

유한요소법을 이용한 고분자 전해질 연료 전지 기체 확산층의 응력 분포 연구

김철현^{1,3} · 손영준^{2†} · 박구곤² · 김민진² · 이종욱³ · 김창수² · 최유송⁴ · 조성백⁴

¹과학기술연합대학원대학교 신에너지기술전공, ²한국에너지기술연구원, ³호남석유화학(주), ⁴국방과학연구소

The Stress Distribution Analysis of PEMFC GDL using FEM

CHULHYUN KIM^{1,3}, YOUNGJUN SOHN^{2†}, GUGON PARK², MINJIN KIM², JONGUK LEE³,
CHANGSOO KIM², YUSONG CHOI⁴, SUNGBAEK CHO⁴

¹Advanced Energy Technology, University of Science & Technology, 176 Gajung-dong, 217 Gajungro Yuseong-Gu
Daejeon 305-350, Korea

²Fuel Cell Research Center, Korea Institute Of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-Ku, Daejeon 305-343, Korea

³The 3rd Research Team, Honam Petrochemical Corp, 24-1 Jang-dong, Yuseong-Ku, Daejeon 305-726, Korea

⁴Agency for defense development, chochiwongil 462, Yuseong-Ku, Daejeon 305-152, Korea

Abstract >> A proper stacking force and assembly are important to the performance of fuel cell. Improper assembly pressure may lead to leakage of fuels and high interfacial contact resistance, excessive assembly pressure may result in damage to the gas diffusion layer and other components. The pressure distribution of gas diffusion layer is important to make interfacial contact resistance less for stack performance. To analyze the influence of design parameter factors for pressure distribution, and to optimize stack design, DOE (Design of Experiment) was used for polymer electrolyte membrane fuel cell stack pressure test. As commonly known, the higher clamping force improves the fuel cell stack performance. However, non-uniformity of stress distribution is also increased. It shows that optimization between clamping force and stress distribution is needed for well designed structure of fuel cell stack. In this study, stack design optimization method is suggested by using FEM (Finite Element Methode) and DOE for light-weighted fuel cell stack.

Key words : PEMFC(고분자 전해질 연료 전지), DOE(실험 계획법), Clamping force(체결 압력), Gasket(가스켓), Gas diffusion layer(기체 확산층), End plate(엔드판)

1. 서 론

연료 전지(Fuel cell)는 수소의 화학 에너지를 전기 에너지로 만들어 주는 시스템으로, 전기 에너지를 생성한 후에도 오염 물질이 거의 나오지 않는다. 질량당

에너지 밀도가 높기 때문에 새로운 화석 연료의 새로운 에너지 대안으로 떠오르고 있다. 연료 전지는 전해질의 종류에 따라 고온형인 용융 탄산염 및 고체 산화물 연료 전지와 저온형인 인산형, 알칼리형 및 고분자형 연료 전지가 있다. 저온형 연료 전지들 중에서 인산형은 분산형 발전 및 발전소용으로 개발되고 있으며 이동 및 수송용으로는 대부분 고분자 전해질 연료 전지를 사용하고 있다.

[†] Corresponding author : yjsohn@kier.re.kr

[접수일 : 2012.5.31 수정일 : 2012.9.12 게재확정일 : 2012.10.26]

Copyright © 2012 KHNES

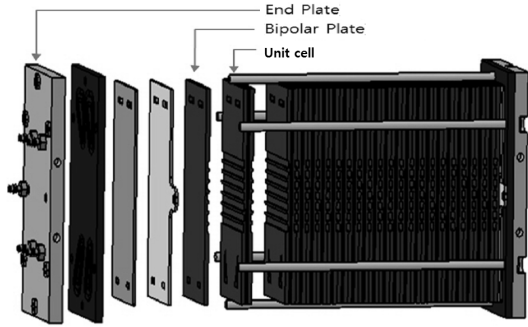


Fig. 1 Fuel cell stack layout

고분자 전해질 연료전지는 다른 종류의 연료전지와 비교하여 작동온도가 낮아 시동시간이 짧고, 전류 밀도 및 출력밀도가 높은 장점이 있다. 그래서 고분자 전해질 연료전지는 단시간에 고출력을 요구하는 자동차의 동력원 및 가정용 발전 등의 다양한 분야에 응용이 가능한 대체 에너지 시스템이다.

연료전지 성능은 전지판의 전류밀도가 균일하게 최대로 발생될 때 우수한 성능을 나타낼 수 있다. 또한, 연료전지의 전류 밀도는 분리판 내부 유동과 밀접한 연관을 갖고 서로 영향을 미친다¹⁾.

고분자 연료전지를 자동차나 가정용 발전기로 사용하기 위해서는 단위전지로는 전압이 매우 낮아서 시스템의 전압(V)을 높이기 위해서 여러 장을 쌓아 올리거나 셀당 생산 전류(I)를 늘리기 위해서 활성면적을 넓게 설계하여 원하는 출력을 얻을 수 있다. 고분자 연료전지는 여러장의 단위셀이 적층된 형태로 Fig. 1과 같이 엔드판(EndPlate), 분리판(Bipolar plate), 막전극접합체(Membrane), 기체확산층(Gas Diffusion Layer), 가스켓등으로 구성되어있다.

많은 수의 단위전지 셀들을 체결하기 위해서는 그만큼 큰 힘으로 압착되어 체결이 된다. 이 힘이 적당하지 않으면 연료누출 및 섞임 현상이 발생하게 되고, 과도한 체결력은 기체확산층과 막전극접합체 등의 스택 구성 품에 손상을 주어 성능에 영향을 미치게 된다.

샌드위치와 같은 구조로 체결이 되는 고분자 전해질 연료전지 스택은 외곽에 체결봉을 이용하여 체결

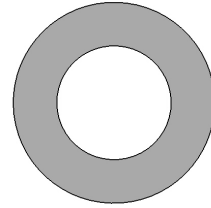


Fig. 2 Specimen for GDL compression experiment

하기 때문에 스택의 중심부와 외곽부의 응력분포 차이가 생겨 내부에 고른 응력을 유지하기가 어렵다.

이런 내부의 응력 불균형은 기체확산층, 막전극접합체, 분리판간의 접촉저항의 불균형으로 인해 저항 손실로 이어지고, 너무 큰 응력 집중은 부품의 파손으로 이어질 수 있다. 또한 분리판과 기체확산층 사이의 고르지 못한 응력분포는 기체확산층의 고르지 못한 채널 침투를 야기해 스택 내부의 기체유동이 고르지 못해 성능 저하로 이어지게 된다²⁾.

본 연구에서는 분리판과 기체확산층 사이에 분포되는 응력경향에 대해서 평가 하였다.

2. 실 험

2.1 가스켓과 기체확산층의 압축실험

고분자 전해질 연료전지 스택의 체결력은 가스켓과 기체확산층이 큰 영향을 미친다.

이 두 부품에 비해 다른 부품들은 강체로 볼 수 있기 때문에 스택의 체결력은 가스켓과 기체확산층을 압축하기 위해 필요한 힘을 계산하여 구할 수 있다. 가스켓과 기체확산층의 압축물성치를 구하기 위하여 Fig. 2와 같은 도넛모양의 4.8cm² 면적을 가지는 시편을 이용하였다³⁾.

가스켓과 기체확산층을 가지고 Fig. 3과 같은 압축실험기를 이용하여 압축실험을 하여 Stress-Strain Curve를 구하였다.

2.1.1 기체확산층의 압축실험

압축실험에 사용한 기체확산층은 SGL Carbon group



Fig. 3 Compression equipment (CPRT-10 by LCDV corp.)

의 GDL 10 BC를 이용하였다.

기체확산층은 수많은 Carbon fiber와 PTFE 및 Micro-porous Layer(MPL)층으로 구성되어 있는 다공성 물질이다. 하나의 기체확산층을 가지고 두번의 압축실험을 하여 그 압축특성을 확인하였다. Fig. 4와 같이 첫번째 그래프에서는 선형적인 특성을 보이지만 Fig. 5와 같이 반복되는 두 번째에서는 비선형적인 특성이 강해진 것을 볼 수 있다. 첫 번째 압축실험에서 재료가 소성변형을 하여 이와 같은 결과가 나타난 것으로 보여진다. 스택의 해석에서는 초기상태에서의

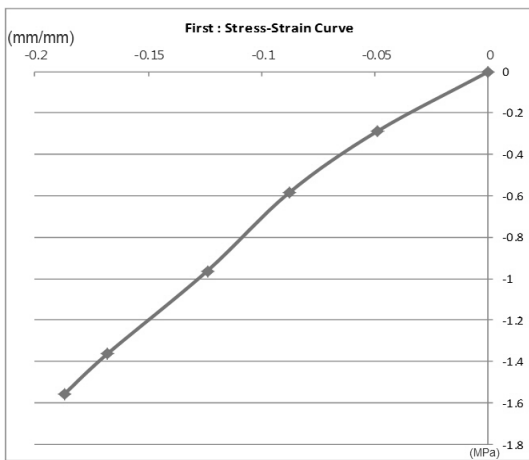


Fig. 4 GDL stress-strain experimental result

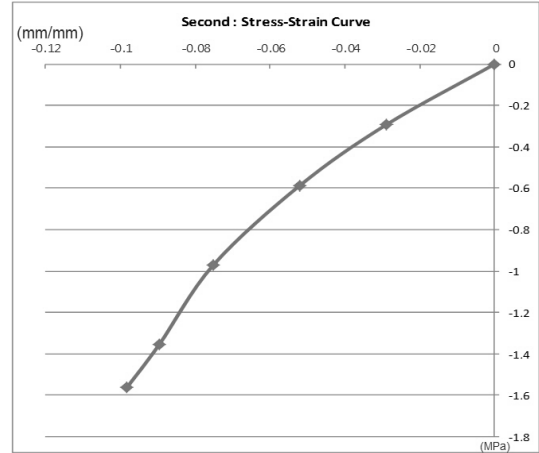


Fig. 5 GDL stress-strain experimental result (2nd test)

스택을 체결 할 것이기 때문에 첫 번째 압축실험 결과를 이용하여 영률 8.4MPa을 구하였다.

2.1.2 EPDM 가스켓의 압축실험

가스켓의 압축실험은 리빙케어사에서 만든 0.4mm 두께의 EPDM 을 이용하였다. 고무재료는 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 대변형 범위에서도 탄성 거동을 나타내는 초탄성(hyperelastic) 특성을 지닌다.

고무재료의 거동은 비 선형, 비 압축성, 대변형의 특성을 지니고 있으며, 그 양상이 고무의 성분에 따라 큰 차이를 나타낸다⁴⁾.

고무의 물성은 Fig. 6과 같이 영률(Young's Module)로 표현할 수 없는 비선형 특성을 지니고 있기 때문에 압축실험에서 구해진 Table 1의 값을 입력하여 물성값으로 사용하였다.

2.2 스택 체결력의 계산

고분자전해질연료전지는 스택의 체결력이 성능에 많은 영향을 미친다. 일반적으로 기체확산층이 30% 정도의 압축될 정도로 체결되었을 때 좋은 성능을 내는 것으로 알려져 있다⁵⁻⁶⁾.

스택의 구성이 Fig. 7과 같을 때 기체확산층이 25% 30% 압축되는데 필요한 체결력을 가스켓의 면적과

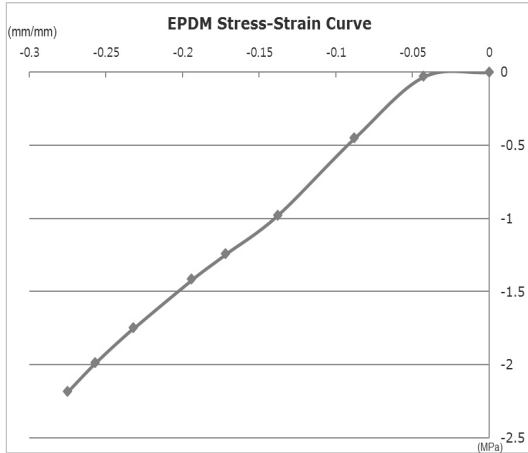


Fig. 6 EPDM gasket stress-strain experimental result

두께를 을 고려하여 계산하였다.

기체확산층의 압축률을 기준으로 가스켓을 압축 하는데 필요한 힘과 기체확산층의 압축하는데 필요한 힘의 합으로 스택의 체결력을 구하였다.

기체확산층이 25%로 압축 시 가스켓의 눌리는 양은 0.015mm이고, 30%로 압축 시의 가스켓의 눌리는 양은 0.037mm이다.

기체확산층과 가스켓의 면적도 고려하여 기체확산층을 25% 30% 압축시킬 수 있는 체결력을 계산하였다. 결과는 아래의 Table 2와 같다.

2.3 실험계획법

실험계획법이란 해결하고자 하는 문제에 대해서 실험을 어떻게 수행하고, 데이터를 어떻게 구해서 어떤 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는 가를 계획하는 것이라 볼 수 있다.

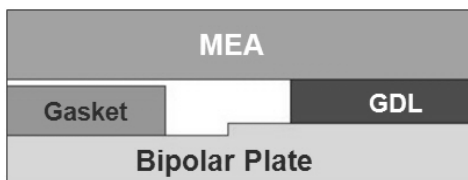


Fig. 7 Cross-sectional layout of fuel cell stack component

Table 1 Gasket strain-stress experimental result

Strain (mm/mm)	Stress (MPa)
0	0
-0.043	-0.031
-0.088	-0.449
-0.138	-0.977
-0.172	-1.243
-0.194	-1.415
-0.232	-1.746
-0.257	-1.985
-0.275	-2.181

고분자전해질연료전지의 스택의 성능은 체결력에 영향을 받고, 그 중에서도 체결력에 따른 분리판과 기체확산층간의 관계가 큰 영향을 미치게 된다^{5,6)}.

고분자전해질연료전지 스택의 일반적인 체결 구조상 기체확산층의 중앙부와 외곽부의 압축받는 응력은 차이를 보이게 된다. 기체확산층의 중앙부는 외곽부에 비해 적은 힘을 받고, 그에따른 압축되는 양도 차이가 나게 된다.

성능을 최적화 하기 위해서는 이 응력의 불균형을 줄이는 것이 필요하다.

고분자전해질연료전지스택의 기체확산층에 분포된 응력의 표준편차값을 특성치로 하고 이 특성치에 영향을 주는 인자로서 Table 3과 같이 엔드판의 두께, 체결봉의 수와 스택의 체결력을 가지고 분석을 하였다. 엔드판의 두께를 늘리고 체결봉의 수를 늘리

Table 2 Compression force of PEM fuel cell stack

	GDL 25%	GDL 30%
GDL	33,235 N	39,882 N
Gasket	1,468 N	3,595 N
GDL+Gasket	34,703 N	43,477 N

Table 3 Experimental control parameters

	Control parameter	Lv 1	Lv 2	단위
A	End plate thickness	8	10	mm
B	Tie rod number	6	10	ea
C	Compression force	34,703	43,477	N

Table 4 Experimental plan table

Case	End plate thickness	Tie rod number	Compression force
1	8mm	6ea	34,703N
2	8mm	10ea	34,703N
3	10mm	6ea	34,703N
4	10mm	10ea	34,703N
5	8mm	6ea	43,477N
6	8mm	10ea	43,477N
7	10mm	6ea	43,477N
8	10mm	10ea	43,477N

는 것은 일반적으로 기체확산층을 고르게 압축시키기 위해 사용되는 방법이다. 그리고 스택의 체결력이 기체확산층에의 응력분포에 미치는 영향을 알기 위해서 실험계획법을 이용하여 실험하고 분석하였다.

Table 3과 같이 2 Level의 제어인자를 가지고 Table 4와 같이 완전요인 실험계획을 실시하였다.

스택의 체결력은 Table 2에서 계산된 기체확산층을 25% 30% 압축시키기 위해 필요한 체결력을 이용하였다.

2.4 고분자 전해질 연료 전지 스택의 구조 해석

고분자 전해질 연료 전지 스택의 기체확산층에 분포되는 응력분포 및 평균응력을 확인 하기 위해서 유한요소 프로그램인 Ansys Workbench V13을 이용하였다.

실험에 사용된 스택은 활성면적 300cm²의 스택으로 알루미늄 엔드판과 카본 분리판으로 구성되어 있다. 막전극접합체를 기준으로 대칭되는 구조를 가지기 때문에 효율적인 전산해석을 위해서 Fig. 8과 같은 Half Size 스택이 이용되었다⁷⁾.

스택의 3D Modeling은 CATIA V5를 이용하여 실험계획법에 따라 8가지 Case의 데이터를 만들어 전

**Fig. 8** Half size unit cell layout**Table 5** Material properties for FEM simulation

	Young's modulus (MPa)	Poisson ratio
End Plate	196,000	0.25
Bipolar Plate	4,800	0.2
MEA	197	0.3

산해석을 하였다.

2.4.1 물성값

전산모사에 이용된 Half Size의 스택은 엔드판, 분리판, 기체확산층, 가스켓, 막전극접합체의 5개 부품으로 이루어져 있다. 앞서 체결력에 가장 큰 영향을 미치는 가스켓과 기체확산층의 물성치를 실험을 통하여 계산하였다. 엔드판과 분리판 막전극접합체는 선형특성을 가지고 물성치로 Table 5와 같다^{3,7)}.

2.4.2 격자선정

고분자 전해질 연료 전지 스택의 전산모사를 위해서 같은 크기의 Hex-dominant Mesh를 이용하였다. 전산모사를 위해 59247개의 Nodes와 8736개의 Elements가 이용되었다.

실험 Case 별로 기체확산층에 분포되는 응력의 표준편차 값을 보기 위해 일정한 크기의 Hex-dominant Mesh를 이용하여 기체확산층과 분리판이 맞닿는 기체확산층면의 3286개의 Node 값들로부터 응력의 표준편차 값을 구하였다.

2.4.3 경계조건

막전극접합체의 대칭면을 fixed 조건으로 고정하고 계산된 체결력을 이용하여 각 볼트헤드면에 동일한 하중을 부여 하였다.

막전극접합체와 닿아 있는 기체확산층과 가스켓의 면은 Bonded 조건으로 면간의 공간이나 미끄러짐을 허용하지 않는 조건을 주었다.

분리판과 닿아 있는 기체확산층과 가스켓의 면은 Frictional 조건으로 접촉면간의 떨어짐과 미끄러짐을 허용하는 조건이다. 분리판과 기체확산층간의 마

Table 6 Stress distribution result of FEM simulation

	Standard deviation (MPa)	Average (MPa)
Case 1	0.400	0.575
Case 2	0.399	0.508
Case 3	0.278	0.639
Case 4	0.336	0.577
Case 5	0.502	0.717
Case 6	0.482	0.628
Case 7	0.350	0.806
Case 8	0.404	0.721

찰계수는 0.4를 주었고, 분리판과 가스켓간의 마찰계수는 0.8을 넣어 계산하였다.

엔드판과 분리판사이도 Frictional 조건을 주었고, 0.3의 마찰계수값을 이용하였다.

Bonded 조건은 선형해석이고 Frictional 조건은 비선형해석으로 여러 번의 반복 계산에 의해 결과를 구하게 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 결과

유한요소법을 이용하여 Table 4와 같은 조건으로

고분자전해질연료전지스택의 기체확산층에 분포된 응력분포를 구하였다. 분리판과 맞닿는 기체확산층의 면에 분포되는 응력을 구하였다. 그 결과 값은 Table 6과 같고 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 전 실험에서 기체확산층의 중앙부와 외곽부의 응력차이가 남을 볼 수 있다. 하지만 제어변수에 따라서 그 정도의 차이가 있음을 볼 수 있다.

수치적인 분석을 하기 위해서 응력의 표준편차값과 평균값을 구하여 각각의 주요과도를 보았다.

기체확산층에 분포되는 응력값의 표준편차는 작을수록 좋고, 평균값은 원하는 값을 갖는 것 좋다. 하지만 같은 조건의 체결력 조건 하에서는 평균응력값이 큰 것이 좋다고 볼 수 있다. Fig. 10은 Fig. 11은 전산해석결과를 제어인자에 대한 표준편차와 평균값의 변화를 도식적으로 나타낸 그래프이다. 그래프의 기울기가 클수록 결과에 대한 기여도가 큼을 나타낸다. 일반적으로 알려진 것과 같이 엔드판(End Plate) 두께를 늘리는 것이 응력분포에 가장 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 체결봉수가 늘어났음에도 응력분포에 좋지 않은 영향을 나타냄을 볼 수 있다. 체결봉의 수가 증가함에 따라 스택의 가로 및 세로 방향의 체결력 비율이 변함에 따라 응력분포의 표준편차값이 높아진 것으로 보인다.

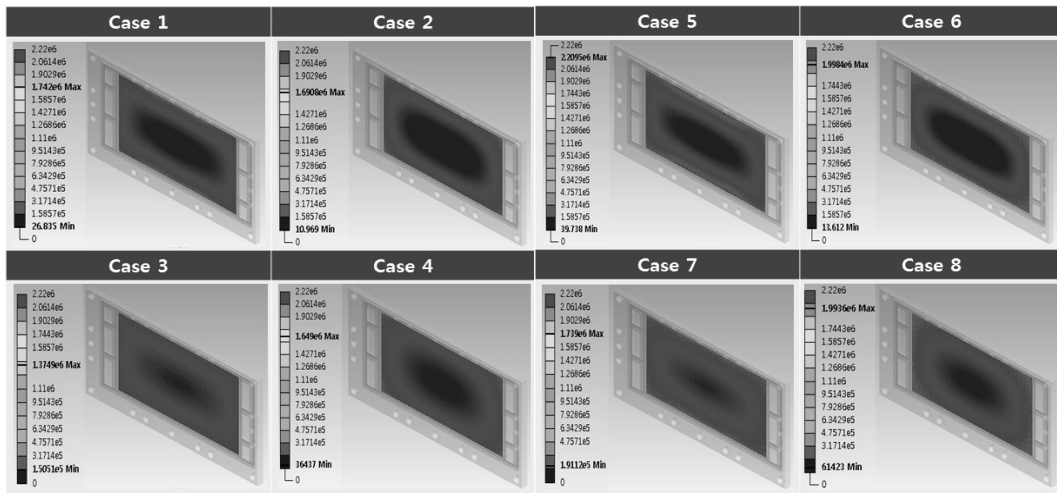


Fig. 9 Stress distribution contour plot of FEM simulation

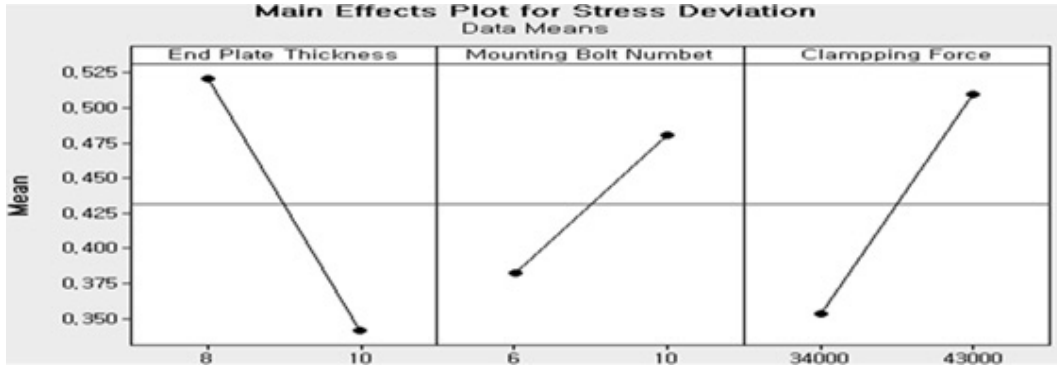


Fig. 10 Main effects plot of standard deviation for GDL stress distribution

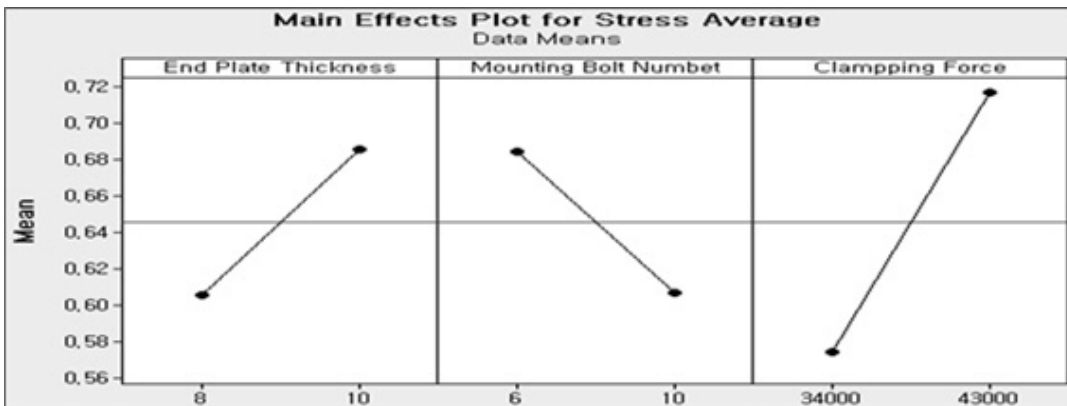


Fig. 11 Main effects plot of average for GDL stress distribution

체결력을 높일수록 분포되는 평균값이 올라감을 볼 수 있다. 체결력을 높이는 것이 스택의 성능을 높이는 빠른 방법이지만, 응력분포의 불균형은 더 심해지기 때문에 근본적인 해결방법은 아니다. 그리고 너무 높은 체결력은 분리판등의 부품에 파손을 일으킬 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 엔드판, 체결봉의 수 및 체결력에 따른 고분자전해질연료전지 기체확산층에 분포되는 응력분포에 대하여 고찰하였다.

단순히 체결력에 따른 스택의 성능을 보는 것 보다 근본적인 원인에 대해서 분석하고 경향을 확인

하였다. 일반적으로 알려져 있듯이 체결력이 높아지면 평균응력값이 올라감에 따라 성능이 좋아지지만 응력 불균형이 커지기 때문에 최적의 방법은 아님을 알 수 있었다.

체결력에 가장 큰 영향을 미치는 가스켓과 기체확산층을 가지고 압축실험을 하여 Strain-Stress Curve를 구하였고, 유한요소 해석결과를 통해 수치적인 결과값을 도출하였다.

이상의 결과로 스택을 설계할 때 기체확산층에 분포되는 응력의 표준편차 특성치를 가지고 유한요소 법과 실험계획법을 이용한 설계방법에 대해서 제안하였다. 동일 수준의 특성치를 낼 수 있는 최적의 설계를 통하여 고분자전해질연료전지 스택의 경량화 설계에 기초가 되리라 기대된다.

참 고 문 헌

1. K. Y. Kim and Y. J. Sohn, "Numerical Study on the Effect of GDL Porosity on the PEMFC Performance" *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol 33, No 12, 2009, 1022-1030
2. W. K. Lee and C. H. Ho, "The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell" *Journal of Power Sources*. Vol. 84, No. 1, 1999, pp. 45-51.
3. J. M. Heo, Y. J. Shon, "Study of stress distribution on GDL and gasket of PEM fuel cell" *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, pp 652-654.
4. W. D Kim, "Design and analysis of the hyperelastic rubber mechanical components" KIM M Report, Korea, 1999.
5. B. J. KIM and S. D LIM, "The Effect of Stack Clamping Pressure on the performance of a Miniture PEMFC Stack" *Trans. Of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 20. No 6, 2009, pp. 499-504.
6. E. J Ahn and Y. G Yoon, "Property Changes of Gas Diffusion Layer in a PEFC by Compression" *Trans. Of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 17, No. 3, 2006, pp. 347-352.
7. Ahmet Kusoglu and Anette M, Karlsson, "Mechanical response of fuel cell membranes subjected to a hygro-thermal cycle" *Journal of Power Sources*, Vol. 161, Issue 2, 2006, pp. 987-996.