

실험설계법을 이용한 연료전지 분리판 냉각채널 설계

장 하·권 오 정·오 병 수*

전남대학교 공과대학 기계공학부

A Design of the Cooling Channel in the Bipolar Plate of PEMFC Using Experimental Design Method

Xia Zhang · Oh-Jung Kwon · Byeong Soo Oh*

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea
(Received 26 May 2015 / Revised 8 June 2015 / Accepted 9 June 2015)

Abstract : The heat generation in PEMFC is proportional to the electrical power output. Therefore, when the fuel cell produced the maximum output, the maximum heat was generated. In order to maintain the performance of the fuel cell, thermal management is as important as pressure and humidity conditions of the reactive gas. In this study, considering the thermal management for the maximum output operation, the optimal cooling channel design specifications of bipolar plate are found for the highest cooling performance. In the current bipolar plate research, many studies focused on analyzing various factors individually but there is no more study on the interaction between design factors. In this study, the heat transfer was simulated by COMSOL Multiphysics with the main design factors which are designated shape, width and rib length. One of the experimental design methods, general full factorial design method, was used to analyze the main factor and interaction on average temperature and maximum temperature for the design specification of fuel cell bipolar plate. When analysis result shows that all of these three factors are highly important, it can confirm that the interaction occurs between the factors.

Key words : PEMFC(고분자 전해질 막 연료전지), Bipolar plate(이극 분리판), Cooling channel(냉각채널), Experimental design method(실험설계법), Full factorial design(완전요인설계)

1. 서론

최근 자원 고갈과 기후변화 문제 등의 이유로 전 세계적으로 화석 에너지를 대신할 수 있는 신재생 에너지원에 대한 관심과 연구가 급속히 증가하고 있다. 화석 에너지를 대체할 에너지로는 바이오 에탄올, 바이오 디젤과 같은 바이오 연료가 있으며 이는 화석 에너지원의 사용량을 줄일 수 있으나, 근본적으로 발생하는 연소 후 생성물을 완전하게 없앨 수 없다. 하지만 다른 에너지원을 이용하는 방법 중에 하나인 수소는 화석 에너지를 이용하지

않는 대체 에너지이며 수소를 연료전지에 사용하면 연소 후 생성물로는 물이 발생되기 때문에 관심이 높아지고 있다.^{1,2)}

수소를 이용한 에너지 변환 장치로는 연료전지가 있는데 이를 수소연료전지라고 한다. 수소연료전지는 수소가 보유하고 있는 화학에너지를 전기에너지로 직접적으로 변환하는 장치를 말한다. 수소연료전지는 현재 화석 에너지를 이용한 내연기관 장치의 효율보다 높다. 이러한 이유로 수소연료전지는 화석 에너지를 이용한 시스템을 대체할 수 있는 충분한 이유가 된다.

수소 연료전지는 고효율, 친환경적인 특성을 가

*Corresponding author, E-mail: bysoh@jnu.ac.kr

지며, 기존의 화석 연료 기반의 열기관을 대체할 수 있는 에너지 변환장치로서 각광을 받고 있다. 특히 고분자 전해질 막 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 낮은 작동온도와 높은 전류밀도, 빠른 시동 등의 장점으로 인하여 휴대용, 차량용, 가정용 등의 동력원으로 연구가 활발히 진행되고 있다.

PEMFC는 운전 중 수소와 산소의 전기화학 반응 과정에서 전기에너지와 함께 부산물로 열과 물이 발생한다. 이러한 열과 물은 시스템으로부터 적절하게 배출되어야 한다. 이러한 이유로 PEMFC의 열과 물 관리는 성능과 내구성을 향상시키기 위하여 중요한 설계 이슈가 되고 있다. 열을 적절히 제거하지 못할 경우, 고분자 전해질 막(Membrane) 내의 수분을 건조시켜 성능을 저하시키며, 균일한 전류를 생산하지 못하여 내구성에 영향을 미친다.³⁾

연료전지의 출력이 100 W 이상 요구될 경우 반응용 공기와 냉각용 공기를 분리하여 공급하는 공기 냉각방식을 사용하고 있다.⁴⁾ 이러한 공기 냉각 방법은 주변장치(Balance of Plant, BOP)를 간소화 할 수 있는 장점이 있으나 공기의 낮은 열전달 계수로 인하여 고용량 연료전지에는 부적절하다. 따라서 차량용 연료전지 등 고용량의 연료전지에는 냉각수를 이용한 냉각방식을 사용하고 있다.

연료전지의 열관리는 성능과 내구성을 위하여 안정적인 온도 범위인 60~80°C에서 동작시켜야 하고 균일하게 유지하여야 한다. 고분자 전해질 막을 사용하는 연료전지의 효율은 일반적으로 50% 미만이다. 다시 말하면 연료전지에서 생산하는 전기에너지 이상의 에너지가 열로 방출되며, 이는 연료전지의 성능과 내구성 하락을 유발한다. 공기 냉각 방식의 연료전지 열관리는 단위전지(Unit cell) 사이에 주기적으로 설치된 냉각 채널(Coolant channel)을 통해 냉각 매체인 공기를 통과시켜 수행된다. 냉각 채널에서는 분리판의 표면의 온도와 냉각공기의 온도차에 의해 대류 열전달이 발생되며, 냉각성능을 향상시키기 위해서는 냉각 채널 내 열전달을 향상시켜야 한다.⁵⁻¹¹⁾

본 연구에서는 100 cm²의 활성화면적을 갖는 분리판에 균일한 열이 발생할 때, 분리판의 설계인자

중, 냉각채널의 형상과 폭, 그리고 rib 길이의 변화에 따라 분리판의 냉각에 어떠한 영향을 미치는지 실험설계(Experimental Design)법 방식을 이용하여 인자들의 영향도를 도식화 하였다. 시뮬레이션은 상용유한요소법 소프트웨어인 COMSOLTM을 이용하여 전산해석을 하였고, 실험설계법 중 완전요인 실험법(Full Factorial Designs)을 사용하여 각 실험인자의 수준(Level)을 바꾸어가며 해석하였다.^{12,13)} 본 연구를 통해서 분리판의 설계 인자(Factor)의 주요 효과(Main effects) 및 상호작용(Interactions)에 대한 분석을 검토하여 분리판 냉각채널을 설계하는데 영향을 주는 주요인자와 인자들의 연관도가 있는 설계인자를 찾을 수 있었다.

2. 전산해석

2.1 해석모델

PEMFC는 화학반응이 일어나는 전해질 막과 전극(Electrode)이 결합된 MEA(Membrane electrode assembly)와 기체 확산 층(Gas diffusion layer), 수소와 공기를 공급하고 전류를 수집하는 역할을 하는 분리판이 여러 장 적층되어 있다. 냉각 채널은 Fig. 1과 같이 단위 전지와 단위 전지를 결합하는 분리판과 분리판 사이에 다수의 채널이 위치해 있으며, 전기화학반응에 의해 발생하는 열을 외부로 배출하는 역할을 한다.¹⁴⁾

본 연구에서는 분리판과 분리판 사이의 냉각 채널 형상에 대하여 냉각성능을 비교하였다. 분리판과 분리판이 결합된 형상의 두께는 6 mm이므로 수

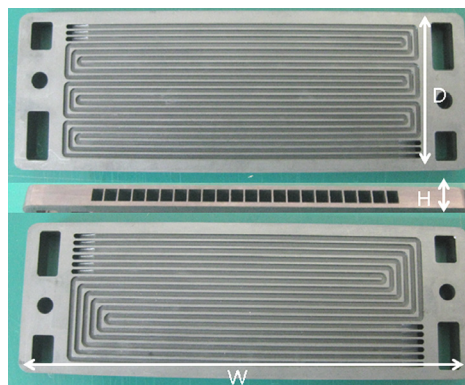


Fig. 1 Air-cooled bipolar plate

소와 산소의 채널의 두께를 고려하여 냉각채널의 최대 높이는 3 mm로 선정하였다. 분리판의 사이즈는 227(W) × 76(D) × 6(H) mm³이며, 분리판의 길이는 227 mm이나 열이 발생하는 활성화 영역의 길이는 170 mm이므로 냉각 채널의 끝과 끝은 170 mm로 선정하였다.

2.2 지배방정식

본 연구에 적용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \tag{1}$$

$$\rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \tag{2}$$

$$\rho C_p u \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \tag{3}$$

ρ 는 밀도, μ 는 점성, C_p 는 비열, k 는 열전도도를 나타낸다. 식 (1)은 연속 방정식, 식 (2)는 운동량 방정식, 식 (3)은 에너지 방정식이다. 분리판에서 열전달은 고체영역에서의 전도 열전달이므로 식 (1)과 식 (2)는 사용하지 않으며, 식 (3)의 좌변은 대류항이므로 무시하고 우변의 전도항만 적용하였다. 우변의 Q 는 열 생성항(Source term)으로 분리판에서 화학반응이 일어나는 영역에서만 발생하고 나머지 영역에서는 무시된다.

2.3 가정 및 경계조건

연료전지의 MEA에서 발생된 열은 분리판을 통해 냉각채널로 전달되며, 이 때 발생하는 열에 대해서 전류와 전압의 함수로 표현되는 발열량 공식을 이용하였다.¹⁵⁾

$$Q = (E - V_{cell}) \cdot I \cdot A \cdot n_{cell} \tag{4}$$

식 (4)의 I 는 단위면적당 전류, V_{cell} 은 전압, n_{cell} 은 셀 수, E 는 기전력, A 는 활성화 면적을 나타낸다. 본 연구에서는 기전력에 대하여 고위 발열량(Higher Heating Value, HHV) 값 1.482 V를 적용하였다. 전압과 전류 값은 본 연구에 사용된 분리판으로 제작된 5cell 연료전지의 성능실험을 통해 얻은 3.0 V, 55 A 값을 이용하였다.

Fig. 2는 5개의 단위전지가 적층된 연료전지를 상대습도 100%에 수소 4.8 l/min, 공기 16 l/min을 공급

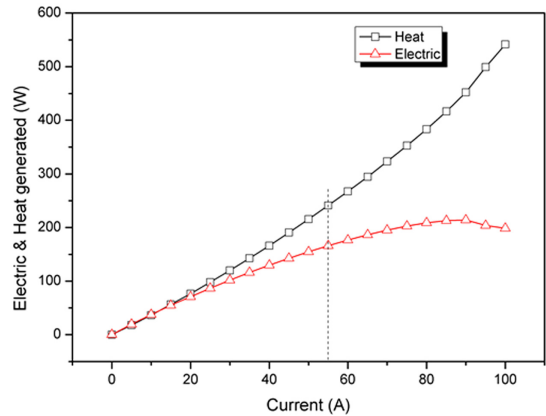


Fig. 2 Electric and heat generated curve

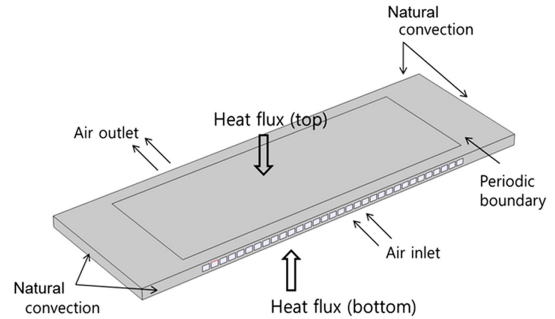


Fig. 3 Schematic of heat transfer in an air cooled PEMFC

하여 얻은 실험값을 근거로 한 개의 분리판에 작용하는 전류와 전압을 산출하여 발열량을 얻었다.

이 때 발생된 열은 분리판의 활성화 영역 표면에서 일정한 열 유속(Heat flux) 2425.5 W/m²를 계산하였다. 분리판은 스택으로 적층 시 동일한 경계면이 반복적으로 나타난다. 따라서 한 면의 변수는 동일한 모양을 갖는 두 번째 경계에서도 같은 상태량을 나타내는 주기(Periodic) 경계 조건을 윗면과 아랫면에 적용하였다.

Table 1 Boundary condition and initial values of the cooling channel

Cooling channel		
Properties	Notes	Values
Flow phase	Laminar	-
Inlet spec.	Velocity	3.5 m/s
Outlet spec.	Pressure outlet	1 atm
Inlet temp.	Ambient	20°C
Thermal conductivity	Constant	0.02588 W/m·K
Specific heat	Constant	1005 J/kg·K

Table 2 Boundary conditions and initial values of the bipolar plate

Bipolar plate		
Properties	Notes	Values
Material	Homogeneous	Carbon graphite
Specific heat	Constant	710 J/kg·K
Density	Constant	1970 kg/m ³
Thermal conductivity	Constant	20.5 W/m·K
Heat flux	Steady and uniform	2425.5 W/m ²
Convection heat transfer	Constant	10 W/m ² ·K

냉각 채널 내에서는 외부에서 공급하는 냉각 공기에 의해 강제 대류가 발생하므로 공기의 입구는 균일한 속도조건을, 출구는 압력조건을 적용하였다. 분리판의 측면영역은 주변 공기와의 자연대류 현상이 발생하므로 그에 해당되는 열전달 계수를 적용하였다. Table 1과 Table 2는 경계조건과 초기조건에 대해 정리하였다.

2.4 실험설계

본 연구의 목적은 냉각채널 형상과 크기에 따른 특성을 파악하는 것이므로, ‘채널의 형상’, ‘채널의 폭’, ‘rib의 길이’를 실험설계 인자로 선정하였다.

실험 인자의 수준은 채널의 형상 2 수준, 채널의 폭 3 수준, rib의 길이 2 수준으로 정하고, 완전요인 실험법의 직교좌표를 사용하여 실험설계하여, 주효과, 상호작용을 분석할 수 있도록 실험설계법에 주

Table 3 DOE (Design of Experiment) and result

No.	Channel shape	Experiment factors			Result	
		Channel width (mm)	Rib length (mm)	Max. temp. (°C)	Ave. temp. (°C)	
1	Rectangular	3	1	61.77	46.88	
2	Rectangular	3	1.5	64.45	48.99	
3	Rectangular	4	1	63.03	48.32	
4	Rectangular	4	1.5	65.21	49.75	
5	Rectangular	5	1	63.02	47.33	
6	Rectangular	5	1.5	64.69	46.79	
7	Ellipse	3	1	63.52	48.58	
8	Ellipse	3	1.5	66.43	50.86	
9	Ellipse	4	1	62.69	48.56	
10	Ellipse	4	1.5	64.97	50.04	
11	Ellipse	5	1	62.56	49.17	
12	Ellipse	5	1.5	64.51	50.32	

어진 조건을 모두 해석하였다.

채널의 높이는 3 mm로 모두 동일하고, 형상은 사각형과 타원형을 비교하였다. 타원형의 경우 채널의 높이는 단축에 해당되고 장축은 각각 3, 4, 5 mm이다. 그리고 rib의 길이는 분리판의 강도를 고려하여 최소 1 mm로 선정하였다. 채널의 형상 2 수준, 채널의 폭 3 수준, rib의 길이 2수준을 완전요인법에 준하여 실험설계하면 Table 3과 같이 정리 된다.

3. 결 과

3.1 연료전지 열평형

연료전지에서 발생하는 열량(\dot{Q}_{input})은 식 (4)와 Table 2의 물성값을 고려하여 아래 식 (5)와 같이 계산하였다. 본 연구는 분리판의 냉각에 관한 것이므로, 발생열은 MEA(전극집합체)에서 균일하게 발열한다고 가정 하였다.

$$\dot{Q}_{input} = \dot{Q}_{heat\ flux} = 48.51 [W] \tag{5}$$

냉각되어 빠져 나가는 열(\dot{Q}_{output})은 아래 식 (6)과 같이 크게 두 가지로 구성 되어 있다.

$$\dot{Q}_{output} = \dot{Q}_{disperse} + \dot{Q}_{coolant} \tag{6}$$

분리판의 측면과 주변 공간에 일어나는 자연대류에 의한 열전달($\dot{Q}_{disperse}$) 및 냉각채널 내에서 대류 열전달에 의해 제거되는 열량($\dot{Q}_{coolant}$)로 구성된다. 두 열량에 대한 수식은 아래 식 (7)과 식 (8)과 같다.

$$\dot{Q}_{disperse} = h_{air} A_{fc} (T_{fc} - T_{\infty}) \tag{7}$$

$$\dot{Q}_{coolant} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \tag{8}$$

이 때, 식 (7)의 h_{air} 는 공기와 분리판 사이의 대류 열전달계수이며, A_{fc} 는 연료전지 측면과 공기가 만나는 면적이고, T_{fc} 와 T_{∞} 는 연료전지 분리판의 온도와 주변 온도를 나타낸다. 식 (8)에서 \dot{m} 은 냉각채널에 들어가는 공기의 질량유량이며, T_{in} 과 T_{out} 는 냉각채널의 입구와 출구에서 온도이다.

수소와 공기(또는 산소)와 같은 반응기체에 의해서 유입 또는 유출되는 열량(\dot{Q}_{gas})은 분리판의 냉각 채널 설계에서 계산 편의상 무시하였다. 따라서 본

Table 4 Convective heat transfer

Experiment factors		Result	
No.	$\dot{Q}_{heat\ flux}$ (W)	$\dot{Q}_{coolant}$ (W)	$\dot{Q}_{disperse}$ (W)
1		34.03	14.48
2		32.87	15.64
3		34.73	13.78
4		33.72	14.79
5		35.55	12.96
6		34.81	13.70
7	48.51	32.45	16.06
8		31.39	17.12
9		32.64	15.87
10		31.78	16.73
11		33.16	15.35
12		32.41	16.10

연구의 최종적인 연료전지 분리판의 열평형식은 아래 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$\dot{Q}_{heat\ flux} - \dot{Q}_{disperse} - \dot{Q}_{coolant} = 0 \quad (9)$$

전산해석 결과의 이상유무를 확인하기 위해서, 전산해석 후 얻어진 결과 데이터를 이용하여 식 (7) 과 식 (8)에 해당하는 값을 계산하였고, 식 (9)와 일치함을 Table 4에 나타냈다.

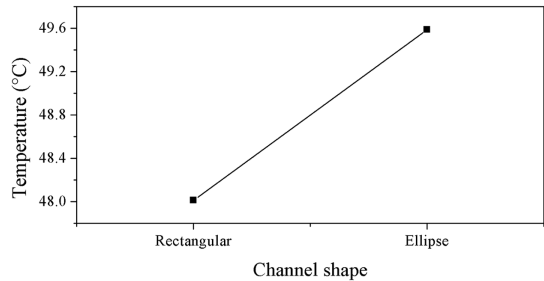
3.2 실험설계 데이터 분석

실험설계에 사용한 인자에 각각의 분리판 평균온도와 최고온도에 대한 주효과(main effect), 상호작용 효과(interaction effect) 분석 결과를 Fig. 4부터 Fig. 7에 정리하였다.

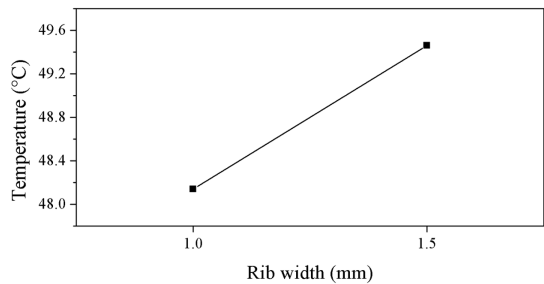
3.2.1 주효과 분석

Fig. 4와 Fig. 5의 각 인자별 주효과에 대해 부연설명하면 다음과 같다. 채널의 형상과 rib의 길이에 대한 주효과 그래프의 기울기가 크게 나타나고 있으며, 이는 평균온도와 최고온도에 해당 인자들의 영향도가 큼을 의미한다.

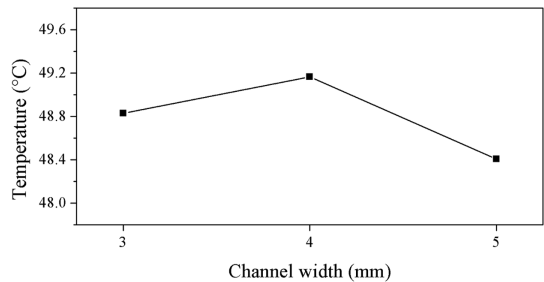
채널의 형상이 타원형인 경우, 사각형 보다 공기와 접촉하는 면적이 작기 때문에 대류에 의한 열전달 양이 감소하여 높은 온도를 나타냈다. 또한 rib의 길이가 줄어들수록 분리판 냉각 채널의 수가 증가하여 냉각 성능이 우수함을 알 수 있다. 채널의 폭의



(a) Main effect of the channel shape



(b) Main effect of the rib width



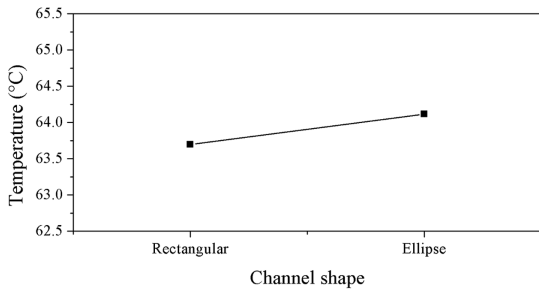
(c) Main effect of the channel width

Fig. 4 Graph of the main effect for average temperature

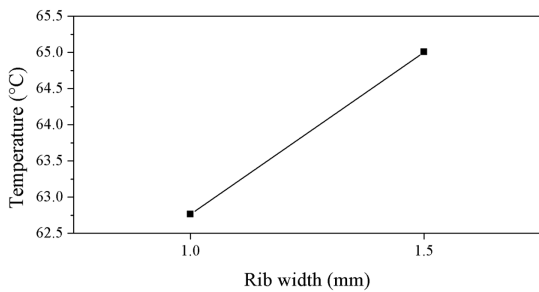
경우 rib의 길이에 따라 채널의 수가 차이가 있기 때문에 본 연구에서는 채널 폭이 5 mm일 때, 가장 좋은 냉각 성능을 나타냈다. 이는 채널 폭을 5 mm로 했을 때 전체 냉각 채널과 공기와 접촉하는 면적이 가장 크다고 판단할 수 있으며, 채널의 폭이 증가할수록 냉각 성능은 향상될 것이라고 판단된다. 따라서 카본 재질의 공기냉각 분리판의 냉각채널 설계 시 rib의 길이는 기계적 강도를 고려하여 1 mm가 적당하다고 판단되며, 채널의 형상은 사각형상에 가깝게 최대한 많은 수의 채널을 설계 하는 것이 냉각에 효율적이라고 판단된다.

3.2.2 상호작용 효과 분석

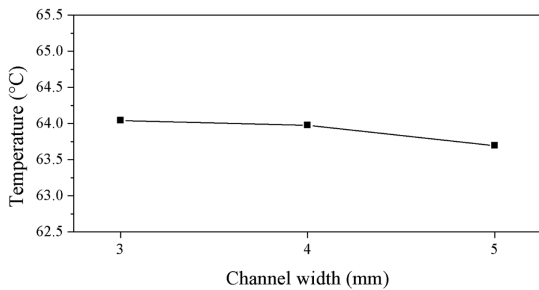
각 인자간 상호작용은 아래와 같이 총 3가지가 있다.



(a) Main effect of the channel shape



(b) Main effect of the rib width



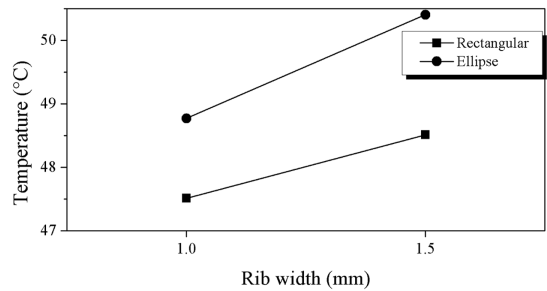
(c) Main effect of the channel width

Fig. 5 Graph of the main effect for maximum temperature

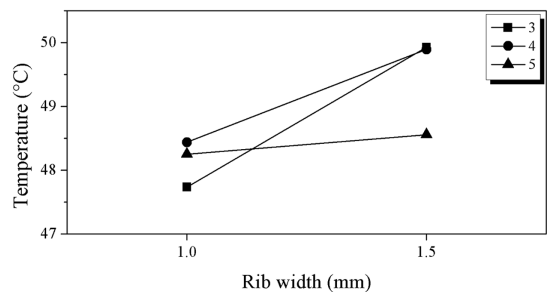
- (a) 'rib의 길이'와 '채널 형상' 간 상호작용
- (b) 'rib의 길이'와 '채널 폭' 간 상호작용
- (c) '채널 폭'과 '채널 형상' 간 상호작용

Fig. 6과 Fig. 7에 (a)부터 (c)까지 위 순서에 맞추어 상호작용 그래프를 차례로 나타내었다.

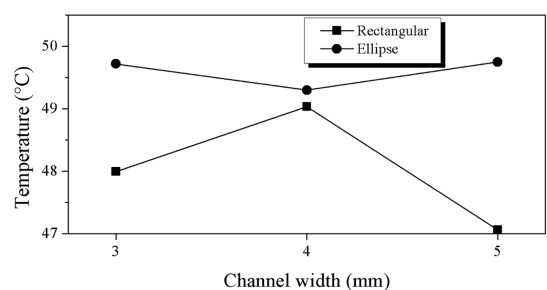
Fig. 6과 Fig. 7의 (a)에서 'rib의 길이'와 '채널 형상' 간 그래프들은 우상향 방향으로 진행하며 벌어지고 있다. 이는 인자 상호간에 양의 상관관계를 가지며 인자간 상호작용이 있음을 확인할 수 있다. 그리고 (b)에서도 'rib의 길이'와 '채널 폭' 간 그래프도 우상향 방향으로 진행하며 벌어지고 있으며, 인자간 상관관계를 확인할 수 있다. 주효과 분석에서 냉



(a) Interaction effect between channel shape and rib length



(b) Interaction effect between channel width and rib length



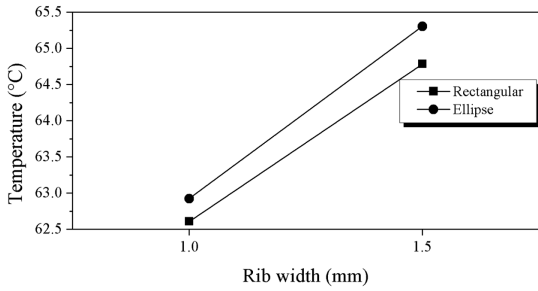
(c) Interaction effect between channel shape and channel width
Fig. 6 Graph of the interaction effect for average temperature

각에 큰 영향을 미쳤던 '채널의 형상'과 'rib의 길이'의 상호간 그래프는 높은 상관관계를 알 수 있으며, 냉각을 향상시키기 위해서는 채널의 형상은 사각형으로, 그리고 rib의 길이는 짧게 하는 것이 좋다는 것을 의미한다.

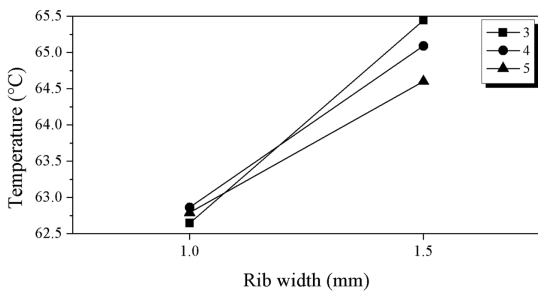
반면 Fig. 6과 Fig. 7의 (c)에서는 (a)와 (b)에 비해 기울기가 낮게 나타난다. 이는 주효과 분석에서 온도에 낮은 영향도를 보였던 인자인 '채널 폭'이 '채널 형상'과의 상관관계에서도 온도에 낮은 연관성을 가짐을 의미한다.

3.3 결과검토 (Discussion)

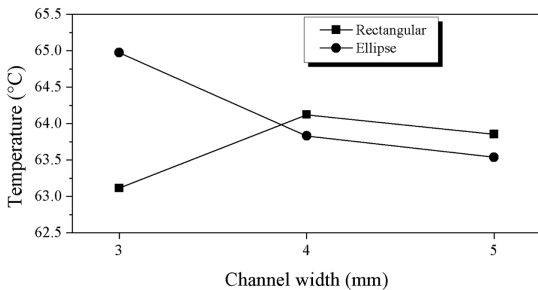
위 결과를 바탕으로 본 연구에서 사용한 활성화



(a) Interaction effect between channel shape and rib length



(b) Interaction effect between channel width and rib length



(c) Interaction effect between channel shape and channel width

Fig. 7 Graph of the interaction effect for maximum temperature

면적 100 cm², 두께 6 mm의 카본 재질 분리판 냉각의 최적 설계 조건은 기계적 강도를 고려하여 rib의 길이는 1 mm, 채널 형상은 사각형, 그리고 활성화 면적 내에서 냉각공기와 접촉 면적이 가장 넓은 채널의 폭 3 mm에 채널의 수는 43개로 했을 경우 냉각 성능이 가장 좋을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 활성화 면적이 100 cm²인 연료전지의 공기 냉각채널에 대해서 열전달 현상을 전산 해석을 활용하여 해석하고, 냉각에 영향을 주는 인자에 대해 확인하였다.

‘채널의 형상’, ‘채널의 폭’ 및 ‘rib의 길이’ 중, 연료전지 분리판 냉각에 영향을 주는 인자는 ‘채널의 형상’과 ‘rib의 길이’임을 확인하였다. 또한, ‘채널의 형상’과 ‘rib의 길이’ 간에 높은 상관관계가 존재하여 채널의 형상이 사각형이고, rib의 길이가 짧을수록 냉각이 향상됨을 알 수 있었다.

본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 분리판 설계 시 선정된 3가지 인자 즉, ‘채널의 형상’, ‘채널의 폭’과 ‘rib의 길이’는 평균 온도에 대한 주효과 분석결과 분리판 냉각에 영향도가 높은 설계 인자임을 확인 하였다.
 - 2) 분리판의 최고 온도 데이터를 이용하여 주효과 분석을 한 결과 ‘rib의 길이’는 영향도가 높고, 평균 온도 데이터를 이용한 분석 대비에서는 ‘채널의 형상’과 ‘채널의 폭’의 영향은 낮게 나타났다.
 - 3) 분리판 설계 인자들간의 상호작용을 분석한 결과 평균온도 및 최고온도 모두에서 인자들간의 상호작용이 발생하였다.
 - 4) rib의 길이는 1 mm 이하로 내려가면 카본 재질 분리판의 기계적 강도가 낮아지므로, 냉각과 분리판의 강도를 모두 고려하면 rib의 길이는 1 mm가 적당하다.
 - 5) 채널의 형상이 사각형 일 경우, 타원형인 경우 대비하여 냉각이 잘되므로, 분리판의 생산 설비의 특성을 반영하더라도, 가능한 사각형상에 가깝게 설계되어야 한다.
 - 6) 위 3가지 분리판 냉각채널 설계 인자는 분리판 온도에 영향도가 높다 판단되므로 냉각채널 설계 시 모두 검토 되어야 하며, 인자들 간의 상호 작용도 함께 검토 되어야 한다.
 - 7) 그 중에서도 ‘채널의 폭’과 ‘채널의 형상’ 간에는 평균온도에서 양의 상호작용과 음의 상호작용이 모두 나타나므로 분리판 냉각의 최적 조건 설계 시 우선적으로 검토해야 할 인자들이다.
- 차후 연구에서는 수소와 공기의 GDL층에서 반응과 열전달을 고려할 예정이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임(No. 2013H1B8A2032290).

References

- 1) C. E. Thomas, "Fuel Cell and Battery Electric Vehicles Compared," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.34, No.15, pp.6005-6020, 2009.
- 2) P. Corbo, F. Migliardini and O. Veneri, "Dynamic Behaviour of Hydrogen Fuel Cells for Automotive Application," *Renewable Energy*, Vol.34, No.8, pp.1955-1961, 2009.
- 3) F. C. Chen, Z. Gao, R. O. Loutfy and M. Hecht, "Analysis of Optimal Heat Transfer in a PEM Fuel Cell Cooling Plate," *Fuel Cells*, Vol.3, No.4, pp.181-188, 2003.
- 4) A. P. Sasmito, K. W. Lum, E. Birgersson and A. S. Mujumdar, "Computational Study of Forced Air-convection in Open-cathode Polymer Electrolyte Fuel Cell Stacks," *Journal of Power Source*, Vol.195, No.17, pp.5550-5563, 2010.
- 5) W. A. N. Mohamed and R. Atan, "Computational Analysis on Thermal Performance and Coolant Flow of an Air-cooled Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell," *Journal of Mechanical Engineering*, Vol.7, No.2, pp.15-36, 2010.
- 6) W. A. N. Mohamed, R. Atan and A. Ismail, "Heat Transfer Simulation of a Single Channel Air-cooled Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stack with Extended Cooling Surface," *International Conference on Science and Social Research*, pp.91-96, 2010.
- 7) J. Scholta, M. Messerschmidt, L. Jorissen and C. Hartnig, "Externally Cooled High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stack," *Journal of Power Sources*, Vol.190, No.1, pp.83-85, 2009.
- 8) K. P. Adzakpa, J. Ramousse, Y. Dube, H. Akremi, K. Agbossou, M. Dostie, A. Poulin and M. Fournier, "Transient Air Cooling Thermal Modeling of a PEM Fuel Cell," *Journal of Power Source*, Vol.179, No.1, pp.164-176, 2008.
- 9) C. Spitta, J. Mathiak, M. Kokupil and A. Heinzl, *Coupling of a Small Scale Hydrogen Generator and a PEM Fuel Cell*, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2007.
- 10) S. T. Hwang, S. H. Cheon, J. S. Song, Y. H. Yun, B. H. Kim, X. Zhang, D. U. Kim, D. Hyun and B. S. Oh, "A Study to Improve PEMFC Performance by Using Electro Polishing and CrN Coating on Metal Bipolar Plate," *Transactions of KSAE*, Vol.22, No.4, pp.65-71, 2014.
- 11) A. Faghri and Z. Guo, "Integration of Heat Pipe into Fuel Cell Technology," *Heat Transfer Engineering*, Vol.29, No.3, pp.232-238, 2008.
- 12) R. A. Fisher, *The Design of Experiments*, 4th Edn., Oliver and Boyd, Edinburgh, 1947.
- 13) O. J. Kwon, C. M. Oh, H. S. Shin and B. S. Oh, "Study on Power Characteristics in the PEMFC Parallel Channel with Baffle through Numerical Analysis," *Journal of the Korean Electrochemical Society*, Vol.17, No.3, pp.193-200, 2014.
- 14) F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, Academic Press, Waltham, 2005.
- 15) J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd Edn., John Wiley & Sons, New York, 2008.