

선박 전원용 고체산화물형 연료전지(SOFC) 시스템의 스택 공급 가스의 열관리 문제에 관한 연구

박상균[†] · 김만응¹

(원고접수일 : 2011년 6월 30일, 원고수정일 : 2011년 8월 31일, 심사완료일 : 2011년 9월 28일)

A Study on Thermal Management of Stack Supply Gas of Solid Oxide Fuel Cell System for Ship Applications

Sang-Kyun Park[†] · Mann-Eung Kim¹

요약 : 본 연구에서는 선박 전원용 SOFC 시스템에 대한 HIL(Hardware-In-the-Loop)을 구축하기 위하여 실시간 코드 생성이 가능한 연료전지 시스템 모델을 개발을 하였다. 또한, 메탄을 연료로 사용한 내부개질형 500kW급 고체산화물형 연료전지 시스템에서 연료전지 스택으로 공급되는 애노드와 캐소드 공급 가스의 온도 차이를 최소화하기 위하여 연료전지 스택 배기가스의 유량 분배, 연료 및 공기 공급 유량, 공급 공기 온도의 영향이 애노드 및 캐소드 공급 가스의 온도 특성과 연료전지 스택 출력 및 시스템 효율 등에 미치는 영향에 관하여 검토하였다. 그 결과 터빈 출구에 위치한 3-Way 밸브의 위치가 0.839에서 애노드와 캐소드 공급 가스 온도가 약 830K에서 동일하게 유지됨을 알 수 있었다. 또한, 애노드와 캐소드 공급 가스 온도를 높이기 위해서는 연료전지 스택 및 시스템 효율을 충분히 고려하여 메탄 공급 유량을 최적화하는 프로세스가 필요함을 알 수 있었다.

주제어 : 온실가스, 열관리, 선박, 고체산화물형 연료전지, 시스템 성능

Abstract: In this research, the fuel cell system model capable of generating codes in real time was developed to construct of a HIL (Hardware-In-the-Loop) for a SOFC-powered ship. Moreover, the effects of the distribution of the exhaust gas flow rates in a stack, the flow rates of fuels and temperature of air supplied on the temperature characteristics of fuels supplied to the cathode and the anode, the output power of the stack and system efficiency are examined to minimize the temperature difference between fuels supplied to the stack used in a 500kW SOFC system using methane as a fuel. As a result, the temperatures of fuels supplied to the cathode and the anode maintain at 830K when the opening factor of three-way valve located at outlet of turbine is 0.839. Also the process for optimization of methane flow rate considering the fuel cell stack and system efficiency is required to increase the temperatures of fuels supplied to the stack.

Key words: Greenhouse gas (GHG), Heat management, Ship, Solid oxide fuel cell, System performance

1. 서 론

IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)의 “Second GHG Study 2009”에 의하면 해운분야는 전 세계 온실가스 배출량의 3.3%를 차지

하고 있으며, 국제해운 부분이 2.7%, 국내해운 및 어선이 0.6%를 차지하는 것으로 보고되고 있다[1].
근년 IMO에서는 선박에서 배출되는 GHG를 저감하기 위해서 신조선에 대한 에너지효율설계지표

[†] 교신저자(사단법인 한국선급 녹색산업기술원, E-mail:skpark@krs.co.kr, Tel: 042-869-9507)

¹ 한국선급 녹색산업기술원

(EEDI), 현존선에 대한 에너지효율운항지표(EEOI), 선박효율관리계획서(SEMP), 시장기반조치(MBM) 등의 다양한 사항에 관해서 논의 중에 있다[2]. 따라서 IMO의 EEDI 요건의 도입에 따른 선박의 에너지효율 향상을 위한 다양한 기술들의 도입이 예상되어지고 있다[3]. 이러한 기술들 중에 장기적이고 근본적으로 선박으로부터 배출되는 대기오염물질을 저감하기 위한 방안 중의 하나로 연료전지(Fuel Cell) 기술의 선박 적용이 고려되어지고 있다[4-13]. 이미 다양한 연료전지 형식 중에서 고체고분자형 연료전지(PEMFC)[4,7], 용융탄산염형 연료전지(MCFC)[5,7] 및 고체산화물형 연료전지(SOFC)[6] 각각의 형식에 대한 해상환경에서의 실증 연구가 진행되어지고 있다. 앞서 기술한 연료전지 형식 중에서 현재 가장 기술개발 수준이 낮은 단계에 있는 SOFC의 경우 향후 고온형 연료전지 시장을 주도할 것으로 기대되어지고 있으며, SOFC 시스템의 모델링 관점에서의 연구도 진행되어지고 있다[8-14].

본 연구에서는 선박 전원용 SOFC 시스템에 대한 설계 및 성능평가 기반을 구축하기 위한 수단으로 HIL(Hardware-In-the-Loop)의 구축을 목표로 하여, 실제의 연료전지 시스템 플랜트를 대신하여 Matlab/Simulink 상용프로그램을 활용하여 실시간 코드 생성이 가능한 모델을 개발을 하였다. HIL 시스템은 실제 플랜트를 대신하여 수학적 모델링을 통하여 만들어진 모델을 실시간으로 실행시켜서 외부 인터페이스를 붙여서 플랜트 이외의 부분에 실제 하드웨어가 있는 것처럼 여기도록 하여 플랜트의 동역학 부분을 소프트웨어로 대체하는 기술이다. 본 논문에서는 실시간 코드 생성 전 단계에서 메탄을 연료로 사용한 내부개질형 500kW 급 고체산화물형 연료전지 시스템을 개발하여 연료전지 스택으로 공급되는 애노드 및 캐소드 공급 가스의 온도차를 최소화하기 위하여 연료전지 시스템의 열관리 측면에서의 다양한 검토를 수행하였다. 연료전지 스택에서의 배기가스의 유량분배, 연료 및 공기의 공급 유량, 공급 공기 온도의 영향이 애노드 및 캐소드 공급 가스의 온도 특성과 연료전지 스택 출력 및 시스템 효율 등에 미치는 영향에 관하여 검토하였다.

2. 해석모델 및 모델링 조건

2.1 해석 모델

본 모델에서 사용된 연료전지 시스템에서의 질량과 에너지 보존 방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_{inlet} - \sum \dot{m}_{outlet} \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dt} = \sum \dot{H}_{inlet,i} - \sum \dot{H}_{outlet,j} + \sum \dot{Q}_k + \sum P_m \quad (2)$$

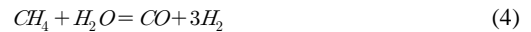
여기서, m 은 질량(mol), \dot{m}_{outlet} 은 스택 출구 유량(mol/s). \dot{m}_{inlet} 은 스택 입구 유량(mol/s), U 는 내부 에너지, $\dot{H}_{inlet,i}$ 는 엔탈피 입력, $\dot{H}_{outlet,j}$ 는 엔탈피 출력, \dot{Q}_k 는 열 흐름, P_m 은 기계적 출력이다.

연료전지 스택에서의 전류(A)는 수소 몰수에 비례하고 셀 수에 반비례하고 본 연구에서는 셀의 수 750개, 셀의 반응면적 0.35m^2 에서 다음의 식으로 전류가 계산되어진다.

$$I = \frac{2F \cdot \dot{H}_{2,mol}}{n} \quad (3)$$

여기서, F 는 Faraday Constant(C), $\dot{H}_{2,mol}$ 은 반응 수소 몰유량(mol/s), n 은 셀의 수(-)이다.

연료전지 내부에서의 개질 반응에 따른 수소 생성은 다음의 화학 평형식에 의해서 이루어지며 열 생성이 동시에 계산되어진다.



연료전지 스택 내부에서 반응되지 않고 배출되는 메탄과 수소는 다음의 평형식에 의해서 연소기에서 연소되어지게 된다.



연료전지 스택과 시스템 효율은 다음과 같이 계산되어진다.

$$\eta_{stack} = \frac{P_{stack}}{m_{fuel} \cdot LHV_{fuel}} \quad (8)$$

$$\eta_{system} = \frac{P_{stack} - P_{air} - P_{compressor} - P_{pump} + P_{turbine}}{m_{fuel} \cdot LHV_{fuel}} \quad (9)$$

여기서, P_{stack} 는 스택 출력(kW), m_{fuel} 은 연료유 유량(mol/s), LHV_{fuel} 은 연료유 저위발열량(KJ/mol), P_{air} 는 공기 압축기 소비 전력(kW), $P_{compressor}$ 는 압축기 소비 전력(kW), P_{pump} 는 펌프 소비 전력(kW), $P_{turbine}$ 는 터빈 생산 전력(kW)이다.

2.2 시스템 구성

본 연구에서는 메탄을 연료로 사용한 내부개질형 500kW급 고체산화물형 선박용 연료전지 시스템의 연료전지 스택에서 배출되는 미반응 가스를 활용한 폐열의 유량 조절을 통하여 애노드 및 캐소드로 공급되는 가스의 온도 차이를 최소로 하는 것을 목표로 하고 있다.

Figure 1의 연료전지 시스템 개략도에서 알 수 있듯이 공기 압축기에서 공급된 공기는 열교환기1을 통과하여 연료전지 스택의 캐소드 측으로 공급된다. 연료인 메탄과 개질반응에 필요한 물은 각각 열교환기2와 3을 통과하여 믹스에서 혼합되어져 연료전지 스택의 애노드 측으로 공급된다. 애노드와 캐소드 측으로 공급되어진 가스는 연료전지 스택 내부의 화학반응에 의해서 소비된다. 화학반응이 이루어지지 않은 메탄과 개질반응으로 발생된 수소 중의 미반응 가스는 스택 출구에서 합쳐져서 연소기로 공급된다. 연료전지 스택에서 배출되는 미연소 가스인 메탄과 수소는 연소기에서 완전 연소가 이루어진다.

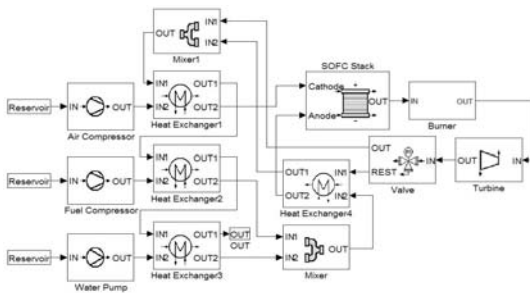


Figure 1: Layout of SOFC system

연소기에서 연소된 가스를 이용하여 터빈을 구동하여 전력 얻고 고온의 가스는 3-Way 밸브로 이동된다. 3-Way 밸브에서는 애노드 및 캐소드 공급 가스를 가열하기 위한 열원으로 사용되어지는 가스의 유량을 조절한다. 밸브 위치가 0의 경우는 가스가 전부 REST 방향으로 흘러 열교환기 4번으로 공급되어 애노드 공급 가스를 먼저 가열하고, 믹스 1을 통과해서 열교환기 1번에서 공기 압축기에서 토출된 공기를 가열하게 된다. 반대로 밸브 위치가 1의 경우는 가스가 전부 OUT 방향으로 흘러 믹스 1을 통과하여 열교환기 1번에서 공기를 가열하는 열원으로 활용된다.

본 연구에서의 연료전지 시스템 운전의 기본적인 조건은 메탄 공급 유량 1.496(mol/s), 공기 공급 유량 20.797(mol/s), 물 공급 유량 3.886(mol/s), 메탄과 공기 및 물의 공급 온도는 298.15(K), 압력은 320(kPa), 터빈의 출구 압력은 100(kPa)로 가정하였다. 계산 결과는 연료전지 시스템이 안정화된 상태에서의 결과를 나타내고 있다.

3. 해석결과

3.1 배기가스 유량 분배의 영향

Figure 2는 터빈 출구부에 위치한 3-Way 밸브의 위치에 따른 애노드와 캐소드 연료전지 스택 공급 가스 온도(Anode IN, Cathode IN), 연료전지 스택 출구 가스 온도(FC OUT), 연료전지 스택 출력(Power), 전압(Voltage) 및 전류(Ampere), 연료전지 스택 및 시스템의 효율(FC Effic., Sys Effic.)의 계산 결과이다.

밸브의 위치가 1에 가까울수록 공급 공기를 가열하기 위하여 캐소드 쪽으로 보내어지는 가스의 유량이 증가함을 의미한다. Figure 2 (a)에서 알 수 있듯이 밸브 위치가 0에서 0.6까지 증가할 경우의 애노드 공급 가스 온도는 1024K에서 1005K로 감소하고, 캐소드 공급 가스 온도는 790K에서 795K로 상승하지만 큰 폭의 온도 변화는 보이고 있지 않는다. 또한 애노드와 캐소드 공급 가스의 온도 차이가 약 200K 정도로 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 실제의 연료전지 시스템을 운전 할 경우에는 연료전지 스택으로 공급되는 애노드와 캐

소드 공급 가스의 온도 차이를 최소화 하거나 동일하게 공급하여야만 고온의 상태에서 운전되고 있는 연료전지 스택 내부에서 열응력으로 인하여 야기되는 문제들을 방지할 수 있을 것이다.

밸브의 위치가 0.6이상의 값이 되면서 애노드 공급 가스 온도가 급격하게 감소하고, 밸브의 위치 0.839에서 애노드와 캐소드 공급 가스의 온도가 약 830K에서 동일하게 되는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 이용되어진 연료전지 시스템의 구성에서는 애노드와 캐소드 공급 가스의 온도를 약 830K로 동일하게 공급이 가능하다는 것을 의미하는 것이다.

Figure 2 (b), (c)에서 보이는 것처럼 밸브의 위치가 변화하여도 연료전지 스택 출력은 560kW, 전압은 520V, 전류는 1079A, 연료전지 스택 효율은 46% 및 전체 시스템 효율을 54%로 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 애노드와 캐소드 공급 가스의 온도 차이가 발생하여도 연료전지 스택 내부에서의 화학반응은 스택의 출구 가스 온도에서 계산되어지게 되며, 밸브 위치에 따른 스택 출구 가스의 온도 차이는 약 46K 정도로 큰 변화가 보이지 않기 때문이다.

연료전지 시스템에 따라 애노드와 캐소드 공급 가스 온도를 830K보다 높은 온도로 유지가 필요한 경우를 가정하여 본 연구에 이용된 연료전지 시스템에 추가의 가열원을 설치하지 않고 애노드 및 캐소드 공급 가스의 온도를 증가시키기 위한 방향에 관하여 다음절에서 검토하였다.

3.2 연료 및 공기 공급 유량의 영향

본 절에서는 밸브 위치가 0.839에서 약 830K인 애노드 및 캐소드 공급 가스 온도를 증가시키기 위한 방안으로 메탄과 공기 공급 유량의 변화에 따른 연료전지 시스템의 운전 특성에 관해서 검토하였다.

Figure 3은 Figure 2의 계산 조건에서 3-Way 밸브의 위치를 0.839로 고정하고, 메탄 공급 유량만을 변경하였을 경우의 계산 결과를 나타낸 것이다. Figure 3 (a)에서 메탄 공급 유량이 증가할수록 애노드 및 캐소드 공급 가스의 온도가 증가하고 연

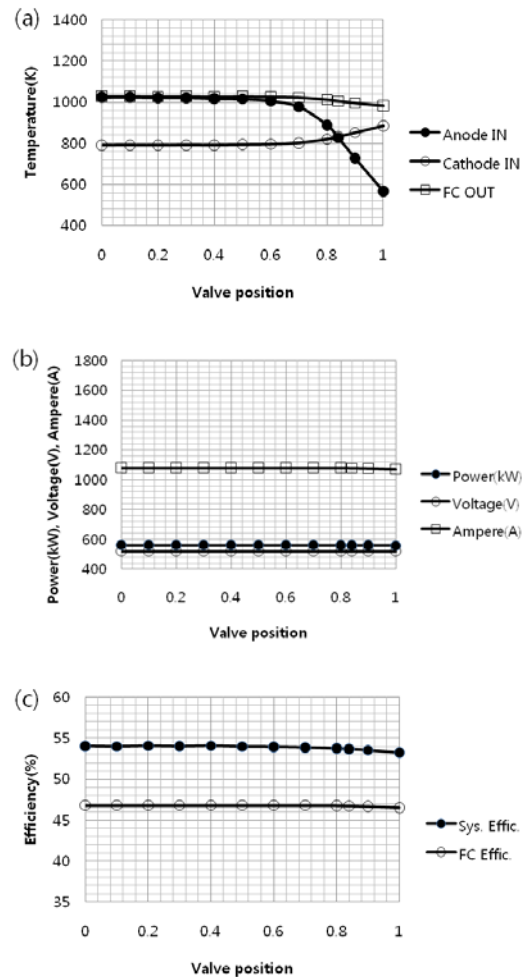


Figure 2: Effect of valve position

료전지 스택 출구 가스의 온도도 같이 증가함을 알 수 있다. 메탄 공급 유량의 증가는 동일한 수소 변환율을 가진 연료전지 스택 내부에서 수소 발생량이 증가하여 더 많은 화학에너지가 전기에너지로 변환되는 것을 의미한다. 따라서 Figure 3 (b)에서 보이는 것처럼 연료전지 스택에 더 많은 전류가 흐르게 되어 전류밀도가 상승하고, 이에 따라 과전압이 상승하여 전압은 낮아짐을 알 수 있다. 또한 과전압의 상승분만큼 연료전지 스택 내부에서의 열 발생량이 증가하여, 연료전지 스택 출구 가스 온도가 증가하고 스택 출구 가스 온도가 연료전지 시스템의 온도에 영향을 미치게 된다. 본

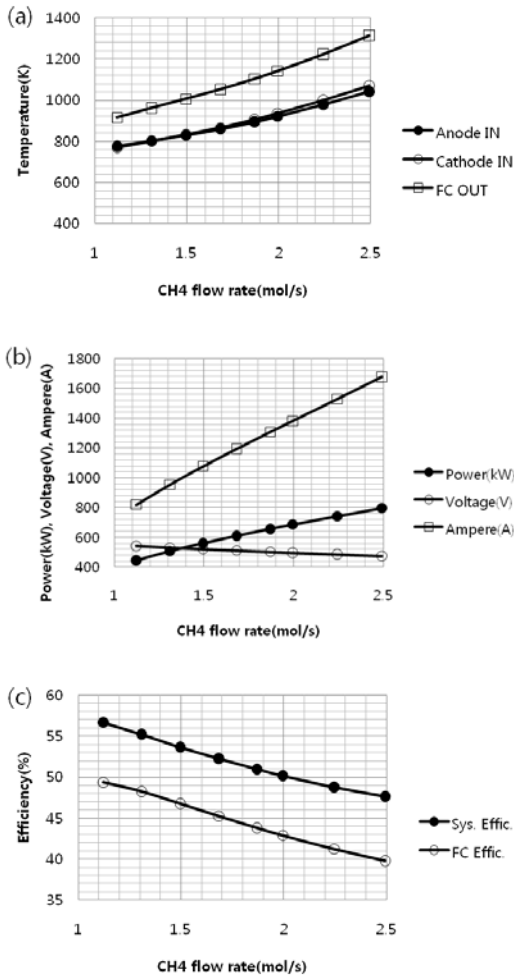


Figure 3: Effect of CH₄ flow rate

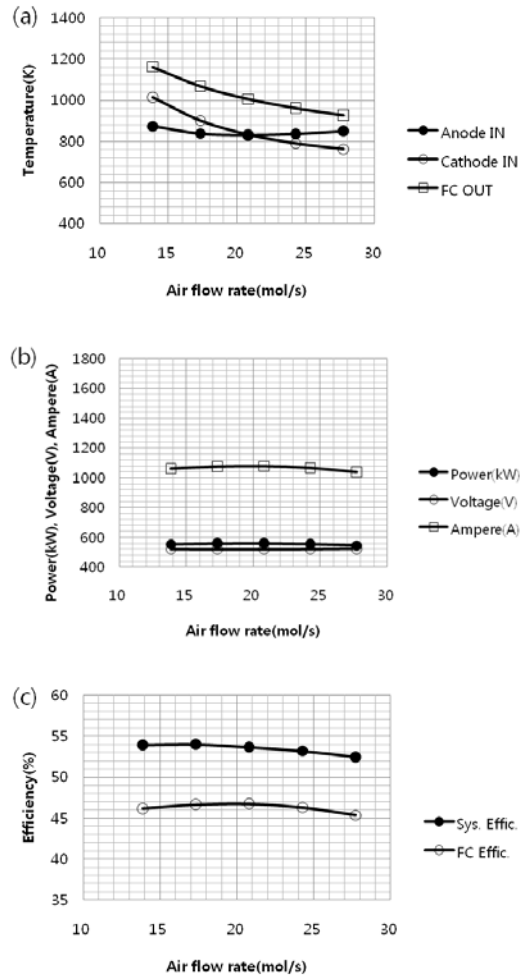


Figure 4: Effect of air flow rate

연구계산 범위의 메탄 공급 유량에서는 애노드와 캐소드 공급 가스의 온도차이가 최대 26K로 안정됨을 알 수 있다. 하지만 메탄 공급 유량을 증가시켜서 애노드 및 캐소드 공급 가스의 온도를 증가시키는 것은 가능하지만 Figure 3 (c)에서 보이는 것처럼 연료전지 스택 및 시스템 효율은 급격하게 낮아지는 것을 알 수 있다.

Figure 4는 Figure 2의 계산 조건에서 3-Way 밸브 위치를 0.839로 고정하고 공기 공급 유량만을 변경하였을 경우의 계산 결과를 나타낸 것이다. Figure 4 (a)에서 알 수 있듯이 Figure 2의 계산 조건보다 공기 공급 유량이 증가한 경우에는 캐소드

공급 가스 온도가 낮아지고, 공기 공급 유량이 감소한 경우에는 캐소드 공급 가스 온도가 증가함을 알 수 있다. 또한 애노드 입구 가스의 온도는 상대적으로 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 공급 공기 유량의 증가로 인하여 연료전지 스택의 냉각효과가 증대되어 연료전지 스택 출구 가스 온도가 낮아지기 때문이며, 낮아진 연료전지 스택 출구 가스의 온도가 전체 시스템의 온도에 영향을 주기 때문으로 판단되어 진다.

Figure 4 (b), (c)에서 보이는 것처럼 연료전지 스택의 출력은 메탄 공급량이 일정하기 때문에 공급 공기의 유량이 증가해도 큰 영향을 받지 않음

을 알 수 있다. 또한 공기 유량 증가에 따른 압축기의 소비 전력이 증가하여 연료전지 시스템 효율은 오히려 감소함을 알 수 있다.

다음에 애노드와 캐소드 입구 가스 온도가 동일하지 않은 조건에서의 메탄 공급 유량의 변화에 따른 영향을 검토하였다. Figure 5는 Figure 2의 계산 조건에서 3-Way 밸브 위치가 0.3과 1인 경우 메탄 공급량만을 변경하였을 경우의 계산 결과를 나타낸 것이다.

두 조건 모두에서 메탄 공급 유량의 증가에 따른 영향은 Figure 3의 조건에서의 계산 결과와 동일한 경향으로 애노드 및 캐소드 공급 가스의 온

도가 동시에 상승하고, 애노드와 캐소드 공급 가스의 온도 차이는 줄어들지 않음을 알 수 있다. 상기의 결과와 Figure 3의 조건에서의 결과를 종합하면, 연료전지 시스템의 운전시 애노드와 캐소드 공급 가스의 온도차가 발생하였을 경우에는 메탄 공급 유량을 조절하여도 온도 차이를 줄일 수 없음을 알 수 있다. 따라서 우선적으로 3-Way 밸브를 적절히 조절하여 애노드와 캐소드 공급 가스 온도 차이를 최소화한 후 연료전지 스택 및 시스템 효율을 고려한 메탄 공급 유량의 최적화를 위한 프로세스가 필요하리라 판단된다.

3.3 가열원(공기 공급 온도)의 이용

본 절에서는 캐소드 공급 가스의 온도 영향을 검토하기 위해서 임의의 열원을 설치하지 않고, 압축기 입구 공기 온도를 임의로 증가하였을 경우에 3-Way 밸브 위치에 따른 연료전지 시스템 운전 특성에 대해서 검토하였다.

Figure 6은 Figure 2의 계산 조건에서 공기 압축기 입구 온도만을 200K 증가하여 498.15K로 가정하여 계산을 한 결과를 보여주고 있다. 공기 압축기 입구 공기를 가열하기 위해서는 추가의 가열원이 필요하지만, 본 연구에서 이용된 연료전지 시스템 자체의 특성을 분석하기 위해서 본 계산에는 추가의 가열원에서 필요로 하는 소비전력은 연료전지 시스템의 효율 계산에서 제외 하였다.

Figure 6 (a)에서 알 수 있듯이 공기 압축기 입구 공기 온도를 증가함에 따라 캐소드 공기 공급 온도(Cathode IN(+200K))가 증가함을 알 수 있다. 특히 밸브 위치가 0.839에서는 애노드와 캐소드 가스 공급 온도가 기존의 830K에서 980K로 동일하게 상승함을 알 수 있다.

Figure 6 (b)에서 알 수 있듯이 연료전지 스택 출력에는 큰 변화가 없지만 Figure 6 (c)에서 보이는 것처럼 연료전지 시스템 효율이 약 4% 정도 낮아짐을 알 수 있다. 이는 공기 압축기 입구 온도의 증가에 따른 공기 압축기의 소비전력의 증가분이 연료전지 시스템 효율에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 캐소드 공급 가스의 온도를 올리기 위한 가열원은 압축기 출구쪽에 위치하는 것이 시스템의 효율 측면에서 유리하다는 것을 알 수 있다.

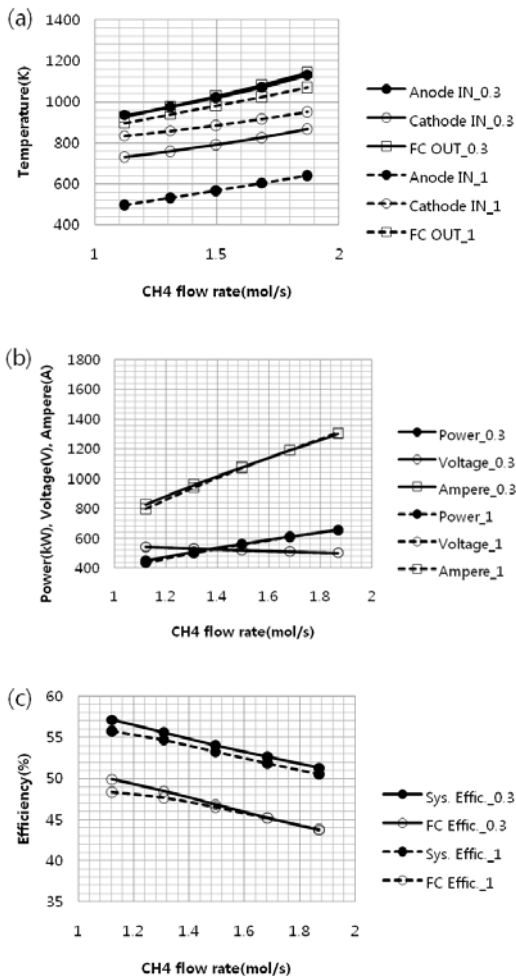


Figure 5: Effect of valve position

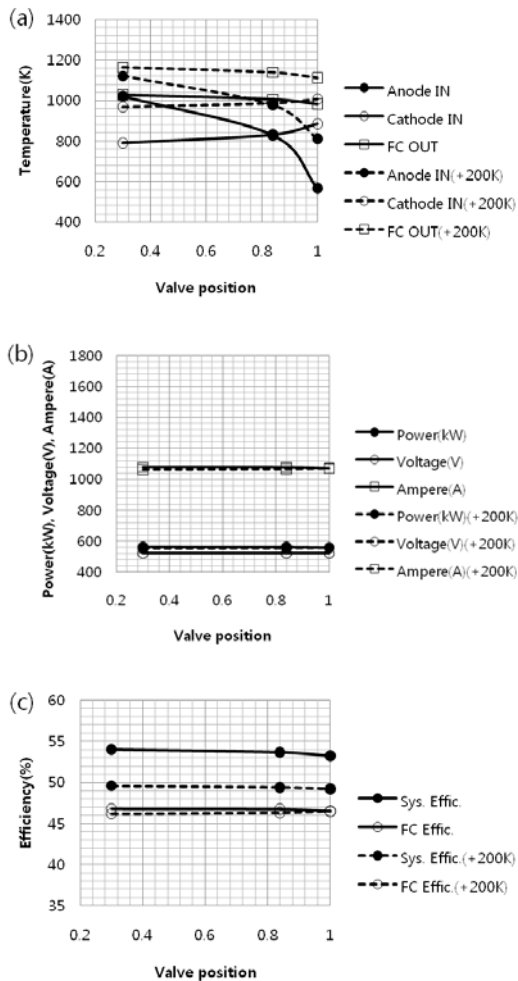


Figure 6: Effect of supply air temperature

4. 결 론

본 연구에서는 메탄을 연료로 사용한 내부개질형 500kW급 선박 전원용 고체산화물형 연료전지 시스템을 모델을 개발하여, 연료전지 스택으로 공급되는 애노드 및 캐소드 공급 가스의 온도차를 최소화하기 위한 시스템의 열관리 측면에서 연료전지 스택 배기가스의 유량분배, 연료 및 공기 공급 유량, 공급 공기 온도의 영향이 애노드 및 캐소드 공급 가스의 온도 특성, 연료전지 스택 출력 및 시스템 효율 등에 미치는 영향에 관하여 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 3-Way 밸브 위치 0.839에서 애노드와 캐소드 공급 가스 온도가 약 830K에서 동일하게 유지되는 것을 알 수 있었다. 이는 본 연구에서 이용되어진 연료전지 시스템의 구성에서는 애노드와 캐소드 공급 가스의 온도를 약 830K로 동일하게 공급이 가능하다는 것을 의미한다.

(2) 메탄 공급 유량을 증가시켜서 애노드와 캐소드 공급 가스 온도를 증가시키는 것은 가능하지만, 연료전지 시스템의 운전시 애노드와 캐소드 공급 가스의 온도차가 발생하였을 경우에는 메탄 공급 유량을 조절하여도 온도 차이를 줄일 수 없음으로 우선 3-Way 밸브를 적절히 조절하여 애노드와 캐소드 공급 가스 온도 차이를 최소화한 후 연료전지 스택 및 시스템 효율을 고려한 메탄 공급 유량의 최적화하는 프로세스가 필요함을 알 수 있었다.

(3) 밸브 위치가 0.839에서는 캐소드 공급 공기의 온도를 200K 높였을 경우 애노드와 캐소드 가스 공급 온도가 기존의 830K에서 980K로 동일하게 상승하였고, 캐소드 공급 가스의 온도를 올리기 위한 가열원은 압축기 출구쪽에 위치하는 것이 시스템의 효율 측면에서 유리하다는 것을 알 수 있었다.

(4) 본 시스템에서 외기로 버려지는 열원을 활용하여 압축기 출구의 캐소드 공급 공기의 가열원으로 활용하는 방안이 관한 검토가 필요하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 (한국해양과학기술진흥원) 해양과학기술연구개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] IMO, Second IMO GHG Study 2009, 2009.
 [2] 국토해양부, “제60차 해양환경보호위원회(MEPC 60) 회의 결과 보고, 2010.
 [3] (사)한국선급, 에너지절약형 선박기술 및 선박

발생 CO2 포집기술개발을 위한 기획연구, 국토해양부, 2010.

- [4] Zemship project : www.zemships.eu
 [5] FellowShip project : www.vikinglady.no
 [6] METHAPU project : www.methapu.eu
 [7] e4ship project : www.e4ships.de
 [8] 김명환, “안전성을 고려한 선박용 SOFC시스템의 성능해석에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제2호, pp. 233-243, 2009.
 [9] 김명환, “선박 동력발생용 SOFC/GT 하이브리드 시스템의 성능 및 안전성 해석”, 한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제4호, pp. 484-496, 2009.
 [10] 박상균, 노길태, 김만응, “선박 전원용 고체산화물형 연료전지(SOFC) 시스템 성능에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제35권, 제5호, pp. 582-589, 2011.
 [11] Farshid zabihian and Alan Fung, “A review on modeling of hybrid solid oxide fuel cell systems”, International Journal of Engineering (IJE), vol 3, no. 2, pp. 85-119, 2009.
 [12] C. Strazza, A. Del Borghi, P. Costamagna, A. Traverso and M. Santin., “Comparative LCA of methanol-fuelled SOFCs as auxiliary power systems on-board ships” Applied Energy, vol. 87, pp. 1670-1678, 2010.
 [13] Lawrence Kar Chung Tse, Steven Wilkins, Niall McGlashan, Bernhard Urban and Ricardo Martinez-Botas, “Solid oxide fuel cell/gas turbine trigeneration system for marine applications” Journal of Power Sources, vol. 196, pp. 3149-3162, 2011.
 [14] Wei Jiang, Ruixian Fang, Jamil A. Khan and Roger A. Dougal, “Parameter setting and analysis of a dynamic tubular SOFC model” Journal of Power Sources, vol. 162, pp. 316-326, 2006.

저 자 소 개



박상균(朴相均)

1996년 한국해양대학교 기관공학과(공학사), 2001년 한국해양대학교 대학원 기관학과(공학석사), 2005년 일본 북해도대학교 대학원 기계공학과(공학박사), 1996년-1999년 (주)한진해운 근무, 2006년-2007년 Auburn University(USA) 연구원 근무, 현재 (사)한국선급 녹색산업기술원 근무



김만응(金晩應)

1980년 한국해양대학교 기관공학과(공학사), 2005년 한국해양대학교 대학원 기계공학과(공학박사), 현재 (사)한국선급 녹색산업기술원 원장