

전산해석을 통한 PEMFC 평행 유로에서 Baffle에 의한 출력특성 분석

권오정¹ · 오창묵² · 신희선³ · 오병수^{4*}

¹전남대학교 대학원 기계공학과, ²고려대학교 대학원 기계공학과,

³전남대학교 기계공학부, ⁴전남대학교 기계공학과

(2014년 4월 25일 접수 : 2014년 8월 15일 채택)

Study on Power Characteristics in the PEMFC Parallel Channel with Baffles through Numerical Analysis

Oh-Jung Kwon¹, Chang-Mook Oh², Hee-Sun Shin³, and Byeong Soo Oh^{4*}

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chonnam National University,
77 Yongbongro, Buk-Gu, Gwangju City 500-757, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea University, Seoul 136-701, Republic of Korea

³Department of Mechanical Engineering, Undergraduate School, Chonnam National University,
77 Yongbongro, Buk-Gu, Gwangju City 500-757, Korea

⁴Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University,
77 Yongbongro, Buk-Gu, Gwangju City 500-757, Korea

(Received April 25, 2014 : Accepted August 15, 2014)

초 록

고분자 분리막 연료전지의 성능향상을 위해 분리판 유로설계연구는 필요하다. PEMFC의 성능향상에 대한, 강제대류를 이용한 interdigitated 유로가 최근에 많이 연구되고 있다. 이 논문에서는 interdigitated 유로를 배플들이 있는 평행류 채널에 비슷하게 적용하였다. 상용 multiphysics program인 COMSOL을 이용하여 완전차단배플인 FBB가 있는 평행류 채널에 관해 전산해석을 수행하였고 3가지 변인들(배플 위치, 유체 방향, 유체 속도)이 사용 되었다. 각각 변인들의 출력은 최대출력의 80%를 고려한 0.5V에서의 결과이다. 최종적으로, 실험설계법 중 완전요인실험법을 바탕으로 여러 수준을 갖는 각 실험인자로부터 결론을 도출하였다. 실험인자들의 주효과와 상호작용 분석은 출력을 향상시키는데 가장 영향을 주는 인자를 찾는데 유용하였다.

Abstract : Research on flow channel designs of the separate plates is necessary to improve the PEMFC performance. On concerning the performance improvement of PEMFC, many recent studies have been made on the interdigitated flow channel using forced convection. In this paper, the interdigitated flow channel is similarly applied on the parallel flow channel with a baffle or baffles. Numerical analysis is performed by using a commercial multiphysics program, which is called COMSOL, on the parallel channel with the fully blocked baffle(FBB) and there are three variables, the position of baffle, flow direction and flow velocity. Each power of the variables is resulted from the fixed 0.5V, the voltage from 80 percents of the maximum power. Finally, based on the full factorial designs(FFD), one of the design of experiments(DOE), each

*E-mail: bysoh@jnu.ac.kr

factor which has several levels lead to the conclusion. The analysis of the main effects and interactions of the factors is useful to find the most influenced factor to improve the power.

Keywords : PEMFC, Parallel channel, Baffle, FBB(Fully-Blocked Baffle), DOE(Design of Experiment), Full Factorial Designs

1. 서 론

연료전지는 지구온난화 같은 환경문제를 해결하기 위한 연구 중 하나로 진행되고 있다. 연료전지에 관한 연구 중, 저온영역에서 작동하는 PEMFC(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, 고분자 전해질형 연료전지)는 청정에너지 인 수소를 전기에너지로 변환시켜주는 장치로서 그 좋은 대안이 되고 있다.

그러나 PEMFC는 자체 재료비의 비중이 높아, 경제성을 얻기 위해서는 저가의 재료를 사용하는 방법에 관한 연구나,^{1,2)} 유사한 체적과 재료비에서 연료전지 자체의 출력 성능을 향상시키는 연구를 통해 경제성을 확보하려고 노력하고 있다.³⁾

이러한 연구의 일환으로 PEM(Polymer Electrolyte Membrane)FC의 출력 향상을 위한 연구로는 화학적인 연구와 함께, 연료전지 동작 중 물관리가 되지 않아 GDL(가스확산층) 내의 기공이 막혀 연료전지 성능이 저하되는 현상을 개선하기 위한 연구^{4,5)}와 분리판 설계를 통해 가스의 확산을 조절하여 성능을 높이는 연구⁶⁾등도 함께 진행되고 있다.

본 연구는 분리판에 관한 연구이며, 그 중 baffle을 유로에 추가하는 경우에 관한 연구이다. baffle과 연관된 기존의 연구 결과들을 살펴보면 아래와 같다.

연료전지 내부에 flooding 현상이 발생하는 경우, 고분자 전해질 막과 기체 사이의 반응을 억제하여 출력을 떨어뜨리는 현상을 일으키기 때문에 연료전지의 유동 개선을 위한 분리판 설계에 관한 연구가 진행되고 있다.⁶⁾

Nguyen⁷⁾은 최초로 interdigitated형 채널 구조를 연구하였다. 기존의 기체의 확산에 의존한 parallel형과 serpentine 형태의 유로에 채널 끝을 baffle로 막아서 기체의 확산효과에 의한 강제 대류효과를 향상시켰다. Baffle에 의해 유로가 막히면서 기체는GDL(Gas Diffusion Layer)로 흘러 들어가고, 이러한 현상으로 인하여 반응기체의 전단력으로 인하여 물을 제거하는 능력이 향상되었다. 동시에 채널로부터 촉매층까지 많은 양의 반응기체가 도달할 수 있다. Liu et al.⁸⁾은 2차원 유동해석을 통하여 산소극에 설치한 FBB(Fully-Blocked Baffle)의 개수와 간격에 따른 전류밀도와외의 관계를 연구하였다. 해당 연구를 통해서, 저전압 일 때 Baffle 아래에서 전류밀도가 크게 향상되었고, Liquid

water effect가 전류밀도에 큰 영향을 준다는 것을 설명하였다. Soong et al.⁹⁾은 2차원 해석을 통해 유로가 완전히 막혀 있지 않은 PBB(Partially-Blocked Baffle)의 영향을 확인하기 위해 baffle과 GDL의 사이의 간격과 GDL의 다공률 (porosity) 및 압력손실과의 관계를 설명하였다. Wang et al.^{10,11)}은 baffle이 없는 SFF(serpentine flow field)와 SBFF(serpentine-baffle flow field)의 비교를 통해 성능향상을 측정 하였다. 또한, parallel 구조와 interdigitated 구조 간의 성능 변화와 물 제거에 관한 연구를 하였다. Yan et al.¹²⁾은 serpentine 구조에서 출구의 크기를 축소시켜 fuel cell 성능이 향상됨을 확인하였다.

이러한 연구 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 평행류 채널(parallel channel)에서 FBB(Fully-Blocked Baffle)를 적용하는 것에 초점을 맞추었다. 유체의 흐름 방향과 유체의 속도가 유로 안에 존재는 baffle의 위치에 따라 출력에 어떠한 영향을 받는지 전산해석을 통해서 경향성을 연구하였다. 전산해석은 실험설계 방법 중 완전요인실험법을 사용하여 실험인자의 수준(level)을 바꾸어가며 모든 경우의 수를 해석하였다. 인자(factor)의 주효과(main effects) 및 상호작용(interactions)에 대한 분석을 통해서 출력향상에 영향을 주는 인자를 확인 해 보았다.

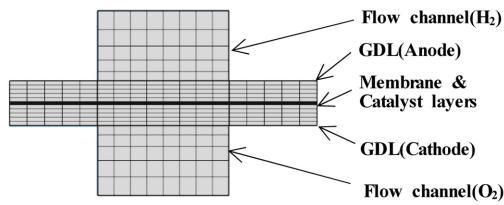
2. 배경지식 및 실험방법

2.1. 해석모델에 대한 배경지식

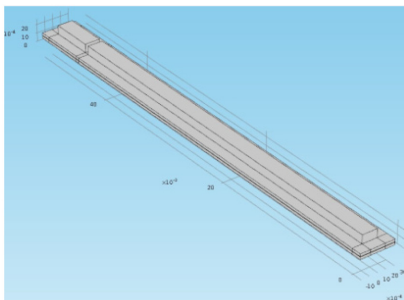
전산해석을 위한 domain 영역은 전해질막(membrane)을 중심으로 anode와 cathode 각각의 촉매층(catalyst layer)과 가스 확산층(Gas Diffusion Layer), 그리고 수소 및 산소 유로(channel)로 구성되어 있으며, 분리판과 GDL과의 접촉상태와 같은 기타 요인은 모두 동일한 조건으로 가정하여, 전산영역의 사이즈 축소를 위해 분리판 형상은 배제 하였다. Fig. 1에 domain 영역에 대한 형상을 명기하였다. Table 1은 domain 설계 치수를 정리하였다.

Mesh는 일정한 값을 얻기 위해서 free mesh를 사용하지 않았으며, sweep 방식을 이용하여 수량을 조절해 가며 mesh 작업을 하였고, mesh의 형상은 quadrilateral hexahedrons 구조를 갖도록 하였다.

PEMFC의 반응식은 아래와 같다.

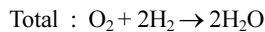
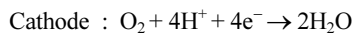
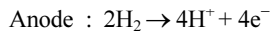


a) The shape of a cut end



b) The shape of domain which has a baffle at P02

Fig. 1. The domain shape for the numerical analysis.



물질 수송 현상에 대한 상세 수식은 상용코드인 COMSOL multiphysics을 사용하였다. 이 수식의 주요 지배방정식은 질량보존의 법칙, 에너지보존의 법칙, 물 이동현상 및 열전달 방정식을 사용 하였다.¹³⁾

또한 수소의 이론상 필요유량은 실험실에서 사용하고 있는 0.6 V 기준 0.4[W/cm²] (약 660 mA/cm²) 출력력을 갖는 25 cm² MEA를 사용하는 것을 가정하고, 아래 수식 (1)¹⁴⁾을 이용하여 계산하였다. 재료의 물성치와 초기조건 및 경계조건은 Table 2, Table 3 및 Table 4에 정리하였다.

$$H_2\text{usage} = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P}{V_c} [kg/s] \quad (1)$$

마지막으로, 연구에서 다음과 같은 가정 하에 전산 해석을 하였다.

1. 연료전지는 정상상태 운전을 한다
2. 중력영향은 무시한다.
3. 반응기체는 층류이며, 비압축성이다.
4. 연료전지 channel 온도는 일정하다.
5. 수소와 산소는 모두 이상기체이며, 상변 화는 없다.
6. 확산층, 촉매층, 전해질막은 등방성이며 균일하다.
7. 전해질막은 완전가습 되었다.

Table 1. Parameters and value for design of domain

Description	Value	Units
Cell length	0.05	m
Channel height	0.001	m
Channel width	0.0018	m
Rib width	0.0012	m

Table 2. Material parameters and value

Description	Value	Units
GDL porosity	0.45	-
GDL permeability	1.2×10^{-11}	m ²
GDL electric conductivity	82	S/m
Porous electrode thickness	7×10^{-6}	m
Permeability of porous electrode	2.4×10^{-12}	m ²
Membrane conductivity	19.42	S/m
Membrane thickness	12.5×10^{-6}	m

Table 3. Boundary condition

Description	Value	Units
Boundary electric potential	0.35~0.9 (step:0.05)	V
Velocity field at wall, u(x,y,z)	(0,0,0)	m/s
Exit pressure	0 (gauge pressure)	Pa

Table 4. Initial condition

Description	Value	Units
Cell temperature	333.15	K
Reference pressure	1	atm
Electrolyte potential	0	V

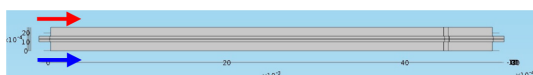
2.2. 실험설계(DOE)

본 연구의 목적은 유로에 baffle 있을 때 유체와의 특성을 파악하는 것이므로, ‘Baffle 개수’, ‘유체 속도’ 및 ‘유체흐름 방향’을 실험설계 인자로 선정하고, 다른 인자가 될 수 있는 물성값은 한 값으로 고정 하였다. 실험 인자의 수준을 baffle의 개수는 4 수준, 유체의 속도는 2 수준, 유체의 흐름 방향은 2 수준으로 정하고, 완전요인실험법¹⁵⁾의 직교좌표를 사용하여, 주 효과, 상호작용 및 회귀분석¹⁶⁾을 할 수 있도록 실험설계법에 주어진 조건을 모두 해석하였다.

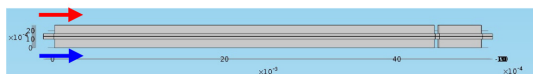
Baffle의 위치는 50 mm의 유로를 5 mm 단위로 10 구간으로 나누고, Fig. 2에 우측부터 1번 구간(P01, Position 01)으로 정하여 P01에서 P10까지 구간을 구분 해 주었다. 본 해석에서는 2번째 구간(P02)에 baffle이 하나 있는 경우, 6번째 구간 (P06)에 baffle이 하나 있는 경우 및 2번째와 6번째 구간 (P02-P06)에 baffle이 2개 존재하는 경우를 시뮬레이션 하였다. Baffle의 사이즈는 0.5 mm 두께를 가지며, 각 구간별

baffle의 위치는 우측 끝에 위치 시켰다. 마지막으로 Fig. 2에 화살표를 이용하여 위쪽(적색) 화살표에 수소, 아래쪽(청색) 화살표에 산소의 흐름 방향을 표시하여 inlet과 outlet의 위치를 표시하였다.

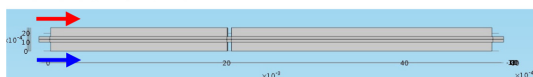
반응기체의 유량은 유로의 면적이 일정하므로 입구 유속으로 표현이 되었고, 2[m/s]는 이론상 필요한 유량을 의미하며, 9[m/s]는 과급유량을 의미한다.



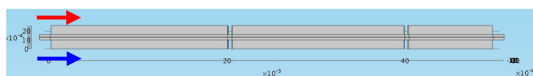
a) Direction of parallel flow and shape of channel without a baffle



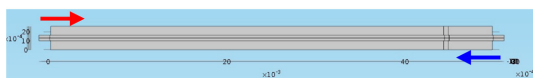
b) Direction of parallel flow and shape of channel with a baffle at P02



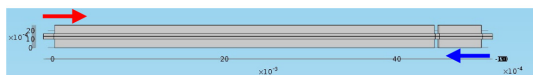
c) Direction of parallel flow and shape of channel with a baffle at P06



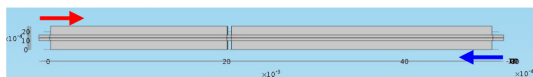
d) Direction of parallel flow and shape of channel with two baffles at P02 and P06



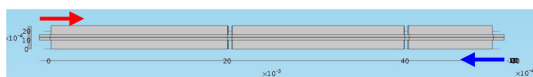
e) Direction of counter flow and shape of channel without a baffle



f) Direction of counter flow and shape of channel with a baffle at P02



g) Direction of counter flow and shape of channel with a baffle at P06



h) Direction of counter flow and shape of channel with two baffles at P02 and P06

Fig. 2. Location of baffle and inlet of gases (Red: Hydrogen, Blue: Oxygen).

유체의 방향이 출력에 영향이 있는지를 확인하여 BOP 설계 시 반영하기 위해서, 유체흐름을 고려한 전산해석을 모두 실시하였다. 유체의 방향은 수소 및 산소의 흐름이 같은 방향으로 진행되는 경우를 parallel flow, 서로 다른 방향에서 들어오는 경우를 counter flow로 명칭을 정하였다.

앞서 설명한 baffle의 위치 4수준, 유속 2수준 및 유체방향 2수준을 완전요인법에 준하여 실험설계하면 Table 5와 같이 정리된다.

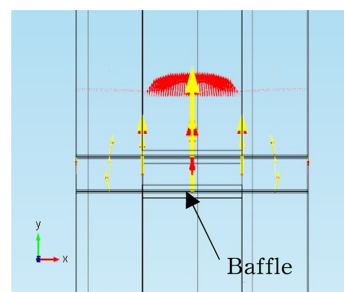
3. 결과 및 고찰

3.1. 전산해석 결과

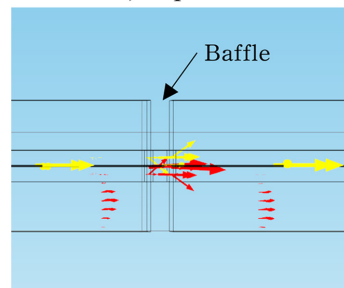
유속을 Fig. 3과 같은 벡터도로 나타내어 수소와 산소의 유동 형태를 확인 수 있었다. 반응기체의 유동 형태를 통해서 유로에 baffle이 존재하더라도 수소와 산소는 GDL층을 통해 연속적으로 흘러갈 수 있음을 확인 하였다.

연료전지의 출력과 전압은 아래 Fig. 4와 같은 형상을 나타냈으며, 최대 출력은 0.4 V 와 0.35 V에서 발생하였다.

시스템 설계 시 최대출력을 설계 스펙으로 사용하는 경우, 고출력 상황에서 부하 변동이 발생하는 경우 시스템이 불안정 해지므로, 연료전지의 출력 비교는



a) Top view



b) Side view

Fig. 3. Velocity vector of the gas at the P02 (Red: Hydrogen, Yellow: Oxygen).

출력의 margin을 고려하여 최대 출력의 80% 정도가 나오는 0.5 V/cell 조건에서의 data를 사용하였다. 데이터는 Table 5의 Result란에 정리하였다.

3.2. 실험설계(DOE) 데이터 분석

실험설계에 사용한 인자들에 대한 각각의 출력에 대한 주효과(main effect)와 상호작용(interaction)에 대한

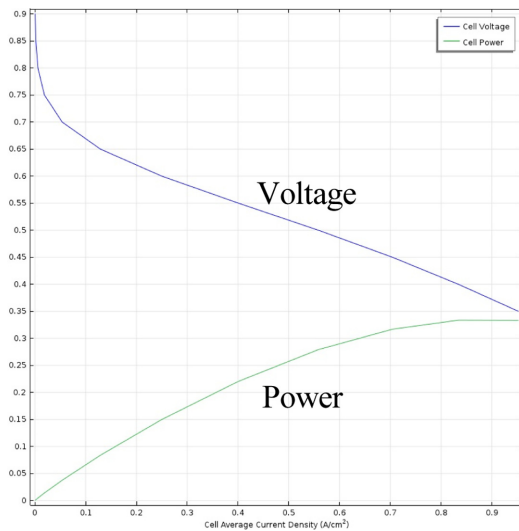


Fig. 4. Graph of I-V and I-P in the condition which is parallel flow and two baffles at P02 and P06.

Table 5. DOE(Design of Experiment) and Result

Experiment factors			Result
Position of Baffle	Fv ¹⁾ [m/s]	Fd ²⁾	Power(0.5V) [W/cm ²]
No Baffle	2	Counter	0.25395
No Baffle	2	Parallel	0.25398
No Baffle	9	Counter	0.26936
No Baffle	9	Parallel	0.26938
P02	2	Counter	0.26665
P02	2	Parallel	0.26685
P02	9	Counter	0.29543
P02	9	Parallel	0.29649
P06	2	Counter	0.26533
P06	2	Parallel	0.26429
P06	9	Counter	0.29198
P06	9	Parallel	0.29005
P02-P06	2	Counter	0.27700
P02-P06	2	Parallel	0.27912
P02-P06	9	Counter	0.31379
P02-P06	9	Parallel	0.31848

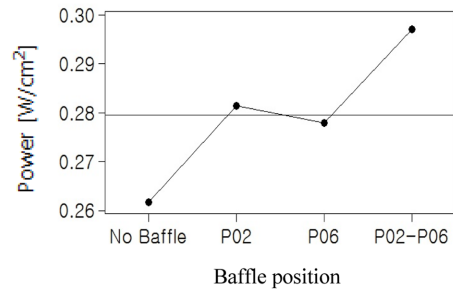
1) Fv: Flow velocity, 2) Fd: Flow direction

분석결과는 Fig.5와 Fig. 6에 정리하였다.

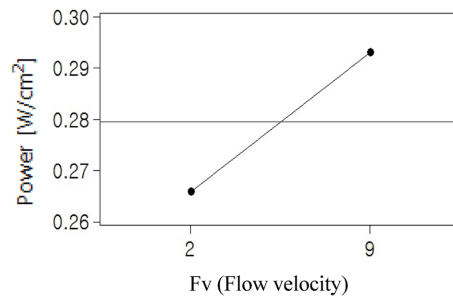
3.2.1 주효과 분석

각 인자별 주효과에 대해 부연설명하면 아래와 같다. ‘Baffle 위치’와 ‘유체 속도(Fv)’ 대한 주효과 그래프의 기울기가 크게 나타나고 있으며, 이는 출력 향상에 해당 인자들의 영향도가 큼을 의미한다. 반면 ‘유체 방향(Fd)’ 주효과 그래프의 기울기는 0에 근사한다. 이는 유체방향이 출력향상과 무관함을 의미한다.

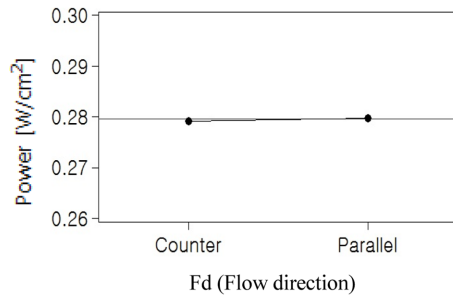
주효과 분석 후, Table 5의 Result를 분석한 결과, baffle의 개수와 유체속도가 증가 할수록 출력이 상승하는 일정한 경향성을 확인할 수 있었으며, 동일



a) Main effect of the baffle's position

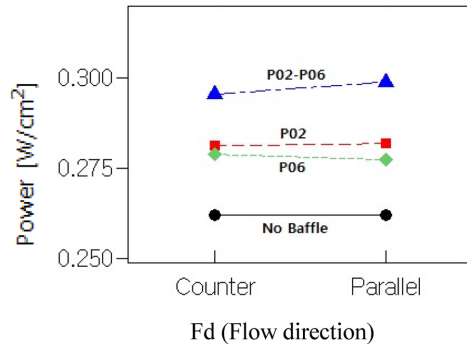


b) Main effect of the Fv(Flow velocity)

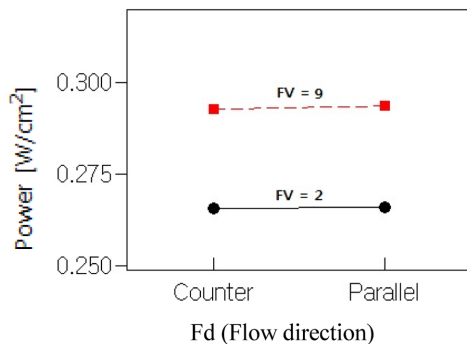


c) Main effect of the Fd(Flow direction)

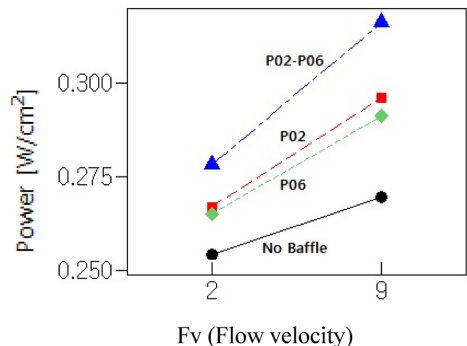
Fig. 5. Graph of the main effect (X axis: Experiment factor, Y axis: Result (Max power)).



a) Interactions effect between Baffle's position and Fd



b) Interactions effect between Fv and Fd



c) Interactions effect between Baffle's position and Fv

Fig. 6. Graph of the interactions effect (X axis: Experiment factor, Y axis: Result (Max power)).

baffle 위치와 유속일 때 유체방향에 따른 출력 차이는 크지 않고, 매우 유사한 값을 가졌다.

유체방향이 출력 향상에 영향은 크지 않으므로 어느 쪽을 선택하여도 무방하다 생각되나, parallel flow 조건에서 미세하게 출력이 더 높게 나왔으므로, BOP 설계 시 Parallel flow 조건이 될 수 있도록 시스템을

구성하는 것이 더 낫다 판단된다.

추가로 counter flow를 배제하고, parallel flow를 기준으로 출력 데이터를 재검토 한 결과 baffle이 출구쪽에 가까울수록 그리고 baffle 개수가 추가 될수록 출력은 상승하는 경향을 가졌다.

3.2.2 상호작용 분석

각 인자간 상호작용은 아래와 같이 총 3가지가 있다.

- ‘유체방향’과 ‘Baffle 위치’ 간 상호작용
- ‘유체방향’과 ‘유체속도’ 간 상호작용
- ‘유체속도’와 ‘Baffle 위치’ 간 상호작용

Fig. 6에서 a)에서 c)까지 위 순서에 맞추어 상호작용 그래프를 차례로 도시하였다.

Fig. 6의 a)에서 ‘유체방향’과 ‘Baffle 위치’ 간 그래프들은 평행선을 그리고 있다. 그리고 Fig. 6의 b)에서도 ‘유체속도’와 ‘유체속도’ 간 그래프들도 상호간 평행선을 그리고 있다. 이는 주효과 분석에서 출력향상에 낮은 영향도를 보였던 인자인 ‘유체방향’이 ‘Baffle 위치’와 ‘유체속도’와의 상관관계에서도 낮은 연관성을 가짐을 의미한다.

반면, 주효과 분석에서 출력향상에 높은 상관관계를 보였던 ‘유체속도’와 ‘Baffle 위치’는 상호간 그래프들이 우상향 방향으로 진행하며 벌어지고 있으므로 인자 상호간에 양의 상관관계를 가지며 인자간 상호작용이 있음을 Fig. 6의 c)의 그래프를 통해서 알 수 있었다. 즉, 유체 속도만 증가시켜 출력을 향상시키는 것 보다 baffle을 추가한 상태에서 유체속도를 증가시키면 더 큰 출력을 얻을 수 있음을 의미한다.

3.3. 최대 출력 데이터의 회귀분석

Table 5의 출력데이터를 이용하여 주효과와 상호작용에서 출력과 높은 상관관계를 보였던 ‘유체속도’와 ‘Baffle 위치’를 이용하여 수식 (2)와 같은 회귀방정식을 도출 하였다. 이때, baffle의 위치는 수치로 표현이 불가하여, baffle의 위치를 baffle개수(Num_Ba)로 변경하여 데이터를 분석하였다. 이로 인하여 P02와 P06에 baffle이 존재하는 경우는 모두 baffle개수가 1개가 되었다. 아래 수식 (2)는 P06의 데이터를 제외하고 수식을 만들었다.

$$Power = 0.24 + (0.0186 \times Num_Ba) + (0.00402 \times Fv) \quad (2)$$

Baffle 위치를 개수로 변경하면서 발생한 문제점을 검증하고자, 유속을 6[m/s]로 수정하고, parallel flow 조건에서 baffle 위치에 따른 4번의 전산해석을 추가로 실시하였다. 해석 결과는 Table 6에 정리하였다.

수식 (2)를 통해서 연산된 값과 전산해석을 통해 나

Table 6. Power data in the condition which is 'Fv = 6'

Num_Ba ¹⁾ [ea]	Fv ²⁾ [m/s]	Power [W/cm ²] with Numerical analysis	Power [W/cm ²] on Regression equation	Error [%]	Remark (Position of Baffle)
0	6	0.26412	0.26680	-1.01	No Baffle
1	6	0.28272	0.28855	-2.06	P02
1	6	0.28272	0.28417	-0.51	P06
2	6	0.30132	0.30724	-1.96	P02-P06

1) Number of Baffle, 2) Fv: Flow velocity

은 출력 data 간의 오차가 3%이내 임을 확인하였다. 즉, 회귀방정식에 대한 검증 결과 양호하며, 수식 (2)을 사용하여도 baffle 개수와 유속이 변하였을 때 어느 정도의 출력이 나올지 유추 가능한 값을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구를 통해서 baffle이 존재하여도 유체는 GDL을 통해 흐를 수 있고 출력이 향상됨을 확인 할 수 있었다.

또한, '유체방향', '유체속도' 및 'Baffle 위치' 중, 연료전지의 출력 향상에 영향을 주는 인자는 '유체속도'와 'Baffle 위치'임을 확인하였다. 추가적으로 '유체속도'와 'Baffle 위치', 각 인자들 간에 상호작용이 존재하므로, baffle을 설치한 상태에서 유체속도가 빨라지면 출력도 더 많이 상승함을 알 수 있었다.

본 연구의 내용을 요약하여 정리하면 아래와 같다.

(1) 단위 parallel channel(평행류 채널)에서 1개 또는 2개의 FBB(Fully-Blocked Baffle)이 존재하는 경우, baffle이 없는 경우 대비하여 출력은 향상 되었다.

(2) Baffle의 개수가 증가하고, 유속(Fv)이 증가 할수록 최대 출력은 상승 하고, 유체의 방향(Fd)은 출력 향상과 연관성이 없었다.

(3) 유체가 같은 방향으로 흐르는 Parallel flow의 경우, baffle이 출구 쪽에 가까울수록, 그리고 baffle 개수가 늘어날수록 출력은 상승하였다.

(4) '유체방향(Fd)'와 'Baffle 위치'를 및 '유체방향(Fd)'과 '유체속도(Fv)'를 간의 상호작용은 나타나지 않았으며, '유체속도(Fv)'와 'Baffle 위치' 사이에서는 인자들 간에 양의 상관관계를 보이며 상호작용을 가졌다.

(5) 모든 수소유량과 baffle의 개수를 전산해석하지 않아도 회귀 방정식으로 예상 출력을 연산할 수 있었다.

후 기

This research was financially supported by the Ministry of Education (MOE) and National

Research Foundation of Korea(NRF) through the Human Resource Training Project for Regional Innovation. (No. 2013H1B8A2032290)

References

1. In-Yup Jeon, Hyun-Jung Choi, Min Choi, et al., 'Facile, scalable synthesis of edge-halogenated graphene nanoplatelets as efficient metal-free electrocatalysts for oxygen reduction reaction', *SCIENTIFIC REPORTS*, 1-7, (2013).
2. Kyungjung Kwon, 'Composition Survey and Analysis of Non-Pt Oxygen Reduction Catalysts for Proton Exchange Membrane Fuel Cells', *J. Korean Electrochemical Soc.(JKES)*, **15**(1), 12-18, (2012)
3. 이슈퀘스트 편집부, '2013 연료전지 및 연료전지차 기술 시장 현황과 전망', *이슈퀘스트*, 98-246, (2013)
4. Ahyoung Woo, Dowon Cha, Bosung Kim, and Yongchan Kim, 'Numerical Simulation of Water Transport in a Gas Diffusion Layer with Microchannels in PEMFC', *J. Korean Electrochemical Soc.(JKES)*, **16**(1), 39-45, (2013)
5. Kap-Seung Choi, Byeong-Cheol Bae, Kiwon Park, and Hyung-Man Kim, 'Design of Serpentine Flow-field Stimulating Under-rib Convection for Improving the Water Discharge Performance in Polymer Electrolyte Fuel Cells', *J. Korean Electrochemical Soc.(JKES)*, **15**(2), 74-82, (2012)
6. Changmook Oh, 'Effects of baffle through the interdigitated flow channel in PEM fuel cell', 6-68, Korea University, Seoul, (2009)
7. Trung V. Nguyen, 'A gas distributor design for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells', *Journal of Electrochem. Soc.*, **143**(5), (1996)
8. Hui-Chung Liu., 'Effects of baffle-blocked flow channel on reactant transport and cell performance of a proton exchange membrane fuel cell', *Journal of Power Sources*, **143**, 125-133, (2005)
9. C. Y. Soong., 'Anaysis of reactant gas transport in a PEM fuel cell with partially blocked fuel flow channels', *Journal of Power Sources* **143**, 36-47, (2005)
10. Wang Xiao-Dong., 'Novel serpentine-baffle flow field design for proton exchange membrane fuel cells', *Journal of Power Sources* **173**, 210-221, (2007)
11. Xiao-Dong Wang., 'Effects of flow channel geometry on

- cell performance for PEM fuel cells with parallel and interdigitated flow fields', *Electrochimica Acta*, **53**, 5334-5343, (2008)
12. Wei-Mon Yan., 'Effects of serpentine flow field with outlet channel contraction on cell performance of proton exchange membrane fuel cells', *Journal of Power Sources* **178**, 174-180, (2008)
13. Chang Kwon Park, In Su Jo, and Byeong Soo Oh, 'A Study on the Mass Flow Effects to the Performance of PEMFC', *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*(2007.12), **18(4)**, 422-431, (2007).
14. James Larminie, Andrew Dicks, 'Fuel Cell Systems Explained, Second Edition', *JOHN WILEY & SONS.LTD*, 496-503, (2003).
15. 한상태, 강현철, 허명희, 'SPSS를 이용한 실험설계와 분석', *SPSS 아카데미 교재 출판*, 1-102, 데이터솔루션, 서울, (2004).
16. 백장선, 정윤경, 'SPSS를 이용한 기술경영 통계학', 239-254, 자유아카데미, 광주, (2011).