

연료전지 냉각판의 냉각 특성에 대한 수치해석적 연구

김 윤 호, 이 용 택, 이 규 정*, 김 용 찬*, 최 종 민***, 고 장 면***

고려대학교 기계공학과 대학원, *고려대학교 기계공학과, **한밭대학교 기계공학과, ***한밭대학교 응용화학생명공학부

Numerical Simulation on Cooling Plates in a Fuel Cell

Yoon-Ho Kim, Yongtaek Lee, Kyu-Jung Lee*,
Yongchan Kim*, Jong Min Choi***, Jang Myoun Ko***

Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

***Division of Applied Chemistry and Biotechnology, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

(Received September 13, 2006; Revision received December 17, 2006)

ABSTRACT: The PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell is one of the promising fuel cell systems as a new small power generating device for automobiles and buildings. The optimal design of cooling plates installed between MEA (membrane electrode assembly) is very important to achieve high performance and reliability of the PEMFC because it is very sensitive to temperature variations. In this study, six types of cooling plate models for the PEMFC including basic serpentine and parallel shapes were designed and their cooling performances were analyzed by using three-dimensional fluid dynamics with commercial software. The model 3 designed by revising the basic serpentine model represented the best cooling performance among them in the aspect of uniformity of temperature distribution and thermal reliability. The serpentine models showed higher pressure drop than the parallel models due to a higher flow rate.

Key words: Fuel cell(연료전지), Cooling plate(냉각판), Flow-field configuration(유로형상), Computational fluid dynamics(전산해석)

기 호 설 명

A : 냉각판 면적 [cm^2]
 I : 전류 [A]
 n : 단위전지 수 [No]
 Q : 열발생량 [W]
 q'' : 열유속 [W/cm^2]

Re : 레이놀즈수, $\rho u D / \mu$
 T : 냉각온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 V : 전압 [V]

하첨자

cell : 스택 내부 전지
 D : 수력직경
OCV : 개회로 전압(open circuit voltage)

† Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1731; fax: +82-42-821-1587

E-mail address: jmchoi@hanbat.ac.kr

1. 서 론

에너지 자원의 고갈과 교토의정서 발효 등에 따라 환경문제의 중요성이 증대되고 있다. 따라서, 고효율의 저공해 전력생산 시스템의 필요성이 증대되고 있다. 연료전지는 수소의 화학에너지를 전기에너지로 전환하기 때문에 친환경적이며 발전효율이 높아 에너지 절감 효과가 매우 크고, 수소, 천연가스, 에탄올, 메탄올 등의 다양한 연료를 이용할 수 있어서 차세대 대체에너지 시스템 중의 하나로 대두되고 있다.

전해질의 종류에 따라 다양한 형태의 연료전지가 있으며, 이중 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell)는 높은 전력밀도와 발전효율을 나타내고, 시동성(quick start) 및 부하변동에 따른 빠른 응답 성능이 우수하여 수송용 및 휴대용 등의 발전시스템으로 활발한 연구 및 상용화 기술개발이 진행되고 있다. 하지만, 고분자 전해질 연료전지는 다른 연료전지에 비하여 온도에 민감하고, 운전온도가 낮아서 과열로 인한 시스템 손상 및 성능 저하가 발생한다는 단점이 있다. 따라서 고분자 연료전지 스택(stack)에서 전기발생률 향상과 전력손실 저하를 위해서 스택 최대온도 조절과 온도 균일성 확보가 중요 현안으로 대두되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

연료전지 스택에서의 가스 반응층 및 가습을 위한 많은 열 및 물질전달에 관한 연구가 수행되었다.^(5,6) 스택의 최적성능을 확보하기 위해서는 최적 운전온도의 안정적인 유지가 요구되며, 이를 위하여 스택 냉각판의 최적설계 및 성능에 관한 연구가 요구된다. Rogg et al.⁽⁷⁾은 차량 구동용 연료전지 냉각시스템의 스택 및 전기구동장치 냉각

을 위한 방열판의 성능과 배열 및 냉각판 설계에 대한 이론적 연구를 수행하였다. Zhang et al.⁽⁸⁾은 고분자 전해질 연료전지 스택 운전시 작동변수인 스택출력, 냉각수유량, 공기유량, 외부온도 등의 영향을 고려하여 lumped thermal mass model 기법을 이용하여 열적 동특성 해석을 수행하고, 실험결과와 비교하여 모델링 기법의 유효성을 제시하였다. Chen et al.⁽⁴⁾은 고분자 전해질 연료전지 스택의 효율적 냉각을 위해 750 W급 연료전지 스택 냉각판에 대한 연구를 수행하고, 스택의 균일 온도분포에 대한 새로운 변수를 도입하였다.

연료전지 스택의 최고온도 제어와 균일온도 분포를 확보하는 것은 스택의 최적운전 및 신뢰성 확보 측면에서 매우 중요하지만 현재까지 이에 대한 연구성과는 매우 미흡하다. 본 연구에서는 3차원 전산해석 기법을 이용하여 연료전지 스택의 냉각기 형상설계 및 성능분석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 연료전지 스택의 열신뢰성 확보를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연료전지 스택 구조 및 냉각판 전산해석 모델

2.1 연료전지 스택 구조

Fig. 1(a)는 연료전지 스택의 일반적인 구조를 나타낸다. 연료전지 스택은 연료공급을 위한 분리판(anode bi-polar plate), 전기화학반응에 의해 전류를 발생시키는 전기발생부로서의 전극/전해질막 접합체(membrane electrode assembly, MEA), 공기공급을 위한 분리판(cathode bi-polar plate), 전기화학반응에 의해 전기와 함께 발생하는 반응

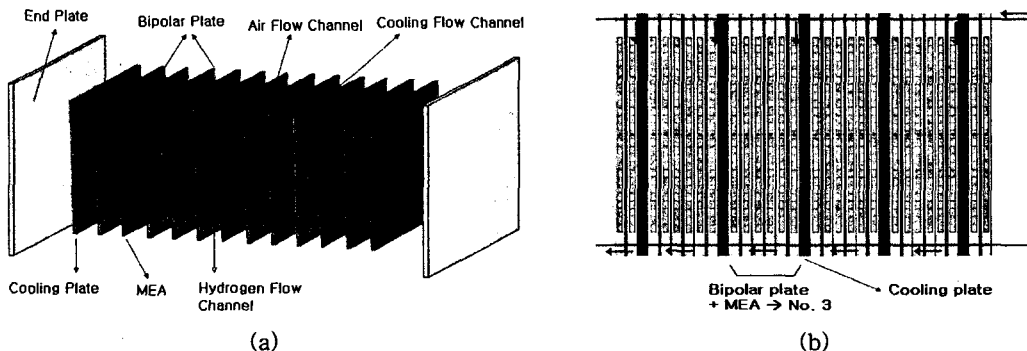


Fig. 1 Schematic of a fuel cell stack.

열을 제어하기 위한 냉각수 공급용 냉각판의 적층된 구조를 갖는다.

연료전지 스택의 전기화학반응에 의해서 생성되는 열발생량은 연료와 공기의 현열증가에 의한 열배출량이 작으므로 무시한다면, 식(1)의 형태로 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$Q_{heating} = nI_{cell}(V_{OCV} - V_{cell}) \quad (1)$$

고분자 전해질 연료전지의 경우 이론적인 개회로 전압은 반응 엔탈피가 전기에너지로 변환시 물이 수증기로 생성될 때를 고려하여 1.25 V로 설정하였고, 스택 내의 단위전지의 전압은 0.6 V로 가정하였다.⁽⁹⁾

스택 내의 냉각판은 기본적으로 단위전지 한 장당 교대로 적층을 시킬 수 있지만 실제 적용 분야에서는 스택의 소형화 및 경량화를 위해 단위전지와 냉각판의 설치를 3:1~5:1의 비율로 설계한다. 본 연구에서는 단위전지와 냉각판을 3:1의 비율로 가정하였고, 스택 내의 냉각판 적층구조는 Fig. 1(b)에 나타내었다.

2.2 냉각판 유로설계

냉각판은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 연료전지 스택 내부의 다수의 MEA 사이에 반복적으로 설치되지만 냉각판을 기준으로 주위 형상 및 운전 조건은 동일하므로 단위 냉각판에 대하여 좌우로부터의 열유속을 고려하여 냉각판 한 장에 대한 전산해석을 수행하였다. 냉각판 재질의 물성은 연료전지에서 가장 많이 사용되고 있는 흑연(graphite)을 사용하였고 단위 냉각판의 구조 및 물성치는 각각 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다.⁽¹⁰⁾ 냉

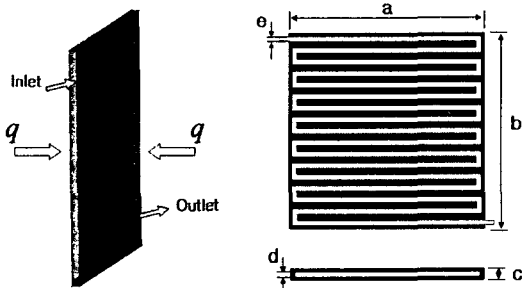


Fig. 2 Structure of a cooling plate.

Table 1 Specifications and properties of the cooling plate

Plate dimension, a×b×c (mm)	100×100×2
Channel width, e (mm)	2
Channel depth, d (mm)	1
Density (kg/m ³)	2,250
Specific heat (J/kg·K)	690
Thermal conductivity (W/m·K)	24

각수는 냉각판 좌측 상단에서 유입되어 우측 하단으로 배출된다. 냉각판의 채널은 기존에 수행된 분리판 유로 형상인 서펜타인(serpentine) 구조와 평행류(parallel) 채널을 기본 형상으로 선정하고 이에 대한 수정 모델을 설계하였다. 서펜타인 및 평행류 기본 채널은 Fig. 3의 모델 1과 모델 4의

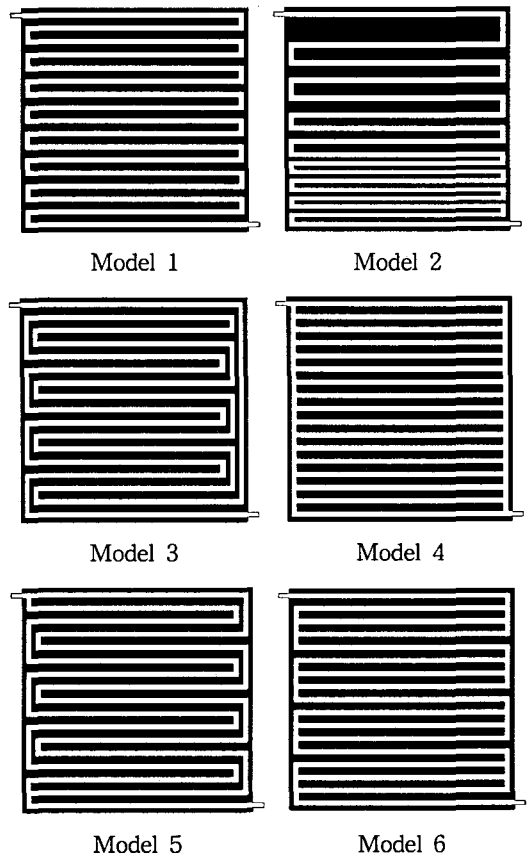


Fig. 3 Flow-field configurations of the proposed cooling plate models.

구조를 갖는다.⁽¹¹⁾ 모델 1과 모델 4의 해석결과로부터 각각의 구조에 대한 개선모델을 추가설계하였다. 서펜타인 기본구조인 모델 1의 출구 냉각 성능 저하를 극복하기 위하여 Fig. 3의 모델 2와 모델 3를 추가설계하였으며, 평행류 기본구조인 모델 4의 냉매 불균일 분배를 개선하고자 2패스와 3패스를 갖는 모델 5와 모델 6을 추가로 설계하였다.

2.3 전산해석

본 연구에서 연료전지 스택 내의 냉각판 해석을 수행하기 위하여 열유체 CFD 상용 코드인 CFD-ACE+⁽¹²⁾를 사용하였다. 냉각판 해석모델에 유동모듈(flow module)과 열전달 모듈(heat transfer module)을 이용하였다. 유동모듈을 이용하여 지배방정식인 질량보존방정식, 운동량방정식에 SIMPLEC(semi-implicit method for pressure-linked equations consistent) 알고리즘을 적용하여 유동장과 속도장을 계산하였으며, 열전달 모듈을 이용하여 냉각판의 열전도와 채널로의 대류열전달을 엔탈피방정식 형태인 에너지보존방정식을 풀어 온도장을 해석하였다.⁽¹²⁾ 유속과 압력 등의 유동 관련 변수 계산결과를 이용하여 열전달방정식을 순차적으로 해석하였다. 전산해석시 유

체유동은 레이놀즈수가 2300 이하인 층류(laminar flow) 모델을 적용하였으며 비압축성 유동(incompressible flow)으로 가정하였다.

전산해석 대상 고분자 전해질 연료전지 스택의 용량을 5kW급으로 설정하여 단위전지 개수와 냉각판 개수를 선정하였고, 각 단위전지 전력과 열발생량을 계산하였다. 전지내의 연료 및 공기 공급 형상에 따라 열발생분포는 매우 다양하므로 본 연구에서는 단위전지 열발생량과 냉각판 전체 면적을 이용하여 냉각판에 가해지는 열유속을 구하였다. 열유속계산식은 식(2)에 나타내었다.

$$q'' = \frac{Q}{A} = \frac{nI_{cell}(V_{OCV} - V_{cell})}{A} \quad (2)$$

작동유체로 물을 사용하고 층류유동 범위 내에서 유량을 변화시켰으며, 열유속 및 입출구 경계 조건을 제외한 외부 벽면조건은 단열로 가정하였다. 냉각액 출구압력은 101 kPa로 고정하였으며, 냉각액의 물성 및 전산해석 모델에 사용된 변수와 운전조건은 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

3. 전산해석 결과 및 고찰

3.1 격자생성 신뢰성 검증

연료전지 스택용 냉각판 전산해석의 정확도를 검토하기 위해 격자 의존성을 평가하였다. 냉각판의 기본 형상인 모델 1를 검증대상으로 하였고, 격자구조는 정육면체 격자(structured grid)로 생성하였다. 입구 경계조건은 레이놀즈수 1500에 대해 격자수를 늘려가면서 해석을 수행하여 입출구의 온도차, 냉각판 내부의 최대온도, 압력강하를 검토하였다.

격자구성은 유동해석에 있어 속도장 및 압력장에 변화가 큰 냉각수 유로부분에 세밀한 격자를 구성하였다. 126,000개의 최소 격자를 생성하고 격자수를 증가시키며 전산해석을 실시하였다. 격자수 변화에 따른 냉각수의 입·출구 온도 차이와 압력강하량 및 냉각판 표면 최고온도를 Fig. 4에 나타내었다. 약 8,000,000개 이상의 격자를 사용하여 전산해석을 실시하면 동일한 결과가 나타났으므로 본 연구에서는 8,000,000 이상의 격자를 생성하여 전산해석을 수행하였다.

Table 2 Parameters of the cooling fluid

Cooling fluid	Water
Temperature (K)	313.15
Density (g/cm ³)	0.99218
Viscosity (g/cm·s)	0.00653
Specific heat (J/g·K)	4.1796

Table 3 Parameters of the cooling plate operation

Electrical power per fuel cell (W)	29.94
Heat generation per fuel cell (W)	32.44
Active area (cm ²)	100
Heat flux (W/cm ²)	0.4875
Inlet hydraulic diameter (cm)	0.1
Inlet water mass flow rate (g/s)	<2.74×10 ⁶
Inlet flow velocity (cm/s)	<1.38×10 ⁶
Inlet Reynolds number (ReD)	<2300

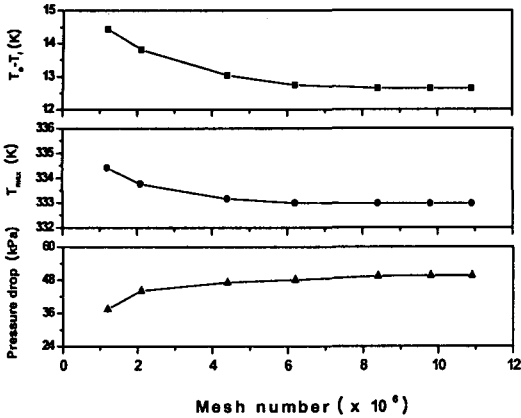


Fig. 4 Grid dependency test for Model 1.

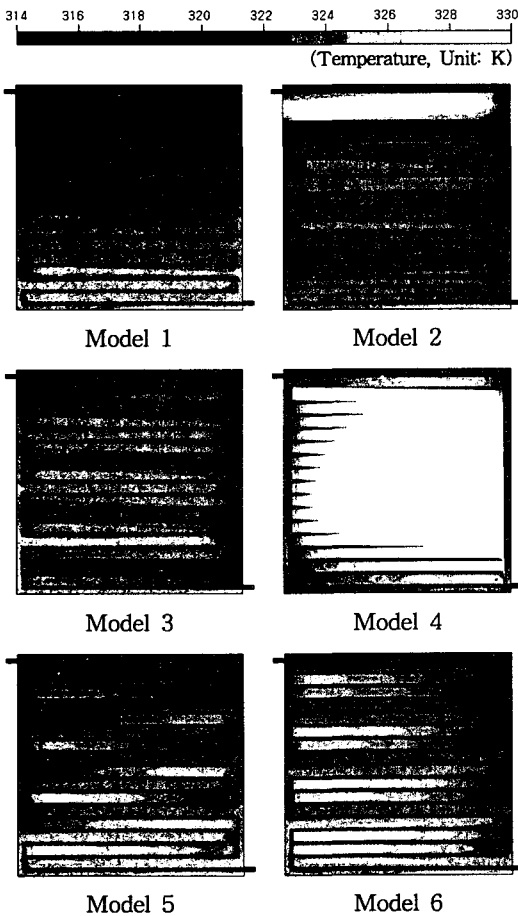


Fig. 5 Temperature distribution in central cut-plane of the cooling plates at $Re_D = 2000$.

3.2 냉각판 냉각성능 특성

Fig. 5는 본 연구에서 제안된 6가지 연료전지용 냉각판 모델에 대해 레이놀즈수(Re_D) 2000에서 냉각판 중심 단면부의 온도분포를 나타낸다. 서펜타인 기본 채널 형상의 모델 1의 경우 채널 입구 측에서 낮은 온도분포를 나타내고, 출구 측에서 높은 온도분포를 나타냈다. 이는 냉각기가 단일 패스를 갖고 작동유체가 출구 쪽으로 진행되면서 온도가 증가하여 냉각능력이 떨어지기 때문이다. 연료전지는 전극크기에 따라서 발생하는 열량은 차이가 있으나 스택에서 발생하는 열은 멤브레인(membrane)의 수소 이온전도도에 영향을 주는 물을 증발시켜서 멤브레인의 건조를 유발한다. 또 이로 인한 멤브레인의 수축에 의해서 접촉저항이 증가하고 성능이 저하된다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 냉각수 유로 형상을 통해 온도구배를 최소화하고 일정온도로 유지시키는 것이 중요하다. 즉, 고분자 전해질 연료전지의 성능은 MEA로부터의 총 제거열량보다는 MEA의 온도 균일성에 큰 영향을 받는다. 모델 1은 단일 패스 구조로 인해서 온도구배가 커서 열분포가 균일하지 못하고 냉각수 출구 쪽에서의 온도가 높게 나타났다. 출구 쪽에서의 온도 상승을 보완하고자 모델 1의 냉각판 구조를 개선하여 모델 2와 모델 3을 설계하였다.

냉각판 모델 2의 경우 출구영역에서의 냉각수 온도 상승에 따른 냉각능력 저하를 보완하고자 출구 쪽으로 진행됨에 따라 각 유로의 간격을 감소시켰다. 모델 2는 모델 1보다 입출구 온도구배 및 열분포가 개선되었다. 하지만, 입구측 유로간격 증대로 입구영역에서의 국부적 온도 상승이 발생했다. 모델 3은 서펜타인 모델 1을 수정하여 냉각수가 입구 측과 출구 측을 교번하도록 유로를 설계하였다. 냉각수의 온도가 낮은 유로와 높은 유로가 냉각판 전체적으로 교차됨에 따라 전 영역에 대해서 모델 1과 모델 2에 우수한 냉각성능과 균일 온도분포를 나타냈다. Fig. 6에서 보여지듯이 동일 레이놀즈수에 대하여 모델 1과 모델 2 및 모델 3은 입출구 냉각수 온도차이는 유사한 값을 나타내어 동일 냉각용량을 갖지만 Fig. 5에서 보여지듯이 모델 3의 온도 균일성이 가장 우수하게 나타났다.

압력강하 측면에서 장점을 가진 평행류 모델 4

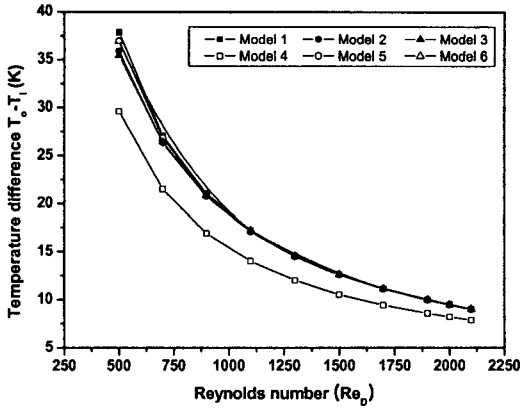


Fig. 6 Temperature difference between inlet and outlet of the coolant for cooling plates with hydraulic Reynolds number.

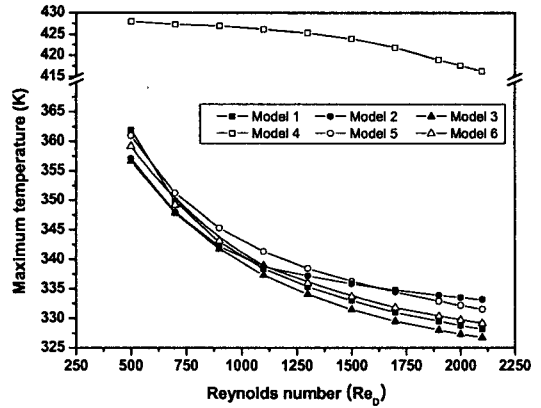


Fig. 7 Maximum temperature within cooling plates with hydraulic Reynolds number.

를 기본 모델로 선정하고 전산해석을 수행하였다. Fig. 5에서 보여지듯이 모델 4의 경우 냉각판 중심부 온도가 크게 상승하여 레이놀즈수 2000에서 417.6 K까지 상승하였다. 이는 냉각수가 각 유로에 대하여 균일하게 흐르지 않고 외곽유로로 대부분의 냉각수가 흘러서 냉각수가 유로 영역에서 온도가 상승하고 전체적인 냉각성능이 낮게 나타났다. 그러므로 Fig. 6에서 보여지듯이 모델 4의 냉각수 입·출구 온도차이가 다른 모델에 비하여 작게 나타났다.

모델 4의 평행류의 유량분배에 따른 불균일 냉각을 개선하고자 2개의 평행유로와 3개의 평행유로를 갖는 모델 5와 모델 6에 대하여 전산해석을 수행하였다. 평행류와 서펜타인 형상의 조합 모델인 모델 5와 모델 6은 Fig. 6에서 보여지듯이 동일 유량에 대하여 냉각수 입·출구 온도가 유사하여 전체 냉각용량은 서펜타인 형상과 유사한 열제거 능력을 갖는다. Fig. 5에서 보여지듯이 개선 모델은 평행류 기본 모델 4보다 유량분배가 개선되어 열분포의 균일도가 크게 향상되었다. 하지만, 서펜타인 모델에 비하여 균일 냉각 측면에서는 성능이 향상되지 못하였다.

가장 냉각성능이 낮은 평행류 기본 유로 형상의 모델 4를 제외한 냉각판 모델은 모든 냉각수 유량범위에 대하여 유사한 냉각수 입·출구 온도차이를 나타냈다. 낮은 유량범위에서($Re_D=500$) 약 35~38℃의 입·출구 온도차이를 나타냈고, 높은 유량범위에서($Re_D>1900$) 약 10℃ 정도의 온

도 차이를 나타냈다. 냉각수의 유량 및 입구 조건이 동일하므로 냉각수가 유사한 입·출구 온도차이를 갖는 경우 냉각판의 냉각용량은 동일하지만 냉각판의 온도구배 및 열분포는 유로 형상에 따라 다르게 나타난다. 특히, 고분자 전해질 연료전지는 저온에서 운전되고 온도에 따른 스택 성능이 매우 민감하므로 냉각판은 발열량 제거를 위한 충분한 냉각용량과 함께 온도 균일성 확보가 스택의 성능 향상을 위해 매우 중요시 된다.

Fig. 7은 레이놀즈수에 따른 냉각판 유로 형상에 따른 최대온도를 나타내었다. 평행류 기본 형상인 모델 4는 유량분배 문제로 인하여 중심부에서 열제거 능력이 떨어져 온도가 급격히 상승하였다. 모델 2의 경우 냉각수 입구측 고체 영역인 유로간의 간격이 넓어 열을 충분히 제거되지 못하고 있음을 알 수 있다. 균일냉각 측면에서 가장 우수한 성능을 나타낸 서펜타인 수정 모델 3이 최대온도 제어 측면에서도 가장 우수한 성능을 나타냈다.

3.3 냉각판 압력강하 성능 특성

Fig. 8은 본 연구에서 제안된 6가지에 냉각판 모델에 대해 레이놀즈수 변화에 따른 냉각수 압력강하를 나타낸다. Fig. 9는 레이놀즈수 2000에서의 각 모델의 내부유로 압력분포를 나타낸다. 모든 레이놀즈수에 대하여 Fig. 9와 유사한 압력분포 형태를 나타냈다. 냉각판 냉각수의 압력강

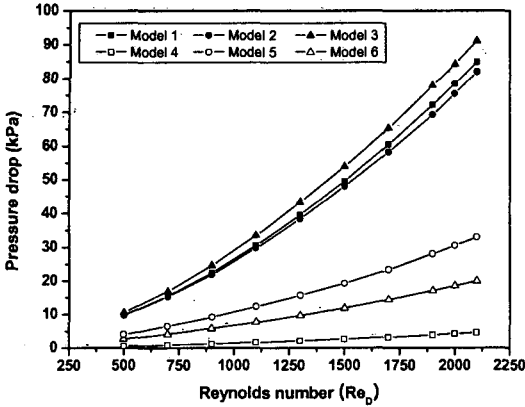


Fig. 8 Pressure drop in cooling flow channel with hydraulic Reynolds number.

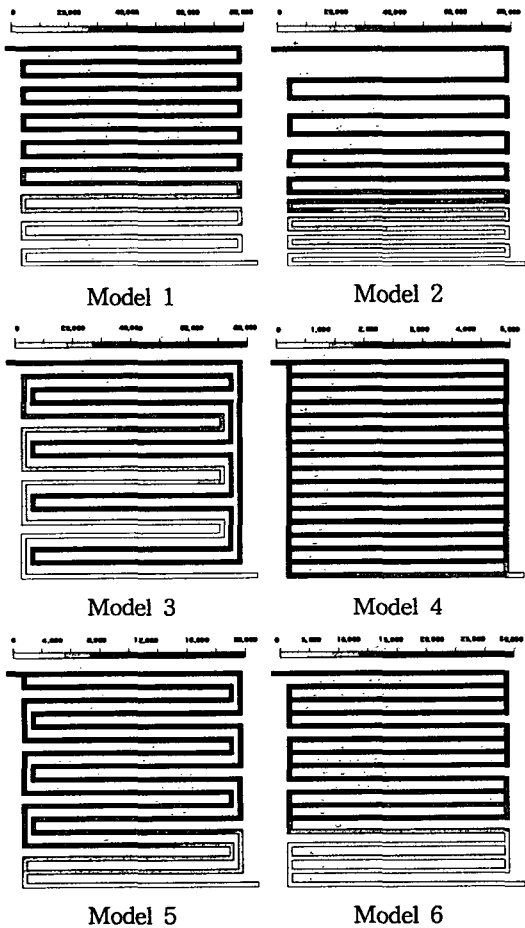


Fig. 9 Pressure distribution in flow channel of the cooling plates at $Re_D=2000$.

하는 연료전지 시스템의 압축기나 펌프의 선정에 있어서 매우 중요한 변수로 고려된다.

Fig. 9에서 보여지듯이 유로의 길이와 굵어지는 수 및 유로를 흐르는 냉각수 유량증가에 따라 압력강하는 상승한다. 서펜타인의 유로 형상인 모델 1~모델 3은 단일 유로를 가지므로 유로내의 유량이 커서 평행류 형상인 모델 4~모델 6보다 냉각판에서의 압력강하가 크게 나타났다. 모델 1~모델 3은 레이놀즈수 500에서 약 10 kPa 이하의 압력강하를 나타냈고, 레이놀즈수 2100에서 약 80~90 kPa의 압력강하를 나타내어 냉각수 유량이 증가할수록 압력강하가 크게 상승하였다. 평행류 유로 형상인 모델 4~6은 입구 레이놀즈수 500~2100 범위에서 30 kPa 이하의 압력강하를 나타내었다. 평행류 모델(모델 4~6)은 입구 레이놀즈수 증가에 따라 서펜타인 모델(모델 1~3)보다 낮은 압력강하 증가율을 나타냈는데, 이는 유로가 분지되어 입구 레이놀즈수는 동일하지만 각 유로를 흐르는 유량이 감소하였기 때문이다.

연료전지 시스템 설계시 시스템 소형화 및 소요동력을 줄이기 위하여 냉각판의 압력강하는 매우 중요한 설계인자이다. 하지만, 연료전지 스택의 성능향상 및 열신뢰성 확보를 위해서는 스택의 발열량 제거 및 온도 균일성 확보가 더욱 중요한 파라미터이다.

4. 결 론

본 연구에서는 고분자 전해질 연료전지의 단위 전지와 냉각판의 적층갯수가 3:1인 연료전지 스택의 열신뢰성 확보를 위하여 스택 냉각용 냉각판에 대하여 6개의 모델을 제안하고, 냉각판에 대하여 3차원 전산유체역학 기법을 이용하여 냉각성능 분석을 실시하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 서펜타인 기본 형상인 모델 1의 경우 출구 쪽의 냉각액 온도 상승으로 냉각판의 출구측 온도가 상승하였으며, 평행류 기본 형상인 모델 4의 경우 냉각액의 유량분배가 불균일하여 냉각판 중심부의 열제거 능력이 크게 저하되어 중심부 온도가 크게 상승하였다.

(2) 서펜타인 기본 유로형상 모델 1의 출구 온도 상승을 보완하기 위하여 유로가 입구 및 출구를 교번하도록 냉각수 유로를 설계한 모델 3이 가장 우수한 냉각성능을 나타내었다.

(3) 평행류 기본 유로형상인 모델 4의 유량 불균일 분배를 개선하여 평행류와 서펜타인의 조합 형태인 모델 5와 모델 6을 설계하였으며, 유량 분배 개선으로 모델 4보다 우수한 균일 냉각성능을 얻었으나, 서펜타인 형상의 모델 3보다는 균일 냉각성능이 우수하지 않았다.

(4) 서펜타인 유로의 냉각기(모델 1~모델 3)의 각 유로 냉각수 유량이 평행류 모델(모델 4~모델 6)보다 커서 압력강하가 크게 나타났으며, 입구 레이놀즈수 증가에 따른 압력강하 증가율도 크게 나타났다.

(5) 연료전지 냉각판 설계시 압력강하 및 균일 냉각성능이 평가되어야 하며, 스택의 성능향상과 신뢰성 확보 측면에서 균일 냉각을 통한 온도 균일성 확보가 가장 중요한 파라미터이다. 본 연구에서 제안된 연료전지 스택용 냉각판 모델 및 해석결과는 연료전지 시스템 설계의 기초자료로 적용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-11014-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Ogden, J. M., Steinnbugler, M. M. and Kreutz, T. G., 1999, A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development, *Journal of Power Sources*, Vol. 79, pp. 143-168.
- Vielstich, W., Lamm, A. and Gasteiger, H. A., 2003, *Handbook of Fuel Cells*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Barbir, F. and Gomez, T., 1997, Efficient and economics of proton exchange membrane (PEM) fuel cells, *Int. Journal Hydrogen Energy*, Vol. 22, No. 10, pp. 1027-1037.
- Chen, F. C., Gao, Z., Loutfy, R. O. and Hecht, M., 2003, Analysis of optimal heat transfer in a PEM fuel cell cooling plate, No. 4, pp. 181-188.
- Djilali, N. and Lu, D., 2002, Influence of heat transfer on gas and water transport in fuel cells, *International Journal of Thermal Science*, Vol. 41, No. 1, pp. 29-40.
- Fuller, T. F. and Newman, J., 1993, Water and thermal management in solid-polymer-electrolyte fuel cells, *Journal of Electrochem*, Vol. 140, No. 5, pp. 1218-1225.
- Rogg, S., Hoglinger, M., Zwittig, E., Pfender, C., Kaiser, W. and Heckenberger, T., 2003, Cooling modules for vehicles with a fuel cell drive, *Fuel Cells*, No. 3, pp. 153-158.
- Zhang, Y., Quyang, M., Lu, Q., Luo, J. and Li, X., 2004, A model predicting performance of proton exchange membrane fuel cell stack thermal systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 501-513.
- Nadal, M. and Barbir, F., 1996, Development of a hybrid fuel cell/battery powered electric vehicle, *International Journal of Hydrogen Energy* 21, Vol. 6, pp. 497-505.
- Li, X., 2006, *Principles of Fuel cells*, Taylor & Francis Group.
- Pierson, H.O., 1993, *Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes: properties, processing and applications*, Noyes Publications.
- ESI US R&D, 2004, *CFD-ACE+ Theory Manual, Version 2004*, ESI US R&D Inc.