함을 알 수 있다. 또한 개질기 출구가스의 조성은 반응온도 500 K에서 수소 59.54%, 일산화탄소 0.42%, 이산화탄소 19.57%, 수증기 20.45%, 메탄올 0.02%임을 보인다. 메탄의 개질 결과[7]와 비교하면 비교적 낮은 온도에서 개질반응이 진행되는 메탄올의 특성에 따라 전이반응의 빠른 진행으로 일산화탄소의 농도는 낮고 이산화탄소의 농도는 높게 나타난다. 아울러 같은 비교에서 메탄올은 수증기의 물분율은 낮게 수소의 물분율은 높게 나타난다.

3.3 스택 작동온도의 영향

Figure 3-(a), (b), (c)는 전류밀도=3000 A/m², S/C=2, 수소연료 이용률=80%인 경우 시스템 특성에 대한 스택 작동온도의 영향을 나타낸 것으로 Figure 3-(a)는 셀의 유기전압과 공급공기의 산소이용률을 Figure 3-(b)는 시스템의 전기적 효율과 열회수를 포함한 총 효율 그리고 Figure 3-(c)는 각부의 온도변화를 나타낸 것이다.

Figure 3-(a)로부터 작동온도가 높아짐에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 커짐을 알 수 있다. 유기전압의 증가는 작동온도 상승에 따른 가역 회로전압의 감소에도 불구하고 활성화 손실전압이 작아지는 효과가 크게 작용하기 때문이다. 또한 산소이용률이 증가하는 것은 활성화 손실전압이 작아지므로 셀의 열 발생이 줄어들어 소요되는 냉각 공기량이 감소하기 때문이다. 이것은 Figure 3-(b)에서 냉각 공기량에 따른 블로워 소요 동력의 변화로부터도 확인할 수 있다.

Figure 3-(b)에서 시스템의 전기적 효율은 작동온도의 증가와 함께 높아진다. 이것은 셀 유기전압의 증대와 블로워 소요 동력의 감소 때문으로 총

효율도 같은 경향을 보인다. 그리고 전기적 효율에 대한 총 효율의 증가는 메탄에 대한 결과[7]와 비교하여 크고 전 범위에서 나타나고 있다. 이것은 개질온도가 메탄의 경우와 비교하여 대단히 낮아 열에너지의 활용도가 증가하여 회수열량이 늘어나는 효과 때문이다.

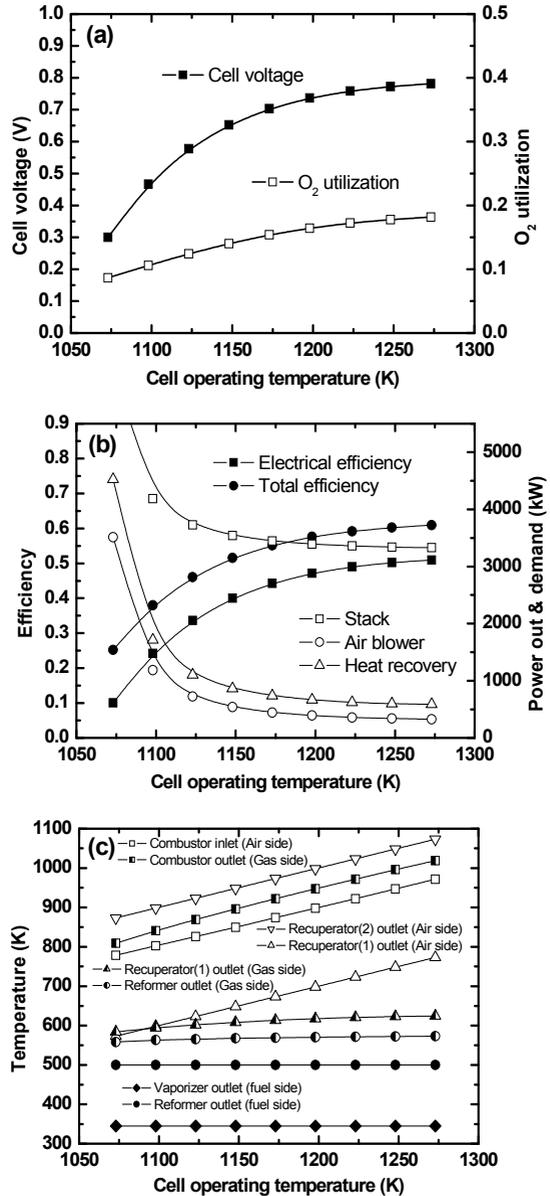


Figure 3: Effect of cell operating temperature

Figure 3-(c)는 시스템 각 부의 온도를 나타낸 것으로 성능평가 시스템의 조건에 따라 연료계통은 거의 일정한 온도를 유지하나 공기계통은 작동온도의 상승과 더불어 증가함을 보여준다.

3.4 전류밀도의 영향

Figure 4-(a),(b)는 작동온도=1223 K, S/C=2, 수소연료 이용률=80%인 경우 시스템 특성에 대한 셀 전류밀도의 영향을 나타낸 것이다.

Figure 4-(a)로부터 전류밀도가 높아짐에 따라 셀 유기전압과 산소이용률이 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 전류밀도의 증가와 함께 활성화, 저항, 농도 손실전압이 증가하여 유기전압이 감소하는 영향과 손실전압에 따른 발열량의 증가로 냉각용 공기량이 증대하기 때문이다. 이것은 Figure 4-(b)에서 늘어나는 냉각 공기량에 따른 블로워 소요 동력의 증가로부터도 확인할 수 있다.

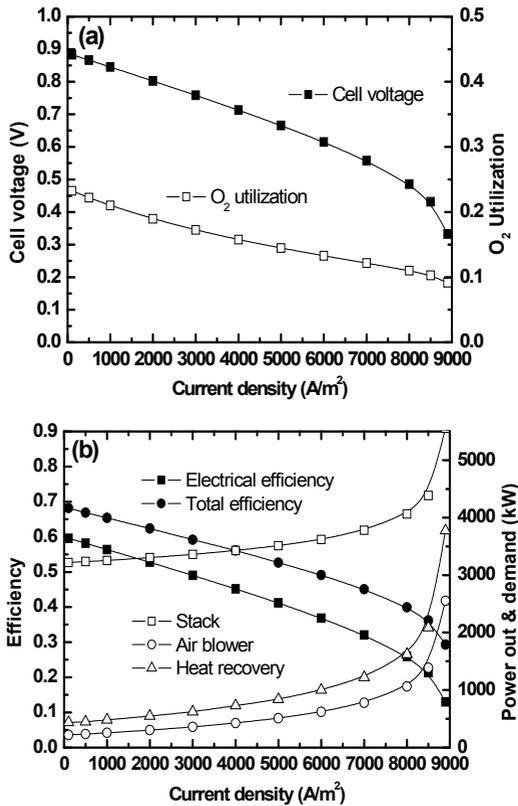


Figure 4: Effect of cell current density

Figure 4-(b)는 전류밀도가 높아짐에 따라 유기전압이 줄어들고 블로워 소요 동력이 증가하는 결과로 전기적 효율이 감소하게 됨을 보여준다. 총 효율도 전기적 효율의 변화와 함께 감소하는 경향을 보이나 그 감소폭은 회수 열량의 증가에 따라 작아지고 있다. 그리고 Figure 3-(b)에서와 마찬가지로 전기적 효율에 대한 총 효율의 증가는 메탄 연료에 대한 결과와 비교하여 매우 크게 나타나고 있다.

3.5 S/C의 영향

Figure 5-(a),(b)는 작동온도=1223 K, 전류밀도=3000 A/m², 수소연료 이용률=80%인 경우 시스템 성능 특성에 대한 S/C의 영향을 나타낸 것이다.

Figure 5-(a)로부터 S/C의 증가에 따라 셀 유기전압은 약간 저하되나 산소이용률은 거의 변화가

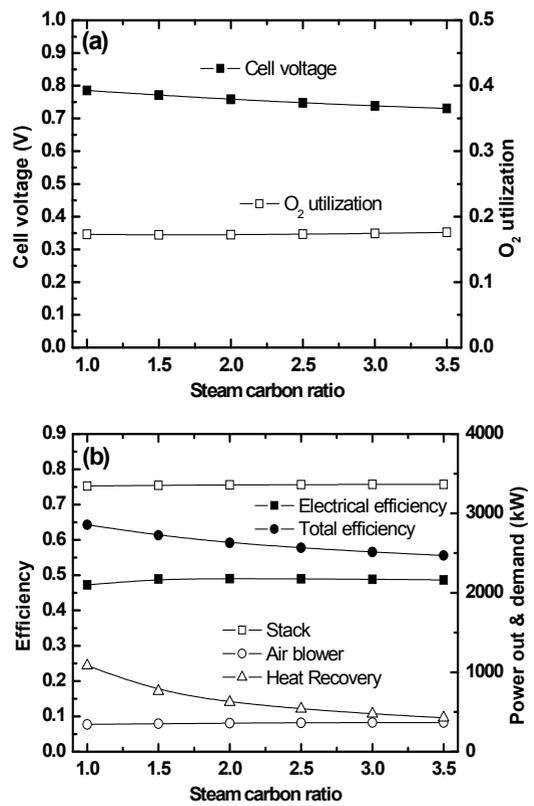


Figure 5: Effect of steam carbon ratio

없음을 알 수 있다. S/C의 증가는 스택 연료극 출구가스의 재순환율이 높아짐을 의미하므로 셀 연료극 입구 가스조성에서 수증기, 이산화탄소의 농도가 늘어나는 반면 수소 농도는 줄어들기 때문에 전기화학반응 네른스트 손실이 증가하여 유기전압을 감소시키는 결과가 초래된다.

Figure 5-(a)의 결과에 따라 S/C가 효율에 미치는 영향은 아주 작다는 것을 Figure 5-(b)는 보여준다. 다만 낮은 S/C의 영역에서 회수열량의 증가로 총 효율의 증가가 크게 나타난다. 이것은 재순환율의 감소로 연소기에 공급되는 미반응 연료량이 증가하기 때문이다.

3.6 수소연료 이용률의 영향

Figure 6-(a),(b)는 작동온도=1223 K, 전류 밀도=3000 A/m², S/C=2인 경우 시스템 성능 특성에 대한 셀 수소연료 이용률의 영향을 나타낸 것이다.

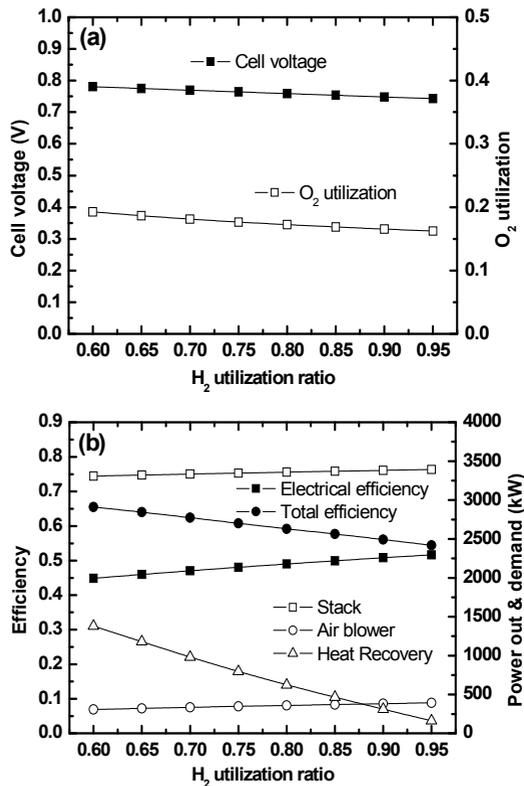


Figure 6: Effect of H₂ utilization ratio

Figure 6-(a)로부터 셀의 수소이용률이 높아짐에 따라 유기전압과 산소이용률이 다소 감소하고 있음을 볼 수 있다. 유기전압이 감소하는 것은 수소이용률의 증가와 함께 셀 출구측 수소농도가 감소하여 네른스트 손실이 증가하기 때문이고, 산소이용률이 감소하는 것은 유기전압의 감소와 함께 냉각공기의 소요량이 증가하기 때문이다.

Figure 6-(b)는 수소연료 이용률의 증가에 따른 유기전압의 감소에도 불구하고 전기적 효율이 오히려 증가하고 있음을 보여주는데 이것은 수소연료 이용률이 증가함에 따라 출력대비 메탄올 연료의 공급량이 줄어들기 때문이다. 전기적 효율과 반대로 총 효율이 감소하는 것은 수소연료 이용률의 증가에 따라 연료극 출구 즉, 연소기 입구의 미반응 연료량이 감소하기 때문이다.

4.7 성능비교

Figure 7-(a),(b)는 본 시스템의 성능 특성을

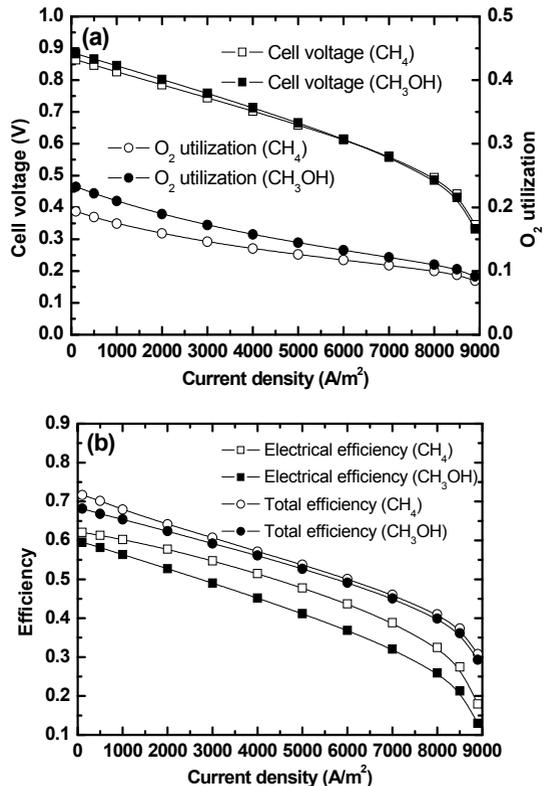


Figure 7: Comparison of performances

같은 조건에 대한 메탄 연료의 성능 특성[7]과 비교하여 나타낸 것이다.

유기전압에는 큰 변화가 없으나 저전류밀도 영역에서 메탄올 연료의 경우가 다소 크게 나타나며 산소이용률에도 그 영향이 나타나고 있음을 Figure 7-(a)는 보여준다. 이것은 각 연료가 개질에 따라 출구가스 조성이 변화하는 영향으로 보인다.

Figure 7-(b)로부터 전기적 효율과 총 효율 모두에서 메탄 연료의 경우가 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이것은 메탄올의 개질에 의해 만들어지는 발열량 기준대비 수소량이 메탄과 비교하여 작기 때문이다. 그러나 총 효율의 경우에는 그 차이가 크지 않다. 즉 메탄올의 경우 개질온도가 대단히 낮아 열에너지의 활용도가 증가하여 회수 가능한 열량이 크게 늘어나기 때문이다.

4. 결 론

본 논문은 액체연료인 메탄올을 수소운반체로 사용한 연료전지(SOFC)시스템의 구성과 성능평가에 대한 시뮬레이션 모델링으로 공기극 입구온도 일정 조건하에서 스택의 작동온도, 전류밀도, S/C, 수소연료 이용률이 본 시스템의 특성에 미치는 영향 등을 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

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

(2) 전기적 효율은 메탄의 경우와 비교하여 메탄올 연료가 개질 특성에 따라 낮게 나타난다.

(3) 총 효율도 메탄의 경우와 비교하여 다소 작은 경향을 보이거나 전기적 효율만큼 크지는 않다.

(4) 메탄올의 경우 열에너지의 활용도가 높고 회수 가능한 열량이 크기 때문에 가스 또는 스팀 터빈을 복합한 하이브리드 시스템을 통하여 전기적 효율 개선의 높은 가능성을 보인다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 김명환, "선박 동력발생용 연료전지시스템 기술 개발의 전망에 대한 고찰", 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, L. Parodi, "Fuel processors for fuel cell APU application", Journal of Power Sources, vol. 154, pp. 503-508, 2006.
- [4] 김명환, "선박동력용 SOFC/GT 하이브리드시스템의 성능 평가(터빈 냉각 및 공기극 입구온도 일정 조건을 중심으로)", 한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제8호, pp. 1107-1115, 2009.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 김명환, "안전성을 고려한 선박용 SOFC시스템의 성능해석에 관한 연구", 한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제2호, pp. 233-243, 2009.

저 자 소 개



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

**길병래(吉炳來)**

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

**이경진(李慶眞)**

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

**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

**오진숙(吳眞淑)**

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

**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

**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

**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