

## 전자식 수소레귤레이터 기밀성 향상을 위한 FEA 연구

손원식<sup>1</sup>, 송재욱<sup>1</sup>, 전완재<sup>2</sup>, 김승모<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>한국기술교육대학교 기계공학과, <sup>2</sup>(주)모토닉

### FEA(Finite Element Analysis) Study for Electronic Hydrogen Regulator of Confidentiality Improvement

Won-Sik Son<sup>1</sup>, Jae-Wook Song<sup>1</sup>, Wan-Jae Jeon<sup>2</sup>, Seung-Mo Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education  
<sup>2</sup>Motonic

**요 약** 수소연료전지차(FCEV)의 수소연료 공급시스템에서 대용량 감압에 사용되는 기존의 1단 감압 구조 레귤레이터(Regulator)의 경우 높은 감압에 따른 맥동과 느린 응답, 수소 취성, 누설, 고중량, 고비용 등의 문제점이 있다. 이러한 문제점은 2번에 걸친 감압 메커니즘(2단 구조)을 가지는 2단 레귤레이터 개발을 통해 극복될 수 있으며, 2번째 감압 시점에 전자식 솔레노이드 밸브를 적용한다면 폭넓은 출구압력의 제어가 가능하다. 이에 따라 2단 전자식 솔레노이드 밸브를 가지는 레귤레이터의 출구압력 정밀도 향상과 누설방지, 내구성, 경량화, 가격저감 등의 기술개발이 필요한 실정이다. 이 중에서도 레귤레이터의 필수적인 성능인 출구압력 정밀도 향상과 누설 방지를 위해 감압 전과 감압 후의 구조 부분을 나누어 각각의 초기 내압 적용 후 Valve part가 닫힌 상태(Open Ratio : 0%)로 가정하여 해석 연구를 진행하였다. 1차감압부의 기밀성과 관련하여 Aluminum Alloy 소재의 사용은 부적절하다고 판단되었고, 서로 다른 금속으로 구성되었을 때는 응력의 변화와 함께 변위 또한 같이 증가하므로 이중 소재를 사용하는 접촉부 구성은 부적절하다고 판단되었다. 2차 감압부의 기밀성과 관련된 변위 측면에서는 Young's Modulus 값이 큰 TPU(Thermoplastic Polyurethane)를 사용하는 것이 비교적 변위량이 작으므로 적절하다고 판단하였고, 기밀성에 대한 기준으로 Case 분석을 진행한 결과 최적 형상을 설계할 수 있었다.

**Abstract** In the case of a conventional single stage decompression regulator used for large depressurization in the hydrogen fuel cell system of a fuel cell electric vehicle (FCEV), problems can arise, such as pulsation, slow response, hydrogen brittleness, leakage, high weight, and high cost due to high decompression. Most of these problems can be overcome easily using two decompression mechanisms (two-stage structures). In addition, a wide outlet-pressure control range can be secured if an electronic solenoid is applied to the second decompression. Accordingly, it is necessary to improve the precision of the outlet pressure of a two-stage pressure-reducing regulator and develop techniques, such as leakage prevention, durability, light weight, and price reduction. Therefore, to improve the outlet pressure accuracy and prevent leakage, the structural part before and after decompression to improve the air tightness were divided and the analysis was carried out assuming that the valve part was closed (open ratio: 0%) after each initial internal pressure application.

**Keywords** : FCEV, Hydrogen Brittleness, Air Tightness, Displacement, 2-Stage Pressure Reducing Regulator

본 연구는 산업통상자원부가 지원하는 권역별신산업육성사업 지원(R0006465)과 2019년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥과제의 지원으로 수행된 연구결과임.

\*Corresponding Author : Seung-Mo Kim(Korea University of Technology and Education)  
email: smkim@koreatech.ac.kr

Received June 24, 2019

Revised July 25, 2019

Accepted September 6, 2019

Published September 30, 2019

## 1. 서론

수소 연료전지차(FCEV)의 연료로 사용되는 수소와 공기 중의 산소는 화학반응 통해 전기를 만들어내고, 배기 가스로 수증기만을 배출하게 되어 미래의 자동차 산업을 주도할 것으로 전망되고 있으며, 수소 산업 또한 미래에 막대한 경제적, 환경적 파급효과를 보일 것으로 예상되고 있다[1].

국내에서도 국제 에너지기구의 예상 전망보다 높은 수소연료전지차를 보급할 계획을 추진 중이고, 환경부와 산업통상자원부는 '수소차 보급 및 시장 활성화 계획'을 수립하여 발표하였다.

기존의 수소연료전지차의 수소연료 공급시스템에서 대용량 감압에 사용되는 1단 감압 구조 레귤레이터의 대부분의 문제점은 2단 감압 메커니즘을 통해 쉽게 극복될 수 있지만 아직 2단 감압 메커니즘에 대하여 많은 연구가 필요한 상황이다[2]. 2단 감압 레귤레이터 출구압력 정밀도의 향상과 누설방지와 내구성, 경량화, 가격저감 등 여러 부분에서의 기술개발이 필요하다.

수소의 점화는 낮은 에너지에도 쉽게 일어날 수 있으므로 가스 누출이 발생할 경우 폭발 등의 사고로 승객과 주변의 안전의 문제로 이어져 누설방지에 대한 기밀성 확보가 매우 중요한 부분이다[3]. 누설방지에 대한 방법으로는 금속 간 조립부 사이에 고무류 혹은 엔지니어링 플라스틱 등을 기밀부재로 사용하여 누설을 방지하는 방법이 사용되고 있다[4]. 이에 따라 수소연료 공급시스템에 사용되는 레귤레이터(regulator)의 성능을 확보하기 위한 설계 연구를 진행하였다.

## 2. 연구 대상 및 목적

### 2.1 레귤레이터 구조

기존의 수소연료전지차의 수소연료 공급시스템에서 대용량 감압에 사용되는 1단 감압 구조 레귤레이터는 높은 감압에 따른 맥동과 느린 응답, 누설, 수소취성, 고충량, 고비용 등의 문제가 발생한다.

1단 고압 수소 레귤레이터의 경우 필드에서 밸브 시트 누설과 기포 발생을 방지하기 위한 고정밀 단조 및 실링 기술이 요구되고, 이로 인한 높은 불량률에 따른 생산성 저하 등의 문제점이 발생한다. 또한 1단 구조가 갖는 기밀성과 관련된 문제점으로는 재료 물성, 치수 정밀도, 설계적 제약 등이 있다[6].

1단 감압 구조가 갖는 대부분의 문제점은 2번에 걸친 감압 메커니즘(2단 구조)을 통해 쉽게 극복될 수 있다. 또한 2번째 감압에 전자식 솔레노이드를 적용한다면 폭넓은 출구압력 제어 범위의 확보가 가능하고, 이에 따라 다양한 차종에 적용이 가능하여 범용 플랫폼 부품으로 적용이 가능하다.

압축수소 저장 방식으로 350 bar와 700 bar의 탱크 시스템이 사용되어 왔지만, 2단 감압 구조를 사용할 경우 기존의 내연기관 자동차의 1회 충전거리를 확보하기 위해서는 수소 기체를 압력용기에 700 bar 이상의 고압으로 저장을 해야 하고, 압력용기에 충전되어 있는 수소를 연료전지 전단 밸브에 공급하려면 16 bar 수준으로 감압해야 한다. 다만 이를 위해서 수소용 2단 감압 구조의 고압 레귤레이터의 기본 설계 및 개발이 필요한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 2단 감압 수소레귤레이터의 핵심 소재의 기계적 특성 평가 및 물성 모델을 구축하고, 출구압력 정밀도의 향상과 누설 방지를 위해 FEM(Finite Element Method) 기반 기밀성 향상을 위한 해석 연구 및 설계를 진행하였다.

## 3. 모델링 및 조건정리

### 3.1 물성 조건

1차 감압부의 해석용 물성맵 확립 및 물성모델 구축을 위한 AL6082, AL7021, S45C-H, SUS304, SUS431, SS400, SPHC, SAPH440, SCM445의 각 소재별 물성값 및 가공성과 수소취성 등을 고려하여 최종 해석용 물성 소재를 선정하였다[5]. 최종적으로 1차 감압부의 소재로 AL6082(Aluminum Alloy), SUS431(Stainless Steel), SCM445(Alloy Steel)이 선정되어 해석을 통한 설계에 적용하였다. 이에 따라 1차 감압부의 소재특성을 Table 1에 표기하였고, 해석을 위한 물성모델을 Table 2에 표기하였다.

Table 1. Material Properties by Tensile Testing

Property \ Material	Al Alloy	STS	Alloy Steel
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2530	7800	7800
Elastic Modulus [GPa]	77.1	198	201
Yield Tensile Strength [MPa]	277	590	805
Ultimate Tensile Strength [MPa]	341	780	1060

Table 2. Physical Properties Model for Interpretation

Property \ Part	1 Stage Part	Shaft Part
Case 1	Al Alloy	Al Alloy
Case 2	STS	STS
Case 3	Alloy Steel	Alloy Steel
Case 4	Al Alloy	STS
Case 5	Al Alloy	Alloy Steel

2차 감압부의 경우도, 해석용 물성맵 확립 및 물성모델 구축을 위한 SUS303, SUS304, SUS316, SUS316L, SUS410, SUS431, TPU(Thermoplastic Polyurethane), PU(Polyurethane)의 각 소재별 물성값에 대한 평가를 통해 최종 해석용 물성 소재를 선정하였다. 최종 2차 감압부의 소재로는 수소 취성부의 재료로는 SUS316L, 자성부의 재료로는 SUS410, 시트부 재료로는 TPU가 선정되었고, 이에 따라 2차 감압부 소재의 특성을 Table 3에 표기하였다.

Table 3. Material Properties of 2 Stage Part

Property \ Material	SUS316L	SUS410	TPU
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	8000	7800	1170
Elastic Modulus [GPa]	200	200	-
Yield Tensile Strength [MPa]	480	485	≥50
Poisson's Ratio [-]	0.285	0.285	0.4

### 3.2 모델링 및 해석조건

본 연구에서는 ANSYS v.16의 전처리 프로그램인 Design Modeler를 이용하여 1차 감압부(1 Stage Part)와 2차 감압부(2 Stage Part)를 모델링하였고 Fig. 1에 도시하였다.

1차 감압부에 대한 해석 진행의 경우, 해석적용 부위가 XY평면과 YZ평면에 대칭 형태인 것을 감안하여 1/4 Symmetry 형상으로 모델링하였고 Fig. 2에 도시하였다. 2차 감압부의 경우는 해석 진행을 위하여 해석적용 부위를 XZ평면에 대칭 형태인 것을 감안하여 1/2 Symmetry 형상으로 모델링하였고, 출구압력 정밀도의 향상과 누설 방지를 위한 구조 최적화를 위해 상대적으로 가장 작은 Density와 Yield Tensile Strength 및 큰

Poisson's Ratio를 갖는 TPU 재질부를 선정하여 기본적인 평평한 형상과 수소가 들어오는 부분으로 볼록한 형상에 대한 Case를 나누어 평가하였다(Fig. 3).

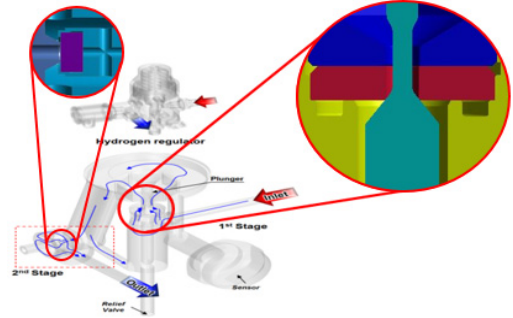


Fig. 1. 1,2 Stage Part

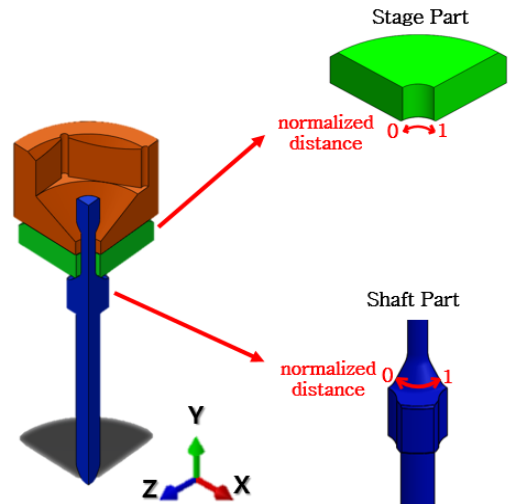


Fig. 2. Simplifying 1 Stage Assy

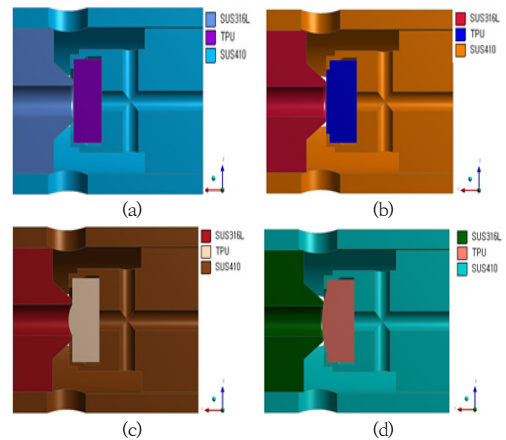


Fig. 3. Case of 2 Stage Part

(a)Case1-flat (b)Case2-flat (c)Case3-round (d)Case4-round

1차 감압부에 대해 원주 곡면 방향으로 레귤레이터 몸체와 나사체결 구조로 연결되어 있으므로 고정 조건(Fixed Constraint)을 설정하였으며, 가장 큰 압력일 때의 기밀성 확인을 위해 구조상 닫힌 상태(Open Ratio : 0 %)에서 변형을 관찰하였다. 1차 감압부의 해석을 위한 격자수는 Table 4에 표시하였고, 앞단(700 bar)과 뒷단(16 bar)의 압력이 상대적으로 큰 차이를 보이므로 이러한 압력차가 어떻게 변형에 영향을 미치는 지 해석을 통해 살펴보았다(Table. 5).

2차 감압부에 대한 기밀성 평가를 위해서는 2차 감압부의 앞단(35, 30, 27, 25 bar)과 뒷단(35, 30, 25, 16 bar)의 가능한 압력들을 적용한 Case들로 나누어 해석을 진행하였고, TPU의 재질은 공정에 따라 다양한 Young's Modulus 값을 가지므로 50 MPa, 100 MPa과 같이 대표적인 2개의 계수에 대한 영향을 살펴보았다. 고려한 Case들의 세부내용과 격자수에 대한 정보를 Table 6와 Table 7에 표시하였다.

또한 Mesh Quality에 대한 검증을 위해 ABAQUS 내에 있는 Verify Mesh Tool을 사용하여 확인하였다.

Table 4. Mesh Information of 1 Stage Part

Mesh Data	
Nodes #	66,339
Element #	170,066
Mixed Element	Tetrahedral, Hexahedral, Wedge
Simulation Tool	
CAE Software	ABAQUS Standard Static Module

Table 5. Case of 1 Stage Part

Case	Pressure
Case 1	700 / 16 [bar]
Case 2	
Case 3	
Case 4	
Case 5	

Table 6. Mesh Information of 2 Stage Part

Mesh Data				
Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Nodes #	304,085	326,841	99,765	102,200
Element #	1,681,430	1,809,944	541,391	557,014
Mixed Element	Tetrahedral			
Simulation Tool				
CAE Software	ABAQUS Standard Static Module			

Table 7. Case of 2 Stage Part

Case	Pressure	Young's Modulus
Case 1	35 / 35 [bar] 30 / 30 [bar] 25 / 25 [bar] 27 / 16 [bar]	50 [MPa]
Case 2		
Case 3		100 [MPa]
Case 4		

## 4. 해석결과 및 고찰

### 4.1 1차 감압부

#### 4.1.1 소재에 따른 최대 응력과 변위 비교

Fig. 4의 그래프는 Contact된 1 Stage part의 Table 2에 따른 Case들의 최대 응력 비교 결과를 도시하였고, 이 해석 결과를 바탕으로 Table 1에 도시한 항복 응력(277 MPa)과 극한 응력(341 MPa)을 토대로 판단하였을 때, 항복 응력과 극한 응력 이상의 결과를 보임으로 수소 레귤레이터 사용에는 적절하지 않을 것으로 판단된다. Stainless Steel를 사용한 물성의 경우 Table 1에 도시한 탄성구간을 벗어나는 기준인 항복 응력(590 MPa) 값 이상의 결과를 보이나 극한 응력(780 MPa) 이상의 결과는 보이지 않았다. Alloy Steel의 경우 Table 1에 도시한 항복 응력(805 MPa)과 극한 응력(1060 MPa)보다 Figs. 4, 5에 나타난 각 Parts에 작용하는 응력이 충분히 작은 값의 결과를 보였다.

Fig. 6의 그래프는 Contact된 1 Stage part의 Table 2에 따른 Case들의 최대 변위 비교 결과를 도시하였고, 기밀성과 관련된 변위 측면에서의 비교 결과, Aluminum Alloy를 사용하였을 때, 가장 큰 변위량 (약 0.0062 mm)을 나타냄으로 적절하지 않을 것으로 판단된다.

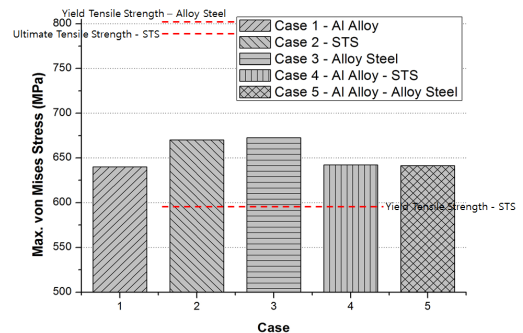


Fig. 4. Maximum Von Mises Stress(1 Stage part)

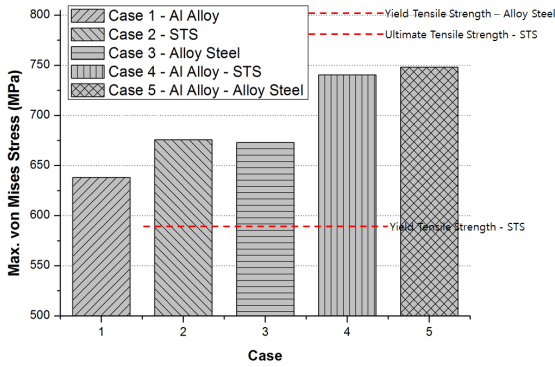


Fig. 5. Maximum Von Mises Stress(Needle Part)

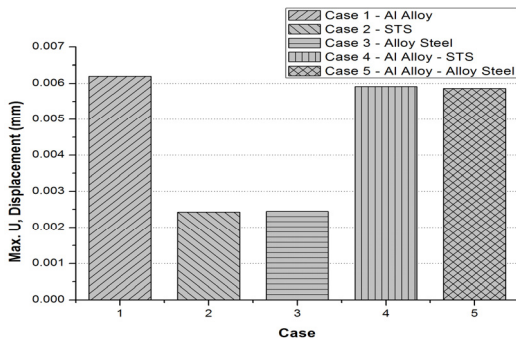


Fig. 6. Maximum Displacement(1 Stage Part)

#### 4.1.2 Contact Surface에서의 기밀성 측면

기밀성과 관련된 1차 감압부의 Part가 만나는 부위의 세밀한 해석을 위해 Contact Surface를 추출하여 Table 2에 따른 Case들의 변위 비교 결과를 Fig 7의 그래프에 도시하였다.

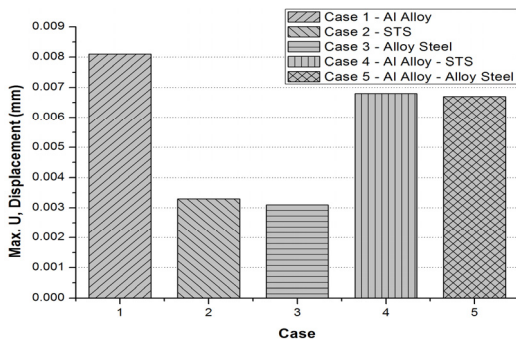


Fig. 7. Maximum Displacement(Contact Surface)

그 결과, Case 1-Aluminum Alloy의 물성 사용 시 가장 큰 변위량(약 0.008 mm)을 보임으로 기밀성과 관련된 변위 측면에서 부적절하다고 판단된다. Case 2-

Stainless Steel와 Case 3-Alloy Steel의 물성 사용 시 가장 작은 변위량(약 0.003 mm)을 보임으로 기밀성과 관련된 변위 측면에서는 적절하다고 판단된다.

## 4.2 2차 감압부

### 4.2.1 Pressure에 따른 최대 변위량과 범위

출구압력 정밀도의 향상과 누설 방지를 위한 구조 최적화를 위해 같은 압력조건에서의 TPU 재질부의 형상별 Case에 대해 비교한 결과를 XZ단면의 가장 윗부분에서 측정하여 그래프로 도시하였다(Figs. 8~11).

TPU의 공정에 따라 분류한 Young's Modulus 값 50 MPa, 100 MPa의 대표적인 2개의 계수에 대한 영향을 살펴본 결과, Young's Modulus 값이 100 MPa인 재질을 사용하였을 때 50 MPa인 재질과 비교하여 약 50%의 변위량이 감소하였다.

모든 Case에 대해 앞단과 뒷단에 각각 27 bar와 16 bar의 압력이 걸린 경우에 가장 작은 변위량을 보였고, 2단 감압 구조 레귤레이터의 2차 감압부에서는 최대 30 bar까지의 압력이 걸리도록 설계되어있으나 안전상 더 높은 압력을 적용 시켜 압력이 35 bar일 때, 즉 유동이 지나가는 부의 전체에 걸리는 압력이 35 bar가 걸릴 때의 Case를 추가하여 최대 변위량을 측정하였다.

TPU 재질부의 형상별 Case에 대한 비교를 위해 같은 압력조건에서의 비교한 해석결과, Case 1-flat의 형상이 모든 압력조건에서 가장 작은 변위량을 보이고, Case에 따른 최대 8.68%의 더 작은 변위량을 보여주고 있다. 이에 따라 기밀성 측면에서 판단하였을 때 가장 적절한 형상임을 판단하였다.

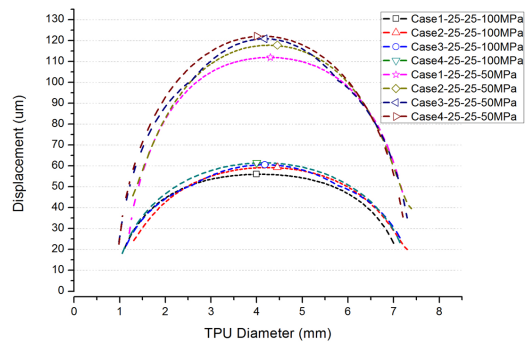


Fig. 8. Displacement of Pressure(25-25bar)

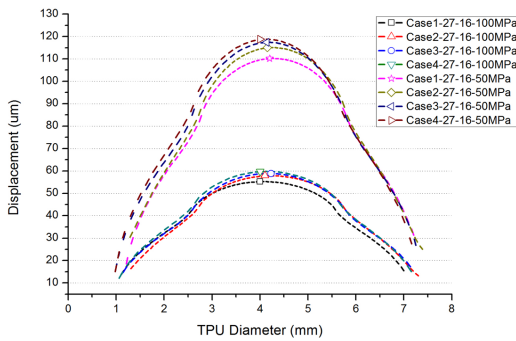


Fig. 9. Displacement of Pressure(27-16bar)

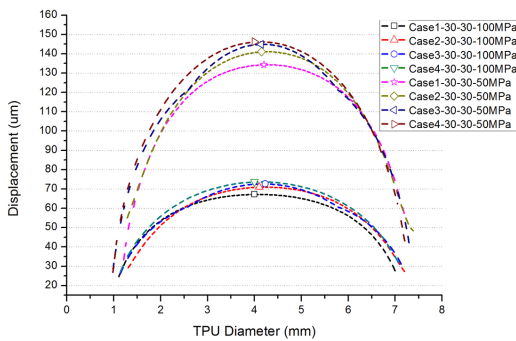


Fig. 10. Displacement of Pressure(30-30bar)

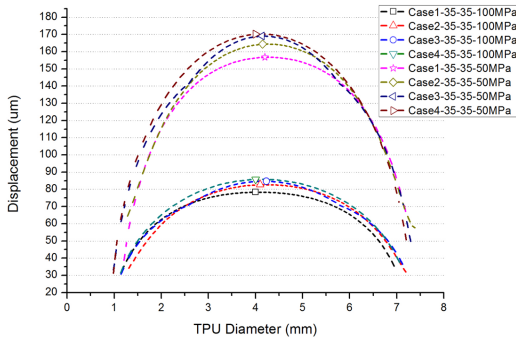


Fig. 11. Displacement of Pressure(35-35bar)

## 5. 결론

본 연구에서는 수소연료전지차의 핵심 부품인 수소 레귤레이터의 2단 감압 구조에 대해 1차 감압부와 2차 감압부의 구조를 나누어 기밀성 확인을 위한 닫힌 구조로 Case를 나누어 비교 분석하였다.

연구의 진행은 1차 감압부에 비교적 큰 내압이 적용됨으로 1차 감압부는 재질별 Case를 나누어 해석을 진행하였으며, 2차 감압부는 비교적 작은 내압이 걸려 형상

및 TPU 제품 재질 특성에 따른 Case를 나누어 해석을 진행하였다.

본 연구 결과 1차 감압부의 Aluminum Alloy의 물성에 대한 신뢰는 구조 해석 결과 소재의 극한 응력값 이상의 분포를 보임으로 사용이 부적절하다고 판단되고, Stainless Steel의 경우 탄성구간을 벗어나는 기준인 항복 응력 값 이상의 결과를 보이지만 극한 응력값 이상으로 응력 분포가 이루어지지 않았다.

Contact Surface에서의, Alloy Steel는 모든 측면에서 탄성 구간 내에 있으나 높은 항복 응력과 극한 응력으로 과잉된 기계적 소재 특성을 갖고 있는 것으로 나타났다. 서로 다른 금속 사용 시, Needle part의 응력이 증가함으로 이중 소재를 사용하는 접촉부 구성은 부적절하다고 판단된다.

기밀성과 관련된 변위 측면에서는 Aluminum Alloy 소재의 변위량이 가장 크게 나타나 부적절하다고 판단되고, 서로 다른 금속으로 구성 되었을 때, 응력의 변화와 함께 변위 또한 같이 증가하며, Needle part의 Contact surface가 1 Stage part의 Contact Surface보다 단면적이 작은 형상의 영향으로 변위량이 더 큰 것으로 판단되었다.

2차 감압부의 해석 결과 TPU의 공정에 따라 분류한 Young's Modulus 값이 큰 TPU를 사용하는 것이 비교적 변위량이 작음으로 기밀성에 대한 기준으로 판단하였을 때 적절하다고 판단되고, 기밀성에 대한 기준으로 Case를 분석하였을 때 Case 1의 flat한 형상이 최대 8.68 % 더 작은 변위량을 보여 가장 적절한 형상으로 판단하였다.

최종적으로 수소레귤레이터의 구조가 갖는 기밀성과 관련된 문제점으로 지적되는 재료물성에 대한 1차 감압부 구조해석을 진행하여, 사용에 대한 적절성을 판단하였고, 이중 소재에 대한 구성의 적절성을 판단하였다. 또한 각 소재별 물성 평가를 통해 2차 감압부의 소재를 선정하고, 기밀성에 대한 기준으로 Case 분석을 진행하여 최적 형상을 설계하였다.

## References

- [1] S. H. Choi, T. W. Lim, "Hydrogen Fuel Cell Vehicle", *Auto Journal*, Vol.34, No.5, pp.31-38, 2012.
- [2] N.K. Jo, S. J. Moon, C. W. Nam, H. K. Lee, W. J. Jeon, "Numerical Study on Internal Flow Analysis of High-pressure Gas Regulator", *KSAE 2017 Annual*



*Autumn Conference & Exhibition*, KSAE, Yeosu, Republic of Korea, p.276, November 2017.

- [3] H. J. Park, S. K. Gi, S. G. Jang, M. J. Do, "High Pressure Check Valve Design for Prevention of Leakage Using FEM", *KSPE 2017 Spring Conference*, KSPE, Jeju, Republic of Korea, pp.988-989, May 2017.
- [4] G. S. Choi, K. Y. Lee, J. T. Kim, E. D. Ro, C. H. Lee, "Study of intermetallic airtightness for hydrogen gas", *KSAE 2018 Annual Autumn Conference & Exhibition*, KSAE, Jeongseon, Republic of Korea, p.1196, November 2018.
- [5] H. Russell, Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies: mechanisms, modelling and future developments, pp.100-594, Woodhead Publishing, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857095374.3.471>
- [6] B. Choudhary, J. Christopher. "Stage-II tensile work hardening behaviour of type 316L (N) austenitic stainless steel", *Materials Science and Engineering: A*, 651, pp.486-489, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mesa.2015.11.001>
- [7] K. Li, J. Peng, "Mechanical Behavior of 316L Stainless Steel after Strain Hardening" *MATEC Web of Conferences*, MATEC, Vol 114, p.02003, 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711402003>
- [8] J. H. Shin, *A study on the improvement of Lock-up pressure in high pressure hydrogen regulator*, Master's thesis, Kyungpook National University, pp.1-4, 2013.

손 원 식(Won-Sik Son)

[정회원]



- 2012년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부 (공학사)
- 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2019년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 혁신선도대학 초빙교수

<관심분야>

기계구조, 소성해석

송 재 욱(Jae-Wook Song)

[준(학생)회원]



- 2018년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부 (공학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>

기계/재료, CAE

전 완 재(Wan-Jae Jeon)

[정회원]



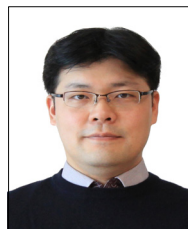
- 1992년 2월 : 영남대학교 전자공학 (공학사)
- 1992년 8월 ~ 2017년 2월 : (주)모토닉 기술연구소
- 1992년 8월 ~ 2017년 2월 : (주)모토닉 기술연구소 연구소장

<관심분야>

자동차 부품 산업 기술 분야

김 승 모(Seung-Mo Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 (공학사)
- 2007년 8월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 (석박통합과정, 공학박사)
- 2007년 9월 ~ 2012년 2월 : 삼성전자 반도체연구소
- 2012 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

공정장비 최적화, 열유동 및 구조해석