

평행류와 Interdigitated 유로를 가진 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)의 성능특성에 대한 수치해석

이필형 · 조선아 · 최성훈[†] · 황상순^{††*}

인천대학교 기계공학과 대학원

[†]INNOFLOW, ^{††}인천대학교 기계공학과

(2006년 10월 24일 접수 : 2006년 11월 24일 채택)

Numerical Analysis on Performance Characteristics of PEMFC with Parallel and Interdigitated Flow Channel

Pil Hyong Lee, Son Ah Cho, Seong Hun Choi[†], and Sang Soon Hwang^{††*}

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

[†]*INNOFLOW, 407 Woolim E-biz Center II, 184-1 Guro-dong Guro-gu, Seoul 152-050, Korea*

^{††}*Dept. of Mechanical Engineering, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea*

(Received October 24, 2006 : Accepted November 24, 2006)

초 록

고분자 전해질 연료전지의 분리판의 유동채널 설계는 고전류밀도에서 발생하는 농도분극에 직접적인 영향을 줄 뿐 아니라 생성되는 물의 효과적인 전달을 위하여 매우 중요하다. 평행류 유로와 interdigitated 유로의 성능비교를 위하여 연료극과 공기극이 포함된 완전한 형태의 고분자 전해질 연료전지의 3차원 수치해석모델을 개발하였다. 수치해석모델을 사용하여 평행류 유동장과 interdigitated 유동장의 압력강하, 채널간의 물질전달, H₂O와 O₂의 농도 분포 그리고 i-V 성능을 비교하였다. 그 결과 물질전달에서 채널간의 대류에 의한 물질전달이 더욱 우수한 interdigitated 유동채널에서 성능이 더 높게 나타났으며 압력강하는 보다 크게 나타나 설계시 두가지 성능에 대한 상호보완이 필요함을 알 수 있었다.

Abstract : Optimum design of flow channel in the separation plate of Proton Exchange Membrane Fuel Cell is very prerequisite to reduce concentration over potential at high current region and remove the water generated in cathode effectively. In this paper, fully 3 dimensional computational model which solves anode and cathode flow fields simultaneously is developed in order to compare the performance of fuel cell with parallel and interdigitated flow channels. Oxygen and water concentration and pressure drop are calculated and i-V performance characteristics are compared between flows with two flow channels. Results show that performance of fuel cell with interdigitated flow channel is higher than that with parallel flow channel at high current region because hydrogen and oxygen in interdigitated flow channel are transported to catalyst layer effectively due to strong convective transport through gas diffusion layer but pressure drop is larger than that in parallel flow channel. Therefore Trade-off between power gain and pressure loss should be considered in design of fuel cell with interdigitated flow channel.

Key words : Proton exchange membrane fuel cell, Parallel flow channel, Interdigitated flow channels.

I. 서 론

고분자 전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell: PEMFC)는 낮은 작동온도와 빠른 시동성등을 가지고 있어 내연기관을 대체하여 적용될 수 있는 높은 가능성을 가지고 있다.¹⁻³⁾

고분자 전해질 연료전지에서 연료 및 산화제를 공급하는 분리판의 유동채널의 설계는 고전류밀도에서 발생하는 농도분극에 직접적인 영향을 주며 생성된 물의 효과적인 전달을 위하여 매우 중요하다.

지금까지의 유동채널의 연구는 주로 평행류(Parallel) 및 구불구불한(Serpentine) 유동채널에서의 전달현상을 주로 다루어왔으며 많은 연구에서 구불구불한 형태의 채널 구조가 평행류 형태의 채널 보다 물질전달 측면에서 효율적임을 보여 주었다.⁴⁻⁹⁾ 그

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

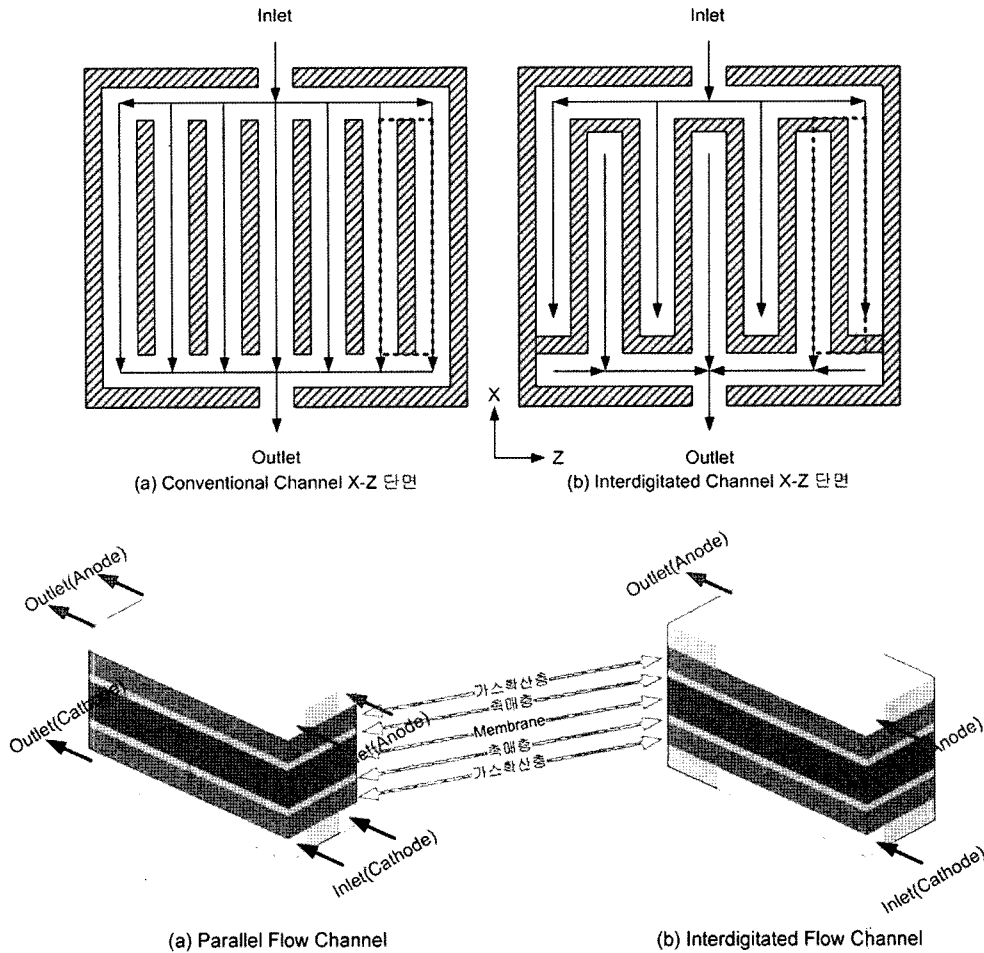


Fig. 1. Parallel 유동장과 Interdigitated 유동장의 채널 형상

러나 단위면적당 출력의 증가를 위하여 고전류밀도에서의 농도 분극을 최소화 할 필요성으로 인하여 interdigitated 유로방식이 제안되어 지고 있다.¹⁰⁾

Fig. 1은 고분자 전해질 연료전지에서의 평행류 유로와 interdigitated 유로를 보여주고 있다. Fig. 1(a)의 평행류 유로에 공급되는 가스는 유동방향과 수직으로 확산을 통하여 기체확산층(GDL)을 통과하여 촉매층에 전달되어진다. 하지만 그림 Fig. 1(b)의 interdigitated 형식의 유동 채널에 공급되는 가스는 확산에 의한 물질전달보다 인접한 채널간 기체확산층을 통한 대류에 의한 물질전달을 하는 형태로서 연료/산화제 물질전달에 보다 효율적인 것으로 알려져 있다.

이러한 interdigitated 유동채널의 성능실험은 1996년 Nguyen에 의해 평행류 유동채널과 함께 이루어 졌으며 실험결과 interdigitated 유동장의 성능실험이 평행류 유동장의 성능보다 우수한 것으로 나타났다.¹⁰⁾

이 실험결과를 바탕으로 interdigitated 유동 채널의 수치해석 모델들이 개발되어져 왔다. Kazim과 Liu¹¹⁾에 의하여 2차원으로 단순화된 interdigitated 형태와 평행류 유동장의 성능비교 수치해석 모델이 개발되어 졌으며, Yi와 Nguyen¹²⁾는 2차원의 interdigitated 유동장의 수치 해석 모델을 개발하여 유동장 전극의 두께와 채널 폭에 대한 고분자 전해질 연료전지의 효율에 미치는 영향이 연구 되었다.

Um과 Wang¹³⁾에 의해서는 평행류 유동장의 연료극과 interdigitated 유동장의 공기극을 이용한 3차원 모델이 개발되었으며, Hu와 Fan¹⁴⁾에 의하여 3차원 interdigitated 유동장과 평행류 유동장의 성능을 비교한 수치해석 모델이 개발되었다.

이제까지의 interdigitated 방식에 대한 연구는 주로 공기극에서의 전달현상만을 다루웠으나 본 연구에서는 공기극과 연료극을 포함한 전체 고분자 전해질 연료전지 모델을 적용하여 연료극에서의 유동과의 상호연관성을 알아보고자 하였다. 이를 위하여 상용코드인 Fluent® (Version 6.2)를 본 연구에 맞게 개조하여 적용하였으며¹⁵⁻²⁰⁾, 이 모델을 이용하여 평행류 유동장과 interdigitated 유동에서의 i-V 성능비교와 압력강하 그리고 유동장에서의 농도 분포, 반응량과 생성물의 량을 비교 분석하였다.

II. 지배방정식과 수치해석 모델

1. 지배방정식

지배방정식은 질량보존방정식과 화학종보존방정식, 운동량보존방정식으로 구성되면 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 온도는 일정하게 유지된다.
- (2) 비압축성, 층류유동을 한다.
- (3) 이상가스의 유동이다.
- (4) Membrane, 촉매층, 확산층은 다공성의 크기가 같다.

Nomenclature		T_s	surface temperature at the anode(K)
a_k	activity of water in stream K, Dimensionless	T_{cell}	fuel cell operating temperature
A_{cv}	specific surface area of the control volume (cv)(m^{-1})	u, v, w	velocity in x, y, z direction, respectively(ms^{-1})
C_{wK}	concentration of water at K interface of the membrane($molm^{-3}$)	V_{OC}	cell open-circuit voltage(V)
D_h	hydraulic diameter of flow channel(m)	V_{cell}	cell voltage(V)
D_w	diffusion coefficient of water(m^2s^{-1})	x	channel length measured from anode inlet(m)
F	Faraday constant (96,487Cmole-of-electrons $^{-1}$)	$X_{w,K}$	mole fraction of water in stream K
I	local current density(Am^{-1})	μ	dynamic viscosity($kg s m^{-2}$)
I_o	exchange current density for the oxygen reaction($100Am^{-2}$)	α	net water flux per proton flux
$m_{K,1}$	mass fraction of the species 1 in stream K, dimensionless	λ	water content in the membrane
$M_{m,dry}$	equivalent weight of a dry membrane($kgmol^{-1}$)	n_d	electro-osmotic drag coefficient (number of water molecules carried per proton)
M_{H_2}	molecular weight of hydrogen($kgmol^{-1}$)	η	overpotential for oxygen reaction(V)
M_{O_2}	molecular weight of oxygen($kgmol^{-1}$)	σ_m	membrane conductivity($ohm^{-1}m^{-1}$)
$p_{w,K}^{sat}$	vapor pressure of water in stream K(Pa)	$\rho_{m,dry}$	density of a dry membrane(kgm^{-3})
Q	volume flow rate(m^3s^{-1})	ρ	density of the mixture(kgm^{-3})
R	universal gas constant($8.314Jmol^{-1}K^{-1}$)	β_ξ	permeability in the ξ direction
t_m	membrane thickness(m)		

1) 질량 보존 방정식.

$$\nabla \cdot (\epsilon \rho u) = S_m \tag{1}$$

여기에서 ϵ 은 다공성물질의 다공성이고, ρ 는 밀도를 나타낸다. S_m 은 연료극과 공기극에서의 수소와 산소의 생성향을 나타내며, 공기극에서는 H_2O 의 생성향을 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$S_m = S_{H_2} + S_{aw} \text{ : 연료극측} \tag{2}$$

$$S_m = S_{H_2} + S_{aw} \text{ : 공기극측} \tag{3}$$

2) 운동량 보존방정식

Darcy's 법칙에 기초하여 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla(\epsilon \rho \vec{u}) = -\epsilon \nabla p + \nabla(\epsilon \mu \nabla \vec{u}) + S_u \tag{4}$$

여기서 μ 는 점성계수이며, S_u 는 다음과 같다.

$$S_{ux} = -\frac{\mu u}{\beta_x}, S_{uy} = -\frac{\mu v}{\beta_y}, S_{uz} = -\frac{\mu w}{\beta_z} \tag{5}$$

3) 화학종 보존방정식

$$\nabla(\epsilon \vec{u} C_k) = \nabla(D_k^{eff} \nabla C_k) + S_k \tag{6}$$

여기서 D_k^{eff} 는 확산계수이고 생성향 S_k 는 다음으로 표현한다.

$$S_k = \begin{cases} -\frac{I(x,y)}{2F} M_{H_2} A_{cv} : S_{H_2} \\ -\frac{\alpha(x,y)}{F} I(x,y) M_{H_2O} A_{cv} : S_{aw} \\ -\frac{I(x,y)}{4F} M_{O_2} A_{cv} : S_{O_2} \\ \frac{1 + 2\alpha(x,y)}{2F} I(x,y) M_{H_2O} A_{cv} : S_{cW} \end{cases} \tag{7}$$

여기서 $I(x,y)$ 는 전류밀도로서,

$$I(x,y) = \sigma_m / t_m \{E - V_c - \eta(x,y)\} \tag{8}$$

로 표시된다.

$\alpha(x,y)$ 는 수소 이온당 순 물 분자전달계수를 말하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha(x,y) = n_d - \frac{F}{I(x,y)} D_w(x,y) \frac{C_{w_c} - C_{w_d}}{t_m} \tag{9}$$

고분자 전해질 연료전지의 성능에 중요한 변수인 H_2O 의 이동에 관련된 식들을 Table 1에 정리하였다.

2. 수치해석모델

수치해석은 Fig. 2와 같은 평행류채널과 Interdigitated채널의 격자형상에서 이루어졌고 두 채널의 반응면적을 동일하게 만들기 위하여 동일한 면적의 MEA를 사용하였으며 두 개의 기체 확산층과 두 개의 촉매층을 이용하여 연료극과 공기극을 구성하였다. 채널의 입구와 출구의 단면적은 $0.0762(cm) \times 0.0762(cm)$ 이 길이는 $4(cm)$ 이다. 가스확산층의 두께는 $0.0254(cm)$ 며 촉매층 두께는 $0.00287(cm)$ 이다. 채널의 길이방향 중앙을 대칭 경

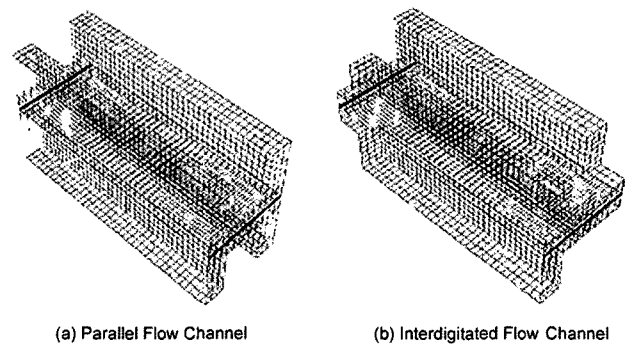


Fig. 2. Parallel 채널과 Interdigitated 채널의 격자구조

Table 1. H₂O의 이동과 관련된 방정식

Water activity	$a = \frac{P_{H_2O}}{P_{SAT}}$	(10)
Nernst equation	$E = E_0 + \frac{RT}{2F} * \ln\left(\frac{P_{H_2} * P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}\right)$	(11)
Water content in the membrane	$\lambda = 0.043 + 17.81a_a - 39.85a_a^2 + 36.0 * a_a^3;$ $0 < a_a \leq 1 = 14.0 + 1.4(a_a - 1.0) : 1 < a_a \leq 3$	(12)
Water concentration	$C_w = \left(\frac{\rho_{m, dry}}{M_{m, dry}}\right) * \lambda$	(13)
Electro-osmotic drag coefficient	$n_d = 0.0029 * \lambda^2 + 0.05 * \lambda - 3.4 * 10^{-19}$	(14)
Membrane conductivity	$\sigma = \left(0.00514 * \frac{M_{m, dry}}{\rho_{m, dry}} * C_w - 0.00326\right) * \exp\left(1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_s}\right)\right) * 100$	(15)
Over potential	$\eta(x, y) = \frac{RT}{0.5F} \ln\left[\frac{I(x, y)P(x, y)}{I_0 P_{O_2}(x, y)}\right] : cathode side$ $= \frac{RT}{F} \ln\left[\frac{I(x, y)P(x, y)}{I_0 P_{O_2}(x, y)}\right] : anode side$	(16)
Back diffusion	$\frac{F}{I(x, y)} * D_w * \frac{(C_{w0} - C_{w1})}{t_m}$	(17)

Table 2. Physical parameters

Description	Value	Description	Value
Channel length(m)	0.04	Cathode side pressure(atm)	1
Channel width(m)	0.000762	Anode stoichiometric flow rate	2
Channel height(m)	0.000762	Cathode stoichiometric flow rate	2
GDL thickness(m)	0.000254	O ₂ /N ₂ ratio	0.21/0.79
Catalyst layer thickness(m)	0.0000287	H ₂ inlet mass fraction, Anode(%)	11.54
Inlet temperature(°C)	80	H ₂ O inlet mass fraction, Anode(%)	88.46
Anode side pressure(atm)	1	O ₂ inlet mass fraction, Cathode(%)	23.3

계조건으로 사용하여 계산하였다.

수치해석프로그램은 Fluent® (version 6.2)를 연구에 맞게 UDF 파일을 작성하여 적용하였다. 격자의 개수는 12×32×40이며 입구에서의 경계조건은 질유량으로 설정하였고 출구에서의 경계조건은 압력조건으로 설정하였으며 기타 입구 및 경계 조건은 Table 2와 같다.

III. 결과 및 고찰

개발된 고분자 전해질 연료전지 모델을 이용하여 평행류유동장과 Interdigitated 유동장에서의 성능을 비교하기 전 개발된 모델의 정확성을 확인하기 위하여 Liu가 실험한 평행류 유동장의 실험데이터²¹⁾의 조건을 사용하여 개발된 수치해석모델을 이용하여 수치해석을 실행하였다. 수치해석은 실험조건과 동일하게 온도 80°C, 연료극 100%가습, 공기극 무가습의 조건으로 수행하였으며, Fig. 3에 성능곡선을 비교하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 성능실험 데이터와 수치해석 데이터가 비교적 정확히 일치하는 것을 확인하였다.

이렇게 검증된 수치해석 방법을 기본으로 하여 먼저 수소/공기 유입조건으로 연료극에서는 상대습도 100%의 가습조건을 공

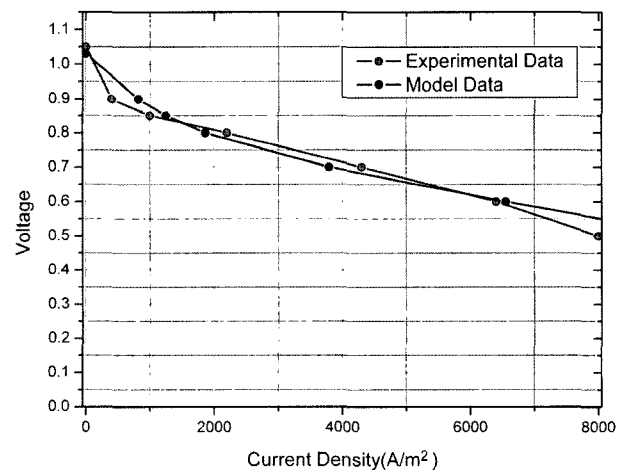


Fig. 3. 실험데이터와 수치해석결과와의 비교

기극에서는 공기 무가습조건을 적용하여 온도 80°C 조건에서 두가지 유로형태에 대한 수치해석을 수행하였다. 먼저 유로 단면에서 연료극과 공기극 그리고 가스확산층에서의 물질전달현

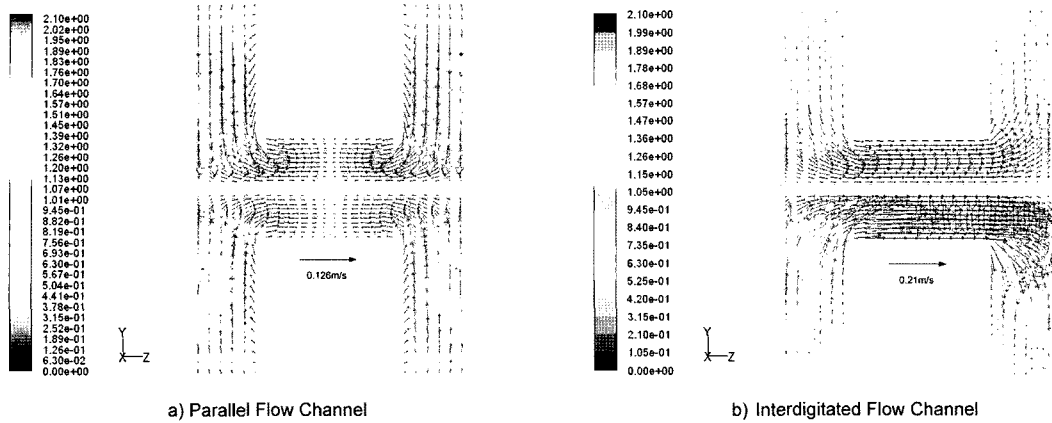


Fig. 4. 유로단면 (Y-Z 면)에서의 속도 분포 ($V_{cell}=0.7 V$).

상을 파악하기 위하여 0.7 V의 전압에서의 전류밀도를 확인한 결과 평행류 유동채널에서는 $0.565 A/cm^2$, interdigitated 유동채널에서는 $0.59 A/cm^2$ 의 값을 얻을 수 있었으며 속도벡터를 Fig. 4에 표시하였다.

그림에서 평행류 유동장에서의 속도벡터는 고분자 전해질 막 (Membrane)을 기준으로 Y축 방향으로 향하고 있어 수소와 산소가 가스확산층을 통과하여 고분자 전해질 막에 공급되어지는 것을 관찰할 수 있으며 속도벡터는 중앙선을 기준으로 대칭을 이루고 있는 것을 알 수 있다. 반면 interdigitated 유동장에서는 수소와 산소가 공급되어지는 채널에서 출구가 있는 채널로 유선을 형성하며 가스확산층을 통과함을 알 수 있다. 전체 속도벡터의 평균 크기로 본다면 평행류 유로에서보다 inter-digitated 유로에서 약 2배 정도 크다고 할 수 있다. 속도벡터형태를 살펴볼 때 interdigitated 유로에서의 가스공급형태는 평행류 유동채널과는 달리 확산에 의한 물질전달보다 대류에 의한 물질전달이 보다 큰 형태임을 알 수 있는데 이는 수소/산소의 물질전달에 있어 보다 효율적인 것으로 판단된다. 이렇게 물질전달 측면에서 효율적인 interdigitated 유로에서의 상대적인 압력강하 특성을 알아보기 위해서 Fig. 5에 두가지 유로에 의한 길이방향의 압력강하 분포를 살펴보았다.

그림에서 보듯이 interdigitated 유로에서 수소 및 공기가 가스확산층을 대류과정을 통하여 전달되면서 발생하는 압력손실은 평행류 유로와 비교했을 때 보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있는데 공급되는 유량이 큰 공기극에서 더 큰 압력강하를 보여주고 있다. 이는 interdigitated 유로를 가진 연료전지 분리판 설계시 물질전달의 향상되어 효율이 증가하게 되지만 압력강하가 증가하기 때문에 실제의 가동조건에서는 압력강하를 감소시키고 효율을 증가시키는 상호보완이 필요하다고 생각된다. 유로에 따른 반응물질의 변화특성을 보기위하여 공기극에서의 산소농도 분포를 살펴보았다.

평행류 유동장의 산소분포는 대칭적으로 나타나며 interdigitated 유동장의 산소분포는 유로특성상 비대칭적으로 나타남을 보여준다. 두가지 유로의 Stoichiometric number가 2인 상태에서는 산소가 충분히 반응하여 출구에서의 비슷한 산소농도를 가짐을 알 수 있다.

고분자 전해질 연료전지에서의 물의 분포특성은 전해질의 전기전도도 및 공기극에서의 물의 생성에 매우 중요한 요소이므로 연료극과 공기극에서의 물의 분포특성을 살펴보는 것이 필요하다. Fig. 7은 평행류 유동장과 interdigitated 유동장에서 연료극과 공기극 측에서의 물의 농도분포를 나타내고 있다.

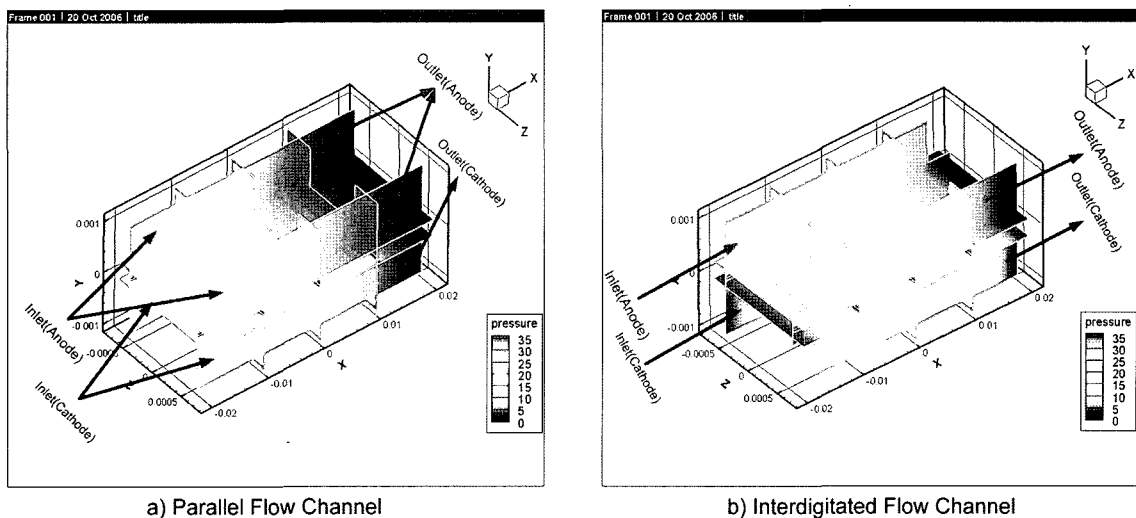


Fig. 5. 채널내의 Pressure drop ($V_{cell}=0.7 V, \Delta P=Pa$).

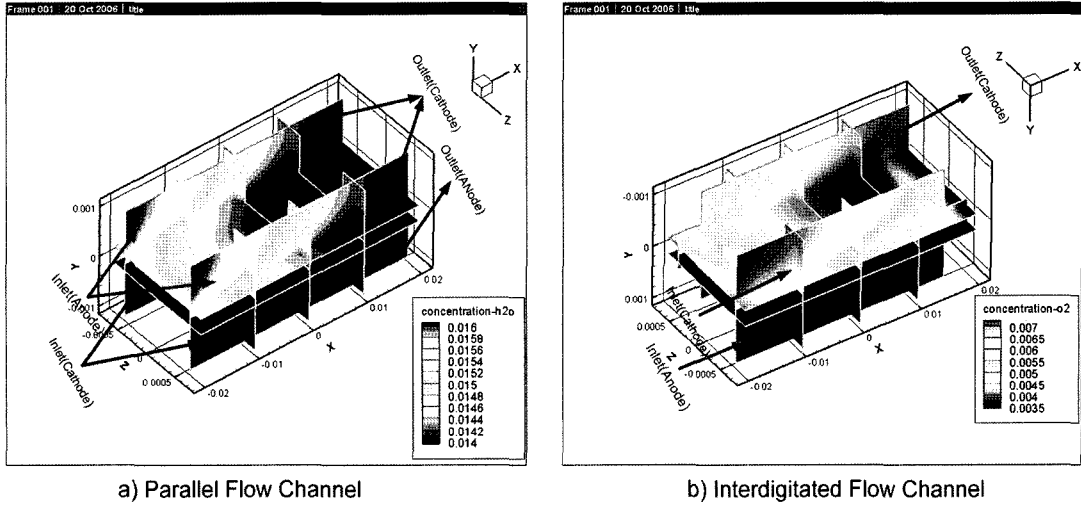


Fig. 6. 공기극에서의 O₂의 농도분포 ($V_{cell}=0.7\text{ V}$).

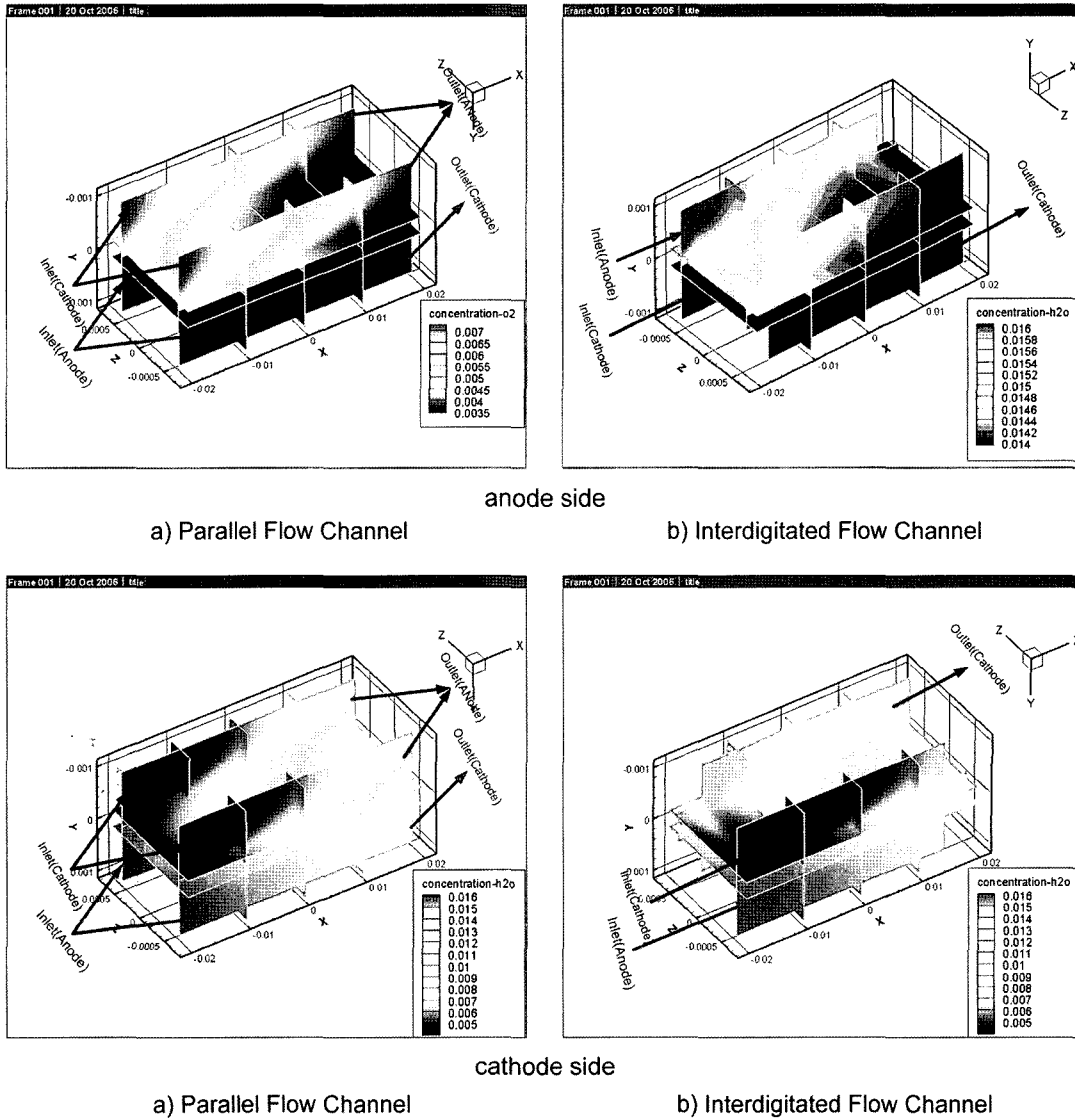


Fig. 7. 채널내의 H₂O의 분포 ($V_{cell}=0.7\text{ V}$).

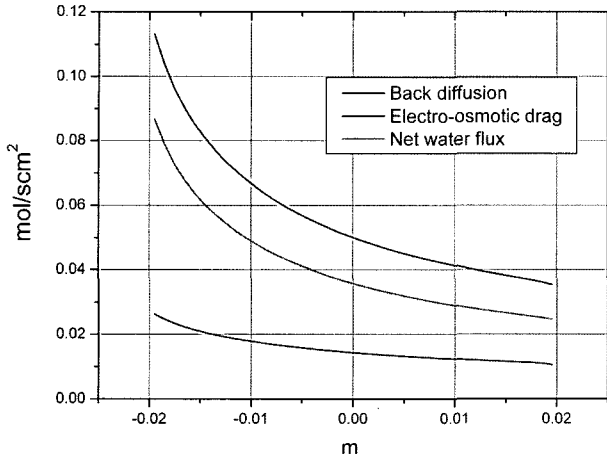


Fig. 8. Parallel유동장에서의 Back diffusion과 Electro-osmotic drag의 길이별 변화 ($V_{cell}=0.7$ V).

그림에서 보듯이 100% 가습된 연료극에서의 물이 고분자 전해질 막으로의 확산 및 대류에 의해 점차 길이방향으로 줄어드는 것을 알 수 있는데 무가습된 공기극 측에서는 전기화학 반응에 의한 물의 발생과 아울러 고분자 전해질 막의 물의 전달 현상에 의하여 길이방향으로 점차 증가하는 특성을 보여주고 있는데 interdigitated 유로의 경우 비대칭적인 특성을 나타내고 있다.

이러한 연료극과 공기극에서의 물의 농도 분포를 이해하기 위하여 고분자 전해질 연료전지의 고분자 전해질내에서의 물의 이동현상과 밀접히 관계되어 있는 두가지 전달현상인 Back diffusion과 Electro-osmotic drag의 영향을 비교하여 보기로 했다. 평행류 유로에서의 Back diffusion과 Electro-osmotic drag에 의한 물의 전달량을 길이 방향으로 Fig. 8에 나타내 보았는데 그림에서 보듯이 Electro-osmotic drag에 의한 전달량이 Back diffusion에 의한 전달량의 크기보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 전체적으로 연료극에서 공기극로 물이 이동하게 하여 연료극에서 물의 농도가 감소하게 되며 평행류 유동장과 interdigitated 유동장의 연료극에서 공통된 현상으로 Fig. 8에서

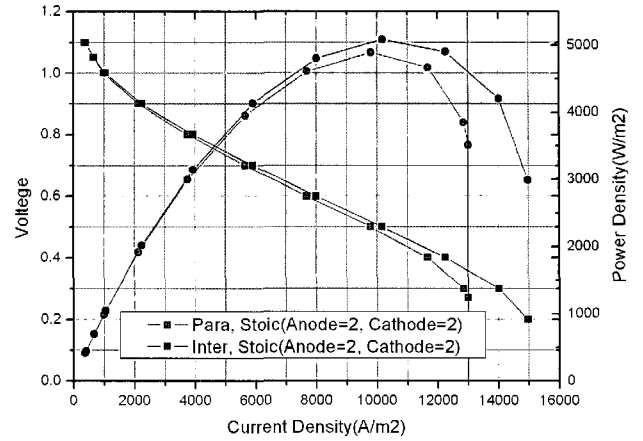


Fig. 10. i-V 곡선 (Stoic, 연료극=2, 공기극=2)

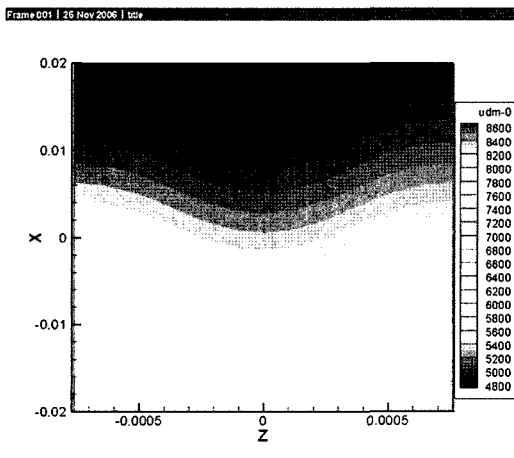
와 같이 관찰되었다.

각 유로에서의 MEA에서의 전류밀도분포특성을 알아보기 위하여 Fig. 9에서는 MEA에서의 국소전류밀도를 나타내었다. 전체적으로 interdigitated 유동장의 전류밀도가 평행류 유동장의 전류밀도보다 더욱 우수한 것을 알 수 있는데 이는 대류에 의한 물질전달효과의 증대로 촉매층에서 전기화학반응이 보다 활발히 일어나 것으로 파악된다.

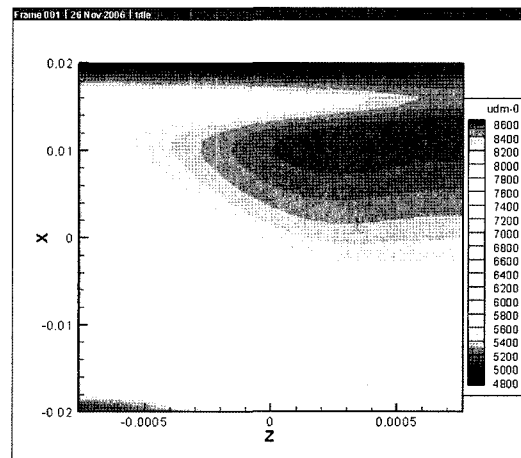
성능비교를 위하여 Fig. 10에서는 각 유로간의 i-V 비교곡선을 나타내었다. 그림에서 높은 전류밀도에서 interdigitated 유동장의 성능이 뛰어남을 알 수 있는데 이는 평행류 유로보다 가스확산층으로의 효과적인 대류전달에 의하여 interdigitated 유로에서는 농도분극이 작아지기 때문이라 판단된다. 이러한 측면에서 동일한 크기의 반응면과 동일한 가스확산층, 촉매층을 가진 연료전지에서는 평행류 유동장보다 interdigitated 유동장의 디자인이 더욱 효율적인 것으로 생각된다.

IV. 결 론

평행류 유동장과 interdigitated 유동장을 가진 고분자 전해질 연료전지를 3차원 수치해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수



a) Parallel Flow Channel



b) Interdigitated Flow Channel

Fig. 9. MEA에서의 Local current density 분포 ($V_{cell}=0.7$ V).

있었다.

1) 동일한 유동 조건하에서의 평행류 유동장과 interdigitated 유동장에서의 성능을 비교한 결과 고전류밀도에서 농도분극을 감소시키는 채널간의 대류에 의한 물질전달이 더욱 우수한 interdigitated 유동채널에서 성능이 더 높게 나타난다.

2) 가스 확산층을 통과하면서 발생하는 압력손실은 평행류 유동장 보다 interdigitated 유동장에서 더 크게 나타나 설계시 인자간의 상호보완이 필요함을 알 수 있다.

3) 연료극과 공기극에서의 물의 농도변화량은 전해질에서의 물의 이동현상인 back diffusion 과 electro-osmotic drag의 상호 밀접한 관계가 있으므로 전해질에서의 물의 전달량을 정확히 예측하는 것이 고분자 전해질 연료전지의 성능 수치해석에 매우 중요하다.

4) 동일한 크기의 반응면과 동일한 가스확산층, 촉매층을 가진 연료전지에서는 평행류 유동장보다 interdigitated 유로의 디자인이 더욱 효율적인 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2006년 자체 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 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**, 1409-1416 (1999).
- T. V. Nguyen, Modeling two-phase flow in the porous electrodes of proton exchange membrane fuel cells using the interdigitated flow fields, *Presented at the 195th Meeting of Electrochemical Society*, 47 May 1999, Seattle.
- D. L. Wood, J. S. Yi, and T. V. Nguyen, Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells, *Electrochim. Acta*, **43**, 3795-3809 (1998).
- T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld, Polymer electrolyte fuelcell model, *J. Electrochem. Soc.*, **138**, 2334-2342 (1991).
- T. F. Fuller and J. Newman, Water and thermal management in solid polymer electrolyte fuel cells, *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 1218-1225 (1993).
- T. V. Nguyen and R. E. White, A water and heat management models for Proton Exchange Membrane fuel cells, *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 2178-2186 (1993).
- J. S. Yi and T. V. Nguyen, An along the channel model for proton exchange membrane fuel cells, *J. Electrochem. Soc.*, **145**, 1149-1159 (1998).
- J. S. Yi and T. V. Nguyen, Multicomponent transport in porous electrodes of proton exchange membrane fuel cells using the interdigitated gas distributors, *J. Electrochem. Soc.*, **146**, 38-45 (1999).
- V. Gurau, H. Liu, and S. Kakac, Two dimensional model for proton exchange membrane fuel cells, *AIChE Journal*, **144**, 2410-2422 (1998).
- Trung and V. Nguyen, A gas distributor design for Proton exchange membrane fuel cell, *J. Electrochem. Soc.*, **143**, L103-L105 (1996).
- A. Kazim, H. T. Liu, and P. Forges, Modeling of performance of PEM fuel cells with conventional flow field, *J. Appl. Electrochem.*, **26**, 1409-1416 (1999).
- J. S. Yi and T. V. Nguyen, Multicomponent transport in porous electrodes of proton exchange membrane fuel cell using the interdigitated gas distributors, *J. Electrochem. Soc.*, **146**, 1149-1159 (1999).
- S. Um and C. Y. Wang, Three dimensional analysis of transport and reaction in proton exchange membrane fuel cells, in proceedings of the ASME fuel cell division, 5-10 November 2000, Orlando.
- Guilin Hu and Jianren Fan, Three-dimensional numerical analysis of proton exchange membrane fuel cell(PEMFCs) with conventional and intrdigitated flow fields *J. Power Soc.*, **136**, 1-9 (2004).
- S. Um, Computational modeling of transport and electrochemical reaction in proton exchange membrane fuel cell. Ph.D. Thesis. Penn State University, 2003.
- S. Shimpalee, S. Dutta, W. K. Lee, and J. W. Van Zee, Effect of humidity on PEM fuel cell performance part II-numerical simulation, *Proceeding of ASME IMECH, TN, HTD 364-1*, 367-374 (1999), Nashville.
- W. K. Lee, J. W. Van Zee, S. Shimpalee, and S. Dutta, Effect of humidity on PEM fuel cell performance part I-experiments, 1999 international mechanical engineering congress & exposition, TN - November 14, Nashville.
- W. K. Lee, C. H. Ho, J. W. V. Zee, and M. Murthy, The effects of compredion and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell, *J. of Power Soc.*, **84**, 45-51 (1999).
- S. Shimpalee, S. Dutta, and J. W. Van Zee, Numerical prediction of local temperature and current density in a PEM fuel cell, 2000 IMECE, in session of transport phenomena in fuel cell system, paper no,2-6-3-2, Orlando.
- S. Dutta, S. Shimpalee, and J. W. Van Zee, Numerical prediction of mass-exchange between anode and cathode channels in a PEM fuel cell, *International J of Heat and Mass Transfer*, **44**, 2029-2042 (2001).
- E. A. Ticianelli, J. G. Berry, and S. Srinivasan, Dependence of performance of solid polymer electrolyte fuel cells with low platinum loading on morphologic characteristics of the electrodes, *J. Electroanal. Chem.*, **251**, 275-295 (1988).