

# 다구찌 기법을 이용한 수소 연료전지용 가스켓 설계

천강민\*, 안준현\*\*, 허장욱\*.#

\*금오공과대학교 기계공학과(항공기계전자용합공학전공), \*\*평화오일셀공업

## Design of Gaskets for Hydrogen Fuel Cells Using Taguchi Method

Kang-Min Cheon\*, Jun-Hyeon An\*\*, 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 11 June 2021; received in revised form 21 July 2021; accepted 7 October 2021)

### ABSTRACT

The Mooney-Rivlin second order optimal strain energy function derived through uniaxial tensile test and analysis was applied to a gasket to confirm the internal stress and surface pressure generated during compression. The Taguchi method, a statistical technique, was used to design the optimum shape of the gasket, and through characteristic evaluation, the optimum shape of the gasket was obtained when the reference plane (T: 0.15 mm), contact surface (W: 1.00 mm), and curvature (R: 0.30 mm) were used. It was determined that the optimum shape yields a von Mises stress of 4.83 MPa, and the contact pressure stress is 20.14 MPa, which satisfies breakage and sealing requirements. In the future, we plan to manufacture a jig that can measure surface pressure to conduct comparative verification studies between the test results and analysis results.

**Keywords** : Hydrogen Fuel Cell(수소 연료전지), Finite Element Analysis(유한요소해석), Gasket(가스켓), Taguchi Method(다구찌 기법), Optimal design(최적설계)

### 1. 서 론

최근 세계는 기후 변화 및 지구 온난화로 인해 환경회의 및 기후 변화 협약에서 이산화탄소 저감 및 화석연료 사용 억제 등 탄소 배출을 줄이기 위해 여러 변화를 시도하고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 노력의 일환으로 승용차와 트럭과 같은 내연기관 차량의

배출가스에 대한 규제를 강화하는 추세이며, 신재생에너지를 동력원으로 사용하는 친환경 자동차를 개발하기 위해 노력하고 있다<sup>[2]</sup>.

연료전지는 높은 에너지 밀도를 가지고 있는 수소를 연료로 사용하여 대기 중 산소와 화학반응으로 전기와 물을 발생시키며, 전기를 만들기 위해 수소의 산화반응을 발생시키는 음극, 산소의 환원반응을 발생시키는 양극과 수소이온을 전달해주는 전해질 막으로 구성된다<sup>[3]</sup>. 기존에는 연료전지에서 수소, 산소 및 냉각수가 분배되도록 통로 역할을

# Corresponding Author : hhjw88@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7399

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하고, 강성이 약한 부품을 지지해주는 분리판에 대한 연구가 활발하게 진행되었다<sup>4)</sup>.

그러나, 최근에는 기밀성 향상을 통해 연료전지 시스템 효율에 직접적인 영향을 미치는 가스켓의 중요성이 강조되고 있으며, 가스켓 형상 및 치수는 반복적인 실험과 경험에 의존하여 제작하고 있기 때문에 제품 설계 단계에서 가스켓의 변형 및 응력 상태 등의 고려가 요구된다.

이러한 가스켓에 사용되는 고무 재료는 하중과 변형이 선형적이지 않은 대변형 구간에서도 탄성 성질을 나타내는 초탄성 특징을 가진다<sup>5,6)</sup>. 따라서, 본 연구에서는 가스켓에 사용되는 초탄성 재료인 EPDM(Ethylene Propylene Diene Monomer)을 대상으로 다구찌 기법을 적용하여 가스켓 설계 파라미터의 영향성을 제시하였다.

## 2. 다구찌 이론

다구찌 기법은 제품의 품질개선 방법론의 일종으로 제어 가능한 파라미터를 이용하여 통제가 불가능한 파라미터를 포함한 강건설계 기법으로 설명되고 있다. 일반적으로 제품의 품질 정의는 생산자의 정의, 사용자의 정의 등이 있지만, 다구찌 기법은 제품이 출하된 후 발생하는 사회적 손실로 정의하였으며, 품질이 좋은 제품은 소비자에게 손실이 적다는 것을 의미하고, 손실의 개념을 손실함수로 정량화하였다<sup>7)</sup>.

손실함수에서 사용되는  $y$ 는 품질의 특성치를 의미하고  $y$ 의 목표치를  $m$ 이라 할 때  $m$ 에서 벗어난

손실을  $L(y)$ 라고 한다.  $m$ 과  $y$ 에 대해 편차가 없다고 하고,  $L(y)$ 를  $m$ 에 대해 테일러 급수전개를 하면, 손실함수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>7)</sup>.

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (1)$$

손실함수는 품질의 특성치가 클수록 좋은 망대 특성(Lager-the-Better)과 특성치가 목표치에 가까울수록 좋은 망목특성(Nominal-the-Best) 및 특성치가 작을수록 좋은 망소특성(Smaller-the-Better)으로 구분할 수 있다. Table 1에 각 특성에 따른 손실함수와 기대손실을 나타내었으며, 기대손실은 손실함수의 평균치를 의미한다<sup>8)</sup>. 또한, 다구찌 기법은 개선을 위한 정도를 나타내는 측정치로 잡음에 대한 제어 파라미터의 영향력을 나타내는 SN비(Signal-to-Noise Ratio)를 반영하고 있다. 각 특성에 대한 SN비를 표에 나타내었으며, 여기서,  $n$ 은 실험횟수,  $y_i$ 는 실험에서 얻은 데이터,  $\bar{y}$ 는 데이터들의 평균,  $V$ 는 분산을 의미한다<sup>9)</sup>.

다구찌 기법은 설계단계에서 품질에 관계되는 여러 설계 파라미터를 통계적으로 반영하여 특성의 민감도와 영향도를 평가함으로써 설계 파라미터를 결정할 수 있다. 특성치는 제품의 기준이 되는 평가특성을 의미하고, 설계 파라미터는 특성치에 영향을 미치는 치수나 형상을 의미한다. 설계 파라미터가 가질 수 있는 값을 여러 개의 수준으로 정의하여, 적절한 직교배열표를 만들고 획득한 데이터로부터 SN비를 분석하여 제품의 설계 조건을 결정할 수 있다.

**Table 1** Types of characteristic and SN ratio

Characteristic	Loss Fuction $L(y)$	Expect Loss $L$	SN Ratio
Lager-the-better	$k \frac{1}{y^2}$	$L = \frac{k}{\mu^2} \left( \frac{3\sigma^2}{\mu^2} + 1 \right)$	$SN = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$
Nominal-the-best	$k(y - m)^2$	$L = k \{ \sigma^2 + (\mu - m)^2 \}$	$SN = 10 \log \left( \frac{\bar{y}^{-2}}{V} \right)$
Smaller-the-better	$ky^2$	$L = k(\sigma^2 + \mu^2)$	$SN = -10 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right)$

### 3. 해석 방법 및 결과

초탄성 재료인 고무의 해석을 위해서는 적합한 변형률 에너지 함수의 적용이 필요하다. 여러 가지 변형률 함수 중 Mooney-Rivlin 2차 모델은 가스켓의 단축 인장시험에 적합한 모델로써<sup>[10]</sup>, Cauchy-Green 변형 텐서의 1차, 2차 불변량( $I_1, I_2$ )과 실험에 의해 결정되는 재료상수( $C_{10}, C_{01}$ )를 이용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[11]</sup>.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2)$$

연료전지의 스택(Stack)은 단위셀(Unit Cell)이 적층되어 구성되고, 높은 전압을 출력하기 위해 직렬로 수백장의 단위셀을 적층한다. 단위셀은 분리판, 가스켓, 기체확산층(Gas Diffusion Layer) 및 막전극접합체(Membrane Electrode Assembly)로 이루어지며, 단위셀에 공급되는 수소와 산소가 전기 화학반응을 일으켜 전기를 생성하게 된다. 가스켓은 전해질 막과 분리판 사이에서 공기, 수소 및 냉각수가 누설되지 않도록 밀봉하는 역할을 한다.

스택 체결로 인한 변위로 가스켓이 압축되는 형상을 Fig. 1에 나타내었고, Hypermesh를 이용하여 요소를 분할하였으며, 요소는 Fig. 2와 같이 quad4를 적용하였다. 가스켓 압축을 위한 지그는 Rigid Body의 Line으로 나타내었으며, 가스켓과 지그는 Bonded 조건을 적용하여 고정하였고, 가스켓과 Pi\_film은 Contact 조건으로 마찰을 고려하였다. 가스켓과 pi\_film간의 마찰계수는 0.1, 가스켓 간의 마찰계수는 0.3을 입력하였으며<sup>[12]</sup> 평면변형률 조건으로 해석을 진행하였다.

경계조건은 중심에 symmetry 조건을 부여하고, 가스켓은 단축 인장시험을 통해 획득한 데이터를 MARC 프로그램에 입력하여 Mooney-Rivlin 2차 모델의 응력과 변형률의 관계로부터 Table 2와 같이 재료 상수를 도출하였으며, Pi\_film은 Young's Modulus를 400MPa, Poisson's Ratio를 0.45로 입력하였다. Pi\_film은 가스켓 압축 시 slip 현상이 발생하지 않도록 가장자리에 x축 변위는 0으로 경계조건을 설정하였으며, 가스켓의 압축 변위는 영구압축률과 압축량을 고려하여 기존 가스켓 두께(0.35mm)의 25%(0.0875mm)인 0.175mm만큼 압축하였다.

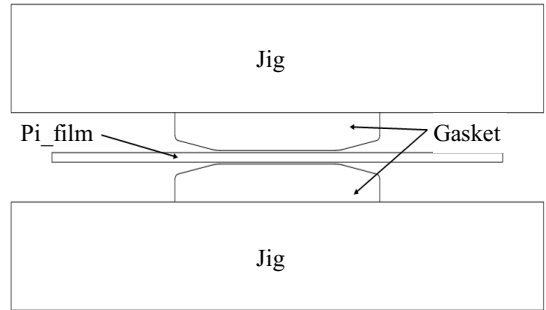


Fig. 1 Analysis model

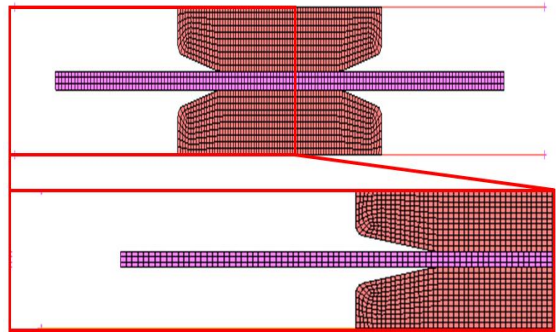
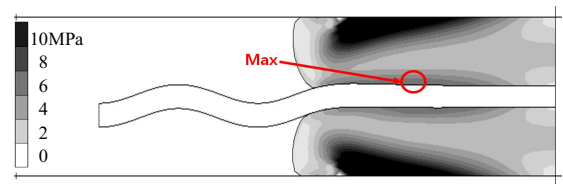


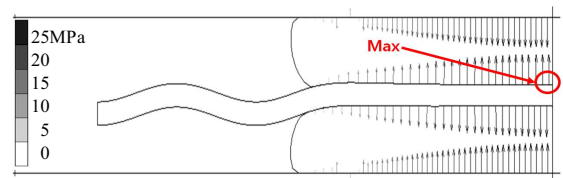
Fig. 2 Finite element model and boundary conditions

Table 2 Mooney-Rivlin 2<sup>nd</sup> material constant

$C_{10}$	$C_{01}$
-0.0605459	0.833439



(a) Von-Mises stress



(b) Contact pressure

Fig. 3 Analysis results

가스켓을 압축하였을 때, 가스켓의 등가응력(Von-Mises Stress) 분포는 Fig. 3(a)와 같으며, 가스켓과 Pi\_film이 접촉하는 면에서 최대 응력(6.3MPa)이 나타났다. 또한, 면압 분포(Contact pressure)는 Fig. 3(b)와 같으며, 중심에서 최대 면압(23.58MPa)이 발생하였다. 따라서, 가스켓의 최대 응력은 EPDM의

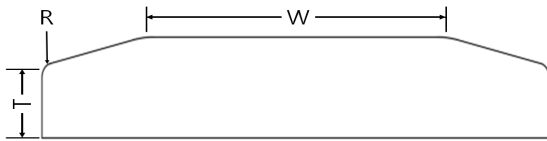


Fig. 4 Gasket design parameter

Table 3 Design parameter and levels

Factor	Level		
	1	2	3
T(mm)	0.15	0.20	0.25
W(mm)	1.00	1.50	1.80
R(mm)	0.30	0.50	0.70

Table 4 Orthogonal array of taguchi  $L_9(3^3)$

Types	T(mm)	W(mm)	R(mm)
Case1	0.15	1.00	0.30
Case2	0.15	1.50	0.50
Case3	0.15	1.80	0.70
Case4	0.20	1.00	0.50
Case5	0.20	1.50	0.70
Case6	0.20	1.80	0.30
Case7	0.25	1.00	0.70
Case8	0.25	1.50	0.30
Case9	0.25	1.80	0.50

Table 5 Evaluation properties by case

Types	Von-Mises Stress	Contact Pressure
Case1	4.83	20.14
Case2	6.04	23.57
Case3	6.55	24.13
Case4	5.30	21.61
Case5	5.90	23.53
Case6	7.19	24.85
Case7	5.94	23.76
Case8	6.37	23.90
Case9	6.88	24.18

인장강도(6~7MPa)<sup>[12]</sup>와 유사한 결과를 표시하고 있으며, 면압은 밀봉을 위해 필요한 압력(7MPa)<sup>[12]</sup>보다 다소 높게 발생하였다.

#### 4. 다구찌 기법을 적용한 가스켓 설계

연료전지는 수백 장의 단위셀을 적층하여 스택 체결 시 가스켓이 압축될 때 균열이나 파손이 발생하지 않아야 하고, 가스켓은 수소와 산소가 새어나가지 않도록 실링(Sealing) 기능을 수행하여야 하기 때문에 가스켓의 평가특성을 등가응력과 면압으로 설정하였다<sup>[12]</sup>. 평가특성에 주효과를 나타내는 가스켓 설계 파라미터들은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 기준면(Reference Plane, T), 접촉면(Contact Surface, W) 및 곡률(Curvature, R) 등이 있으며, 각 설계 파라미터들은 제작 가능한 범위에서 3가지 수준으로 Table 3과 같이 선정하였다. 기준면(T)은 기존 0.25mm에서 설계 범위인 0.15mm와 중간 값인 0.2mm를 하였으며, 접촉면(W)은 기존 1.5mm에서 최대, 최소로 설계 가능한 1.00mm와 1.80mm를 하였고, 곡률(R)은 기존 치수인 0.5mm에  $\pm 20\%$  적용하여 수준을 선정하였다. 모든 파라미터를 고려하여 해석을 진행할 경우  $3^3$ 개로 27번의 해석을 진행해야 한다. 하지만, 교호작용을 희생시켜 실험의 횟수를 줄이기 위해 3파라미터 3수준일 때 사용하는  $L_9(3^3)$  직교배열표를 사용하여 Table 4에 나타내었으며, 총 9번의 해석을 통해 각 case의 결과를 얻을 수 있다.

9가지 조건에 대해 해석으로 획득한 등가응력과 면압을 Table 5에 나타내었다. 2가지 평가특성 모두 파손과 밀봉 성능을 만족하는 범위에서 특성치가 작을수록 우수한 설계이므로 망소특성을 선정하였으며, 망소특성은 SN 비가 클수록 평가특성의 값이 낮게 발생한다<sup>[13]</sup>. 그러나, 본 연구에서는 잡음 인자를 고려하지 않았기 때문에 각 파라미터의 수준에 대한 등가응력과 면압의 평균값으로 분석하였으며, 식 (3)을 사용하여 설계 파라미터간 수준별 평균값을 구하였다.

$$\text{Level Average} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

**Table 6 Response table for means of Von-Mises stress**

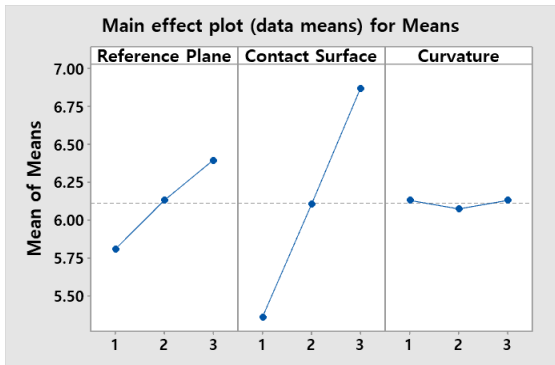
Factor	Level			
	T	W	R	
Means	1	5.807	5.357	6.130
	2	6.130	6.103	6.073
	3	6.397	6.873	6.130
Delta	0.590	1.517	0.057	
Rank	2	1	3	

**Table 7 Response table for means of contact pressure**

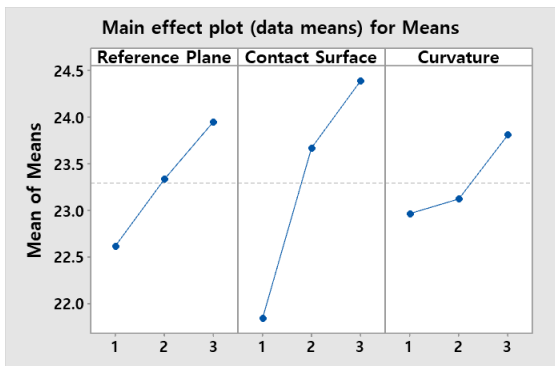
Factor	Level			
	T	W	R	
Means	1	22.61	21.84	22.96
	2	23.33	23.67	23.12
	3	23.95	23.95	24.39
Delta	1.33	2.55	0.84	
Rank	2	1	3	

설계 파라미터에 대한 등가응력과 면압의 수준별 평균값을 Table 6과 Table 7에 나타내었으며, Fig. 5에 주 효과도를 나타내었다<sup>14)</sup>. 그림으로부터 등가응력과 면압에 민감도가 큰 설계 파라미터는 기준면(T), 접촉면(W), 곡률(R) 순으로 표시되고 있음을 알 수 있으며, 등가응력에 대해 기여도가 큰 각 요인별 수준은 기준면의 1수준(0.15mm), 접촉면의 1수준(1.00mm), 곡률의 2수준(0.50mm)이고, 면압에 대해 기여도가 큰 각 요인별 수준은 기준면의 1수준(0.15mm), 접촉면의 1수준(1.00mm), 곡률의 1수준(0.30mm)을 나타내고 있다.

이러한 결과로부터, 2가지 평가특성에 대해 기준면과 접촉면은 공통으로 1수준일 때 기여도가 가장 높게 나타났고, 곡률의 경우 등가응력과 면압이 서로 다른 수준이지만, 등가응력의 경우 수준별 SN비가 비슷하기 때문에 면압에서 기여도가 큰 1수준을 선정하였다. 따라서, SN 비의 결과를 통해 평가 특성이 최적인 가스켓의 파라미터 조건은 case1 (W : 0.15mm, T : 1.00mm, R : 0.30mm)임을 알 수 있다. 다구찌 기법을 통해 얻은 최적 형상의 등가응력은 Fig. 6(a)와 같이 4.83MPa로 기준(6-7MPa)보다 매우 작게 발생하였으며, 면압은 Fig. 6(b)와 같이 20.14MPa로 기준(7MPa)보다 크게 나왔기 때문에 만족한다고 볼 수 있다.

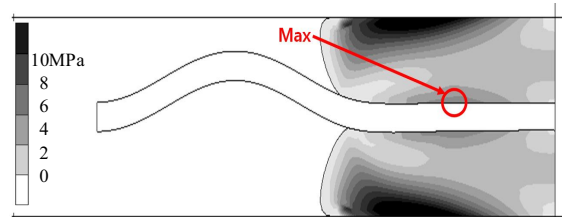


(a) Von-Mises stress

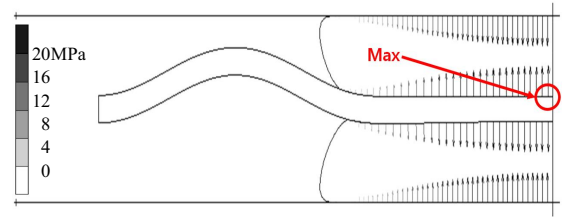


(b) Contact pressure

**Fig. 5 Main effect plots for means**



(a) Von-Mises stress



(b) Contact pressure

**Fig. 6 Analysis results**

## 5. 결론

가스켓에 사용되는 초탄성 재질인 EPDM을 대상으로 다구찌 기법을 적용하여 가스켓 설계 파라미터의 영향성을 검토하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 등가응력과 면압의 특성 평가로부터 가스켓 형상의 설계 파라미터가 W(0.15mm), T(1.00mm), R(0.30mm)에서 최적으로 도출되었다.
- 2) 최적 설계 파라미터를 적용시 등가응력은 4.83 MPa, 면압은 20.14MPa이 계산되었으며, 이는 설계 기준을 충족하였다.
- 3) 차후에는 면압을 측정할 수 있는 치구를 제작하여 시험결과와 해석결과를 비교 검증하는 연구를 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 및 한국산업기술평가관리원의 소재부품기술개발 - 전략핵심소재자립화기술개발의 연구결과로 수행되었음(K\_G012000998301).

## REFERENCES

1. 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 the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, pp. 46-46, 2016.
2. Choi, J. H. and Choi, J. Y., "Research Status of Hydrogen Fuel Cell System Based on Hydrogen Electric Vehicle", Korean Society for Energy, Vol. 29, No. 4, pp. 26-34, 2020.
3. Sim, J. P., Lee, C. R. and Lee, H. G., "Principle and Application of Hydrogen Fuel Cell as a Renewable Energy Source", The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 61, No. 11, pp. 15-22, 2012.
4. Jeon, Y. T. and Jeong, Y. S., "Metallic Bipolar Plates for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)", Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 36, No. 6, pp. 27-32, 2014.
5. Kim, D. Y., Kim, J. M. and Kim, H. Y., "Study of Analysis Process to Maintain Sealing Efficiency of Automotive Fuel Cell Stack", Conference of the Korean Society Of Automotive Engineers, pp. 549-549, 2008.
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. Yum, B. J., Ko, S. W. and Kim, S. J., "The Taguchi Method for Product and Process Design", The Korean Operations Research and Management Science Society, Vol. 7, No. 2, pp. 3-21, 1990.
8. Yum, B. J., Kim, S. J., Seo, S. K., Byun, J. H. and Lee, S. H., "The Taguchi Robust Design Method : Current Status and Future Directions", Korean Institute Of Industrial Engineers, Vol. 39, No. 5, pp. 325-341, 2013.
9. Wu, R. Z., Yoon, H. S. and Ahn, S. H., "A Study on Design of Micro End-mill Geometry using Taguchi method and Response Surface Method", Conference of the Korean Society for Precision Engineering, pp. 869-870, 2010.
10. Cheon, K. M., Jang, J. H. and Hur, J. W., "Finite Element Analysis of Gaskets for Hydrogen Fuel Cells", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 2021.
11. 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.
12. Fuel Cell Gasket Friction Coefficient Measurement Report, Pyung Hwa Oil Seal, pp. 16-17, 2020.

13. Cho, S. H., Kim, C. K. and Kim, Y. G.,  
“Optimized Design of O-Ring using Taguchi Method”, Conference of the Korean Society Of Tribologists And Lubrication Engineers, pp. 241-247, 2003.
14. Park, S. K., “Study of Muffler for Rotary Compressor by Taguchi Method Viewpoint”, Conference of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering(KSNVE), pp. 542-547, 1998.