

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.4.349

수치해석을 통한 PEMFC 채널의 설계와 SU-8을 이용한 채널 제작 및 성능 평가

최인재* · 왕학민* · 최갑승* · 김형만**

* 인제대학교 기계공학과 & 고안전차량 핵심기술연구소

Numerical Analysis-Based Design of PEMFC Channel, Fabrication of Channels, and Performance Test Using SU-8

Injea Choi*, Hakmin Wang*, Kap-Seung Choi* and Hyung-Man Kim**

*Dept. of Mechanical Engineering & High Safety Vehicle Core Technology Research Center, INJE Univ.

(Received July 21, 2009 ; Revised February 9, 2010 ; Accepted February 10, 2010)

Key Words: PEMFC(고분자 전해질 연료전지), SU-8, Flow Characteristic(유동특성), Micro-Channel(마이크로 채널), Micro Fuel Cell(마이크로 연료전지), SEM Image(주사전자현미경 화상)

초록: 연료전지는 환경문제와 천연자원 고갈을 해결할 수 있기 때문에 가장 주목받고 있는 새로운 동력원이다. 본 논문에서는 마이크로 연료전지의 효율을 높이기 위해 다양한 형상에 대해 마이크로 채널에서 수소가스 유동을 수치해석 하였다. 이미 개발된 채널과 새롭게 고안된 채널, 모두 여섯 개의 다른 형상을 가진 채널이 같은 유동 특성과 경계조건으로 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 통해 유속, 유동분포, 유동균일성 등이 채널형상에 따라 영향을 많이 받는 것을 알았다. 이에 수소 가스 유동을 고려한 채널형상 최적화를 통해 연료전지의 성능을 향상시키고자 하였다. 수치해석을 통한 최적화된 채널형상을 사용한 PEMFC 실험결과 평균보다 높은 전류밀도를 나타내었다. 그러나 내구성이 낮았다.

Abstract: Fuel cells have attracted enormous interest as new power sources because the cells can be used to solve the problem of environmental pollution as well as the natural-resource exhaustion problem. In this study, hydrogen-gas flow in microchannels of different shapes was numerically analyzed to improve the efficiency of a microfuel cell. Flow characteristics in six microchannels of different shapes but under identical boundary conditions were simulated. The analysis result shows that the flow characteristics such as velocity, uniformity, and flow rate, greatly depend upon the channel shape. This implies that the efficiency of microfuel cell can be expected to be increased by adopting the optimal configuration of channel shape for hydrogen-gas flow. The experimental results show that power density of a PEMFC with a microflow channel is higher than that of a PEMFC without a microflow channel; however, a durable catalyst is required in MEA.

1. 서 론

인류의 주 에너지원인 화석연료는 환경문제와 매장량의 한계라는 큰 문제점을 가지고 있어 주 에너지원으로써 큰 위기에 직면해 있다. 이를 해결하기 위한 대안으로 최근 신·재생에너지가 주목 받고 있다. 이러한 분위기에 따라 자동차 및 가정용 연료전지 등 중·대형 연료전지에 대한 연구가 활발히 진행 된 가운데 최근에는 휴대형 전자기기의 전원공급 장치용 소형 연료전지에 대한 연구가 활발히 진행 되었고 실용화 단계에 이르렀다.⁽¹⁾ 그러나 연료전지

는 제작 단가가 높아 상용화에 많은 어려움이 있다. 연료전지의 상용화를 위한 최우선 과제는 연료전지의 성능을 향상시킴으로써 상대적으로 단가를 낮추는 것이다. 현재 마이크로 연료전지는 다양한 연료전지 타입 중 DMFC(Direct Methanol Fuel Cell)를 이용한 개발이 주를 이루고 있으나 DMFC는 메탄올이 전해질을 바로 투과하여 효율을 저하시키는 Crossover 라는 결정적인 결함을 가지고 있어, PEMFC(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)을 이용하여 소형 연료전지를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행 되고 있다.

한편, Stanley 등은 마이크로 기계가공을 적용한 micro fuel cell에 관한 연구에서 활성화 면적이 9

* Corresponding Author, mechkhm@inje.ac.kr

cm²인 PEM fuel cell에서 최대 전력 3.2 mW/cm²을 얻었다. Park 등은 carbon의 열분해를 이용하여 제작한 유동관을 사용한 miniature PEM fuel cell을 이용하여 1.21 mW/cm²의 성능을 얻었다.^(2,3)

연료전지의 성능에는 연료의 공급 압력, 반응 온도, 습도 및 채널 내부의 연료 유동특성 등 여러 가지 요소가 영향을 미친다.^(4,5) 그 중 연료의 공급 압력, 반응 온도, 습도 등의 요소는 외부에서 제어할 수 있는 요소들인 반면, 채널내부의 수소와 산소의 가스유동 특성은 연료전지 채널의 형상에 큰 영향을 받는 요소로써 최초 연료전지 제작 시 고려해야 할 부분이다. 채널 전반에 걸쳐 가스유동특성이 고르지 못할 경우 연료전지의 전기화학반응이 활발히 일어나는 부분과 그렇지 못한 부분이 나누어져 전체적인 성능을 저하시키고, 특히 산소 측 채널에서 유동특성이 고르지 못한 경우는 유동속도가 느린 부분에서 H₂O가 액화되어 채널을 막아 연료전지의 성능을 급격히 저하시키는 결과를 초래하게 된다. 이러한 특성은 경계층의 영향으로 인하여 채널의 사이즈가 작아질수록 큰 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 소형 연료전지 채널 내부의 전반에 걸쳐 고른 가스 유동특성을 나타내는 연료전지 채널을 개발하기 위하여 유동해석 상용 코드인 CFD-ACE+를 사용하여 여러 형상의 연료전지 채널에 대한 수치해석을 수행하였고 새로운 채널 형상을 고안 하였다. 또한 수치해석 결과를 바탕으로 하여 시작품을 제작하여 실험을 통하여 연료전지의 성능을 확인하였다.

2. 소형 연료전지 채널의 설계 및 유동해석

2.1 채널의 설계

연료전지 채널의 사이즈 및 형상은 연료전지의 성능에 영향을 주는 주요한 요인 중의 하나이다.⁽⁵⁻⁷⁾ 이 중 채널의 사이즈에 관한 연구는 여러 학자들에 의하여 상당부분 진행이 되었다. 여러 수치해석 결과를 바탕으로 볼 때 채널의 사이즈는 100 μm~500 μm일 때 가장 성능이 뛰어난 것으로 나타났다.^(6,7) 이에 채널의 사이즈를 500 μm를 기준으로 설계하였고 채널의 형상은 기존에 개발된 4가지 채널과 새로운 형상의 다른 2가지 채널을 설계하였다. 새로운 형상의 채널은 연료전지 운전 시 발생하는 응축수로 인한 문제를 해결하고자 고안된 형상이며, 유체의 유입과 유출로 인해 발생하는 주변부분의 스윌을 줄이고자 입출구 주

변 부분에 경사를 주었다.

연료전지가 높은 성능을 가지기 위한 채널 형상의 조건은 채널 내부에서 고른 유동특성을 보여야 하며, 연료(수소 및 산소)의 반응 면적이 넓어야 한다.

Figure 1의 (a)~(d)는 기존의 개발된 연료전지 채널의 형상으로서, 수치해석을 통한 각 유동속도의 결과를 나타낸 것이다. 기존 채널에서 보완해야 할 부분들(채널 내부의 유동특성 및 반응면적)을 파악하여 Fig. 1의 (e)와 (f)와 같은 수소 극 채널을 설계하였다. 새로운 형상의 2가지 채널에 있어서는 채널의 깊이는 500 μm로 설계를 하였으나 채널 내부의 유동 특성의 변화라는 설계의 목적을 달성하기 위하여 채널의 너비는 500 μm 이상으로 설계하였다. 또한 각 채널은 4 cm² 또는 그 이하의 반응 면적을 가지도록 설계하였다.

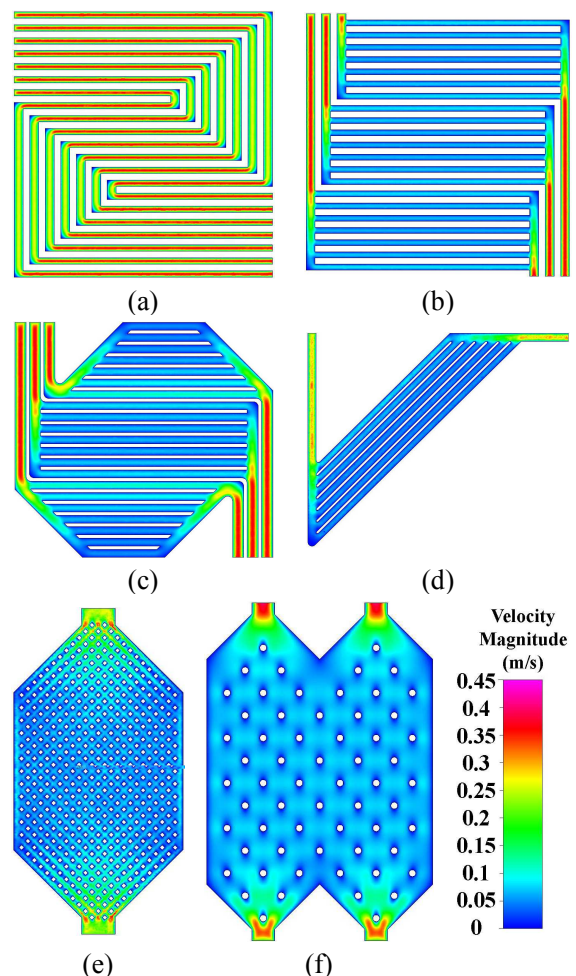


Fig. 1 Numerical analysis of hydrogen gas flow velocity each model of miniature fuel cell channels

2.2 유동해석

연료전지의 성능에 있어서 채널 내부에서 일어나는 가스의 유동특성은 아주 중요한 요인 중의 하나이다. 특히 채널의 사이즈가 마이크로 크기로 작아질 경우 가스의 경계층의 영향을 더 크게 받는다. 이러한 가운데 채널 내부 전반에 걸쳐 고른 유동특성을 보이지 않을 경우 연료전지의 성능을 저하시키는 여러 가지 현상들이 발생한다. Figure 1에서는 여러 형상((a)~(f), 6 종류)의 채널에서 발생하는 유동 특성을 속도에 대하여 나타낸 것이다. 수치해석은 연료전지의 anode(수소극) 채널에 대하여 수행 하였으며 입구에서의 수소의 속도는 0.2 m/s, 층류로 가정하였고 중력의 영향은 무시하였다. 1/10000의 수렴오차와 반복계산 1000번의 조건으로 계산되었다. (연료전지의 cathode(공기극)에 대해서도 수치해석을 수행하였으나, 수소극의 해석결과와 거의 유사한 결과를 보였다.)

Figure 1의 (b)~(e)의 채널에서는 가스의 유동속도가 채널의 각 부분마다 다른 결과를 보인다. 이는 연료 전지의 성능을 저하 시키는 요인으로 연료전지의 전기화학반응이 활발히 일어나는 부분과 그렇지 못한 부분이 나누어져 성능을 저하시킨다. 또한, cathode (산소극)에서 Fig. 1의 (b)~(e)와 같은 유동특성을 가질 경우 유동속도가 느린 부분에서 H₂O가 액화되어 채널을 막아 연료전지의 성능을 급격히 저하시키는 결과를 초래하게 된다.

Figure 1의 (a)는 (f)와 같이 채널 전반에 걸쳐 고른 유동특성을 가지고 있지만 (f)는 (a)에 비하여 반응 면적을 넓힐 수 있는 특징을 가지고 있어 더 높은 성능을 기대할 수 있는 채널 형상이다.⁽⁸⁾ 또한, Fig. 1(f)는 상대적으로 다른 형상들에 비해 uni-direction의 특성이 작고 2차원 효과가 크다. 이러한 특성 또한 채널 내 고른 유동분포에 영향을 주었다고 판단되며 연료전지의 성능향상을 기대할 수 있다.

3. 소형연료전지 채널의 제작 및 성능실험

3.1 연료전지 채널의 제작

수치해석을 통한 채널내부의 유동해석 결과를 바탕으로 연료전지채널을 제작하였다. 일반적인 기계가공은 그 크기에 한계가 있고 복잡한 형상에 대한 가공이 어렵다.^(2,9) 이에 마이크로 스케일에서의 복잡한 형상제작이 비교적 간단한 epoxy

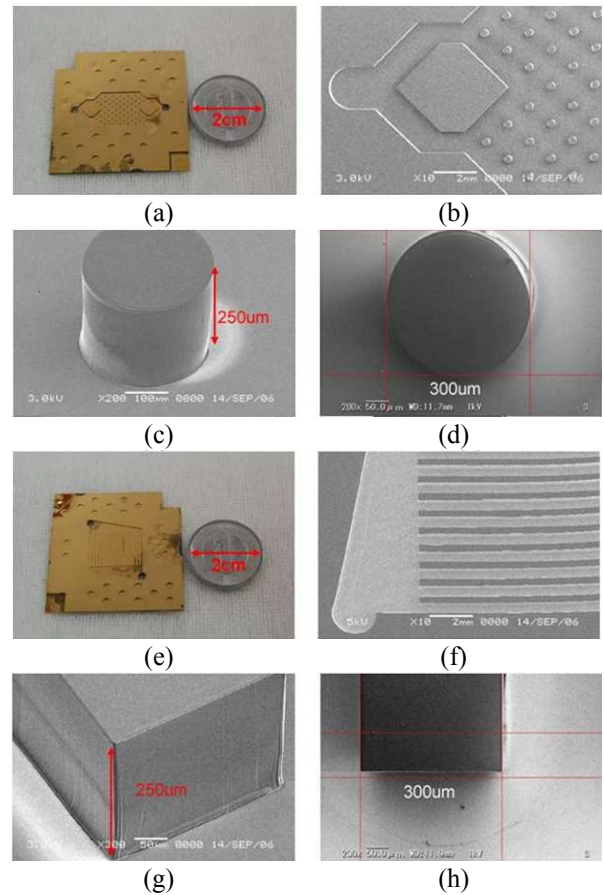


Fig. 2 Fabricated anode((a)~(d)) and cathode ((e)~(h)) channel with Si/SU-8 for micro PEM fuel cell

type negative PR인 SU-8을 사용, 실리콘기판 위에 소형 연료전지 채널을 제작하였다.

SU-8에 선택적으로 UV를 노출시키기 위해 mask를 제작하였다. 두께 380 μm 의 silicon wafer는 높은 확실성을 갖기 위해 용매제 또는 묽은 산과 초순수를 사용하여 세척한 후 200 $^{\circ}\text{C}$ 의 hot-plate에서 5분간 건조하였다. silicon wafer의 뒷면을 에칭하기 위해 알루미늄을 증착한 후 S1818을 코팅하고 앞서 제작한 mask를 사용하여 UV에 선택적으로 노출, S1818의 경화되지 않은 부분을 NMD-3 2.38% 용액을 이용하여 제거하였다. 알루미늄을 에칭한 후 ICP-RIE를 이용하여 silicon wafer를 에칭 하였다. Silicon wafer 앞면에 채널을 제작하기 위해 SU-8을 250 μm 로 코팅하고 65 $^{\circ}\text{C}$ 에서 30분간 pre-bake, 95 $^{\circ}\text{C}$ 에서 90분간 soft-bake를 하였다. 350 ~ 400 nm의 UV로 SU-8을 경화 시켰고 이외의 부분은 용매를 이용하여 제거하였다. 최종적으로 Cr(60nm) 및 Au(130nm)를 증착하여 전극으로 사용하였다. Figure 2의 (a),

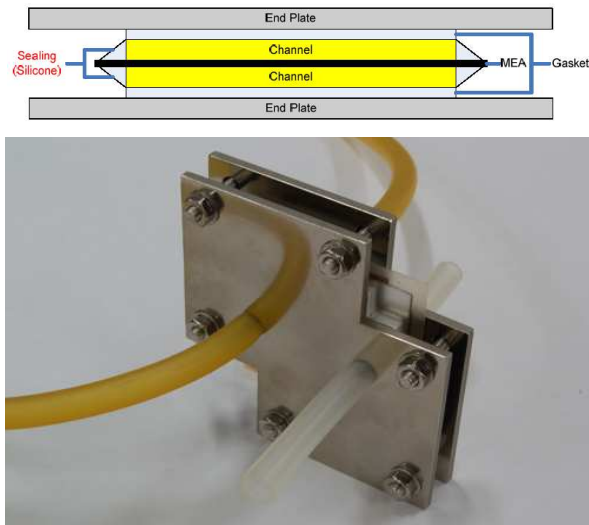


Fig. 3 Assembly of micro PEM fuel cell prototype

(e)는 각각 제작된 소형 연료전지 채널로서 수소극과 산소극을 나타낸다. Fig. 2의 수소극은 Fig. 1의 (f)의 형상이 적용되었고 산소극은 Fig. 1의 (a)~(d)의 특성을 통합하여 직선 형태의 유로가 적용되었다. 제작된 연료전지 채널은 전체 크기 3 × 3 cm이고 실제 연료전지 작동면적은 1 × 1 cm이다. Figure 2의 (b)~(d), (f)~(h)는 제작된 연료전지 채널의 SEM image이다. Figure 2의 (d), (h)와 같이 anode(수소극)는 지름 300 μm의 구조물로 채널이 이루어져 있고 cathode(산소극)는 너비 300 μm, 채널 너비 500 μm로 제작되었다.

3.2 성능실험

제작된 연료전지 채널을 이용하여 성능실험을 수행하였다. 연료전지의 성능평가를 위해 일반적으로 연료전지의 성능을 평가하는 방법으로써 보편적으로 사용되는 I-V 곡선을 이용한 전력 계산을 통해 이루어졌다. 단위전지의 어셈블리는 Fig. 3의 아래 사진과 같으며 그 단면도는 위 그림과 같이 하였고 nafion 112를 기반으로 한 3L Standard MEA를 사용하였다. 채널 내부에 외부의 공기가 유입되는 것을 방지하기 위하여 실리콘(silicone)을 사용하여 실링하였다. 500 mW 연료전지를 이용하여 H₂O를 개질, 수소와 산소를 획득하였으며 발생한 수소와 산소를 그대로 연료전지에 공급하였다.

연료전지 반응 시 가스의 압력에 대한 영향을 제거하기 위하여 가스 출구를 개방시켜 실험하였다. 공급되는 수소 및 산소의 온도는 25 °C로 일정하게 유지되었다. 공급되는 수소 및 산소는 연료 주입구

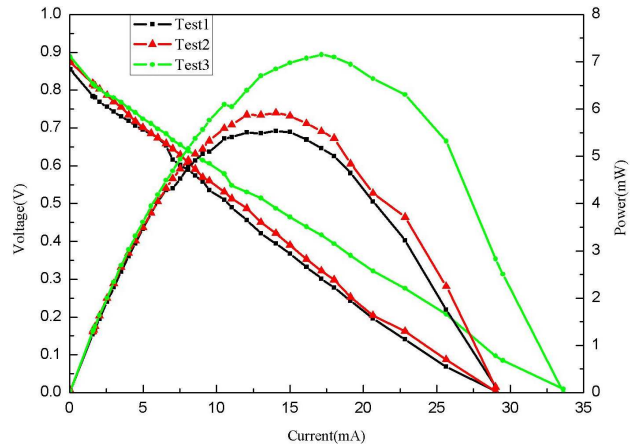


Fig. 4 Current-voltage curve and power density curve of fuel cell performance experiments of micro fuel cell prototype: y-direction of left side is Voltage (V), y-direction of right side is Power (mW)

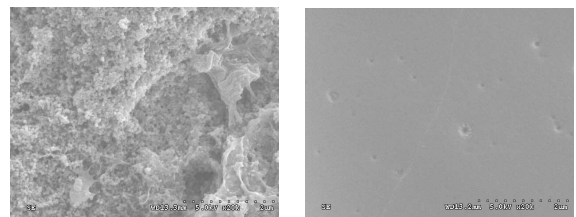


Fig. 5 SEM image of MEA (left: before experiment, right: after experiment)

에서 측정이 되었으며 K-type 열전대를 사용하여 측정하였다. 최초 연료공급 5분 후 부터 측정을 시작 하였으며 실험간 30 분의 간격을 두고 총 3 회에 걸쳐 성능 측정을 수행 하였다. Figure 4는 본 시작 품의 성능실험 결과를 나타내는 Current-voltage와 power density 그래프이다. x축은 전류(mA), y축은 전력(mW), 좌측 y축의 값은 전압(V)를 나타낸다. Figure 4에 나타난 바와 같이 최고전압 0.857~0.89 V, 최대전류 29~33.6 mA, 최대전력 5.53~7.13 mW 로 측정되었다. Figure 4의 그래프에서 확인할 수 있듯이 1~3 차 실험으로 갈수록 연료전지의 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 특히 3 차 실험 결과는 1, 2 차 실험결과보다 성능이 확연히 향상된 것을 확인할 수 있다. 최대 전력이 7.13 mW로 유사한 타 연구결과보다 높게 나타났다.^(2,3) 이는 실험이 진행되면서 반응되어 생성된 H₂O가 membrane를 가습하여 나타난 결과이다. 이후에 동일한 실험을 수행한 결과 1~3차와 비교하여 현저히 낮은 성능을 나타내었는데, 그 원인을 찾기 위해 MEA의 SEM image를 촬영하였다.

Fig. 5에 MEA 촉매층 표면의 SEM image를 나타내었다. 왼쪽의 실험 전 MEA의 SEM image에서는 촉매층 표면에 많은 기공이 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 오른쪽의 MEA SEM image에서는 표면의 기공이 없어지고 표면이 매끄럽게 된 것을 확인할 수 있다. 이것은 전극으로 사용된 금이 MEA의 촉매층 표면에 흡착된 것으로써, 단위 셀의 체결력에 의한 금과 MEA간의 압력과 전기화학반응에 의해 발생된 열, 그리고 MEA의 다공구조가 복합적으로 영향을 미친 것으로 해석된다.

4. 결 론

수치해석을 통해서 다양한 형상의 채널의 내부 유동해석을 수행하였고, 채널 전반에 걸쳐 고른 유동특성을 나타내는 채널을 설계 하였다. 실리콘 MEMS 기술과 SU-8 을 사용하여 소형 연료전지의 전극채널을 제작하였고 제작된 소형 연료전지의 성능실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수치해석결과 Figure. 1의 (f) 형태가 가장 일정한 내부 유동을 나타내었다. SU-8을 이용하여 제작한 채널의 실험결과 최대 전력이 7.13 mW로 측정되어 기존에 비슷한 연구결과 보다 높게 나타났다.

(2) Figure 4에 나타난 바와 같이 연료전지의 성능은 몇 차례의 실험을 통해서 향상되었다. 이는 연료전지의 성능에 영향을 미치는 다양한 요소 중 membrane의 가습정도에 의한 것으로 1차, 2차 실험에 비해 3차 실험의 성능이 월등히 높은 것으로 보아 3차 실험에서 membrane의 가습 정도가 가장 좋은 것을 확인하였다. 가습이 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 차후 membrane의 가습량에 따른 성능변화에 대한 구체적인 연구가 필요하다.

(3) SU-8을 이용하여 채널을 제작한 결과 소형 PEMFC 채널 제작시 SU-8을 이용한 UV 노출 방법이 기계가공과 비교할 때 유용하다는 것을 확인하였다. Figure 5에 나타난 MEA 촉매층 표면의 SEM image를 통해서 알 수 있듯이 몇 차례의 연료전지 성능 실험 후 MEA 표면에 금이 흡착되는 것이 확인되었다. 이에 보다 정확한 원인 규명을 위해서 체결력과 Au의 코팅 방법 및 여러 가지 요소를 변화시킨 실험결과가 필요하기 때문

에 추가 실험 데이터를 얻기 위한 연구를 수행할 것이다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20090080496)

참고문헌

- (1) Dyer, C.K., 2002, "Fuel Cells for Portable Applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 106, pp. 31~34.
- (2) Park, Benjamin Y. and Madou, Marc J., 2006, "Design, Fabrication, and Initial Testing of a Miniature PEM Fuel Cell with Micro-Scale Pyrolyzed Carbon Fluidic Plates," *Journal of Power Sources*, Vol. 162, pp. 369~379.
- (3) Stanley, Kevin G., Czyzewska, Eva K., Vanderhoek, Tom P. K., Fan, Lilian L. Y., Abel, Keith A., Wu, Q. M. Jonathan and Paremewaran, M(Ash), 2005, "A Hybrud Sequential Deposition Fabrication Technique For Micro Fuel Cells" *Journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 15, pp. 1979~1987.
- (4) Coppo, M., Siegel, N.P. and von Spakovsky, M.R., 2006, "On the Influence of Temperature on PEM Fuel Cell Operation," *Journal of Power Sources*, Vol. 159, pp. 560~569.
- (5) de Souza, A. and Gonzalez, E.R., 2003, "Influence of the Operational Parameters on the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with Different Flow Fields," *Journal of Solid State Electrochemistry*, Vol. 7, pp. 651~657.
- (6) Suk-Won Cha, Ryan O'Hayre, Sang Joon Lee, Yuji Saito and Fritz B. Prinz, 2004, "Geometric Scale Effect of Flow Channels on Performance of Fuel Cells," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 151-11, pp. A1856~A1864.
- (7) Cha, S.W., O'Hayre, R., Saito, Y. and Prinz, F.B., 2004, "The Scaling Behavior of Flow Patterns:A Model Investigation," *Journal of Power Sources*, Vol. 134, pp. 57~71.

- (8) Wang Hak-Min, Kim Hyung-Man, Takama Nobuyuki and Kim Beomjoon, 2006, "Analysis of Gas Flow in Micro Channels for High Performance of Micro Fuel Cell," *2nd International Conference on Cooling and Heating Technologies*, pp. 58~64.
- (9) Hsieh Shou-Shing, Huang Ching-Fang, Kuo Jenn-Kun, Tsai Huang-Hsiu, Yang Sheng-Huang, 2005, "SU-8 Flow Field Plates for a Micro PEMFC," *Journal of Solid State Electrochem*, Vol. 9, pp. 121~131.