

전산유체역학을 이용한 PEMFC의 성능에 대한 3차원 유로 구조의 영향

한경호 · 윤도영[†]

광운대학교 화학공학과
 01897 서울특별시 노원구 광운로 20
 (2016년 9월 30일 접수, 2016년 11월 5일 수정본 접수, 2016년 11월 7일 채택)

Effects of 3D Flow-Channel Configurations on the Performance of PEMFC using Computational Fluid Dynamics

Kyoung-Ho Han and Do Young Yoon[†]

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, 20, Gwangun-ro, Nowon-gu, Seoul, 01897, Korea
 (Received 30 September 2016; Received in revised form 5 November 2016; accepted 7 November 2016)

요 약

본 연구에서는 3차원 전산유체역학 모델을 적용하여 서펜타인 유로를 갖는 고분자 전해질 분리막(PEM) 연료전지의 성능평가를 수행하였다. PEM 연료전지의 전산 모델은 등온조건하에서의 이동현상을 고려하여, 물질 및 운동량 전달, 전극에서의 반응속도론 그리고 전기적 흐름을 모두 포함하였다. 한편, 병류로 흐르도록 형성된 구조의 유로 형태는 본 연료전지모델에서 유로의 폭과 높이의 비인 종횡비와 유로와 립 폭의 비인 반응면적비를 변화시키며 다양한 형상으로 고려되었다. 유로의 형상이 변화될 경우 연료전지 내부의 수소와 산소의 질량분율 분포가 계산되었으며, 이에 따라, 활성화과전압의 계산 값이 변하게 되며 전류밀도 분포가 최종적으로 결정되었다. CFD 결과는 종횡비가 클수록 성능이 증가하고 반응면적비가 클수록 성능이 감소하는 것을 보였다. 본 연구의 모델에 의하면 서펜타인 유로의 형상에 의해, 성능특성이 경향성을 보이는 결과를 보여주었으며, 이와같은 결과는 다른 문헌에 보고 된 CFD 결과들과 전반적으로 잘 부합하는 것으로 나타났다.

Abstract – Here has been examined a 3-dimensional computational fluid dynamics (CFD) modeling in order to investigate the performance analysis of proton exchange membrane (PEM) fuel cells with serpentine flow fields. The present CFD model considers the isothermal transport phenomena in a fuel cell involving mass, momentum transport, electrode kinetics, and potential fields. Co-current flow patterns for a PEMFC are considered for various geometries in the single straight cell. Current density distribution from the calculated distribution of oxygen and hydrogen mass fractions has been determined, where the activation overpotential has been also calculated within anode and cathode. CFD results showed that profiles differ from those simulations subjected to each the calculated activation overpotential. It is interesting that the present serpentine flow field shows the specific distribution of current density with respect to the aspect ratio of depth to width and the ratio of reaction area for various serpentine geometries. Simulation results were considered reasonable with the other CFD results reported in literature and global comparisons of the PEMFC model.

Key words: 3D CFD, PEMFC, Serpentine flow field, Current density distribution, Performance analysis

1. 서 론

탄소에너지 자원의 고갈과 기후변화에 대한 관심이 증가함에 따라, 높은 효율과 환경오염 유발물질이 적은 대체에너지 기술이 최근 많은 주목을 받고 있다. 연료전지는 수소를 연료로 이용하여 화

학적 에너지를 전기적 에너지로 즉시 변환할 수 있는 전기화학장치로서, 차량, 가정, 그리고 다양한 휴대용 전력공급원으로서 활용되고 있다[1].

수소 연료전지는 전해질의 종류에 따라 크게, 고분자 전해질 막 연료전지(PEMFC: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell), 고체 산화물 연료전지(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell), 알칼리 연료전지(AFC: Alkaline Fuel Cell), 인산 연료전지(PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell), 그리고 용융탄산염 연료전지(MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell)와 같이 5가지 종류로 구분되며, 그 효율이 약 60~80% 정도이다. 이 중에서 PEMFC는 낮은 작동온도와, 높은 전력밀도,

[†] To whom correspondence should be addressed.

E-mail: yoondy@daisy.kw.ac.kr

‡ 이 논문은 광운대학교 한 준 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

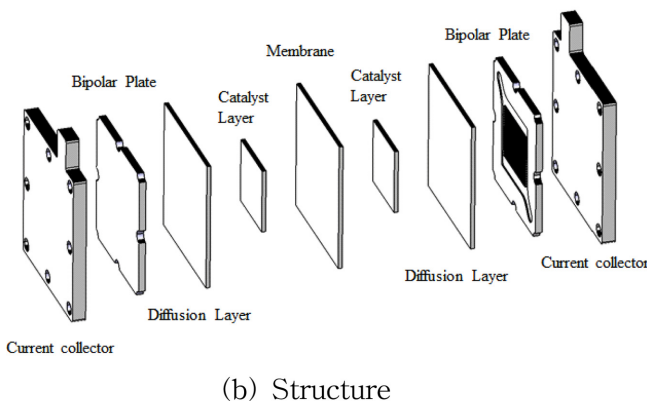
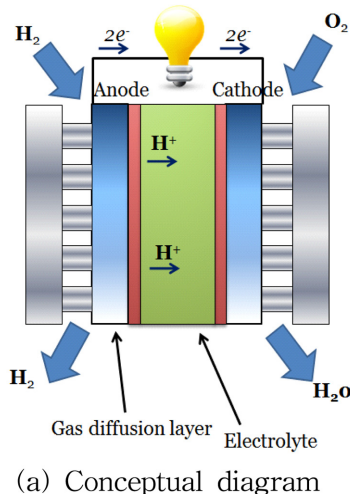


Fig. 1. Configuration of a PEMFC.

쉬운 규모 확장(scale-up) 등 많은 장점을 갖고 있다. Fig. 1에 PEMFC의 개념과 일반적인 구조를 나타내었다. PEMFC는 Fig. 1(a)에 보이듯이 수소를 연료로 이용하는 연료전지로서 수소가 전극에서 전자를 내놓음으로써 전력을 발생시키고, 수소양이온이 고분자 전해질을 통해 반대 전극으로 이동하여 산소와 반응하면서 물을 생성한다. 한편, Fig. 1(b)에 도시한 바와 같이 PEMFC는 고분자소재의 전해질을 중심으로 전극(electrode)과 가스확산층(gas diffusion layer, GDL), 분리판(bipolar plate), 집전판(current collector)이 샌드위치 형태로 덮여 있다. 이 중에서 분리판은 PEMFC 스택을 이루기 위한 핵심 구성요소이며, 자체에 유로(flow channel)가 형성되어 있다. 유로는 연료로 사용되는 수소와 산소공급원으로 사용되는 공기를 균일하게 공급하는 역할을 한다[2]. 고효율 또는 효율향상을 도모하기 위한 PEMFC의 설계에 있어서는, 수소와 공기의 균일한 공급이 PEMFC의 성능에 중요한 변수로 작용하기 때문에, 유로의 형상 또는 구조에 대한 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 대표적으로 Shimpalee 등[3]은 전산유체기법(CFD)을 이용하여 다양한 유로형상에서의 온도와 전류밀도 분포에 대한 연구를 수행하였다. Wang[4] 등은 유로 구조에 따른 PEMFC의 성능변화와 유동장 및 압력장에 대한 연구를 CFD를 이용하여 수행하였다. 한편, 다양한 형상 중에 제작이 용이한 서펜타인(serpentine)의 유로에 대한 연구도 진행되어 왔다. Park[5] 등은 서펜타인의 유로를 적용한 교차흐름을 갖는 PEMFC의 성능을 측정하고, 가스확산층의 두께와 투과도(permeability) 그리고 유속변화에 대한 영향성을 실험 및 수치해석적으로 조사하였다.

Hashemi[6] 등은 비 등온의 3차원 모델링을 통하여 직선유로와 서펜타인 유로에서 병류 및 향류 흐름에 대한 성능을 평가하고 비교하였다. 이 외에 유로의 길이, 면적 등이 디자인과 패턴 등에 기반하여 연구들이 진행되기도 하였으며[7-12], 전극의 유효면적을 고려한 연료전지 스택의 운전특성이 연구되었다[13].

PEMFC에서는 유입가스의 압력과 확산특성이 그 성능변화에 영향을 미치고 있으나, 유로의 깊이(depth)와 폭(width) 그리고 림(lib)의 폭과 같이 전달특성에 결정적인 면적의 구성요소들에 대한 영향이 보다 상세하게 검토될 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 서펜타인(serpentine) 형상을 기본 유로에 선정하여, 유로의 깊이(depth)와 폭(width)의 비인 종횡비(aspect ratio)와 유로의 폭과 림(lib)폭의 비인 반응면적 비(reaction area ratio)에 따른 전류밀도와 전압과의 관계를 CFD 해석기법을 적용하여 성능특성을 평가하고자 한다.

2. PEMFC CFD 모델링

2-1. PEMFC 지배 방정식

2-1-1. 연속방정식과 운동량 방정식

연료전지와 같이 반응이 존재하는 시스템에서의 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \vec{v}_i) = S_i \quad (1)$$

여기서, ρ 는 밀도, \vec{v} 는 속도이며 S 는 화학종 i 의 생성 혹은 소멸을 각각 나타낸다. 본 연구의 시스템에서 수소와 산소는 소멸되는 항으로, 물은 생성되는 항으로 설정되었다.

연료전지 내부에서 유체의 유동을 서술하기 위한 운동량방정식은 질량과 속도를 가지고 있는 유체의 운동량수지에 의해 수립되며 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla(-pI + \vec{\tau}) + \vec{F} \quad (2.1)$$

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{v} \right] \quad (2.2)$$

$$\vec{F} = -\left(\frac{\mu}{\alpha} \nabla + C \frac{1}{2} \rho |\vec{v}| \nabla \right) \quad (2.3)$$

여기서 p 는 압력, α 는 투과상수, μ 는 점도, C 는 관성저항인자, ∇ 는 구배연산자, I 는 단위텐서이다. 또한, \vec{F} 는 다공성물질을 투과하면서 발생하는 운동량손실벡터를 나타낸다.

2-1-2. 물질전달 방정식

유로(flow channel)를 통해 유입되는 수소와 산소는 농도구배에 의한 확산(diffusion)으로 가스 확산층을 통과하여 전극(electrode)에 도달하게 된다. 확산되는 가스는 단일 성분이 아니라 수소, 산소, 수증기 등의 여러 가지 성분으로 구성되어있기 때문에 다음과 같은 다성분(multi-component) 물질 확산을 고려한 물질전달 방정식이 적용되어야 한다.

$$j_i = - \sum_{j=1}^{N-1} \rho D_{ij} Y_j - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (3)$$

여기서 D_{ij} 는 2성분 확산계수이고, T 는 절대온도, N 은 화학종의 수, $D_{T,i}$ 는 열확산계수, Y 는 질량분율이다. 2성분 확산계수는 다음의 식

으로 표현된다.

$$D_{ij} = [D] = [A]^{-1}[B] \quad (4.1)$$

$$A_{ii} = -\left(\frac{X_i}{D_{iN}M_{w,N}} + \sum_{j=1}^N \frac{X_j}{D_{ij}M_{w,i}}\right) \quad (4.2)$$

$$A_{ij} = X_i\left(\frac{1}{D_{ij}M_{w,j}} - \frac{1}{D_{iN}M_{w,N}}\right) \quad (4.3)$$

$$B_{ii} = -\left(X_i\frac{M_w}{M_{w,N}} + (1-X_i)\frac{M_w}{M_{w,i}}\right) \quad (4.4)$$

$$B_{ij} = X_i\left(\frac{M_w}{M_{w,j}} + \frac{M_w}{M_{w,N}}\right) \quad (4.5)$$

여기서 $[A]$ 와 $[B]$ 는 $(N-1) \times (N-1)$ 행렬이고 $[D]$ 는 일반화된 Fick의 법칙 확산계수 D_{ij} 의 $(N-1) \times (N-1)$ 행렬이다. 또한 X 는 몰분율, M_w 는 몰 질량이다. 위의 식들을 이용하여 다 성분 물질전달을 고려한 Maxwell-Stefan 확산 모델을 사용할 경우 화학종의 물질전달 방정식은 다음과 같은 식 (5)가 된다.

$$\sum_{j=1}^N \frac{X_j X_i}{D_{ij}} \left(\frac{j_j}{\rho_j} - \frac{j_i}{\rho_i} \right) = \nabla X_i - \frac{\nabla T}{T} \sum_{j=1}^N \frac{X_j X_i}{D_{ij}} \left(\frac{D_{T,j}}{\rho_j} - \frac{D_{T,i}}{\rho_i} \right) \quad (5)$$

2-1-3. 전기화학 방정식

연료전지의 가장 중요한 부분은 연료로부터의 전자전달에 의한 전류 생성이다. 전자는 전기화학 반응에 의해 생성되거나 소모되기 때문에 이로 인해 발생하는 전류는 다음과 같이 전기화학의 반응속도 값이 된다.

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (6)$$

여기서 Q 는 전하이고, t 는 시간을 나타내므로 전류는 단위시간당 전하의 이동속도라고 할 수 있다. 식 (6)을 전기화학반응에 의한 전류로 표현하면 다음의 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

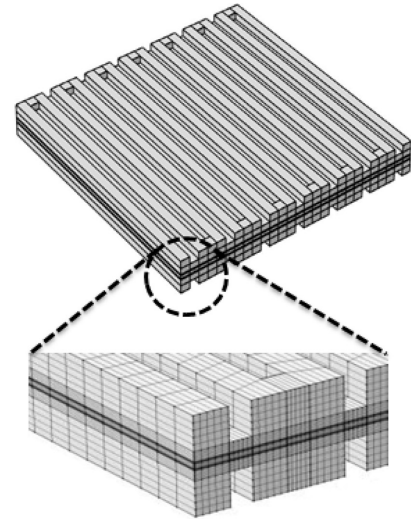
$$i = nF \frac{dN}{dt} \quad (7)$$

여기서 n 은 이동한 전자의 개수이고, dN/dt 는 전기화학반응 속도이며, F 는 Faraday 상수(96485C/mol)이다. 여기서 패러데이 상수는 아주 중요한 매개체 역할을 하게 되는데 반응을 통해 생산된 전자의 양을 전하량으로 바꿔서 전류를 표현 할 수 있도록 한다.

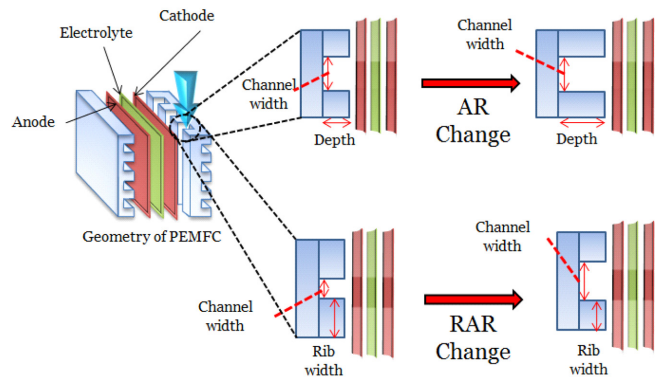
연료전지에서는 산화극과 환원극에서 각각 환원전류와 산화전류가 생성이 되는데 이들 값의 차이가 연료전지 내에 흐르는 순(net)전류 값이 된다. 연료의 물질전달 속도가 충분히 커서 전기화학반응의 전체속도결정단계가 촉매 표면에서의 전하전달 과정이라 하면 순(net)전류 값은 Butler-Volmer 방정식으로부터 다음의 식 (8)과 같이 표현된다.

$$i = i_0 \left[e^{-\alpha n F \eta / RT} - e^{(1-\alpha) n F \eta / RT} \right] \quad (8)$$

여기서 i_0 는 평형상태에서의 전류이며, α 는 대칭인자, n 은 반응 시 방출되는 전자의 개수, $\eta (=E-E_{eq})$ 는 활성화 과전압이다. 즉, 식 (8)은 가하는 전압에 따라 전류가 어떻게 변하는지를 보여줄 수 있는 식이다.



(a) Serpentine-type PEMFC model



(b) AR and RAR of the flow channel

Fig. 2. PEMFC geometry.

2-2. PEMFC 형상 및 경계조건

본 연구에서는 여러 가지 유로 구조 중에서 Fig. 2(a)에 보인 서펜타인(serpentine)타입의 유로를 갖는 PEMFC의 성능을 CFD를 이용하여 해석하고자 하였다. 연료전지의 구성은 음극(anode), 양극(cathode), 전해질(electrolyte), 가스확산층(gas diffusion layer), 그리고 연료와 공기가 흐르는 유로(channel)로 구성되어 있다.

본 연구에서는 분리판 내 유로의 폭과 깊이 그리고 릿 폭의 변화가 PEMFC의 성능에 끼치는 영향을 분석하고자 하였다. 이들을 변경하게 되면 유로의 중횡비(AR, Aspect Ratio)와 반응면적비(RAR, Reaction Area Ratio)가 변하게 되는데 AR과 RAR은 각각 다음과 같이 정의되고 Fig. 2(b)에 개략도로 나타내었다.

$$AR = \frac{\text{Channel depth}}{\text{Channel width}} \quad (9)$$

$$RAR = \frac{\text{Channel width}}{\text{Rib width}} \quad (10)$$

Fig. 2(b)에서 확인 할 수 있듯이, 단일 전지의 가로 및 세로의 크기 변화는 없고, 유로의 단면적만 변한다. 그러나 유로의 단면적이 같고 AR과 RAR이 다를 경우, 단면적의 모양이 서로 다르게 되며 기체의 가스 확산층으로의 이동에 영향을 끼칠 수 있다. 본 연구에서는

Table 1. Parameters for the present CFD modeling

| Parameters | Unit | Value |
|---|--------------------|------------------------|
| Cell length | m | 13.5×10^{-3} |
| GDL width | m | 0.25×10^{-3} |
| Porous electrode thickness | m | 0.05×10^{-3} |
| Membrane thickness | m | 0.125×10^{-3} |
| GDL porosity | - | 0.4 |
| GDL permeability | m ² | 1×10^{-11} |
| GDL electric conductivity | S/m | 53 |
| Inlet H ₂ mass fraction (anode) | - | 0.9 |
| Inlet H ₂ O mass fraction (cathode) | - | 0.1 |
| Inlet oxygen mass fraction (cathode) | - | 0.19 |
| Anode inlet flow velocity | m/s | 2 |
| Cathode inlet flow velocity | m/s | 2 |
| H ₂ -H ₂ O Binary diffusion coefficient | m ² /s | 0.0111 |
| N ₂ -H ₂ O Binary diffusion coefficient | m ² /s | 0.0031 |
| O ₂ -N ₂ binary diffusion coefficient | m ² /s | 0.0029 |
| O ₂ -H ₂ O binary diffusion coefficient | m ² /s | 0.0028 |
| Cell temperature | K | 343.15 |
| Reference pressure | Pa | 101325 |
| Cell voltage | V | 0.4 ~ 1 |
| Oxygen reference concentration | mol/m ³ | 40.88 |
| Hydrogen reference concentration | mol/m ³ | 40.88 |
| volume fraction for gas diffusion in electrode | - | 0.3 |
| Permeability (porous electrode) | m ² | 1×10^{-11} |
| Membrane conductivity | S/m | 4.2 |

Table 2. Case studies for different AR and RAR

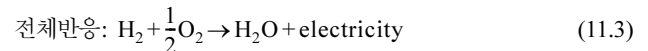
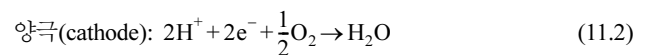
| | RAR | AR | Ch_width (mm) | Ch_depth (mm) | Rib_width (mm) |
|---------|-----|-----|---------------|---------------|----------------|
| CASE 1 | | 0.6 | | 0.3 | |
| CASE 2 | | 0.9 | | 0.45 | |
| CASE 3 | | 1.2 | | 0.6 | |
| CASE 4 | | 1.5 | | 0.75 | |
| CASE 5 | | 0.6 | | 0.3574 | |
| CASE 6 | | 0.9 | | 0.53604 | |
| CASE 7 | | 1.2 | | 0.7147 | |
| CASE 8 | | 1.5 | | 0.8934 | |
| CASE 9 | | 0.6 | | 0.395 | |
| CASE 10 | | 0.9 | | 0.5927 | |
| CASE 11 | | 1.2 | | 0.7902 | |
| CASE 12 | | 1.5 | | 0.9878 | |
| CASE 13 | | 0.6 | | 0.422 | |
| CASE 14 | | 0.9 | | 0.632 | |
| CASE 15 | | 1.2 | | 0.844 | |
| CASE 16 | | 1.5 | | 1.05 | |

AR과 RAR을 변화시키며 총 16개의 경우에 대하여 시뮬레이션을 진행하였다. Table 1에 PEMFC의 크기 및 모델링에 필요한 매개변수들의 값을 정리하여 나타내었으며, 16개의 case에 대한 유로의 길이와 폭 그리고 릿 폭의 수치를 Table 2에 기재하였다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 RAR값을 1, 1.5, 2, 2.5 네 가지로 설정하였으며, 각각의 RAR마다 AR을 0.6, 0.9, 1.2, 1.5로 변화시키며 시뮬레이션을 진행하였다. 본 연구에서는 70 °C의 온도와 1기압 조건에서 연료전지가 운전된다고 가정하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 성능을 해석하기 위한 I-V곡선의 데이터는 전지에 인가되는 전

압을 1 V~0.4 V 범위에서 0.1 V씩 감소시킴으로써 얻을 수 있었다.

연료전지의 전기화학 반응은 음극과 양극에서 일어난다. 음극에서는 수소(H₂)가 전자를 내놓으면서 양이온(H⁺)이 되고, 전해질을 통해 양극으로 이동한다. 양극에서는 산소(O₂)가 양이온과 전자를 얻음으로써 물(H₂O)이 생성된다. 이에 대한 반응식을 식 (11)에 나타내었다.



2-3. 전산유체역학

본 연구에서는 유체의 유동과 촉매층에서의 전기화학반응이 결합된 연료전지 모델을 구성하였다. 연료전지 모델을 전산유체역학(CFD) 기법으로 해석하기 위해서는 계산격자를 생성하여야 한다. 수치적 해의 정확도는 격자의 수에 따라 달라지는데 격자의 수가 많을수록 더욱 정확한 해를 구할 수 있다. 그러나 격자수를 증가시키면 계산 시간이 기하급수적으로 증가하게 되므로, 결과의 정확성과 계산시간의 적절한 균형이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 직육면체 격자를 구성하였다. 또한 적절한 계산시간과 결과 값을 얻기 위해 총 11만개의 격자를 구성하여 시뮬레이션을 진행하였다.

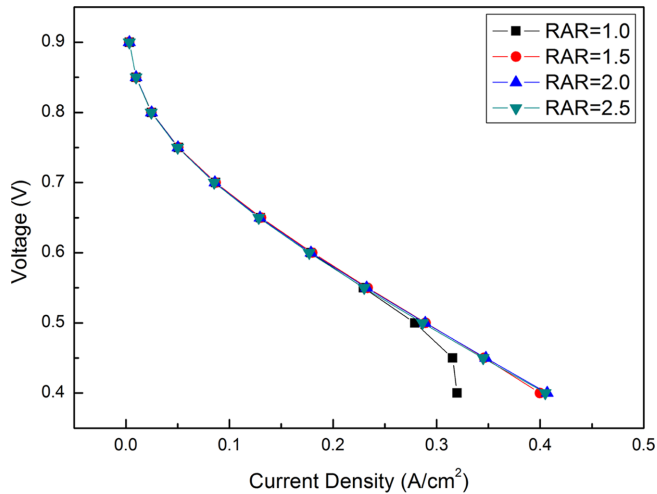
3. 결과 및 검토

3-1. PEMFC의 I-V 성능곡선

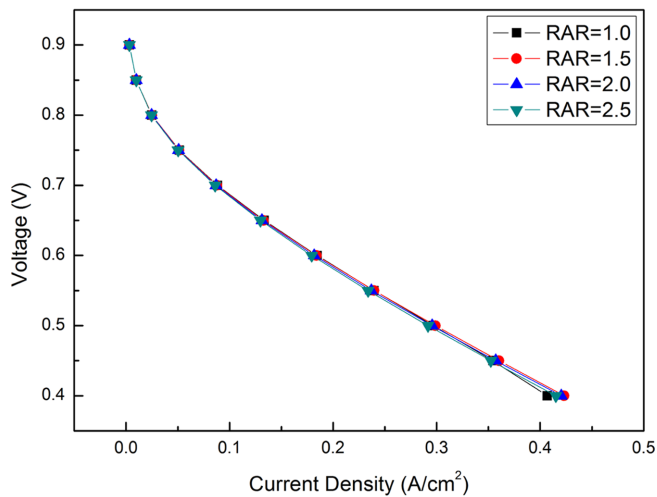
Fig. 3은 AR이 각각 0.6과 0.9일 때의 I-V곡선을 나타낸 것이다. I-V 곡선은 연료전지의 성능을 평가하는 중요한 지표 중 하나로서 같은 전류밀도에서 더 높은 전압을 가질수록 성능이 높다. Fig. 3의 I-V 곡선의 경향을 보면, 고전압 영역에서는 전류밀도가 증가함에 따라 전압이 급격히 감소하는데 이것은 활성화 과전압에 의한 전압 감소이며, 약 0.05 A/cm² 이상의 전류밀도에서는 전해질에서의 옴(ohm) 과전압에 의한 영향이 지배적으로 나타난다. 한편, Fig. 3(a)에서 RAR이 1인 경우, 약 0.3 A/cm² 이상의 전류밀도에서는 전압이 급격히 감소하였는데, 이것은 한계전류밀도에 의한 결과이다. 한계전류밀도란, 전하전달속도가 물질전달속도에 의해 결정될 때의 전류밀도이다. 연료전지에서 생성되는 전류밀도의 크기는 전극에서 전기화학 반응을 통하여 연료가 소모되는 속도에 비례한다. 전류밀도가 증가한다는 것은 반응속도가 증가한다는 것이고 반응속도가 연료의 확산속도보다 빠를 경우 한계전류밀도에 도달하게 된다. 즉, 이 경우는 연료 혹은 산소의 확산속도가 반응속도보다 느리기 때문에 나타나는 현상이다. 그러나 RAR이 1에서 1.5이상으로 증가하였을 경우에는 한계전류밀도에 의한 경향이 나타나지 않았다. 한편, Fig. 3(b)에서는 RAR이 1인 경우에 한계전류밀도에 도달하지 않았다. AR이 각각 1.2, 1.5일 때의 I-V 곡선은 AR이 0.9인 경우와 매우 비슷하며 0.4 V에서 약간의 전류밀도 차이만 보였다.

3-2. RAR과 AR변화에 대한 유로의 입·출구 압력강하

RAR과 AR변화에 따른 유로의 입·출구 압력강하의 크기를 Fig. 4에 나타내었다. 압력강하의 크기는 파이프 혹은 유로의 형상에 의해



(a) AR=0.6

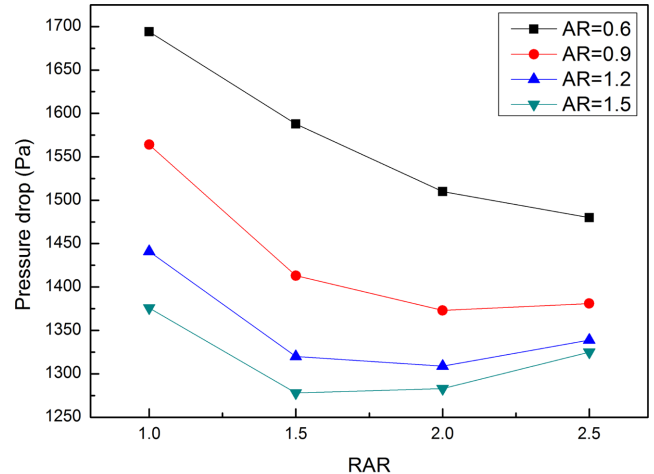


(b) AR=0.9

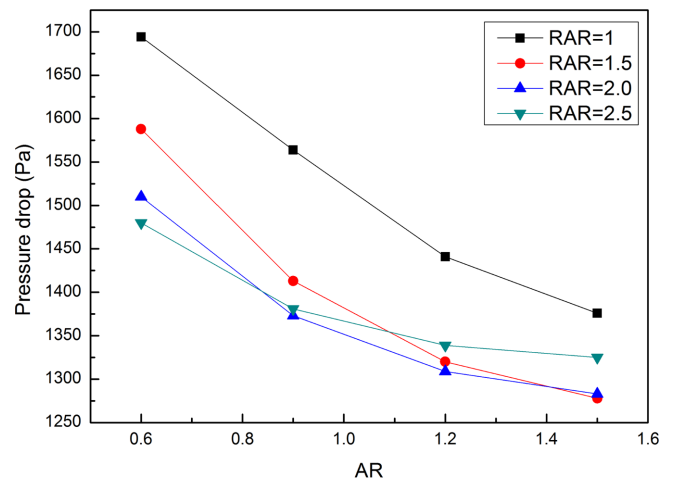
Fig. 3. I-V curve for the present PEMFC modeling.

충분히 변할 수 있으며, 이에 대한 해석은 기체를 유입시키는 펌프의 운전조건과 직결된다. 수평면에서의 모든 유체의 흐름은 유로의 입구와 출구사이의 압력 차이에 의해 발생하게 되는데, 이 때, 유로의 각도나 형상에 의한 압력손실이 발생할 수 있다. 압력손실이 증가할수록 펌프는 같은 유량을 내보내기 위해 더 많은 일을 해야 한다.

Fig. 4(a)를 보면 AR이 0.6인 경우에는 RAR이 증가함에 따라 압력강하가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 AR이 0.9와 1.2인 경우에는 RAR이 2.0 이상일 때 압력강하가 증가하였고, AR 1.5일 때는 RAR이 1.5 이상일 때 압력강하가 증가하는 경향을 보였다. RAR이 1인 경우에 모든 AR에 대하여 압력강하가 가장 높았으며, RAR과 AR이 모두 1.5인 경우에는 가장 낮은 약 1275 Pa의 압력강하가 발생하였다. 고정된 RAR에서 AR에 의한 압력강하의 변화를 확인하기 위하여 Fig. 4(b)에 그래프를 나타내었다. 고정된 RAR에서는 AR이 증가함에 따라 압력강하가 계속해서 감소하는 것을 확인할 수 있다. RAR이 1인 경우에는 거의 선형적으로 감소하였으며, 나머지의 RAR에서는 비선형적으로 감소하였다. 한편, AR증가에 따른 압력강하의 감소율은 1.5의 RAR에서 가장 컸으며, RAR



(a) RAR vs. Pressure drop



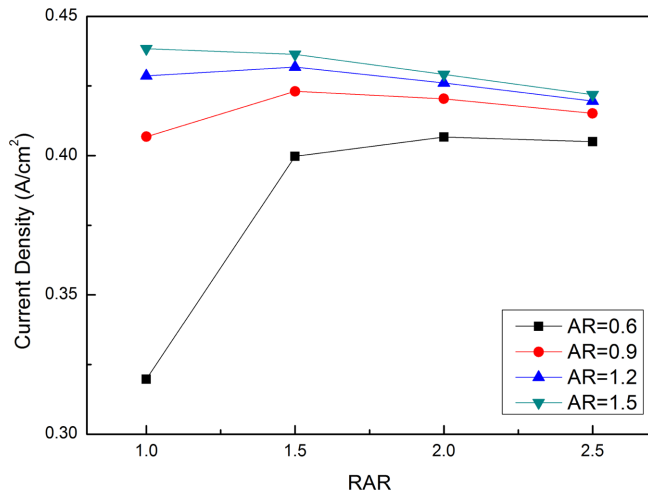
(b) AR vs. Pressure drop

Fig. 4. The pressure drop subject to different cross-sectional area of the flow channel.

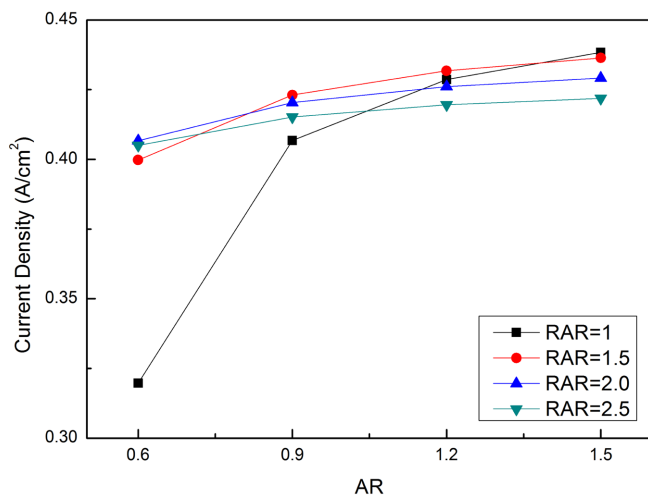
이 2.5인 경우 가장 작았다. 위 결과들은 AR과 RAR이 유로의 입·출구 압력강하에 미치는 영향이 서로 다르다는 것을 보여주고 있다. 특히 RAR이 변할 경우, AR보다 더 복잡한 압력강하의 경향이 나타났다.

3-3. 0.4 V에서의 PEMFC의 성능변화

Fig. 5(a)는 각 AR에 대해 유로의 RAR 변화에 따른 0.4 V에서의 전류밀도 값을 나타낸 그래프이며, 16개의 서로 다른 유로형상 중에서 RAR이 1이고 AR이 1.5일 때 가장 높은 전류밀도 값을 가짐으로써 최대의 성능을 보였다. RAR변화에 대한 경향성을 살펴보면, 대부분의 경우에 RAR이 증가하면서 전류밀도가 감소하였으나, AR이 0.6일 때는 한계전류밀도가 나타나는 구간을 제외하고 RAR 증가에 따른 성능감소가 거의 나타나지 않았다. 한편, 모든 경우에 대해 유속은 2 m/s로 고정되어 있기 때문에 유로의 RAR이 증가할수록 연료와 공기의 몰 유량(molar flow rate)은 증가하게 된다. 몰 유량이 증가함에 따라 연료전지의 성능이 향상될 것으로 예측하였으나, 반대의 결과가 나타났다. 이 결과는 RAR의 증가가 기체의 확산을 저해하는 요인으로 작용하는 것으로 예상된다. AR의 결과로부터 이에 대한 분석을 하기 위해 Fig. 5(b)에 그 결과를 나타내



(a) RAR vs. current density



(b) AR vs. current density

Fig. 5. Current density of the PEMFC at the 0.4 V.

었다. Fig. 5(b)를 보면 Fig. 5(a)의 결과와 매우 대조적이다. Fig. 5(a)에서는 RAR 증가에 따라 전류밀도가 감소하는 결과가 나타났지만, Fig. 5(b)는 AR이 증가할수록 전류밀도가 증가하는 결과를 보이고 있다. 전류밀도가 증가하는 이유는 위에서 언급한 바와 같이 유로의 단면적이 증가함에 따라 연료전지로 유입되는 연료와 산소의 몰 유량(molar flow rate)이 증가하기 때문이다. Fig. 5(b)의 그래프는 각각의 RAR에 대하여 전류밀도가 AR이 증가함에 따라 비슷한 경향으로 증가하였다. 또한, 유로의 단면적이 가장 작은 경우를 제외하고 같은 AR에서 RAR이 낮을수록 더 높은 전류밀도 값을 나타내었다. 다만, AR 증가에 따라 전류밀도가 선형적으로 증가하지 않고 증가량이 점차적으로 감소하였는데, 이로부터 AR을 크게 증가시켜도 전류밀도의 향상에는 한계가 존재할 것으로 예측된다. 추가적으로 Fig. 5(b)의 결과는 Fig. 5(a)의 결과에서 언급한 바와 같이, RAR의 증가가 기체의 확산을 저해하는 요인으로 작용할 것이라는 예측에 대한 근거로 삼을 수 있다. 본 연구에서는 전기화학적인 변수의 조작 없이 오로지 유로의 형상만을 변화시켜 데이터를 얻었다. 그 결과는 동일한 유로의 단면적에서 AR이 증가할수록 전류밀도가 증가하고 RAR이 감소할수록 전류밀도가 증가하는 것으로 나타났다. 전기화학적인 변수의 조작 없이 연료전지의 모델에서

전류밀도가 변하는 것은 유로의 형상변화가 기체의 확산속도에 영향을 끼친 것으로 판단할 수 있다. 즉, Fig. 5(b)의 결과로부터 RAR의 증가는 기체의 확산을 저해하는 요인으로 작용할 수 있음을 나타낸다. AR이 증가할수록 연료전지의 성능은 향상되지만 점차적으로 향상의 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고분자 전해질 막 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)의 서펜타인(serpentine) 타입의 유로형상 변화에 따른 성능을 연구하였다. CFD 기법을 이용한 3차원 해석을 진행하였으며, 유로형상의 변수를 종횡비(Aspect Ratio, AR)와 반응면적 비(Reaction Area Ratio, RAR)로 설정하였다. AR과 RAR은 각각 4가지의 경우를 고려하여 총 16개의 계산결과를 얻었다. 그 결과 유로의 입·출구의 압력강하는 AR이 증가할수록 감소하였으며, RAR이 증가할수록 연료전지의 성능이 감소하는 경향을 보였다. 또한 AR은 증가할수록 성능이 증가하였지만, 증가량이 점점 감소하는 경향이 나타났다. 결론적으로, PEMFC의 유로설계 시 RAR이 높을수록 기체의 확산에 영향을 받아서 전류밀도가 감소하고 너무 낮은 경우 한계전류밀도가 나타날 수 있다. 그리고 AR은 증가할수록 전류밀도가 증가하고 압력강하는 감소하지만 효율적인 운전을 위해서는 적절한 비율을 찾는 것이 중요한 것으로 판단된다. 실제 연료전지 시스템에서 유로형상 설계 시, 본 연구결과가 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

감 사

본 연구는 한국과학기술연구원의 미래원천연구사업(NO. 2E25412-15-121)과 2016년 광주대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Wang, Y., Chen, K. S., Mishler, J., Cho, S. C. and Adroher, X. C., "A Review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Technology, Applications, and Needs on Fundamental Research," *Applied Energy*, **88**, 981-1007(2011).
- Li, X. and Sabir, I., "Review of Bipolar Plates in PEM Fuel Cells: Flow-field Designs," *International Journal of Hydrogen Energy*, **30**, 359-371(2005).
- Shimpalee, S., Greenway, S. and Van Zee, J. W., "The Impact of Channel Path Length on PEMFC Flow-field Design," *Journal of Power Sources*, **160**, 398-406(2006).
- Li, X., Sabir, I. and Park, J., "A Flow Channel Design Procedure for PEM Fuel Cells with Effective Water Removal," *Journal of Power Sources*, **163**, 933-942(2007).
- Park, J. and Li, Xi., "An Experimental and Numerical Investigation on the Cross Flow Through Gas Diffusion Layer in a PEM Fuel Cell with a Serpentine Flow Channel," *Journal of Power Sources*, **163**, 853-863(2007).
- Hashemi, F., Rowshanzamir, S. and Rezakazemi, M., "CFD Simulation of PEM Fuel Cell Performance: Effect of Straight and Serpentine Flow Fields," *Mathematical and Computer Modelling*, **55**,

- 1540-1557(2012).
7. Nguyen, T. V., "A Gas Distributor Design for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, **143**(5)(1996).
 8. Ahmed, D. H. and Sung, H. J., "Effects of Channel Geometrical Configuration and Shoulder Width on PEMFC Performance at High Current Density," *Journal of Power Sources*, **162**, 327-339(2006).
 9. Peng, L., Lai, X., Liu, D., Hu, P. and Ni, J., "Flow Channel Shape Optimum Design for Hydroformed Metal Bipolar Plate in PEM Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, **178**, 223-230(2008).
 10. Jeon, D. H., Greenway, S., Shimpalee, S. and Van Zee, J.W., "The Effect of Serpentine Flow-field Designs on PEM Fuel Cell Performance," *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**, 1052-1066(2008).
 11. Yang, H. and Zhao, T. S., "Effect of aNode Flow Field Design on the Performance of Liquid Feed Direct Methanol Fuel Cells," *Electrochimica Acta*, **50**, 3243-3252(2005).
 12. Ferng, Y. M. and Su, A., "A Three-dimensional Full-cell CFD Model Used to Investigate the Effects of Different Flow Channel Designs on PEMFC Performance," *International Journal of Hydrogen Energy*, **32**, 4466-4476(2007).
 13. Choi, H. J., Ahn, S. Y., Cho, S. A., Lee, J. K., Shim, J. P., Cha, S. Y., Ha, H. Y., Hong, S. A., Lim, T. W. and Oh, I. H., "A Study on Operational Characteristics of the 3 kW Class PEMFC Stack," *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, **38**(4), 550-555(2000).