

수소비행체를 위한 수소공급밸브 연구

남 충 우¹⁾ · 김 현 철^{*1)} · 김 재 광²⁾ · 박 문 제²⁾ · 남 유 주³⁾

한국자동차연구원 수소연료전지기술부문¹⁾ · 태광후지킨 연구개발 1팀²⁾ · 현대모비스 연료전지시스템 개발셀³⁾

A Study on Hydrogen Supply Valve for Hydrogen Aircraft

Chungwoo Nam¹⁾ · Hyunchul Kim^{*1)} · Jeakwang Kim²⁾ · Munje Park²⁾ · Yuju Nam³⁾

¹⁾Hydrogen Fuel Cell Technology R&D Department, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea

²⁾Team 1, R&D, TK-Fujikin, 7 Noksansandan 261-ro, 88beong-gil, Gangseo-gu, Busan 46753, Korea

³⁾Fuel Cell System Development Cell, R&D, Hyundai Mobis, 37 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi 16082, Korea

(Received 12 June 2023 / Revised 21 June 2023 / Accepted 23 June 2023)

Abstract : Fossil fuel phase-out is a main issue which should be solved for all sector of mobility. Especially for the aviation sector, a hydrogen fuel cell-based aircraft is under development according to its inevitable emission effect and in following to carbon offsetting and reduction scheme for international aviation(CORSIA) by international civil aviation organization. In this study, shape change of hydrogen supply valve has been experimented with flow and magnetic field analysis under aviation running circumstances. Comparing to a normal vehicle driving, aviation is running under different circumstances such as altitude, temperature, pressure and etc. K-epsilon model has been used for the numerical analysis. With redesigning suction force about 10 % and spring constant, it has been improved for hysteresis deviation of hydrogen supply valve.

Key words : Aircraft(비행체), Hydrogen supply valve(수소공급밸브), Hydrogen shut-off valve(수소차단밸브), Fuel processing system(수소공급시스템), Solenoid valve(솔레노이드밸브), Stoichiometric ratio(화학양론비)

1. 서론

탈석유화는 모든 이동수단에서 고민해야 할 과제로 자동차, 철도, 선박, 항공 등 주요 교통수단에서 친환경 에너지화 추진중에 있다. 특히 항공분야는 온실가스 배출 영향이 크고, 탄소상쇄·감축계획(CORSIA) 이행에 따른 항공기 탄소 배출 저감의 기술적 대안으로 수소연료전지 기반 항공기 개발이 진행되고 있다. 국내 기업들도 수소연료전지 추진시스템을 개발 중이나, 아직은 드론 및 UAM(도심항공모빌리티)에 장착하는 것을 목표로 항공기용 연구개발은 초기 단계이다. 자동차용 수소연료전지와 항공용 수소연료전지는 운용환경(운행 고도 등)이 달라서, 항공용 연료전지만의 안전성 측면에서 고도에 따른 압력변화에 따른 영향, 온도변화, 고밀도에 따른 Thermal management, 연료공급차단, 누설, 고압요기,

연료충전, 기울기 등의 안전 이슈 등 고려해야 할 항목이 많다. 수소공급밸브(Fuel supply valve)는 연료전지에 수소를 공급하는 밸브로서, 연료 전지에서 운전에 필요한 에너지를 생성하기 위해 운전조건에 따라 필요한 유량의 수소를 공급하는 밸브이다. 수소전기차의 경우 수소를 고압으로 저장하여 사용하기 때문에 압력을 관리하면서 연료량을 조절할 수 있는 수소공급밸브가 필요하다. 연료전지 스택의 성능 및 효율을 높이기 위해 출구를 막는 데드엔드(Dead-eng) 타입으로 구성하여 전기화학 반응에 참여하지 못한 수소를 재순환하고 수소연료를 재공급할 수 있도록 한다.^{1,4)} 수소공급밸브는 매니폴드에 장착되기 때문에 밸브 동작에 따른 소음이 발생되며, 저 전류 운전시의 기류소음 발생이 일어나는 경우가 있다. 유량제어시의 차압과 열림 량에 대한 유량, 온도변화

*Corresponding author, E-mail: hckim@katech.re.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<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.

가 발생하며, 따라서 열림 작동 속도 및 닫힘 작동속도, 소모전류, 작동전압, 제어주파수 인자임을 확인할 수 있다.^{5,6)} 따라서 본 연구에서는 수소연료전지에 수소를 공급하는 공급밸브 적용을 위한 솔레노이드의 형상을 변경하여 유동해석 및 자기장 해석을 수행하였다. 수소비행체 스택의 요구 유량 및 솔레노이드 히스테리시스 개선, 흡인력에 대하여 분석하였다.

2. 수소공급밸브 유동해석

2.1 수치해석 모델 및 경계조건

수소공급밸브의 유동에 특성을 수치해석을 위해 연속 방정식, 상태방정식, 에너지방정식을 적용하였으며, 아래 식 (1)~(3)과 같다. 여기서 u 는 속도, ρ 는 밀도, k_{eff} 는 열전도도, τ 전단응력, t 는 시간을 의미 한다.

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j}(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i}) \quad (3)$$

난류모델은 K-epsilon(2eqn) 모델을 적용하였다. K-epsilon 난류 모델은 방정식 식 (4), (5)와 같이 정의되며 여기서 k 운동에너지, μ 점성, G_k 난류 에너지에 대한 그레디언트, Y_M 난류 섭동에 대한 소산율, S_k 는 운동에너지에 대한 사용자 정의 항이다. 식 (6)은 난류 점성식이다. 유동해석을 위한 경계조건이며, 입구압력조건은 1.65 MPa, 출구압력조건은 0.15 MPa 적용하였다. Table 1 은 수소가스의 20 °C에서의 기본 물성치이다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} + (G_k - C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon\rho} \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

Table 1 Working fluid properties

Properties	Hydrogen
Density (kg/m ³ , 20 °C)	0.08189
Specific gravity	0.07
Specific heat (J/kg · K)	14,283
Thermal conductivity (W/m · K)	0.1672
Viscosity (kg/m · s)	8.411×10 ⁻⁶

2.2 수소공급 밸브의 형상 및 격자 의존성

수소공급 밸브의 전체 형상은 Fig. 1(a)와 같으며, Fig. 1(b)는 내부유로를 투영한 이미지이다. 유동해석에 적용

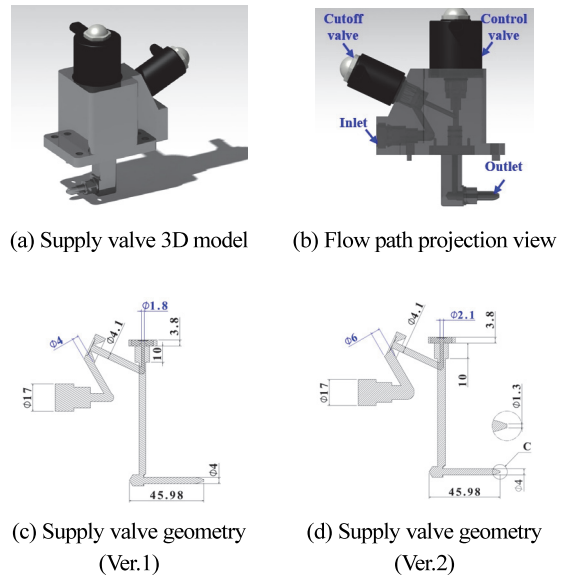


Fig. 1 Shape and flow path of hydrogen supply valve

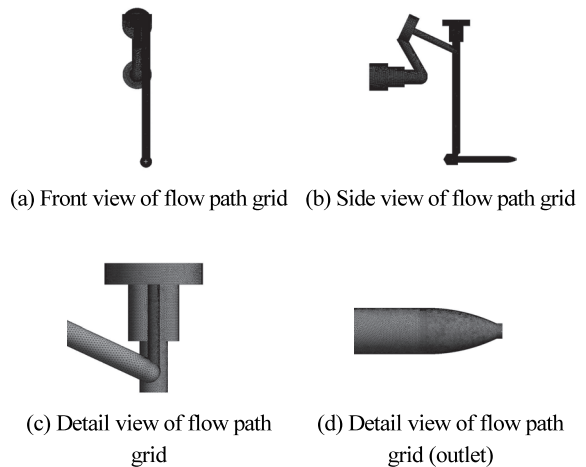


Fig. 2 Numerical modeling and grid

된 수소 공급 밸브의 Ver.1, Ver.2 유로는 대한 기하학적 형상은 위 그림 Fig. 1(c), (d)와 같으며, Ver.1과 Ver.2의 차이는 Fig. 1(c), (d)에서와 같이 입구에서 차단밸브 전단의 유로의 직경을 각각 4 mm, 6 mm이며, 차단밸브에서 공급밸브까지의 유로를 1.8 mm에서 2.1 mm로 직경의 변경 설계하였다. 격자는 사면체(Tetrahedron) 격자를 이용하였으며, Fig. 2(a) ~ (d)와 같다. 유동해석에 격용된 격자는 약 200만개로 격자에 대한 의존도는 5% 이내이다.

2.3 수소공급밸브 유동 해석 결과

수소공급밸브 Ver.1 유로부분의 압력, 속도, 온도 변화에 대한 결과는 아래 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a) 유로의 압력 변화이며, Fig. 3(b)는 출구 부분의 압력변화이다. 출구 부분의 직경은 1.3 mm로 수축되므로 압력변화가 급격히 발생함을 알 수 있다. Fig. 3의 (c) ~ (d) 내부유로에 속도 변화를 나타낸 결과이며, Fig. 3(e) ~ (f)온도 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 3의 (d)에서 알 수 있듯이 출구전단에

서 급격히 속도가 증가하여 출구 부분에서 초음속 유동장을 형성함을 확인하였다.

수소공급밸브 Ver.2 유로부분의 압력변화에 대한 결과는 위 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a) 유로의 압력변화이며, Fig. 4(b)는 출구 부분의 압력변화이다. Ver.2의 출구 부분의 직경 역시 1.3 mm로 수축되므로, 압력변화가 급격히 발생함을 알 수 있다. Fig. 4의 (c) ~ (d) 내부유로에 속도 변화를 나타낸 결과이며, Fig. 4(e) ~ (f) 온도 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 4의 (d)에서 알 수 있듯이 Ver.2 역시 출구전단에서 급격히 속도가 증가하여 초음속 유동장을 형성함을 확인하였다. Table 2는 유로가 다른 두 가지 수소공급밸브 출구에서의 수치해석 결과 값이다. Ver.1의 수소 체적 유량은 807 LPM, Ver.2의 유량은 851 LPM으로 Ver.2에서 유량이 개선됨을 6%정도 개선됨을 확인할 수 있었다. 입구에서 차단밸브 전단의 유로의 직경을 각각 4 mm, 6 mm, 차단밸브에서 공급밸브까지의 유로가 1.8 mm에서 2.1 mm변경됨에 따라서 Fig. 3, Fig. 4의 압력

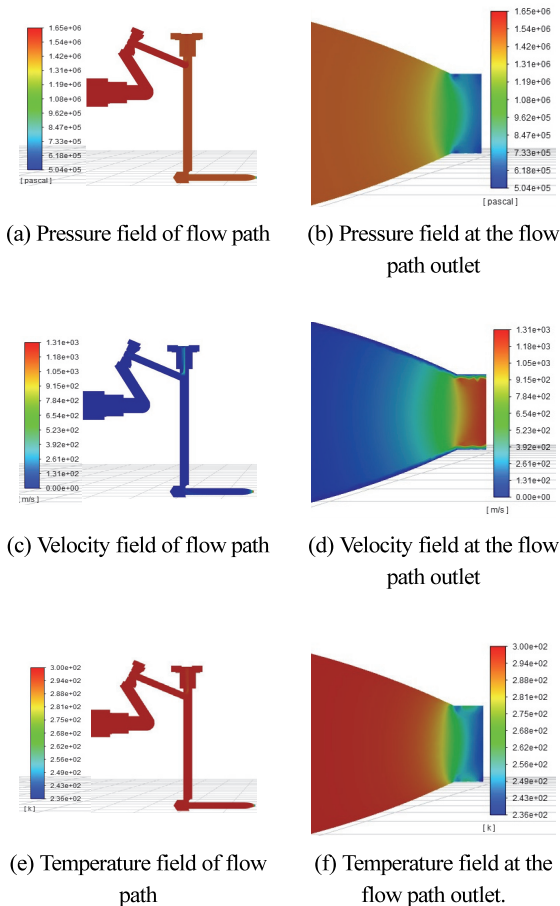


Fig. 3 Numerical analysis result of hydrogen supply valve (Ver.1)

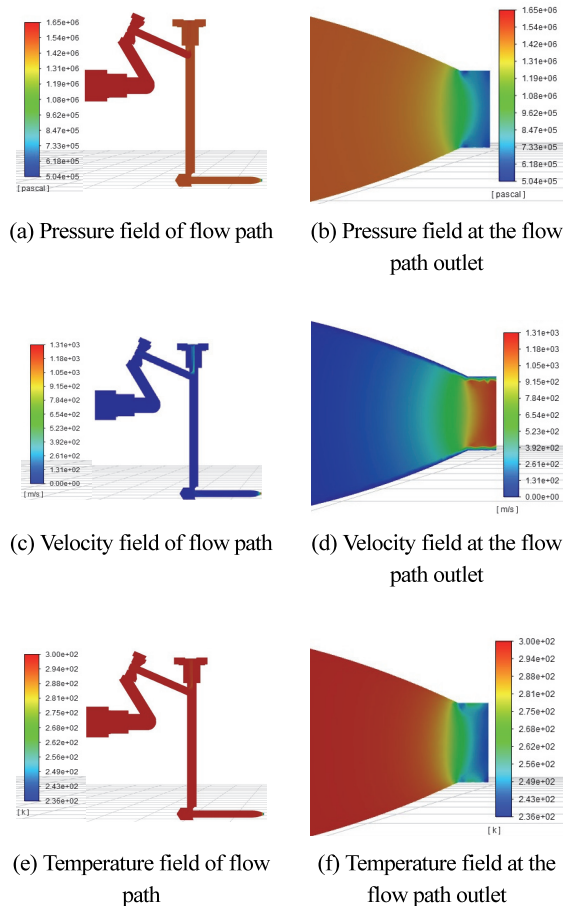


Fig. 4 Numerical analysis result of hydrogen supply valve (Ver.2)

Table 2 Numerical analysis result at outlet

No	Item (outlet)	Ver.1	Ver.2
1	Area (mm ²)	1.3218	
2	Density (kg/m ³)	0.7294	0.7689
3	Velocity (m/s)	1255.4	1255.6
4	Flow rate (g/s)	1.21E-3	1.26E-3
5	Flow rate (LPM)	807	851

장에서와 같이 Ver.2에서 차압 손실이 작아 유량이 증가한 것으로 보인다. 본 수치해석 결과를 실험 결과와 비교 시 5%이내의 오차율을 보였다.

3. 솔레노이드밸브 전자기장 해석 및 성능 평가

3.1 수소공급밸브 요구사항

수소공급밸브 설계시 요구사항을 만족하여야 한다. 입구압력은 1.65 MPa이며, 최대 입구압력은 2.2 MPa, 출구압력은 0.1 ~ 0.3 MPa로 비례제어를 통해 출구 압력을 조절한다. Table 3에 자세히 나타내었다.

Table 3 Specification of hydrogen supply valve

Type	Hydrogen
Nominal working pressure	1.65 MPa
Max pressure	2.2 MPa
Outlet pressure	0.1 ~ 0.3 MPa
Max flow rate	Up to 700 L/min
Operating voltage	13.5 V

3.2 수소공급밸브 솔레노이드 밸브 요구 흡인력

솔레노이드 밸브의 최대 사용압력 2.2 MPa이며, 기밀 성능 만족을 위한 스프링 하중은 밸브시트면적과 압력에 의해 결정되며, 약 12 N의 하중이 된다. 따라서 최대 압력과 시트면적에 공차 조건의 최대 열림 흡인력을 만족하면서, 신뢰성 확보를 위한 여유율(온도, 전압 등)을 고려하였을 때 약 1.5배로 선정하였다. 식 (1)에 의해 흡인력이 결정되며, 비례제어밸브는 빠른 응답성을 만족하기 위한 스트로크 구간의 흡인력의 편차를 최소화하기 위한 해석이 필요하다.

$$F = \frac{B_g^2 S}{2\mu_0} = \frac{10^7}{8\pi} B_g^2 S \quad [N] \quad (1)$$

여기서 B_g는 공극의 자속밀도[T]이며, S는 유효단면적[m²] 따라서 자속밀도와 공극의 유효단면적에 의하여

흡인력이 달라진다.

$$B_g = \frac{\Phi}{A_g} \quad [T] \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{N \times I}{R_m} \quad [Wb] \quad (3)$$

$$R_m = \frac{L}{\mu A} \quad (4)$$

$$V = IR = \frac{4\rho I_m N I}{\pi d^2} \quad [V] \quad (5)$$

여기서 I는 여자전류, d는 도선의 선경[m], ρ는 도선의 전기저항율[Ω · m], l_m는 코일의 1회 감김 평균길이[m]이다. B_g의 크기에 따라 기자력 형성이 달라지기 때문에 코일의 크기를 결정하기 위한 자속밀도를 먼저 구하고 설계를 진행하였다. 식 (5)와 같이 절연종별, 허용온도를 고려하여 코일선종, 폭, 감김수, 선경을 선정한다.^{7,8)}

상기의 수식은 수동계산을 위한 개략적인 계산식이며, 실제 재료의 B-H커브의 비선형성, 모델의 간략화로 인한 설계 오차가 존재함으로 해석을 통한 흡인력 계산을 진행하였다.

3.3 솔레노이드밸브 전자기장 해석 조건

솔레노이드 밸브의 흡인력에 영향을 미치는 설계 조건은 코일보빈의 내경, 외경, 높이, 공극부의 면적, 공극부 사이의 거리, 인가전압, 자성재질, 스트로크, 코일턴수 등이 있다. 전자기장 해석에서는 솔레노이드 설계 변수를 상기 항목으로 지정하였으며, 유로 개방에 필요한 요구 흡인력을 만족하는지 확인하기 위해 해석을 진행하였다. 전자기장 해석은 상용 소프트웨어인 MAGNET를 사용하였으며, 해석을 위한 간략화 된 솔레노이드 모

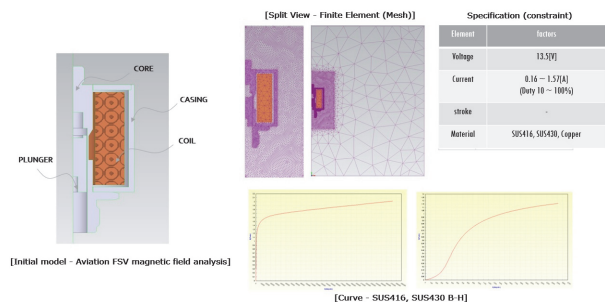


Fig. 5 2D model for electromagnetic field analysis and conditions

Table 4 Material of solenoid valve

Part name	Material
Molding ass'y	PA66 + GF35 %
Core	SUS 410L
Case	SUM24L
Coil	Copper
Plunger	SUS 410L
Coil bobbin	PA66 + GF35 %
Guide	SUS 316 L
Seat	EPDM 90

델은 코일, 플런저, 코어, 케이싱과 같은 자기회로로 구성되어있으며, Fig. 5에 나타내었다.

비행체용 솔레노이드밸브 해석시 기본 입력값은 밸브의 요소 격자모델, 자성재료의 초기곡선 투자율, 자성재료의 비선형 B-H커브 자료, 구동전압, 코일저항, 코일전수, 전류(Duty별), 스트로크 등이며, 내부 공기층 격자는 0.3 mm로 설정하였다. 솔레노이드 밸브의 물성 정보는 Table 4에 나타내었다.

3.4 솔레노이드밸브 전자기장 해석 결과

Fig. 6에 스트로크 및 듀티별 해석결과 하중값의 최대 편차는 듀티 20 % 인가시 $\pm 15\%$ 편차가 발생되며, 듀티 100 % 인가시 하중편차는 $\pm 5\%$ 이내로 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 비행체 수소공급밸브 설계 기준은 유량 및 스트로크의 50 % 수준으로 흡인력을 설정하였으며, 최대 및 최소 편차는 해석결과를 바탕으로 기준이하여 설계 목표를 설정하였다.

초기 변수인자를 바탕으로 해석한 결과는 목표 대비 초기 흡인력이 약 30 % 부족하며, 스트로크 구간의 하중 편차가 최대 약 17 % 발생하였다. 최적의 값을 도출하기 위해서 식 (3)와 같이 자기회로 내 자기저항을 최소화 설계검토를 통한 인자도출을 진행하였으며, 식 (3)에 의한 식 (1)의 결과인 흡인력 향상 및 하중편차 최소화를 위하여 Fig. 7과 같이 6가지 변수를 도출하였다.

Fig. 8과 같이 6가지 변수를 바탕으로 상용 최적화 프로그램인 Optinet을 이용하여 최적화를 진행하였으며, 목표값 대비 초기흡인력 및 최대편차가 목표값 이내를 만족하였다. Table 5에 상세히 나타내었으며, 최적 모델을 바탕으로 솔레노이드를 제작하였다. 해석결과를 바탕으로 최적 도출된 제품의 정합성을 확인하기 위한 흡인력 평가결과는 Fig. 6에 나타내었다. 흡인력 평가결과 해석결과와의 오차는 $\pm 5\%$ 이내로 흡인력 해석결과와 실험결과가 큰 차이가 없을 확인하였다.

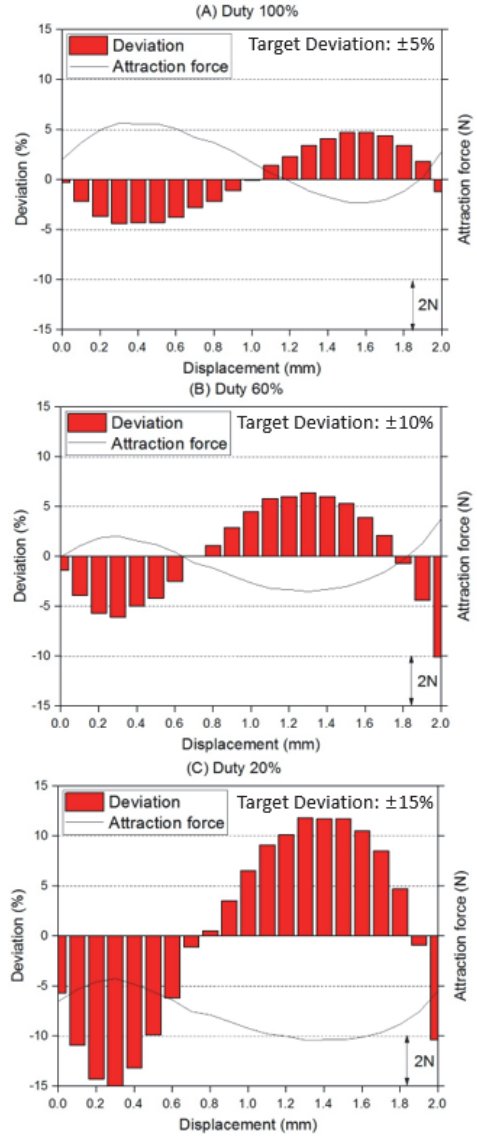


Fig. 6 Attraction force due to PWM duty

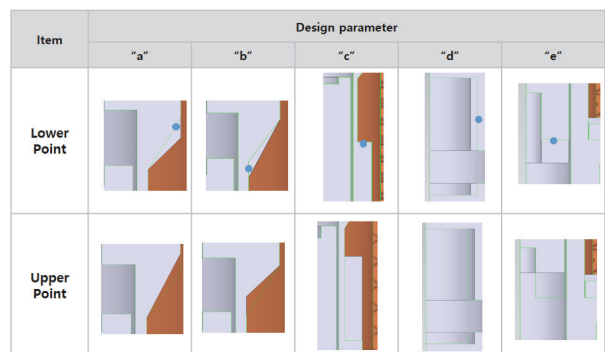


Fig. 7 Design parameters of solenoid valve

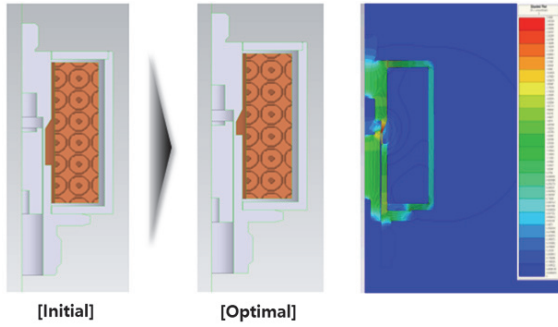


Fig. 8 Optimal solenoid model

Table 5 Solenoid valve optimization

Model	Design parameter				
	“a”	“b”	“c”	“d”	“e”
Initial	Base				
Optimal	+0.6	Base	+6.1	-0.5	-0.3

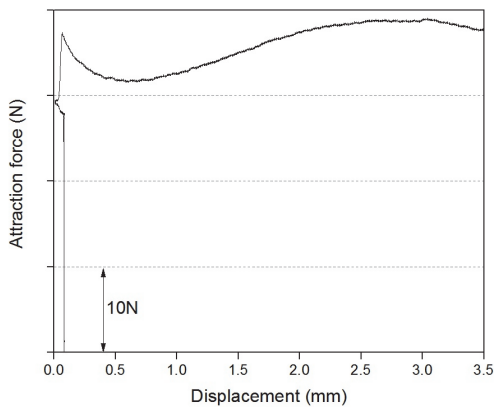


Fig. 9 Experiment result of attraction force

3.5 솔레노이드밸브 성능평가

수소 유량/압력 조절장치는 수소공급모듈에 장착되며 스택에서 요구하는 수소의 압력과 유량제어 재순환 수소의 흡입유량을 제어하는 역할을 한다. 솔레노이드 타입의 비례제어밸브로서 제어기에서 스택에서 피드백되는 압력신호를 받아 요구하는 수소공급압력에 도달할 때까지 제어기에서 인가되는 전류값(PWM)에 비례하여 밸브의 개폐량을 조절함으로써 수소유량 및 압력을 조절한다. 성능평가를 위한 조건은 Table 6에 나타내었다.

수소 공급 밸브의 듀티에 따른 유량 경향을 통해 솔레노이드 밸브의 히스테리시스를 측정하였다. 유량이 공급되는 시작 지점, 최대유량이 공급되는 지점, 공급되는 유량이 감소되는 지점, 유량이 차단되는 지점을 기준으

Table 6 Condition of experiment

Operating fluid	Hydrogen
Operating pressure	1.65 MPa @ 25 °C
Operating voltage	13.5 V
Operating signal	PWM 1 kHz

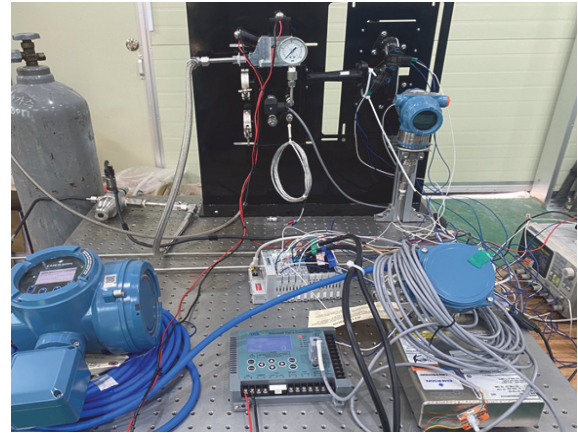


Fig. 10 Experiment set-up of hydrogen supply valve

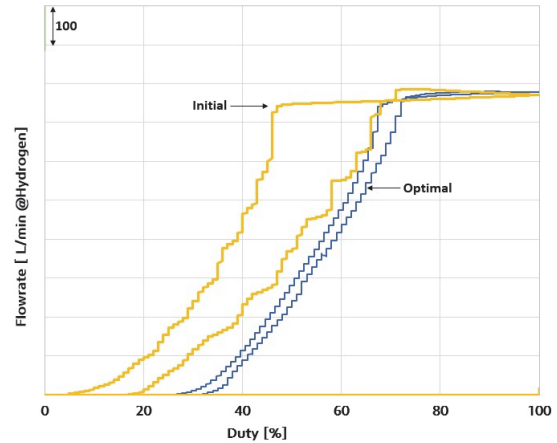


Fig. 11 Hysteresis measurement results according to solenoid valve optimization

로 목표치인 10% 이내를 벗어나지 않아야 한다.

수소 공급 밸브의 솔레노이드의 초기 제품과 최적화된 제품의 유량과 제어듀티에 따른 히스테리시스를 Fig. 11에 나타내었다. 솔레노이드 밸브의 내부 스프링부 편차 및 스프링상수 설계를 통한 성능 개선이 가능하다. 흡인력과 스프링하중의 관계를 통해 유량이 공급되는 시점의 기존대비 흡인력을 감소시키며, 제어듀티를 10% 상향하여 수소비행체에 요구되는 히스테리시스 목표오차 범위인 10% 이내에 만족하였다. 또한 유량이 공급되어

유지 되는 지점에서의 흡인력 또한 기존 대비 약 33 % 축소하여 유량 공급시와 차단시의 흡인력 편차를 줄여 히스테리시스 성능을 개선하였다.

4. 결론

본 연구에서는 수소비행체에 수소연료전지를 적용하기 위하여 수소공급밸브 및 차단밸브의 일체화가 필요하며, 목표유량 및 성능을 만족하기 위해 수소공급밸브에 대한 설계와 성능 평가를 수행하였다.

- 1) 기존 연료전지시스템에 적용되는 수소차단 및 공급밸브 유로는 일직선상에 배치되어 있으며, 수소 비행체의 경우 연료전지시스템의 경량화 및 일체화를 통한 레이아웃이 중요하다. 따라서 수소공급밸브 Ver.1 안과 Ver.2 안의 유로의 기하학적 조건에서의 유동특성을 알아보기 위해서 수치해석을 진행하였다. 차단밸브에서 공급밸브까지의 유로 1.8 mm에서 2.1 mm 증가함에 따라서 차압손실이 적어 공급밸브 후단에서의 압력이 좀 더 높게 형성됨에 따라서 유량이 증가하며 각각의 밸브 모두 출구 부분에서 초음속 유동이 형성되었다.
- 2) 출구 부분에서 초킹이 될 경우, 입구 압력을 일정하게 유지할 경우, 후단의 압력 변화가 발생하여도 솔레노이드밸브의 On/off를 통하여 유량을 정량적인 유량을 컨트롤 할 있다.
- 3) 수소공급밸브의 유로선정을 위한 수치해석과 실험결과 값의 오차가 5 % 이하임을 확인하였다. 이로 인하여 수소공급밸브의 유동해석을 통한 목표유량을 만족하였다. 또한 수소공급밸브 유로 개발을 위한 수치해석 기법을 정립하였다.
- 4) 수소공급밸브의 히스테리시스 편차 개선을 위한 흡인력 재설계와 스프링 상수 재설계시 입력듀티에 따른 유량 특성 지점을 검토하여 유량이 공급되는 시점에서의 초기흡인력, 유지흡인력과 스프링하중의 관계 고려하여 흡인력을 조정과 유량이 공급되는 입력 듀티 지점을 기존 대비 약 10 % 조정하여 솔레노이드밸브의 유량과 입력듀티에 따른 히스테리시스 편차를 감소시켰다.

수소비행체는 기존 수소전기차 대비 정격출력이 1/3 수준이며, 따라서 BOP의 재설계가 필요하다. BOP 중 수소공급밸브와 차단밸브의 통합을 통한 유로의 형상 변화에 따른 유량 성능 확보와 솔레노이드 전체 형상을 포함하여 듀티별 흡인력 편차를 줄이는 해석 및 최적화를 통해 보다 정확한 해석결과와 실험결과를 얻을 수 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 에너지기술개발사업(20213030030100, 최대이륙중량 200 kg급 비행체용 순정 격출력 30 kW급 연료전지 파워팩 시스템 개발) 및 (2022303004020C, 수소저장시스템의 멀티 및 싱글제어가 가능한 제어기 기술개발)에 지원을 받아서 이루어 졌습니다.

References

- 1) C. Nam, J. Park, H. Lee, J. Kim and Y. Kim, "A Study on Hydrogen Supply Valve for Its Air Mobility," The Korean Institute of Gas Autumn Conference, p.203, 2022.
- 2) S. Lee, E. Ro and C. Lee, "A Study on Hydrogen Supply Valve for High Performance FCEV," KSAE Fall Conference Proceedings, p.1100, 2020.
- 3) J. H. Kim, Y. G. Noh, U. S. Jeon and J. H. Lee, "Modeling of Hydrogen Recirculation System for Fuel Cell Vehicle," Journal of Hydrogen and New Energy, Vol.22, No.4, pp.481-487, 2011.
- 4) Y. Lee, J. Kim, E. Ro and C. Lee, "Hydrogen Fuel Cell Generator Fuel Supply Valve Development," KSAE Spring Conference Proceedings, p.10, 2022.
- 5) C. -W. Nam, R. -M. Kim and H. -H. Kim, "A Numerical Study of Flow Control Valve to Flow Characteristics by Pressure Difference for Hydrogen Station," Journal of The Korean Institute of Gas, Vol.25, No.2, pp.28-33, 2021.
- 6) C. Nam, H. Lee, S. Moon, J. Kim, G. Kim and K. Lee, "Experimental Study on Characteristics for CNG Electronic Pressure Regulator," Transactions of KSAE, Vol.25, No.5, pp.525-532, 2017.
- 7) J. Kim, Y. Kim, C. Nam, J. Park and H. Lee, "Mechanical Characteristics of Rubber O-Ring for Hydrogen Tank Valve According to Hydrogen Cycling Test," KSAE Fall Conference Proceedings, p.2486, 2022.
- 8) H. R. Lee, J. H. Ahn, J. O. Shin and H. Y. Kim, "Design of Solenoid Actuator for FCV Cylinder Valve Considering Structural Safety," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.25, No.3, pp.157-163, 2016.