

Six sigma 기법을 이용한 PEMFC Cathode 유로설계 최적화

김선화[†]

*상지대학교 신에너지·자원공학과

Optimization of Cathode Flow Field Design for a PEMFC with Six Sigma Technique

SUNHOE KIM[†]

**Dept. of New Energy & Resource Engineering, College of Science & Engineering,
Sangji Univ., 660, Usan-dong Wonju-Si, Gangwon-do, 220-702, Korea*

ABSTRACT

Six sigma method was applied for optimization of flow field design of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). The optimization between number of channel and channel/rib width was suggested in this paper with six sigma method. With the help of six sigma design of experiment (DOE) the number of experiments may be reduced dramatically. The fuel cell channel design optimization with results of these experiments with a 100 cm² serpentine flow field indicates a optimization data for a given constant operating conditions.

KEY WORDS : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Six sigma(식스시그마), Residential fuel cell(가정용 연료전지), Fuel cell bipolar plate(연료전지 분리판)

1. 서 론

연료전지는 그 자체의 청정성과 고 효율성으로 인하여 현재 각종 연구 분야에 각광 받고 있는 미래의 에너지원이다. 그 중 고체고분자형 연료전지(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)는 여타의 여러 가지 연료전지 중에서 가장 그 기술적 성숙도가 가장 높은 기술 방식으로서 90℃ 이하의 낮은 운전온도에 따른 우수한 시동 및 운전특성과

이동형전원에서 수송용 그리고 분산발전시스템 까지 응용될 수 있는 폭넓은 응용분야 때문에 현재의 기술로서는 가장 상용화에 근접해 있는 기술이라 할 수 있다. 또한 전기발생의 부산물은 순수한 물로써 공해를 유발시키지 않기 때문에 미래의 청정에너지 기술로서 각광받고 있으며 현재 자동차 업계 및 가정용 연료전지 분야에서 연구가 활발히 진행 중에 있다¹⁻⁶⁾. 이 중 가장 핵심적인 부분이라고 할 수 있는 연료전지의 부품은 stack 이라고 할 수 있는데 stack의 설계에는 여러 가지의 기술이 요구된다. 그 중 분리판에서의 gas 유로의 설계는 gas의

[†]Corresponding author : sunhoekim@sangji.ac.kr

[접수일 : 2009.10.26 수정일 : 2009.12.4 게재확정일 : 2009.12.15]

분포, 압력손실 그리고 접촉저항 등의 변수들 간의 최적화가 요구 된다. 이를 위한 여러 가지 실험과 simulation의 결과로서 연료전지의 유로의 최적화에 관한 연구가 진행되어 왔다⁷⁻⁹⁾.

Gas 유로의 설계에 있어 유로의 도입부와 출구구 부간의 압력차가 크다면 liquid water의 배출이 용이하고 유로에서 전극까지의 gas의 diffusion 이 용이해 질 수 있으나 system의 설계에 있어서 고효율의 공기 공급장치를 사용하게 되어 그에 따른 부품의 cost의 증가와 운전상의 높은 소비전력을 요구하게 된다. 반대로 압력강하가 너무 낮은 경우는 수분의 배출이 어렵고 또한 전극방향으로의 공기의 확산이 어렵기 때문에 stack 성능의 불안정성을 야기하게 되어 결과적으로 system의 문제를 야기할 수 있기 때문에 압력강하와 연료전지 성능의 핵심 인자라 할 수 있는 유로의 설계상의 최적화가 요구된다.

Six sigma는 초기 공장공정의 불량률을 줄이기 위한 최적화로 사용되었는데, six sigma는 진화를 거듭하여 현재에는 연구개발 분야에서도 최적화를 위해 사용 중이다. 본 연구에서는 R&D six sigma를 사용하여 연료전지의 최적화를 찾으려 하고 있다. 위에서 언급한 변수인 유로의 개수와 폭을 기준으로 하여 그에 관한 결과인 성능(cell voltage)과 압력강하 간의 최적점을 찾으려 한다. 본 연구에서의 목표는 40mbar 이하의 압력강하와 전류밀도 200 mA/cm²에서의 0.7V이상의 성능이고, 이를 위하여 유로의 개수와 폭간의 최적점을 six sigma의 기법 중 design of experiment(DOE)를 이용하여 연료전지 분리판 유로의 최적점을 찾는 것 이라고 할 수 있다. 이를 위해 연료전지 stack의 최적화에 필요한 최소한의 실험 결과를 이용하여 최적화를 이루는 과정을 살펴보도록 한다. 단위전지를 이용하여 유로설계상의 핵심적인 요소인 유로의 폭과 개수의 최적화를 진행하려 한다.

Six sigma를 이용한 최적화에 있어서 언뜻 보기에는 복잡한 통계적 지식이 필요한 것으로 판단되지만, six sigma의 학문적 이해를 위한 것이 아니라면, 실험상의 최적화를 위하여 간단한 minitab[®]의 조작만으로도 최적점을 구할 수 있는 과정을 본 연

구에서 소개 하도록 한다¹⁰⁾.

2. 실험

2.1 측정자에 따른 성능측정특성

Single cell의 조립에 있어 조립하는 사람마다 각자의 조립 습관에 따라 체결압 등의 조건이 달라질 수 고 이의 결과로 single cell의 성능이 조금씩 변할 수 있다. 또한 압력강하의 경우 측정자의 측정 습관에 따라 읽음의 미세한 차이를 생각할 수 있다. 그러므로 동일 cell을 2명의 실험자가 체결하여 5가지의 다른 조건에서 그 때의 cell의 성능과 압력강하를 각각 2회씩 측정하여 측정자에 따른 성능 특성 차이를 압력과 성능 대하여 계수gage R&R로 측정해보았다. 이 때 사용된 cell은 5가지의 다른 전류밀도 상에서 그 때의 전압과 압력강하를 측정하였다. 실험자별 습관에 따른 영향성을 파악하기 위하여 각기 다른 두 사람이 다섯 가지의 다른 전류밀

#	C1	C2	C3	C4
	number	operator	Voltage	pressure drop
1	1	1	0.757	19.9
2	1	1	0.754	20.5
3	2	1	0.740	22.8
4	2	1	0.739	22.5
5	3	1	0.754	22.2
6	3	1	0.756	22.6
7	4	1	0.741	20.8
8	4	1	0.742	21.0
9	5	1	0.705	25.0
10	5	1	0.707	25.2
11	1	2	0.755	20.1
12	1	2	0.757	20.3
13	2	2	0.739	22.8
14	2	2	0.737	22.8
15	3	2	0.756	22.4
16	3	2	0.754	22.4
17	4	2	0.744	21.0
18	4	2	0.740	20.3
19	5	2	0.705	25.2
20	5	2	0.706	24.8
21				

Fig. 1 Captured worksheet of gage R&R input values by operators and experiments.

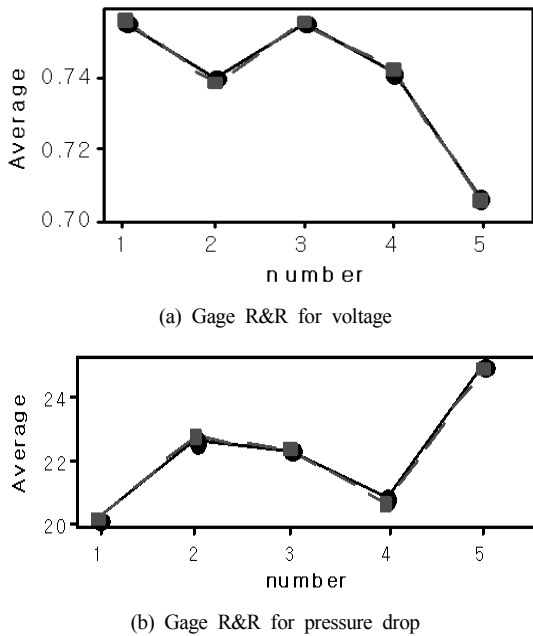


Fig. 2 Gage R&R result by operators and experiment numbers.

도 하에서의 전압과 압력강하를 각각 2회씩 측정된 결과를 입력하여 실험자에 따른 측정을 실시하였다. 그 입력과정을 minitab® worksheet에 Fig. 1과 같이 나타내었다. Fig. 1에서 number는 각기 다른 운전 전류밀도를 의미하고, operator는 실험자를 의미한다. 그에 따른 결과인 voltage와 pressure drop으로 정리 되어 있다.

그에 대한 결과를 분석한 결과 Fig. 2에 나타난 것과 같이 시험횟수와 사용자간의 영향성이 거의 없는 것으로 나타났으므로 본 실험에서 실험자에 따른 장치의 영향성은 무시할 수준이라고 할 수 있다.

2.2 실험설정

본 연구에 있어서 유로의 개수와 폭에 따른 각기 다른 시료의 사용에 따라 나머지의 운전조건은 정량화된 비교가 가능할 수 있도록 일반화가 요구 된다. 본 실험에 있어서 cell의 온도는 70°C이고 anode와 cathode의 가습은 각각 100%RH로 모든 시료에 동일하게 적용된다. 이 때 기준으로 삼아야 하는 운전 전류밀도는 200mA/cm²이며, 연료와 공기의 이

Table 1 Characteristic and control values

Results	Name	Unit	Target	Factor Design	
	Cell Voltage	V	> 0.7	Factor	2
Pressure drop	mbar	< 40			
Control factor	Name	Range	Reason	Repeat	1
	Channel Number	8, 12	Pressure drop		
	Channel width	0.8 mm 1.2 mm	Diffusion, Contact resistance	Number of experiments	8

용률은 각각 70, 50%로서 그 유량은 각각 0.21, 0.72 L/min 이었다. 이런 동일한 조건하에 유로의 개수가 다른 두 가지(8, 12개)의 cell과 폭이 다른 두 가지의(0.8, 1.2mm) cell, 즉 2인자 2수준(4가지 조합)의 반복실험을 통하여 유로의 개수와 폭간의 최적화를 도모하였다.

2.3 실험배치

실험의 진행은 2인자 2수준으로 진행되어 2번 반복했다. 결과적으로 4번의 실험이 두 번 반복되어 총 실험횟수는 8번이 되고 모든 실험은 무작위로 진행되었으며, minitab®의 random 기능을 이용하여 무작위의 실험순서를 정하였다. 본 연구에서의 목표는 200mA/cm²의 전류밀도 하에서 압력강하는 줄이고(40 mbar 이하) cell voltage는 증가(0.7V이상)시킬 수 있는 최적점을 구하는 것이고, 그를 위한 요인과 인자의 나열은 Table 1에 특성치와 제어인에 관하여 나열하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연료전지의 성능 비교

2인자 2수준으로 진행되어진 실험 결과는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타냈다. 모든 실험 가능한 전류밀도대에서의 최적화를 기대하기 보다는 목표로 하고 있는 운전영역대인 200mA/cm²에서의 전압과 압력강하를 8번의 모든 실험에서 비교해 보았다. Fig. 3는 전류밀

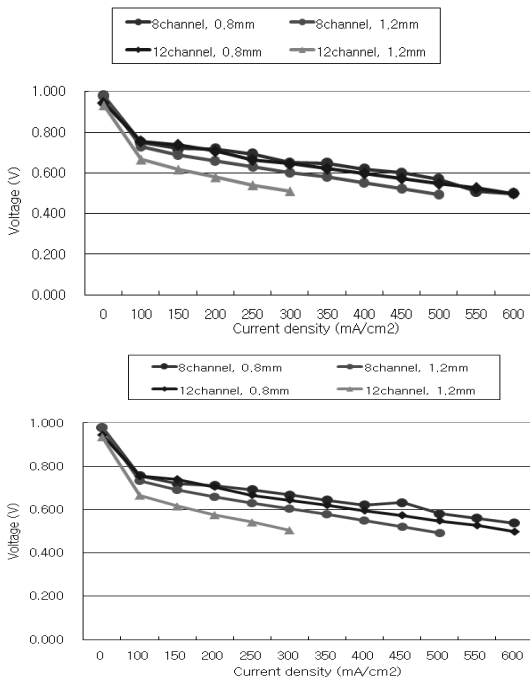


Fig. 3 Cell voltage result by channel types.

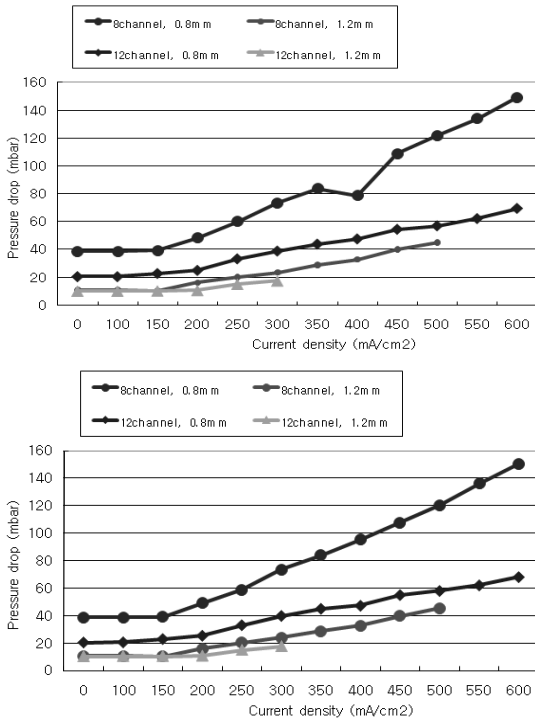


Fig. 4 Pressure drop result by channel types and repetition.

도 변화에 따른 전압의 변화를 나타내었고 또한 반복된 실험의 결과와 함께 나타내었다. Fig. 4역시 전류밀도와 입출구간의 압력강하를 나타내었는데 Fig. 3의 경우와 마찬가지로 반복의 결과와 함께 비교 하였다. 200mA/cm²에서의 전류밀도와 압력강하의 값들을 분석대상으로 minitab[®]을 이용하여 분석하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 두 번의 실험결과를 비교하였다 첫 번째 그림과 두 번째 그림은 거의 유사한 결과를 보여준다. 이 그림에서 보듯이 전압과 압력강하의 곡선은 두 번의 실험 결과에 재현성을 보였다. 8channel, 0.8mm의 경우, 450mA/cm²에서 조금 다른 값이 나왔지만 실제의 최적화를 위한 범위가 아니며, 실험상의 오차로 보이기 때문에 이 부분은 무시하도록 한다. 전류밀도 200mA/cm²에서의 전압과 압력강하의 값을 기준으로 삼아 진행된 최적화의 작업에 있어서 우선적으로 분석해야 할 것은 유로의 폭과 유로의 개수간

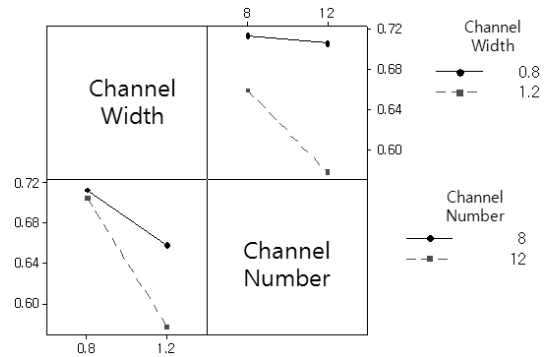


Fig. 5 Interaction of channel numbers and width to cell voltage.

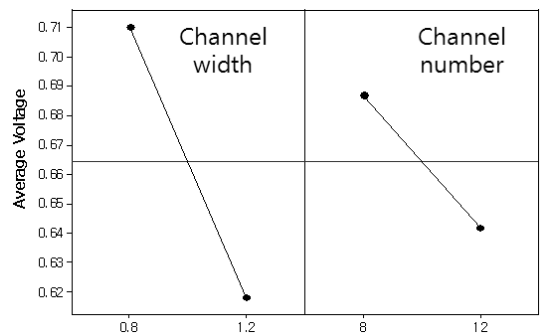


Fig. 6 Cell voltage main effect plot.

의 상호영향작용이 있는지에 관한 분석이 필요하다.

Fig. 5는 cell voltage에 대하여 두 가지 인자의 상호 영향성에 관한 설명을 하고 있다. 유로의 폭과 유로 개수사이의 변화치가 상호간 교차되지 않기 때문에 두 인자간의 상호작용(교호작용)은 무시할 수준으로 판단할 수 있다.

Fig. 6은 두 가지의 인자 중 cell voltage에 영향을 보다 크게 미치는 인자가 무엇인지 설명하고 있다. 유로의 폭이 바뀔때 따라 영향을 받는 cell voltage는 그 영향의 폭이 0.09V로서 유로 개수가 미치는 영향인 0.05V보다 그 변화폭이 크다고 할 수 있으며 cell voltage에 주로 영향을 미치는 인자는 유로의 폭이라고 할 수 있다.

또 다른 목표치인 압력강하에 있어서 유로폭과 유로의 개수사이의 상호작용은 Fig. 7에 설명되어

있다. 유로 폭과 유로 개수간의 상호작용은 무시할 수준으로 판단된다. 또한 Fig. 8에 나타났듯이 유로의 폭이 유로의 개수보다 압력강하에 보다 큰 영향을 미친다고 설명될 수 있다.

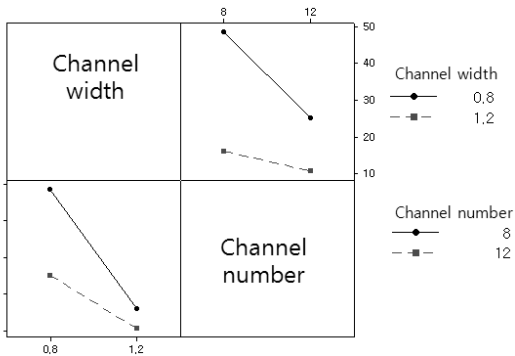


Fig. 7 Interaction of channel numbers and width to pressure drop.

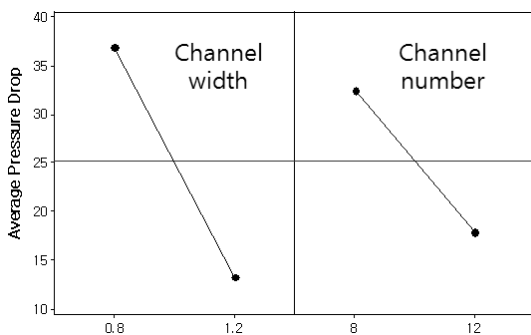


Fig. 8 Pressure drop main effect plot.

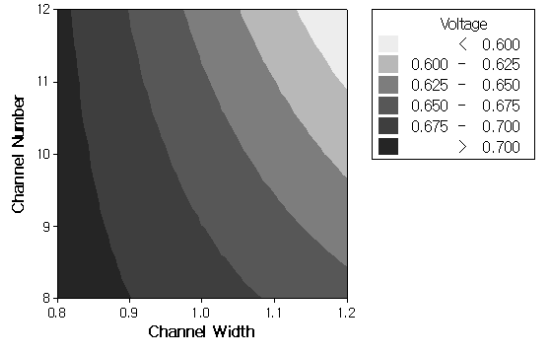


Fig. 9 Contour plot of cell voltage by channel number and width.

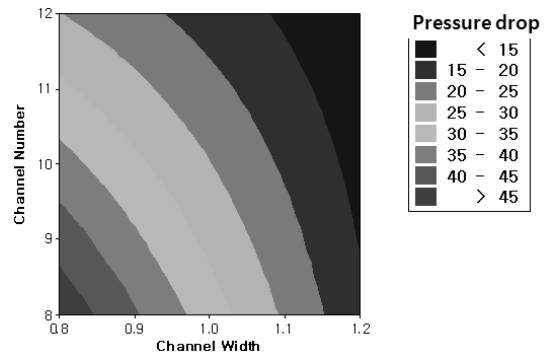


Fig. 10 Contour plot of pressure drop by channel number and width.

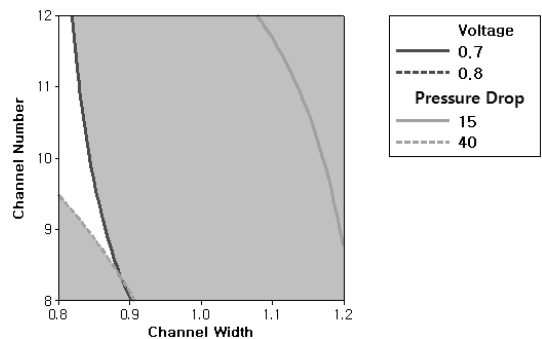


Fig. 11 Overlaid contour plot of voltage and pressure drop.

Fig. 9는 유로의 개수와 유로의 폭이 cell 전압에 미치는 영향을 등고선으로 나타냈다. 이 그림에서 보듯이 유로의 개수와 폭은 작을수록 더 좋은 cell voltage를 나타낸다.

Fig. 10은 유로의 개수와 유로의 폭이 압력강하에 주는 영향을 등고선으로 나타냈다. 전압에의 영향성에서와는 반대로 압력강하는 유로의 개수가 많을수록, 유로의 폭이 넓을수록 압력강하는 작게 나타난다. 최적의 유로 개수와 유로폭간의 최적점이 이 두 등고선을 합쳐진 지점이라고 할 수 있다.

Fig. 11은 유로의 폭과 개수가 cell voltage와 압력강하에 미치는 영향에 관한 등고선의 겹쳐진 형태이다. 그림의 왼쪽 중단부터 중단사이의 흰색 부분이 목표치를 도달할 수 있는 최적점이다. 이 그림

에서 유로의 개수는 10, 11, 12개 그리고 유로의 폭은 약 0.80mm 이상 0.82mm 이하에서 최적점이라고 할 수 있다.

Fig. 12는 최적화된 유로의 monte carlo 모델링의 결과이다. cell voltage의 목표치인 cell voltage 0.7V 이상은 만족시켰으며, 실제의 시스템에서 운전하는 경우 0.6V 이하의 voltage값은 불량으로 처리 되므로 0.6V를 lower limit으로 규정하였다. 또한 요구되어지는 cell voltage 값은 크면 클수록 유리하므로 upper limit은 규정하지 않았다.

Fig. 13은 최적화된 유로의 monte carlo 모델링 결과이다. 압력강하의 목표치인 40mbar 이하를 만족시켰으며, 실제로 시스템이 요구하는 압력강하는 50mbar 이상은 불량으로 처리하므로 50mbar 를 불량으로 규정하였다. 요구되어지는 값은 현재의 요구수준으로서는 작을수록 유리하므로 lower limit은 규정하지 않았다.

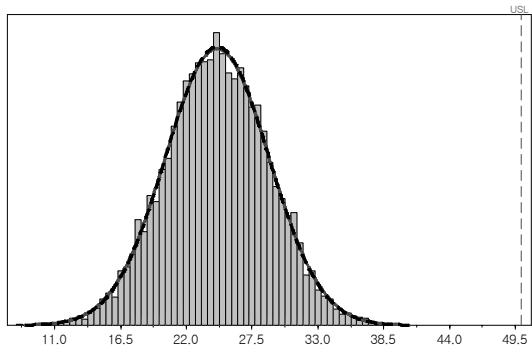


Fig. 12 Monte Carlo simulation for cell voltage for optimized channel number and width.

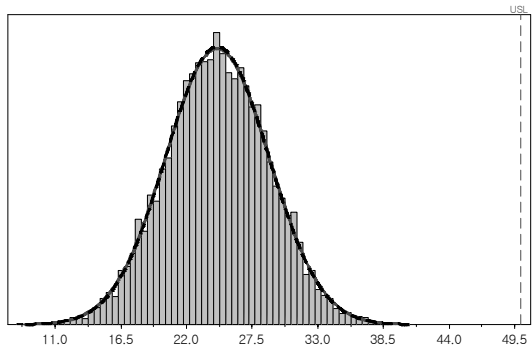


Fig. 13 Monte Carlo simulation for pressure drop for optimized channel number and width.

4. 결 론

Six sigma의 기법중 하나인 design of experiment 를 이용하여 연료전지 유로의 최적화를 시도해본 결과, 2인자 2수준의 반복실험을 통하여 200mA/cm²의 전류밀도 하에서 압력강하는 줄이고(40 mbar 이하) cell voltage는 증가(0.7V 이상)시킬 수 있는 최적점이 도출 되었다. 그 최적점은 유로의 개수 10, 11, 12 개 그리고 유로의 폭은 0.80mm 이상 0.82mm 이하에서 target을 만족할 수 있었다.

본 연구는 six sigma 를 사용하여 많지 않은 실험 결과를 통하여 통계적으로 최적점을 찾는 과정을 제시하고 있다. 향후 유로의 깊이를 포함한 여러 가지 인자들의 최적화를 진행할 계획이다. 이뿐만이 아니라 가습, 이용률 등의 본 연구에서 다루지 않은 변수들의 최적화의 구현이 용이할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2008년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것임.

참고 문헌

- 1) S. S. Yu, Y. D. Lee, D. J. Hong, K. Y. Ahn :
“A Dynamic Simulation Model for the Operating Strategy Study of 1 kW PEMFC”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 19, No. 4, 2008, pp. 313-321.
- 2) Y. W. Noh, S. H. Kim, K. S. Jeong, I. J. Son, K. I. Han, B. K. Ahn : “Modeling and parametric studies of PEM fuel cell performance”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 19, No. 3, 2008, pp. 209-216.
- 3) Y. M. Kim, J. H. Lee, S. J. Im, B. K. Ahn, T. W. Lee : “PEMFC Characterization Study by in-situ Analysis Method”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 20, No. 3, 2009, pp. 208-215.
- 4) T. Nguyen, and R. White : “A water and heat management model for proton exchange membrane fuel cells”, Journal of Electrochemical Society, Vol. 140, pp. 2178-2186.
- 5) S. Y. Hwang, M. J. Kim, J. H. Lee, W. Y. Lee : “A Simulation based Study on the Economical Operating Strategies for a Residential Fuel Cell System”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 20, No. 2, 2009, pp. 104-115.
- 6) W. Y. Lee, J. K. Jeong, S. P. Yu, S. K. Um, C. S. Kim : “Operation Performance of a Polymer Electrolyte Fuel Cell Cogeneration System for Residential Application”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 16, No. 4, 2005, pp. 364-371.
- 7) H. S. Kim, K. T. Kang, Y. K. Choi, S. D. Lee : “Research Papers : Numerical and Experimental Analysis of Pressure Drop in a Bipolar Plate channel of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 15, No. 2, 2004, pp. 159-165.
- 8) S. Shimpalee, D. Spuckler, J. W. Van Zee : “Prediction of transient response for a 25-cm² PEM fuel cell”, Journal of Power Sources, Vol. 167, Issue 1, 2007, pp. 130-138.
- 9) W-k. Lee, C-H. Ho, J. W. Van Zee, M. Murthy : “The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell”, Journal of Power Sources, Vol. 84, Issue 1, 1999, pp. 45-51.
- 10) D. K. Park : “Design of Experiment using minitab”, Gijeon, 2008, pp. 12-20, 63-81.