

병렬 사형유로를 채택한 냉각판을 통한 고분자 전해질 연료전지의 균일 냉각에 대한 전산유체역학 해석 연구

류승호* · 백승만* · 남진현**† · 김찬중*

* 서울대학교 기계항공공학부, ** 대구대학교 자동차·산업·기계공학부

Computational Fluid Dynamics Study on Uniform Cooling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells by Parallel Multi-pass Serpentine Flow Fields

Seung Ho Yu *, Seung Man Baek *, Jin Hyun Nam **†, and Charn-Jung Kim *

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.,

** School of Automotive, Industrial, and Mechanical Engineering, Daegu Univ.

(Received October 5, 2009 ; Revised August 24, 2010 ; Accepted September 6, 2010)

Key Words: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell(고분자 전해질 연료전지), Cooling Plate(냉각판), Coolant Flow Channel(냉각수 유로), Parallel Multi-Pass Serpentine Flow Fields(개선된 병렬 사형유로), Temperature Uniformity(온도 균일도)

초록: 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)의 열관리는 성능 향상과 내구성 측면에서 중요한 문제이다. 일반적으로 냉각수 순환 유로를 가진 냉각판이 여러 개의 단전지 사이에 삽입되어 PEMFC 내부에서 발생하는 반응열을 외부로 배출한다. 본 연구에서는 개선된 병렬 사형유로(MPSFF)를 향상된 냉각성능을 가진 냉각판 유로형상으로 제안하고, 이를 전산유체역학(CFD) 해석을 통하여 평가하였다. 비교를 위하여 냉각수 유로로 일반적으로 사용되는 사형유로 및 병렬형유로의 냉각성능에 대한 계산도 수행하였다. CFD 결과는 개선된 병렬 사형유로가 냉각판 표면에서의 온도의 비균일도를 상당히 감소시키고, 따라서 PEMFC의 내구성과 성능을 향상시킬 수 있음을 보여주었다.

Abstract: Thermal management is important for enhancing the performance and durability of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) and is taken into account in the design of PEMFCs. In general, cooling pates with circulating liquid coolant (water) are inserted between several unit cells to exhaust the reaction heat from PEMFCs. In this study, computational fluid dynamics (CFD) simulations were performed to characterize the uniform cooling performance of parallel multipass serpentine flow fields (MPSFFs) that were used as coolant flow channels in PEMFCs. The cooling performances of conventional serpentine and parallel flow fields were also evaluated for the purpose of comparison. The CFD results showed that the use of parallel MPSFFs can help reduce the temperature nonuniformity, and thus, can favorably enhance the performance and durability of PEMFCs.

- 기호설명 -

1. 서론

q : 열 유속, W/m^2
 Q : 부피 유량, m^3/s
 T_{max} : 최대 온도, $^{\circ}C$
 T_{avg} : 평균 온도, $^{\circ}C$
 U_T : 온도 균일도 지표, $^{\circ}C$
 ΔP : 압력 강하, Pa
 Δh_f° : 물의 생성엔탈피, kJ/mol
 F : Faraday 상수, 96487 C/mol

전세계적으로 신재생 에너지원에 대한 관심과 연구가 자원고갈과 기후변화 문제의 해결을 위하여 급속히 증가하고 있다. 고효율, 친환경적인 특성을 가진 수소 연료전지는 기존의 화석연료 기반의 열기관을 대체할 수 있는 에너지 변환장치로서 각광을 받고 있다. 특히 고분자 전해질 연료전지 (polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 낮은 작동온도와 높은 전류밀도, 빠른 시동 등의 장점으로 인해 자동차용, 휴대용, 가정용 동력원으로

† Corresponding Author, jhnam@daegu.ac.kr
 © 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

서의 적용이 활발히 연구되고 있다.⁽¹⁾

고분자 전해질 연료전지의 운전 중에 전기화학 반응의 부산물로서 필연적으로 발생하는 열과 물은 시스템으로부터 적절하게 배출되어야 한다. 최근에 들어 고분자 전해질 연료전지의 열관리(thermal management) 및 물관리(water management) 문제는 성능 및 내구성 향상을 위한 중요한 설계 이슈가 되고 있다. 적절한 열 관리가 제공되지 않는 경우, 고분자 전해질 연료전지는 과열 또는 온도분포의 불균일에 의한 성능저하를 겪게 된다. 과열은 전극전해막(membrane electrode assembly, MEA) 내의 수분을 건조시켜 저항손실을 증가시키며, 국부적인 온도편차는 전류생산의 불균일을 발생시켜 내구성에 부정적인 영향을 미친다.⁽²⁾

고분자 전해질 연료전지의 열 관리는 단위전지 사이에 주기적으로 설치된 냉각판(cooling plate)을 통해 냉각매체(coolant)를 순환시켜 수행된다. 냉각매체로는 주로 물이 사용되며 냉매를 위한 유로형상으로는 사형(serpentine), 병렬형(parallel), 또는 사형과 병렬형이 혼합된 형태가 사용된다. 유로형상에 따른 냉각판의 성능에 대한 수치 연구에서, 사형유로가 병렬형유로보다 온도 균일도와 최대온도의 측면에서 더 나은 성능을 보이며 또한 사형유로의 형상을 변화시킴으로써 더 향상된 냉각성능을 얻을 수 있음이 연구되었다.^(3,4) 또한 Xu 와 Zhao⁽⁵⁾는 직접 메탄올 연료전지(direct methanol fuel cell, DMFC)의 공기공급을 위한 유로형상으로 양극판(bipolar plate) 리브 아래의 공간을 통한 대류(under-rib convection)를 향상시키는 새로운 사형유로(convection enhanced serpentine flow field, CESFF)를 제안하였다.

최근에 Nam 등⁽⁶⁾은 이상의 유로형상에 대한 연구⁽³⁻⁵⁾를 종합하여 고분자 전해질 연료전지의 성능을 향상시킬 수 있는 개선된 사형유로(multi-pass serpentine flow field, MPSFF)의 설계를 제안하였다. 또한 Nam 등⁽⁶⁾은 개선된 사형유로가 냉각판의 냉매 순환 유로에 적용되어 연료전지 내부의 온도 균일도 향상에도 기여할 것임을 예측하였다. 실제로 Yu 등⁽⁷⁾은 최근에 전산유체역학(CFD)을 이용한 해석연구를 통해 개선된 단일 사형유로(single MPSFF)가 작은 반응면적을 가진 냉각판에서 과열 및 온도분포의 불균일을 감소시킴을 수치적으로 보였다.

본 연구에서는 개선된 병렬 사형유로(parallel MPSFF)를 비교적 큰 반응면적을 가진 냉각판에 적용하여 냉각성능을 수치적으로 평가하였다. CFD

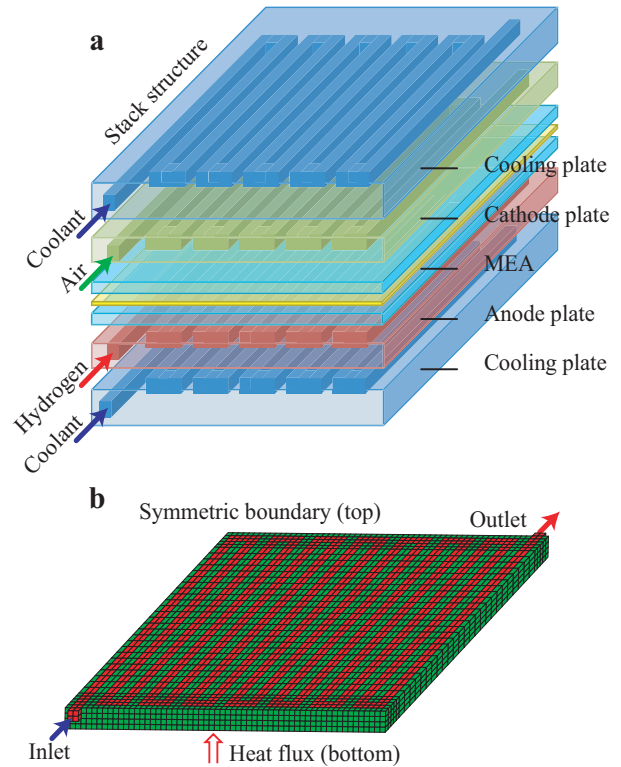


Fig. 1 The structure of PEMFCs: (a) stack structure, and (b) cooling plate

를 활용하여 일정한 표면 열유속이 가해지는 경우 냉각판 내의 온도분포를 해석하였다. 해석으로 얻어진 온도 균일도 지표를 기존의 사형 및 병렬형 유로가 적용된 경우와 비교하여 개선된 병렬 사형 유로의 냉각성능을 평가하였다.

2. 해석 모델

2.1 연료전지 구조

고분자 전해질 연료전지는 Fig. 1(a)과 같이 전류 생산을 위한 기초 단위인 단전지(single cell)가 수십 또는 수백 개 적층된 스택구조를 통해 요구되는 출력을 얻는다. 단전지는 기체확산층 포함하여, 수소 및 공기의 공급, 전류의 수집을 담당하는 양극판, 실제 전기화학 반응이 일어나는 전극전해막으로 구성된다. 냉각판은 여러 개의 단전지 사이에 설치되어 고분자 전해질 연료전지 내에서 발생하는 열을 흡수, 배출하는 역할을 수행한다.

전극전해막에서 발생된 열은 양극판을 통해 냉각판으로 전달되며, 이때 냉각판의 표면에서의 평균 열유속 q 는 다음과 같이 연료전지의 출력전류 I 및 전압 V 의 함수로 표현된다.^(4,5)

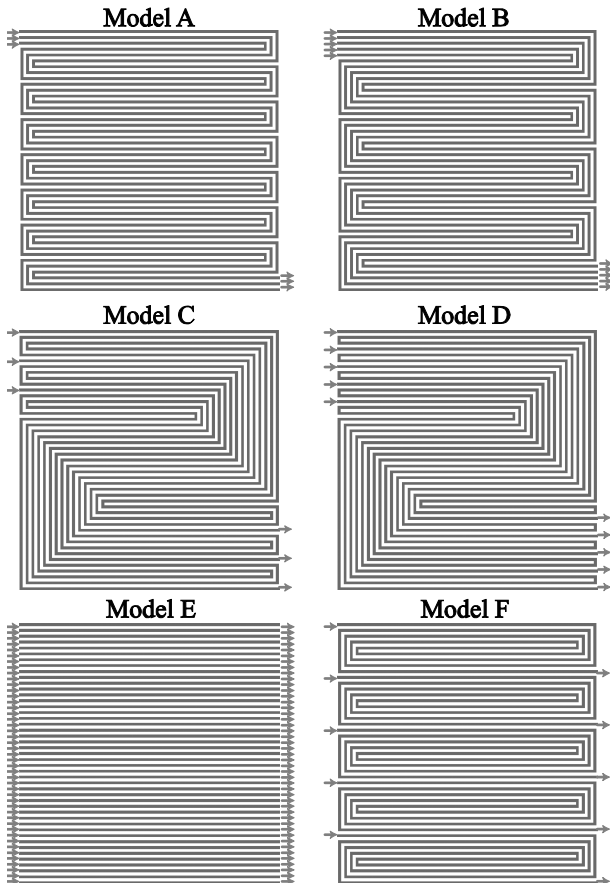


Fig. 2 Six flow field designs considered as a coolant channel in cooling plates.

$$q = \frac{nI(-\Delta h_f^\circ / 2F - V)}{A} \quad (1)$$

여기서 A 는 반응면적, Δh_f° 는 물의 생성엔탈피 (저위발열량 -241.8 kJ/mol 또는 고위발열량 -285.8 kJ/mol), F 는 Faraday 상수(96,487 C/mol)이고, n 은 냉각관 하나 당 단위 셀의 개수이다. CFD 해석에 사용된 냉각관 반영역(half domain)의 격자구조가 Fig. 1(b)에 나타내어져 있다.

2.2 냉각관 유로 형상

본 연구에서 냉각관의 냉각수 유로로서 고려한 6가지 유로형상 모델이 Fig. 2에 나타내어져 있다. 모델 A와 B는 각각 유로의 개수가 3개와 5개인 기본적인 병렬 사형유로이다. 또한 모델 C와 D는 3개, 5개의 유로를 가진 개선된 병렬 사형유로이며, 모델 E는 다수의 유로를 갖는 기본적인 병렬형 유로이다. 마지막으로 모델 F는 유로가 5개인 병렬 나선형유로이다. 각각의 모델에 대한 냉각성능의 비교를 통하여 유로 개수 및 유로 형상에 따른

Table 1 Geometrical parameters and material properties for cooling plates considered in this study

Parameters	Values
Geometries of cooling plate	
Dimension	$90 \times 90 \times 2$ mm ³
Channel and rib width	1 mm
Channel height	1 mm
Properties of cooling plate (graphite)	
Density	2250 kg/m ³
Specific heat	690 J/kg-K
Thermal conductivity	24.0 W/m-K
Properties of coolant fluid (water at 40°C)	
Density	992.2 kg/m ³
Specific heat	4179 J/kg-K
Thermal conductivity	0.62 W/m-K
Viscosity	0.000653 Pa-s

냉각성능의 차이를 연구하였다.

본 연구에서 고려한 냉각관의 두께는 2 mm로, 반응면적은 90 mm × 90 mm로 비교적 크게 설정되었다. 냉각관의 중심부에는 1 mm × 1 mm의 정사각형 유로가 존재하여 이를 통하여 냉각수가 순환하는 것으로 가정되었다. 냉각관의 치수, 냉각수와 냉각관의 물성치는 Table 1에서 정리하였다.

2.3 지배방정식 및 해석방법

비압축성 뉴턴 유체에 대한 질량, 운동량, 에너지 보존의 지배방정식은 층류 유동의 경우 다음과 같이 표현된다.

- 질량 보존식:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

- 운동량 보존식:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

- 에너지 보존식:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

위에서 ρ 는 유체의 밀도, μ 는 점도, c_p 는 비열을 의미한다. 본 연구에서는 정상상태만을 고려

Table 2 Operation conditions for cooling plates considered in this study

Parameters	Values
Heat flux	5000 W/m ²
Inlet fluid temperature	40°C
Volumetric flow rate	2, 3, 4 × 10 ⁻⁶ m ³ /s
Reynolds number	1013, 1519, 2026

하므로 $\partial(\cdot)/\partial t$ 항은 해석에 사용되지 않는다. 고체영역인 냉각판에서 열전달 해석에는 식 (2)와 (3)은 필요치 않으며, 또한 식 (4)에서도 대류항을 무시하여 전도만을 해석하게 된다.

이상의 지배방정식은 유한체적법에 기초한 상용 CFD 코드(STRA-CD, CD-Adapco)를 사용하여 해석되었다. 유동장 및 압력장의 커플링은 SIMPLE 알고리즘을 이용하여 처리하였다. 운동량 보존식의 잔차(residual)는 10⁻⁴ 보다, 에너지 보존식의 경우 10⁻⁹ 보다 낮아질 때까지 반복계산을 수행하여 수렴된 해를 얻었다.

2.4 격자 생성 및 계산 조건

본 연구에서 고려한 냉각판은 상하 대칭구조이므로 Fig. 1(b)에서처럼 대칭 경계조건을 사용한 반영역으로 모델을 구성하였다. 해석을 위한 격자는 냉각판의 고체 영역과 냉각수의 유로의 유체 영역으로 구분하여 생성되었다. 냉각판과 냉각수의 유로는 모두 정렬격자(structured grid)로 구성하였으며, 특히 유로의 코너부분에서는 격자를 더 조밀하게 구성하였다.

본격적인 해석에 앞서 해석결과의 격자의존성 여부를 검토하기 위하여 계산영역을 구성하는 체적 셀의 수를 변화시키며 냉각판 내부의 최대온도와 유로를 통한 냉각수의 압력강하를 살펴보았다. 그 결과 약 40만개 이상의 체적셀로 격자가 구성되면 충분히 수렴된 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 유체 영역인 1 mm × 0.5 mm인 반 채널(half-channel) 단면적에는 5개 × 5개의 격자를 모든 모델에 대해 공통적으로 배치하였다. 따라서 본 연구에서는 각 모델에 대하여 약 40만개 이상의 체적셀로 구성된 격자를 생성하여 계산을 수행하였다.

이렇게 생성된 격자를 가지고, 이론값이 존재하는 모델 E의 직선 유로를 따른 Nu 수의 발달 과정을 우선 검토하였다. 온도발달 입구영역의 길이는 대략 1.5 cm 정도로 계산되어 이론적인 값인

$L_{e,t} = 0.05 \text{RePr}D_h = 1.45 \text{ cm}$ 와 잘 일치하였다. 또한, 완전발달 영역에서의 Nu 수도 3.41 정도로 계산되어 일정열유속 조건에서의 이론값인 3.61과 비교적 잘 일치하였다. 계산된 Nu 수와 이론값과의 차이는 냉각판 유로 표면에서의 조건이 일정열유속 조건과는 다소 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다.

고분자 전해질 연료전지의 실제 운전시에 냉각판으로 유입되는 열유속의 분포는 전극전해막에서의 전기화학 반응이 불균일성 때문에 완전히 균일하지는 않다. 일반적으로 저전류밀도 운전영역에서는 양극판 리브(rib) 하부에서의 전류생산이 채널 하부보다 상대적으로 더 크고 따라서 발열량도 더 크다. 반대로 고전류밀도 운전영역에서는 채널 하부에서의 전류 생산 및 발열량이 더 크게 나타난다. 한편, 반응 기체가 완전 가습된 경우에는 유로 입구 근처의 전류 생산량이 상대적으로 크고, 반면에 부분 가습조건 하에서는 유로 중간부에서의 전류 생산량이 더 커진다. 이러한 이유로 고분자 전해질 연료전지의 전체 반응면적에 대한 전류밀도의 분포는 크게는 20~50% 이상의 편차를 나타내기도 한다.^(8,9)

게다가 냉각판이 여러 개의 단위 셀 사이에 삽입되어 냉각을 수행하는 경우, 전극전해막, 양극판과 같은 다양한 내부 구조물을 통한 열전달이 냉각판 표면에서의 열유속 분포에 영향을 미친다. 따라서, 고분자 전해질 연료전지의 전극전해막과 양극판을 포함한 단전지 영역까지 계산영역에 포함하는 것은 계산시간의 측면에서 적절치 않다. 본 연구에서는 고분자 전해질 연료전지 운전에서 일반적인 값인 $q = 5000 \text{ W/m}^2$ 의 균일한 열유속 조건을 냉각판 표면에 설정하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 냉각판의 운전 및 경계조건은 Table 2에 제시되어 있다. 연료전지의 냉각판 내부의 채널 유동은 과도한 압력 손실을 피하기 위하여 저 레이놀즈 영역에 맞게 설정되는 것이 일반적이다.⁽³⁾ 따라서 본 연구에서는 냉각판 내부 유동을 층류 영역으로 제한하여, 입구에서의 유량을 2×10⁻⁶, 3×10⁻⁶, 4×10⁻⁶ m³/s와 같이 세 경우를 고려하였다. 또한 냉각수의 입구온도는 40°C로 설정되었다.

3. 결과 및 토의

고분자 전해질 연료전지에서 냉각판의 역할은 전기화학 반응의 부산물로 생성된 열을 배출하여

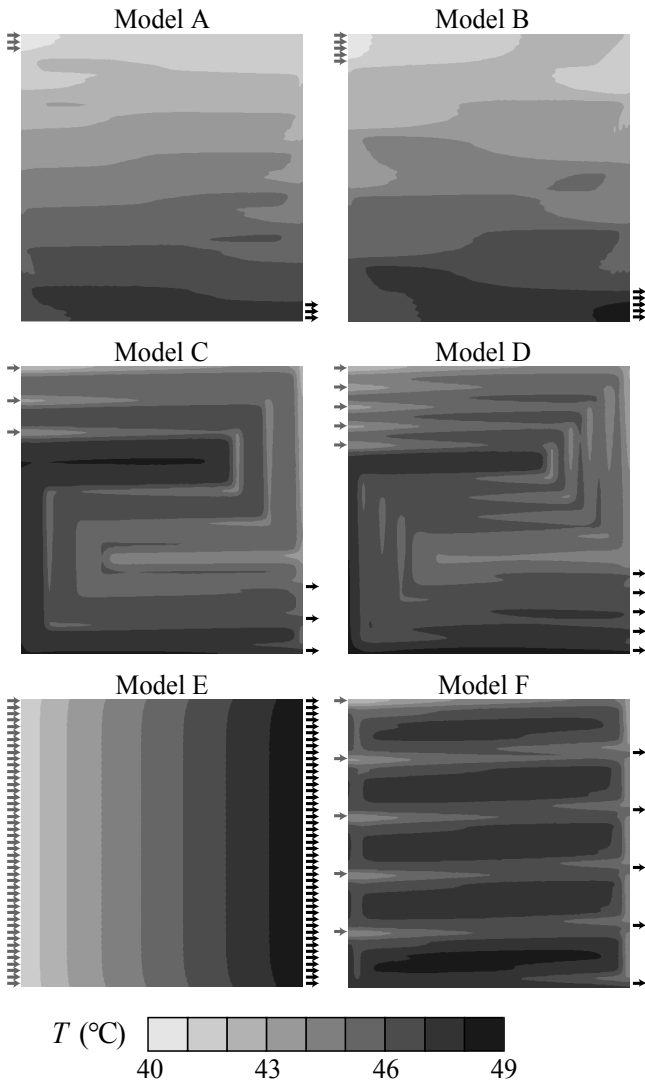


Fig. 3 Surface temperature distribution in cooling plates obtained with $Q=3\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

연료전지의 과열을 방지하고 동시에 균일한 온도 분포를 유지하는 것이다. 따라서 서로 다른 냉각관의 냉각성능은 동일한 작동조건(일정 냉각수 유량 및 표면 열유속)에서 얻어지는 온도분포의 균일도를 통해 비교, 평가될 수 있다.

냉각수 유량 Q 가 $3\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 고정된 경우, 각 유로형상을 채택한 냉각관 표면에서의 온도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 기본적인 병렬 사형유로(모델 A, B)나 병렬형유로(모델 E)를 채택한 경우에 비해 개선된 병렬 사형유로(모델 C, D)를 채택한 냉각관의 경우, 온도분포가 더 균일해짐을 확인할 수 있다. 병렬 나선형유로인 모델 F를 채택한 냉각관의 경우에도 개선된 병렬 사형유로(모델 C, D)를 채택한 경우와 비슷하게 비교적 균일한 표면온도 분포를 나타내는 것으로 확인된다.

Table 3 Summary of cooling performances obtained for $Q=3\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

Models	T_{\max} (°C)	ΔT (°C)	U_T (°C)
A	47.9	7.18	1.622
B	48.1	7.31	1.620
C	48.1	5.93	0.820
D	48.4	6.35	0.758
E	48.6	7.52	1.768
F	48.3	5.99	0.738

냉각관 표면에서의 온도분포의 균일도를 정량적으로 평가하기 위하여 다음과 같은 온도 균일도 지표 U_T 를 정의하여 비교하였다.^(3,4,7)

$$U_T = \frac{\int_V |T - T_{\text{avg}}| dV}{\int_V dV}, \text{ and } T_{\text{avg}} = \frac{\int_V T dV}{\int_V dV} \quad (5)$$

위의 식 (5)에서 V 는 열전달 표면과 접한 체적셀의 부피를, T_{avg} 는 그러한 체적셀의 평균온도를 의미한다. 식 (5)의 정의에서 알 수 있듯이 온도분포의 균일도 지표 U_T 는 냉각관의 표면온도가 그 평균에 비해 얼마나 편차를 가지는지를 평가하며, 이 값이 작을수록 고른 분포임을 의미한다.

Fig. 3의 냉각관 표면온도의 분포에 대응하는 정량적인 결과를 Table 3에 정리하였다. 냉각관 표면의 최대온도 T_{\max} 가 유로형상에 대해 큰 차이를 보이지 않음을 Table 3에서 확인할 수 있다. 이것은 유로의 형태와 무관하게 출구에서의 냉각수 온도가 에너지 보존에 의해 결정되며, 따라서 냉각수 출구온도에 직접적으로 영향을 받는 T_{\max} 는 유로형상과 관계없이 비슷해지기 때문이다. 냉각관 유로형상으로 개선된 병렬 사형유로(모델 C, D) 및 나선형유로(모델 F)를 채택한 경우의 균일도 지표는 $0.73\sim 0.82^\circ\text{C}$ 정도로, 이는 기본적인 병렬 사형유로(모델 A, B)를 채택한 경우의 $1.62\sim 1.63^\circ\text{C}$ 에 비해 약 1/2 정도로 작은 수준이다. 또한 표면온도의 범위인 ΔT ($\equiv T_{\max} - T_{\min}$)도 모델 C, D, F가 모델 A, B에 비해 대략 1°C 정도 낮은 것으로 평가되었다. Table 3의 정량적인 결과를 정리하면 개선된 병렬 사형유로인 모델 D나 병렬 나선형 유로인 모델 F가 가장 좋은 냉각성능을 나타내며, 반면에 병렬형유로인 모델 E가 가장 나쁜 냉각성능을 나타냄을 확인할 수 있다.

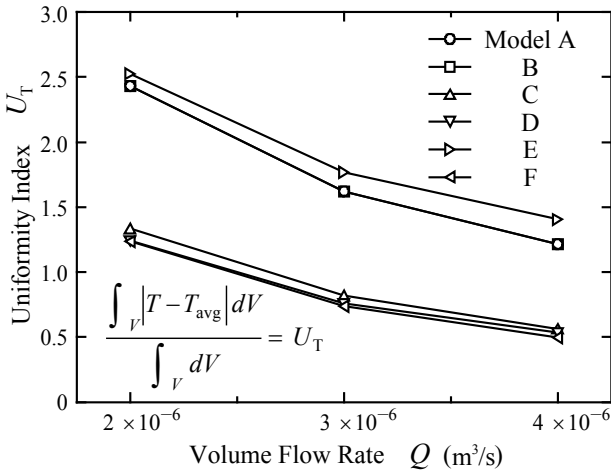


Fig. 4 The effect of the coolant flow rate, Q , on the temperature uniformity index, U_T

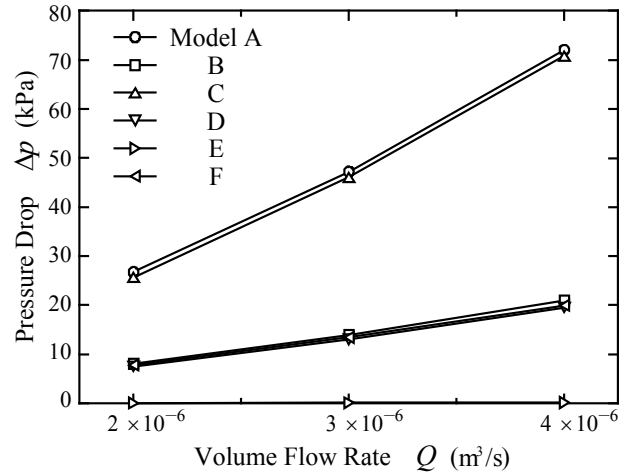


Fig. 6 The effect of the coolant flow rate, Q , on the pressure drop, ΔP , across a cooling plate

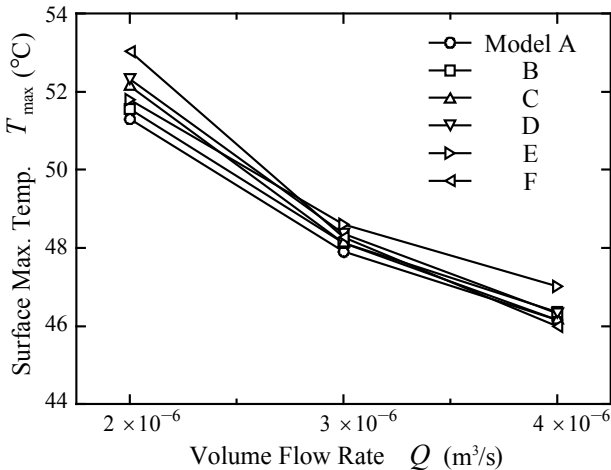


Fig. 5 The effect of the coolant flow rate, Q , on the maximum surface temperature, T_{max}

Fig. 4는 냉각판 유로를 따라 흐르는 냉각수 유량에 따른 균일지표 U_T 의 변화를 보여주고 있다. 쉽게 예측할 수 있듯이 냉각수 유량이 증가함에 따라, 이에 반비례하여 냉각수 온도상승은 억제되고 표면온도의 균일도는 향상된다. 실제로 Fig. 4에서 냉각수 유량 Q 가 $2 \times 10^{-6} m^3/s$ 에서 $4 \times 10^{-6} m^3/s$ 로 2배 증가될 때, 모든 유로형상에 대해 균일지표 U_T 는 약 50% 정도 감소되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4에서 냉각수 유량 $Q = 2 \times 10^{-6} m^3/s$ 에서 모델 C, D, F의 U_T 값이 대략 1.25°C로, $Q = 4 \times 10^{-6} m^3/s$ 에 대한 모델 A, B, E의 U_T 값과 거의 같게 나타났다. 따라서 적은 냉각수 유량이 사용되는 경우에도 개선된 병렬 사형유로(모델 C, D)나 나선형유로(모델 F)를 사용하면 향상된 냉각 효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 냉각판 표면(열유속 경계)에서의 냉각수 유량에 따른 최대온도 T_{max} 의 CFD 해석결과를 보여주고 있다. 냉각판 유로 입구에서의 냉각수 온도는 $40^\circ C$ 로 설정되었음을 상기하라. 이러한 T_{max} 는 고분자 전해질 연료전지의 국소적 과열과 관련된다. Fig. 4의 결과와 마찬가지로 유로형상에 관계없이 냉각수 유량 Q 가 증가할수록 냉각판 표면에서의 최대온도 T_{max} 는 감소하게 된다. 이러한 현상은 기본적으로 냉각판을 통한 냉각수의 온도상승($T_{w,rise} \equiv T_{w,out} - T_{w,in}$)이 냉각수 유량에 반비례하기 때문이다. 냉각판에서의 정상상태 에너지 보존을 고려하면 Q 가 $2 \times 10^{-6} m^3/s$ 에서 $4 \times 10^{-6} m^3/s$ 로 2배 증가될 때 냉각수의 온도상승은 약 $9.8^\circ C$ 에서 약 $4.9^\circ C$ 로 반으로 감소할 것으로 계산된다. 이에 따라서 냉각판 표면의 최대온도도 감소하게 되며, 실제로 $Q = 2 \times 10^{-6} m^3/s$ 의 경우 $52^\circ C$ 정도에서 $Q = 4 \times 10^{-6} m^3/s$ 의 경우 $46^\circ C$ 정도로 상당히 감소됨을 Fig. 5에서 확인할 수 있다. Fig. 5는 또한 냉각판 표면의 최대온도가 유로형상에 관계없이 비슷한 온도로 결정됨을 보여주고 있다.

냉각판을 통한 압력강하는 냉각수 유량과 함께 순환펌프의 소요동력과 연관되어 연료전지 시스템 설계에서 중요한 인자로 작용한다. CFD 해석으로 얻어진 냉각수 유량에 따른 냉각판의 압력강하를 Fig. 6에 제시하였다. 모델 E의 기본적인 병렬형유로의 경우 개별 유로의 길이가 짧고 또한 개별 유로를 통한 유량의 분산효과로 매우 낮은 압력강하를 필요로 하는 것을 확인할 수 있다. 동일한 이 유로 병렬 사형유로의 경우에도 유로의 개수에 비례하여 압력강하가 낮아짐을 확인할 수 있다. 따

라서 유로의 개수가 3개로 동일한 모델 A와 C 사이에, 그리고 개수가 5개인 B, D, F 사이에는 거의 비슷한 압력강하 거동을 확인할 수 있다.

4. 결 론

다양한 유로형상을 가지는 9 cm × 9 cm 크기의 고분자 전해질 연료전지용 냉각관에서의 열전달 및 유체유동을 CFD를 활용하여 해석하고, 각각의 유로형상의 냉각성능을 과열 및 온도 균일도의 관점에서 평가하였다. 해석결과로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 고려한 유로형상 중에서 개선된 사형유로인 모델 C, D 및 병렬 나선형유로인 모델 F가 냉각관 표면의 온도분포를 균일하게 유지하는데 가장 효과적이었다. 이러한 향상된 냉각성능은 냉각수 입구와 출구를 여러 번 반복하는 유로형상에서 기인한 것으로 판단된다.

(2) 기본적인 병렬 사형유로인 모델 A, B의 경우, 각각 개선된 병렬 사형유로인 모델 C, D와 압력강하 특성은 비슷하지만 냉각성능은 더 낮은 것으로 평가되었다.

(3) 유로를 통과하는 냉각수의 압력강하는 병렬로 배치된 유로의 개수에 반비례하였다. 특히, 기본적인 병렬형 유로의 경우 매우 작은 압력강하를 요구하였으나 냉각성능은 가장 떨어지는 것으로 나타났다.

(4) 온도 균일도와 압력강하에 따른 펌프 소요 동력의 측면을 모두 종합하면, 유로의 개수가 5개인 개선된 병렬 사형유로 모델 D 또는 병렬 나선형유로 모델 F를 냉각수 유로로 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) O'Hayre, R. P., Cha, S. W., Colella, W. and Prinz, F. B., 2006, *Fuel Cell Fundamentals*, John Wiley & Sons, New York.
- (2) Faghri, A. and Guo., Z., 2005, "Challenges and Opportunities of Thermal Management Issues Related to Fuel Cell Technology and Modeling," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, No. 19-20, pp. 3891~3920.
- (3) Chen, F. C., Gao, Z., Loutfy, R. O. and Hecht., M., 2003, "Analysis of Optimal Heat Transfer in a PEM Fuel Cell Cooling Plate," *Fuel Cells*, Vol. 3, No. 4, pp. 181~188.
- (4) Choi, J., Kim, Y. H., Lee, Y., Lee, K. J. and Kim, Y., 2008, "Numerical Analysis on the Performance of Cooling Plates in a PEFC," *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 22, No. 7, pp. 1417~1425.
- (5) Xu, C. and Zhao, T. S., 2007, "A New Flow Field Design for Polymer Electrolyte-Based Fuel Cells," *Electrochem. Commun.*, Vol. 9, No. 3, pp. 497~503.
- (6) Nam, J. H., Lee, K. J., Sohn, S. and Kim, C. J., 2009, "Multi-Pass Serpentine Flow-Fields to Enhance Under-Rib Convection in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Design and Geometrical Characterization," *J. Power Sources*, Vol. 188, No. 1, pp. 14~23.
- (7) Yu, S. H., Sohn, S., Nam, J. H. and Kim, C. J., 2009, "Numerical Study to Examine the Performance of Multi-Pass Serpentine Flow-Fields for Cooling Plates in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *J. Power Sources*, Vol. 194, No. 2, pp. 697~703.
- (8) Shimpalee, S., Greenway, S. and Van Zee, J., 2006, "The Impact of Channel Path Length on PEMFC Flow-Field Design," *J. Power Sources*, Vol. 160, No. 1, pp. 398~406.
- (9) Jeon, D. H., Greenway, S., Shimpalee, S. and Van Zee, J., 2008, "The Effect of Serpentine Flow-Field Designs on PEM Fuel Cell Performance," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 3, pp. 1052~1066.