

고온 고분자 전해질 연료전지 박판형 분리판의 유로 설계 및 스택 성능 평가

김지홍^{1,2} · 김민진^{1,2,†} · 김진수³

¹한국에너지기술연구원 연료전지연구소, ²과학기술연합대학원대학교 신에너지 및 시스템 기술, ³일도에프엔씨(주)

Flow Field Design and Stack Performance Evaluation of the Thin Plate Separator for High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

JI-HONG KIM^{1,2}, MINJIN KIM^{1,2,†}, JINSOO KIM³

¹Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea

²Department of Advance Energy and System Technology, Korea University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

³ILDO F&C CO., LTD, 137 Neungheodaero 625beon-gil, Namdong-gu, Incheon 21697, Korea

†Corresponding author :
minjin@kier.re.kr

Received 7 August, 2018
Revised 20 September, 2018
Accepted 30 October, 2018

Abstract >> Research on High temperature polymer electrolyte fuel cell (HT-PEMFC) has actively been conducted all over the world. Since the HT-PEMFC can be operated at a high temperature of 120-180 °C using phosphoric acid-doped polybenzimidazole (PBI) electrolyte membrane, it has considerable advantages over conventional PEMFC in terms of operating conditions and system efficiency. However, If the thermal distribution is not uniform in the stack unit, degradation due to local reaction and deterioration of lifetime are difficult to prevent. The thin plate separator reduces the volume of the fuel cell stack and improves heat transfer, consequently, enhancing the cooling effect. In this paper, a large area flow field of thin plate separator for HT-PEMFC is designed and sub-stack is fabricated. We have studied stack performance evaluation under various operating conditions and it has been verified that the proposed design can achieve acceptable stack performance at a wide operating range.

Key words : High temperature polymer electrolyte fuel cell(고온 고분자 전해질 연료전지), Stack(스택), Thin plate separator(박판형 분리판), Thermal transfer(열전달), Double manifold(이중 매니폴드), Gas distribution(가스 분배)

1. 서론

최근 전 세계적으로 환경 문제가 대두되고 있는 가운데 화석연료를 기반으로 하는 발전 시스템을 대

체할 에너지 기술로 polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)이 연구개발되고 있다. PEMFC는 수소와 산소를 연료로 하는 전기화학적 에너지 변환 장치로써 고효율의 청정에너지 기술로써 주목받고

있다. 또한 높은 전력 밀도와 빠른 시동 특성의 장점을 가지기 때문에 건물용이나 자동차용 발전 시스템으로써 지속적으로 연구개발되고 있다¹⁻⁴⁾.

PEMFC는 전해질로 Dupont사의 Nafion 막과 같은 양이온 전도성 고분자막을 사용하고 촉매로 탄소를 담체로 사용한 백금을 사용한다. 연료전지의 성능은 운전온도가 높을수록 증가하는데 Nafion 막은 100°C 이상에서 수분 흡수량이 현저하게 줄어들기 때문에 60-80°C 정도의 적정 운전온도 범위를 가진다. 물 관리가 중요한 PEMFC로써는 운전에 필요한 가습장치, 열교환기, 응축수 처리 장치 등의 많은 balance of power (BOP)를 필요로 하기 때문에 시스템 크기와 복잡도가 증가하는 동시에 단가 및 유지보수비용이 커지게 되어 시스템 효율이 떨어진다^{5,6)}. 이와 같은 PEMFC의 운전 조건과 시스템적인 측면의 어려움을 상쇄할 수 있는 high temperature-PEMFC (HT-PEMFC)가 주목받아 오고 있다.

HT-PEMFC는 인산이 도핑된 polybenzimidazole (PBI) 기반 membrane electrode assembly (MEA)를 사용하여 120-180°C의 높은 온도에서 운전이 가능하다. 따라서 물의 끓는점 이상의 온도로 인하여 생성물의 관리가 필요 없으며 일산화탄소 피독 현상에 대한 강한 내성을 가져 개질가스의 사용이 용이하다는 장점을 가진다. 결과적으로 BOP의 숫자를 줄여 연료전지 시스템을 간소화하고 전체 비용을 낮출 수 있다. 추가적으로 높은 온도의 배열을 활용하여 냉난방 시스템에 활용할 수 있다는 장점도 있다⁷⁻⁹⁾.

국내외에서 1-5 kW급 HT-PEMFC가 꾸준히 연구 개발되어 있다. 덴마크 Serenergy는 HT-PEMFC 기반의 응용 시스템 개발을 활발히 진행하고 있으며, 같은 덴마크 기업인 Danish Power Systems이 HT-MEA를 제공하고 있다. 또한 독일의 BASF사도 상용 HT-MEA의 개발을 선도하고 있다¹⁰⁻¹²⁾.

국내에서는 한국에너지기술연구원이 국가과제를 통하여 HT-PEMFC용 핵심 부품 기술 개발 사업을 성공적으로 완료하여 HT-PEMFC 스택 기술의 국산화를 이루었고 국내 기업에 기술이전을 완료하였다¹³⁻¹⁵⁾.

앞서 나열한 HT-PEMFC의 장점들과 세계적 연구

흐름에 발맞춰 빠른 상용화가 가능할지 여부가 주목받고 있는 가운데 HT-PEMFC 상용화에 가장 걸림돌이 되는 부분은 역설적으로 높은 온도의 열이다. 고온 고분자연료전지 스택의 열 분포를 살펴보면 상대적으로 스택 중앙부의 온도가 높은 편이며 국부적으로 높은 발열이 일어나는 구간이 생기는 현상을 자주 발견할 수 있다. 이는 전기화학 반응에 의하여 생성된 열이 빠져나가지 못하고 축적되어 일어나는 현상으로써 MEA를 비롯한 스택 부품들의 열화 및 내구성 저하를 일으키는 주요 원인이 된다¹⁶⁻¹⁸⁾.

이러한 문제들을 개선하기 위하여 최근 HT-PEMFC용 박판형 분리판(thin bipolar plate)의 설계 및 제작에 대한 연구가 조금씩 진행되고 있다. 박판형의 얇은 분리판을 사용하면 스택의 전체 부피가 감소하게 됨으로써 열전도가 개선되고 원활한 냉각이 가능하게 된다. 이로 인하여 스택 온도의 불균일을 개선하고 단위 셀의 국부적인 반응을 지양하고 균일한 반응을 일으키도록 하여 전기 전도성을 향상시킬 수 있게 된다. 또한 부피, 무게가 감소함으로써 연료전지의 공간 활용성 및 휴대성을 증가시킬 수 있다는 장점도 있다.

박판형 분리판에 대한 연구는 크게 금속 분리판 혹은 카본 그라파이트 복합 재료(Carbon graphite composite) 분리판으로 나뉜다. 금속판은 주조 및 엠보스(embossing) 가공에 적절하여 대량 제조에 유리하며 얇게 만들 수 있기 때문에 박판형에 적합하지만 연료전지 운전환경에서 쉽게 부식되는 단점이 있다^{19,20)}. 카본 그라파이트 분리판은 기본적으로 부피가 크며 강도가 낮고 취성의 특징이 있지만 부식에 강하며 벌크 및 접촉 저항 손실이 낮은 장점이 있으며, 최근에는 복합 재료를 사용하여 주조 및 엠보스 가공을 통하여 얇으면서도 좋은 강도와 전기전도성을 가진 분리판 개발에 대한 연구도 이루어지고 있다²¹⁾.

Kang 등²²⁾은 에폭시-카본 섬유 프리프레그(epoxy-carbon fiber prepregs) 복합 재료 분리판을 개발하여 분리판의 두께를 줄이는 동시에 강성과 열전도 및 전기전도성을 개선하는 연구를 진행하였다. Lee 등²³⁾

은 HT-PEMFC용 얇은 탄소 펠트 복합 분리판을 개발하여 전기적 특성을 개선하고 고온에서 높은 압축 압력을 견디도록 하였다. 이 연구에서는 스택의 두께와 무게를 줄이기 위하여 애노드와 캐소드가 단일 플레이트에 통합되도록 설계하였고, 활성면적 50×50 mm의 3 cell 스택을 제작 및 평가하였다.

본 연구에서는 HT-PEMFC용 박판형 카본 분리판(thin Carbon bipolar plate)을 양산하기 전 단계에서 실험을 통하여 설계된 분리판의 검증 연구를 진행하였다. 제안된 분리판은 반응물이 채널에 균일하게 공급되도록 새로운 구조의 매니폴드 형태를 설계 및 도입하였으며, 대면적의 6 cell 스택을 제작하고 다양한 운전 조건에서 성능 평가를 통하여 분리판의 설계 적합성을 평가하였다. 또한 앞으로의 연구에서 본 설계를 이용한 박판형 분리판의 대량 생산 및 kW급 스택 제작으로의 확장 가능성을 판단하려고 한다.

2. 실험

2.1 준비

본 연구에서는 HT-PEMFC 대면적 스택 제작에 국산 상용 HT-MEA를 사용하였다. 활성 면적은 애노드 308.56 cm², 캐소드 301.5 cm²의 대면적 MEA이다.

실험에 사용한 연료전지 스테이션의 제원은 애노드 측 공급 가능 가스 범위 1.5-150 nlpm, 캐소드 측 3.75-750 nlpm, 가용 전력 범위는 50-6,000 W, 최대 로드 전류 전압은 각각 6 kW, 600 A, 120 V이다.

스택의 가열 및 냉각은 열매체 오일을 스택 중앙의 냉각판에 투입하는 오일 냉각 방식을 채택하였다. PEMFC 냉각 방식으로 유체 냉각 방식이 많이 쓰이는데 열매체에 따라 수냉식과 오일 방식으로 나뉜다. 유체는 열용량이 크기 때문에 쉽게 온도 변화가 일어나지 않아 스택 온도를 안정적으로 유지할 수 있는데, 오일의 끓는점이 더 높아 고온의 운전 조건에 적합하다. 또 다른 냉각 방식인 공랭식으로는 외부 공기만으로 고온의 스택을 신속하게 냉각하기 어렵고 추가로 설치할 fan과 가열기 등에 상당한 동력이

필요하기 때문에 고온 스택에는 적합하지 않다.

2.2 분리판(bipolar plate) 설계

2.2.1 일반적인 PEMFC 채널 형태

직선 채널(straight channel)은 도입가스의 균일한 분배와 스택 차압이 낮은 장점을 가지기 때문에 대표적으로 많이 쓰이는 채널 형태이다. 하지만 대면적 스택에서는 낮은 유속으로 인하여 종종 분리판의 가장자리 채널까지의 가스 분배가 원활하지 못하게 되고 전기화학 반응으로 생성된 물이 밀려나가지 못하여 채널이 막히게 되는 데드존(dead zone)을 형성하여 MEA의 부분 손상 및 성능 저하를 유발하기도 한다. 또 다른 대표적인 채널 형태인 사형 채널(serpentine channel)은 상대적으로 강한 차압을 유발시켜 빠른 유속을 통하여 생성물을 원활하게 밀어내는데 유리하지만 가스 공급에 있어 balance of plant(BOP)의 소비 동력 부하를 높인다는 점에서 시스템 효율을 낮추게 된다.

2.2.2 제안된 분리판

본 연구에서 설계·제안된 분리판 채널은 변형 직선 채널을 채택하였다. HT-PEMFC는 운전온도가 100℃ 이상으로 채널내 생성된 물이 증발하기 때문에 제안된 분리판에서 직선 채널의 단점인 블락 현상은 일어나지 않는다. 또한 제작비용과 대량생산에 있어서 상대적으로 몰드 가공이 용이한 직선 채널이

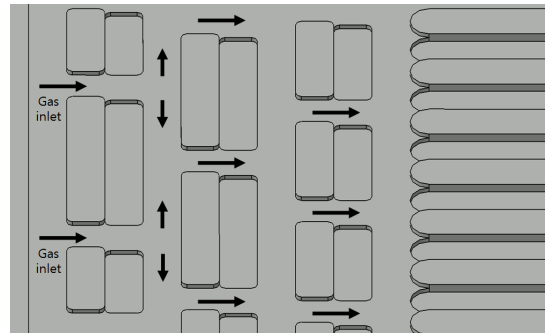


Fig. 1. Gas distribution at the channel



Fig. 2. HT-PEMFC stack

적합하다고 판단하였다.

제안된 분리판은 공급가스가 채널로 분배되기 전에 각 분리판의 애노드, 캐소드 매니폴드의 특정한 공간으로 먼저 유도하는 이중 매니폴드 구조를 사용한다. 또한 Fig. 1과 같이 전체 활성면적에 균일하고 원활한 가스 공급을 위하여 중앙 매니폴드와 채널 입구 사이에 변형된 가스 분배 구조를 도입하였다.

2.3 스택 제작

Fig. 2와 같이 6개의 셀과 1개의 카본 냉각판으로 구성된 HT-PEMFC 스택을 제작하였다. 분리판은 박판형 설계를 구현한 기계 가공 분리판을 사용하였다.

또한 상용 스택에서는 주로 금속 냉각판을 사용하지만 본 실험에서는 몰딩 가공 용이성 및 제작비용 감소를 위하여 카본 냉각판을 사용하였다. 스택은 12개의 볼트를 80 kgf·cm로 토크 렌치를 사용하여 교차 체결하였고 각 체결봉은 절연을 위하여 캡톤 필름을 감았다. 자세한 스택 제원은 Table 1에 소개하였다.

2.4 리크 테스트(leakage test)

신규 제안한 분리판이 기존 분리판에 비하여 얇고

Table 1. Thickness of the HT-PEMFC stack's components

Component	Thickness (mm)	Number
Bipolar plate	3	8
Gasket	1	12
MEA+GDL+Subgasket	830±60 μm	6
Cooling plate	-	1
Current collector	1	2
End plate	30	2
Total height (after clamping)	89.5	-

좁은 유로를 가지기 때문에 분리판 내 강한 기체 흐름과 보다 많은 외부 리크와 큰 차압이 발생할 가능성을 염두에 두고 리크 및 차압 테스트를 진행하였다. 테스트는 디지털 차압계(differential pressure gauge)를 사용하여 애노드, 캐소드, 냉각판의 각각 매니폴드에 질소가스를 주입하여 일정 시간 동안 압력이 떨어지는지 확인하는 방식으로 체결된 스택 외부로 가스 누출이 발생하는지 확인하였다.

애노드 및 캐소드의 차압 측정 기준은 본 연구실에서 기연구 개발한 건물용 3 kW급 HT-PEMFC 80셀 스택에서 사용한 사형 분리판의 입출구 매니폴드 차압의 최대 허용치인 15 kPa을 기준으로 하였으나 박판형 분리판이 아니므로 참고 대상으로만 설정하였다.

2.5 셀 활성화(cell activation)

예열된 스택의 각 셀 별로 표면 온도를 측정하여 스택의 온도가 전체적으로 목표 운전 온도 근방으로 균일한지 측정한 후 셀 활성화를 시작한다. 일반적인 PEMFC는 운전을 시작하기 위하여 운전온도까지 가열할 필요가 없으나 HT-PEMFC는 MEA의 활성 조건을 충족시키기 위하여 높은 온도로 운전을 시작한다.

운전온도를 140°C로 유지하고 전류밀도 0-200 mA/cm²에서 I-V 곡선(I-V curve)을 확인하였다. 공급하는 수소 및 산소의 양론비(stoichiometry)는 각각 1.3, 2.0으로 설정하였다.

Table 2. Stoichiometry condition

Condition	λ_{H_2}	λ_{Air}
1	1.3	2.0
2	1.6	2.5
3	2.0	3.0
4	2.3	3.5
5	2.6	4.0
6	2.9	4.5

2.6 가스 과급에 의한 성능 변화 측정

본 연구에서 제안한 분리판으로 제작한 스택이 다양한 연료전지 어플리케이션에 적용되기 위해서는 각각의 사용 목적에 따른 발전 성능을 낼 수 있어야한다. 따라서 다양한 부하, 온도 및 과급 조건에 따라 정상적인 성능 유지할 수 있는지 검증이 필요하다. 제안된 분리판에서 가스 유량 증가에 따른 이상 성능 유무를 확인하기 위하여 Table 2와 같이 6단계의 양론비(stoichiometry)를 설정하고 스택 성능 변화를 측정하였다.

연료전지 스택의 운전 온도를 150°C로 유지하고 전류밀도 200 mA/cm²에서 6단계의 양론비를 10분씩 순차적으로 적용하여 1시간 동안의 성능 변화를 확인하였다.

2.7 온도 변화에 의한 성능 변화 측정

제안된 분리판에서 운전온도 변화에 따른 이상 성능 유무를 확인하기 위하여 전류밀도 150 mA/cm², 운전온도 140-150°C 범위에서의 성능 변화를 측정하였다. 스택 성능의 보다 명확한 변화를 확인하기 위하여 공급가스 양론비는 애노드, 캐소드 각 3.9, 6.0으로 과잉 공급하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 스택 평가

스택 리크 테스트 결과 애노드, 캐소드, 냉각 셀

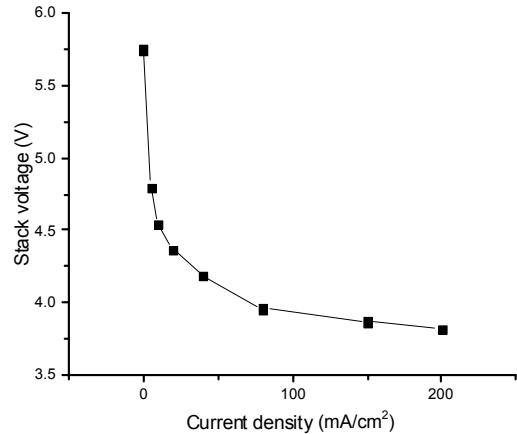


Fig. 3. IV curve of stack

모두 가스 외부 누출이 발견되지 않았다. 이로 인하여 스택이 적절한 압축력에 의하여 평평하게 체결되었고 스택 내부 가스켓(gasket)이 비틀림 없이 적절한 역할을 수행하고 있음을 알 수 있다.

매니폴드의 차압은 스택의 발전 성능 평가시 전류밀도 200 mA/m²에서 측정하였으며 애노드, 캐소드 각각 평균 1.680 kPa, 7.060 kPa의 결과를 얻었다. 앞서 2.4절에서 언급한 3 kW급 HT-PEMFC 스택의 사형 채널 분리판에서 측정된 차압인 애노드, 캐소드 1.340 kPa, 6.720 kPa을 기준으로 앞서 말한 3 kW급 HT-PEMFC 스택의 사형 채널 분리판에서 측정된 차압인 애노드, 캐소드 1.512 kPa, 6.720 kPa을 기준으로 제안된 분리판이 근소하게 높은 경향을 보인다. 단, 박판형 분리판은 상대적으로 두께가 아주 얇고 채널의 크기가 작기 때문에 기본적으로 차압이 크게 형성됨을 고려하였을 때, 제안된 분리판 구조에서의 차압이 아주 낮은 것으로 판단할 수 있다.

정상적으로 활성화된 셀의 기본 성능은 Fig. 3과 같이 일반적인 PEMFC의 I-V 곡선을 보인다. 설정한 실험 조건 상에서 셀 1개 당 평균 0.636 V의 성능을 보였다.

3.2 가스 과급에 의한 성능 변화

Fig. 4와 같이 6단계의 양론비에서 스택 전압을 확

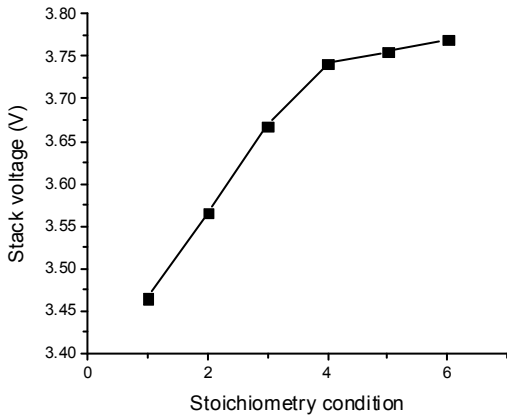


Fig. 4. Stack voltage by stoichiometry condition

인할 수 있다. 일반적으로 PEMFC는 공급가스의 유량이 증가할수록 촉매의 표면 농도 증가와 교환전류 밀도의 증가로 인하여 셀 전위의 이득이 생긴다. 단, 수소의 과잉 공급은 연료 효율을 낮추게 되며 공기의 과잉 공급은 스택의 냉각 효과를 일으켜 운전 온도의 제어가 불안정해지는 동시에 블로워(blower), 압축기(compressor) 등 BOP의 동력 소비량을 늘려 시스템 효율을 감소시키기도 한다.

실험 결과 일반적 PEMFC의 경향처럼 양론비가 증가할수록 스택의 성능이 뚜렷하게 증가하는 경향을 보이며, condition 1보다 condition 6에서 스택 전압이 0.304 V 높으며, 셀 1개 당 약 0.05 V 증가하였다. 단, condition 4부터 양론비 증가에 의한 전압 이득이 현저히 줄어드는 모습을 보인다. 이를 통하여 본 박판형 분리판의 적정 과급률은 수소, 공기 각각 2.3, 3.5 이하로 판단된다.

3.3 온도 변화에 의한 성능 변화

Fig. 5와 같이 온도에 의한 스택 전압의 변화를 확인할 수 있다. 실험 결과 운전온도가 140°C에서 149°C 까지 증가하면서 스택 전압이 0.08 V 상승하는 모습을 확인할 수 있다. PEMFC에서는 운전온도가 증가할수록 교환 전류 밀도가 증가하여 활성화 손실이 줄어들어 전위가 높아지게 된다.

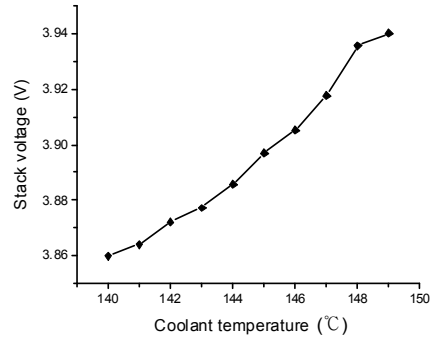


Fig. 5. Stack voltage by operation temperature

실제 연료전지 발전 시스템에서는 적용하는 환경에 따라 다양한 운전 조건에서 운전할 수 있는 유동성이 있어야 하는데, 제안된 설계로 다양한 운전온도에서 정상적인 온도 제어 및 성능 확인이 가능하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 HT-PEMFC용 박판형 카본 분리판에 적용될 매니폴드 및 채널 형태를 설계하고 이를 실험적으로 검증하는 연구를 수행하였다. 설계된 분리판은 반응물이 채널에 균일하게 공급될 수 있도록 새로운 구조의 매니폴드 형태를 도입하였으며, 분리판의 프로토타입(Prototype)을 가공하여 대면적의 6 cell 스택을 제작하고 다양한 운전 조건에서 성능 평가를 수행하였다. 스택 단위의 리크 테스트와 운전 중 가스 매니폴드 차압 테스트 결과를 통하여 스택의 제작성과 매니폴드 및 채널 설계 적합성을 검증하였다. 또한 온도 변화와 공급가스 유량 변화에 따른 발전 성능 테스트를 통하여 보다 넓은 운전 범위에서 정상적인 HT-PEMFC의 성능을 확보할 수 있는지 평가하였다. 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 연료전지 스택 리크 테스트 결과 애노드 및 캐소드에서 리크가 발견되지 않았으며 스택이 적절한 압축력으로 체결되었고 가스켓(gasket)이 비틀림 없이 적절한 역할을 수행하고 있음을 알 수 있다.

2) 발전 성능 평가시 애노드 및 캐소드 차압 테스트

트에서 기존의 HT-PEMFC 사형 채널 분리판의 차압과 비슷한 측정값을 보였다. 박판형 분리판은 채널 부피가 작아 기본적으로 차압이 크게 형성됨을 고려하였을 때, 제안된 분리판의 차압이 적절한 수준임을 알 수 있다. 이때의 운전 조건은 냉각 오일 온도 140°C, 전류밀도 200 mA/cm², 공급 수소와 산소의 양론비 각각 1.3, 2.0으로 설정하였으며, 셀 1개 당 평균 0.636 V의 성능을 보였다.

3) 발전 성능 평가시 가스 과급률이 증가함에 따라 스택 성능이 현저하게 높아지는 것을 확인하였다. Condition 1보다 condition 6(숫자가 높을수록 과급)의 스택 전압이 0.304 V 높으며 셀 1개 당 약 0.05 V의 증가를 보였다.

4) 발전 성능 평가시 스택 운전온도 증가에 따라 스택 성능이 높아지는 것을 확인하였다. 온도가 140°C에서 149°C까지 증가하면서 스택 전압이 3.86 V에서 3.94 V까지 약 0.08 V 상승하는 모습을 보였다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(B8-2451-02)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과와 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20163010032000)의 결과이다.

References

1. J. Lamrminie and A. Dicks, "Fuel Cell System Expalined", John Wiley, 2003.
2. F. Barbir, "PEM fuel cells: theory and practice", Academic Press Series series editor, Elsevier Academic Press, 2005.
3. C. Bernay, M. Marchand, and M. Cassir, "Prospects of Different Fuel Cell Technologies for Vehicle Applications", Journal of Power Sources, Vol. 108, No. 1, 2002, pp. 139-152.
4. J. Garche and L. Jörissen, "Applications of Fuel Cell Technology: Status and Perspectives", The Electrochemical Society Interface, 2015, pp. 39-43.
5. C. S. Spiegel, "Design & Building Fuel Cells", McGraw-Hill, 2007.
6. V. Das, S. Padmanaban, K. Venkitesany, R. Selvamuthukumar, F. Blaabjerg, and P. Siano, "Recent advances and challenges of fuel cell based power system architectures and control - A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 73, 2017, pp. 10-18.
7. H. Jjanßen, J. Supra, L. Lüke, W. Lehnert, and D. Stolten, "Development of HT-PEFC stacks in the KW range", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 11, 2013, pp. 4705-4713.
8. S. S. Araya, F. Zhou, V. Liso, S. L. Sahlin, J. R. Vang, S. Thomas, X. Gao, C. Jeppesen, and S. K. Kær, "A comprehensive review of PBI-based high temperature PEM fuel cells", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, No. 46, 2016, pp. 21310-21344.
9. R. E. Rosli, A. B. Sulong, W. R. W. Daud, M. A. Zulkifley, T. Husaini, M. I. Rosli, E. H. Majlan, and M. A. Haque, "A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) system", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 14, 2017, pp. 9293-9314.
10. M. Nasri and D. Dickinson, "Thermal management of fuel cell-driven vehicles using HT-PEM and hydrogen storage", In 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014, pp. 1-6.
11. R. Kerr, H. R. García, M. Rastedt, P. Wagner, S. M. Alfaro, M. T. Romero, C. Terkelsen, T. Steenberg, and H. A. Hjuler, "Lifetime and degradation of high temperature PEM membrane electrode assemblies", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, No. 46, 2015, pp. 16860-16866.
12. T. J. Schmidt and J. Baurmeister, "Properties of high-temperature PEFC Celtec®-P 1000 MEAs in start/stop operation mode", Journal of Power Sources, Vol. 176, No. 2, 2008, pp. 428-434.
13. A. Jo, K. Oh, J. Lee, D. Han, D. Kim, J. Kim, and Y. J. Sohn, "Modeling and analysis of a 5 kWe HT-PEMFC system for residential heat and power generation", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 3, 2017, pp. 1698-1714.
14. W. Y. Lee, M. Kim, Y. J. Sohn, and S. G. Kim, "Power optimization of a combined power system consisting of a high-temperature polymer electrolyte fuel cell and an organic Rankine cycle system", Energy, Vol. 113, 2016, pp. 1062-1070.
15. W. Y. Lee, M. Kim, Y. J. Sohn, and S. G. Kim, "Performance of a hybrid system consisting of a high-temperature polymer electrolyte fuel cell and an absorption refrigerator", Energy, Vol. 141, 2017, pp. 2397-2407.
16. V. P. McConnell, "High-temperature PEM fuel cells: Hotter, simpler, cheaper", Fuel Cells Bulletin, Vol. 2009, No. 12, 2009, pp. 12-16.
17. L. Lüke, H. Janßen, M. Kvesić, W. Lehnert, and D. Stolten,

- “Performance analysis of HT-PEFC stacks”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 11, 2012, pp. 9171-9181.
18. J. Kim, M. Kim, T. Kang, Y. J. Sohn, T. Song, and K. H. Choi, “Degradation modeling and operational optimization for improving the lifetime of high-temperature PEM (proton exchange membrane) fuel cells”, *Energy*, Vol. 66, 2014, pp. 41-49.
 19. S. P. Jung, C. I. Lee, C. C. Chen, W. S. Chang, and C. C. Yang, “Development of novel proton exchange membrane fuel cells using stamped metallic bipolar plates”, *Journal of Power Sources*, Vol. 283, 2015, pp. 429-442.
 20. P. Alnegren, J. G. Grolig, J. Ekberg, G. Göransson, and J. E. Svensson, “Metallic Bipolar Plates for High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells”, *Fuel Cells*, Vol. 16, No. 1, 2016, pp. 39-45.
 21. D. Lee and D. G. Lee, “Carbon composite bipolar plate for high-temperature proton exchange membrane fuel cells (HT-PEMFCs)”, *Journal of Power Sources*, Vol. 327, 2016, pp. 119-126.
 22. K. Kang, S. Park, A. Jo, K. Lee, and H. Ju, “Development of ultralight and thin bipolar plates using epoxy-carbon fiber prepregs and graphite composites”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 3, 2017, pp. 1691-1697.
 23. D. Lee, J. W. Lim, and D. G. Lee, “Cathode/anode integrated composite bipolar plate for high-temperature PEMFC”, *Composite Structures*, Vol. 167, 2017, pp. 144-151.