

연료전지 채널 내 균일한 유량분배를 위한 연료전지 스택의 매니폴드 디자인 최적화 연구

조아래* · 강경문* · 오성진** · 주현철***†

Optimizing the Manifold Design of a Fuel Cell Stack for Uniform Distribution of Reactant Gases within Fuel Cell Channels

A-Rae Jo*, Kyung-Mun Kang*, Sung-Jin Oh**, Hyun-chul Ju***†

Key Words : Fuel cell(연료전지), Stack(스택), Manifold(매니폴드), Flow distribution(유동분포), Porous media(다공성 미디어)

ABSTRACT

The main function of fuel cell manifold is to render reactants distribution as uniform as possible into a fuel cell stack. The purpose of this study is to numerically investigate the effects of stack manifold design on reactants distribution within a fuel cell stack. Four manifold designs with different manifold entrance shapes (expansion or diffuser) and different values of the extra width between the cell outer channel and manifold side wall are considered and applied to the fuel cell stack consisting of 50 cells. Since the fuel cell stack geometry involves several millions of grid points for numerical calculations, a parallel computing methodology is employed to substantially reduce the computational time and overcome the memory requirement. The numerical simulations are carried out and calculated results clearly demonstrate that both the manifold entrance shape and extra width have a substantial influence on manifold performance, controlling the degree of flow separation and entrance length for fully developed flow in the manifold channel. Finally, we suggest the optimum design of fuel cell manifold based on the simulation results.

기호설명

A	면적(m ²)	N	개수
c	경험적 상수	p	압력(Pa)
C	농도(mol/m ³)	u	유체 속도(m/s)
D	표준 편차	u'	변동 유체 속도(m/s)
F	페더레이 상수	V	유체 속도(m/s)
G	운동에너지의 생성항(kg/ms ²)	δ	텐서
I	전류밀도(A/cm ²)	ϵ	난류 소산률(m ² /s ³)
K	투과성(m ²)	ϕ	다공도
\dot{m}	질량유량(kg/s)	κ	난류 운동에너지(m ² /s ²)
M	분자량(kg/mol)	μ	점도(kg/ms)
		ρ	밀도(kg/m ³)
		σ	경험적 상수
		τ	전단응력(N/m ²)
		ζ	화학량론

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** (주)퓨얼셀 파워

*** 인하대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail : hcju@inha.ac.kr

하첨자

<i>a</i>	연료극
<i>avg</i>	평균 값
<i>chan</i>	채널
<i>cell</i>	셀
H_2	수소
<i>in</i>	입구
<i>i, j</i>	벡터 구성요소
<i>k</i>	채널 번호
<i>mem</i>	멤브레인
<i>ratio</i>	비율
<i>ref</i>	기준 값
<i>t</i>	난류

1. 서 론

고분자 전해질형 연료전지(Polymer Electrolyte Fuel Cells, PEFCs)는 고분자 전해질을 사용하는 연료전지로서 다른 형태의 연료전지에 비하여 비교적 낮은 작동 온도($\sim 100^\circ\text{C}$)에서 운전이 가능하고 전류밀도 및 출력밀도가 크며 부하변화에 대한 응답특성이 빠르다는 장점이 있다. 고분자 전해질형 연료전지는 이러한 특성 이외에도 넓은 범위의 출력을 낼 수 있는 장점이 있기 때문에 가정용 발전장치, 이동용 전원 및 군사용 전원 등 다양한 분야에 응용될 수 있다. 이러한 연료전지가 다양한 분야에 응용되기 위해서는 연료전지 작동 시 연료전지 내부에서 발생하는 물리적 현상들을 이해하고 복잡한 열 및 물질 전달 메커니즘을 정확히 규명하여 고효율, 고성능 연료전지 시스템을 개발해야 한다. 이를 위해 연료전지 내부에서 발생하는 여러 가지 현상들을 예측하고 그 원인을 규명할 수 있는 이론적 연구가 선행되어 왔다.^(1~10)

한편, 단위전지로 얻을 수 있는 출력은 그리 크지 않기 때문에 연료전지 시스템으로부터 고효율의 전력을 생산하기 위해서는 수 십장의 단위전지를 직렬로 연결한 연료전지 스택(stack)으로 제작되어야 한다. 연료전지 스택의 성능은 반응물의 유량에 민감하므로, 매니폴드에서 각 셀에 같은 양의 반응 가스를 공급할 수 있는 매니폴드의 형상을 설계하는 것이 필수적이다.

Kim 등⁽¹¹⁾은 단위전지 10개로 구성된 스택을 제작하고 매니폴드 형상을 변화시켜 가면서 시뮬레이션을 수행하여 측정된 실험결과와 비교하였다. 또한, 공기극의 매니폴드 형상에 따라 매니폴드에서 각 셀의 입구의 유동분포가 연료전지 성능에 미치는 영향을 비교 분석하였다. Koh 등⁽¹²⁾은 2차원 연료전지 스택 모델을 이용하여 매니폴드와 채널의 압력강하 및 유동분포에 대해 수치 해석 결과와 실험 결과를 비교/분석하였다. 그들의 연구결과는 매니폴드의 치수와 기하학

적 형상이 많은 압력강하를 일으키는 주요 인자라고 설명하였다. Chen 등⁽¹³⁾은 가스 채널에 다공성 미디어 영역을 설정하여 연료전지 스택에서의 압력강하와 유동 분포를 시뮬레이션을 통해 계산하였다. 그들의 연구 결과는 각 셀에서 채널의 폭이 클수록 균등한 유량분포가 나타남을 보였고 매니폴드의 폭이 클수록 각 셀로의 균등한 유량 분포 특성이 나타난다고 설명하였다.

실제 연료전지 스택의 각 셀 및 각각의 가스 채널로 들어가는 유량분포는 매니폴드의 형상 및 유동 흐름에 따라 편차가 발생할 수 있다. 하지만, 위의 언급된 연구들은 그러한 효과를 무시하였기 때문에 스택 성능의 최적화를 도출할 수 있는 인자를 찾기가 어렵다. 따라서, 연료전지 스택의 성능을 향상시키기 위해서는 매니폴드를 통한 압력강하를 최소화하고, 매니폴드 내의 불안정한 유동 흐름, 매니폴드에서 각 셀에 분배되는 유량의 불균일성 등을 해결할 수 있는 매니폴드 형상을 설계해야 한다.

본 논문의 목적은 이러한 매니폴드 형상에 따른 연료전지 스택의 유동 해석을 수행하여 각 셀 및 각각의 채널로의 균등한 유동 분포를 이룰 수 있는 최적화된 매니폴드 형상을 제시하는데 있다.

2. 매니폴드 유동 해석 모델

2.1. 모델 시뮬레이션

본 연구에서는 연료전지 스택의 유동의 특성을 확인하기 위하여 범용소프트웨어인 ANSYS-FLUENT 6.3 전산유체(Computational Fluid Dynamics, CFD) 패키지를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 본 모델의 수렴 조건은 각 수치 셀(Cell)의 레지듀얼(Residual)의 최대값이 10^{-9} 이하로 떨어질 때이며, 대부분의 시뮬레이션 경우 대략 15,000번의 반복횟수(Iteration)이내로 상기 조건을 만족하여 수렴하였다.

한편, 연료전지 스택의 유동의 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 약 550만개의 육면체(hexahedral) 형상의 격자가 스택 형상에 적용되었다. 본 연료전지 스택 시뮬레이션의 수행시간을 단축하기 위하여 다수의 CPU를 이용하여 병렬 계산을 수행하였다. 병렬 계산은 48GB의 메인 노드(인텔® 코어 Xeon 2.53GHz)와 8개의 서브 노드(인텔® 코어 i7 2.93GHz, 8GB)로 구성되어 진행되었으며 각 서브 노드는 이더넷 네트워크(ethernet network) 시스템에 의해 1Gbps의 속도로 정보를 주고받는다.

Table 1 Stack properties and operating conditions

Stack properties	Value	Operating conditions	Value
Cell / channel number(Anode)	50 / 8 EA	Operating current density	0.34 A/cm ²
Gas channel width / depth	1.05 / 0.7 mm	Operating temperature	60 °C
Cell-to-cell distance in manifold axis	3.65 mm	Anode inlet humidification	100 % at 60°C
Area of inlet and outlet	4.54×10 ⁻⁵ m ²	H ₂ concentration	30 %
Simplified channel length	162 mm	Stoichiometry (anode)	1.33
Gas permeability for the simplified channel	6.16×10 ⁻⁹ m ²	Active area	133 cm ²

2.2. 지배 방정식

본 연구에서는 매니폴드에서의 유동의 특성을 확인하기 위하여 난류 모델인 k-ε 모델을 이용하였고 각 셀에서의 발생하는 전기화학반응 등은 고려하지 않았다. 시뮬레이션에 적용된 지배식은 다음과 같다.

연속 방정식:

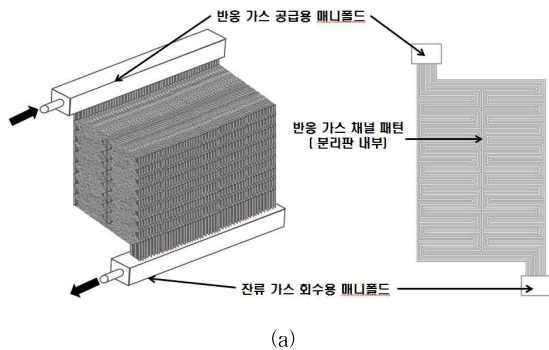
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

운동량 보존식:

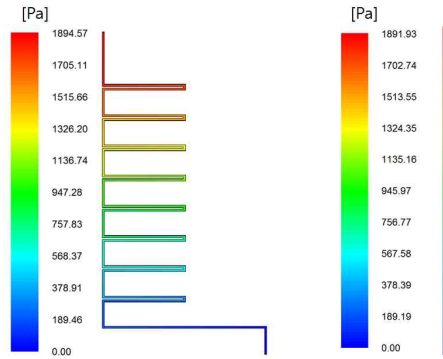
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u'_i u'_j) \end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)에서 레이놀즈 응력(Reynolds stresses)은 다음과 같다.

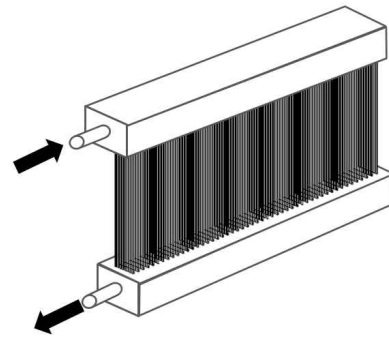
$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \tag{3}$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 (a) Schematic of fuel cell stack. (b) Comparison of pressure drop in actual channel and simplified channel. (c) schematic of simplified fuel cell stack

κ(Turbulent kinetic energy) 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \tag{4}$$

ε(Turbulent dissipation rate) 방정식:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - c_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \tag{5}$$

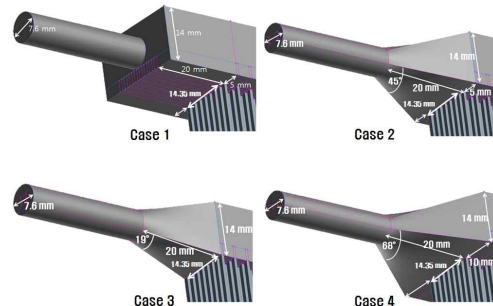


Fig. 2 Geometric configuration of manifold entrance region

식 (5)에서 μ_t 는 난류 점도(Turbulent viscosity)를 의미하며 $\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 로 나타낼 수 있고, G_k 는 평균 속도의 차이에 의해 발생하는 난류운동에너지 생성항으로써 $G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ 로 나타낼 수 있다. 또한, $c_{1\epsilon} = 1.44$, $c_{2\epsilon} = 1.92$, $c_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 등은 경험적 상수이다.⁽¹⁴⁾

2.3. 스택의 기하학적 형상 설정

본 연구에서 고려된 스택의 기하학적 형상은 Fig. 1(a)에 나타나있으며 스택의 작동 조건 및 치수는 Table 1에 나열되어 있다. 스택 내부 전체 유동의 흐름은 U 타입으로 가정되었다.

Fig. 1(b)는 스택의 매니폴드에서 유동해석에 필요한 격자(mesh) 수를 줄이기 위하여 각 셀의 분리판 유로 형상을 단순화하는 과정을 모사하였다. 즉, 분리판 유로의 형상을 단순화하기 위해서는 단순화된 유로채널의 압력강하와 실제 유로 채널에서 발생하는 압력강하의 크기가 동일해야 한다. 단순화된 채널에 유동 저항을 높이기 위해 단순화 채널을 다공성 미디어(porous media)로 가정하였고 동일한 크기의 압력강하 효과를 나타내기 위해 가스투과도를 결정하였다. 가스 투과도는 식 (6)와 같이 Darcy의 법칙(law)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\nabla P = \frac{\mu}{K} \vec{u} \quad (6)$$

식 (6)에서 ∇P 는 가스 채널의 압력강하, μ 는 가스의 점성, \vec{u} 는 반응 면적에 대한 평균속도이다. 이러한 방법을 통해 가스 채널의 유로 패턴(pattern)은 채널 입구에서부터 출구까지의 직선으로 단순화될 수 있다. 이를 통해 전체 스택의 형상을 Fig. 1(c)과 같이 단순화하여 유동 분배 특성을 확인하였다.

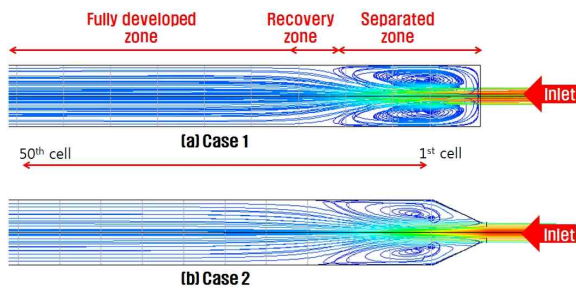


Fig. 3 Streamline profiles in the cross-section of the manifold for (a) Case 1 and (b) Case 2

2.4. 경계 조건(Boundary conditions)

본 연구에서 고려된 연료전지 스택은 50개의 셀이 적층된 구조이며 각 셀의 채널 수는 8개로 구성되어 있다. 각 셀의 반응 면적은 133 cm², 작동온도 60 °C에서 스택의 출력은 1.6 kW 이다. 그리고 스택에서의 유동 흐름의 특성은 연료극(anode) 가스채널에서만 고찰되었다.

연료극 스택의 입구 속도는 식 (7)와 같이 계산될 수 있다.

$$V_{in} = \zeta \times \frac{I_{ref}}{2 \cdot F \cdot C_{H_2,in}} \times \frac{A_{mem} \cdot N_{cell}}{A_{in}} \quad (7)$$

식 (7)에서 ζ 은 화학량론(Stoichiometry), I_{ref} 는 전류밀도(Current Density), A_{mem} 는 반응면적(Area), F 는 페러데이 상수(Faraday constant), $C_{H_2,in}$ 는 셀에 들어가는 수소의 농도(Concentration), V_{in} 은 연료전지 스택의 입구로 들어가는 속도이다.

3. 결과 및 고찰

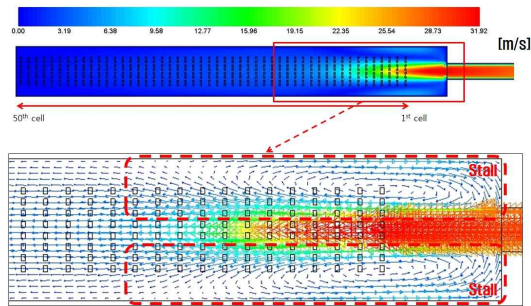
3.1. 매니폴드 시뮬레이션 형상

본 연구에서는 매니폴드 폭과 입구형상을 설계인자로 고려하여 유동분배 특성을 분석하였다. Table 2에 매니폴드 형상에 대한 제원 값들을 나타냈으며, 매니폴드 형상 제원들에 대한 매니폴드 입구의 기하학적 형상들은 Fig. 2에 나타내었다. 모든 매니폴드들의 높이(Manifold height)는 14 mm, 매니폴드들의 길이(Manifold length)는 20 mm, 매니폴드 입구면적(Manifold inlet area)은 45.36 mm²로 일정한 반면 폭은 각각의 경우마다 달라짐을 알 수 있다. 즉 매니폴드의 폭은 단위전지 채널/랜드의 길이의 합인 14.35 mm 와 각 셀의 가스채널 끝과 매니폴드 벽면사이의 간격의 합(Manifold extra width)으로 결정된다. Case 1 과 Case 2는 간격이 5 mm이므로 매니폴드의 폭은 24.35 mm (=14.35mm + 5 mm × 2)인 반면 Case 3는 간격이 없으므로 14.35 mm, Case 4는 간격이 10 mm로 폭은 34.35 mm가 된다. 한편 매니폴드 입구형상은 Case 1이 단순히 사각 단면으로 확장되는(expansion) 형상이고, Case 2부터 4까지는 점차적으로 확장되는 디퓨저(diffuser)형상을 띄고 있음을 알 수 있다.

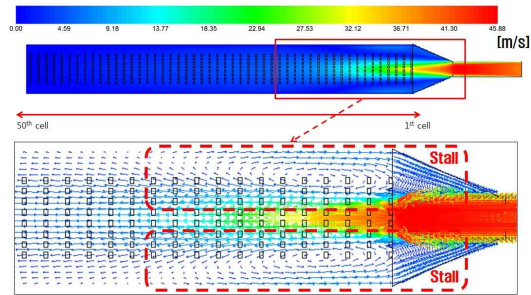
Table 2 Manifold geometry parameters for simulation cases

Case	Design parameter			Independent variable
	Type of Manifold entrance geometry	Manifold extra width	manifold length	
1	Expansion	5 mm	20 mm	14 mm
2	Diffuser	5 mm		
3	Diffuser	0 mm		
4	Diffuser	10 mm		

Total length of channel and rib : 14.35 mm
Manifold inlet area : 45.36 mm²



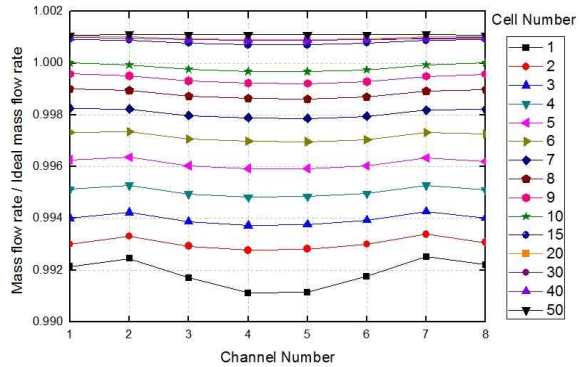
(a)



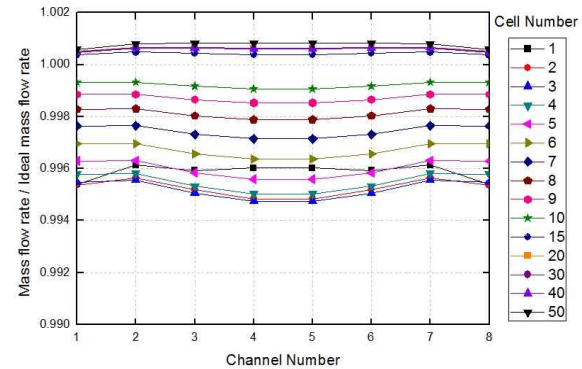
(b)

Fig. 4 Velocity distribution in the cross-section of the manifold for (a) Case 1 and (b) Case 2

Fig. 3는 Case 1 과 Case 2에 대한 매니폴드 셀 방향 단면의 유선(stream line)을 나타낸 그림이다. 반응 가스가 튜브 관에서 매니폴드로 들어갈 때 유동의 단면적이 증가하여 매니폴드 내에서 실속(stall)이 발생된다. 본 연구에서는 Agarwal 등⁽¹⁵⁾이 제시한 것과 마찬가지로 매니폴드 내에서 형성된 유동분포의 특징을 영역별로 구분하기 위해 난류유동에서의 면적 변화에 따른 유동분포 영역을 다음과 같이 정의하였다. 반응물이 매니폴드를 따라 이동하는 동안 단면적이 확장되면서 유동의 실속이 발생되어 유동의 분리 현상이 관측되는 영역을 분리영역(Separated region), 유동이 발달되기 전까지의 영역을 회복영역(Recovery region), 유동이 더 이상 변하지 않는 영역을 완전발달영역(Fully developed flow region)으로 구분하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Deviation of the mass flow rate of each cell for (a) case 1 and (b) case 2: the mass flow rate flowing into each channel is normalized by the average value as calculated in Eq. (8)

3.2. 매니폴드 디자인 영향성 연구

Fig. 4는 Case 1 과 Case 2의 매니폴드 입구 형상차이에 따른 유동분포를 보여주는 그림이다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)의 속도분포를 비교할 때 입구 형상에 관계없이 두 경우 모두 매니폴드 단면적이 확장되면서 1번 셀부터 11번 셀까지 실속이 형성되어 유동이 분리 현상이 관측되고 12번 셀 이후부터는 유동이 회복되어 20번 셀 이후에는 유동이 완전 발달된 모습을 보여주고 있다.

Fig. 5는 case 1과 case 2에 대한 각 셀 및 채널로 분배되는 실제 질량유량의 값 (\dot{m}_{chan})을 스택내부 50개의 셀과 각 셀의 8개 채널에 균일하게 분배된다는 가정 하에 계산된 평균질량유량 값 ($\dot{m}_{chan,avg}$)으로 나눈 무 차원 값을 나타낸 그래프이고 무 차원 값은 식 (8)과 같이 계산될 수 있다. 또한, 채널에 유입되는 반응 가스의 셀 및 채널 간 유량 편차는 식 (8)에 따라 계산된 실제 질량유량의 무 차원 값과 평균질량유량의 무 차원 값의 차이를 나타낸다.

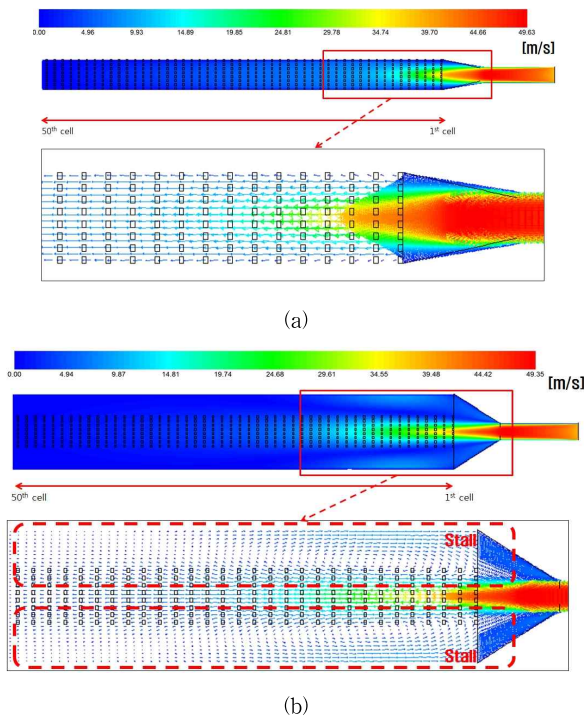


Fig. 6 Velocity distribution in the cross-section of the manifold for (a) Case 3 and (b) Case 4

$$\dot{m}_{ratio} = \frac{\dot{m}_{chan}}{\dot{m}_{chan,avg}} = \frac{\dot{m}_{chan}}{\zeta_a \times \frac{I_{ref}}{2 \cdot F} \times \frac{A_{mem} \cdot M_{H_2}}{N_{chan}}} \quad (8)$$

먼저 case 1과 case 2 모두 1번부터 10번 셀들까지 유입되는 유량은 평균값(=1.0)보다 적은 반면 나머지 셀들에서는 유입되는 양이 평균 이상임을 알 수 있다. 이는 Fig. 4에 나타난 매니폴드 단면에서의 속도분포의 특성에 기인하며, 1번 셀부터 10번 셀까지는 매니폴드 내부 유동이 빠르게 진행되어 셀들로 유입되는 양이 상대적으로 적은 반면, 11번 셀부터는 점차 매니폴드 유동의 특성이 회복되어 속도감소로 인한 셀로의 유입량이 증가하며 셀들 사이의 유입되는 유량도 균일하게 된다. 특히 완전 발달된 유동이 형성되는 20번 이후에서는 셀 및 채널 간 유량의 편차가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. Case 1 과 Case 2의 매니폴드 형상의 영향성은 매니폴드 입구근처에서 셀에 유입되는 유량을 비교함으로써 알 수 있다. 5번 셀 이하의 입구근처의 셀들의 유입유량은 Case 2의 디퓨저 형태의 매니폴드 형상에서 상대적으로 크게 나타나 나머지 셀들과의 편차가 적음을 알 수 있다.

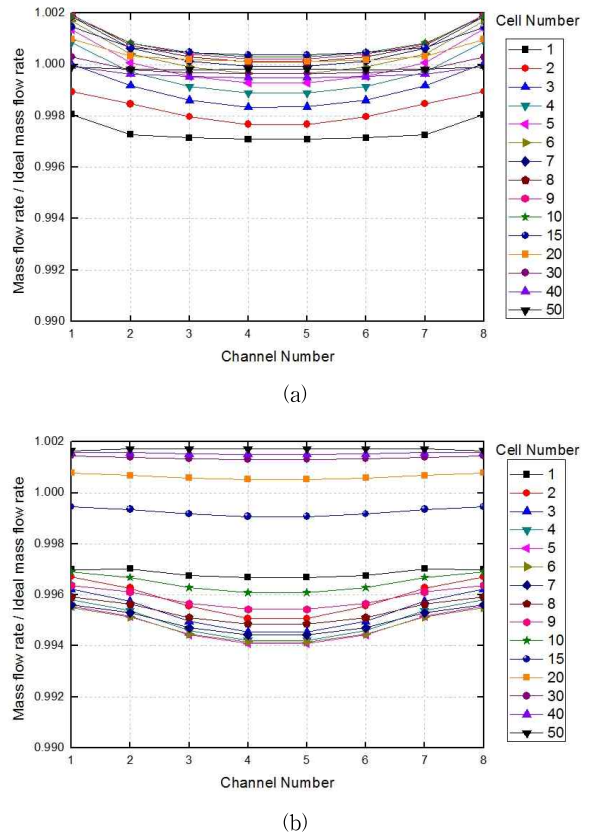


Fig. 7 Deviation of the mass flow rate of each cell for (a) case 3 and (b) case 4: the mass flow rate flowing into each channel is normalized by the average value as calculated in Eq. (8)

Fig. 6은 Case 3와 Case 4의 속도분포 비교를 통해 매니폴드의 벽면과 채널 사이의 폭이 매니폴드 유동에 미치는 영향성을 보여준다. 폭이 없는 Case 3는 실속 현상이 거의 나타나지 않아 유동의 분리영역(Separated region)과 회복영역(Recovery region)이 셀 초반부에 형성되고 5번 셀 이후로는 완전 발달된 유동 영역이 되는 것을 확인할 수 있다. 반면 폭이 10 mm인 Case 4는 실속영역이 Fig. 4(b)의 5 mm 폭의 Case 2에 비해 크게 나타나, 매니폴드내부 실속 현상의 크기는 매니폴드벽면과 채널 사이의 폭이 증가함에 따라 커지게 된다. Runstadler 등⁽¹⁶⁾은 평판 디퓨저에서 실속이 일어나기 시작하는 원추각의 임계각을 18°로 제시하였다. Fig. 2에 표기된 것처럼 Case 2 매니폴드 원추각은 19°로 임계값을 약간 초과하기 때문에 실속현상이 미비하게 나타나는 반면, Case 2의 원추각은 45°, Case 4의 원추각은 68°이기 때문에 실속현상의 크기는 매니폴드벽면과 채널 사이의 폭이 증가함에 따라 커지게 된다.

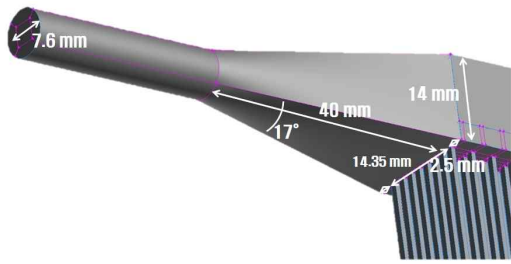


Fig. 8 Geometry of optimized manifold entrance region.

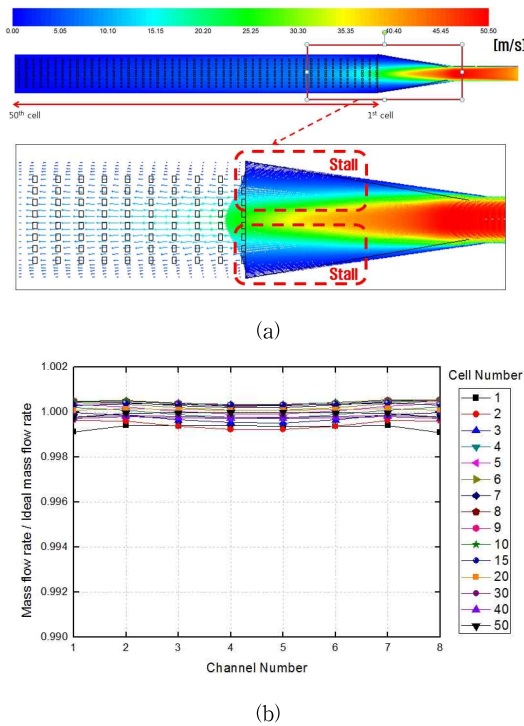


Fig. 9 (a) Velocity distribution in the cross-section of the manifold for optimized case. (b) Deviation of the mass flow rate of each cell for optimized case : the mass flow rate flowing into each channel is normalized by the average value as calculated in Eq. (8)

Fig. 7은 Case 3과 Case 4 매니폴드에서 각 셀 및 채널로 분배되는 유량 값을 무 차원으로 나타낸 그래프이다. 앞에서 언급된 것처럼, Case 3는 매니폴드 내부에 실속이 거의 발생되지 않아 유동이 빨리 발달되며 이로 인해 각 셀로 유입되

Table 3 Manifold geometry parameters for simulation cases

Case	Design parameter			Independent variable
	Type of Manifold entrance geometry	Manifold extra width	manifold length	
Optimum	Diffuser	2.5 mm	20 mm	14 mm
Total length of channel and rib : 14.35 mm				
Manifold inlet area : 45.36 mm ²				

는 유량의 편차가 Case 4 (Fig. 7(b))와 Case 2(Fig. 5(b))에 비해 적음을 알 수 있다. 하지만 매니폴드 유동이 발달된 이후 채널들 간의 유량편차는 Case 3가 가장 커, 각 셀의 중간 채널들 (채널번호 4,5) 보다 양 외각채널들 (채널번호, 1,2,7,8)에 더 많은 유량이 유입된다. 이는 Case 3의 매니폴드 벽면과 채널 사이의 폭이 없어 매니폴드 벽면근처에서 속도가 급격히 감소하기 때문이다.

3.3. 최적화 매니폴드 형상 디자인 및 결론 도출

Fig. 4을 통해 case 1과 case 2의 결과를 비교하면 매니폴드 입구 형상과 관계없이 실속은 두 형상에서 동일하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, Fig. 5에서 관측된 결과를 살펴보면 셀 간 유량의 편차는 디퓨저 형상이 비교적 적다는 것을 확인할 수 있다. 위의 결과를 토대로 사각 단면으로 확장되는 매니폴드 형상보다 디퓨저 형상의 매니폴드 형상이 스택에서의 매니폴드 형상으로 더 적합하다고 할 수 있다. 또한, Fig. 5(b)와 Fig. 7을 통해 도출된 결과를 분석하면 튜브관의 폭과 매니폴드 입구의 길이의 비가 실속이 발생되지 않는 원추 각 이하로 설계가 가능하다면 매니폴드에서 각 셀로의 균일한 유량 분배 특성을 지니는 매니폴드 형상을 설계할 수 있다.

Table 3은 이러한 결과들을 바탕으로 제시된 최적화 매니폴드의 형상에 대한 제원 값을 나타낸 표이고, Fig. 8은 최적화 매니폴드의 기하학적 형상을 나타낸 그림이다. 연료전지 스택의 셀 간 유량의 편차를 줄이기 위하여 매니폴드 입구 형상은 디퓨저 형상을 선택하였고, 매니폴드 폭은 Fig. 5(b)와 Fig. 7을 통해 분석한 결과를 토대로 매니폴드 벽면의 폭을 2.5 mm로 정하였다. 그리고 유동의 실속이 일어나는 영역을 피하고 디퓨저의 원추각을 임계각(=18°)이하로 줄이기 위해 매니폴드 입구의 길이는 20mm에서 40 mm로 증가시켰다.

Fig. 9는 Fig. 8의 형상을 기반으로 매니폴드 단면에서의 속도 분포와 질량 유량의 비율을 나타낸 그림이다. Fig. 9(a)에서 보듯이 스택의 셀 영역에서는 유동의 실속으로 인한 유동 박리(separation) 현상이 관측되지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 9(b)에서 보듯이 매니폴드에서 스택 셀들로 유입되는 질량유량의 무 차원 값의 편차가 매우 적고 각 셀에서의 채널로의 유량의 편차 또한 거의 일정한 것을 확인할 수 있다.

Table 4 Mass flow rate variation between channels in the simulation cases

Case	Standard deviation(D)
1	0.002184
2	0.001644
3	0.000749
4	0.002383
Optimum	0.000276

Table 4는 4개의 case들과 본 연구에서 제시한 최적화한 형상의 모든 채널들(50cells × 8channels = 400channels)에 유입되는 질량유량 값의 표준편차를 나타낸 표이고 표준편차는 식 (9)와 같이 계산될 수 있다.

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_{chan}} (m_{ratio,k} - m_{ratio,avg})^2}{N_{chan}}} \quad (9)$$

Table 4에 나타나 있는 것처럼 최적화 형상의 채널로 유입되는 가스의 유량 편차는 0.000276으로 가장 작은 값을 나타내므로, 본 연구에서 제시한 최적화 형상이 다른 4개의 case들에 비해 전체 채널들 간 유량분배가 가장 균등함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 제안된 매니폴드 형상에서의 유동 특성 및 각 셀에 분배되는 유량 분배 특성을 확인하였다. 또한, 제시된 매니폴드 형상들의 유량 분배 특성을 확인하기 위하여 약 550만개의 육면체 형상의 격자가 본 형상에 적용되었으며 시뮬레이션의 수행 시간을 단축하기 위하여 8개의 PC 클러스터에 나누어 병렬계산이 수행되었다. 본 연구를 통해 스택의 성능을 향상시키기 위해서 매니폴드내의 불안정한 유동 흐름 및 각 셀에 분배되는 유량의 불균일성을 해결할 수 있는 최적의 매니폴드 형상을 제시하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 매니폴드 입구의 형상은 사각 단면으로 확장되는 형상이나 디퓨저 형상과 관계없이 유동의 실속이 발생하는 것을 알 수 있으며, 튜브의 폭과 매니폴드 입구 면적의 차이가 클수록 실속이 발생하는 영역이 넓어진다는 것을 해석 결과를 통해 알 수 있다. 하지만, 사각 단면으로 확장되는 형상은 매니폴드 폭에 상관없이 실속이 발생하지만 디퓨저 형상에서는 원추 각의 크기에 따라 유량 분배 특성이 차이가 발생한다. 따라서 디퓨저 형상의 매니폴드에서 원추각의 크기가 유량 분배 특성을 결정하는 주요 인자임을 확인할 수 있다.

(2) 매니폴드 벽면과 채널 사이의 폭의 길이 변화에 따른 유량 분배 특성은 매니폴드 폭의 길이가 너무 커지거나 없으면 각 셀의 채널 간 유량 편차가 크다는 것을 알 수 있다. 매니폴드 벽면과 채널 사이에 폭이 없으면 실속으로 인한 수도 손실은 없으나 각 셀에서 최외각 채널이 상대적으로 많은 유량이 유입되어 채널 간 유량 편차가 발생한다. 반대로 매니폴드 폭이 커지게 되면 유동의 실속이 더 확장되어 각 셀 및 채널 간 유량 편차가 증가하게 된다.

(3) 균일한 유량이 스택을 구성하는 각 셀에 공급되기 위해서는 매니폴드 입구의 길이와 튜브의 폭의 비율에 따른 원

추 각의 설계가 가장 중요한 인자임을 확인할 수 있고, 이것은 스택 설계에 있어서 유동의 입구 영역을 차지하는 엔드판(end plate)의 입구 형상 설계에도 고려되어야 하는 중요한 자임을 말해준다.

후 기

본 연구는 대경광역권 선도사업 육성사업(과제번호: R-0001192)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Nguyen, T.V., 1993, "A Water and Heat Management Model for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells," *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 140, pp. 2178~2186.
- (2) Wang, Y. and Wang, C. Y., 2006, "A Nonisothermal, Two-Phase for Polymer Electrolyte Fuel Cells," *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 153, pp. A1193~A1200.
- (3) Ju, H., Wang, C. Y., 2004, "Experimental Validation of a PEM Fuel Cell Model by Current Distribution Data," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 151, pp. A1954~A1960.
- (4) Ju, H., Wang, C. Y., 2004, "Experimental Validation of a PEM Fuel Cell Model by Current Distribution Data," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 151, pp. A1594~A1960.
- (5) Ju, H., Meng, H., Wang, C. Y., 2005, "A Single-Phase, Non-Isothermal Model for PEM Fuel Cells," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1303~1315.
- (6) Ju, H., Wang, C. Y., Cleghorn, S., Beuscher, U., 2005, "Nonisothermal Modeling of Polymer Electrolyte Fuel Cells. (I) Experimental Validation," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 152, pp. A1645~A1653.
- (7) Ju, H., Wang, C. Y., Cleghorn, S., Beuscher, U., 2006, "Nonisothermal Modeling of Polymer Electrolyte Fuel Cells. (II) Parametric Study of Low-Humidity Operation," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 153, pp. A249~A254.
- (8) Ju, H., Luo, G., Wang, C. Y., 2007, "Probing Liquid Water Saturation in Diffusion Media of Polymer Electrolyte Fuel Cells," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 154, pp. B218~B228.
- (9) Nam, J., Chippar, P., Kim, W., Ju, H., 2010, "Numerical Analysis of Gas Crossover Effects in Polymer Electrolyte Fuel Cells(PEFCs)," *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 3699~3709.
- (10) Kang, K., Ju, H., 2009, "Numerical modeling and analysis of micro-porous layer effects in polymer electrolyte

- fuel cells,” *Journal of Power Sources*, Vol. 194, pp. 763~773.
- (11) Kim, S. Y., Kim, W. N., 2007, “Effect of Cathode Inlet Manifold Configuration on Performance of 10-Cell Proton-Exchange Membrane Fuel Cell,” *Journal of Power Sources*, Vol. 166, pp. 430~434.
- (12) Koh, J. H., Seo, H. K., Lee, C. G., Yoo, Y. S., Lim, H. C., 2003, “Pressure and Flow Distribution in Internal Gas Manifolds of a Fuel-Cell Stack,” *Journal of Power Sources*, Vol. 115, pp. 54~65.
- (13) Chen, C. H., Jung, S. P., Yen, S. C., 2007, “Flow Distribution in the Manifold of PEM Fuel Cell Stack,” *Journal of Power Sources*, Vol. 173, pp. 249~263.
- (14) ANSYS Inc., 2006, “Fluent 6.3 User’s Guide,” USA.
- (15) Agarwal, N. K., 1994, “The Sound Field in Fully Developed Turbulent Pipe Flow due to Internal Flow Separation, Part 1: Wall-Pressure Fluctuations,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 169, pp. 89~109.
- (16) Runstadler, P. W., Dolan, F. X., Dean, R. C., 1975, “Diffuser Data Book,” Creare Inc. Tech. note 186, Hanover, NH.