

## 고분자 전해질 연료전지에서 전기화학반응 열생성에 의한 열전달특성

한상석 · 이필형 · 이재영 · 박창수 · 황상순\*

인천대학교 기계공학과

(2008년 10월 1일 접수 : 2008년 11월 21일 채택)

## Heat Transfer by Heat Generation in Electrochemical Reaction of PEMFC

Sang Seok Han, Pil Hyong Lee, Jae Young Lee, Chang Soo Park, and Sang Soon Hwang\*

Dept. of mechanical Engineering, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea

(Received October 1, 2008 : Accepted November 21, 2008)

### 초 록

고분자 전해질 연료전지의 구성요소인 기체 확산층(Gas Diffusion Layer)은 반응물을 채널에서 MEA로 전달하며 동시에 생성물을 MEA에서 채널로 전달하는 역할을 한다. 기체 확산층의 기체 투과도가 클수록 기체 확산층을 통과하는 반응기체의 양이 증가하여 고분자전해질 연료전지 성능이 향상되며 물질전달과 함께 열전달이 이루어지기 때문에 생성열에 의한 MEA의 온도상승을 억제해준다. 본 연구에서는 기체 확산층의 기체투과도를 달리하여 전기화학 반응과 열 생성을 고려한 3차원 수치해석 모델을 통해 동일 반응면적을 가지는 직선형 채널과 곡사형 채널에 대해 열전달 및 물질전달 특성을 분석하였다. 수치해석 결과 직선형 채널의 경우 곡사형 채널에 비해 기체 확산층의 기체투과도에 따른 성능 변화가 크지 않았다. 이러한 이유는 직선형 채널에서 주된 물질전달은 확산에 의해 이뤄지기 때문이다. 곡사형 채널의 경우 기체투과도가 높을수록 대류에 의한 물질전달로 원활한 물질전달이 이뤄졌기 때문에 연료전지 성능이 증가 되었으며 원활한 물질전달이 열전달을 촉진하여 MEA의 온도를 낮추었다. 또한 곡사형 채널에서는 기체투과도가 작아질수록 확산에 의한 물질 및 열전달 특성을 보여주었다.

**Abstract :** GDL(Gas Diffusion Layer) is one of the main components of PEM fuel cell. It transports reactants from the channel to the catalyst and removes reaction products from the catalyst to the channels in the flow filed plate. It is known that higher permeability of GDL can make it possible to enhance the gas transport through GDL, leading to better performance. And MEA's temperature is determined by gas and heat transport. In this paper, three dimensional numerical simulation of PEM fuel cell of parallel channel and serpentine channel by the permeability of GDL is presented to analysis heat and mass transfer characteristics using a FLUENT modified to include the electrochemical behavior. Results show that in the case of parallel channel, performance variation with change of permeability of GDL was not so much. This is thought because mass transfer is carried out by diffusion mechanism in parallel channel. Also, in the case of serpentine channel, higher GDL permeability resulted in better performance of PEM fuel cell because of convection flow though GDL. And mass transfer process is changed from convection to diffusion when the permeability becomes low.

**Keywords :** GDL, PEM fuel cell, Permeability, Heat transfer, Serpentine channel, Parallel channel.

\*E-mail: hwang@incheon.ac.kr

## 1. 서 론

고분자전해질 연료전지는 상온에서의 작동, 높은 동력 밀도, 간단한 구성, 빠른 시동 등이 다른 연료전지에 비해 우수하기 때문에 광범위한 분야에서 활발한 연구가 이뤄지고 있다.<sup>1-4)</sup> 고분자전해질 연료전지의 요소로써 분리판(Bipolar Plate)과 측매층(Catalyst Layer) 사이에 위치한 기체 확산층(Gas Diffusion Layer)은 채널을 통해 유입된 가스를 측매층 전체 면에 넓게 분포시키며 동시에 측매층에서 화학반응에 의해 생성된 화학종을 채널로 이동시키는 역할을 한다. 기체 확산층의 특성 중 기체투과도는 압력이 서로 다른 경계면에서 기체 확산층을 통해 반응 기체를 얼마나 투과시키는가에 대한 물리적 의미를 가진다. 따라서 기체 확산층의 기체투과도가 클수록 기체 확산층을 통과하는 기체 양이 증가하게 된다. 그 결과 측매층으로의 반응기체 전달량이 증가하여 연료전지 성능이 향상되며 기체 확산층에서의 원활한 물질전달로 인하여 채널 내부의 압력손실이 줄어들게 된다. 또한 MEA에서 전기화학 반응에 의한 생성열이 물질전달과 함께 채널로 효과적으로 전달되기 때문에 MEA의 온도상승을 억제 시킨다. 이와 같이 기체 확산층의 기체투과도는 고분자전해질 연료전지 성능에 밀접한 관계를 가지는 구성요소로써 물질전달과 열전달에 직접적인 영향을 미치는 요소이다. 따라서 기체 확산층의 기체투과도와 이에 따른 물질전달 및 열전달 특성에 대한 연구가 필요하다. 기체 확산층에 대한 연구로써 기체 확산층 두께와 다공성에 따른 물질전달 특성에 대한 수치해석 연구가 이뤄졌으나 이를 연구는 전기화학 반응을 고려하지 않거나 단순화된 모델을 사용한 수치해석으로 보완적인 연구가 필요하다.<sup>5-7)</sup> 기체 확산층의 기체투과도에 대한 연구로는 Bernardi<sup>8)</sup>는  $4.73 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 의 기체투과도를 적용한 수치해석을 통해 연료전지 성능특성을 연구하였고 Pharoah<sup>9)</sup>은 기체투과도가 기체 확산층에 미치는 영향을 조사하기 위해 기체투과도가 달라질 경우 압력강하에 미치는 영향을 수치해석을 통해 연구하였다. 하지만 위의 수치해석 연구들은 반응열을 고려하지 않거나 전기화학 반응을 고려하지 않았기 때문에 기체투과도에 따른 고분자전해질 연료전지 특성에 대한 명확한 연구가 이루어졌다고 할 수 없다. 열전달 특성을 분석하기 위해 에너지 방정식을 적용한 수치해석 연구로써 Nguyen<sup>10)</sup>과 Fuller<sup>11)</sup>는 2차원 모델링을 적용하여 수치해석 하였고 Simpalee와 Dutta<sup>12)</sup>는 3차원으로 모델링하여 열전달을 고려한 수치해석을 통해 생성열이 고분자전해질 연료전지에 미치는 영향을 MEA의 온도분포와 전류밀도 분포 등을 통해 분석하였다. Ju<sup>13)</sup>는 열생성을 고려한 3차원 모델링을 통해 가습조건에 따른 수치해석으로 온도가 MEA의 가습에 영향을 준다

고 설명하였다. Xianguo Li<sup>14)</sup>는 열역학적 개념과 기역 반응과, 비기역반응에 의해 발생하는 열에 대해 자세하게 설명하였다. 본 논문에서는 연료전지 반응에서 기역 반응과 비기역반응 과정에 의해 발생되는 생성열을 고려한 수치해석을 통해 기체 확산층의 기체투과도에 따른 직선형 채널과 곡사형 채널의 물질전달 특성과 열전달 특성을 연구하고자 한다.

## 2. 지배방정식과 수치해석 모델

### 2.1. 지배방정식

지배방정식은 질량보존 방정식과 운동량보존 방정식, 화학종보존 방정식, 에너지보존 방정식으로 구성되었다.

#### 2.1.1. 질량보존 방정식

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{u}) = S_m \quad (1)$$

$\rho$ 는 밀도,  $\vec{u}$ 는 속도벡터,  $S_m$ 은 고분자전해질 연료전지 내부에서 전기화학반응에 의해 생성되거나 소비되는 기체의 질량변화를 나타내는 생성항이다. 공기극에서는 환원되는 산소와 생성되는 수분, 양극의 농도차에 의해 이동되는 수분의 합을 나타내며 각각의 생성항은 Table 1에 나타냈다.

#### 2.1.2. 운동량 보존방정식

운동량보존방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla(\varepsilon \rho \vec{u} \vec{u}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla(\varepsilon \mu \nabla \vec{u}) + S_u \quad (2)$$

$p$ 는 압력,  $\mu$ 는 점성계수를 나타내며 모멘텀 생성항  $S_u$ 는 다공성물질에서 흐르는 유체의 운동량 감소를 나타내며 모멘텀 생성항은 Table 1에 나타냈다.

#### 2.1.3. 화학종보존 방정식

화학종보존방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla(\vec{\varepsilon u} C_k) = \nabla(D_k^{eff} \nabla C_k) + S_k \quad (3)$$

$C_k$ 는  $k$ 번째 화학종을 나타내며  $K$ 는 수소, 산소, 질소와 물을 포함하는 화학종을 나타낸다.  $D_k^{eff}$ 는 확산계수이며 다음과 같다.

$$D_k^{eff} = \varepsilon^{1.5} D_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{P_0}{P} \quad (4)$$

$\varepsilon$ 은 다공성물질의 Porosity이며 생성항  $S_k$ 는 Table 1에 나타냈다.

**Table. 1 source terms**

Source term	Equation
$S_m$	$S_{H_2} + S_{aw} \rightarrow \text{anode side}$ $S_{O_2} + S_{cw} \rightarrow \text{cathode side}$
$S_u$	$-\frac{\mu \dot{u}}{\beta}$
$S_k$	$S_{H_2} = -\frac{I(x, y, z)}{2F} M_{H_2} A_{cv}$ $S_{aw} = -\frac{\alpha_n(x, y, z)}{F} I(x, y, z) M_{H_2O} A_{cv}$ $S_{O_2} = -\frac{I(x, y, z)}{4F} M_{H_2} A_{cv}$ $S_{cw} = \frac{1 + 2\alpha_n(x, y, z)}{2F} I(x, y, z) M_{H_2O} A_{cv}$ $\rightarrow \alpha_n(x, y, z) = n_d - \frac{F}{I(x, y, z)} D_w \frac{(C_{wc} - C_{wa})}{t_m}$
$S_h$	$I(x, y, z) \times \Delta s \times A_{cv} + (U_0 - V_{cell}) \times I(x, y, z)$

#### 2.1.4. 에너지보존 방정식

에너지 보존 방정식과 반응에 의한 생성열 관련 식은 아래와 같이 표현 가능하다.

$$\nabla(\varepsilon \vec{u} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (5)$$

고분자전해질 연료전지 내부에서 생성되는 열은 전기화학 반응에 의해 수소와 산소가 물로 변환될 때 발생하는 열과 연료전지 내부의 저항에 의해 발생되는 열로 나눌 수 있다.

$$q_b = -\frac{I}{2F} \Delta H_{H_2O} - I \times V_{cell} \quad (6)$$

#### 2.2. 수분의 이동

고분자전해질 연료전지 내부에서 수소극에서 수소이온이 전해질막을 통과하여 공기극으로 이동할 때 수소극의 수분과 함께 이동하게 된다. 이때의 현상을 전기삼투(Electro-osmotic drag) 현상이라 한다. 또한 공기극의 축매층에서 전기화학 반응에 의해 생성된 수분과 전기삼투에 의해 이동된 수분에 의해 공기극 수소극의 농도차가 발생하는데 이때 공기극의 수분이 수소극으로 이동하게 되는 현상을 역화산(Back diffusion) 과정이라 한다.

$$J_{H_2O} = 2 * n_d \frac{I(x, y, z)}{2F} \quad : \text{Electro-osmotic drag flux} \quad (7)$$

$$J_{H_2O \text{ back diffusion}} = -\frac{\rho_{m, dry}}{M_{m, dry}} * D_w * \frac{d\lambda}{dz} \quad : \text{Back diffusion flux} \quad (8)$$

여기서,  $\rho_{m, dry}$ 와  $M_{m, dry}$ 는 건조 상태에서 전해질의 밀도와 당량(equivalent weight)을 나타낸다.  $D_w$ 는 수분화산계수로서 고분자 전해질 막에서 수분함량에 크게 영향을 받으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D_w = D_\lambda \exp\left(2416\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{cell}}\right)\right); D_\lambda = 10^{-10}, \lambda < 2; \\ D_\lambda = 10^{-10}(1 + 2(\lambda - 2)), 2 \leq \lambda \leq 3; \\ D_\lambda = 10^{-10}(3 - 1.67(\lambda - 3)), 3 < \lambda < 4.5; \\ \lambda \geq 4.5 \quad (9)$$

$n_d$ 는 Electro-osmotic drag 계수이며 각각의 수소이온에 의해 이동하는 물분자의 수를 정의하며 아래와 같다.

$$n_d = 0.0029 \lambda^2 + 0.05 \lambda - 3.4 \times 10^{-19} \quad (10)$$

$\lambda$ 는 전해질의 수분함량을 나타내며 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$\lambda = 0.043 + 17.81 a_a - 39.85 a_a^2 + 36.0 a_a^3, \\ 0 < a_a \leq 1; \lambda = 14 + 1.4(a_a - 1), (1 < a_a \leq 3) \quad (11)$$

$a_K$ 는 수분의 활동도를 나타내며  $X_{w, K}$ ,  $P_{sat}$ 와 관계된다.

$$a_K = \frac{X_{w, K} P(x, y)}{P_{w, K}^{sat}}, \quad K = \text{anode} \text{ 또는 } \text{cathode} \quad (12)$$

$X_{w, K}$ ,  $P_{sat}$ 는 각 전극에서 수분의 몰분율과 포화수증 기압을 나타내며  $P_{sat}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\log_{10} P_{sat} = -2.1794 + 0.02953 T - 9.1837 \times 10^{-5} T^2 \\ + 1.4454 \times 10^{-7} T^3 \quad (13)$$

수분의 Electro-osmotic drag와 Back diffusion에 의해 변화하는 전해질의 이온 전도도  $\sigma_m(x, y, z)$ 는 아래와 같다.

$$\sigma_m = (0.00514\lambda - 0.00326) \exp\left(1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_s}\right)\right) \times 10^2 \quad (14)$$

### 2.3. 전기화학 반응식

고분자전해질 연료전지의 작동 전압은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$V_{cell} = U_0 - \eta_{act} - \eta_{ohmic} - \eta_{conc} \quad (20)$$

$\eta_{act}$ 는 활성화 과전압(activation overpotential)이며 Tafel equation에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha_t nF} \times \ln \frac{I(x, y, z)P}{i_0 P_k} \quad (21)$$

$\alpha_t$ 는 전달계수(transfer coefficient)이며  $n$ 은 전자의 몫수,  $i_0$ 는 교환전류밀도(exchange current density)를 나타낸다.  $\eta_{ohmic}$ 은 수소이온이 전해질막을 통과할 때 발생되는 저항에 의해 발생하는 과전압으로 아래와 같으며  $t_m$ 은 전해질막의 두께를 나타낸다.

$$\eta_{ohmic} = I(x, y, z) \times \int_0^{t_m} \frac{1}{\sigma_m} \quad (22)$$

### 2.4. 수치해석모델

수치해석모델은 Fig. 1과 같은 직선형 채널과 곡사형 채널이며 연료극과 공기극 사이에 기체 확산층과 촉매층을 적용하여 구성하였다. 반응면의 면적은  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 이며 기체 확산층과 촉매층의 두께는  $0.254 \text{ mm}$ ,  $0.03 \text{ mm}$ 으로 동일하다. 공기극과 수소극 채널의 입구와 출구 단면적은 동일 조건으로  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 이며 입구에서의 경계조건은 질량유량으로 설정하였고 출구에서의 경계조건은 압력조건으로 설정하였다.

였으며 연료전지 작동 전압은  $0.6 \text{ V}^\circ$  셙 조건은 Table 2에 나타냈다. 수치 상용화된 전산유체 프로그램인 Fluent 사용하였으며 고분자 전해질 연료전지를 해석하기 위하여 사용자 정의 Function: UDF)을 사용하여 전기화학 였다. 또한 완성된 수치해석 모델로부터 변화에 따른 채널별 연료전지 특성을 기체 확산층의 기체투과도를  $10^{-8} \text{ m}^{2,1}$  달리하여 수치해석 하였다.

## 3. 결 과

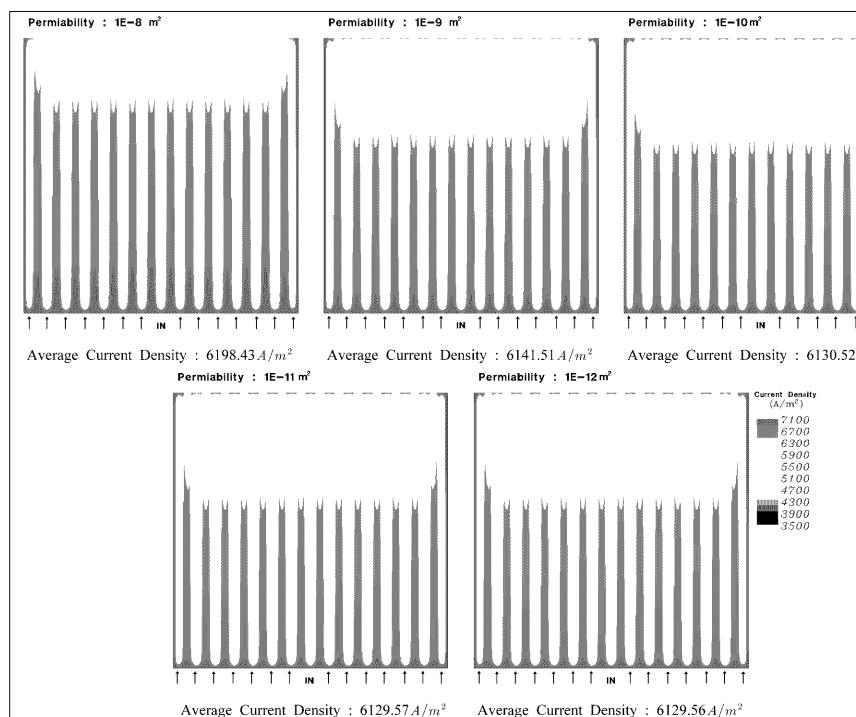
### 3.1. 직선형 채널

Fig. 2는 기체 확산층의 기체투과도 채널 연료전지 MEA에서의 전류밀도 것으로 기체투과도가  $10^{-8} \text{ m}^2$ 인 경우 경우보다 미소하게 높은 평균값을 보여 기체투과도가  $10^{-10} \text{ m}^2$ 인 조건에서 따른 평균전류밀도의 차이가 거의 없지만 모든 기체투과도 조건에서 MEA 전류밀도에 비해 MEA의 산 부분에 크게 형성되는 것을 알 수 있다. 이와 널 및 산 부분에서의 전류밀도가 차이를 알아보기 위해 Fig. 1의 Section에 대해 이온전도도와 온도에 대한 나타냈다. Fig. 3을 통해 MEA의 치 높게 나타나며 MEA의 산 부분의 낮거나 채널 부분과 산 부분 간에 온도 차를 알 수 있으며 온도가 높은 부분 도가 온도가 낮은 부분에 비해 낮거나 확인할 수 있다. 이러한 현상은 MEA



**Table. 2 Physical parameters**

Description	Value	Description
Channel width (mm)	1	Anode stoichiometric number
Channel height (mm)	1	Cathode stoichiometric number
GDL thickness (mm)	0.254	Density of dry membrane ( $kg/m^3$ )
Catalyst layer thickness (mm)	0.03	Equivalent weight of a dry membrane ( $kg/mol$ )
Anode Inlet temperature (°C)	70	Anode Operating pressure (atm)
Cathode Inlet temperature (°C)	70	Cathode Operating pressure (atm)
Cell Operating temperature (°C)	70	Operating Voltage (V)

**Fig. 2. Local current density contours according to permeability in MEA of parallel channel.**

질 경우 MEA가 건조되어 이온전도도가 감소하는 일 반적인 경향과 일치한다. 이처럼 MEA의 채널 부부과

조건에서의 속도 벡터로 부터 대류에 략이 매우 작음을 알 수 있다. 따라서

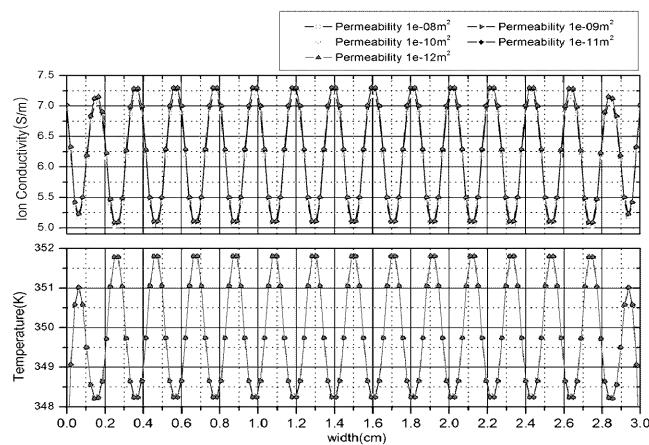
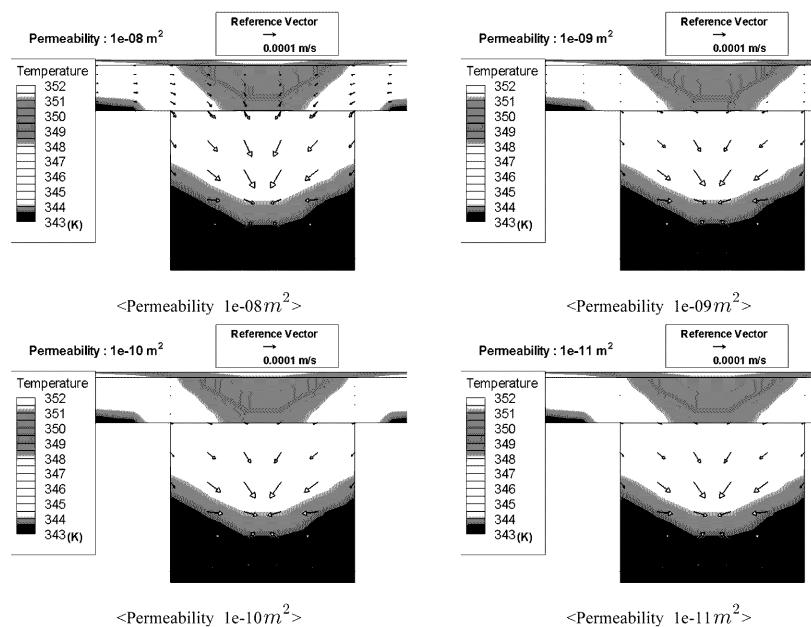


Fig. 3. Temperature and ion conductivity profiles in the plane cutting across the middle of the fuel cell of



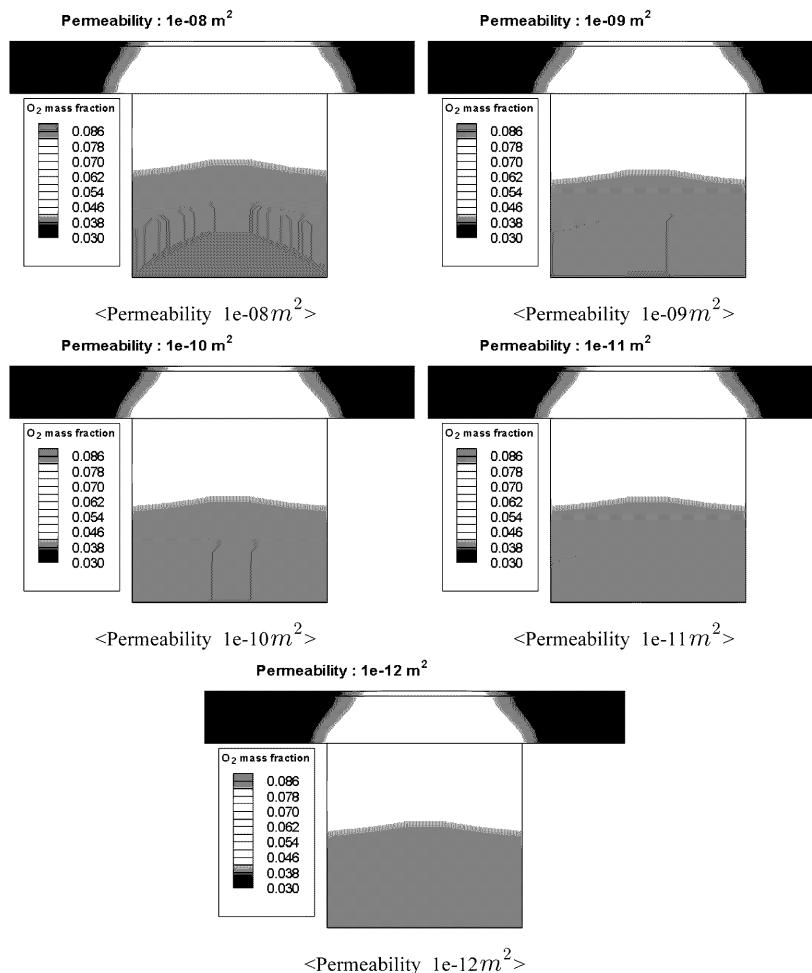
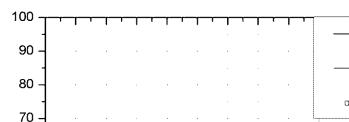


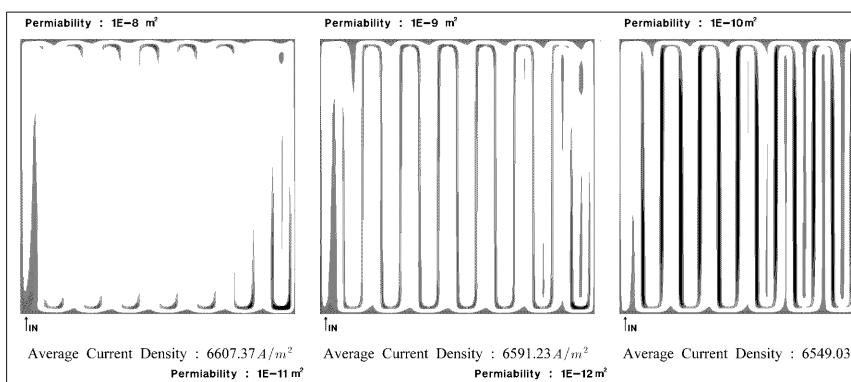
Fig. 5. Distributions of oxygen mass fractions in the cathode side at the middle length cross-section of

$10^{-8} \text{m}^2$ 에서 17 Pa로 가장 작은 입출구 압력강하를 보이고 이하부터는 압력차가 19.5 Pa로 기체투과도의 변화에도 그 차이가 없음을 알 수 있다. 결과적으로 기체 확산층의 기체투과도는 물리적으로 대류와 관계되



채널과 마찬가지로 산 부분과 채널 부분에서 전류밀도의 크기 차이가 발생한다. 하지만 기체투과도에 변화에도 거의 비슷한 평균전류밀도를 보이는 직선형 채널과 달리 곡사형 채널의 경우 기체투과도가 작아질수록 평균전류밀도가 낮아지는 경향을 보인다. 이것은 직선형 채널과는 달리 기체 확산층의 기체투과도가 곡사형 채널의 연료전지에 영향을 미친다는 의미이다. 따라서 기체투과도에 따른 곡사형 채널의 열전달 특성 변화를 알아보기 위해 Fig. 8을 나타냈다. Fig. 8은 연료전지 입구와 출구의 중심부분인 Fig. 1의 section cut(L)의 단면에서 온도분포와 속도벡터를 나타낸 것으로 기체투과도가  $10^{-8} \text{ m}^2$ 와  $10^{-9} \text{ m}^2$  조건에서 기체 확산층을 통해 한 채널에서 인접 채널로 대류에 의해 물질전달이 이뤄지는 Bypass flow 현상이 뚜렷하게 나타난다. 하지만 기체투과도가 점차 감소할수록 기체 확산층 부분의 속도 벡터가 감소하는 것을 확인할 수 있으며 이와 함께 MEA의 채널 부분과 산 부분간의 온도구배가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 기체투과도에 따라 MEA의 채널 부분과 산 부분간의 온도 변화정도를 알아보기 위해 MEA의 Section Cut(L)에서의 온도 그래프를 Fig. 9에 보였다. 기체투과도가 가장 큰  $10^{-8} \text{ m}^2$  조건에서 산과 채널 간의 최대 온도차는 약 2.25 K 정도이며 기체투과도가 최소인에서 최대 온도차는 약 3.3 K으로 약 1.5배의

최대 온도구배가 나타남을 알 수 있다. 른 물질전달 정도를 알아보기 위해 I Cut(L) 단면에 대한 기체투과도에 따른 분포를 도시하였다. 기체투과도가 높은 체 확산층의 질량 분율 구배가 완만한 이러한 이유는 Fig. 7과 같이 기체·Bypass Flow에 의해 물질전달이 효과 때문이다. 하지만 기체투과도가 감소할 때 대류보다는 확산에 의한 물질전달이 원활하게 이뤄지지 않았기 때문에 산층 간에 산소 질량 분율이 급격한 차처럼 곡사형 채널의 특징은 물질전달 확산층의 기체투과도에 따라 대류과정의 특징을 뚜렷하게 가지고 있음을 11은 연료전지의 입구와 출구의 중Cut(L)에서의 기체 확산층 내부 압력강인 것으로 기체 확산층의 기체투과도가 력강하가 크게 나타나며 기체투과도가 되는 조건에서는 압력강하가 더 이상 알 수 있다. 이러한 이유는 기체 투과도가  $10^{-12} \text{ m}^2$  이하가 될 경우 대류에 으로의 물질전달이 감소하고 대부분의 통해서만 이동되었기 때문이다.



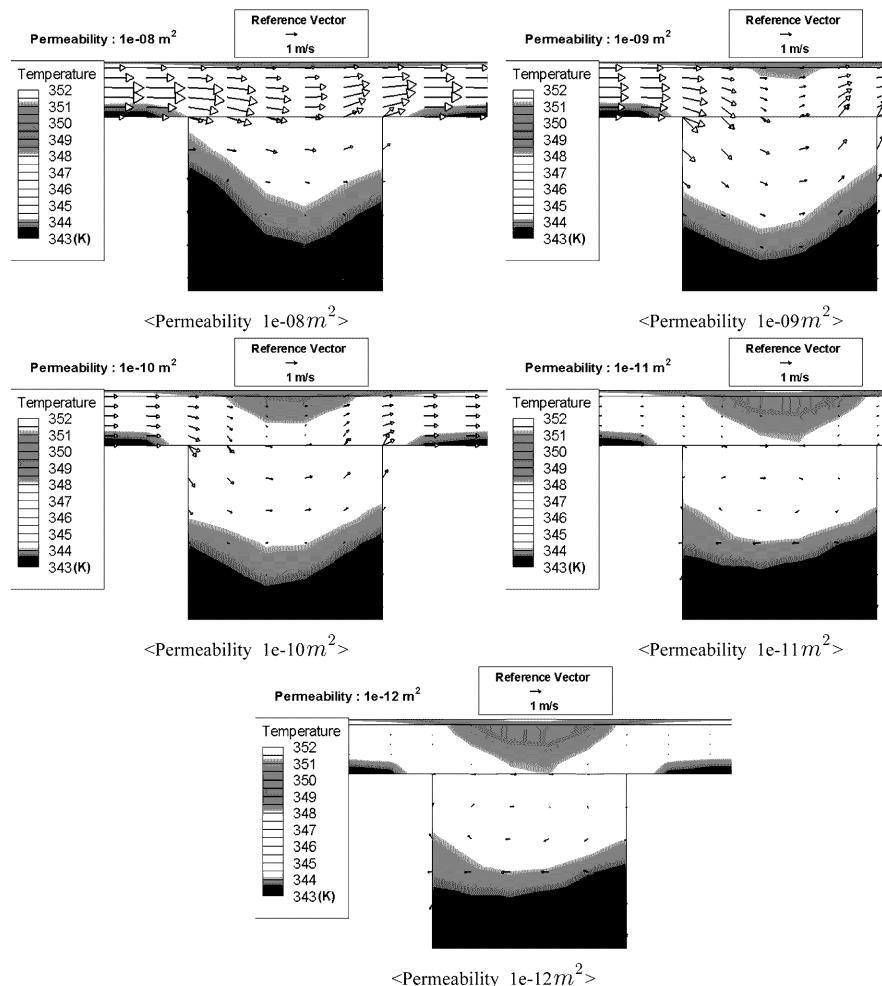
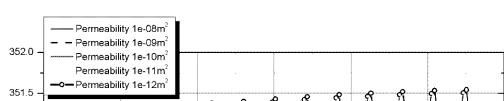
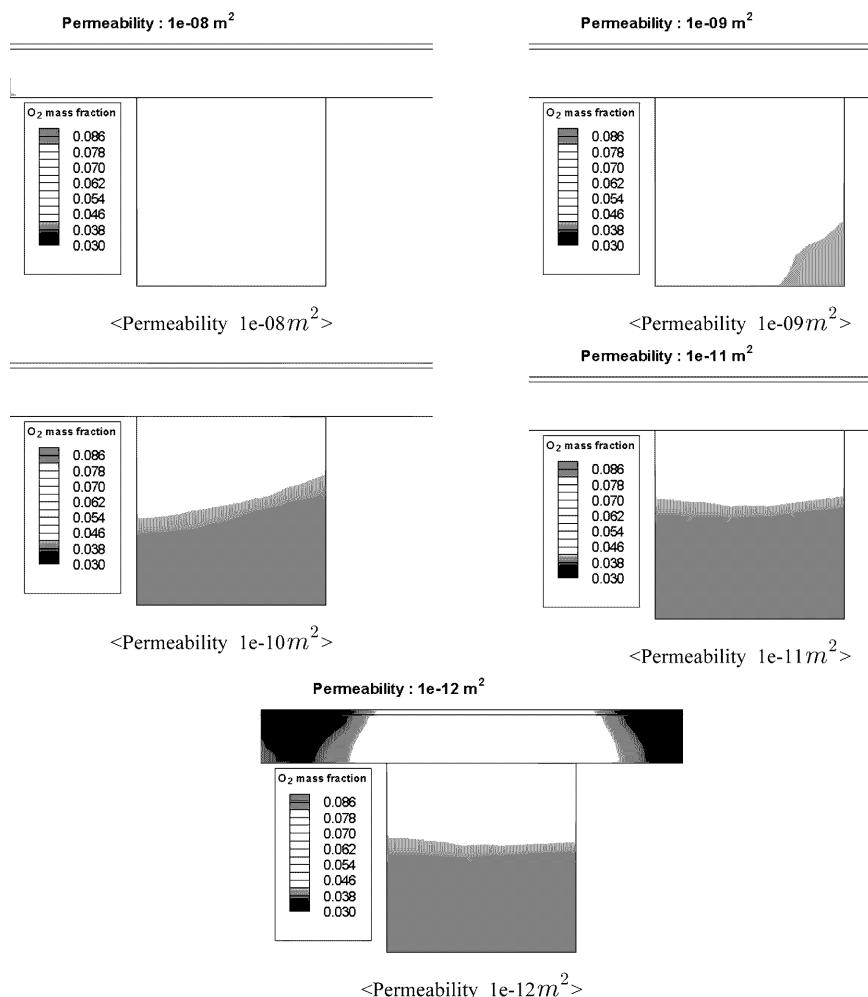


Fig. 8. Distributions of temperature and velocity vector in the cathode side at the middle length cross-section channel.

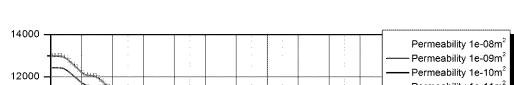
#### 4. 결 론

1) 직선형 채널과 곡사형 채널 모두  
넓은 부분과 좁은 부분간의 전류밀도와





**Fig. 10.** Distributions of oxygen mass fractions in the cathode side at the middle length cross-section channel.



4) 고사형 채널은 기체투과도가 높아 물질전달 과정이 진행되며 기체의 운도 구배와 반응 기체의 구배가

6) 채널에서 측매층으로의 반응 물질 전달 속도가 작고 대류 보다는 확산과정에 의해 물질전달이 이뤄지는 직선형 채널에 비해 반응 물질 전달 속도가 크고 대류과정에 의해 물질전달이 이뤄지는 곡사형 채널이 물질전달 및 열전달 효과가 우수하여 결과적으로 곡사형 채널에서 높은 전류밀도가 발생하였다.

## 감사의 글

이 논문은 인천대학교 2007년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음

## Nomenclature

### English letters

$A_{cv}$	Specific surface area of the control volume [ $m^{-1}$ ]
$D_w$	Diffusion coefficient of water [ $m^2/s$ ]
$F$	Faraday constant [C/mol]
$I$	Local current density [ $A/m^2$ ]
$M_{m,dry}$	Equivalent weight of a dry membrane [kg/mol]
$n$	number of electrons in electrochemical reaction
$n_d$	Electro-osmotic drag coefficient
$P$	Pressure [pa]
$T$	Temperature [K]
$\vec{u}$	Velocity vector [ $m/s$ ]
$\alpha_k$	activity of water
$P_{sat}$	vapor pressure of water
$t_m$	vapor pressure of water
$i_0$	exchange current density [ $A/m^2$ ]

### Greek letters

$\alpha$	Net water flux per proton flux
$\varepsilon$	Porosity
$\lambda$	water content in the membrane
$\mu$	Dynamic viscosity [ $kg \cdot s/m^2$ ]
$\rho$	Density of the mixture [ $kg/m^3$ ]
$\rho_{m,dry}$	Density of a dry membrane [ $kg/m^3$ ]
$\sigma_m$	Ion conductivity [S/m]
$\alpha_t$	Transfer coefficient

### Superscripts and subscripts

$a$	anode
$c$	cathode
$aw$	water of anode
$cw$	water of cathode
$w$	water
$O_2$	oxygen
$H_2$	hydrogen
$H_2O$	water
$k$	species

## 참고문헌

1. A. Kazim, H. T. Liu, and P. Forges, 'Modeling of Performance of PEM Fuel Cells With Conventional and Interdigitated Flow Fields', *J. Appl. Electrochem.*, **29**, 1409 (1999).
2. H. Wu, Berg, and Li, 'Non-isothermal Transient Modeling of Water Transport in PEM fuel Cells', *J. Power Soc.*, **165**, 232 (2007).
3. S. A. Cho, P. H. Lee, S. S. Han, and S. S. Hwang, 'Heat Transport Characteristics of Flow Fields in Proton Exchange Membrane Fuel Cells', *J. Power Soc.*, **178**, 692 (2008).
4. P. H. Lee, S. A. Cho, S. S. Han, and S. S. Hwang, 'Performance Characteristics of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) With Interdigitated Flow Channel', *International J. Automotive Technology*, **8**, 761 (2007).
5. J.-H. Jang, W.-M. Yan, and C.-C. Shih, 'Effects of the Gas Diffusion-layer Parameters on Cell Performance of PEM Fuel Cells', *J. power Soc.*, **161**, 323 (2006).
6. Z. Zhana, J. Xiao, D. Li, M. Pana, and R. Yuan, 'Effects of Porosity Distribution Variation on the Liquid Water Flux Through Gas Diffusion Layers of PEM Fuel Cells', *J. power Soc.*, **160**, 1041 (2006).
7. T. Berning and N. Djilali, 'Three-dimensional Computational Analysis of Transport Phenomena in a PEM Fuel Cell-a Parametric Study', *J. Power Soc.*, **124**, 440 (2003).
8. D. M. Bernardi and M. W. Verdrugge, 'A Mathematical Model of the Solid-polymer Electrolyte Fuel Cell', *J. Electrochem. Soc.*, **139**, 2477 (1992).
9. J. G. Pharoah, 'On the Permeability of Gas Diffusion Media Used in PEM Fuel Cells', *J. Power Soc.*, **144**, 77 (2005).
10. T. V. Nguyen and R. E. White, 'A Water and Heat Management Model PEMFCs', *J. electrochem. Soc.*, **140**, 2178 (1993).
11. T. F. Fuller and J. Newman, 'Water and Thermal Management in Solid-polymer-electrolyte Fuel Cells', *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 1218 (1993).
12. S. Shimpalee and S. Dutta, 'Numerical Prediction of Temperature Distribution in PEM Fuel Cells', *Numerical Heat Transfer, Part A*, **38**, 111 (2000).
13. H. Ju, C.-Y. Wang, S. Cleghorn, and U. Beuscherb, 'Nonisothermal Modeling of Polymer Electrolyte Fuel Cells I. Experimental Validation', *J. Electrochem. Soc.*, **152(8)**, A1645 (2005).
14. X. Li, *Principles of Fuel Cells*, Taylor & Francis, New York (2006).