

공기극 채널 형상이 직접 메탄올 연료전지의 성능에 미치는 영향

황 용신¹⁾, 최 훈²⁾, 차 석원³⁾, 이 대영⁴⁾, 김 서영⁵⁾

Effect of air flow channel configuration on performance of direct methanol fuel cells.

Yong-Sheen Hwang, Hoon Choi, Suk-Won Cha, Dae-Young Lee, Seo Young Kim

Key words : DMFC(직접 메탄올 연료전지), Flow channel(유로), Differential Pressure(차압), Pressure drop(압력강하), Stoichiometry(과급률)

Abstract : We consider the optimum air flow channel design for DMFC's in the present study. The effect of pressure drop across the inlet and outlet of a stack on the performance of a DMFC is investigated. The various flow channel configurations are dealt with. In DMFC systems, the optimization of such geometric parameters is crucial to minimize the parasitic power usage by the auxiliary devices such as fuel pumps and blowers. In this paper, we present how the pressure drop control can optimize the driving point of a DMFC stack. Further, we show how the optimal fuel utilization ratio can be achieved, not degrading the performance of DMFC stacks. Overall, we discuss how the flow channel design affects the selection of balance of plant(BOP) components, the design of DMFC systems and the system efficiency.

Nomenclature

P : pressure, pa
 ρ : density, kg/m³
 f : friction coefficient, pa
 L : lenth of the channel, m
 D_h : hydroric diameter, m
 V : velocity, m/s
 g : gravity acceleration, m/s²
 M : mass flow rate, kg/s

subscrip

a : air
m : moisture
da : dry air
o : outlet
i : inlet
p : product

1. 서론

휴대용 전자기기의 전원은 리튬 이온 이차 전지가 주류를 이루어 왔다. 현재 휴대용 전자

기기의 발전은 여러 가지 센서를 이용한 소형 정보 가전이나, PC와 동등한 기능을 가지는 모바일 기기 등과 같이 기능이 다양해지며, 소비 전력이 증가하는 추세이다. 이러한 상황에서 에너지 밀도가 높은 연료인 메탄올을 직접 사용하는 직접 메탄올 연료전지(DMFC) 시스템은 소형 전자 기기의 발전용으로 많은 관심을 끌고 있다.

DMFC 시스템의 개발을 위해서는 스택의 전기 화학적 특성 외에도 시스템에 영향을 미치는 인자에 대한 물리적 특성의 이해가 필요하다. 스택의 성능에 영향을 미치는 대표적인 물리적 인자로는 스택 내부의 차압, 유량, 온도, 가습량, 스택의 채결압력 및 MEA의 채결 두께 등이 있다.^{[1]-[7]} 특히 스택의 성능은 스택 내부의 차압에 많은 영향을 받게 된다.^{[2],[5],[7]} 연료 극에서는 낮은 차압으로 생성되는 CO₂에 의하여 채널

-
- 1), 2) 서울대학교, 기계공학과
E-mail : yshwang@snu.ac.kr, torr00@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8050 Fax : (02)880-1910
 - 3) 서울대학교, 기계공학과
E-mail : swcha@snu.ac.kr
Tel : (02)880-1700 Fax : (02)880-1910
 - 4), 5) 한국과학기술연구원, 에너지메카닉스연구센터
E-mail : ldy@kist.re.kr, seoykim@kist.re.kr
Tel : (02)958-5690 Fax : (02)958-5689

의 가스 막힘 현상이 발생하며, 공기 극에서는 낮은 차압으로 인하여 플러딩 현상이 발생하게 된다. 낮은 차압의 스택은 가스 막힘 현상과 플러딩을 억제하기 위하여 많은 연료와 공기를 넣어주어야 하며, 이러한 결과에 의해 많은 연료의 낭비와 기생전력을 소모하게 된다.

본 연구에서는 스택 내에서의 차압에 대한 이론적 해석을 통하여 스택내의 차압 영향에 대한 방향성을 제시하며, 공기극의 유로 설계를 통하여 높은 공기의 이용률을 얻을 수 있는 스택의 차압에 대하여 고찰하였다. 이러한 물리적 인자의 최적화를 통해 스택의 성능을 향상시킬 수 있으며, 시스템의 체적 감소 및 효율을 개선시키고, 열역학적인 손실을 줄일 수 있다.

2. 실험 방법

2.1 스택 설계

2.1.1 단위 전지 제작

본 연구에서는 Stack의 성능 실험을 위하여 활성면적이 50cm²인 E-Tak사의 MEA 12D-W MEA를 사용하였다. 12D-W MEA의 멤브레인은 Dupont사의 Nafion 117 막을 사용하였고, 공기극과 연료극의 GDL은 Carbon Cloth를 사용하였다.

스택의 유로는 공기극, 연료극 모두 사형 유로를 사용하여 제작하였다. 연료극의 채널 형상은 고정하였으며, 공기극의 채널 형상을 변화하면서 스택의 성능 변화에 대한 실험을 진행하였다. 공기극 차압에 대한 성능 변화를 알기 위해서 공기극 채널의 깊이 변화만을 고려하였으며, Open ratio를 0.923으로 고정하여 실험을 수행하였다.

2.1.2 스택의 압력강하

본 연구에서는 공기극의 차압 변화에 대한 DMFC 스택의 성능을 측정하기 위하여 스택의 공기극 입출구 차압을 계산하였다. 계산을 간략화하기 위하여 스택 내부에 흐르는 유체는 단상이며, 유로는 직선으로 가정하였다. 물론 스택내의 유동현상은 다상유동이며, 사형유로로 이루어진다. 또한 스택의 운전 시 연료극의 가스 막힘 현상과 공기극의 물 막힘 현상에 의하여 이론적 차압 이상의 압력이 걸리게 된다. 이러한 가정은 정확한 스택 내의 차압을 나타낼 수는 없으나, 스택의 유로 간에 차압의 차이나 운전률에 따른 차압의 변화에 대한 방향성을 나타내는 것에는 큰 무리가 없다.

스택 내에서의 차압에 대한 식은

$$\Delta P = \rho g \left(f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g} \right) \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있다.

Fig. 1에 과급률의 변화 시 채널 형상에 따른 차압 변화를 식 (1)을 이용하여 나타내었다.

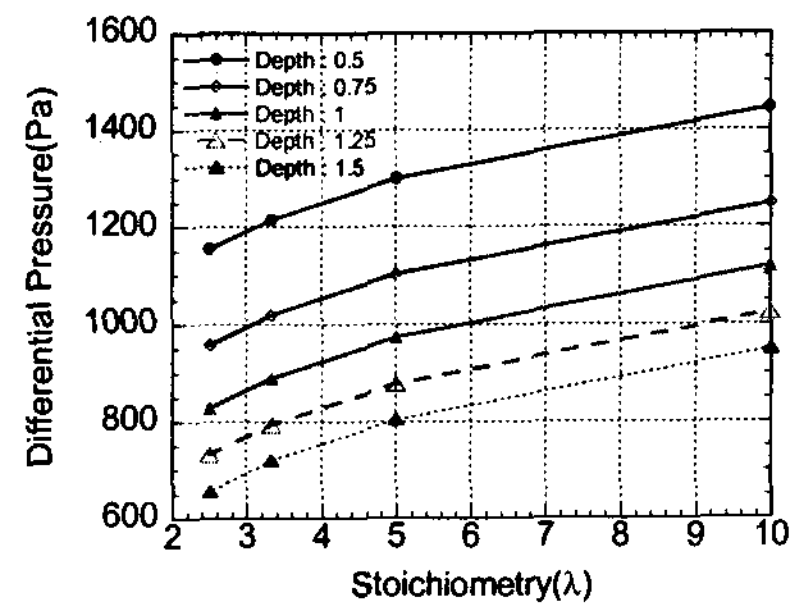


Fig. 1 Variation of the differential pressure at different channel depth(calculated result)

Fig. 1에서 알 수 있듯이 공기극 입출 구에 걸리는 차압은 약 1kPa정도이며, 과급률이 5~10인 구간에서는 차압이 선형적으로 감소하고 5이하에서 기울기가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 유로의 깊이가 1mm 이하에서는 유로 간 차압의 차이가 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 유로 간 차압의 영향을 알기 위하여 일정 Open ratio를 갖으며, 그 깊이를 변화시켜 단위 전지를 제작하였다. 유로 깊이의 변화는 0.75mm ~ 1.25mm 까지 변화시켰으며, 그 차압 영향에 따른 성능변화에 대해 실험을 수행하였다.

2.2 실험 조건

DMFC와 PEMFC 연료전지 스택의 운전 시 공기측 입구 조건이 연료전지 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 입구측 습도가 낮거나 공기의 유량이 많게 되면 공기 극에서 생성된 물과 연료극에서 크로스 오버되는 물이 빠르게 증발하며 막이 마르게 된다. 이온 전도막이 마르게 되면 이온 전도도가 떨어지며 성능 또한 낮아지게 된다. 반대로 입구측 습도가 높거나 유량이 적게 되면 공기 극에서 생성된 물과 연료극에서 크로스 오버되는 물을 효율적으로 배출할 수가 없다. 따라서 공기극 채널 내에 물이 과다해지며, 일정 수준 이상이 되면 플러딩이 일어나게 된다. 이러한 플러딩 현상은 스택의 성능을 낮출 뿐 아니라 스택의 내구성에도 문제가 된다.

입구의 습도와 유량이 스택에 주는 영향을 알기 위해서 일정 전류밀도에서 과급률에 따른 입구측 공기 상태량에 대하여 계산을 수행하였다. 계산의 간략화를 위하여 스택 운전 시 크로스 오버 량을 고려하지 않았다. 전체적인 공기의 양은

$$M_a = M_m + M_{da} \quad (2)$$

이며, 출구측 습도의 질량 유량은

$$M_{m,o} = M_{m,i} + M_{m,p} \quad (3)$$

이 된다.

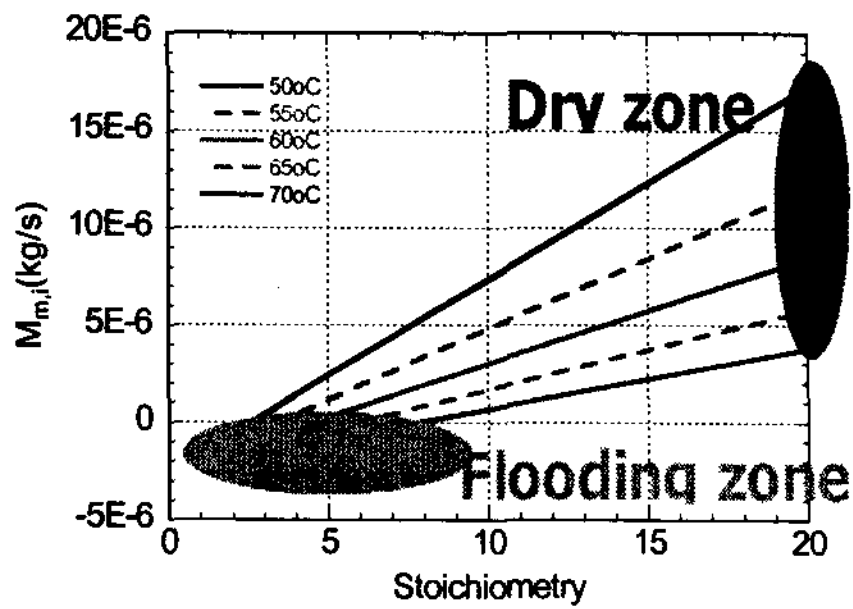


Fig. 2 Variation of the moisture flow rate at different temperature

Fig. 2에 $150\text{mA}/\text{cm}^2$ 운전 시 과급률에 따른 입구 조건의 필요 수분 량에 대해 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 온도가 높아지거나, 과급률이 높아질수록 많은 수분 량이 필요하게 된다. 본 계산 결과에 의하면 온도 50°C , 과급률 7이하 영역에서는 이온 전도 막의 수분이 필요 이상 증가 하게 되어 플러딩 존이 발생하게 되며, 온도 70°C 이상 과급률 20이상의 영역에서는 이온 전도 막의 수분이 적어져서 막이 건조하기 시작한다. 연료로 기체인 수소를 사용하는 PEMFC의 경우 막의 건조에 의한 영향이 지배적이게 되며, 연료로 액체인 메탄올 솔루션을 사용하는 DMFC의 경우에는 상대적으로 플러딩에 의한 영향이 지배적이게 된다.

DMFC 스택 운전 시 플러딩의 영향을 알기 위해서 운전 조건은 과급률 2.5 ~ 10까지의 영역에서 실험을 수행하였다.

3 결과

3.1 스택 내 차압의 변화

Fig. 3에 스택운전 시 과급률에 따른 차압의 변화에 대해 나타내었다. 본 실험의 결과는 $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 전류 밀도로 단위전지 운전 시 과급률의 변화에 따른 스택 내 차압의 결과이다. Fig. 3의 결과는 단상이며 직선 유로로 계산한 Fig. 1의 결과와 같이 일정 과급률 이상에서는 선형적으로 차압이 감소하나 과급률 5이하에서는 차압의 기울기가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 공기극 유로의 깊이가 1mm 이하가 될 때 각 유로 간 차압의 차이가 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 3의 결과는 Fig. 1의 결과와 그 형태가 유사하나 실제 스택의 운전 시 유체가 다상이며, 사형유로 이기 때문에 차압의 크기가 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3의 결과에서 깊이 1mm과 1.25mm사이의 과급률에 따른 차압 변화의 기울기가 유사하나 0.75mm 깊이의 유로에서는 과급률에 따른 차압의 변화 기울기가 급증하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 단위 전지 스택은 유로의 깊이가 1mm 이상에서는 차압의 크기가 약 3kPa 이하이며, 1mm 이하에서는 3kPa 이상이 걸리게 된다.

본 결과에서 알 수 있듯이 유로의 깊이가

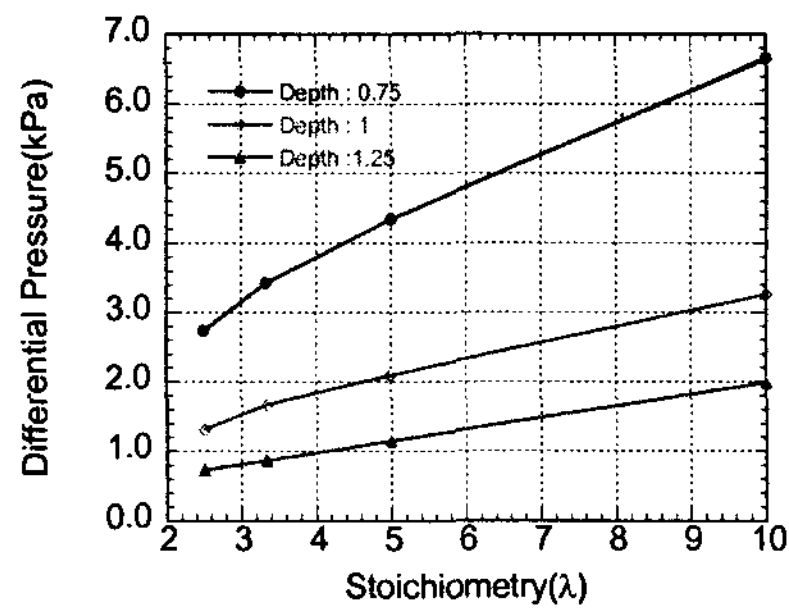


Fig. 3 Variation of the differential pressure at different channel depth(experimental result)

줄어들수록 그 차압은 증가하며 일정 유로 깊이 이하에서는 차압의 증가가 커지는 것을 알 수 있다. 또한 일정 과급률 이상에서는 과급률과 차압의 변화가 선형적으로 증가하며, 일정 과급률 이하에서는 그 기울기가 커지는 것을 알 수 있다.

3.2 과급률의 영향

과급률에 대한 영향을 알기 위하여 유로깊이가 1.25mm인 단위 전지를 이용하여 각 과급률당 일정 전류밀도 $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 하에서 스택의 운전을 수행하였다. 스택의 운전 온도는 60°C 이며, 측정은 2.5, 3.3, 5, 10의 과급률에서 일정 시간동안 전압을 측정하였다. Fig. 4에 전류 밀도 과급률에 따른 전압강하에 대해 그래프를 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 과급률이 5 ~ 10까지는 전압의 변동이 거의 존재하지 않으며, 과급률 5 이하부터 전압의 변동의 폭이 커지게 된다. 이러한 변동은 과급률이 낮아질수록 크로스 오버된 물과 생성된 물을 가지고 나갈 수 있는 공기의 능력이 작아지고, 스택 내 차압이 1kPa 이하로 낮아 짐으로 인하여 플러딩이 심화되고 있는 것이다. 본 결과는 DMFC 스택 운전 시 일정 과급률 이하로 공기의 유량을 줄이게 되면 스택 내 차압이 급격히 낮아지게 되며 플러딩이 심화되어 스택의 성능에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

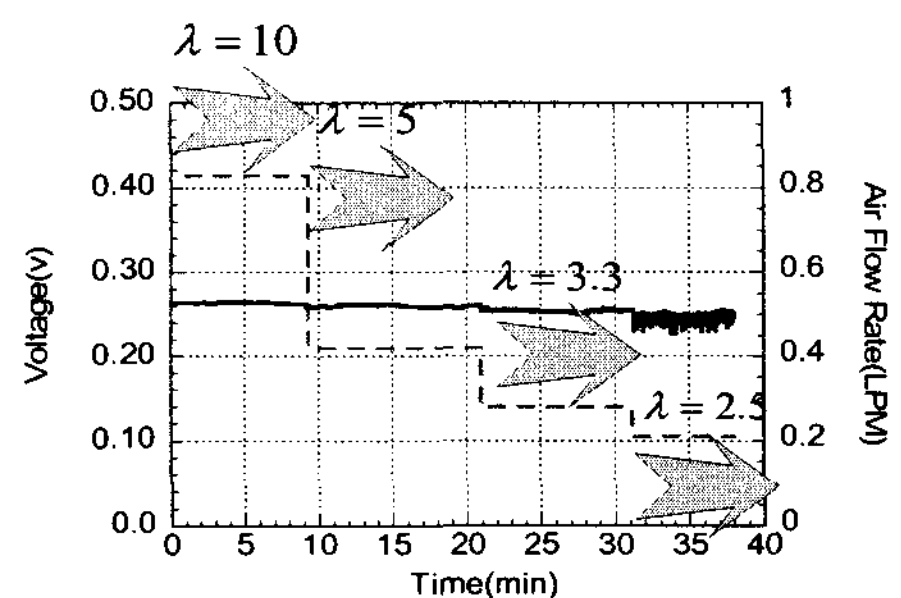


Fig. 4 Transient variation of the voltage at $100\text{mA}/\text{cm}^2$

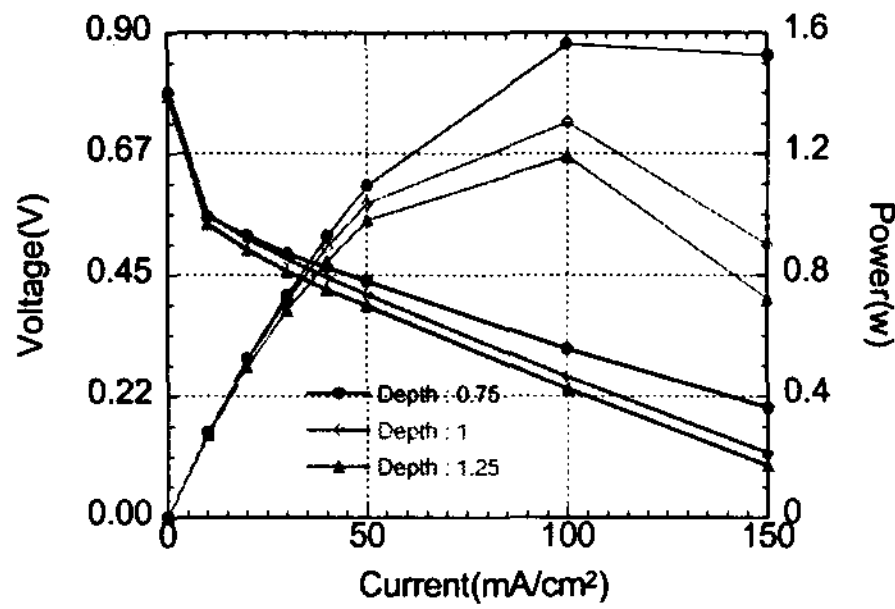


Fig. 5 DMFC performance at 60°C at different channel depth

3.3 유로의 영향

스택의 성능은 스택 내에 걸리는 차압에 영향을 받게 된다. 스택의 차압이 높아지게 되면 스택내의 확산이 증가하며, 스택 내에 생성된 물을 제거하기가 유리해진다. Fig. 5에 공기극 유로 깊이에 따른 성능커브를 나타내었다. 본 결과에서는 유로의 깊이가 감소할수록 스택의 성능이 증가하는 것을 알 수 있으며, 유로의 깊이가 1mm 이상일 때 성능의 증가율이 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 유로 깊이에 따른 스택 내 차압 변화를 나타낸 Fig. 3의 결과에서 알 수 있듯이 유로의 깊이가 1mm 이하에서는 압력 변화가 급격해지고 이러한 압력 변화의 영향이 스택 성능에 큰 영향을 미치게 된다.

Fig. 6에 운전온도 60°C, 전류밀도 100mA/cm²에서 유로의 깊이 변화 시 과급률에 따른 전압 변화를 나타내었다. 각각의 유로에서 과급률에 따른 전압변화는 과급률 5~10까지 영역에서 변화의 폭이 크지 않으나, 과급률 5이하에서는 전압강하의 폭이 급격히 커지는 것을 알 수 있다. 또한 유로 깊이에 따른 영향을 보게 되면 Fig. 5의 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 유로 깊이가 1mm 이상에서는 차압의 변화가 약 2kPa이하가 되며, 그때의 스택은 각 유로 간 전압차가 10mV가 된다. 반면, 유로의 깊이가 1mm 이하에서는 차압의 변화가 약 3kPa이상이며, 그때의 스택은 각 유로 간 전압차가 50mV가 된다. 이러한 성능의 차이는 유로 깊이에 따른 차압의 영향이 지배적이며, 차압의 영향은 3kPa 이상에서 극대화 되는 것을 알 수 있다.

4 결론

본 연구에서는 공기극 유로의 깊이 변화가 스택의 성능에 미치는 영향에 대해서 연구를 수행하였다. 스택 내부 차압은 과급률이 5~10인 구간에서는 과급률에 따른 차압의 증가율이 선형적이며, 5 이하의 과급률에서는 차압 변화의 증가율이 급격히 커지게 된다. 차압이 급격히 변화하는 구간에서부터는 스택 내의 플러딩 영향이 극대화 되며, 스택의 성능 저하가 일어나게 된다. 따라서 과급률이 5~10의 영역에서는 스택의 성능 차이가 크지 않으나, 과급률 5이하에서 부터는 급격한 성능 저하가 일어나게 된

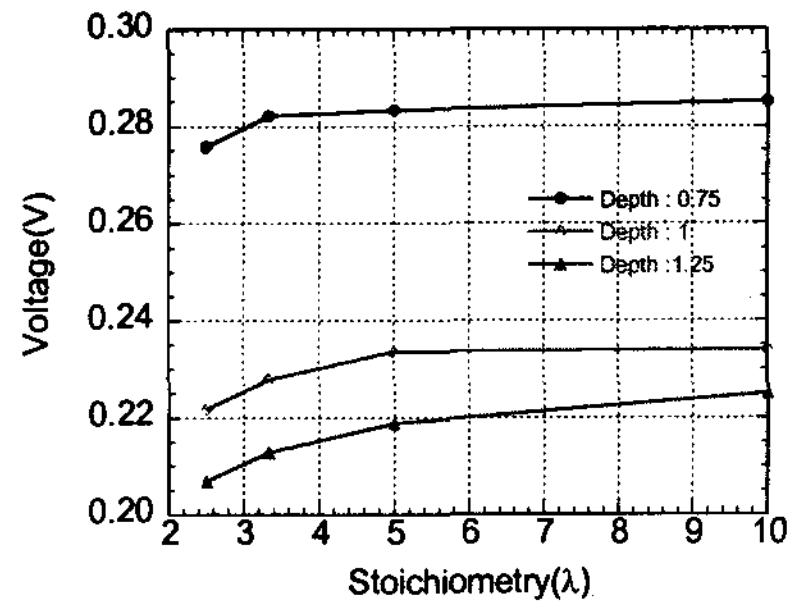


Fig. 6 Variation of the voltage at 60°C at different channel depth

다. 이러한 결과는 과급률이 낮아질수록 스택내의 공기 유량이 감소하여 수분을 제거할 수 있는 능력이 줄어들기 때문이다.

또한, 스택의 성능은 스택 내에 걸리는 차압에 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 유로 깊이가 1mm 이하에서 3kPa 이상의 차압이 걸리게 되며, 3kPa 이상의 압력에서 최적의 스택 성능을 내는 것을 알 수 있다.

후기

본 연구는 한국과학기술연구원 에너지 메카닉스 연구센터의 휴대 연료전지용 마이크로 BOP 시스템 개발과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] A. S. Arico, S. Srinivasan 2001, DMFCs: From Fundamental Aspects to Technology Development, Fuel Cells, No. 2, pp. 133-161
- [2] H. Yang, T. S. Zhao 2005, Pressure drop behavior in the anode flow field of liquid feed direct methanol fuel cells, Journal of Power Source, Vol. 142, pp. 117-124.
- [3] Kim D, Lee, J, 2006, Operational characteristics of a 50W DMFC stack, Journal of Power Source, Vol. 155, pp. 203-212.
- [4] H. Yang, T. S. Zhao, Effect of anode flow field design on the performance of liquid feed direct methanol fuel cells, Electrochemical Acta, Vol. 50, pp. 3243-3252.
- [5] A. S. Arico, P. Creti, 2000, Influence of flow field design on the performance of a direct methanol fuel cell, Journal of Power Source, Vol 91, pp. 202-209.
- [6] Jin, S, Cowart, 2005, An experimental and modeling based investigation into the high stoichiometric flow rates required in direct methanol fuel cells, Journal of Power Source, Vol. 143, pp. 30-35.
- [7] Yasuro, Y, Akira, S, 2003, Development of 5kW Polymer Electrolyte Fuel Cell, IHI Engineering Review, Vol. 36, No. 1.