Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society(2014. 6), Vol. 25, No. 3, pp. 271~279
DOI: http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.3.271
ISSN 1738-7264
eISSN 2288-7407

선박 추진용 25kW급 고분자전해질 연료전지 시스템 개발

한인수† · 정지훈 · 고백균 · 최청훈 · 유성주 · 신현길
GS칼텍스 기술연구소

Development of a 25kW-Class PEM Fuel Cell System for the Propulsion of a Leisure Boat

IN-SU HAN†, JEEHOON JEONG, BACK-KYUN KHO, CHOENG HOON CHOI, SUNGJU YU, HYUN KHIL SHIN
Research & Development Center, GS Caltex Corp. 359 Expo-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-380, Republic of Korea

Abstract >> A 25kW-class polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell system has been developed for the propulsion of a leisure boat. The fuel cell system was designed to satisfy various performance requirements, such as resistance to shock, stability under rolling and pitching oscillations, and durability under salinity condition, for its marine applications. Then, the major components including a 30kW-class PEM fuel cell stack, a DC-DC converter, a seawater cooling system, secondary battery packs, and balance of plants were developed for the fuel cell system. The PEM fuel cell stack employs a unique design structure called an anodic cascade-type stack design in which the anodic cells are divided into several blocks to maximize the fuel utilization without hydrogen recirculation devices. The performance evaluation results showed that the stack generated a maximum power of 31.0kW while maintaining a higher fuel utilization of 99.5% and an electrical efficiency of 56.1%. Combining the 30-kW stack with other components, the 25kW-class fuel cell system boat was fabricated for a leisure. As a result of testing, the fuel cell system reached an electrical efficiency of 48.0% at the maximum power of 25.6kW with stable operability. In the near future, two PEM fuel cell systems will be installed in a 20-m long leisure boat to supply electrical power up to 50kW for propelling the boat and for powering the auxiliary equipments.

Key words : Polymer electrolyte membrane(고분자전해질), Fuel cell propulsion(연료전지 추진), Cell stack(셀스택), Fuel cell boat(연료전지 선박), Stack design(스택 설계), Cascade-type stack(다단형 스택)

1. 서 론

고분자전해질(polymer electrolyte membrane) 연료전지는 높은 전기효율, 높은 출력밀도, 낮은 작동 온도, 적은 공해물질 배출, 짧은 시동 시간 등의 특징으로 인하여 승용차, 버스, 지게차, 선박을 포함한 다양한 운송 수단의 주 동력원을 대체하기 위해 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3].

최근 10여 년 전부터 고분자전해질 연료전지를 소형 선박의 주 동력원으로 사용하려는 연구가 유럽을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 선박은 일반적으로 디젤엔진을 비롯한 내연 기관을 사용하여 추진 동력을 얻는다. 그러나 전 세계적으로 환경규제 강화와

†Corresponding author : ishan1969@gscaltex.com
[접수일 : 2014.4.1 수정일 : 2014.4.29 게재확정일 : 2014.6.30]
Copyright ⓒ 2014 KHNES

에너지 효율 증대에 대한 요구가 점차 증가되고 있어, 이러한 조건에 맞는 새로운 추진 기관의 개발 필요성이 대두되고 있고, 이에 적합한 강력한 후보로 연료전지가 떠오르고 있다. 고분자전해질 연료전지는 빠른 기동성, 높은 출력밀도, 우수한 정숙성 등으로 인하여 요트를 포함한 레저용 중소형 선박의 추진 동력원으로 적합한 것으로 평가받고 있다[4-6]. 유럽은 독일의 Hydra 프로젝트를 통해 2000년에 5kW급 알카라인 연료전지를 22인승 소형 보트에 장착함으로써 최초의 연료전지 보트를 선보였다[5,6]. 이후 고분자전해질 연료전지를 사용한 연료전지 보트 및 요트 개발이 지속적으로 이루어졌으며, 상업용 연료전지 선박 개발 및 실증을 위해 2006년부터 독일 함부르크에서 ZEMSHIP (Zero Emission Ship) 프로젝트가 착수되었다[7]. 독일을 포함한 유럽 각국의 9개 공공 기관 및 기업체가 컨소시엄을 구성하여 추진한 이 프로젝트는 2010년까지 약 450만 유로가 소요되었으며 최대 100명의 승객이 탑승 가능한 소형 연료전지 선박을 제작하여 함부르크시 중앙에 자리 잡고 있는 인공 호수인 알스트호에서 관광용으로 운항을 하고 있다. 선박의 주 동력원으로 사용된 연료전지 시스템은 독일의 Proton Motor사가 개발한 50kW급 고분자 전해질 연료전지 모듈을 장착하였으며, 연료전지에서 생성된 전력으로 납축전지를 충전하여 최대 속력 14km/h로 선박을 운항할 수 있다. 독일 통계청의 발표에 의하면 독일 전역에 운항 중인 900대 이상의 유람선에 장착된 추진 기관을 연료전지로 전환할 경우 약 6,500톤의 이산화탄소 및 약 1,300톤의 이산화황을 줄일 수 있을 것으로 예상하고 있다. 또한, 네덜란드는 Fuel Cell Boat 프로젝트를 통하여 운하 내에서 운항되는 87인승 규모의 연료전지 선박을 2009년 12월에 진수하여 실증을 진행하고 있다. 이 연료전지 추진 선박은 연료전지와 배터리를 결합한 하이브리드 방식의 추진 시스템으로 60~70kW 출력이 가능한 고분자전해질 연료전지와 30~50kW급 출력을 갖는 배터리를 장착하고 있다. 연료전지 시스템은 일정 부하에서 최대의 효율을 유지할 수 있도록 작동하며 부하가 증가 시 배터리로부터 전력을 공급받도록 설계되어있다.

고분자전해질 연료전지를 선박의 추진 동력원으로 사용하기 위해서는 선박의 운영 환경에 맞게 설계 및 제작이 이루어져야 한다. 예를 들어, 선박 추진체가 필요로 하는 충분한 동력이 전달될 수 있도록 빠른 부하 추종 능력을 갖추어야하며, 선박이 상하좌우 흔들림(rolling & pitching)을 겪거나 외부 충격이 가해지더라도 연료전지 시스템이 안정적으로 작동해야한다. 또한, 선박이 해양 환경에서 운영되는 경우, 해수를 이용한 연료전지 냉각 시스템 설계가 필요하며 연료전지 시스템으로 유입되는 염분으로 인한 스택 내구성 저하가 유발되지 않도록 설계 및 제작이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 국내 최초로 시도되고 있는 20-m급 규모의 연료전지 추진 유람선(여객선) 개발 프로젝트의 일환으로 진행되고 있는 중소형 선박 추진용 고분자전해질 연료전지 시스템 개발에 관하여 논의하고 자 한다.

2. 스택 설계 및 제작

2.1 스택 설계

Fig. 1은 선박용 25kW급 연료전지 시스템에 사용된 30kW급 고분자전해질 연료전지 스택(stack)의 개

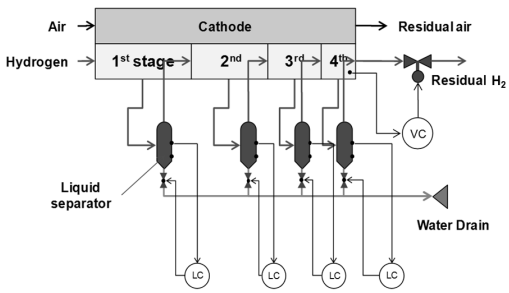

Fig. 1 Schematic of the 30kW cascade-type PEM fuel cell stack

략적인 구조를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 일반적인 고분자전해질 연료전지 스택과 다르게 스택의 애노드 측(anode side) 셀을 몇 개의 그룹으로 나누어 다단형(cascade-type)으로 구성한 것이 특징이다. 각 단은 한 개에서 최대 수백 개의 셀로 구성할 수 있으며, 각 단(stage)의 중간에 기액분리기를 장착하여 생성수를 스택 중간에서 제거할 수 있다. 이와 같은 구조는 스택에 공급되는 수소의 이용율을 최대로 높일 수 있기 때문에 미반응 수소를 스택 입구로 재순환시키기 위한 수소 재순환 펌프 또는 블로워가 필요 없어 구조가 비교적 단순하고 펌프 구동을 위한 추가적인 동력이 필요하지 않는 장점이 있다. 스택 각 단에 포함된 셀수를 적절하게 결정함으로써 마지막 단을 제외한 각 단의 수소 양론비를 플러딩(flooding)[8] 방지를 위해 유지해야하는 1.2~1.5 수준으로 조절할 수 있으며, 마지막단의 수소 양론비는 항상 1.0 근방에서 유지된다. 따라서 마지막 단을 제외한 셀 출구에서 수소의 유량을 충분히 확보할 수 있기 때문에 플러딩을 방지할 수 있고 최종적으로 잔류 수소 배출량을 줄일 수 있다. 스택의 애노드 출구에 장착되어 있는 purge 밸브(Fig. 1의 Residual H_2를 배출시키는 밸브)는 평상시에는 닫혀 있어 스택이 dead-end 상태[9]로 작동되며, 마지막단의 평균 셀전압이 미리 설정한 값 이하로 떨어질 경우 개방되어 불순물을 외부로 방출시킴으로써 셀전압을 회복시키는 역할을 한다. 각 단의 셀수 결정 방법 및 다단형 스택 설계에 대한 자세한 사항은 Han 등의 최근 논문[10]을 참고하기 바란다.

Table 1에 30kW급 스택에 대한 주요 설계 값들을 정리하였다. 연료전지 시스템이 25kW의 출력을 달성하기 위해서는 BOP (balance of plant) 소비전력과 DC/DC 컨버터의 효율을 고려했을 때 스택의 출력이 최소 30.5kW 이상이 돼야한다. 스택을 구성하는 셀의 활성면적은 450cm^{2}이며 총 146셀로 설계하였다. 다단형 스택의 단수를 증가시킬수록 스택의 연료이용율을 높일 수 있으나 스택의 구조가 너무 복잡하게 되어 실제 제작이 비현실적일 수 있다. 따라서 제작 경험상 3~4단으로 구성하는 것이 제작 및 연료이용율을 만족시키는 측면에서 적절한 것으로 판단된다[10]. 다단형 스택 구성을 위해서 스택의 애노드 측을 4단으로 분할하였으며 각 단은 100셀(첫 번째 단), 32셀(두 번째 단), 10셀(세 번째 단), 4셀(마지막 단)로 구성하였다. 이와 같은 단수 구성을 통하여 첫 번째부터 세 번째 단의 수소 양론비를 1.4~1.5 수준으로 유지할 수 있다. 또한 중력 가속도의 10배에 달하는 외부 충격이 가해지더라도 스택이 파손되지 않도록 충격 보강 설계를 적용하였으며, 상하좌우 기울임 시 스택 외부로 생성수의 배출이 원활하도록 스택 매니폴드 설계를 최적화하였다[11,12].

Fig. 2는 설계가 완료된 선박용 30kW급 스택의 3차원 도면을 나타낸 것이다. 스택 케이스 외부에 애

Table 1 Major design parameters of the 30kW-class stack

Design parameters	Description
Output power	30.5kW
Active area	450cm^2
Number of cells	146
Number of anodic stages	4
Number of cells in each stage	100, 32, 10, and 4 (for 1st, 2nd, 3rd, and 4th stage, respectively)
Stoichiometry in each stage	1.46, 1.44, 1,40, and 1.00 (for 1st, 2nd, 3rd, and 4th stage, respectively)

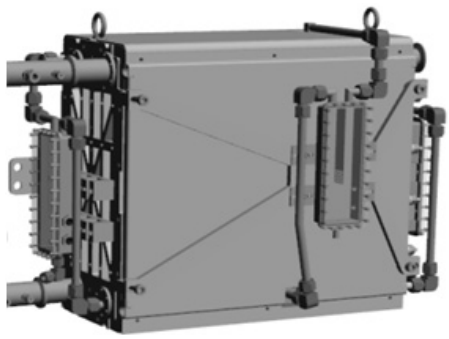

Fig. 2 3-dimensional drawing of the 30kW cascade-type PEM fuel cell stack with liquid separators

노드 측 각 단으로부터 배출된 생성수를 제거하기 위한 기액분리기가 장착되어 있다.

2.2 스택 제작

30kW급 스택 제작을 위해 막전극 접합체(membrane electrode assembly), 금속 분리판(metallic bipolar plate), 가스 공급판, 절연판, 집전판, 압축판 및 기액분리기를 설계한 후 제작하였다. 막전극 접합체는 염분 환경 하에서 내구성을 평가한 상용품을 주문 제작하여 스택 조립에 사용하였다. 스택이 외부 충격에 견딜 수 있도록 충분한 강도를 유지하기 위해서는 충격강도가 약한 흑연계열 분리판 대신에 금속 분리판 채용이 필수적이다. 본 연구에서는 금속 분리판에 가스켓을 직접 사출 성형(injection molding)한 가스켓 일체형 금속 분리판을 개발하여 적용하였다. 가스 공급판은 다단형 스택 구성을 위해 필요한 부품으로 스택 내부의 셀 사이에 위치하여 전기적 연결 수단을 제공함과 동시에 스택 중간 단에 수소를 공급하거나 미 반응 수소와 생성수를 스택 외부로 내보내는 역할을 한다. 스택 외부에 장착되는 판형 기액분리기는 각 단에서 배출된 수소와 생성수 혼합물로부터 생성수를 분리하여 배출시키며 스테인리스강과 엔지니어링 플라스틱을 가공하여 조립 제작하였다.

연료전지가 해양에서 작동될 경우 스택에 유입되는 염분으로 인하여 막전극 접합체의 내구성을 저하시킬 수 있다. 염분 환경 하에서 막전극 접합체의 내구성을 평가하기 위해 스택 제작에 사용한 것과 동일한 막전극 접합체 및 분리판을 사용한 단위 셀을 제작한 후 염분 환경을 모사한 실험 장치를 사용하여 단위 셀의 장기 내구성을 평가하였다. 염분 환경을 모사하기 위해 단위 셀의 캐소드(cathode)에 공급되는 공기를 3.5wt.% 농도의 염수에 통과시켰다. Fig. 3은 단위 셀을 염분 환경 하에서 3,000h 이상 장기 평가하는 동안 셀전압의 변화를 도시한 그래프이다.

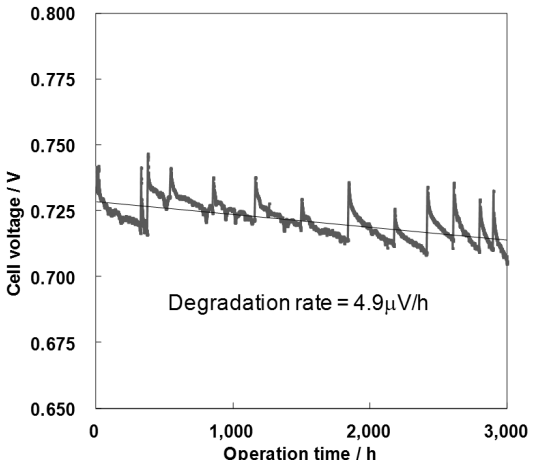

Fig. 3 Long-term performance of the single cell under salinity condition (the test had been performed at a cell temperature of 70°C, hydrogen inlet pressure of 0.45bar, anode relative humidity of 0%, cathode relative humidity of 100%, hydrogen stoichiometry of 1.2, and oxygen stoichiometry of 2.0)

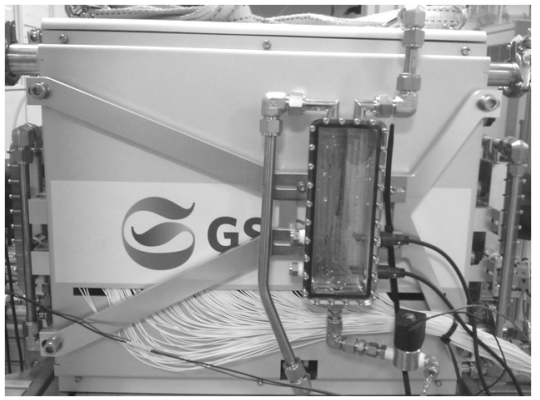

Fig. 4 Photo of the 30kW-class PEM fuel cell stack with liquid separators

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 장기 평가 기간 동안 4.9μV/h로 비교적 낮은 전압 강하율을 보여 염분 환경 하에서도 3,000h 이상의 내구성을 갖추고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 완성된 30kW급 다단형 스택의 사진을 나타낸 것이다. 외부 충격으로부터 셀 이탈 및 파손을 방지하기 위해 스택 외곽 4개의 코너에 유리섬유 강화 플라스틱으로 제작한 충격 방지 프레임을 장착하였다. 또한, 스택 외곽 부위 4면에는 애노드 각 단으

로부터 배출된 생성수를 제거하기 위한 기액분리기를 장착하였다.

3. 시스템 설계 및 제작

Fig. 5는 선박용 연료전지 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 선박 추진을 위해 장착된 추진 모터/드라이버가 요구하는 부하에 빠르게 응답할 수 있도록 연료전지-배터리 하이브리드 시스템으로 구성하였다. 연료전지 스택은 선박 추진 및 전자 장비 운용에 필요로 하는 동력의 대부분을 공급하며 배터리는 연료전지 기동 및 급격한 부하 변동 시에 부족한 전력을 짧은 시간 동안 공급하는 보조적인 동력 공급원 역할을 한다. 수소는 수소 탱크에 고압으로 저장된 후 감압기를 거쳐 0.5bar 이하로 감압된 후 무가습 상태로 스택에 공급된다. 공기는 터보블로워에 의하여 압축된 후 원통형 가습기 내부에서 스택 출구로부터 배출되는 습윤 공기와 물질 및 열전달에 의하여 가열 및 가습된 후 스택으로 유입된다. 스택에서 발생하는 반응열은 선박 외부에 장착된 용골 냉각장치(keel cooling unit)에 의하여 해수와 열교환하여 냉각되도록 설계하였다. 펌프, 블로워 및 제어 장치를 포함한 각종 BOP 구동을 위한 전력은 시스템 초기 기동 단계에서는 보조 배터리로부터 공급되며 정상 운전 상태로 진입하면 스택으로부터 직접 공급된다. DC/DC 컨버터는 스택 출력 전압을 모터/드라이버 및 배터리 충전기의 작동 전압 영역까지 상승시키는 역할을 한다.

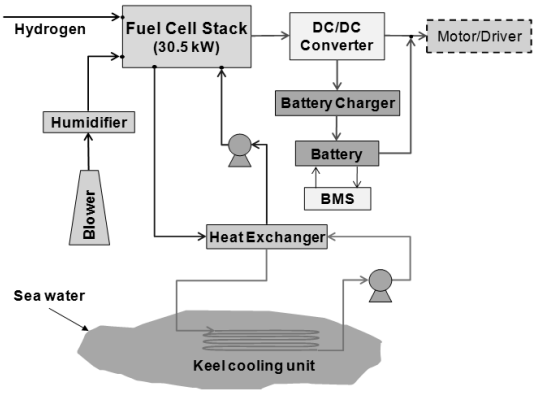

Fig. 5 Schematic of the 25kW-class PEM fuel cell system

Fig. 6 Photo of the 25kW-class PEM fuel cell system

완성된 25kW급 선박용 연료전지 시스템의 외형 사진을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에 보인 연료전지 시스템은 연료전지 스택과 각종 BOP들을 포함하고 있으며, DC/DC 컨버터 및 배터리는 별도의 모듈로 구성된다.

4. 결과 및 토론

본 장에서는 제작한 30kW급 스택과 25kW급 연료전지 시스템의 주요 성능 테스트에 관하여 다룬다.

4.1 스택 테스트

완성된 30kW급 스택의 기본 성능을 Greenlight사의 G500 모델 테스트스테이션을 사용하여 테스트하였다. 스택에 공급되는 냉각수 온도는 65°C로 설정하였으며, 냉각수 출구 온도는 입구 온도와 10°C 이하 차이가 항상 유지되도록 냉각수 유량을 조절하였다. 스택에 공급되는 수소의 압력은 45kPa(계기압)로 조절하였으며, 공기의 공급 압력은 부하에 따라 0

~25kPa(계기압) 수준을 유지시켰다. 수소는 무가습 상태(상대습도 0%)로 스택에 직접 공급되었으며, 스택에 공급되는 공기의 상대습도는 100% 주변에서 유지되도록 조절하였다. 다단형 스택은 출구에 위치한 수소 purge 밸브가 잠겨 있는 동안은 dead-end 상태로 작동되기 때문에 수소의 양론비가 1.0 수준을 유지하며, 불순물 및 생성수 배출을 위해 purge 밸브가 열리면 1.0보다 약간 높은 값을 유지한다. 부하 변동과 관계없이 공급되는 공기의 양론비는 2.0을 유지

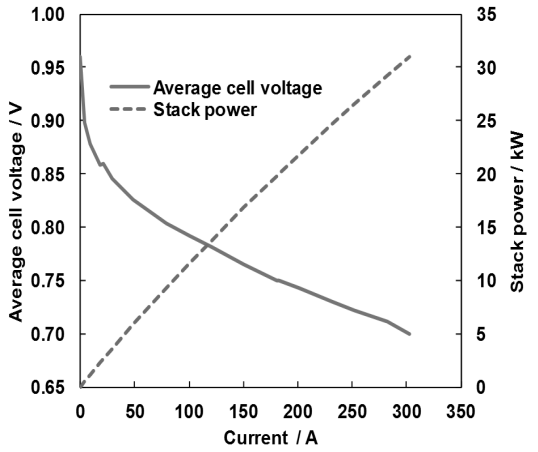

Fig. 7 Polarization and power curves obtained from the 30 kW-class cascade-type PEM fuel cell stack

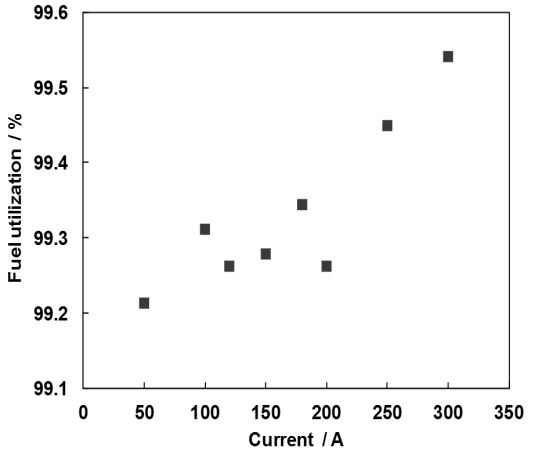

Fig. 8 Fuel(hydrogen) utilizations measured at various current values

하도록 조절하였다. Purge 밸브는 스택 마지막단(4번째 단)에 포함된 4셀의 평균 셀전압이 스택 전체 셀의 평균 셀전압 보다 0.1V 이하로 낮아질 경우 0.5s 동안 열린 후 닫히도록 설정하였다.

Fig. 7은 전류에 따른 스택의 평균 셀전압 및 출력을 측정한 그래프이다. 전체 작동 부하 영역에 걸쳐 0.704V 이상의 높은 평균 셀전압을 유지하고 있으며, 최대 부하 303A에서 31.0kW의 출력 및 발전 효율 56.1%(LHV 기준)의 우수한 성능을 보였다.

Fig. 8은 여러 부하 조건에서 측정된 스택의 연료 이용율을 도시하고 있다. 연료 이용율은 스택에 공급된 수소 중 스택 외부로 배출되지 않고 전력 생산을 위해 소모된 수소의 비율을 나타낸 것으로 일정 부하에서 공급되는 수소와 배출되는 잔류 수소의 평균 유량을 측정하여 계산할 수 있다. 그래프에 나타난 바와 같이 연료 이용율은 부하 증가에 따라 대체로 증가하는 경향을 보이며, 최소 99.2%에서 최대 99.5%로 유지되어 일반적인 스택의 90~80% 수준[13]과 비교했을 때 매우 높은 값임을 알 수 있다.

해상에서 선박 운항 시 선박은 파도 및 바람의 영향을 수시로 받게 되며, 이에 따라 상하좌우 기울임을 수시로 겪게 된다. 이와 같은 환경 하에서 스택이 작동될 때 스택 외부로 생성수의 배출이 원활하지 않을 수 있으며, 이에 따라 플러딩이 유발되어 스택 출력이 불안정해지거나 경우에 따라 shutdown 될 수도 있다. 이를 방지하기 위해서는 기울임 상태에서도 스택 매니폴드를 통과하는 잔류 가스가 생성수의 운반에 필요한 유속을 충분히 유지할 수 있도록 매니폴드 크기를 최적화해야 하며, 셀 내부에서 플러딩이 일어나지 않도록 채널 및 막전극 접합체 설계를 최적화해야 한다[14].

제작된 스택의 기울임 상태에서 안정성을 평가하기 위해 Fig. 9에 보인 것과 같은 방법으로 스택을 상하좌우 방향으로 선박 설계 조건을 감안하여 ±20도로 인위적으로 기울인 상태에서 200A로 일정 시간

동안 정전류 운전을 진행하면서 셀전압 변화를 관찰하였다. 스택이 매니폴드 출구가 상승하는 방향으로 기울어질 경우, 잔류가스의 유속이 생성수를 제거할 만큼 충분하지 않으면 스택 내부에 생성수가 축적되기 시작한다. 반대로 매니폴드 출구가 하강하는 방향으로 기울어지면 생성수의 배출에 오히려 도움이 된다. 따라서 스택 기울임 방향이 동적으로 바뀌는 것보다 매니폴드가 상승하는 방향으로 지속되는 것이 생성수 배출에는 불리한 조건이 된다. Fig. 10은 스택을 매니폴드 출구가 지면으로부터 상승되는 방향으로 20도 기울인 상태에서 스택의 평균 셀전압과 스택을 구성하는 146개 셀 중에서 최소 전압 값의 변화를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 그림에 나타난 최소 전압 값의 잦은 변화(0.67~0.72V 구간)는 스택 마지막 단(Fig. 1의 4th stage)에 포함된 셀들의 전압 변화를 보인 것으로 마지막 단 내부에 생성수 및 불순물이 축적됨에 따라 셀 전압이 점차 낮아져 미리 설정된 전압 이하가 될 경우 스택 출구에 설치된 purge 밸브가 자동으로 열려 셀전압을 회복시키는 과정이 반복되는데서 기인한다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 기울임 조건 하에서도 평균 셀전압과 최소 셀전압이 시간 경과에 따라 매우 안정적으로 유지되고 있어 개발된 스택이 해상 환경과 유사한 기울임 조건 하에서도 안정적인 성능을 유지함을 알 수 있다.

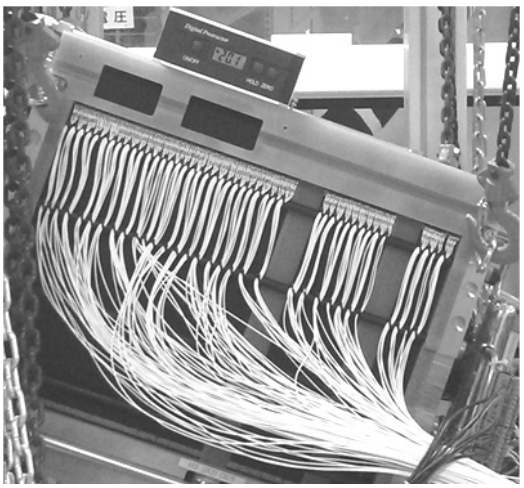

Fig. 9 Stack operation under a tilting condition

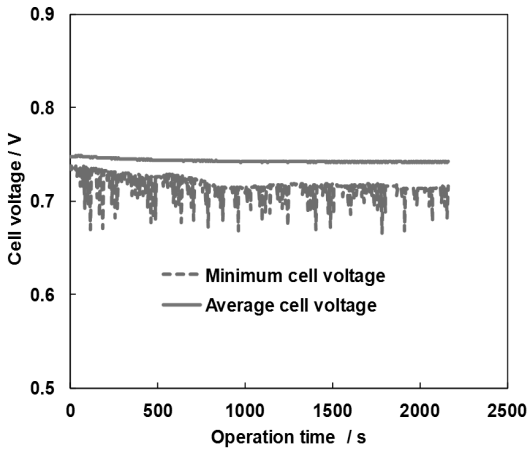

Fig. 10 Variations in the average and minimum cell voltages during the operation of the 30kW stack under a tilting condition

4.2 시스템 테스트

제작 완료된 25kW급 선박용 연료전지 시스템의 주요 성능을 평가하였다. 시스템 운전 조건은 스택의 운전 조건과 동일한 65°C로 설정하였으며, 냉각수 출구 온도는 입구 온도와 10°C 이하의 차이가 유지

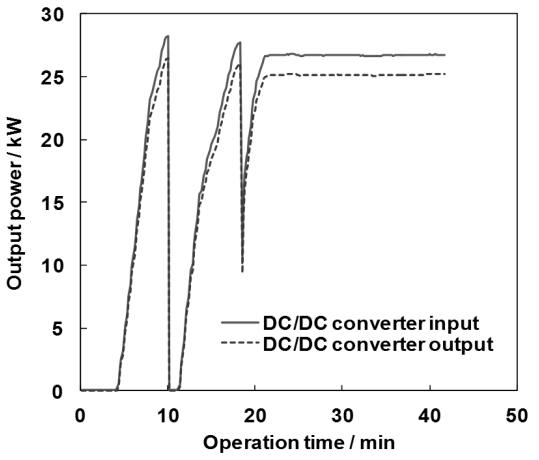

Fig. 11 Output powers measured at the power output ports of the fuel cell system and at the DC/DC converter during power ramp-up/-down tests of the 25kW-class PEM fuel cell system

Table 2 Performance summary of the 25kW fuel cell system

Performance index	Value
System net power (kW)	25.6
System efficiency (%, LHV)	48.0
Stack output power (kW)	29.9
Stack efficiency (%, LHV)	56.1
DC/DC converter efficiency (%)	93.7
BOP power consumption (kW)	2.49
Hydrogen consumption (kg/h)	1.61

되도록 냉각 펌프의 유량이 자동 조절된다. 공기의 양론비는 부하에 따라 미리 설정된 값으로 2.0~3.0 범위에서 유지된다. 선박에 장착된 추진 모터 대신에 30kW급 전자부하기를 사용하여 시스템에 부하를 인가하였다. Fig. 11은 시스템을 두 차례에 걸쳐 startup과 shutdown을 반복하는 동안 부하를 최대 출력까지 변동시키면서 측정한 연료전지 시스템(DC/DC 컨버터 입력 파워)의 출력과 DC/DC 컨버터의 출력 변화를 시간에 따라 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 부하 요구량에 따라 목표 출력 25kW에 모두 도달하였으며 최대 출력에서 안정적인 동작을 유지하였다.

Table 2는 시스템이 최대 출력을 유지하면서 작동되는 동안 측정된 값을 기준으로 계산한 시스템의 주요 성능 지표들을 정리한 것이다. 연료전지 시스템이 순출력(net power) 25.6kW에 도달했을 때 시스템 발전 효율은 48.0%(LHV 기준)로 비교적 우수한 효율을 가짐을 알 수 있다. 이때 시스템 가동에 소비된 BOP 전력은 2.49kW이었으며, DC/DC 컨버터의 전력변환 효율은 93.7%로 비교적 우수한 효율을 나타내고 있으나 BOP 설계 및 운전 최적화가 더 이루어질 경우 시스템 효율을 더욱 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

소형 레저용 선박의 추진 동력원을 공급하기 위한 선박용 고분자 전해질 연료전지 시스템을 개발하였다. 연료전지 시스템이 해양 환경에서 운항되는 선박 내부에 장착되기 때문에 다음과 같은 특성을 만족하도록 설계 및 제작하였다.

1) 염분 환경 하에서 스택의 내구성(3,000h 이상) 유지
2) 선박의 기울임에 따른 스택의 안정성 유지
3) 외부 충격에 대한 시스템의 강건성 확보
4) 해수를 이용한 연료전지 냉각

시스템 개발에 사용된 연료전지 스택은 애노드 셀을 4개의 그룹으로 분할하여 수소의 흐름을 다단형으로 구성한 설계를 적용하여 제작하였다. 이에 따라, 연료이용율을 기존 스택에 비하여 획기적으로 높일 수 있었으며, 수소 재순환과 관련된 장치 및 제어가 필요 없어 시스템 설계를 단순화시킬 수 있었다. 연료전지 시스템은 선박이 필요로 하는 부하를 빠르게 공급할 수 있도록 연료전지-배터리 하이브리드 시스템으로 구성하였으며, 해수를 사용한 스택 냉각이 가능하도록 용골 냉각 시스템을 채용하였다. 완성된 스택을 평가한 결과, 최대 출력 31.0kW에서 56.1%의 전기효율과 99.5%의 연료이용율의 우수한 성능을 얻을 수 있었다. 또한, 제작한 25kW급 시스템을 평가한 결과, 목표 출력 이상인 25.6kW에서 48.0%의 우수한 발전효율을 얻었다. 개발된 연료전지 시스템은 20m급 레저용 선박에 2대가 장착되어 47kWh급 배터리와 하이브리드 시스템을 형성하여 선박 추진 및 보조 부하에 필요한 전력을 순간 최대 150kW까지 공급할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산하 한국산업기술진흥원과 대경지역사업평가원의 대경광역경제권 선도산업육성사업(과제번호 R0001668)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. I. Tolj, M. V. Lototskyy, M. W. Davids, S. Pasupathi, G. Swart, and B. G. Pollet, “Fuel cell-battery hybrid powered light electric vehicle (golf cart): Influence of fuel cell on the driving performance”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 38, 2013, pp. 10630-10639.
2. A. Veziroglu, and R. Macario, “Fuel cell vehicles: state of the art with economic and environmental concerns”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 36, 2011, pp. 25-43.
3. P. Fisher, J. Jostins, S. Hilmansen, and K. Kendall, “Electronic integration of fuel cell and battery system in novel hybrid vehicle”, J. Power Sources, Vol. 220, 2012, pp. 114-121.
4. I. J. S. Veldhuis, R. N. Richardson, and H. B. J. Stone, “Hydrogen fuel in a marine environment”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 32, 2007, pp. 2553-2566.
5. V. P. McConnell, “Now, voyager? The increasing marine use of fuel cells”, Fuel Cell Bulletin, Vol. 2010, 2010, pp. 12-17.
6. G. Weaver, and S. Barrett, “Marine applications of fuel cell technology”, Fuel Cell Bulletin, Vol. 2003, 2003, pp. 11-12.
7. J. Schneider, and S. Dirk, “ZEMShip”, 18th World Hydrogen Energy Conference 2010, May 16-21, 2010, Essen, Germany.
8. H. Li, Y. Tang, Z. Wang, Z. Shi, S. Wu, D. Song, J. Zhang, K. Fatih, J. Zhang, H. Wang, Z. Liu, R. Abouatallah, and A. Mazzab, “A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell”, J. Power Sources, Vol. 178, 2008, pp. 103-117.
9. Z. Wan, J. Lin, Z. Luo, Z. Tu, Z. Liu, and W. Liu, “Evaluation of self-water-removal in a dead-end proton exchange membrane fuel cell”, Applied Energy, Vol. 104, 2013, pp. 751-757.
10. I.-S. Han, J. Jeong, and H. K. Shin, “PEM fuel-cell stack design for improved fuel utilization”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 38, 2013, pp. 11996-12006.
11. J. Jeong, I.-S. Han, and H. K. Shin, “Optimal sizing of the manifolds in a PEM fuel cell stack using three-dimensional CFD simulations”, Trans. Korean Hydrogen & New Energy Society, Vol. 24, 2013, pp. 386-392.
12. C.-H. Chen, S.-P. Jung, and S.-C. Yen, “Flow distribution in the manifold of PEM fuel cell stack”, J. Power Sources, Vol. 173, 2007, pp. 249-263.
13. B. Belvedere, M. Bianchi, A. Borghetti, A. De Pascale, M. Paolone, and R. Vecci, “Experimental analysis of a PEM fuel cell performance at variable load with anodic exhaust management optimization”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 38, 2013, pp. 385-393.
14. I.-S. Han, J. Lim, J. Jeong, and H. K. Shin, “Effect of serpentine flow-field designs on performance of PEMFC stacks for micro-CHP systems”, Renewable Energy, Vol. 54, 2013, pp. 180-188.