

수소 연료전지용 가스켓의 유한요소해석

천강민*, 장종호**, 허장욱*.#

*금오공과대학교 기계공학과(항공기계전자융합공학전공), **평화오일셀공업

Finite Element Analysis of Gaskets for Hydrogen Fuel Cells

Kang-Min Cheon*, Jong-Ho Jang**, Jang-Wook Hur*.#

*Department of Mechanical Engineering (Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering of Mechanical Engineering), Kumoh National Institute of Technology

**Headquarter of Research and Development, Pyung Hwa Oil Seal Industry Co.,Ltd.

(Received 09 March 2021; received in revised form 23 April 2021; accepted 04 May 2021)

ABSTRACT

An analysis was conducted to predict the behavior of gasket by applying an optimal-strain energy-density function selected through a uniaxial tensile test and an analysis of the gasket used in an actual hydrogen fuel cell. Among the models compared to predict the materials' properties, the Mooney-Rivlin secondary model showed the behavior most similar to the test results. The maximum stress of the gasket was not significantly different, depending on the location. The maximum surface pressure of the gasket was higher at positions "T" and "Y" than at other positions, owing to the branch-shape effect. In the future, a jig that can measure the surface pressure will be manufactured and a comparative verification study will be conducted between the test results and the analysis results.

Keywords : Hydrogen Fuel Cell(수소 연료전지), Finite Element Analysis(유한요소해석), Gasket(가스켓), Strain Energy Density Function(변형률 에너지 밀도 함수), Superelastic Material(초탄성 재료)

1. 서 론

최근 세계는 기후 변화 및 지구 온난화를 해결하기 위해 이산화탄소 저감 및 화석연료 사용 억제 등 여러 변화를 시도하고 있다. 이러한 노력의 일환으로 탄소 배출을 줄이기 위해 내연기관 배출 가스 규제가 강화되고 있으며, 재생 가능한 새로운 친환경 연료로부터 에너지를 얻기 위한 시도가 추진되고 있다^[1,2].

새로운 친환경 연료 중 수소는 대량의 에너지를 오랜 기간 저장 및 운송하고, 높은 에너지 밀도로 인해 장거리 주행과 연료 충전시간을 디젤 또는 가솔린 차량과 유사한 수준으로 제공할 수 있다^[3]. 수소를 친환경 에너지 연료로써 효율적으로 활용할 수 있는 방법은 두 개의 전극과 수소이온을 전달해주는 전해질 막으로 구성된 연료전지로 사용하는 것이다^[4]. 연료전지는 애노드 전극에서 수소를 수소 이온과 전자로 분리시키고, 캐소드 전극에서 산소와 전해질을 통해 이동한 수소 이온이 만나 물과 전기를 만드는 구조로 이루어지는데, 기존에는 연료전지에서 공기 흐름의 통로가 되는 분리판

Corresponding Author : hhjw88@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7399

에 대한 연구가 활발하게 진행되었다^[5].

그러나, 최근에는 효율향상 측면에서 셸링 역할을 수행하는 가스켓의 중요성이 강조되고 있으며, 이러한 가스켓에 사용되는 고무 재료는 금속 재료와 달리 큰 변형에서 탄성을 유지하고, 하중과 변형이 선형적이지 않은 초탄성 특징을 갖는다^[6]. 초탄성 재료의 변형 등은 가스켓의 형상을 결정하는데 중요하며, 해석을 위해서는 응력-변형을 관계로부터 최적의 변형률 에너지 밀도 함수의 적용이 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 가스켓에 사용되는 초탄성 재료인 EPDM(Ethylene Propylene Diene Monomer)의 물성치를 응력-변형률 관계를 이용하여 확인하고, 최적의 변형률에너지 밀도 함수를 선정 및 적용하여 가스켓 형상에 대한 변형과 최대응력 및 면압 등을 제시한다.

2. 변형률 에너지 밀도 함수

2.1 정의 및 종류

변형률 에너지 밀도 함수는 외부 일이 물체의 변형에 따른 변형률 에너지로 축적되는데, 이때 단위 체적 당 변형률 에너지로 정의된다. 고무해석에 사용하는 변형률 에너지 밀도 함수는 일반적으로 Mooney-Rivlin 2차 모델, Yeoh 모델, Ogden 3차 모델이 사용되고 있으며^[7], 고무는 변형 정도 및 종류에 따라 거동이 다르기 때문에 적합한 함수를 선택해야 한다.

2.2 Mooney-Rivlin 2차 모델

Mooney-Rivlin 2차 모델은 전단 및 단축 인장시험에 적합한 모델이며, 변형률 에너지 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^[7].

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

Mooney-Rivlin 2차 모델은 100% 변형률까지의 인장시험 데이터와 거동이 비슷하지만, 큰 변형률

에서는 강성을 과다하게 평가하는 특징이 있다^[8].

2.3 Yeoh 모델

Yeoh 모델은 Neo-Hookean 모델의 Cauchy-Green 변형 텐서 1차 불변량(I_1)을 3차까지 늘려서 표현한 모델이며, 변형률 에너지 밀도 함수는 실험에 의해 결정되는 재료상수(C_{10})를 이용하여 식 (2)와 같이 표시할 수 있다^[9].

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (2)$$

단축 인장시험 데이터를 2축 인장과 같이 다른 변형모드를 구현할 수 있고, 일반적으로 변형률이 큰 범위에서 정확도가 높다^[7-9].

2.4 Ogden 3차 모델

Ogden 3차 모델은 연신을 불변량에 기초한 것이 아닌 연신을 자체의 모델로 도입되었으며, 변형률 에너지 밀도 함수는 주 변형률(λ_1 , λ_2 , λ_3)과 실험에 의해 결정되는 재료상수(μ_i , α_i)를 이용하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

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

Ogden 3차 모델은 Seal, O-ring 등 고무를 재료로 하는 비선형 응력-변형 거동을 예측하는 데 널리 사용되는 모델이며, 단축 인장시험의 경우 최대 700%까지의 변형률과 잘 맞는 것으로 알려져 있다^[7,8].

3. 단축 인장시험과 해석

3.1 단축 인장시험

초탄성 재료인 고무의 재료상수는 단축인장, 이축인장 및 단축압축 등 여러 종류의 부하 시험을 통해 선정하는 것이 필요하지만, 시험을 빠르고 효율적으로 수행하기 위해 단축 인장시험을 사용

하여 산출하였다^[8]. 시험편의 재질은 EPDM이고, 형상은 KS M 6518인 아령형 3호이며, 인장속도는 5.00mm/min로 시험을 진행하였다^[7].

초탄성 재료는 일정 변형을 범위 안에서 반복적으로 하중을 부하하게 되면 초기 분자구조가 재배치되어 응력이 점점 감소하다가 안정화되는 Mullins 효과가 나타난다. 따라서 단축 인장 시험시, 응력-변형을 곡선이 안정화될 때 까지 변형을 구간에서 부하와 제거를 반복하는 과정이 필요하다^[7]. EPDM을 40%의 변형을 범위내에서 10회 반복하중을 주었을 때, 응력-변형을 곡선은 Fig. 1과 같으며, 변형을 구간이 크고 반복횟수가 증가할수록 응력이 완화되었다. 반복하중을 통해 안정화시키는 과정 중 시험편의 단면적 및 표점거리가 초기 시험편 상태와 다르게 되는 부분을 고려하여 응력-변형을 곡선을 원점으로 피팅시킨 결과($\epsilon_{max} = 0.35$)를 Fig. 2에 나타내었다^[10].

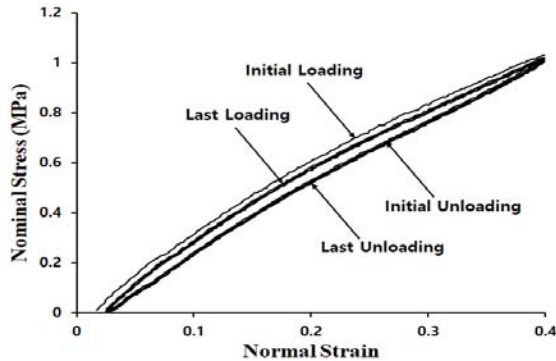


Fig. 1 Uniaxial tension curve at each level

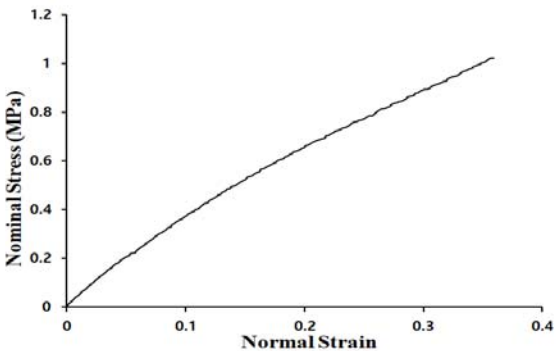


Fig. 2 Uniaxial tension fitting curve

3.2 유한요소해석

시험에 사용된 시험편과 동일한 형상에 대해 Hyper Mesh로 Fig. 3과 같이 요소를 분할하였으며, 크기는 KS M 6518인 아령형 3호 100mm(L) × 25mm(W) × 2mm(T) 및 표점거리 20mm로 하였다. 요소는 Hexa Type으로 모델링을 하였으며, 그립 부분은 해석결과에 큰 영향을 미치지 않으므로 Mesh를 크게 하고, 표점거리(Gage Length)의 Mesh는 조밀하게 하였다.

단축 인장시험을 통해 획득한 Fig. 2의 데이터를 MARC 프로그램에 입력하여 응력과 변형률의 관계로부터 변형률 에너지 밀도함수(Mooney-Rivlin 2차 모델, Yeoh 모델 및 Ogden 3차 모델)에 의한 재료상수를 계산할 수 있으며, 이때 산출된 변형률 에너지 밀도 함수의 재료상수를 Table 1에 나타내었다. 모델에 적용한 변위와 경계조건은 Fig. 4와 같으며, 모델의 수평방향에서 좌측면 그립부를 완전 고정하고, 우측면 그립부에 변위를 주어 단축인장 시험을 모사하였다.

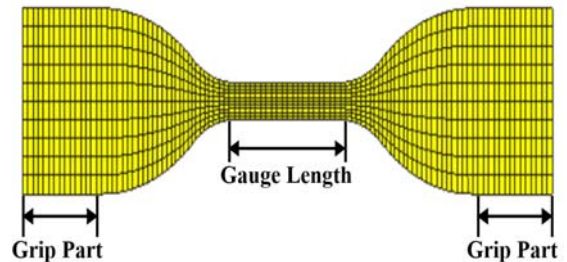


Fig. 3 Finite element model of uniaxial tensile specimen

Table 1 EPDM material constant

	Mooney-Rivlin 2 nd	Yeoh	Ogden 3 rd
C_{10}	0.300171	C_{10} 0.643052	μ_1 -0.209622
C_{01}	0.427421	C_{20} 4.30289e-11	α_1 -8.336
		C_{30} 2.56582e-08	μ_2 0.0826136
			α_2 0.462419
			μ_3 2.69067
			α_3 0.493692

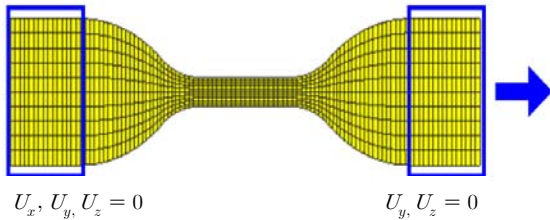


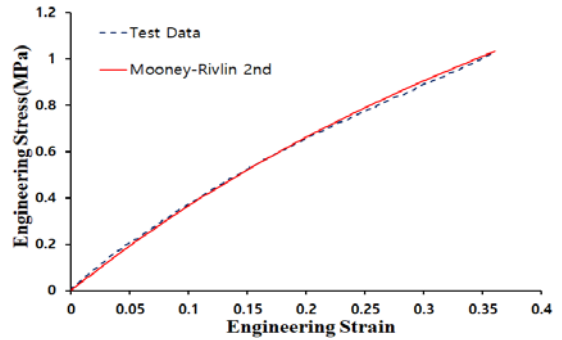
Fig. 4 Finite element model boundary conditions^[11]

3.3 시험결과와 해석결과 비교

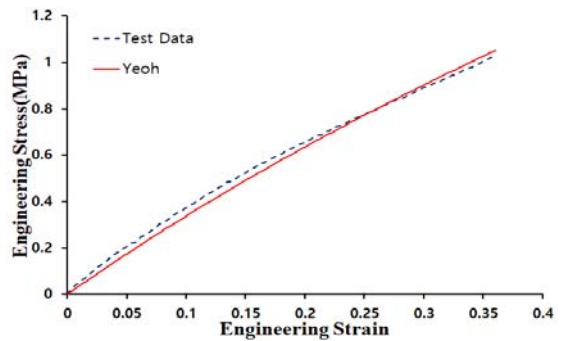
EPDM 재질을 대상으로 단축 인장시험 결과와 각각의 변형률 에너지 밀도 함수에 의한 해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 변형률이 40% 구간까지의 경우 Mooney-Rivlin 2차 모델이 Yeoh 모델이나 Ogden 3차 모델에 비해 시험결과와 가장 유사함을 알 수 있다. 또한, 시험 데이터와 각각의 변형률 에너지 밀도함수 데이터의 오차를 Table 2와 같이 나타내었으며, 변형률이 중간인 0.2와 최대값인 0.35를 대상으로 분석하였다. 표로부터 Mooney-Rivlin 2차 모델은 각각 0.87%와 0.95%의 오차를 보이고 있으며, 다른 변형률 에너지 밀도 함수를 적용한 경우보다 오차가 다소 적음을 알 수 있다.

4. 연료전지 가스켓 해석 및 고찰

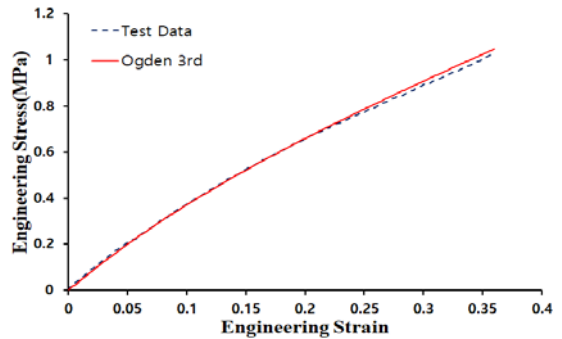
연료전지의 스택은 단위셀(Unit Cell)의 적층으로 구성되고, 높은 전압을 출력하기 위해 수백장의 단위셀이 직렬로 적층된다. 단위셀은 분리판, 가스켓, 기체확산층(Gas Diffusion Layer) 및 막전극접합체(Membrane Electrode Assembly)로 이루어지며, 단위셀에 공급되는 수소와 산소가 전기화학 반응을 일으켜 전기를 생성하게 된다. 가스켓의 역할은 전해질 막과 분리판 사이에서 공기, 수소 및 냉각수가 누설되지 않도록 밀봉하는 역할을 하며,



(a) Mooney-Rivlin 2nd



(b) Yeoh



(c) Ogden 3rd

Fig. 5 EPDM Uniaxial tensile test-analysis result graph

Table 2 EPDM material comparison of strain test and analysis results

Strain	Test Result (MPa)	Analysis Result(Deviation from test result, %)		
		Mooney-Rivlin 2 nd (MPa)	Yeoh (MPa)	Ogden 3 rd (MPa)
0.20	0.657	0.6628(0.87%)	0.6355(3.29%)	0.6592(0.33%)
0.35	1.003	1.0130(0.95%)	1.0269(2.34%)	1.0255(2.19%)

Fig. 6(a)는 단위셀을 나타내고, Fig. 6(b)는 연료전지에 사용되는 가스켓의 형상을 표시하고 있다.

가스켓 형상은 CATIA를 이용하여 3차원으로 모델링하고, Hyper Mesh를 사용하여 요소를 분할하였다. 해석은 MARC를 사용하였고, 요소는 Hexa Type을 적용하였으며, 가스켓을 압축시키기 위한 치구는 Rigid Body의 Surface로 나타내었다. 가스켓과 치구의 면은 Touching 조건으로 접촉면간의 마찰을 고려하였으며, 가스켓과 치구간의 마찰계수는 0.1, 그리고 가스켓간의 마찰계수는 0.3을 입력하였다^[12]. 가스켓의 압축 변위는 초기 높이의

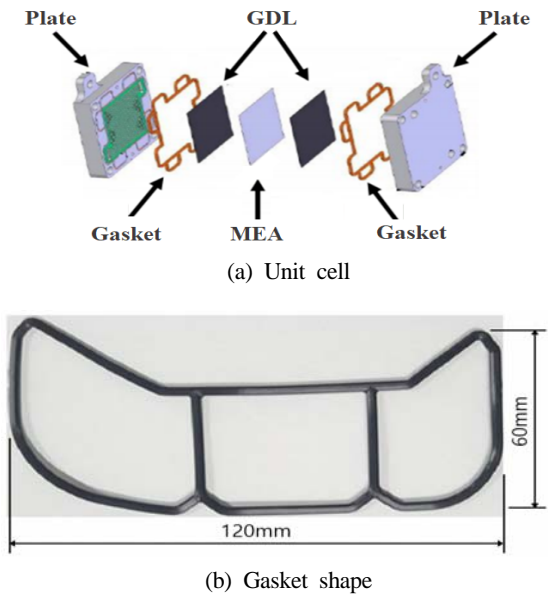


Fig. 6 Unit cell and gasket shape

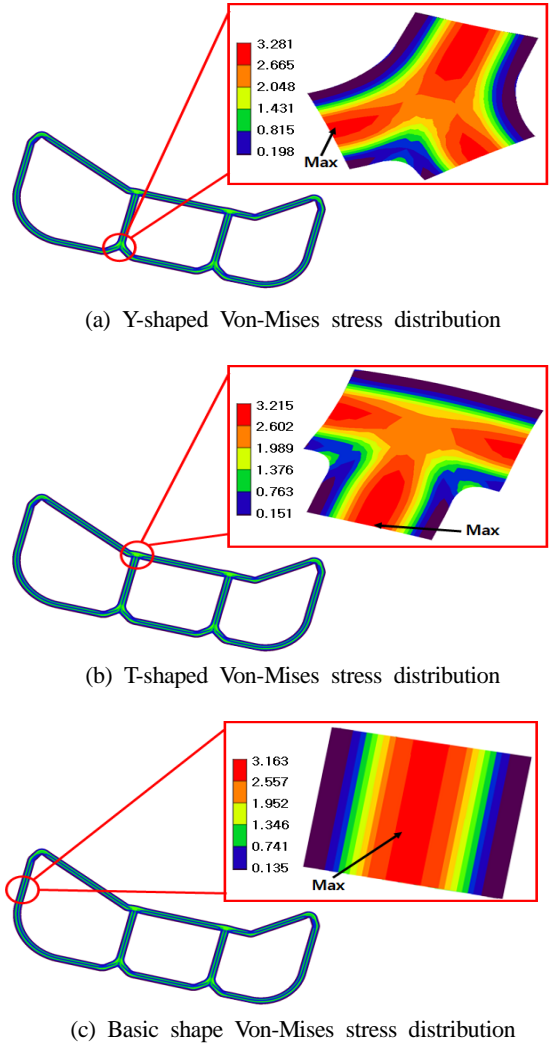
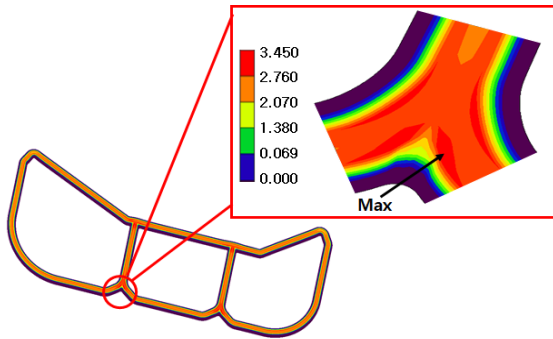


Fig. 7 Surface pressure distribution by shape

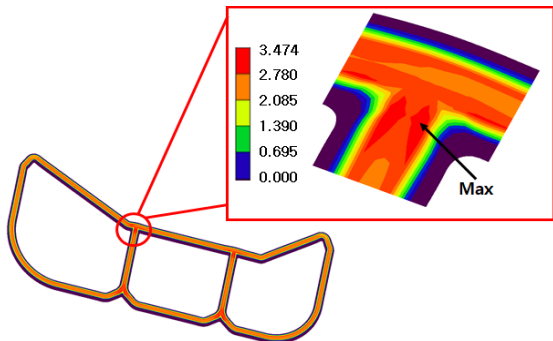
Table 3 Deformed shape when compressing a specific part of the gasket

Gasket Configuration	View A	View B	View C
	before 	before 	before
	after 	after 	after

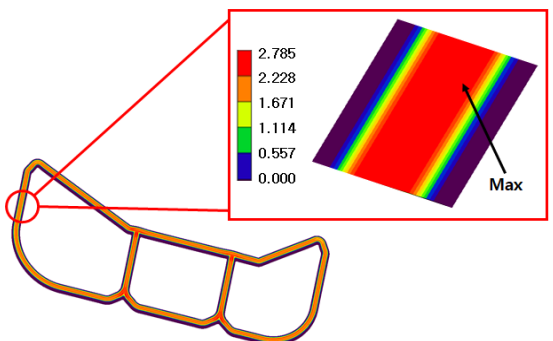
10~30%를 압축하였을 때, 영구압축줄임은 작게 발생하고, 씰링 역할을 만족하기 때문에 초기 높이(2.05mm)의 30%인 0.65mm 만큼 압축하였으며, 가스켓을 0.65mm만큼 압축하였을 때, 가스켓 특정 부위의 변형은 Table 3과 같으며, 변형이 상하 대칭을 나타내고 있다. 이때의 Von-Mises 응력



(a) Y-shaped surface pressure distribution



(b) T-shaped surface pressure distribution



(c) Basic shape surface pressure distribution

Fig. 8 Surface pressure distribution by shape

분포는 Fig. 7과 같으며, 최대 응력이 3.163~3.281MPa로 위치에 따른 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 또한, 면압 분포는 Fig. 8과 같으며, “T” 형상(Fig. 8(a))과 “Y” 형상(Fig. 8(b))의 위치에서 최대 면압은 3.474MPa와 3.450MPa로 기본형상(Fig. 8(c))인 2.785MPa보다 크게 나타났다. 이는 가스켓의 “T”와 “Y”의 분기 형상 효과에 기인한 것으로 판단되며, 차후에는 면압을 측정할 수 있는 치구를 제작하여 시험결과와 해석결과에 대한 비교 검증 연구를 수행할 예정이다.

5. 결론

단축 인장시험과 해석을 통해 선정된 최적의 변형률 에너지밀도 함수를 실제 가스켓에 적용하여 수소 연료전지에 사용되는 가스켓의 거동을 예측하기 위한 해석을 진행하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 재료의 특성을 예측하기 위해 비교한 모델 중 Mooney-Rivlin 2차 모델이 다른 모델들보다 시험결과와 가장 유사한 거동을 나타낸다.
- 2) 가스켓의 최대 응력은 3.163~3.281MPa 수준이며, 위치에 따른 차이는 크지 않았다.
- 3) 가스켓의 최대 면압은 2.785~3.474MPa 수준이며, “T”와 “Y”의 위치에서 분기형상 효과에 기인하여 다른 위치보다 최대 면압이 높게 나타났다.
- 4) 차후에는 면압을 측정할 수 있는 치구를 제작하여 시험결과와 해석결과를 비교 검증연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 및 한국산업기술평가관리원의 소재부품기술개발 - 전략핵심소재자립화기술개발의 연구결과로 수행되었음(K_G012000998301).

REFERENCES

1. Lee, S. M., Jeon, J. H., Lee, C. W., Suh, J. D., Chang, H., Kim, S. H., Lee, S. H. and Hwang, W. B., “Structural Analysis in Metal Bipolar

- Plate of Fuel Cell Stack”, Conference of the Korean Society for New and Renewable Energy, pp. 101-104, 2007.
2. Lee, H. R., Ahn, J. H., Shin, J. O. and Kim, H. Y., “Design of Solenoid Valve for FCV Cylinder Considered Structural Safety”, Conference of Korean Society of Manufacturing Process Engineers, pp. 46-46, 2016.
 3. Hydrogen Council, “Hydrogen Meets Digital”, pp. 8-10, 2018.
 4. Kim, G. H., Choi, S. H. and So, J. D., “A Study on Improve Performance and Control of Fuel Cell System”, Conference of the Korean Society of Manufacturing Engineers, pp. 209-213, 2007.
 5. Park, J. S., Yoon, J. Y., Lim, J. B., Lee, W. Y. and Jo, J. W., “Structural Analysis of Bipolar Plates in a PEM Fuel Cell Considering Hyperelastic Behaviors”, Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, pp. 215-218, 2007.
 6. Ahn, S. S., Kim, S. R., Park, H. S., Kang, Y. G., Koo, J. M. and Seok, C. S., “Evaluation of Fatigue Characteristics of Rubber for Tire Using Strain Energy Density”, The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 36, No. 10, pp. 1163-1169, 2012.
 7. Cho, J. K., Kim, R. S., Park, I. K., Kim, Y. C., Hwang, M. J., Suhr, J. H., Jung, H. S., Kang, J. W. and Nam, J. D., “Hyperelastic Material Modeling of Natural Rubber Compounds and Finite Element Analysis of Bushing Performance in Automobile”, The Polymer Society of Korea, Vol. 42, No. 6, pp. 946-953, 2018.
 8. Woo, C. S., “Strain Energy Function for Characteristic Analysis of Rubber Parts”, Rubber Technology Vol. 20, No. 2, pp. 94-101, 2019.
 9. Choi, B. G., Heo, M. H., Seo, C. M., Kwon, H. R., Kim, K. H. and Park, S. H., “Analysis on Hyperelastic Model of Automotive Weatherstrip Rubber”, Conference of Korean Society of Automotive Engineers, pp. 1109-1112, 2017.
 10. Kim, W. D., Kim, W. S. and Kim, C. H., “Determination of Rubber Material Model and the Deformation Behaviors of Rubber Component Considering Mullins Effect”, MSC Korea User conference, 2001.
 11. Lee, K. S., Ki, M. S. and Park, B. J., “Comparative Study on the Nonlinear Material Model of HyperElastic Material Due to Variations in the Stretch Ratio”, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 32, No. 4, pp. 253-260, 2018.
 12. Fuel Cell Gasket Friction Coefficient Measurement Report, Pyung Hwa Oil Seal, pp. 16-17, 2020.