

수소 저장 탱크용 고압 밸브의 개도율에 따른 열·유동 특성 분석

정다운¹ · 최 진² · 서현규^{3†}

¹공주대학교 기계공학과 대학원, ²한국자동차연구원, ³공주대학교 기계자동차공학부

Analysis of Thermal Flow Characteristics according to the Opening Ratio of High-Pressure Valve for Hydrogen Storage Tank

DA WOON JUNG¹, JIN CHOI², HYUN KYU SUH^{3†}

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Kongju National University, 56 Gongjudaehak-ro, Gongju 32588, Korea

²Korea Automotive Technology Institute(Katech), 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan 31214, Korea

³Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, 56 Gongjudaehak-ro, Gongju 32588, Korea

†Corresponding author :
hksuh@kongju.ac.kr

Received 3 August, 2022
Revised 1 October, 2022
Accepted 21 October, 2022

Abstract >> In this study, in order to numerically analyze the heat flow characteristics in the valve according to the opening rate for the solenoid valve for hydrogen supply applied to the hydrogen storage tank, flow characteristics were comparatively analyzed. Through the analysis of pressure and temperature distributions within the valve according to the high-pressure supply condition of 70 MPa or more, the heat flow characteristics in the valve, inlet and outlet passage according to the opening rate of the valve were identified. As a result a sudden change in the fluid behavior appears in the neck region of the valve, and it is understood that the flow separation caused by the flow path shape of the expanded tube has a dominant influence on the flow characteristics. And, it was confirmed that the shape of the valve seat is a factor significantly affecting the improvement of flow rate and differential pressure performance.

Key words : Flow separation(유동박리), Hydrogen storage tank(수소 저장 탱크), Opening ratio(개도율), Pressure distributions(압력 분포), Pressure drop(압력 강하), Valve seat(밸브 시트)

1. 서론

최근 강화되는 배기배출물 규제에 인하여 전기자동차나 수소연료전지 자동차와 같은 친환경 자동차의 수요가 증가하는 추세이다. 특히 전기자동차의 보급이 확대되고 있는 실정이지만, 보급된 규모에 비해

충전시설이 부족하고, 충전에 소요되는 시간이 길다는 문제가 발생하고 있다. 반면에 수소연료전지 자동차의 경우, 배기배출물이 존재하지 않고 전기자동차에 비해 수소 충전 시간이 짧다는 이점이 있어 최근 정부와 관계부처 주도로 수소연료전지 자동차의 기술개발과 보급을 위한 정책이 확대되고 있으며, 수소

연료전지 자동차 보급 확대에 따른 수소 충전시설 및 충전장치의 수요가 증가하고 있다^{1,2)}. 수소 연료전지 자동차의 연료인 수소 충전 시 충전 탱크 내 고압 상태의 수소가 레귤레이터를 거치며 압력이 낮아지고, 압력이 조절된 수소가 스택으로 공급된다. 이를 분석하기 위해 Park³⁾은 고압 압축수소의 비이상성과 압축과정에서 나타나는 온도상승을 고려하기 위해 수소 기체 충전 시 열역학적 물성을 여러 상태방정식을 적용하여 비교분석 및 정확도를 검증하였고, Lee 등⁴⁾은 수소 기체 분사 시 압축성 유동 특성에 민감한 수소 레귤레이터의 압력 손실을 완화시키기 위해 유체관로 형상에 따른 압력 강하 특성을 전산유체역학을 통해 비교 분석하여 효과적인 수소 레귤레이터 유체관로 설계 방안을 제안하였다. 수소 충전 과정에서 밸브 및 레귤레이터의 오작동으로 인해 과도한 압력의 수소가 공급될 경우, 부품의 파손으로 이어져 화재 발생의 가능성이 있다. 이를 위해 Choi 등⁵⁾은 수소 충전소에 적용되는 압력 조정기의 유량 제어밸브를 대상으로 구조 및 피로해석을 통하여 내압 및 내구성을 확인하고 내압시험 기준 취약부위를 분석하였다. 특히, 수소상용차의 경우 전기상용차 대비 고중량 적재가 가능하지만, 승용차에 비해 3-5배 정도 크기의 수소 저장탱크가 장착되고 있어 충전 유량 확보와 충전 속도 개선이 요구된다^{6,7)}.

따라서 본 연구에서는 수소 저장탱크에 적용되는

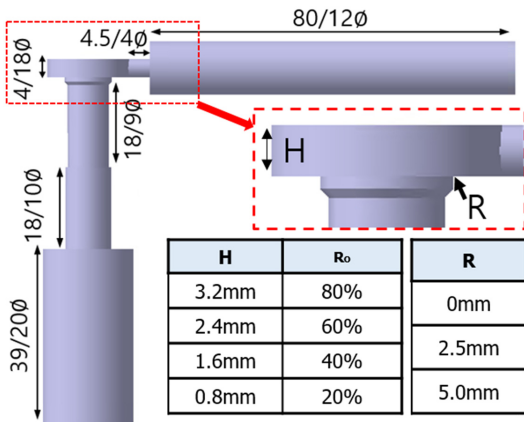


Fig. 1. Geometry of hydrogen supply valve

수소 공급용 솔레노이드 밸브를 대상으로 개도율 (Ro)과 밸브시트 형상에 따른 밸브 내의 열유동특성을 수치 해석적으로 분석하기 위해 입구의 고압 공급 조건에 따른 솔레노이드 밸브의 성능을 비교분석하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 수치해석 대상 및 설계 조건

본 연구는 수소저장시스템 내 고압 밸브의 개도율과 밸브시트 형상이 차압과 유량 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 실제 수소 저장 탱크용 솔레노이드 밸브를 대상으로 밸브와 플런저 부분을 모델링하였다. 또한, 완전발달유동 모사를 위해 수소가 충전되는 입구부와 플런저를 지난 출구부의 유체영역을 연장하여 Fig. 1과 같이 유체 유동영역을 설정하였다. 본 수치해석에 적용한 격자는 Fig. 2에 나타내었으며, 신뢰성 확보를 위해 벽면에 inflation 기능을 사용하여 Y+는 최대 98.04로 격자를 생성하였다. 작동유체는 수소 기체로 설정하였으며, 압축성 유동을 분석하기 위해 이상기체 조건을 적용하였다.

본 연구에서는 70 MPa 이상의 압력으로 충전된 고압 수소 탱크에 직결된 솔레노이드 밸브의 개도율 (Ro)에 따른 열·유동특성을 파악하기 위해 선행 연구를 참고하여 Table 1과 같은 해석 조건에 따라 정상상태 해석을 진행하였다^{8,9)}. 해석에 사용된 격자는 개도율과 밸브시트 형상에 따라 각각 약 800만 개에서 1,200만 개로 생성하여 수치해석에 적용하였으며 Fig. 1과 같이 플런저 실린더에 의해 개도율이 변경

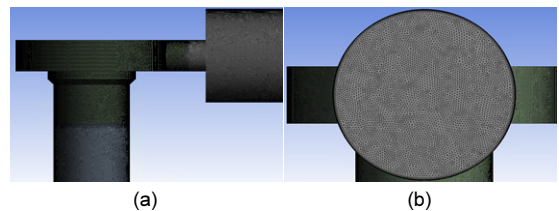


Fig. 2. Mesh of hydrogen supply valve. (a) Front view of mesh. (b) Right view of mesh.

되는 부분의 높이 비에 따라 구분하여 해석을 수행하였다. 또한, 실린더가 상하로 개폐되며 맞닿는 밸브시트의 형상을 변경해가며 차압과 유량성능을 비교 분석하기 위해 기존의 직각형태와 필렛 가공 시 반지름에 따라 형태를 구분하여 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 수치해석 지배방정식

수소 공급용 솔레노이드 밸브의 열·유동해석을 위해 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식이 지배방정식으로 적용되었으며, 각각 식 (1)~(3)과 같이 나타낸다.

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

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

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

식 (1)~(3)에서 u_j 는 속도를 의미하며, 밀도는 ρ , 열전도도는 k_{eff} , τ_{ij} 는 전단응력텐서를 나타낸다. 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였고, 난류 운동에너지(k)와 에너지 소산률(ϵ)에 대한 방정식을 적용하여 열·유동장을 계산한다^{10,11}.

Table 1. Analysis conditions

Contents	Conditions
Turbulence model	$k-\epsilon$
Fluid	H ₂ (ideal gas)
Inlet temperature (K)	283
Inlet pressure (MPa)	70, 75, 80
Opening ratio (R _o)	20, 40, 60, 80, 100
Outlet pressure (MPa)	50

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_K \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \tag{5}$$

식 (4), (5)는 $k-\epsilon$ 난류 모델에서 사용된 k 와 ϵ 방정식이며, 두 식의 좌변의 두 항과 우변의 첫째항은 각각 시간항, 대류항, 확산항을 의미하며, 압축성 난류에서 전체 소멸율 변화량(Y_M), 사용자 정의 소스항(S_K)으로 구성된다. $k-\epsilon$ 난류 모델에서의 Eddy viscosity는 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$ 로 정의되고, $\sigma_\epsilon, \sigma_k, C_1, C_2, C_3$ 는 모델링 상수를 의미한다.

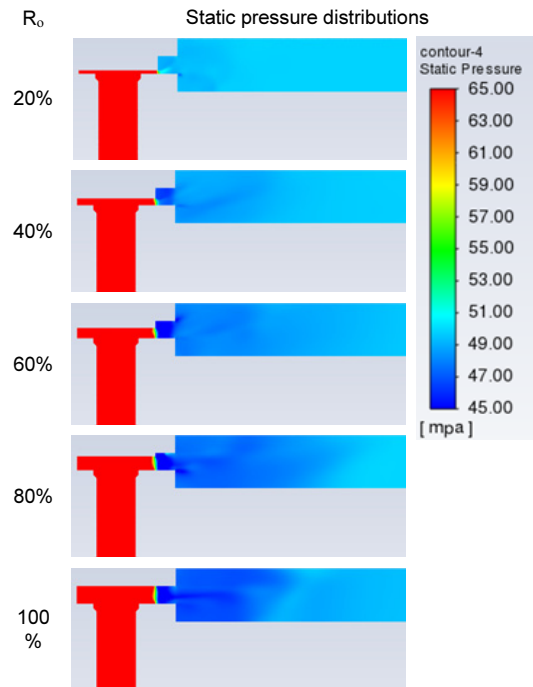


Fig. 3. Static pressure distributions in hydrogen valve according to opening rate (P_{inlet}=75 MPa)

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 개도율(opening ratio)이 유동특성에 미치는 영향

Fig. 3은 개도율에 따른 수소 공급용 솔레노이드

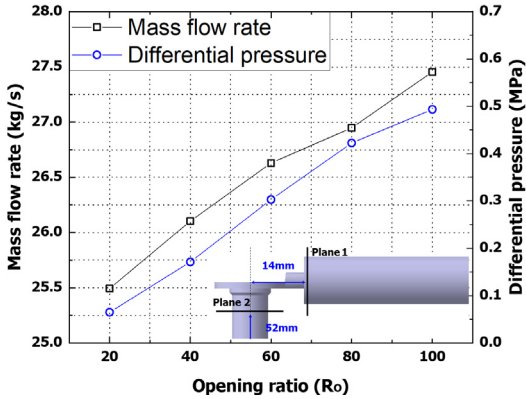


Fig. 4. Mass flow rate, differential pressure distribution in hydrogen valve according to opening rate ($P_{inlet}=75$ MPa)

밸브 내의 정압분포이며 Fig. 4는 개도율에 따른 질량 유량과 차압 그래프이다. 차압은 밸브 목영역을 지난 부분과 밸브시트 직전 면에서의 평균 압력을 기준으로 식(6)과 같이 측정하였으며 Fig. 4에 차압 측정 위치를 plane-1, plane-2로 도식하였다.

$$\Delta P = P_{1\text{Average}} - P_{2\text{Average}} \quad (6)$$

연구 결과, 개도율이 증가함에 따라 저압분포의 범위가 상승하는 경향이 나타난다. 이는 개도율이 증가할수록 유로 단면적이 증가하여 유량이 증가함에 따라 유속이 상승하고 밸브시트와 목 영역의 유로가 확장되는 비율이 감소하여 목 영역의 전단에서 발생하는 유동박리의 범위가 저하되고, 주유동을 방해하는 영향이 감소함에 따라 나타나는 경향으로 판단된다. 이는 Fig. 4에서도 확인 가능하듯 개도율과 유량은 비례하는 경향이 나타나며, 이로 인해 유속이 증

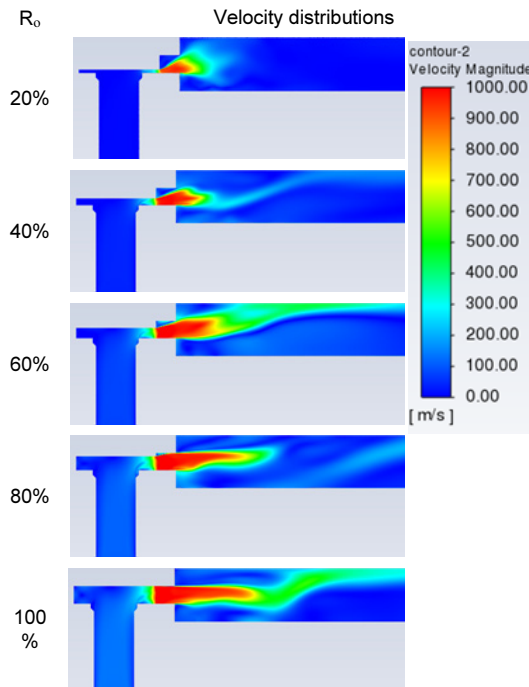


Fig. 5. Velocity distributions in hydrogen valve according to opening rate ($P_{inlet}=75$ MPa)

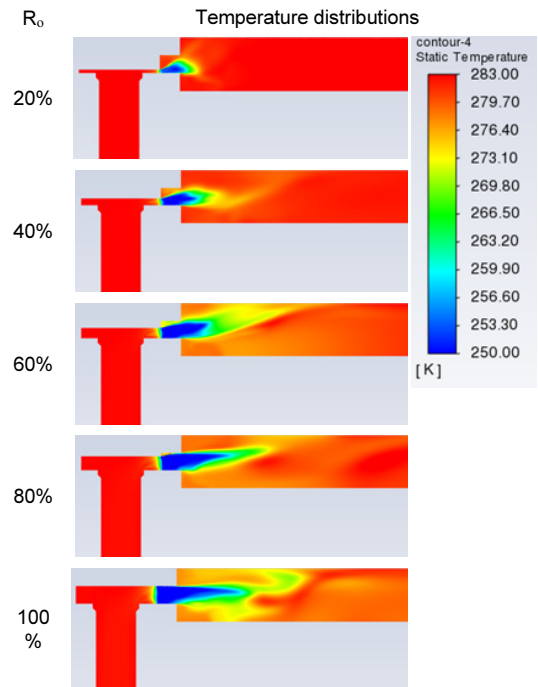


Fig. 6. Temperature distributions in hydrogen valve according to opening rate ($P_{inlet}=75$ MPa)

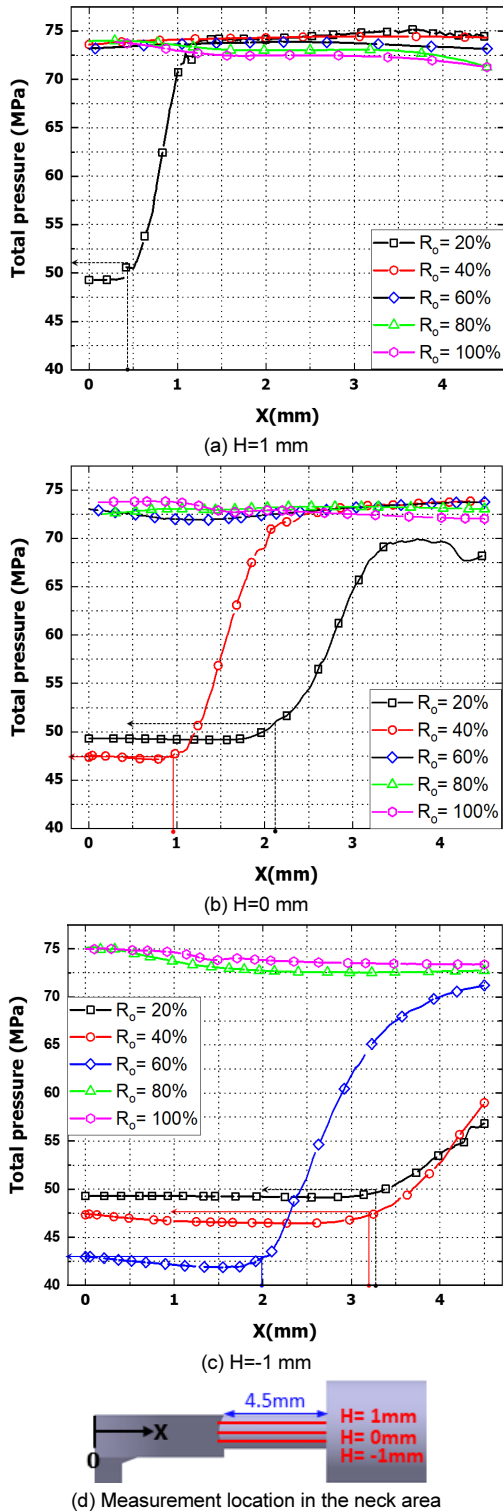
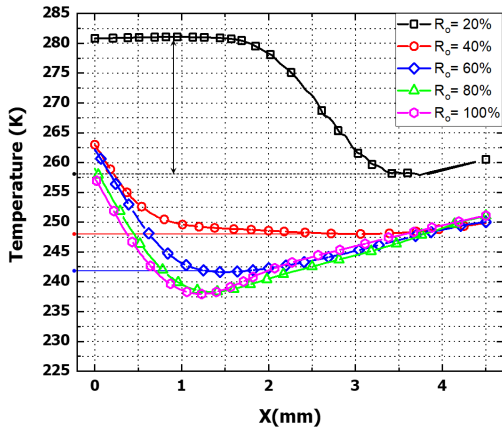


Fig. 7. Total pressure distributions of the neck area in hydrogen valve ($P_{inlet}=75$ MPa)

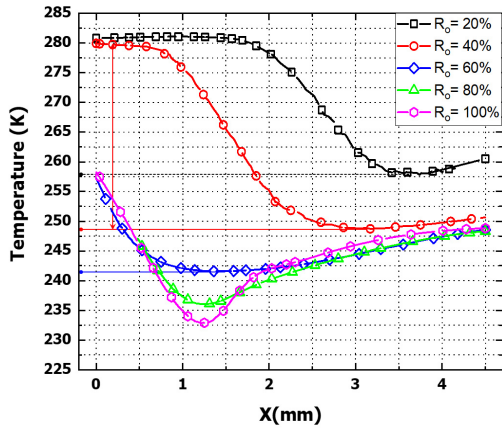
가함에 따라 플런저 실린더 전후의 차압 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Figs. 5, 6은 개도율에 따른 수소 밸브 내의 유속과 온도분포이다. 유속 분포에서 개도율이 증가함에 따라 주유동의 속도는 점차 수평방향으로 증가하며 분포하는 경향이 나타난다. 이는 개도율이 증가하며 목 영역 전단의 유로 단면적이 증가함에 따라 목 상부의 저압분포와 유동박리에 의한 영향이 저하되면서 수직방향으로 분포하는 속도가 감소하여 나타난 것으로 판단된다. 또한, 개도율 100%의 경우 유동이 수평적으로 분포하다가 잠시 하락하고 다시 상승하는 형태를 보였다. 이는 온도분포에서 유추할 수 있듯이 저온의 수소 기체가 수평적으로 분포하는 과정에서 높은 밀도로 인해 잠시 하락하고 후에 주변의 상대적으로 높은 온도의 수소 기체와 열교환을 통해 온도가 점차 증가한다. 일정거리를 지난 주유동의 온도가 주변의 수소기체와 온도차이가 하락하며 주변의 수소기체의 밀도 차가 감소함으로 인해 유동이 다시 상승하는 경향이 나타나는 것으로 판단된다.

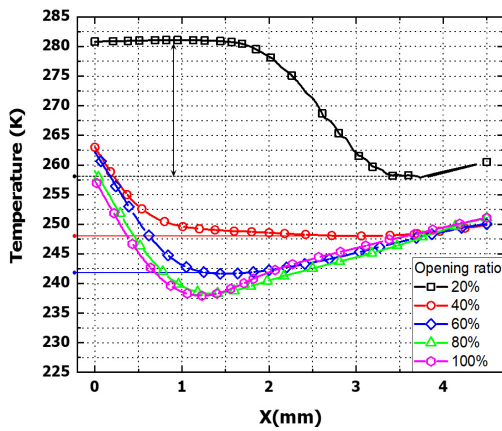
플런저 실린더를 지난 수소기체가 확관 부분에서 급격한 유동특성 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이를 비교 분석하기 위해 개도율에 따른 목 영역의 전압과 온도그래프를 각각 Figs. 7, 8에 도식하였다. 전압 그래프에서 20-60% 개도율의 경우, 목 영역의 하단부(H=-1)에서 상단부(H=1)로 갈수록 압력 변곡점(pressure inflection point)이 앞당겨지고, 개도율이 증가할수록 초기 전압은 감소하는 경향이 나타난다. 이는 개도율이 증가할수록 확관되는 비율이 감소하고, 확관의 형상으로 인해 발생하는 유동박리가 주유동에 미치는 영향이 저하되는 것으로 보여진다. 측정 높이가 낮아짐에 따라 개도율과 압력이 반비례하는 결과가 나타나는데, 이는 개도율이 증가할수록 유량, 유속이 증가하여 전압이 감소하는 것으로 판단된다. 또한, 20-60% 개도율에서 상대적으로 전압의 변화량이 크게 나타나는 경향은 유동박리가 주유동에 미치는 영향이 증감되는 개도율의 구간이 존재하는 것으로 사료된다. 반면, 80%, 100% 개도율의 경우, 완전발달유동에 가까운 유체거동이 나타나



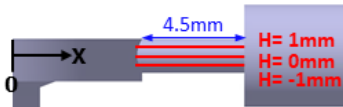
(a) H = 1 mm



(b) H = 0 mm



(c) H = -1 mm



(d) Measurement location in the neck area

Fig. 8. Temperature distributions of the neck area in hydrogen valve ($P_{inlet}=75$ MPa)

전압의 변화가 상대적으로 적게 나타났다.

온도그래프의 경우, 20-60%의 개도율에서 목 영역의 상단부로 갈수록 고온 영역이 증가하고, 동일 위치에서 개도율이 증가할수록 저온 분포 영역이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 전압그래프와 마찬가지로 주유동이 유동박리로부터 받는 영향이 감소할수록 유속이 증가하였으며, 수소 기체가 이상기체로 해석이 진행됨에 따라 온도가 유속과 반비례하여 나타난 결과로 보인다. 또한, 목 영역의 하단부에서 상승부로 갈수록 개도율이 증가함에 따라 온도 편차가 상승하는 경향이 나타나는데, 이는 목 영역에서 유속이 급격히 변화하는 구간을 의미한다. 개도율이 증가할수록 유로 형상에 의해 발생하는 유동박리의 범위가 감소하고, 이에 따라 주유동에 미치는 영향은 저하되어 개도율 80%, 100% 경우 목 영역 내 수소 기체의 압력과 온도의 변화량이 미미한 것으로 파악된다.

3.2 충전압력이 차압, 유량특성에 미치는 영향

Figs. 9, 10은 개도율 40%와 80%의 충전 압력에 따른 속도분포이다. 유체 거동 형태는 충전압력에 의한 영향보다 개도율에 의한 영향이 지배적인 것으로 파악되며, 이를 정량적으로 비교하기 위해 앞서 Fig. 4

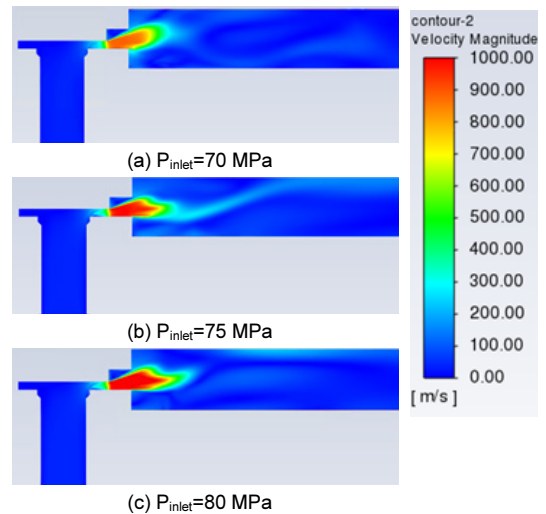


Fig. 9. Velocity distributions in hydrogen valve at 40% opening ratio

에 나타난 차압과 유량 측정 지점을 기준으로 차압과 질량유량 그래프를 Figs. 11, 12에 도식하였다.

전압력이 증가할수록 차압과 유량은 선형적으로 증가하는 경향이 나타났으며, 이는 충전압력의 상승이 유량 성능 개선에는 유리하지만 차압 또한 상승하여 안정성 문제가 야기될 수 있음을 확인하였다. 또한, 차압 성능 측면에서 유량보다는 확관 형태인 유로의 형상에 의해서 나타나는 유동박리가 미치는 영향이 지배적인 것으로 사료된다.

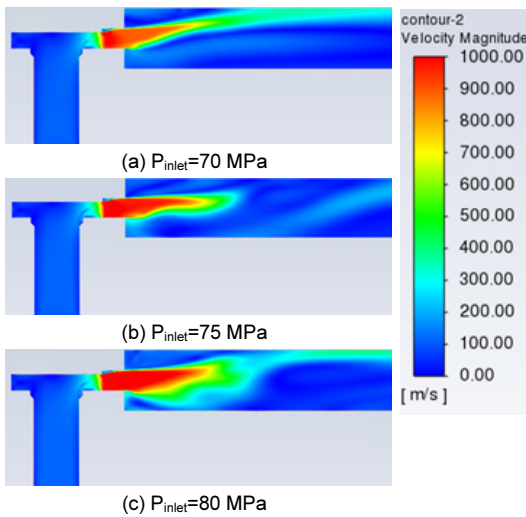


Fig. 10. Velocity distributions in hydrogen valve at 80% opening ratio

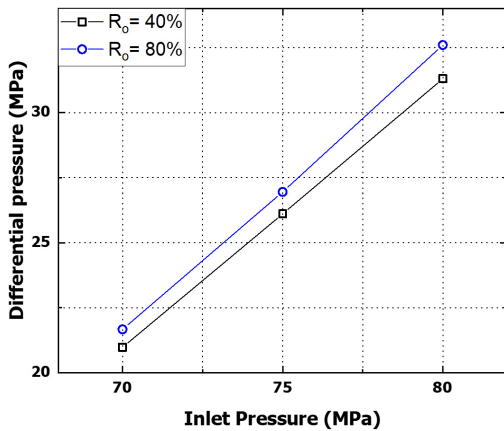


Fig. 11. Differential pressure distributions according to opening rate & inlet pressure

3.3 밸브시트 형상에 따른 차압 및 유량특성

Figs. 13, 14는 유동박리의 영향과 유량에 의한 영향을 배제하기 위해 개도율과 충전압력을 고정시키고, 밸브시트 형상에 필렛 가공을 적용하여 Fig. 1과 같이 밸브시트 부분의 가공 형태를 valve seat radius (R)로 구분하여 도출한 차압과 질량유량 그래프와 속도분포이다. R=2.5 mm인 경우 R=0 mm인 경우에 비해 유량 성능이 개선되었으나 증가한 유량에 비례하여 차압 또한 증가한 것을 확인할 수 있다. 반면 R=5.0 mm인 경우, R=0 mm와 R=2.5 mm인 경우에

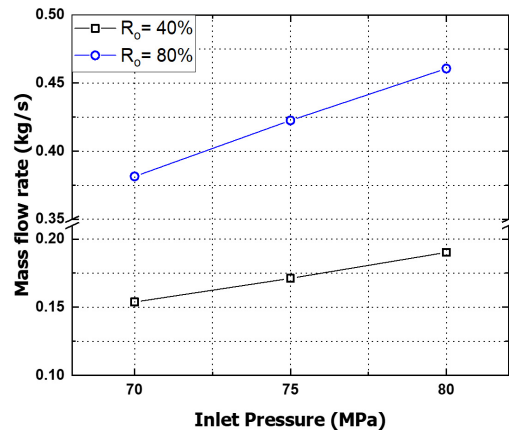


Fig. 12. Mass flow rate according to opening rate & inlet pressure

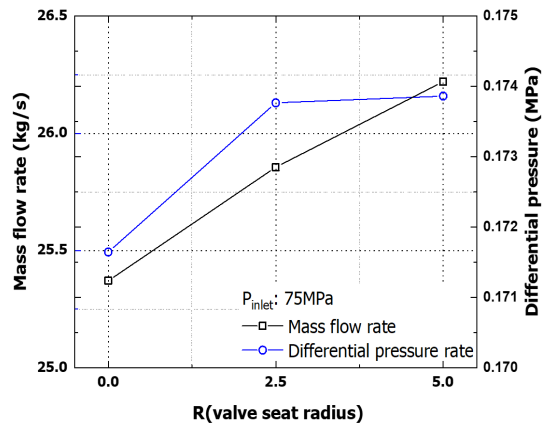


Fig. 13. Mass flow rate, differential pressure distributions in hydrogen valve according to valve seat radius (P_{inlet}=75 MPa, R_o=40)

비해 유량성능이 증가하였으며, R=2.5 mm의 경우에 비해 차압의 증가량이 미미한 것으로 파악된다. 이는 R=5.0 mm의 밸브시트 형상 조건의 충전 성능이 다른 형상조건에 비해 우수한 것으로 보이고, 원활한 유동을 유도하는 밸브시트의 필렛 가공이 유량성능과 차압 개선에 유의미한 영향을 미치는 인자인 것으로 판단된다. 따라서 이에 대해 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 수소 충전 시스템의 성능과 안정성을 개선하고자 수소 공급용 솔레노이드 밸브를 대상으로 개도율과 밸브시트 형상에 따른 밸브 내의 열·유동특성을 수치 해석적 방법을 이용하여 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개도율이 증가함에 따라 유량과 차압이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 동일한 충전 압력 조건에서 개도율이 증가함에 따른 유로 단면적의 확대가 유량과 유속의 증가로 이어지며, 이에 따라 차압 성능이 저하되는 것을 확인하였다.

2) 밸브 내의 목 영역에서 유체 거동이 급격히 변화하는 것을 파악하였으며, 개도율 20%, 40%, 60%

와 개도율 80%, 100% 경우에서 유체 거동 특성의 차이를 확인하였다. 개도율 60% 이하의 경우 확산 형태의 유로 형상으로 의해 발생하는 유동박리가 주 유동을 방해하는 경향이 나타나는 반면, 개도율 80% 이상의 경우 유동박리의 범위가 감소하여 목 영역에서의 유체 거동의 변화가 상대적으로 감소한 것을 확인하였다.

3) 충전압력의 상승은 유량 성능의 개선으로 이어졌으나, 차압 또한 증가하여 충전 성능 개선에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 반면, 필렛 가공을 적용한 밸브시트 형상은 차압 성능과 유량 성능 개선에 유의미한 결과를 보여주며, 이에 대해 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구이다(2022303004020C, 수소저장시스템의 멀티 및 싱글제어가 가능한 제어기 기술개발).

References

1. J. A. Choi, S. W. Ji, and J. S. Jang, "A study on design of ultra-high-pressure ball valve for hydrogen station", *Journal of Drive and Control*, Vol. 18, No. 3, 2021, pp. 23-29, doi: <https://doi.org/10.7839/KSFC.2021.18.3.023>.
2. 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, 2021, pp. 28-33, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2021.25.2.28>.
3. B. H. Park, "Calculation and comparison of thermodynamic properties of hydrogen using equations of state for compressed hydrogen storage", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 2, 2020, pp. 184-193, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.2.184>.
4. Y. R. Lee, S. K. Gi, S. G. Jang, and M. J. Do, "A study on flow characteristics with the variation of fluid pipe line in hydrogen regulator", *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, KSPE 2017 Spring Conference, 2017, pp. 939-940. Retrieved from https://www.kspe.or.kr/data2/KSPE2017s_03.pdf.

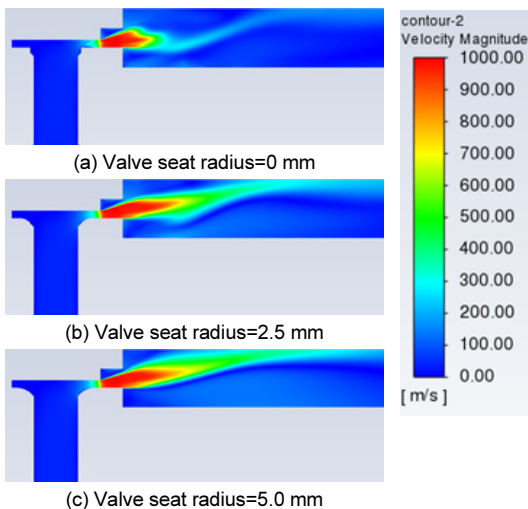


Fig. 14. Velocity distributions in hydrogen valve in hydrogen valve according to valve seat radius (Pinlet=75 MPa, Ro=40)

5. I. H. Choi, T. I. Ha, and H. S. Kim, "Durability assessment by structural and fatigue analysis of flow control valves (FCVs) for hydrogen refueling stations", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 33, No. 3, 2022, pp. 240-246, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.3.240>.
6. C. Y. Shim, K. H. Lee, C. O. Hong, and Y. S. Kim, "Numerical evaluation of flow and performance of hydrogen recirculation blower for fuel cell vehicle", *Trans. Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 2, 2005, pp. 1395-1400. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00661479>.
7. B. Choi, M. Kim, C. Hong, and S. Chang, "CFD analysis of supersonic ejector for recirculation of hydrogen in fuel cell vehicle", *Trans. Korean Society of Automotive Engineers*, 2011, pp. 3117-3122. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01825669>.
8. U. Baek, G. M. Gwak, N. Y. Kim, Y. M. Cho, and S. K. Lyu, "Study on the optimal design of the nozzle shape of the 700 bar hydrogen refueling nozzle for hydrogen electric vehicles", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 21, No. 7, 2022, pp. 28-33, doi: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2022.21.07.028>.
9. H. B. Ko, H. L. Kang, and S. H. Han, "Structural conceptual design and flow characteristics of coaxial counter-rotating ball valve", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 46, No. 4, 2022, pp. 215-221, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2022.46.4.215>.
10. H. J. Shin, "CFD analysis of an air compressor for a hydrogen electric car", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 42, No. 12, 2018, pp. 853-859, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2018.42.12.853>.
11. S. H. Jeong and H. K. Suh, "Influence of fin characteristics on the turbulent flow in IHX for a vehicle", *J. Korean Soc. Mech. Technol.*, Vol. 20, No. 4, 2018, pp. 413-419, doi: <https://doi.org/10.17958/ksmt.20.4.201808.413>.