

수소 연료전지 개스킷의 면압에 대한 유한요소 해석

전형렬*, 박수현*, 주우정**, 허장욱*:#

*금오공과대학교 기계공학과, **평화오일씰공업(주)

Finite Element Analysis of Surface Pressure of Hydrogen Fuel Cell Gasket

Hyeong-Ryeol Jeon*, Soo-Hyun Park*, Woo-jung Zoo**, Jang-Wook Hur*:#

*Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

**Pyung Hwa Oil Seal Industry Co., Ltd.

(Received 10 March 2022; received in revised form 24 April 2022; accepted 28 April 2022)

ABSTRACT

The optimal strain energy function was obtained by comparing the results of the analysis using the strain energy functions obtained by uniaxial tensile and equibiaxial tensile tests on gasket materials used in hydrogen fuel cells, with the results measured using a contact pressure measurement sensor. At this time, even when only the uniaxial tensile test was conducted, Yeoh could obtain the most accurate results even by conducting only the uniaxial tensile test. Using this, an analysis of the cross section of the gasket used in stack confirmed a safe contact pressure and no deformation on the separator. In the future, research will be conducted to verify the gasket durability by reliability evaluation.

Keywords : Gasket(개스킷), Fuel Cell(연료전지), Finite Element Analysis(유한요소해석), Contact Pressure(접촉면압), Strain Energy Density Function(변형률 에너지 밀도 함수)

1. 서 론

주요 선진국을 중심으로 연비규제 강화를 통한 친환경차량 보급 확대가 이루어짐에 따라 정부에서는 EV(Electric Vehicle), FCEV(Fueled Cell Electric Car) 등에 대한 의무판매 및 구매지원 정책을 적극적으로 시행하고 있다. 특히, FCEV의 경우 승용차 보다는 장거리 및 상용차량에 더 유리한 특

징이 있으나, 상용차량의 경우 일반 승용차보다 높은 내구성을 요구하고 있으므로, 이를 만족하기 위해서는 기존 내연기관 자동차 엔진에 해당되는 연료전지 Stack의 수명향상이 필요하다^[1]. 연료전지 Stack은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 막전극접합체(MEA, Membrane Electrode Assembly), 기체확산층(GDL, Gas Diffusion Layer), 분리판 및 개스킷으로 단위 셀(Unit Cell)이 구성되며, 이들이 수백장 적층되어 Stack을 형성하고 있는데, 연료전지 Stack의 수명 향상을 위해서는 MEA, GDL 및 개스킷의 내구성 개선 등이 이루어져야 한다.^{[2],[3]}.

Corresponding Author : hhjw88@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7399

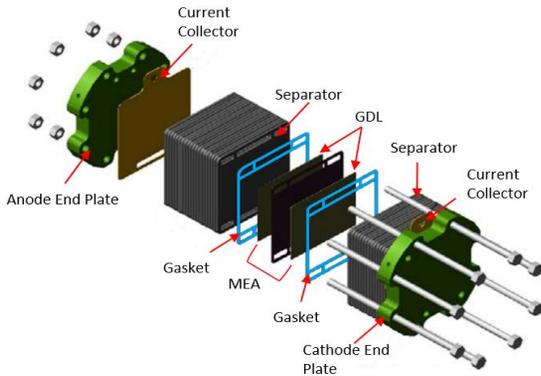


Fig. 1 The structure of a fuel cell stack

연료전지 Stack용 개스킷의 경우 사용되는 수소, 산소+물, 냉각수를 외부 또는 다른 셀간 이동을 차단하여야 하며, Stack 내부의 응력분포가 동일하게 이루어질 수 있도록 높은 치수정밀도가 요구되고 있다. 또한, 여러장이 적층되는 만큼 조립안정성을 확보하기 위해 분리판에 일체화 형태가 요구되고 있으며, Stack의 신뢰성, 안전성 및 성능에 중요한 역할을 하는 개스킷에 대한 중요성이 높아지고 있다.

이와 같은 개스킷을 개발 시, 형상 최적화를 위해 매번 제품을 만들어 평가하는 것은 시간 및 비용적인 문제로 어려움이 있어 제작 전 유한요소 해석을 통해 밀봉 특성 등에 대한 검토가 필요하다. 압축하중을 받는 가스켓의 응력상태에 대한 해석과 시험에 대한 연구는 압축시험의 곤란함에 따른 인장시험 위주로 수행되고 있다^{[1],[3]}. 따라서 본 연구에서는 면압센서를 활용하여 개스킷 재료인 EPDM(Ethylene Propylene Diene Monomer)판재에 대한 면압을 측정하고, 이를 해석값과 비교하여 가장 일치하는 탄성변형률 에너지 방정식을 도출하였으며, 이를 이용하여 개스킷 형상에 대한 면압을 확인하였다.

2. 물성측정과 변형률에너지 함수

2.1 물성측정

고무는 밀봉이나 진동억제 등에 주로 사용되기 때문에 압축하중을 받는 경우가 대부분이므로 재

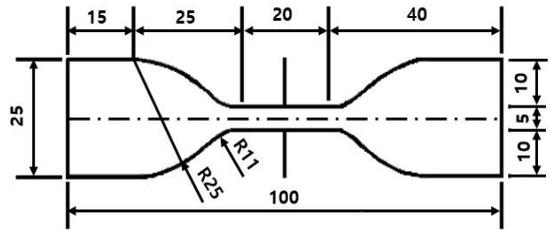


Fig. 2 The dimensions of rubber specimen



Fig. 3 Uni-axial tension test

료에 대한 하중-변형 특성에 대한 시험방법으로는 압축시험이 요구되고 있다. 그러나, 접촉면에서 발생하는 마찰로 인해 정확한 응력-변형률 관계를 획득하기가 곤란하기 때문에 시험이 비교적 간단한 단축 인장시험이 많이 사용되고 있다^[4].

단축 인장시험의 경우 시험편 형상은 Fig. 2와 같이 KS M 6518인 아령형 3호이며, Fig. 3과 같이 재료를 그립으로 고정하여 인장하고, 이때 인장속도는 5.00mm/min로 시험한다^[5]. 연료전지 개스킷에 사용되는 EPDM을 0~25%와 0~40%의 변형률 범위내에서 각각 10회 반복하중을 주었을 때, 응력-변형률 곡선은 Fig. 4(a)와 같으며, 반복하중을 통해 고무시편을 안정화시키는 과정 중 시편의 단면적 및 표점거리가 초기 시편 상태와 다르게 되는 점을 고려하여 응력-변형률 곡선을 원점으로 피팅 시킨 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다^[6].

한편, 개스킷의 압축하중 상태를 고려하여 단축 인장시험 보다는 다소 복잡하고 비용이 많이 소요되지만, 유사한 변형모드를 갖는 등이축 인장시험이 사용되고 있다. 등이축 인장시험은 원주방향으로 균일하게 인장하중을 부가하여 하중-변형률 관계를 측정하며, 시험 형상을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 변형률은 시편에 20mm 간격으로 표시

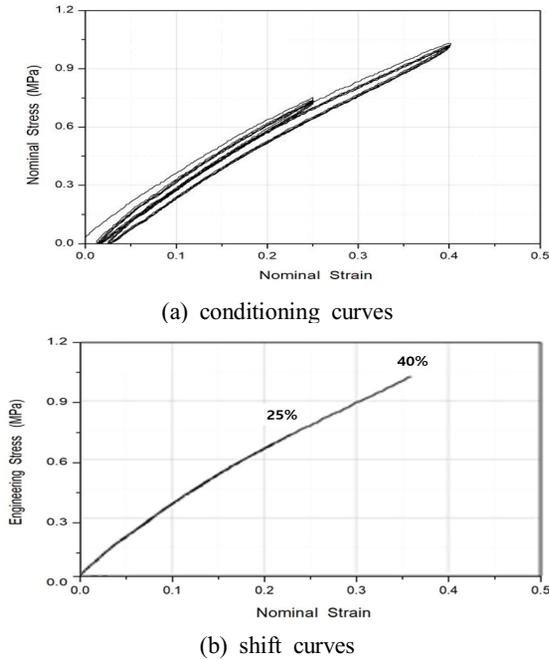


Fig. 4 Uniaxial tension test results for EPDM

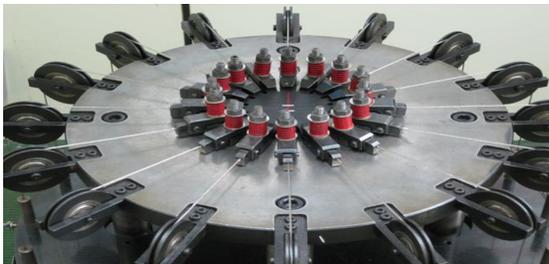


Fig. 5 Equi-biaxial tension test

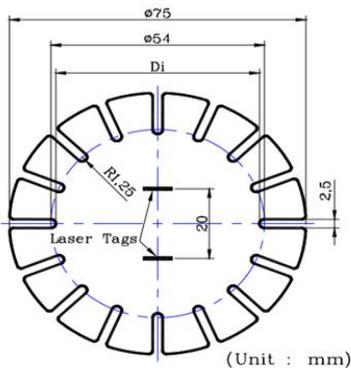


Fig. 6 The dimensions of equi-biaxial tension test

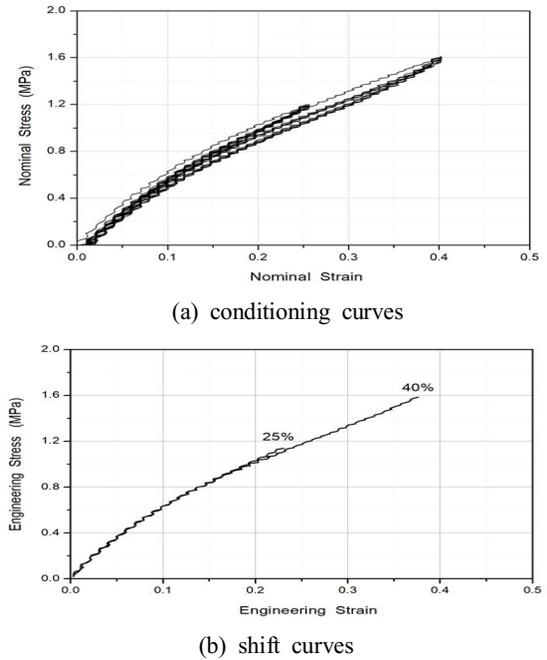


Fig. 7 Equi-biaxial tension test results for EPDM

된 표점거리를 Laser Extensometer로 측정하였다. 연료전지 시험편을 단축 인장시험에서와 같이 등이축 인장시험에서 0~25%와 0~40%의 변형률 범위내에서 각각 10회 반복하중을 주었을 때, 시험 결과는 Fig. 7(a)와 같으며, 원점으로 피팅시킨 결과를 Fig. 7(b)에 나타내었다^[7].

2.2 변형률에너지 함수

고무분자의 사슬 방향이 처음에는 등방성이지만 재료가 신장됨에 따라 분자 사슬이 방향성을 갖게 되어 이방성이 증가하게 된다. 그러나 이방성의 증가가 변형방향을 따르므로 재료는 변형이력을 통해 등방성으로 간주된다. 고무의 거동을 표현한 변형률에너지 함수(W)는 재료거동이 탄성이며 등방성이라는 가정하에 일반적으로 연신율 불변량(Strain Invariant)과 주연신율(Principal Stretch Ratio)의 형태로 표현된다^[1].

고무의 물성을 정확하게 알기 위해서는 물성시험을 통해 얻어진 응력-변형률 시험 데이터에 변형률에너지 함수로부터 계산된 응력-변형률 곡선이 잘 맞는 최적의 변형률에너지 함수를 구하는

것이 중요하며, 가장 많이 사용하는 변형률에너지 함수로는 Mooney-Rivlin 2차 모델, Yeoh 모델 및 Ogden 3차 모델이 있다^{[8][9][10]}.

먼저, Mooney-Rivlin 2차 모델은 전단 및 단축 인장시험에 적합한 모델이며, 변형률에너지 밀도 함수는 Cauchy-Green 변형 텐서의 1차, 2차 불변량(I_1, I_2)과 실험에 의해 결정되는 재료상수(C_{10}, C_{01})를 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

그리고 Yeoh 모델은 Neo-Hookean 모델의 Cauchy-Green 변형 텐서 1차 불변량(I_1)을 3차까지 늘려서 표현한 모델이며, 변형률에너지 밀도 함수는 실험에 의해 결정되는 재료상수(C_{i0})를 이용하여 식 (2)와 같이 표시할 수 있다^[9].

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (2)$$

또한, Ogden 3차 모델은 연신율 불변량에 기초한 것이 아닌 연신율 자체의 모델로 도입되었으며, 변형률에너지 밀도 함수는 주 변형률($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)과 실험에 의해 결정되는 재료상수(μ_i, α_i)를 이용하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다^[10].

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (3)$$

3. 면압 측정 및 해석

3.1 면압측정

유한요소해석에 적합한 개스킷 재료의 변형률에너지 함수를 구하기 위해 Fig. 8과 같은 면압 측정장치를 활용하여 FSR(Force Sensing Resistor) 센서 위에 개스킷 판재를 올려놓고, 면압을 측정하였다. 센서의 작동원리는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 전도성입자가 0.5mm 이하의 폴리머사이에 위치하며, 압력을 받아 전도성입자 간 거리가 근접하면 저항이 감소하여 전류가 증가되는 값을 계측

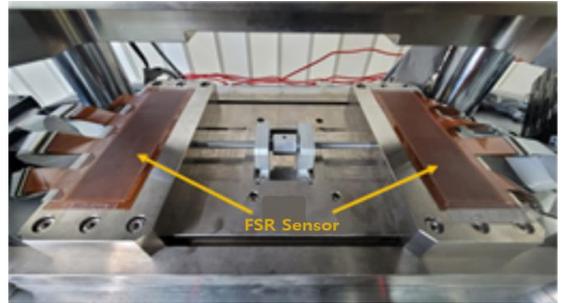


Fig. 8 Surface Pressure Measuring device

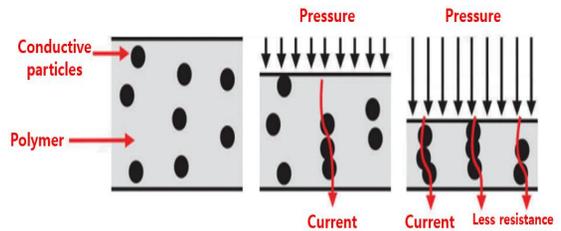


Fig. 9 Principle of operating the pressure sensor

Table 1 Specifications of sensor

Measurement Range	0.5 ~ 45 kgf/cm ²
Temperature	0 ~ 80°C
Thickness	0.12mm
Weight	2g
Number of Nodes	2,304(48×48)
Pitch (mm)	1.015×1.015

하여 면압으로 변환하였고, 이때 사용한 센서의 사양은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

3.2 유한요소해석

면압측정에 사용한 시험편과 동일한 형상에 대해 Hyper Mesh로 요소를 분할한 형상을 Fig. 10과 같이 나타내었다. 요소는 Hexa Type으로 모델링을 하였으며 요소의 최소크기는 0.03mm이다.

단축 인장시험과 등이축 인장시험을 통해 획득한 응력-변형률 데이터를 MARC 프로그램에 입력하여 변형률에너지 밀도함수 3가지(Mooney-Rivlin 2차 모델, Yeoh 모델 및 Ogden 3차 모델)에 대한 재료상수를 계산하였다. 변형률 범위가 40%일 때,

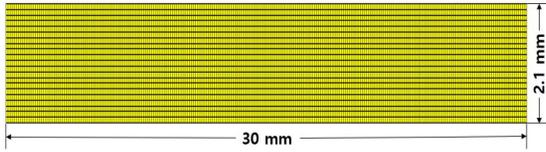


Fig. 10 Finite element model

Table 2 Coefficients of Strain Energy function

Model		Material Constants	
		Uniaxial	Equi-biaxial
Mooney-Rivlin	C10	0.300171	0.63375
	C01	0.427421	0.011137
Ogden	μ_1	-0.20962	-4.15E-5
	μ_2	0.082614	2.83E-5
	μ_3	2.69067	1.4309
	α_1	-8.3336	-0.0787785
	α_2	0.462419	0.074281
Yeoh	C10	0.6403352	0.644039
	C20	4.3E-11	9.69E-9
	C30	2.57E-8	0.004771

변형률에너지 밀도함수의 재료상수를 Table 2에 나타내었다. 모델에 적용한 변위와 경계조건은 구속이 없으며, 고무와 접촉하는 재질(스테인리스강)간의 마찰계수는 0.3을 사용하였다^[11].

3.3 면압 해석 및 시험 결과 비교

EPDM 재질을 대상으로 단축 인장시험과 등이축 인장시험을 통해 얻은 각각의 변형률에너지 밀도함수에 의한 해석결과를 Fig. 11에 나타내었다. 변형률이 40% 구간까지의 단축인장과 등이축 인장에 대해 해석한 결과, 단축과 등이축 인장 모두에서 Yeoh모델이 Mooney-Rivlin 2차 모델이나 Ogden 3차 모델에 비해 시험결과와 가장 유사함을 알 수 있다. 또한, 변형률이 15%인 시점에서 시험 결과와 각각의 변형률에너지 밀도함수를 이용한 해석 결과의 오차를 Table 3과 같이 나타내었다. 표에서와 같이 등이축 인장시험 데이터를 적용한 경우 3가지 모델 모두에서 약 5% 이내의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있으나, 단축인장의 경우 Yeoh모

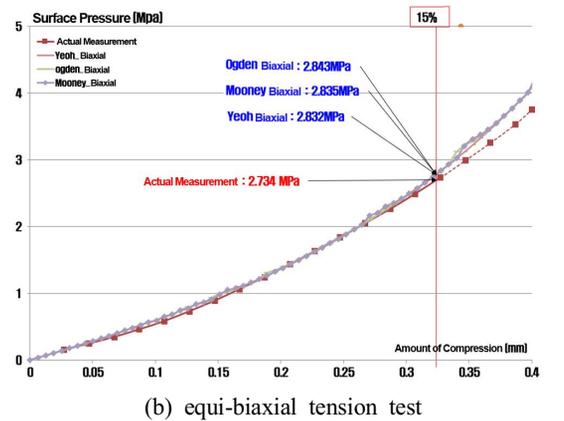
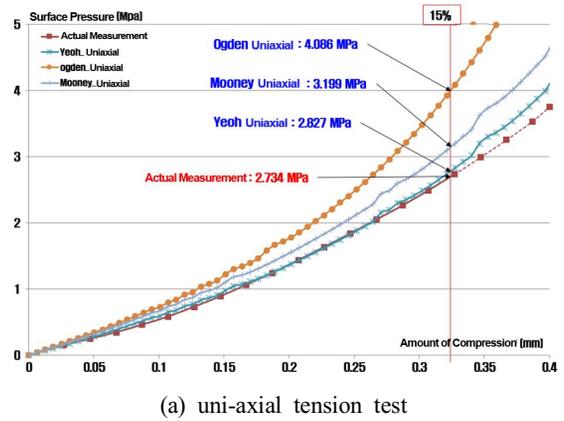


Fig. 11 The results of the analysis based on the strain energy function

Table 3 The results of the analysis based on the strain energy function

Types		Contact press(MPa)	Error(%)
FSR sensor		2.734	-
Uniaxial	Yeoh	2.872	5.05
	Ogden	4.086	47.07
	Mooney	3.199	11.38
Equi-biaxial	Yeoh	2.832	3.06
	Ogden	2.843	3.85
	Mooney	2.835	3.55

델만이 5% 수준의 오차를 보이고 있으므로 Yeoh 모델이 시험결과와 해석결과가 가장 유사함을 알 수 있다.

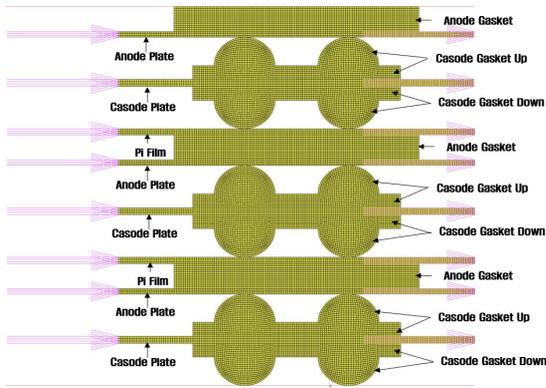


Fig. 12 Finite element model

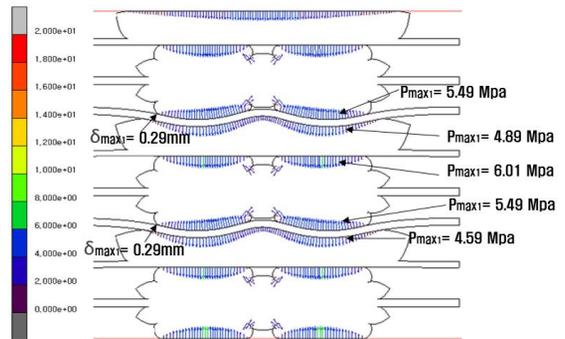
4. 고찰

연료전지의 Stack은 단위셀의 반복적인 적층으로 구성되고, 출력을 높이기 위해서 수백장의 단위셀이 직렬로 적층되며, 단위셀에 공급되는 수소와 산소가 전기화학반응을 일으켜 전기를 생성하게 된다. 개스킷의 역할은 전해질 막과 분리판 사이에서 공기, 수소 및 냉각수가 누설되지 않도록 밀봉하는 역할과 함께, 각 셀의 간격이 일정하게 유지되도록 한다^[12].

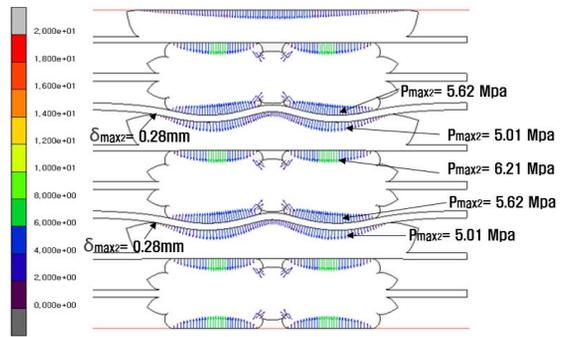
연료전지 개스킷 단면 해석은 3개의 셀 적층을 대상으로 하였으며, 이때 Anode 반응면, Cathode 반응면 및 냉각면 개스킷의 면압을 계산하였다. 이때, 면압은 기밀유지에 충분하여야 하고, 파손되거나 내구성이 저하되지 않도록 과도한 변형을 방지하여야 한다.

3개의 셀에 대한 단면 형상은 Fig. 12과 같으며, Hyper Mesh를 사용하여 Hexa 요소로 분할하였고, 해석은 MARC를 사용하였다. 개스킷을 압축시키기 위한 치구는 Rigid Body의 Surface로 나타내었으며, 분리판과 MEA의 재질은 각각 SUS316, PI필름이고, 분리판과 고무는 접촉에 의한 구속으로 설정하였다.

해석에서 두께가 매우 얇은 GDL은 반영하지 않았고, 개스킷과 분리판의 면은 접촉면간의 마찰을 고려하였으며, 마찰계수는 0.3으로 하였다^[13]. 개스킷의 압축 변위는 Stack의 성능이 가장 좋게 나오는 Cell Pitch가 되도록 압축(전체 높이 5.46~4.08mm)하였으며, 변형률에너지 함수는 면압 측정결과와 가장



(a) Uni-axial tension



(b) Equi-biaxial tension

Fig. 13 Finite element analysis contact press result

유사한 거동을 보이는 Yeoh 모델을 사용하였다. 해석결과는 Fig. 13과 같으며, 3개의 셀 중 위아래 접합부를 제외한 관심대상인 가운데 셀의 경우, 단축과 등축 인장의 모든 층에서 밀봉조건인 2MPa를 상회하는 최대면압(Pmax1 : 4.89~6.01MPa, Pmax2 : 5.01~6.21MPa)을 표시하고 있으며, 분리판 두께(약 0.5mm)에 비해 분리판의 변형(최대 0.28~0.29mm)로 미세한 수준을 나타내고 있다.

5. 결론

개스킷 판재에 대한 면압 측정결과와 해석결과를 비교하여 최적의 변형률에너지 모델을 선정하였으며, 이를 이용하여 개스킷 형상에 대한 면압을 계산하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 등축 인장시험은 변형률 에너지 함수에 관계 없이 유사한 결과를 보이나, 단축 인장시험의 경

우 변형률 에너지 함수의 선정에 따른 결과와 차이가 크다.

- 2) 개스킷의 면압에 대한 거동을 가장 잘 나타내는 변형률에너지 함수는 단축과 등이축 인장 모두 Yeoh모델이다.
- 3) 개스킷 각 층의 최대 면압은 단축과 등이축에서 모두 2MPa 이상 수준으로 Stack내부의 기밀을 충분히 만족하며, 분리판 변형도 적어 연료전지 Stack에 적용이 가능하다.

후 기

본 연구는 산업자원부 및 한국산업기술평가관리원의 소재부품기술개발 - 전략핵심소재자립화기술개발의 연구결과로 수행되었음(K_G012000998302).

REFERENCES

1. Cheon, K. M., Jang, J. H., Hur, J. W., "Finite Element Analysis of Gaskets for Hydrogen Fuel Cells", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 10, pp. 95~101, 2021.
2. H EG & G Technical Services, Unc., Fuel Cell Handbook, U.S Department of Energy Office of Fossil Energy, pp. 3-1~3-22., 2004.
3. Cheon, K. M., An, J. H., Hur, J. W., "Design of Gaskets for Hydrogen Fuel Cells Using Taguchi Method", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 21, No. 1, pp. 66~72, 2022.
4. Sasso, M., Palmieri, G., Chiappini, G., and Amodio, D., "Characterization of Hyperelastic Rubber-like Masterials by Biaxial and Uniaxial Stretching Tests Based on Optical Methods", Polymer Testing, Vol. 27, No. 8, pp. 995-1004, 2008.
5. Mullins, L., "Effect of Stretching on the Properties of Rubber," J. of Rubber Research, Vol. 16, 1947.
6. Mullins, L., : Softening of Rubber by Deformation, Rubber Chem. & Tech., Vol. 42, pp. 339-362, 1969.
7. Cho, J. K., Kim, R. S., Park, I. K., Kim, Y. C., Hwang, M. J., Suhr, J. W., Jung, H. S., Kang, J. W., Nam, J. D., "Hyperelastic Material Modeling of Natural Rubber Compounds and Finite Element Analysis of Bushing Performance in Automobile", Polymer (Korea), Vol. 42, No. 6, pp. 946-953, 2018.
8. Kim, W. D., Kim, W. S., Kim, C. H., "Determination of Rubber Material Model and the Deformation Behaviors of Rubber Component Considering Mullins Effect", MSC Korea User conference, 2001.
9. Ahn, S. S., Kim, S. R., Park, H. S., Kang, Y. G., Koo, J. M., Seok, C. S., "Evaluation of Fatigue Characteristics of Rubber for Tire Using Strain Energy Density", Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 36, No. 10, pp. 1163-1169, 2012.
10. Yeoh, O. H., : On the Ogden Strain-energy Function, Rubber Chemistry and Technology, Vol. 70, pp. pp. 175-182, 1996.
11. Fuel Cell Gasket Friction Coefficient Measurement Report, Pyung Hwa Oil Seal, pp. 16-17, 2020.
12. Gadala, M. S.,: Alternative Method for the Solution of Hyper-elastic Problems with In-compressibility, Computer and Structure, Vol. 42, pp. 1-10, 1992.
13. Ogden, R. W., : Non-linear Elastic Deformations, Dover Publications, INC., New York, 1984.