

## 2단 감압 수소레귤레이터의 연성해석 및 도금특성에 관한 연구

송재욱, 김승모\*  
한국기술교육대학교 기계공학과

### A Study of Fluid Structure Interaction Analysis and Coating Characteristics of a Two-stage Pressure Reduction Hydrogen Regulator

Jae-Wook Song, Seung-Mo KIM\*  
Dep. of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

**요약** 수소연료전지차(FCEV)는 전기를 자체 생산하는 연료전지를 동력원으로 하고 있으며 기존 기계식 레귤레이터의 출구압은 시스템 사양에 의해 제작 시점에서 고정되며 순간적인 수소 공급량에 의한 출구압 강하가 발생하는 경우 수소의 공급유량이 부정확해지는 문제가 있다. 본 연구에서는 기존에 존재하는 1단 기계식 감압 레귤레이터를 보완하기 위한 2단 감압 레귤레이터의 형상 설계 및 재질 선정을 수행하였다. 2단계 감압을 통한 맥동과 느린 응답을 보상하고 고압 편차 문제를 해결하기 위해 감압 유닛의 접촉면 형상을 가공성을 고려하여 설계하였다. 기밀성 측면에서 TPU의 변형량은 최대 15.82% 작은 변위량을 보였으며, 재질 선정에서는 2단 감압에 보편성을 확보하고 다양한 수소 연료 공급시스템에 적용 가능한 전자식 솔레노이드를 고려하여 자성체를 선정하고 적절한 도금 종류를 검증하기 위한 수소 취성 및 내식성 평가를 실시하였다. 시편의 표면 부식은 Cr 도금의 경우에서만 발생되지 않았으며, 인장 시험을 통해 부식과정간 연신율을 비교하였을 때, 2% 이내의 차이를 확인하였다.

**Abstract** In this study, shape design and material selection were carried out for a two-stage pressure-reducing regulator to compensate for the shortcomings of a one-stage mechanical decompression regulator. The shape of the contact surface of the depressurization unit was considered, material was selected, and the shape was designed to compensate for the pulsation and slow response through the two-stage decompression and to solve the problem of high pressure deviation. In terms of airtightness, the deformation amount of TPU showed a small amount of displacement of up to 15.82%. Considering the fact that it is applicable to various hydrogen fuel supply systems by securing universality by applying electronic solenoids to the second pressure reduction, magnetic materials were selected. The hydrogen embrittlement and corrosion resistance were evaluated to verify the plating process. Surface corrosion did not occur in only the case of Cr plating. The elongation during the corrosion process was compared using a tensile test, and there was a difference within 2%.

**Keywords** : FCEV, Hydrogen Brittleness, 2-stage Pressure Regulator, Gas Corrosion, FSI

본 논문은 2019년도 한국기술교육대학교 연구연간제 연구비 및 산학협력단 공용장비센터의 지원과 중소벤처기업부의 기술개발사업(S2871286)으로 연구되었음.

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

Received September 17, 2020

Revised November 23, 2020

Accepted January 8, 2021

Published January 31, 2021

## 1. 서론

수소연료전지차(FCEV)는 전기를 자체 생산하는 연료 전지를 동력원으로 하고 있다[1]. 연료전지 내의 수소 측(Anode)에서 백금 촉매에 의해 수소분자가 전자와 수소이온으로 분리되고, 수소이온은 전해질 막을 통해서 공기 측(Cathode)로 이동해 수소 측에서 생성된 전자가 외부 도선을 통해서 공기 측에서 다시 수소이온과 전자, 산소가 반응해 부산물로 열과 물을 생성하며, 이 때 발생하는 전자의 흐름에 의해서 전기가 생성된다. 일반적인 탄화수소계열의 액체연료는 단위무게 당 에너지가 약 45MJ/kg 인 반면, 수소연료는 약 120MJ/kg으로 매우 높고 탄소를 포함하지 않아 배출되는 온실가스가 없고 부산물로는 열과 물 뿐인 특징을 가지고 있다. 그리고 공기 중으로부터 산소를 얻기 위한 공기정화 장치는 미세먼지를 줄이는 부수적인 효과도 가지고 있다[2,3]. FCEV의 주요 구성은 앞서 언급한 전기 생성 장치인 스택과 온도를 조절하고 수소와 공기를 스택에 공급하는 운전장치, 그리고 스택으로부터의 전기를 모터로 공급해주고 제어하는 전장장치와 차량 내의 수소를 70MPa 고압으로 저장하고 압력을 조절해주는 수소저장장치로 분류된다. 연료저장장치에서 70MPa의 상태로 충전되어 있는 수소를 실제 전기 생산 장치인 스택에서는 수소 공급압이 0.1~0.2MPa 수준으로 사용되며 이를 위해 고압 용기로 부터 1.6MPa 내의 수준으로 감압시켜야 하는데 이 감압에 사용되는 부품이 수소저장장치의 고압 수소레귤레이터이다[4]. 기존의 1단 감압 수소레귤레이터는 상대적으로 많은 감압으로 인해 맥동 및 느린 응답이 발생하여 높은 압력편차를 보이며, 이로 인해 출구압력 정밀도가 떨어지는 문제점이 있으며 높은 감압 과정에 필요한 고정밀 단조 및 실링 기술이 요구된다. 이러한 고정밀 단조 및 실링 기술은 제작과정에서 불량률이 높아 생산성이 떨어지는 단점이 있다. 2단 감압 수소레귤레이터는 첫 번째 감압을 통해 압력을 초기 감압한 후 두 번째 감압에서 전자식 솔레노이드를 적용하여 스택에서 필요한 폭넓은 출구압 제어 범위를 통해 정밀한 제어로 감압시켜 수소 누설을 최소화할 수 있다. 또한 고정식의 출구압력만 가능한 1단 감압 수소레귤레이터와는 달리 솔레노이드의 설정에 따라 다양한 출구압력을 컨트롤 할 수 있고 차량에 따라 범용적으로 적용할 수 있는 장점이 있다. 다만 1단 감압 수소레귤레이터와 비교하여 추가 부품이 구성되어야 하며 각 부품의 신뢰성 및 표면에서 나타날 수소 취성에 대한 안정성을 미리 확보해야 한다[5].

## 2. 연구목적 및 해석조건

### 2.1 레귤레이터 설계의 목적

기존 기계식 레귤레이터의 출구압은 시스템 사양에 의해 제작 시점에서 고정되며 순간적인 수소공급량에 의한 출구압 강하가 발생하는 경우 수소의 공급유량이 부정확해지는 문제가 있다. 따라서 수소저장탱크의 내부압력 70MPa에서 연료전지 스택에서 사용될 압력으로 감압 및 공급하는 밸브는 2단계의 능동적 제어가 가능한 구조가 필요하며 추가되는 부품은 마찬가지로 누설 최소화를 위한 실링구조로 설계할 필요성이 있다.

재질 측면에서도 솔레노이드 주변 추가 구조의 수소 유로로 인한 재질 취성화를 최소화하기 위한 연구가 필요하다. 일반적으로 재질의 수소취성화를 피하기 위해서는 스테인리스강 합금과 같은 특정 금속재료를 권장하고 있는데[6], 강재의 수소취성은 표면도금의 종류와 두께 및 균열의 유무에도 영향을 받으며, 사용 중 부식 환경에서 수소가 혼입될 수 있고 자동차 부품에 인가되는 응력, 주행환경, 시간에 따라 취성화가 증대될 수 있다. 부식은 시간의 함수이기에 차량의 평균수명이 증가하고 있는 현실을 반영한다면 부식 환경에서의 수소취성의 발생우려는 2단 수소 레귤레이터 설계 시점에서 필수적으로 고려해야 할 요소로 판단된다[7].

따라서, 본 연구에서는 연료 공급시스템에 사용되는 2단 수소 레귤레이터의 성능을 확보하기 위한 솔레노이드 주변 2차 감압부의 기밀 설계 연구와 수소취성 및 내식성의 신뢰성 확보를 위한 도금을 통한 표면처리 등의 재질 선정 연구가 필요하다. 이를 위하여 기밀 설계에 필요한 구조해석을 진행하였고 재질 선정을 위해 관련 유동 혼합기체 부식 시험(KS C IEC 60068-2-60)을 진행하여 재질의 부식 영향을 시편인장시험을 통해 살펴보았다.

### 2.2 수치해석 기법

수소연료전지차의 연료인 수소는 일반적으로 70MPa의 고압으로 충전 되지만, 실제 전기를 생산하는 스택에서 요구되는 수소 공급압은 1.6MPa 수준으로 큰 폭의 감압이 필요하다.

기존의 기계식 1단 감압 레귤레이터는 큰 폭의 감압에 따른 밸브에서의 누설과 기포 발생을 방지하기 위한 고정밀 단조, 실링 기술이 요구되어 불량률이 발생하기 쉽고 생산성이 떨어지는 문제점이 있다. 이러한 1단 단일 감압 구조가 가지는 기밀성 관련 문제점들은 2단 감압 메커니

즘을 통해 극복이 가능하다. 기존의 1단 감압과 더불어 전자식 솔레노이드를 적용한 후속 감압을 통해 2단에 걸친 다단 감압이 가능하며 1.6MPa 내외의 폭넓은 출구압 제어와 정밀한 감압과 누설 방지가 가능하다[8]. 그러나 2단 감압 메커니즘을 위해서는 많은 구조 개선이 요구되며[9], 쉽게 접화가 일어나는 수소의 특성에 따라 외부 누설방지에 대한 기밀성 확보는 여전히 중요한 설계이슈이다[10]. 따라서, 2단 감압 레귤레이터에서도 이러한 구조적 설계 안정성을 확보해야 할 필요성이 있다. 이를 위해, 2단 감압부의 기밀설계 관점에서 유동의 흐름과 구조의 영향을 함께 살펴보기 위해 FSI (Fluid-Structure Interaction) 연성 수치 해석을 적용하여 설계를 수행하였다.

FSI 기법에는 Direct-coupled FSI, One-way FSI, Two-way FSI가 있는데, 본 2단 감압 연구에서는 유동의 압력, 온도 등에 의해 변형된 구조가 유동흐름에 미치는 영향은 크지 않으므로, One-way FSI 기법을 사용하였다. 유동해석 지배방정식에는 연속방정식(1), Navier-Stoke's 방정식(2)을 사용하였다.

여기서  $\rho$ ,  $u_i$ 는 밀도, 속도이며  $p$ ,  $\tau_{ij}$ 는 압력과 점성 응력텐서(Viscous Stress Tensor)로 나타내었다.

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서  $\rho$ ,  $u_i$ 는 밀도, 속도이며  $p$ ,  $\tau_{ij}$ 는 압력과 점성응력 텐서(Viscous Stress Tensor)로 나타내었다.

### 2.3 소재선정과 물성

소재의 FSI 해석을 위한 물성을 확보하기 위해 SUS303, SUS304, SUS316, SUS316L, SUS410, SUS431, TPU (Thermoplastic Polyurethane), PU(Polyurethane) 등의 후보 재질을 평가, 선정하였다. 수소취성에 대한 내성 및 내식성에 대한 소재로 SUS316과 SUS316L을 고려하였으며 가공성을 위한 최적의 소재로 SUS316L을 1단 감압구조 소재로 최종 선정하였다. 2번째 감압에서는 전자식 솔레노이드 사용이 필요함에 따라 자성을 띠는 SUS410 소재를 선정하였다. 또한 2차 감압부의 밸브 접촉부는 TPU와 PU 중 경도가 높으며 인장강도 및 인열강도(tear strength) 조건에 부합하는 TPU를 선정하여 구조해석을 통한 형상설계를 진행하였다[11].

Table 1. TPU Material Criteria

Hardness	95 ± 5 HsA
Tensile Strength	≥ 50N/mm <sup>2</sup>
Internal Tearing Strength	≥ 80N/mm <sup>2</sup>

Table 2. Material Property

Property \ Material	SUS316L	SUS410	TPU
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	8000	7800	1170
Elastic Modulus [GPa]	200	200	0.919
Yield Tensile Strength [MPa]	480	485	≥ 50
Poisson's Ratio	0.285	0.285	0.4

### 2.4 해석조건

본 연구에서는 Ansys Fluent를 이용하여 구조해석 및 유동해석을 진행하고자 전처리 프로그램인 Design Modeler를 이용하여 2단 감압 수소레귤레이터의 2차 감압부의 형상을 최대 open ratio 100% 일 때를 가정하여 TPU와 inlet/outlet 구조물과의 distance를 2mm로, open ratio 50%일 때의 distance 1mm로 모델링하였다. 출구압력 정밀도 및 누설 방지를 위한 구조 최적화 설계를 진행하기 위해 Density 및 Yield Strength가 작고, Poisson's Ratio가 커서 많은 변형이 예측되는 TPU 재질부의 최적형상을 접촉면의 응력 및 변위를 구조해석을 통해 확인하고, TPU의 접촉면의 변형과 유로 틈새에 따른 유동 시뮬레이션을 진행하였다. TPU의 접촉면은 접촉면을 고려한 flat, small convex, large convex 형상으로 진행하였으며(Fig. 2), 2단 감압부의 입구 압력은 2.7MPa, 출구 압력은 0.3MPa로 설정하였으며, k-omega standard 점성모델을 사용하였다[12].

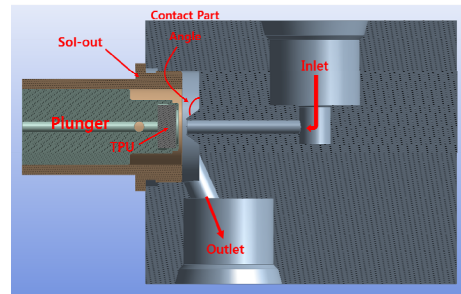


Fig. 1. Part Design & Configuration

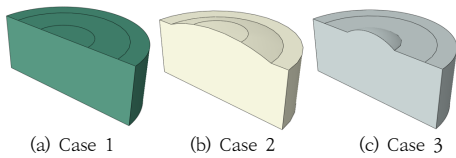


Fig. 2. TPU Design Case : (a) Flat, (b) Small Convex, (c) Large Convex

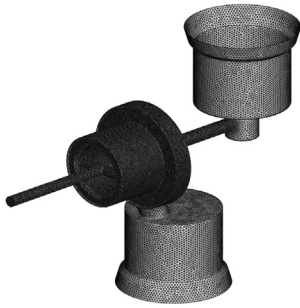


Fig. 3. Mesh - Flow Field

Table 3. Mesh Information

Mesh Data			
Case	Case 1	Case 2	Case 3
Node #	409108	528568	529819
Element #	2164034	2789888	2798051
Element Type	Tetrahedral		
Simulation Tool			
CAE Software	ANSYS Workbench FSI		

### 3. 도금별 부식시험 및 인장시험

#### 3.1 도금처리

레굴레이터에 사용되는 SUS316L 소재는 연신율이 좋으며 부식 저항이 커 고압 환경, 해수 접촉부품 등으로 널리 사용되고 있으며[13], 실린더 및 밸브 금속재료 중 수소 취화를 최소화할 수 있는 재료로 KS규격에 명시되어 있다[14]. 그러나 솔레노이드를 위한 자성재료인 Plunger의 SUS410의 재질은 수소취성에 대한 내성이 검증되지 않은 재료이므로 이를 위한 평가를 진행하였다. 수소취성에 대한 내성을 검증하기 위해 표면도금에 따른 문헌 조사를 진행하였다.

Cr 도금은 경도가 크고 마찰계수가 작아 내마모성이 뛰어나며 이형성이 좋아 금형에 주로 사용되며, 수소와의 공유결합성(Bond Overlap Population)이 낮아 반응성이 적고 수소침투가 어려워 수소취성에 강한 내성을 보

인다. Ni도금은 균일성이 우수하여 복잡한 형상을 가진 부품에서도 균일한 도금이 가능하다는 장점이 있으나, 수소와의 공유결합성이 Cr과 비교하여 상대적으로 크기 때문에 수소취성에 불리할 수 있을 것으로 판단된다[15]. 그러나 벤치마크한 외국 타사에서 제작되는 수소 레굴레이터의 재질 분석을 위한 ICP-OES(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy)분석과 표면을 분석하기 위한 XRF(X-ray fluorescence analyzer) 분석으로 벤치마크 분석(Table 4, 5)을 통해 재질과 표면의 결과를 비교하여 강제 표면의 Ni 도금이 확인되었으므로 검증을 위한 부식시험을 함께 진행하였다. CrN 도금의 경우 고온 내식성이 뛰어나 고온에서 사용되는 금형이나 피가공물과의 접촉부분이 수 백도에 달하는 공구나 금형에서도 내마모성과 내산화성이 뛰어나며 가혹한 마찰에서도 우수한 성능을 보인다[16].

이에 따라 도금 종류로 Cr(Chromium), CrN(Chromium Nitride), Ni(Nickel)을 선정하였고, 인장시험편에 도금 처리를 하여 부식시험을 진행하고 최종 인장 평가를 진행하였다.

Table 4. Bench Mark Data (ICP-OES)

Analyte	Result
Fe	93.44%
Mn	1.41%
Ni	0.89%
S	0.35%
P	0.13%
Cr	0.08%
Mo	0.02%
Si	0.00%

Table 5. Bench Mark Data (XRF)

Analyte	Result
Ni	91.51%
P	5.34%
Fe	3.04%
Zr	0.12%

#### 3.2 부식시험

유동 혼합기체 부식 시험은 제품 구성요소에 따른 부식 영향을 파악하기 위한 시험이다[17]. 수소 레굴레이터 부품은 신뢰성과 수명 요구사항이 높은 제품이므로 가혹도를 높여 H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 모두 10ppm에서 부식시험을 진행하였으며, 최대 21일의 시험을 진행하였다. 온도와 습도는 각각 25℃와 RH 75%로 진행하였다. 황화수소와

이산화질소, 아황산가스의 실험 분위기에서는 수분이 있으면 Corrosion이 일어날 수 있으며, 316과 같은 SS합금의 사용으로 최소화가 가능하다.

수소이온은 금속에 흡착되어 수소원자가 안정화가 되면, 표면에서는 수소원자들의 재결합으로 인한 수소 분자화 반응(Hydrogen Evolution Reaction)과 수소원자가 강재 내로의 흡수되면서 수소 흡수 반응(Hydrogen Absorption Reaction)이 동시에 나타나며, 황화수소는 수소원자를 안정화시키며 HAR 반응을 촉진시킨다. 부식 시험 장비로는 GS-UVZ를 이용하였으며, 시간에 따른 부식 유무 확인을 위해 KS규격을 참고하여 11일차에 중간 개방하여 상태를 관찰하였다.



Fig. 4. Gas Corrosion Test Instrument (GS-UVZ)

### 3.3 인장시험

수소 취성 및 내식성에 대한 평가를 위하여 도금한 시편과 도금 처리하지 않은 시편의 인장시험을 부식시험 후 진행하였다. 인장시험 장비로는 AG-Retrofit(250kN)을 이용하였으며, 시간에 따른 부식 상태를 파악하기 위하여 부식 전 시편과 부식 11일 경과 시편, 부식 21일 경과 시편을 도금별 시편 3개와 미도금 시편에 대하여 진행하였다[18].

## 4. 시험 결과 및 고찰

### 4.1 부식 시험 및 인장 시험 결과

시간에 따른 부식 유무 판별을 위하여 11일차(Fig. 5) 1회 개방하여 시편의 부식 유무를 판별한 결과, Cr 도금 시편에서는 표면에서 부식 발생이 관찰되지 않았으며, CrN 도금 시편은 일부 표면에서, Ni 도금 시편의 경우 표면 전반에 걸쳐 부식 진행이 관찰되었다. 최종적으로 부식 시험 21일 경과 후 관찰한 결과(Fig. 6), Cr도금 시편의 경우만 부식의 진행이 없었으며, CrN 도금과 Ni 도

금의 경우 시간에 따른 부식 상태의 가속화를 확인하였다.

부식시험 후 인장시험 결과, 미도금 기준 대비 Ni 도금의 연신율은 3.38% 증가하고 CrN 도금은 0.79% 감소, Cr 도금은 0.95% 감소하는 것을 확인하였다. 일반적으로 연신율의 감소가 수소취화와 관련되는 것으로 알려져 있는데 부식시험 이후 연신율 감소가 크지 않으므로, 부식에 따른 추후 취성 관점에서 Cr 도금이 부식과 수소취성에 대해 적합한 도금임을 확인하였다.

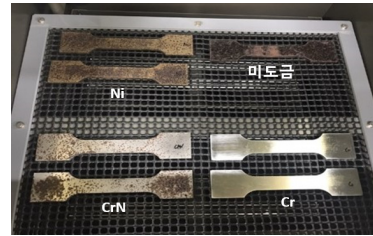


Fig. 5. Corrosion Test Results (11 days)

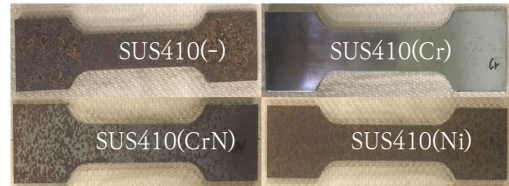


Fig. 6. Corrosion Test Results (21 days)

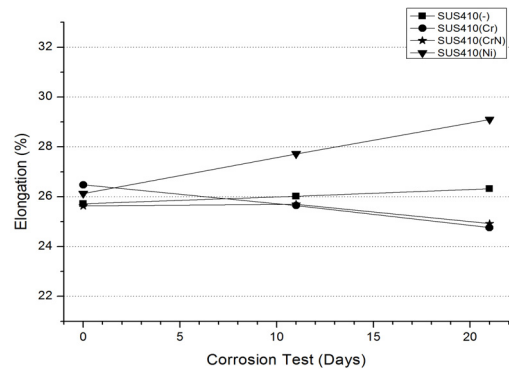


Fig. 7. Elongation Results

## 5. 2차 감압부 연성해석 결과

### 5.1 TPU의 접촉면 형상에 따른 변위 및 유량

출구압력 정밀도 및 누설 방지를 위한 기밀성을 예측하기 위해 TPU 형상 별 해석을 Contact part가 125°의

조건에서 진행하였다. 기밀성 측면에서 TPU와 Contact Part의 Open Ratio에 따른 유동흐름에 의한 TPU의 변위를 확인한 결과 Open Ratio 100%일 때 Case 1이 최대 18.39% 작은 변위량을 보였으며, Open Ratio 50%에서도 Case 1의 형상이 최대 15.82% 작은 변위량을 보였다. 그리고 Open Ratio가 최대일 때의 출구유량을 비교했을 때에도 Fig. 11과 같이 Case 1의 출구유량이 0.0288903kg/s로 최대가 됨을 확인하였기에 기밀성 측면에서 Case 1의 형상이 가장 적절한 설계형상을 확인하였다.

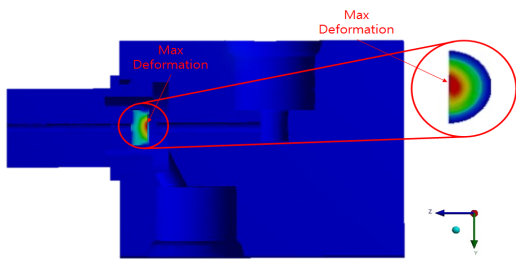


Fig. 8. TPU Deformation Contour (case 1 : Flat)

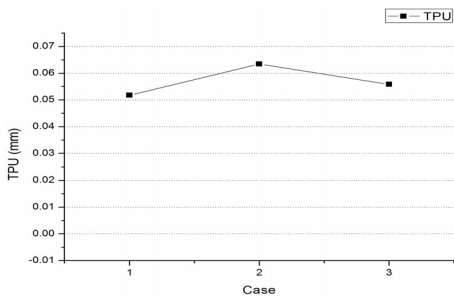


Fig. 9. Maximum Deformation (Open Ratio 100%)

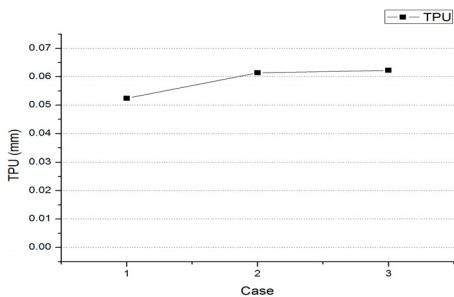


Fig. 10. Maximum Deformation (Open Ratio 50%)

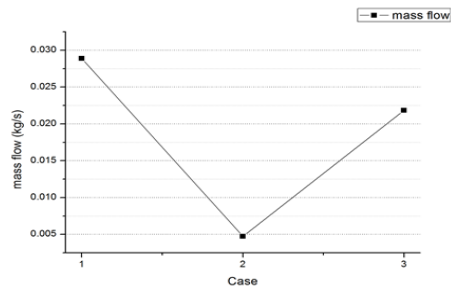


Fig. 11. Mass Flow of Hydrogen (TPU Case, Open Ratio 100%)

## 5.2 Contact Part 접촉면적에 따른 출구유량

Fig. 1의 Contact Part의 각도에 따라 TPU와 Contact Part의 접촉면은 도넛형태를 보이게 되는데 출구압력 정밀도 측면에서 접촉면적에 따른 출구유량을 해석을 통해 살펴보았다.

Contact Part의 각도는 가공 특성상 90°에서 125°까지의 범위를 가질 수 있으며 이에 따라 해당되는 접촉면적의 크기도 달라진다. 최적의 Contact Part 형상을 결정하기 위해서 Open Ratio가 100%일 때 Contact Part의 각도를 90°에서 125°까지 변경시키면서 접촉면적에 따른 출구 유량을 비교하였다. 아래 그림과 같이 125° 각도의 면적이 가장 원활한 유량을 보였으므로 앞선 해석 결과(Fig. 9)에서 TPU case 1의 결과를 통해 Angle 125°의 기밀성 측면에서 TPU의 미소한 변형량을 확인하였고, 최대 유량을 확보해야하는 조건 상 125°의 형상 디자인이 감압부의 형상으로 적절함을 확인할 수 있었다.

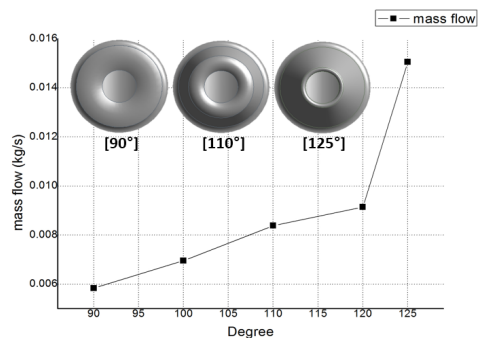


Fig. 12. Mass Flow of Hydrogen (Contact Part Angle)



## 6. 결론

본 연구에서는 연료 공급시스템에 사용되는 수소 레귤레이터의 성능을 확보하기 위해 해석과 시험을 통한 설계 연구를 진행하였다.

수소취성의 영향을 파악하기 위해 선정된 도금 종류를 유동 혼합기체 부식 시험 평가를 통해 시편의 부식 유무를 판별하여 Cr 도금 시편에서만 부식이 진행되지 않음을 확인하였다. 부식시험 후 진행된 인장시험에서 시간에 따라 진행되는 수소취화의 관점에서 Cr 도금이 가장 적합한 것으로 판단된다.

2차 감압부 형상 설계 관점에서는 TPU의 형상으로 Case 1의 형상과 Contact Part의 가공특성 상 구현할 수 있는 90°에서 125°까지의 형상 중 125° 각도의 결과를 통해 변형량을 작게 가져가며, 최대 출구유량을 확보할 수 있었다.

본 연구에서는 기존의 1단 기계식 감압 레귤레이터가 가지는 단점을 보완하기 위한 2단 감압 레귤레이터의 2차 감압부 접촉면을 고려하고 재질을 선정, 형상을 설계하였다. 두 번째 감압에 전자식 솔레노이드를 적용함으로써 범용성을 확보하여 넓은 출구압 제어가 가능해 다양한 수소연료 공급시스템에 적용할 수 있는 점을 고려하여 자성 재질의 소재를 선정하고, 이에 따른 수소 취성 및 내식성 평가를 시험으로 진행하여 적합한 도금 처리를 검증하였다.

## References

- [1] Hwang, K. H., Kim, R. W., Kim, D. Y., Kim, C. M., Kim, S. R., "Evaluation of Pressure Regulator Spring Characteristics of Hydrogen Storage", Korean Society for Precision Engineering Autumn Conf., 135, 2019
- [2] Drell, I. L., Belles, F. E., "Survey of hydrogen combustion properties", NACA, 1958
- [3] Kwon, O. J., Jo, H. J., Chung, H. H., Myong, K. J., "Analysis and Modeling of Hydrogen Sales at Hydrogen Filling Stations", KSAE, Vol.27, No.2, pp. 93-100, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2019.27.2.093>
- [4] Ehret, O., & Bonhoff, K., "Hydrogen as a fuel and energy storage: Success factors for the German Energiewende", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.40, No.15, pp. 5526-5533, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.176>
- [5] Song, J. W., Jeon, W. J., Kim, S. M., "Flow-Structure interaction 2 Stage Pressure Reduction Hydrogen Regulator", Korean Society of Manufacturing Technology Engineers Autumn Conf., pp. 189., 2019
- [6] Hwang, E. H., Seong, H. G., Kim, S. J., "Effect of Carbon Contents on Corrosion and Hydrogen Diffusion Behaviors of Ultra-Strong Steels for Automotive Applications", Korean Journal of Metals and Materials, Vol.56, No.8, pp. 570-579, 2018.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2018.56.8.570>
- [7] Yang, W. S., Seo, J. W., Ahn, S. H., "A Study on Hydrogen Automotive Steel Sheets", Corrosion Science and Technology, Vol.17, No.4, 193-201, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.14773/cst.2018.17.4.193>
- [8] B. Choudhary, J. Christopher., "Stage-II tensile work hardening behaviour of type 316L (N) austenitic stainless steel", Materials Science and Engineering: A, Vol. 651, pp.486-489, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.001>
- [9] Jo, N. K., Moon, S. J., Nam, C. W., Lee, H. K., Jeon, W. J., "Numerical Study on Internal Flow Analysis of High-pressure Gas Regulator", KSAE Annual Autumn Conf., pp.276, 2017.
- [10] Park, H. J., Gi, S. K., Jang, S. G., Do, M. J., "High Pressure Check Valve Design for Prevention of Leakage Using FEM", KSPE Spring Conf., pp. 988-989, 2017.
- [11] Son, W. S., Song, J. W., Jeon, W. J., Kim, S. M., "FEA(Finite Element Analysis) Study for Electronic Hydrogen Regulator of Confidentiality Improvement", Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.20, No.9, pp.175-181, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.9.175>
- [12] Wilcox, D. C., "Turbulence modeling for CFD", CA: DCW industries, La Canada, 1998.
- [13] Choi, I. H., Baek, S. H., Lee, T. H., Jhang, K. Y., "Evaluation of Fatigue Degradation in SUS316L Using Nonlinear Ultrasonics", Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.34, No.2, pp.145-152, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.3795/ksme-a.2010.34.2.145>
- [14] KS, "Gas cylinders - Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents - Part 1: Metallic materials", KS B ISO 11114-1:2012, Korea, 2002.
- [15] Kim, T. W., Park, T. S., Jung, Y. S., Kang, Y. J., Lee, T. H., "Dynamics Study with DFT(Density Functional Theory) Calculation for Metal with a few Peripheral Electrons", Transactions of the Korean hydrogen and new energy society, Vol.25, No.3, pp. 234-239, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.3.234>
- [16] Kim, S. S., Han, J. G., "A Study on the enhancement of wear resistance and corrosion resistance of CrNx for a replacement for electroplated Cr coating", Korean journal of metal and materials, Vol.37, No.3, pp.314-320, 1999.
- [17] KS, "Environmental testing Part 2-60: Tests Test Ke: Flowing mixed gas corrosion test", KS C

IEC60068-2-60:2015, Korea, 2010.

- [18] KS, "TEST PIECES FOR TENSILE TEST FOR METALLIC MATERIALS", KS B 0801:2007, Korea, 1975.
- 

송 재 욱(Jae-Wook Song)

[준회원]



- 2018년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학사)
- 2018년 3월 ~ 2020년 8월 : 한국 기술교육대학교 기계공학과 (공학 석사)

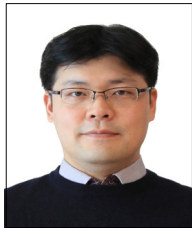
<관심분야>

기구설계, 열유동 구조해석

---

김 승 모(Seung-Mo Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 서울대학교 공과대 학 기계항공공학부 (공학사)
- 2007년 8월 : 서울대학교 공과대 학 기계항공공학부 (공학박사)
- 2007년 9월 ~ 2012년 2월 : 삼성 전자 반도체연구소 책임연구원
- 2012 3월 ~ 현재 : 한국기술교육 대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

공정장비 최적화, 열유동 및 구조해석