[2006-12-FC-011]

유로형상 변화에 따른 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)의 성능 및 전달특성에 대한 3차원 수치 해석적 연구

이필형*, 조선아, 최성훈, 황상순

Three Dimensional Computational Study on Performance and Transport Characteristics of PEMFC by Flow Channel Patterns

Pil-Hyong Lee, Son-Ah Cho, Seong-Hun Choi, Sang-Soon Hwang

Abstract Selection of flow channel in the separation plate of PEMFC is very important parameter to improve its performance and reduce parasite loss. Flow patterns in the channel have great influence on the transport of hydrogen and air and removal of water generated from electrochemical reaction in diffusion layer. In this study. fluid flow in flow channel with parallel and interdigitated patterns are simulated three dimensionally on full flow domain including anode and cathode channel together. The numerical results show that the fuel cell with interdigitated flow channel represents better performance than that with parallel flow channel due to its strong convective transport across the gas diffusion layer. But the pressure drop in parallel flow channel is much more than that in interdigitated flow channel. And effects of temperature and stoichiometric number on performance can be calculated and analyzed as well.
Nomenclature

Key words PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Parallel flow channel(평행류 채널), Interdigitated flow channel(Interdigitated 채널), Electrochemical reaction(전기화학반응), Stoichiometric number(이론공연비 수)

* 인천대학교 기계공학과
□E-mail : meman80@incheon.ac.kr □Tel : 032-770-4371 □Fax : 032-770-8410

Nomenclature

a_K : *activity of water in stream K, Dimensionless*
A_{cv} : *specific surface area of the control volume (cv)*(m^{-1})
C_{WK} : *concentration of water at K interface of the membrane*$(molm^{-3})$
D_h : *hydraulic diameter of flow channel(m)*
D_W : *diffusion coefficient of water*(m^2s^{-1})
F : *Faraday constant (96,487 Cmole-of-electrons*$^{-1}$*)*
I : *local current density*(Am^{-1})
I_0: *exchange current density for the oxygen reaction*$(100Am^{-2})$
$m_{k,l}$: *mass fraction of the species 1 in stream K, dimensionless*
$M_{m,dry}$: *equivalent weight of a dry membrane*$(kgmol^{-1})$
M_{H_2} : *molecular weight of hydrogen*$(kgmol^{-1})$
M_{O_2}: *molecular weight of oxygen*$(kgmol^{-1})$
$P_{W,K}^{sat}$: *vapor pressure of water in stream K(Pa)*
Q : *volume flow rate*(m^3s^{-1})
R : *universal gas constant*$(8.314Jmol^{-1}K^{-1})$
t_m : *membrane thickness(m)*
T_S: *surface temperature at the anode(K)*

T_{cell}: *fuel cell operating temperature*
u, v, w : *velocity in direction, respectively*(ms^{-1})
V_{oc} : *cell open-circuit voltage*(V)
V_{cell}: *cell voltage*(V)
x : *channel length measured from anode inlet*(m)
$X_{W,K}$: *mole fraction of water in stream K*
μ : *dynamic viscosity*($kg\ s\ m^{-2}$)
α : *net water flux per proton flux*
λ : *water content in the membrane*
n_d: *electro-osmotic drag coefficient(number of water molecules carried per proton)*
η : *overpotential for oxygen reaction*(V)
σ_m : *membrane conductivity*($ohm^{-1}m^{-1}$)
$\rho_{m,dry}$: *density of a dry membrane*(kgm^{-1})
ρ : *density of the mixture*(kgm^{-3})
β_ζ : *permeability in the* ζ *direction*

1. 서 론

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

고분자 전해질 연료전지의 유동채널의 설계는 연료와 산화제의 공급과 배출, 고전류밀도에서 전기화학 반응으로 생성된 Cathode채널의 물의 이동에 직접적인 영향을 주어 연료전지 성능에 중요한 변수가 된다.

지금까지의 고분자 전해질 연료전지의 유동채널 연구의 대부분은 Parallel유동채널과 Serpentine유동채널에 대한 물질전달 현상을 주로 연구하였으며 Serpentine유동채널이 Parallel유동채널보다 물질전달 측면에서 효율적인 구조임을 보여주었다.[4-9]

하지만 고분자 전해질 연료전지가 단위면적당 전기화학반응을 통하여 생산되는 출력의 향상을 위하여 1996년 Trung와 Nguyen에 의하여 Interdigitated유동채널이 제안되었다.[10]

Fig.1은 Parallel유동채널과 Interdigitated유동채널 형상을 보여준다.

Fig.1-a)의 Parallel유동채널에 공급되는 가스는 공급되는 방향의 수직방향의 확산에 의해 기체확산층(GDL)을 통과하여 촉매층에 전달되어진다. 반면 그림 Fig.1-b)의 Interdigitated 형식의 유동채널에 공급되는 가스는 확산에 의한 물질전달보다 인접한 채널간 기체확산층을 통한 대류에 의한 물질전달을 하는 형태로서 연료/산화제 물질전달에서 보다 효율적인 것으로 알려져 있다.[10]

이러한 interdigitated유동채널의 성능실험은 1996년 Nguyen에 의해 Parallel유동채널과 함께 이루어 졌으며 실험결과 interdigitated 유동장의 성능실험이 Parallel유동장의 성능실험보다 우수한 것으로 나타났다.[10]

실험결과를 바탕으로 interdigitated유동채널의 수치해석 모델들이 개발되어져 왔다. Kazim과 Liu[11]에 의하여 2차원으로 단순화된 interdigitated유동장과 Parallel유동장의 성능비교 수치해석이 수행되었으며, Yi와 Nguyen[12]는 2차원의 interdigitated 유동장의 수치 해석 모델을 개발하여 유동장 전극의 두께와 채널 폭에 대한 고분자 전해질 연료전지의 효율에 미치는 영향이 연구되었다. Um과 Wang[13]에 의해서는 Parallel유동장의 Anode와 interdigitated 유동장의 Cathode를 이용한 3차원 모델이 개발되었으며, Hu와 Fan[14]은 3차원 interdigitated 유동장과 Parallel 유동장의 성능을 상호 비교하여 분석하였다.

지금까지의 대부분의 Interdigitated유동채널에 대한 연구는 주로 Cathode에서의 물질전달 현상만을 다루었다. 하지만 본 연구에서는 Cathode와 Anode를 포함한 3차원의 고분자 전해질 연료전지모델을 적용하여 Cathode와 Anode의 유동의 상호연관성과 성능의 차이를 알아보고자 하였다. 이를 위하여 상용코드인 Fluent®(Version 6.2)를 본 연구에 맞게 개조하여[15-20] 3차원의 고분자 전해질 연료전지 수치해석 프로그램을 개발하였으며, 이 프로그램을 적용하여 Interdigitated유동채널과 Parallel유동채널의 물질전달 특성과 Anode에 공급되는 연료의 가습도 변화, 작동온도, Stoichiometric number 변화에 따른 고분자 전해질 연료전지의 성능변화를 비교 분석하였다.

2. 지배방정식과 수치해석 모델

1. 지배방정식

지배방정식은 질량보존방정식과 화학종보존방정식, 운동량

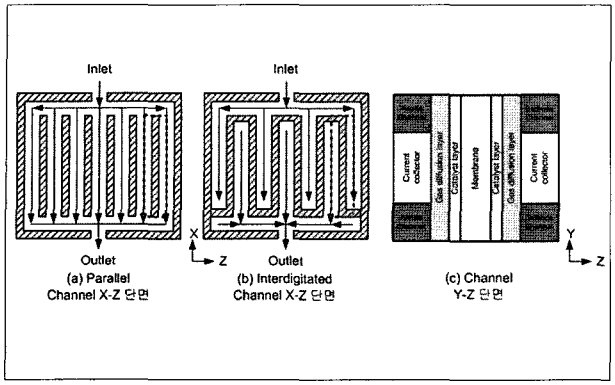


Fig.1. Parallel유동장과 Interdigitated유동장의 채널 형상

보존방정식으로 구성되며 다음과 같이 가정한다.

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

1) 질량 보존 방정식

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho v) = S_m \tag{1}$$

여기에서 ε은 다공성물질의 다공성이고, ρ는 밀도를 나타낸다. S_m은 Anode와 Cathode에서의 수소의 산소의 반응율을 나타내며, Cathode에서의 H_2O의 생성항을 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$S_m = S_{H_2} + S_{aw} : Anode\ side \tag{2}$$

$$S_m = S_{O_2} + S_{cw} : Cathode\ side \tag{3}$$

2) 운동량 보존방정식

Darcy' s Law에 기초하여 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 μ는 점성계수이며, S_u는 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^{eff}_k 는 확산계수이고 생성항 S_k는 다음으로 표현한다.

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

여기서 $I(x,y)$는 다음 식으로 표시된다.

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

$\alpha(x, y)$는 수소이온당 순 물분자 전달계수를 말하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

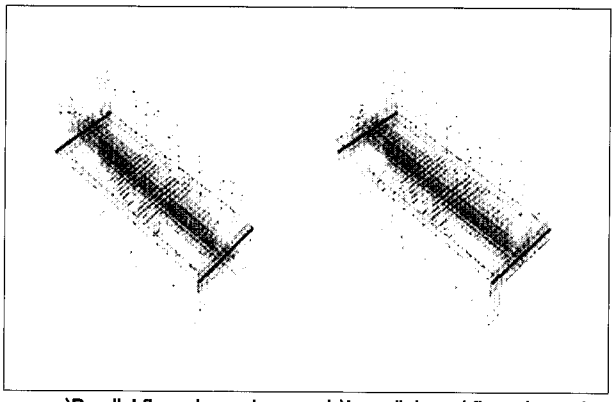
고분자전해질 연료전지의 성능에 중요한 변수인 H_2O의 이동에 관련된 식들을 Table.1에 정리하였다.

2. 수치해석모델

수치해석은 Fig.2에서 표시된 Parallel유동채널과 Interdigitated유동채널의 격자형상에서 이루어졌고 두 채널의 반응면적을 동일하게 만들기 위하여 동일한 면적의 MEA를 사용하였으며 두 개의 기체확산층과 두 개의 촉매층을 이용하

Table.1 물의 이동과 관련된 방정식

Water activity	$a = \frac{P_{H2O}}{P_{SAT}}$	(10)
Nernst equation	$E = E_0 + \frac{RT}{2F} * \ln\left(\frac{P_{H2} * P_{O2}^{1/2}}{P_{H2O}}\right)$	(11)
Water content in the membrane	$\lambda = 0.043 + 17.81a_a - 39.85a_a^2 + 36.0 * a_a^3;$ $0 < a_a \le 1 = 14.0 + 1.4(a_a - 1.0) : 1 < a_a \le 3$	(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	$\sigma = \left(0.00514 * \frac{M_{m,dry}}{\rho_{m,dry}} * C_w - 0.00326\right) \times \exp\left(1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_s}\right)\right) * 100$	(15)
Over potential	$\eta(x,y) = \frac{RT}{0.5F} \ln\left[\frac{I(x,y)P(x,y)}{I_0 P_{O_2}(x,y)}\right]$	(16)
Back diffusion	$\frac{F}{I(x,y)} * D_w(x,y) * \frac{(C_{w_2} - C_{w_1})}{t_m}$	(17)



a)Parallel flow channel b)Interdigitated flow channel

Fig.2 Parallel 채널과 Interdigitated 채널의 격자구조

Table.2 Physical Parameter

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(℃)	80	H_2O inlet mass fraction, Anode(%)	88.46
Anode side pressure(atm)	1	O_2 inlet mass fraction, Cathode(%)	23.3

여 Anode와 Cathode 유동채널을 구성하였다.

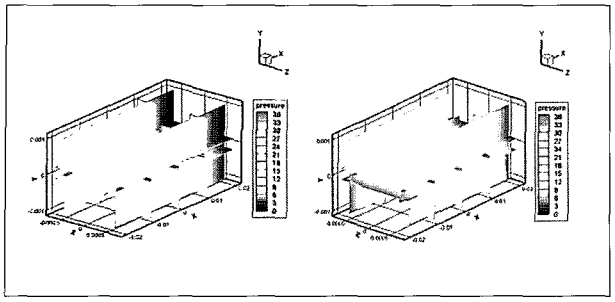
채널의 입구와 출구의 단면적은 0.0762(㎝)× 0.0762(㎝)이고 길이는 4(㎝)이며 가스확산층과 촉매의 두께는 각각 0.0254(㎝), 0.00287(㎝)이다. 채널의 길이방향 중앙을 대칭 경계조건으로 사용하여 계산하였다.

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

3. 결과 및 고찰

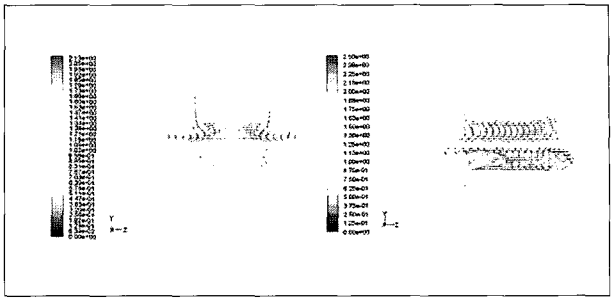
개발된 고분자 전해질 연료전지의 수치해석 프로그램을 사용하여 Interdigitated유동채널과 Parallel유동채널에서의 가동조건을 변경하면서 수치해석을 시행하였다.

먼저 Parallel유동채널과 Interdigitated유동채널 설계에 중요한 압력강하 및 유동특성을 살펴보았다. 두가지 유동채널의 전압은 0.5V로 고정하였으며 이 전압조건에서 Parallel유동장과 Interdigitated유동장의 전류밀도는 각각 0.97846 $A/㎠$와 1.01685 $A/㎠$으로 나타났다. Stoichiometric number는 cathode와 anode에서 2.0으로 설정하였다. Fig.3은 Parallel 유동채널과 Interdigitated 유동채널의 길이방향의 압력강하 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 Parallel유동채널과 Interdigitated유동채널에서 공급되는 유량이 큰 Cathode에서 압력 강하가 크게 나타남을 알 수 있었으며 Parallel유동채널보다 Interdigitated유동채널에서의 압력강화가 큰 것을 확인하였다. 압력강하와 유동특성과의 연관성을 알아보고 위하여 Fig.4에서는 Parallel유동채널과 Interdigitated유동채널



a)Parallel flow channel b)Interdigitated flow channel

Fig.3. 채널내의 압력강하 (V_{cell}=0.5V, △P=Pa, Stoic(Anode=2, Cathode=2))



a)Parallel floe channel b)Interdigitated flow channel

Fig.4. Y-Z 단면의 속도벡터 (V_{cell}=0.5V, Stoic(Anode=2, Cathode=2))

의 Y-Z단면에서의 속도분포를 나타내었다. Fig.4-(a)의 Parallel유동채널의 속도분포를 살펴보면 유동채널의 입구를 통하여 공급되어진 연료와 산화제는 가스채널을 지나면서 가스확산층을 통과하게 되며 이때 확산과정을 통하여 촉매층에 공급되어지는 것을 확인할 수 있다. 반면 Fig.4-(b)의 Interdigitated 유동채널에서는 연료와 산화제가 공급되어지는 채널에서 출구가 있는 바로 옆 채널로 가스확산층을 통하여 유선이 형성되어 배출됨을 알 수 있다. 전체 속도벡터의 평균 크기로 본다면 Parallel유동채널에서보다 Interdigitate유동채널에서 약 2배정도 크게 나타남을 알 수 있었다.

각각의 유동장에서의 속도벡터형태를 살펴볼 때 Interdigitated유동장에서의 가스공급형태는 Parallel유동장과는 달리 확산에 의한 물질전달보다 가스확산층을 통한 대류에 의한 물질전달이 보다 지배적인 유동형태임을 확인할 수 있어 연료/산화제의 물질전달에 있어 보다 효율적일 것으로 판단된다.

각각의 유동채널에서의 성능특성을 비교하기위하여 Fig.5에는 Interdigitated유동채널과 Parallel유동채널의 i-V성능곡선을 나타내었다. 그림을 보면 고전류밀도에서 Interdigitated유동장의 성능이 Parallel유동장의 성능보다 뛰어남을 알 수 있다. 이것은 Parallel유동장보다 가스확산층으로의 효과적인 확산과 대류 물질전달 의하여 Interdigitated유동장의 Cathode에서의 농도분극이 작아지기 때문이라 판단된다.

Parallel유동채널과 Interdigitated유동채널의 물질전달 특성과 성능 비교에 이어 고분자 전해질 연료전지의 성능에 중요한 운전조건인 운전온도 및 Stoichiometric number, 가습도 변화에 따른 성능특성을 비교하여 보았다. Fig.6은 가동온도 변화에 따른 성능특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 작

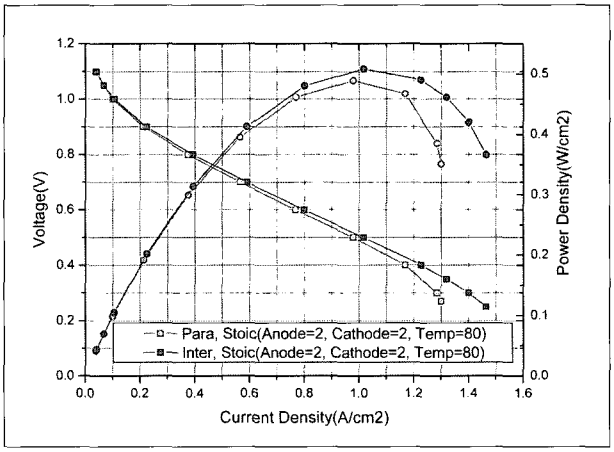


Fig.5 Parallel유동장과 Interdigitated유동장의 성능비교

동온도가 상승하면 연료전지의 전체적인 성능이 상승함을 볼 수 있다. 고분자 전해질 연료전지의 가동온도를 상승시키면 Membrane의 이온전도도가 상승하는 효과에 의해 전체적인 성능이 향상됨을 알 수 있다.

또한 Fig.7에는 가습도 변화에 따른 고분자 전해질 연료전지의 성능곡선을 나타내고 있다. 고분자 전해질 연료전지의 Anode에 공급되는 가습도가 상승하게 되면 전체적인 성능이 상승하게 된다. 이것은 고분자 전해질 연료전지의 성능은 Membrane의 이온전도도와 직접적으로 연관이 되기 때문이다. 가습된 Anode의 연료는 Membrane에 수분을 공급하게 되고 공급된 수분은 Membrane의 이온전도도를 상승시키고 이온전도도가 상승하게 되면 Membrane을 통과하는 이온의 수가 많아지게 되어 결과적으로 고분자 전해질 연료전지의 효율이 증가하게 된다.

Stoichiometric number변화에 따른 성능변화는 Fig.8에 나타내었다. Stoichiometric number의 상승은 Anode와

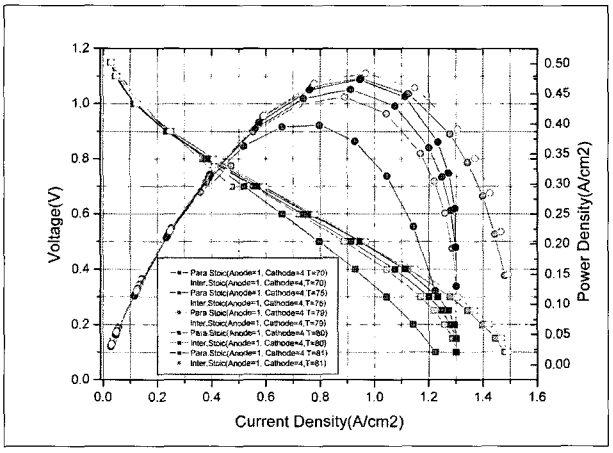


Fig.6 Parallel유동장과 Interdigitated유동장의 가동온도 변화에 따른 성능비교

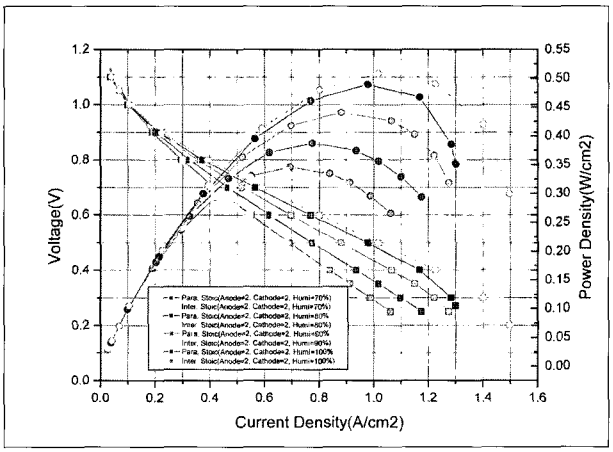


Fig.7 Parallel유동장과 Interdigitated유동장의 Anode가습도 변화에 따른 성능비교

Cathode에 공급되는 연료와 산소의 량을 증가시키고 결국 가스확산층을 통과하여 촉매층에 공급되는 연료와 산화제의 량을 증가시킴으로 인하여 전체적인 고분자 전해질 연료전지의 성능이 향상되는 것으로 생각된다. 하지만 너무 높게 Stoichiometric number를 상승시키면 촉매의 반응이 포화가 되어 공급되는 수소를 모두 반응시키지 못하고 배출하게 되므로 시스템 전체의 에너지 효율이 감소되는 것을 고려하여 최적값이 결정되어야 할 것이다.

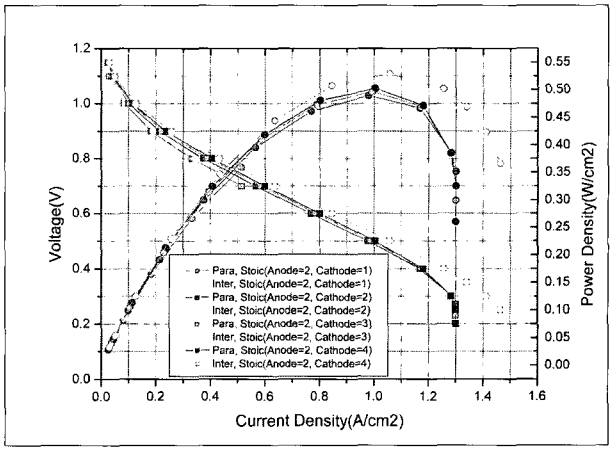


Fig.8 Parallel유동장과 Interdigitated유동장의 Stoichiometric number 변화에 따른 성능비교

4. 결 론

Parallel유동채널과 Interdigitated유동채널을 가진 고분자 전해질 연료전지의 3차원 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

1) 동일한 크기의 반응면과 가스확산층, 촉매층을 사용하는 고분자 전해질 연료전지에서는 Parallel유동채널보다 Intedigitated유동채널의 성능이 더 높게 나타나지만 기체확산층을 통한 대류전달에 의해 압력강하는 더 크게 나타난다.

2) Parallel 과 Interdigitated 유동채널 연료전지에서 Anode에 공급되는 연료의 작동온도와 가습도를 증가시켜 주면(70-100%) Membrane의 Conductivity가 상승하여 연료전지의 효율이 증가하는 특성을 보여주었다.

3) 또한 두 유동채널에서 Stoichiometric number를 증가시켜주면 가스확산층을 통과하여 촉매에 공급되는 수소와 산소의 공급량증가에 따라 연료전지의 성능은 상승하나 전체 에너지 효율측면에서 최적 값이 조정되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 인천지역환경기술개발센터의 2006년도 연구개발사업비 지원(06-4-80-81)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

[1] A. Kazim, H. T. Liu, P. Forges, Modeling of performance of PEM fuel cells with conventional and interdigitated flow fields, J. Appl. Electrochem. 29 (1999) 1409.1416.

[2] 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.

[3] D. L. Wood, J. S. Yi, T. V. Nguyen, Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells, Electrochem. Acta 43 (1998) 3795. 3809.

[4] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, S.Gottesfeld, Polymer electrolyte fuelcell model, J. Electrochem. Soc.138(1991)2334-2342.

[5] T. F. Fuller, J. Newman, Water and thermal management in solid polymer electrolyte fuel cells, J. Electrochem. Soc.140(1993)1218- 1225.

[6] T. V. Nguyen, R. E. White, A water and heat management models for Proton Exchange Membrane fuel cells, J. Electrochem. Soc.140(1993)2178-2186.

[7] J. S. Yi, T. V. Nguyen, An along the channel model for proton exchange membrane fuel cells, J. Electrochem. Soc.145(1998)1149-11 59.

[8] J. S. Yi, T. V. Nguyen, Multicomponent transport in porous electrodes of proton exchange membrane fuel cells using the interdigitated gas distributors, J. Electrochem. Soc.146 (1999) 38-45.

[9] V. Gurau, H. Liu, S. Kakac, Two dimensional model for proton exchange membrane fuel cells, AIChE Journal l44 (1998)2410-2422.

[10] Trung, V. Nguyen, A gas distributor design for Proton exchange membrane fuel cell, J. Electrochem. Soc.143(1996)L103-L105

[11] A. Kazim, H. T. Liu, P. Forges, Modeling of performance of PEM fuel cells with conventional flow field, J. Appl. Electrochem. 26(1999)1409-1416

[12] J. S. Yi, T. V. Nguyen, Multicomponent transport in porous electrodes of proton exchange membrane fuel cell using the interdigitated gas distributors, J. Electrochem. Soc. 146(1999)1149-1159

[13] S. Um, 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.

[14] G. Hu, J. Fan, Three-dimensional numerical analysis of proton exchange membrane fuel cell(PEMFCs) with conventional and intrdigitated flow fields J. Power Soc. 136(2004)1-9

[15] S Um, Computational modeling of transport and electrochemical reaction in proton exchange membrane fuel cell. Ph.D. Thesis. Penn State University, 2003.

[16] S. Shimpalee, S. Dutta, W. K. Lee, J. W. Van Zee, Effect of humidity on PEM fuel cell performance part II- numerical simulation, Proceeding of ASME IMECH, TN, HTD 364-1,pp.367-374(1999), Nashville.

[17] W. K. Lee, J. W. Van Zee, S. Shimpalee, S. Dutta, Effect of humidity on PEM fuel cell performance part sI-experiments, 1999 international mechanical engineering congress & exposition, TN - November 14, Nashville.

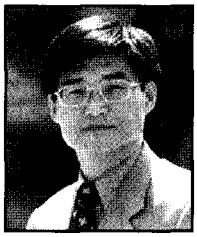
[18] W. K. Lee, C. H. Ho, J. W. V. Zee, M. Murthy, The effects of compreddion and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell, J of Power Soc, 84(1999)45-51

[19] S. Shimpalee, S. Dutta, 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,26-32, Orlando.

[20] S. Dutta, S. Shimpalee, 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(2001)2029-2042

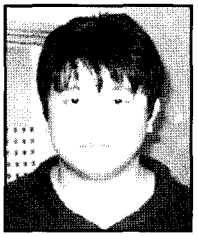
황 상 순



1981 : 서울대학교 항공공학과 공학사
1983 : 서울대학교 항공공학과 공학석사
1989 : 서울대학교 항공공학과 공박학사
1989~1993 : 현대자동차 중앙연구소 선임연구원
1994~1995 : University of Wisconsin-Madison, Post. Doc.
2000~2001 : Purdue University 방문교수

현재 : 인천대학교 기계공학과 교수
(E-mail : hwang@incheon.ac.kr)

이 필 형



2006년 : 인천대학교 기계공학과 공학사

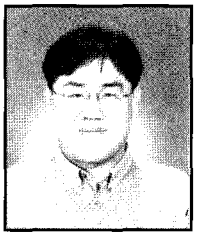
현재 : 인천대학교 기계공학과 석사과정
(E-mail : meman80@incheon.ac.kr)

조 선 아

2004년 : 인천대학교 기계공학과 공학사

현재 : 인천대학교 기계공학과 석사과정
(E-mail : chosona@incheon.ac.kr)

최 성 훈



1996년 : 인천대학교 기계공학과 공학사
1998년 : 인천대학교 기계공학과 공학석사
1998-2006 ATES 엔지니어

현재 : INNOFLOW
(E-mail :shchoi@innoflow.co.kr)