

## Wave 형상 채널을 통한 연료전지 Cathode에서의 물질전달 특성 향상에 관한 연구

이규호\*, 남기훈\*, 변재기\*, 최남현\*, 최영돈\*\*<sup>†</sup>

\*고려대학교 기계공학과 대학원, \*\*고려대학교 기계공학과

## Research on Improving in Mass Transfer Characteristics by Cathode Wave-Form Channel

KYUHO LEE\*, KIHOO NAM\*, JAEKI BYUN\*, NAMHYUN CHOI\*, YOUNGDON CHOI\*\*<sup>†</sup>

\*Grad. School of Korea Univ., Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul, 136-701, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, Korea Univ., Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul, 136-701, Korea

### ABSTRACT

PEMFC (polymer electrolyte membrane fuel cell) is device that generates electricity from hydrogen. It is one of the subjects related to renewable energy and various research has been conducted on the PEMFC. PEMFC has low operating temperature and high efficiency among fuel cells, and is given attention as means for automobile and domestic use. Analysis of flow field pattern in supplying hydrogen and oxygen is part of the research to increase PEMFC efficiency. In this study, separation plate currently used in PEMFC is transformed to wave shape and mass transfer characteristics in the channel is examined through numerical and experimental analysis. Wave shape separation plate yielded 18% increase of efficiency compared to separation plate used in normal channel. And improvements in mass transfer characteristics were verified.

**KEY WORDS** : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Cathode(공기극), Channel form(관내 형상), Mass transfer(물질 전달), Separator(분리판)

### Nomenclature

$V$  : velocity, m/s  
 $u$  : velocity in axial direction, m/s  
 $v$  : velocity in vertical direction, m/s  
 $x, y$  : coordinate system  
 $p$  : pressure, Pa

### Greek symbols

$\rho$  : density  
 $\mu$  : viscous coefficient

### 1. 서 론

현재 우리가 사용하는 에너지원은 대부분 화석 연료의 연소로 얻어지고 있지만, 이 화석연료는 유

<sup>†</sup>Corresponding author : ydchoi@korea.ac.kr

[ 접수일 : 2010.12.2 수정일 : 2010.12.27 게재확정일 : 2011.2.18 ]

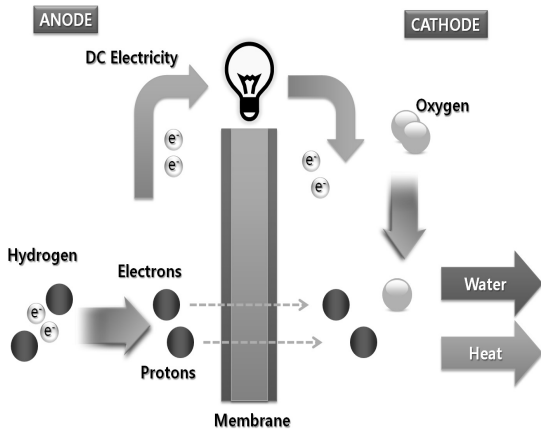


Fig. 1 PEM fuel cell schematic.

한하며 곧 매장량의 한계를 가지게 된다. 또한 환경 오염문제와 기상이변의 문제 등 여러 문제점들을 야기 시켜 새로운 에너지원을 사용하여 발전해야 할 필요성이 제기되어지고 있다.

따라서 오늘날 여러 신재생에너지원들을 이용한 발전방법에 대한 연구가 활성화되고 있다. 우리나라의 정부에서도 적극적으로 지원하는 등 풍력, 태양광, 연료전지를 비롯한 에너지원들이 개발되어지고 있다<sup>1)</sup>.

이 중 연료전지의 한 종류중 하나인 고분자 전해질 막 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell: PEMFC)는 고분자 전해질 막의 양면에 전극 촉매를 접합하여 제조한 막-전극 접합체인 MEA(membrane electrode assembly)를 이용하여, 전기를 발생시키는 장치로 많은 연구가 국내에서 시행되어지고 있으며, Fig. 1에 그 개략도를 나타내었다. 하지만 발전량이 다른 화석연료에 비해 미미한 실정이라서 아직까지 화석연료를 대체하기엔 많은 준비와 연구가 필요하다<sup>2)</sup>.

현재 진행하고 있는 연구 중 한 부분에 있어서 효과적인 연료와 산소를 공급하는 flow field 패턴에 대한 연구가 진행되어 지고 있다. 그 중 연료전지의 특성상 내부를 볼 수 없고 측정의 어려움으로 인해 연료전지내의 전기화학적 반응과 물리적 현상들을 표현할 수 있는 전산유체역학을 이용한 연료전지

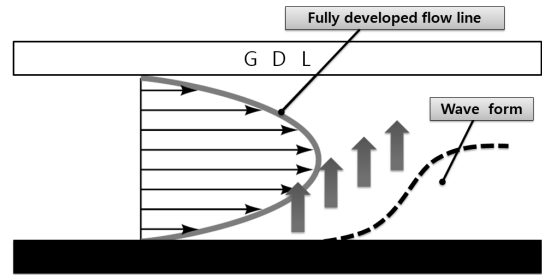


Fig. 2 Wave form effect on velocity boundary layer.

연구와 병행되어 진행되고 있다.

주요한 연구들을 살펴보면, 연료전지의 생성물인 물의 제거 및 예측에 관한 연구<sup>3,4)</sup>들이 있으며, Xianguo Li et al.<sup>5)</sup>는 여러 연구기관에서 만든 분리판 디자인 및 최신 패턴을 소개하고, 각 채널 패턴에 대한 문제점과 최적화를 위한 여러 방안을 제시 하였다. A. Su, et al.<sup>6)</sup>는 직관 채널 패턴과 S자 모양의 구불구불한(serpentine) PEMFC 채널 패턴에 대하여 3차원 전산해석과 실험을 통해 연료전지 성능을 분석하였다. 직관 채널 패턴 보다는 S자 모양의 구불구불한(serpentine) 패턴의 채널에서 더 높은 물질 전달 성능을 연구를 통해 나타 내보였다. Shiang-Wuu Perng et al.<sup>7)</sup>은 PEM fuel cells에서 가스 확산층(gas diffusion layer, GDL) 돌기 형상을 이용하여 촉매층(catalyst layer) 표면과 채널 내에서의 유동장의 특성에 대하여 전산해석을 통해 연료전지의 성능을 비교하였다. 또한 돌기 형상의 개수의 변화를 통한 유동 특성 및 연료전지 성능 비교를 하는 등 다양한 연구가 진행되고 있다<sup>8~12)</sup>.

본 연구에서는 현재 일반적으로 연료전지에 사용되고 있는 cathode측 분리판의 형상을 wave 형태로 변경시킨 후 그 결과를 수치적 검증과, 실험적 검증을 통해 채널내의 물질전달 특성을 비교 분석 하였다.

## 2. 전산해석

### 2.1 해석 모델

연료전지의 물질전달 특성을 증가시키기 위해 wave 채널을 비교하기 위한 기준으로 serpentine 형태의

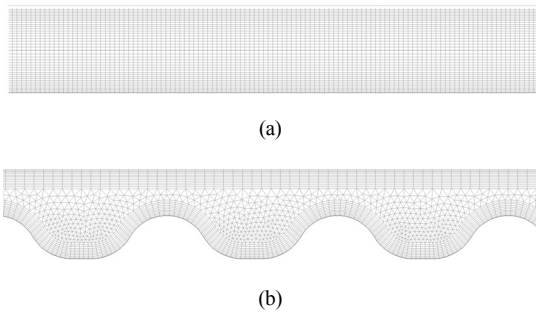


Fig. 3 Mesh of (a) normal channel and (b) wave channel.

단일 채널(normal channel)을 모델링 하여 해석을 수행하였다.

Normal 채널의 경우 완전발달 될 경우 channel에서의 유동은 Fig. 2와 같다. 따라서 GDL 근처에서의 유동흐름은 원활하지 않게 된다. 이로 인해 공기극의 채널 중심부에서 가장 빠르게 연료가 주입되므로, 효과적이지 못하다. Wave 형상의 형태는 Fig. 2에서 점선으로 표현하였다. 완전 발달 될 경우 wave form에 의해서 유체입자는 속도의 방향이 바뀌게 되어, 속도구배가 normal 채널과 달라질 것으로 예측되어진다. 이에 따라 많은 성분의 유체입자가 GDL 근처로 흐르게 되어 연료 주입이 보다 효과적이게 된다.

이러한 두 개의 비교모델은 41.5mm×0.93mm의 단일 채널에서 해석을 진행하였으며, mesh의 형태는 Fig. 3과 같다.

## 2.2 지배방정식

본 전산해석에서는 다음과 같은 방정식이 사용되어 진다.

- Continuity equation:

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{1}$$

- Momentum equation:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \tag{3}$$

- Energy equation:

$$\rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} = \Gamma \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \tag{4}$$

- Charge conservation equation

$$U_i \frac{\partial \phi_c}{\partial x_i} = -S_\phi \tag{5}$$

## 2.3 모델 시뮬레이션

해석 도구는 상용 CFD 코드 FLUENT 6.3을 이용하여 2-Dimension으로 해석하였으며, 격자 생성은 Gambit 2.4을 이용하여 작업하였다. 채널내의 유동의 특성은 laminar flow의 형태를 띄며, 그 흐름이 나중에 fully developed 될 것이라 예상하여 steady flow로 설정하였다. 이 때 처리방법은 quick scheme을 사용 하였으며, 속도-압력 결합법은 수렴성이 좋은 PISO algorithm을 사용하였다.

## 2.4 경계 조건

본 해석을 실행하기 위해서 사용된 격자수는 32,130개의 격자가 normal 채널의 경우 사용되었으며, wave 채널의 경우 23,539개의 격자가 사용되었다. 격자수의 차이는 형상의 차이에 의해 발생하였으며, 격자는 삼각 mesh와 사각 mesh가 혼합된 형태의 mesh가 사용되었다.

그 밖에 입구조건으로는 air velocity 값을 3.4293 m/s로 주었으며, 출구 조건으로는 pressure outlet의 조건을 주었다. 그 이외의 경계에는 wall 조건을 주어 전산해석을 하였다.

## 3. 실험

### 3.1 실험 장치

본 연구에서는 Fig. 4와 같은 실험 장치를 통해 측정하였다. 실험에 사용한 연료극 유로의 폭과 길이

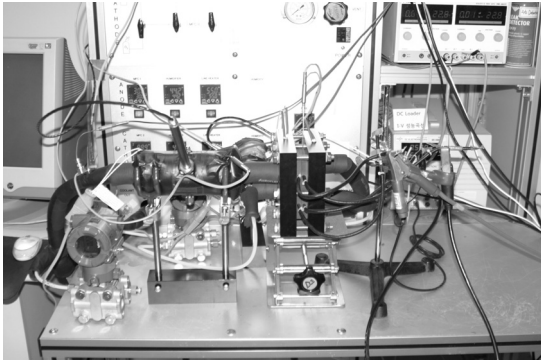


Fig. 4 Overall experimental setup of PEMFC.

는 0.9mm, 0.6mm 이며, 공기극 채널의 폭과 깊이는 0.9mm, 0.9mm 이다. Fig. 5는 가공되어진 normal 채널과 wave형상의 채널을 보여준다.

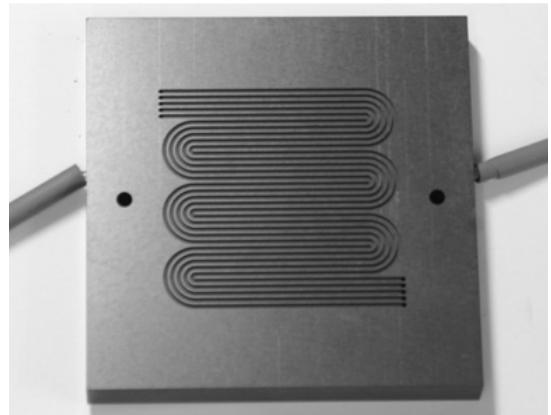
질량유량계에 99.9%의 공기와 수소를 통과시켜 유량을 조절하였고 공기와 수소 모두 습도를 일정하게 유지시키기 위해 가습기를 설치하여 90%의 상대습도를 유지시켰다. 가습기를 통과한 공기와 수소는 일정한 온도를 유지시키기 위해서 라인히터를 설치하여 온도를 조절하였다. 성능 셀의 입출구의 압력, 온도 그리고 습도를 측정하기 위해서 압력계와 차압계, 습도계를 설치하였다. 또한 셀의 온도가 일정한 상태에서 현상을 비교하기 위해서 히터를 삽입하여 온도를 유지하였다.

### 3.2 실험 조건

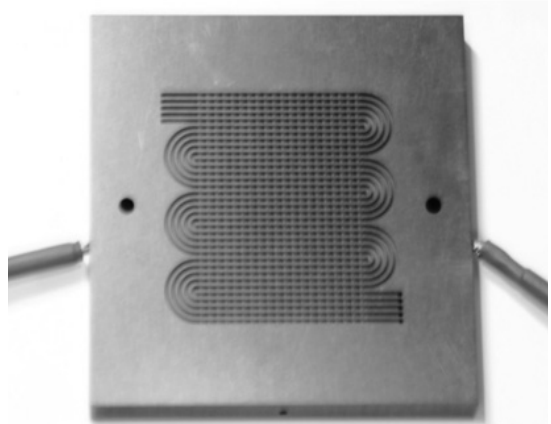
본 연구에서는 wave 형상의 채널구조와 normal 채널에 비해 성능이 얼마나 좋을지 확인하기 위해 같은 조건으로 두 가지 형상을 비교하여 실험을 수행하였다. 좀 더 정확한 결과를 얻기 위해서 연료극의 경우 당량비와 입구온도, 셀 온도를 고정시켜 실험을 수행하였다.

### 3.3 측정 장치

본 연구에서는 Gore 사의 PRIMEA 57 MEA와 SIGRCET 사의 GDL 35BC를 결합한 25cm<sup>2</sup>의 활성화 면적을 갖는 고분자 전해질 막(MEA)를 사용하



(a) Normal (straight) channel



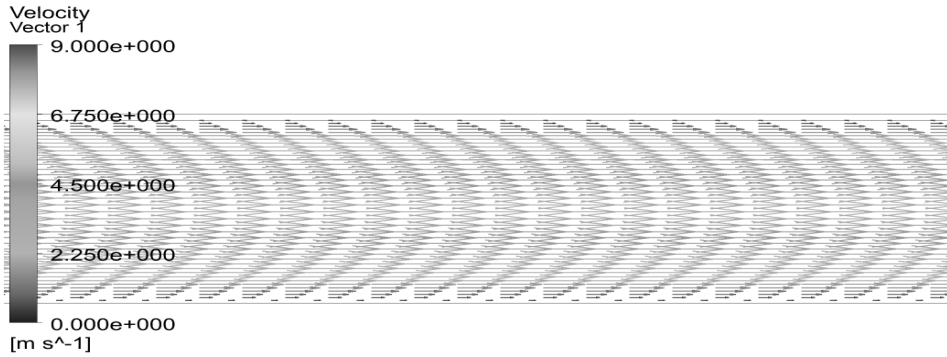
(b) Wave channel

Fig. 5 Cathode channel form, (a) straight channel and (b) wave form channel.

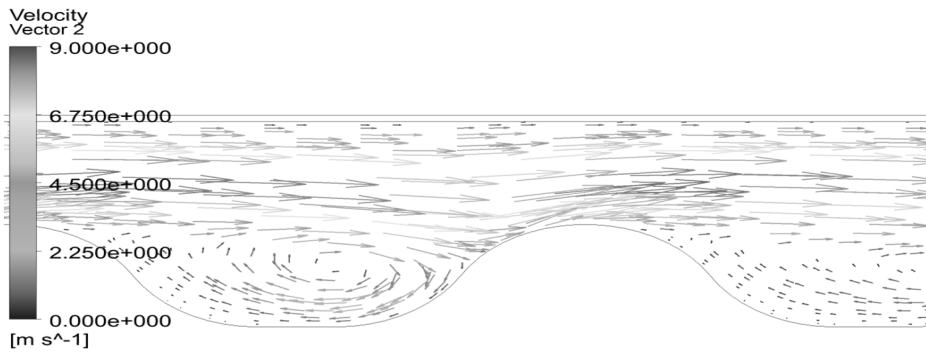
였다. 전류와 전압을 조절 및 측정을 하기 위해서 300W DC-Loader를 사용하였다. 입출구의 압력을 측정하기 위해서 YOKOGAYA사의 model - EJA110A 차압계, model- EJA530A 압력계를 사용하였다. 연료극과 공기극의 유량을 조절하기 위해서 1L/5L의 질량유량계를 사용하였다. 공기극 입구와 출구의 상대 습도를 측정하기 위해서 VAISALA사의 HMT330 series를 사용 하였다.

## 4. 해석 결과 및 고찰

위 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 시뮬레이션 결과



(a) Normal channel



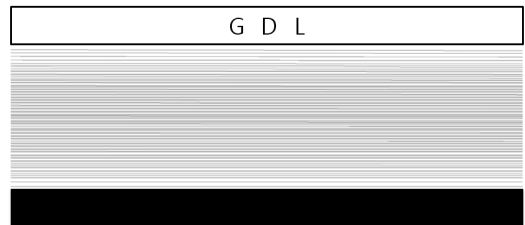
(b) Wave channel

Fig. 6 Velocity vector of (a) normal channel and (b) wave channel.

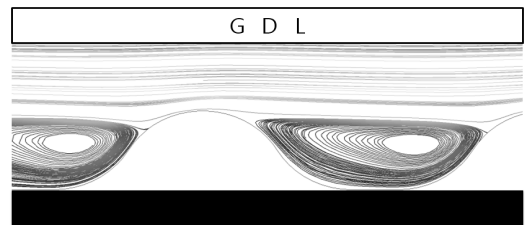
normal 채널에서의 이동방향 최고속도( $V_{max,n}$ )는 4.875m/s, wave 채널의 경우 이동방향 최고속도는 8.15m./s로 나타났다.

즉, 똑같은 입구조건과 벽면조건일 경우, 이동방향으로의 속도는 normal 채널에서 wave 채널보다 더 높은 속도로 유동이 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 같은 에너지를 갖는 wave 채널에서의 유동 흐름에서 x방향으로의 속도가 줄었다는 결과로 볼 때, y축 속도가 생겼다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7에 나타난 steam line의 모습으로 볼 때, wave 위쪽 부분으로 속도가 빨라지는 현상을 볼 수 있으며, 이러한 현상은 좀 더 많은 양의 공기를 빠르게 GDL층으로 공급하여 P-I곡선에서의 고전류 밀도구간에서의 농도분극으로 인한 급격한 성능 저하를 지연하고, 고성능 구간을 유지하는 시간을 확



(a) Normal channel



(b) Wave channel

Fig. 7 Steam line of (a) normal and (b) wave channel.

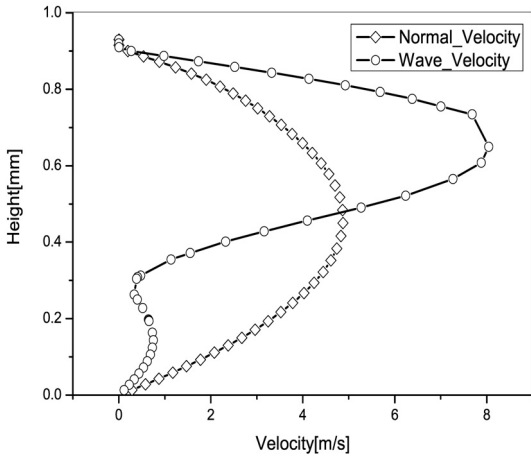


Fig. 8 Velocity variation according to height.

장시키는 효과를 낼 수 있을 것으로 예측된다.

이러한 steam line은  $V_{max} = 10\text{m/s}$ ,  $V_{min} = 0\text{m/s}$ 으로 무차원화 하여 나타낸 그림이다.

## 4.2 실험 결과와 비교

전산해석결과, Fig. 8과 같은 형태의 그래프가 나타났다. Wave form을 지난 후의 속도구배를 기존의 normal 채널과 비교하여 나타내었다. 이로 보아, 더 많은 양의 공기가 GDL 근처로 유동하게 되어 더 나은 유동 특성을 갖는 것을 확인하였다.

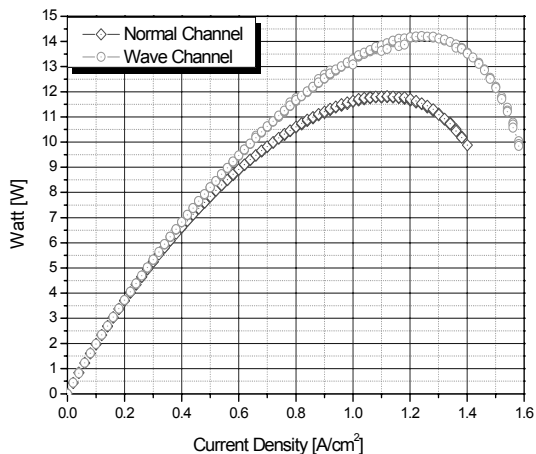


Fig. 9 P-I performance curve for PEMFC experiment.

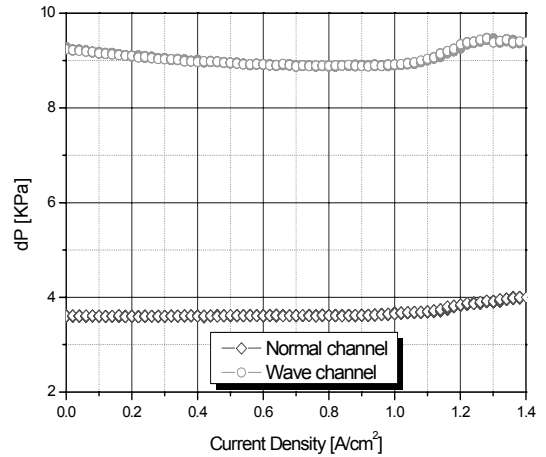


Fig. 10 Pressure curve for PEMFC experiment.

이는 wave 채널에서 y방향 속도가 wave 형상을 통해 증가되면서, 그로 인해 공기극의 반응성을 증가시키게 되어 normal 채널에 비해 wave 형상의 채널이 더 좋은 성능을 나타내게 된 것을 실험결과를 통해 알 수 있다.

전산 해석 후에 시행된 실험 결과 P-I(power-current density) curve를 Fig. 9에 나타내었으며, 그 때의 채널 입/출구 압력차를 Fig. 10에 나타내었다. Wave 채널에서 채널내의 압력이 커지게 되며, 이는 연료전지의 성능을 향상 시키는 요인이 된다. Fig. 9는 wave 채널이 보다 많은 전력을 뽑아낼 수 있다는 것을 보여주며, 고전류 밀도구간에서의 농도분극으로 인한 급격한 성능 저하를 지연하고, 고성능 구간을 유지하는 시간이 길어지는 현상을 실험을 통해 확인하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 분리판 내의 normal 형태의 채널에서 불필요한 연료의 흐름을 줄이고, 더 효과적인 연료공급과 연료전지의 성능향상을 위해 wave form 채널을 사용하여, 연구를 수행했다. 그라파이트 재질의 분리판을 밀링가공을 통해 wave form 채널을 제작하였다. 전산해석 상용툴인 Fluent를 이용하여 결

과 값을 예측하였으며, 이에 대한 증명을 하기 위해 실험 검증을 수행하였다. 그 결과, Wave form 채널의 경우가 Normal 채널에 비해 성능이 좋아지는 것을 확인 할 수 있었으며, 이러한 영향은 Normal 채널에 비해 Wave form에 의해서 채널 내부의 공기 유동이 GDL 측으로 대류와 확산을 통해 전달되어지는 공기의 양이 많아져 성능이 향상 되는 것이다, 이러한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) Wave form 채널의 경우 수치적 해석 결과 기존의 normal 채널에서의 유동과 비교해 볼 때, normal 채널에서는 확산력으로 GDL 측으로의 가스공급이 주된 역할을 하겠지만, Wave form에 의해 GDL 측으로의 유동이 증가되면서 확산력과 더불어 대류에 의한 물질전달이 향상되어 연료 전지에 사용될 경우 더 좋은 유동 특성을 갖는 것을 확인하였다.
- 2) 실험 결과는 P-I 곡선에서 보듯이 전류밀도(current density)가 증가함에 따라 기존의 normal 채널과 wave form 채널의 기울이의 격차가 달라지는데, 이것은 전류밀도 증가에 따라 점진적으로 증가하는 농도분극에 의한 것으로, 가장 큰 전력이 나오는 한계전류밀도의 구간에서도 normal 채널에 비해 wave form 채널이 더 큰 전류밀도에서 나타난다. 이런 결과는 wave form 채널이 normal 채널에 비해 최대 전력이 약 18% 높게 나타나는 것을 Fig.9를 통해 확인하였다.

## 후 기

본 과제는 한국연구재단 연구과제 (2009-0086642)로 수행된 것이며 이에 감사한다.

## 참 고 문 헌

- 1) Yongseok Lee and Do-Hwan Rho, "Innovation Technology Development & Commercialization Promotion of R&D Performance to Domestic Renewable Energy", 기술혁신학회지, Vol. 12, No. 4, 2009, pp. 788-818.
- 2) T.V.Nguyen and M.W.Knobbe, "A Liquid Water Management Strategy for PEM Fuel Cell Stacks", Journal of Power Sources, Vol. 144, 2003, pp. 70-79.
- 3) Kyoungrock Kim, Seongho Han, Deukkuen Ahn and Youngdon Choi, "Removal of Flooding in a PEM Fuel Cell at Cathode by Flexural Wave", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 21, No. 1, 2010, pp. 35-41.
- 4) Deukkuen Ahn, Seongho Han, Kyoungrock Kim and Youngdon Choi, "Experimental Analysis for Variation of Pressure Difference on Flooding in PEM Fuel Cell at CATHODE Channel Outlet", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 20, No. 5, 2009, pp. 390-396.
- 5) X. Li, I. Sabir, "Review of bipolar plates in PEM fuel cells : Flow-field designs", International Journal of Hydrogen energy, Vol. 30, 2005, pp. 359-371.
- 6) A. Su, Y. C. Chiu and F. B. Weng, "The impact of flow field pattern on concentration and performance in PEMFC", Int. J. Energy Res. Vol. 29, 2005, pp. 409-425.
- 7) S. W. Perng, H. W. Wu, "Effect of the prominent catalyst layer surface on reactant gas transport and cell performance at the cathodic side of a PEMFC", Applied Energy, Vol. 87, 2010, pp. 1386-1399.
- 8) Jenn-Kun Kuo, Tzu-Hsinag Yen and Cha'o Kuang Chen, "Three-dimensional numerical analysis of PEM fuel cells with straight and wave-like gas flow fields channels", J. Power Source, Vol. 177, 2008, pp. 96-103.
- 9) Jenn-Kun Kuo, Cha'o-Kuang Chen, "Evaluating the enhanced performance of a novel wave-like form gas flow channel in the PEMFC using the field synergy principle", J.Power Source, Vol. 162, 2006, pp.1122-1129.
- 10) D. Natarajan and T. V. Nguyen, "A Two-dimen-

- sional, Two-phase, multicomponent, transient model for the cathode of a proton exchange membrane fuel cell using conventional gas distributors”, J. Electrochem. Soc., Vol. 148, No. 12, 2001, pp. 1324-1335.
- 11) Y. G. Yoon, W. Y. Lee, G. G. Park, T. H. Yang, C. D. Kim, “Effects of channel configurations of flow field plates on the performance of a PEMFC”, *Electrochimica Acta*, No. 50, 2004, pp. 709-712.
- 12) F. Liu, G. Lu and C.Y. Wang, “Water transport coefficient distribution through the membrane in a polymer electrolyte fuel cell”, *J. Membrane Science*, No. 287, 2007, pp. 126-131.