

공기측 입구헤더의 형상 개선을 통한 고분자 전해질 연료전지의 성능 향상

김 원 년, 김 윤 호*, 김 서 영**†

삼성전자 VD사업부 개발팀, *서울시립대학교 기계정보공학과, **한국과학기술연구원 열유동제어센터

Performance Enhancement of a PEMFC by Modification of Air Inlet Flow Header Configuration

Won Nyun Kim, Yun Ho Kim*, Seo Young Kim**†

R&D team, VD Division, Samsung Electronics, Suwon 443-742, Korea

**Department of Mechanical & Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea*

***Thermal/Flow Control Research Center, KIST, Seoul 130-650, Korea*

(Received August 30, 2006; revision received March 9, 2007)

ABSTRACT: In the present study, a 10-cell PEMFC stack with straight type cathode flow channels is employed to investigate the effect of inlet air flow header configuration on the overall fuel cell performance. Four different types of inlet flow headers are considered and the flow patterns according to the air inlet flow header configuration are numerically obtained. The computed result for a modified header predicts about 8.5% improvement in the air flow distribution at 10-cell cathode channel inlets. Experiments are also carried out to confirm the numerical findings by measuring actual air flow distributions and the polarization curves of the PEMFC stack.

Key words: Air flow rate(공기유량), CFD(전산유체역학), PEMFC(고분자전해질 연료전지), Polarization curve(성능곡선)

기 호 설 명

B : 공기극 사이 간격 [mm]
 D : 공기극의 크기 [mm]
 H : 입구관의 높이 [mm]
 H_s : 스택의 높이 [mm]
 H_t : 전체 높이 [mm]
 I : 전류 [A]
 L : 스택의 너비 [mm]

\dot{m} : 공기극의 공기유량 [kg/s/m]
 P : 전력 [W]
 U : 공기유속 [m/s]

그리스 문자

Ψ : 유량함수 [kg/s/m]

하첨자

† Corresponding author
 Tel.: +82-2-958-5683; fax: +82-2-958-5689
 E-mail address: seoykim@kist.re.kr

ave : 평균값
 max : 최대값
 min : 최소값

1. 서 론

연료전지는 열기관의 효율을 증가할 수 있다는 점과 친환경적인 특징 등으로 인하여 새로운 에너지 발생장치로 기대되고 있으며, 이의 상용화를 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 PEMFC는 단순한 구조와 손쉬운 작동으로 인하여 다양한 종류의 연료전지 중 가장 많은 주목을 받고 있다.

연료전지는 단일 셀로 사용할 경우, 발생전압이 낮아 동력원으로는 적합하지 않다. 연료와 산소 공급이 원활할 경우, 발생전압은 연료전지 스택을 구성하는 셀의 개수에 비례하며, 발생전류는 Membrane Electrode Assembly(MEA)의 크기에 비례한다.^(1,2) 따라서 필요 전력에 따라 적절한 크기의 스택 형태로 구성하여 사용한다.

스택 형태의 수소 연료전지에 연료와 공기가 공급될 때, 각각의 셀로 공급되는 공기 및 연료의 유량은 편차를 가진다. 여러 개의 셀들로 구성된 연료전지 스택에서 특정 셀에 공기나 연료공급이 부족할 경우, 이 셀에서 최소 전류 생성조건이 형성된다. 연료전지 스택은 앞서 언급한 것처럼 단일 셀들을 직렬 연결한 형태이므로 최소 전류 발생조건이 형성된 셀에 의하여 전체 스택의 전류 발생량이 결정된다. 따라서, 최악의 전류 생성조건을 가지는 셀의 조건을 향상시킬 경우, 연료전지 스택 전체의 성능 향상을 기대할 수 있으며, 그로 인한 스택의 소형화가 가능하다.^(1,2)

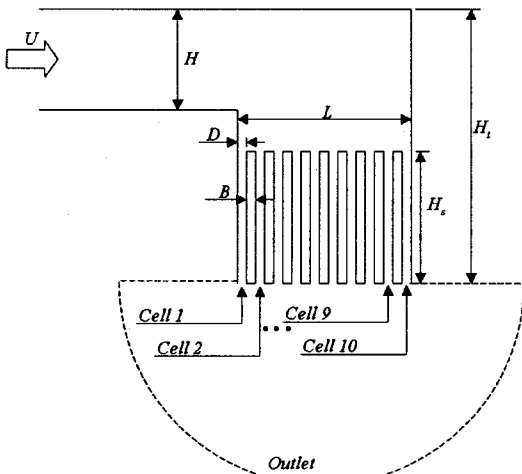


Fig. 1 Schematic diagram.

공기 중의 산소는 화학반응에 참여하며, 화학반응의 부산물로 발생된 수분제거를 수행하여 원활한 화학반응을 가능하게 한다. 또한, 화학반응을 통하여 발생된 열로 인하여 가열되는 연료전지 스택을 냉각시키는 역할도 수행하므로 공기의 원활한 공급은 연료 못지 않게 중요하다.

앞서 언급한 바와 같이 각 셀들로 공기를 원활하게 공급하기 위한 방안으로 여러 가지가 있겠으나, 본 연구에서는 10개의 셀들로 구성된 스택의 입구 헤더 형상 변경에 의한 공기공급 유량분포 개선을 통하여 연료전지의 성능 향상을 수치해석으로 예측하고 실험으로 확인하고자 한다.

2. 수치해석 모델링

수평 배치된 입구 헤더를 통하여 유입된 공기는 유동 방향이 수직으로 바뀌어 연료전지에 공급된다. 이러한 문제를 1개의 큰 입구관을 통하여 유입된 공기가 10개의 작은 관으로 분산되어 흐르는 2차원 문제로 단순화하였으며, 계산영역은 Fig.1과 같다. 계산영역의 기하학적 치수는 실제 연료전지 장치와 같으며, Table 1에 나타내었다.

단순한 기본 형태(Type 1)와 모서리 부위를 타원형 곡선으로 대체한 형상을 가진 헤더(Type 2, 3, 4)들에 대한 공기유량 분포를 구하였다. 이 입구 헤더들의 형상은 Fig.2에 나타내었다.

실제 연료전지 실험장치의 동작조건을 바탕으로 입구유속은 0.57 m/s로 설정하였으며, 출구 측에는 균일 압력조건을 적용하였고, 모든 고체 벽면에서는 점착조건을 적용하였다. 실제 연료전지 스택의 경우 화학반응으로 인하여 공기극의 산소농도가 감소하고, 수분이 공급되어 유체의 밀도와 점성계수 등이 변화하게 된다. 그러나, 셀들의

Table 1 Geometric parameters

Item	Value
B (mm)	2.5
D (mm)	3.0
H (mm)	40.0
H _s (mm)	70.0
H _t (mm)	160.0
L (mm)	52.5
U (m/s)	0.57

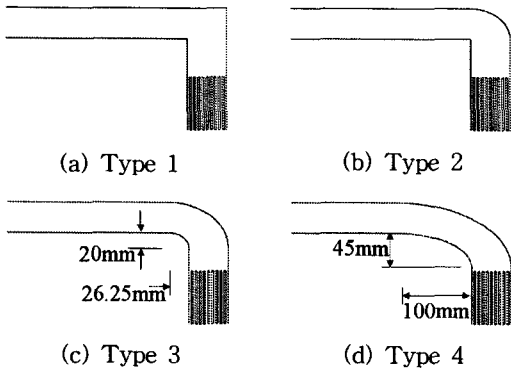


Fig. 2 Shapes of inlet headers.

공기극들 사이의 유량분포를 예측하는 것이 수치 해석의 목적이므로, 본 연구에서는 화학반응의 영향은 고려하지 않았으며, 동작유체는 비압축성 공기로 설정하였다.

경계층 내부의 유동모사를 위하여 벽면에 격자를 집중시킨 비균일 격자계를 적용하였으며, 압력방정식과 유동방정식의 연결을 위하여 SIMPLE⁽³⁾ 알고리즘을 적용하였다. 대류항 차분을 위하여 고차 도식인 MUSCL⁽⁴⁾ 도식을 적용하였으며, 상용 프로그램인 FLUENT⁽⁵⁾를 이용하여 정상상태 Navier-Stokes 식의 수치해를 구하였다.

3. 실험장치 및 방법

실험장치는 공기 공급부, 연료 공급부, 연료전지 스택으로 이루어져 있다.

공기 공급부는 압축공기를 연료전지 스택에 공급하는 역할을 하고 있으며, 압축공기의 유량을

제어하기 위한 로터미터, 입구관의 유속분포 균일화를 위한 버퍼 영역과 메쉬층, 공기를 연료전지 스택에 직접 공급하는 입구 헤더 등으로 이루어져 있다. 로터미터를 이용하여 입구 헤더로 공급되는 유량을 제어하여 입구 헤더의 입구 평균 유속을 0.57 m/s로 유지하였고, 온도 제어장치를 이용하여 연료전지 스택에 공급되는 공기의 온도는 30°C, 습도는 12.0±0.5%로 유지하였다.

연료 공급부는 수소 용기에서 유량 제어장치를 통하여 연료전지 스택에 수소를 공급한다. 본 연구에서는 연료극 측의 영향을 배제하기 위하여, 스택으로 공급된 수소가 외부로 배출되지 않는 방식을 선정하였다. 연료전지의 상류 측과 하류 측 압력을 측정하여 연료전지 스택 내부의 연료 압력을 1.5기압으로 유지하였다.

실험에 사용한 연료전지 스택은 헬리오센트리스 에너지 시스템사의 NP50⁽⁶⁾ 연료전지 스택이다. 10개의 셀이 직렬로 연결되어 있으며 공기극의 유동장은 직선형이다.

이 밖에 연료전지 스택의 온도유지를 위하여 팬을 이용하여 냉각 혹은 가열을 수행하였다. 냉각 혹은 가열을 위한 외부공기도 온도 제어장치를 이용하여 30°C로 유지하였다. 실험장치의 구성과 실제 형상은 Fig.3에 나타내었다.

연료전지의 특성을 나타낼 수 있는 특성 곡선 측정을 위한 실험을 수행하기에 앞서 항상 연료전지 스택의 초기화를 수행하였으며, 연료전지 스택의 초기화는 다음과 같이 수행하였다.

연료 공급부의 출구 밸브를 열고, 연료극에 수소 대신 가열된 질소를 공급하여 연료극의 잔류 수소와 수분을 제거한다. 이와 동시에 팬을 통하

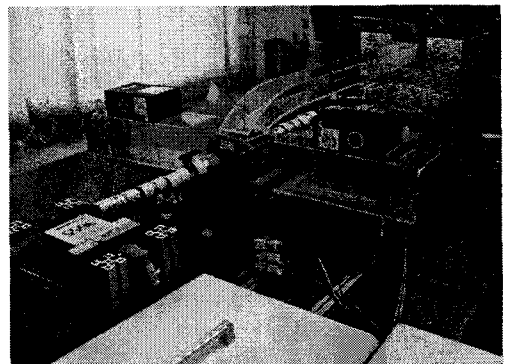
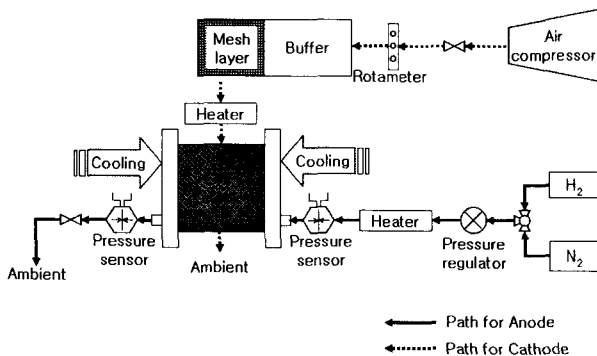


Fig. 3 Experimental setup.

여 연료전지 외부 표면을 가열한다. 연료전지 스택의 온도가 30°C가 되면, 질소공급을 중단하고, 수소를 공급하여 연료극을 다시 수소로 채운다. 이때 화학반응을 통하여 발생한 수분이 MEA에 공급되어 MEA가 활성화되도록 3A 부하조건 하에서 약 10분간 연료전지를 동작시킨다. 이 후 연료 공급부의 출구 밸브를 닫고, 연료극의 수소 압력을 1.5 기압으로 유지하여 연료전지 스택의 초기화를 마치고 특성 곡선측정을 수행하였다.

연료전지 스택의 특성 곡선측정은 다음과 같은 방법으로 수행하였다. 연료전지 스택에 0A 부하조건을 가한 후, 발생전압과 연료전지 스택의 온도가 정상상태에 도달할 때까지 유지한다. 이 후 연료전지 스택의 OCV를 측정하고 연료전지 스택의 전류부하를 증가시킨다. 다시 연료전지 스택의 온도와 발생전압이 정상상태에 도달하면 전압을 측정하고, 다시 연료전지의 전류부하를 증가시키는 단계를 반복하는 방식으로 특성 곡선의 측정을 수행하였다.

측정을 종료한 후에는 연료전지 스택의 연료극에 잔류한 수소의 크로스오버(crossover)에 의한 MEA 파손을 방지하기 위하여, 연료 공급부의 출구 밸브를 열고 연료전지 스택의 연료극에 질소를 공급하여 연료극의 수소를 제거한다. 이와 동시에 상온의 실내 공기를 이용하여 연료전지 스택의 냉각을 수행한다. 연료전지 스택의 온도가 실내 온도에 도달하면 질소공급을 중단하고, 실험을 종료하였다.

수치해석 결과의 검증은 위하여 유속측정을 수행하였다. 열선 유속계를 이용하여 연료전지 스택의 공기극 출구 유속을 측정하였다. 각 셀들의 출구에서 유속측정을 수행하여 3분간 시간 평균한 값이 일정한 값에 도달한 경우 정상상태에 도달한 것으로 판정하여, 공기극 출구 유속으로 결정하였다.

4. 결과 및 고찰

입구 헤더 형상에 따른 유선을 Fig. 4에 나타내었다. 입구 측에서 공급된 유동은 수평 방향으로 진행한 후, 입구 헤더를 따라서 유동 방향이 수직으로 변경되고, 연료전지 셀의 공기극에 해당하는 cell 1부터 10까지 10개의 관들을 통하여 출구로 배출된다. 입구 헤더의 형상에 따라 차이는

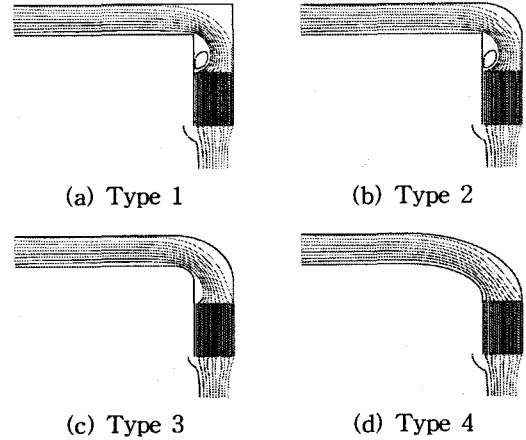


Fig. 4 Contours of stream line, $\Psi_{min}=1.62 \times 10^{-3}$ kg/s/m, $\Psi_{max}=3.24 \times 10^{-2}$ kg/s/m.

있으나, 유동 방향이 90° 변경되는 부위에서 유동박리가 발생한다. Type 1은 가장 단순하고 기본적인 형상을 가지고 있으나, 유동 방향의 변화가 가장 급격하며, 이에 따른 유동박리가 발생하여 강한 재순환 영역의 생성이 관찰된다. 유동박리에 의하여 형성된 재순환 영역의 영향으로 cell 1로의 공기 공급이 저해된다. Type 1에 비하여 다소 개선된 형태로 볼 수 있는 Type 2의 경우에서도 유동박리에 의한 재순환 영역이 여전히 존재하여, cell 1로의 공기 공급을 방해한다.

Fig. 4의 (c)와 (d)에 나타난 바와 같이 Type 3과 4의 경우, 입구관의 모서리를 타원형으로 대체하여 재순환 영역의 완화를 꾀하였다. Type 3에 비하여 타원형 곡면의 곡률을 감소시킨 Type 4의 경우 형상 수정을 통하여 유동박리 현상이 매우 약화된 것을 관찰할 수 있으며, 수치해석 결과를 토대로 하여 각 셀들의 공기극 유량 m 을 계산하여 그 분포를 Fig. 5에 나타내었다.

수평으로 유입된 유동의 방향이 수직 방향으로 바뀌도록 구성된 입구 헤더의 기하학적인 특징으로 인하여 4가지 경우 모두 첫번째 셀에 공급되는 공기유량이 최소이다. 이 후, 이웃하는 셀들로 진행할수록 유량이 증가하여 최대 유량이 발생하고, 벽면의 영향으로 공급유량이 다시 감소하는 경향을 보인다. Type 1의 경우, 첫번째 셀에 공급되는 유량이 최소이며, 이 후 이웃 셀들로 공급되는 유량은 증가하여 8번째 셀에서 공급유량은 최대이다. Type 2는 Type 1에 비하여 유로 형

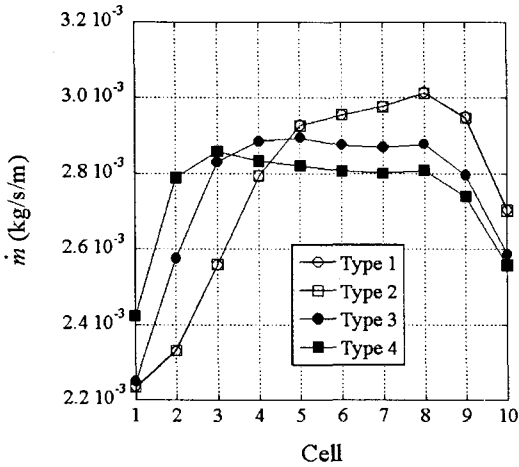


Fig. 5 Distributions of computed air flow rate.

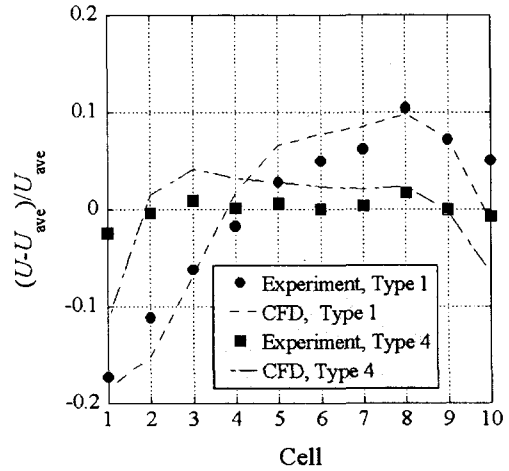


Fig. 6 Distributions of computed and measured air flow rate.

상이 소폭 개선된 형태이지만 그 영향은 거의 없다고 판단된다. 또한, 여전히 존재하는 모서리의 영향으로 셀들로 공급되는 유량의 분포가 Type 1과 거의 흡사하다. Type 3의 경우는 입구관의 모서리 부분에 대한 개선을 수행한 경우이다. 이 경우, 3번째 셀부터 8번째 셀까지 균일한 유량이 셀별로 공급된다. 셀별로 공급되는 유량의 편차는 크게 개선되었으나, 최소 유량이 공급되는 첫 번째 셀로 공급되는 공기유량은 소폭 증가에 그쳤다. Type 3의 결과를 바탕으로 유로의 곡률을 감소시켜 유동 방향의 변화를 더욱 완만하게 개선한 Type 4의 경우, 유량분포가 Type 3에 비해서도 더욱 균일해졌으며, 최소 유량이 공급되는 첫 번째 셀로 공급되는 공기유량이 증가하였다. 연료전지 스택의 전체 성능은 최소 공기유량이 공급되는 첫 번째 셀에 공급되는 공기유량의 영향을 받게 된다. 따라서 첫 번째 셀에 공급되는 공기유량이 가장 많은 Type 4의 입구 헤더를 적용할 때, 연료전지 스택의 성능이 가장 우수할 것으로 예상할 수 있다.

각 경우에 대하여 최소 공기유량이 공급되는 셀인 첫 번째 셀로 공급되는 공기유량을 분석해 보면, Type 1에 비하여 개선된 Type 2, 3, 4의 적용을 통하여 최소 공기유량이 공급되는 첫 번째 셀로 공급되는 공기유량이 증가하였다. 수치해석 결과 공기유량 분포 측면에서 Type 4가 가장 유리하며, 이 경우 가장 나쁜 성능을 가지는 Type

1에 비하여 첫 번째 셀로 공급되는 공기유량이 8.5% 증가하는 것으로 계산되었다.

수치해석 결과를 검증하기 위하여 연료전지 스택의 공기극 출구에서의 유속 측정을 수행하였으며, 가장 나쁜 경우인 Type 1과 가장 좋은 Type 4에 대한 셀별 유속분포를 Fig. 6에 나타내었으며, 수치해석 결과와도 비교하였다. 평균 유속 U_{ave} 는 2.7 m/s이다. 수치해석 결과와 실험을 통하여 얻은 연료전지 스택의 셀별 공기극 유속분포는 다소 차이가 있으나, 정성적으로 유사한 분포를 보이고 있다. Type 1의 경우, 수치해석 결과와 유사하게, 첫 번째 셀에 최소 유량이 공급되며, 점차 공급유량이 증가하여 8번째 셀에서 최대값을 가지며, 이후 감소하는 분포를 보인다. Type 4의 경우도 수치해석과 유사한 분포를 보이나, 가장자리 셀들인 첫 번째 셀과 10번째 셀에서의 유량이 수치해석 결과보다 큰 것으로 측정되었다. 즉, 최소 유량이 수치해석 결과에 비하여 큰 값을 가지게 되어, 수치해석을 통하여 예측한 것보다 더욱 균일하게 공기가 공급되어 수치해석 결과인 8.5% 이상의 성능 개선을 예상할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 연료극의 조건을 배제하기 위하여 dead end 방식으로 연료를 공급하였으며, Fig. 2에 나타낸 형태의 입구 헤더들을 적용하여 연료전지 스택에 공기를 공급하였다. 입구 헤더의 형상변화에 따른 연료전지의 성능을 관찰하기 위하여 연료전지의 특성 곡선을 측정하

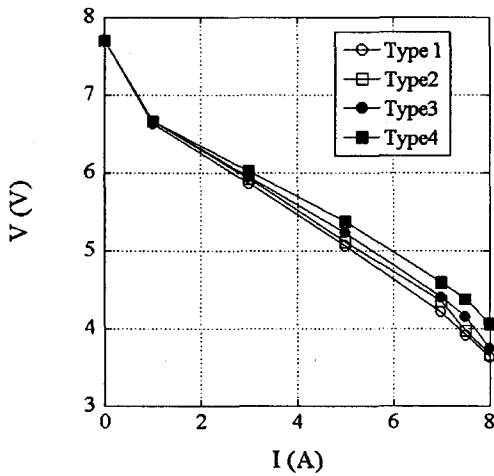


Fig. 7 Polarization curves.

여 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 전류가 증가할수록 전압이 감소하는 연료전지의 전형적인 거동을 관찰할 수 있다. 저전류 부하조건에서 전류 증가에 따라 전압이 급격히 감소하는 activation polarization dominated^(1,2) 영역과 전류 증가에 따라 전압이 선형적으로 감소하는 Ohmic polarization dominated^(1,2) 영역, 그리고 이 후 지속적인 전류 증가에 의하여 전압이 급격히 감소하는 concentration polarization dominated^(1,2) 영역의 발생이 관찰되었다. Type 1에 비하여 입구 헤더 형상을 개선한 Type 2, 3, 4의 경우, 같은 전류 부하조건에서 높은 전압이 발생하는 결과를 보이고 있다. Type 2는 앞서 나타난 수치해석 결과를 통하여 예상한 바와 같이 Type 1에 비하여 성능이 크게 향상되지 않았으나, 입구 헤더 형상이 더욱 개선된 Type 3과 Type 4를 적용한 경우는 특성 곡선을 통하여 연료전지 스택의 성능 개선을 뚜렷이 관찰할 수 있다.

전류변화에 따른 발생전력을 Fig. 8에 나타내었다. 입구 헤더 형상에 관계없이 전류가 증가함에 따라 발생전력이 증가하여 최대값에 도달하고, 이후 다시 감소하는 연료전지의 전형적인 거동을 보이고 있다. 입구 헤더 형상의 영향으로 Type 1의 경우가 최대 발생전력이 가장 낮고, 입구 헤더 형태가 개선된 Type 2, 3, 4의 순으로 최대 전압이 상승하는 경향을 보이고 있다.

실험을 통하여 측정된 입구 헤더 형태별 최대

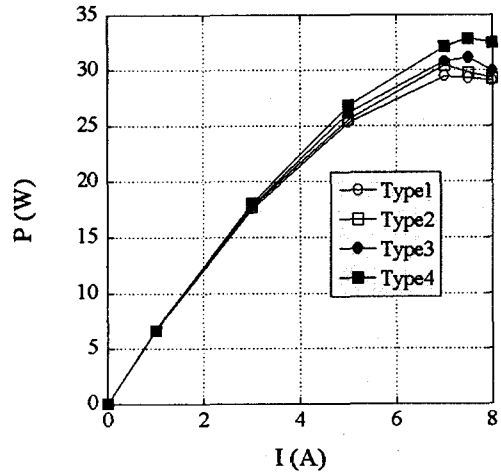


Fig. 8 Power curves.

발생전력 P_{max} 를 분석해 보면, Type 1에 비하여 공기 공급조건이 개선된 Type 2, 3, 4의 경우가 Type 1에 비하여 최대 전력이 상승하였다. 앞서 수행한 수치해석의 결과와 마찬가지로 Type 1, 2, 3, 4의 순으로 발생전력 측면에서 우수한 성능을 보이고 있으며, 이는 수치해석을 통한 예상과 일치한다. 가장 우수한 성능을 보이는 Type 4의 경우 Type 1에 비하여 공기 공급조건이 8.5% 개선되는 것으로 예측한 수치해석 결과처럼, 실험을 통하여 측정된 최대 발생전력도 Type 4의 경우가 Type 1에 비하여 약 10.3% 향상되었다.

5. 결 론

연료전지 스택의 성능 향상을 위한 한 가지 방안으로 공기 입구 헤더 형상의 개선을 제안하였다. 입구 헤더 형상의 개선에 따른 연료전지 스택의 공기측 유동장의 거동을 수치해석을 통하여 분석하였다. 개선된 공기 입구 헤더를 적용할 경우, 기본 형상의 입구 헤더에 비하여 유량분배의 균일도가 약 8.5% 개선됨을 확인하였다.

수치해석을 통하여 얻은 연료전지 스택의 셀별 유량분포는 실험을 통하여 측정된 결과와 잘 일치하였다. 수치해석 결과로부터 가장 우수한 성능을 보이는 입구 헤더를 제작 적용한 연료전지 스택에서 발생전력이 기본 헤더 형상을 적용한 경우보다 약 10.3% 증가하였다.

참고문헌

1. Larminie, J. and Dicks, A., 2003, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons Ltd.
2. Barbir, F., 2002, PEM Fuel Cells: Theory and Practice, Elsevier Academic Press.
3. Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Book Company.
4. Van Leer, B., 1979, Toward the ultimate conservative difference scheme, IV. a second order Sequel to Gudunov's method, J. of Comp. Phy., Vol. 32, pp. 101-136.
5. Fluent 6.2 User's Guide, Fluent Inc.
6. Operating Instructions, NP50 Fuel Cell Stack, Heliocentris Energy Systems.