

이동식 수소 충전 장비용 수소 밸브의 유체 온도 변화에 따른 유동 특성의 수치해석적 연구

권준영^{1†} · 오승준¹ · 최정주² · 김용기³

¹동아대학교 고기능성밸브 기술지원센터, ²동아대학교 기계공학과, ³태광후지킨 주식회사

A Numerical Analysis Study of Hydrogen Valve to Flow Characteristics by Fluid Temperature Variation for Mobile Charging Equipment

JUNYEONG KWON^{1†}, SEUNGJUN OH¹, JEONGJU CHOI², YONGKI KIM³

¹Technical Center for High-Performance Valve, Dong-A University, 37 Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, 37 Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea

³TK-FUJIKIN CORPORATION, 7 Noksansandan 261-ro 88beon-gil, Gangseo-gu, Busan 46753, Korea

[†]Corresponding author :
kjyung625@dau.ac.kr

Received 9 November, 2022
Revised 29 November, 2022
Accepted 12 December, 2022

Abstract >> Global efforts to reduce carbon emissions have focused attention on the development of hydrogen energy and the development of various hydrogen mobility requires mobile hydrogen charging stations. In this study, the flow characteristics of the flow control hydrogen valve for mobile hydrogen charging equipment were studied according to the temperature change of hydrogen gas. The inlet pressure was 100 MPa, the outlet pressure to 70 MPa, and temperature condition was set -40°C to 85°C. As a result, the difference in the valve flow coefficient, which determines the capacity of the valve, showed a difference within 5% depending on the temperature.

Key words : Hydrogen(수소), Hydrogen valve(수소 밸브), Numerical analysis(수치해석), Flow coefficient(유량계수), Temperature(온도)

1. 서론

전 세계적으로 2015년 파리기후협정 이후 2021년 1월부터 신기후 체제에 돌입하며 국가별 온실가스 감축 목표를 세우고 목표를 달성하기 위해 에너지 전환에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 우리나라 역시 2030년 배출 전망치 대비 37%를 2050년 까지 감축하기를 목표로 설정하였다. 이를 추진하기

위해 정부는 탄소중립 로드맵을 발표하였고 여기에 각 산업 분야별 온실가스 감축 계획에 대해 계획이 수립되어 있으며 그중 수송 분야에서는 국내 운행 중인 내연기관 차량의 76% 이상을 전기 및 수소연료 전지 차량으로 전환해야만 하는 상황이다¹⁾.

여기서 말하는 수소연료전지란 물의 전기분해와 반대되는 원리로 기체 수소와 기체 산소를 화학적으로 반응시켜 전기를 발생시키는 전지이다. 이러한 연

료전지 1세트를 여러 장 적층하여 결합한 형태를 스택이라고 부르며 운송 차량 이외에도 수소연료전지 파워팩을 이용하여 지게차, 건설기계와 드론, 농기계 등 다양한 분야로 확대되고 있다.

이처럼 수소에너지 개발이 활발해진 지금 우리 정부는 수소에너지 활성화를 위해 수소충전소 확대 및 수소법 시행을 통해 수소에너지관련 선진 기술을 확보하고자 노력하고 있다. 하지만 현재 건설 중인 고정식 수소충전소의 경우 이동 거리가 멀고 수요가 많은 수소연료전지 차량은 충전할 수 있으나 지게차, 건설기계와 드론, 농기계의 경우 충전하기에는 한계가 있다. 따라서 국내의 기업들은 차량 캐리어 방식의 수소 공급 및 충전을 할 수 있는 이동식 충전 장비를 개발하고 있다. 다만 현재 이동식 수소 충전 장비에 사용되는 피팅 및 밸브는 전량 외국 수입 제품에 의존하고 있으며 본 연구에서 다루고자 하는 공압밸브 역시 전량 수입되는 제품 중 하나이다. 앞서 언급한 공압밸브는 수소 모빌리티에 고압 수소를 충전하는 과정에서 수소를 공급/차단/제어하는 밸브이다. 다만 고압 수소용 밸브의 경우 그 사용 압력이 매우 높아 니들 밸브(needle valve)의 형태를 가지며, 이는 통상적으로 디스크와 스템이 따로 구성되어 스템의 동작으로 디스크가 시트와 접촉하여 밸브의 밀폐가 되는 구조이나 니들 밸브의 경우 스템이 디스크의 역할도 하는 구조로 되어있다.

본 연구에 사용되는 수소 밸브 역시 니들 밸브와 같은 구조이나 수동 조작이 아닌 구동부에 공압을 공급하여 구동부를 움직이면 구동부와 연결된 밸브의 스템이 상하로 움직여 밸브의 유로를 조절하거나 유체의 흐름을 개폐하는 구조로 되어있다. 이러한 공압밸브의 내구성과 기술 개발을 위한 연구가 많이 진행되고 있다.

Choi 등²⁾은 수소충전소용 유량제어 밸브를 설계하여 구조 및 피로해석을 통한 내구성을 확인하여 해외 선진사 제품 대비 12% 감소되었음을 확인하였고, 또한 이 설계 제품의 피로해석을 진행한 결과 ISO 19880-3 기준³⁾을 만족하는 것으로 결과를 보고하였다.

Nam 등⁴⁾은 실제기체(peng-robinson method) 방정식을 적용하여 수소충전소용 유량제어 밸브의 내부 유동을 입구와 출구의 차압에 따라 그 특성을 확인한 결과 차압에 따른 유동 형상의 특별한 차이는 거의 발생하지 않으며 수소 가스의 온도 변화폭이 증가함에 따라 질량유량에 대한 경향이 체적유량과는 다른 양상을 보이게 된다고 결과를 보고하였다.

Ye 등⁵⁾은 고압 수소 니들 밸브에서 스템의 끝 모양(valve spool)에 따른 유동 특성에 관해 연구하였으며, 특히 straight cone 형상과 arc cone 형상이 내부 유동의 압력 형성이 균일하다는 결과를 보고하였다.

본 연구에서는 이동식 수소충전소에 사용될 밸브가 수소 가스의 온도에 따라 흐르는 유량의 변화와 유속의 변화에 관해 연구하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 유한체적법(finite volume method) 기반인 ANSYS 2022 R2 (ANSYS, Canonsburg, PA, USA)를 활용하였으며 지배방정식은 미소 검사 체적에 질량 보존의 법칙을 미분하여 적용한 연속 방정식과 난류 해석을 위한 운동량 보존 방정식 및 압축성 유체의 에너지 보존 방정식이다⁶⁾.

-The continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

-Momentum conservation equation

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + S \quad (2)$$

-Energy conservation equation

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (v(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T + (\bar{\tau}_{eff} \cdot v)) \quad (3)$$

여기서 t, ρ 는 각각 시간과 밀도를 나타내고 v, p, s 는 속도 벡터, 정압 및 소스항을 나타낸다. $\bar{\tau}$ 는 응력 텐서를 의미하고 그 식은 아래와 같다.

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla v + \nabla v^T) - \frac{2}{3} \nabla v I \right] \quad (4)$$

여기서 μ 는 점성계수를 나타내며 I 는 단위 텐서이다. 수식 (3)에서 $E = h - (p/\rho) + (1/2)v^2$ 이고 유효열전도율 $k_{g,eff}$ 는 k_g 와 k_t 의 합으로 구할 수 있으며 $k_t = (c_{pg}\mu_t)/Pr_t$ 이다. Pr_t 는 난류 Prandtl 수이며 $\bar{\tau}_{eff}$ 는 점성가열을 나타낸다⁷⁾.

2.2 유량계수

유량계수는 밸브가 가지는 고유한 유량에 대해 지칭하는 것과 동시에 사용 환경에 따라 밸브를 선택할 수 있는 기준이 된다.

유량계수의 정의는 특정 열림도에서 60°F인 물이 밸브 입구와 출구의 압력 손실이 1 psi로 밸브 내부를 통하여 흐르는 유량(gallon [U.S]/min)을 말한다. 이와 관련한 식은 아래의 식과 같다.

$$C_v = Q \sqrt{\frac{G}{\Delta P}} \quad (5)$$

여기서 C_v 는 유량계수, Q 는 유량을 말하며 ΔP 는 입구 측과 출구 측의 차압(psi)을 나타낸다. G 는 흐르는 유체의 비중이다. 다만 식 (5)는 비압축성 유체에 대한 유량계수를 구하는 수식이며 압축성 유체에 대해서는 ANSI/ISA-75.02⁸⁾ 표준의 내용 중 환산식을 이산화하여 아래와 같이 나타내었다.

$$C_v = \frac{Q}{7320 F_p P_1 Y} \sqrt{\frac{M_W T Z}{F_k x_T}} \quad (6)$$

여기서 Q 는 유량(ft³/h)을, F_p 는 배관 형상계수를,

P_1 은 입구측 압력을 나타낸다. M_W 는 적용 유체의 분자량을 나타내며 T 는 유체의 절대온도, Z 는 유체의 압축계수를 나타낸다. 특히 Y 팽창계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Y = 1 - \frac{x}{3(F_k x_T)} \quad (7)$$

식 (7)에서 F_k 는 비열비 계수를 나타내며 이는 시험 유체의 비열비를 공기 비열비인 1.4로 나눈 값을 적용한다. x_T 는 압력 저하비를 나타내고, x 는 실제 압력 저하비를 나타내며 여기서 계산되는 Y 값은 1 미만이어야 하고 0.67 이하가 되어서도 안 된다.

2.3 형상 및 격자

밸브의 유동 해석을 위해 3D 모델링을 실시하여 Fig. 1과 같이 모델링 형상을 제작하였다. 유체와 직접적으로 접촉되지 않는 공압 구동기 부분은 해석에서 제외하고 Fig. 2와 같이 유동장을 형성하였다.

입구와 출구측 직경은 2.8 mm이며 seat 내경은 6.8 mm이다. 유동장 형성 시스템의 리프트는 최대한 이동한 full open 상태에서 형성하였다.

격자는 fluent meshing의 polyhedral mesh를 사용하여 Fig. 3과 같이 생성하였으며 mesh node 수는 358,622개이다. 또한 벽면에서의 속도 분포를 정밀하게 모사하기 위해 prism 격자를 생성하였다. 자세한 경계조건 및 격자 정보는 Table 1에 나타내었다.

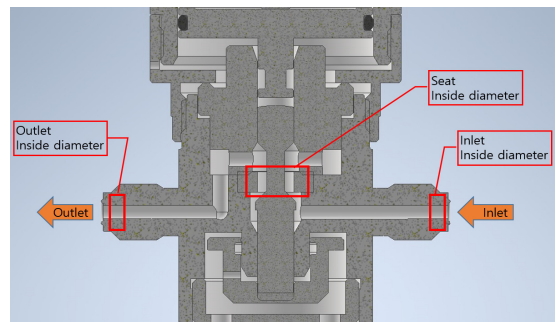


Fig. 1. 3D model of hydrogen valve

2.4 경계조건 및 변수

ISO 19880-1⁹⁾ 기준에 따라 수소충전소의 분배시스템에 최대 작동 압력은 압력등급 H70 기준으로 96.25 MPa이다. 이 기준을 맞추기 위해 밸브의 입구측 압력을 100 MPa로 선정하였다. 또한 SAE J2601:2020¹⁰⁾ 기준에 따라 수소 충전 시 발생하는 최대 차압을 30

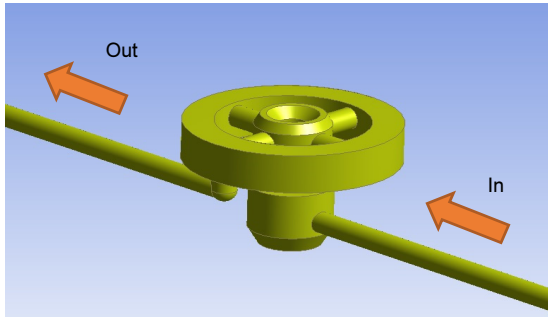


Fig. 2. CFD model of hydrogen valve

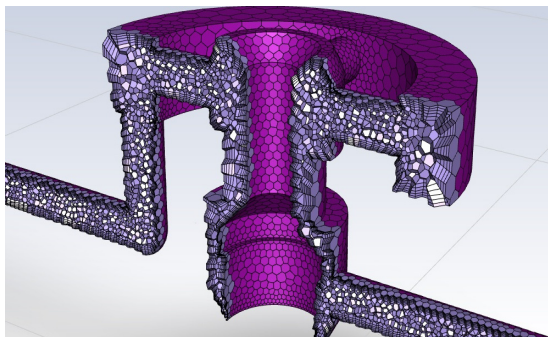


Fig. 3. Computational grid for numerical analysis

Table 1. Boundary conditions and mesh information

Type of fluid	Hydrogen gas
Boundary condition	Inlet pressure: 100.0 MPa
	Outlet pressure: 70.0 MPa
	Temperature: -40°C to 85°C
Turbulent Model	Shear stress transport
Mesh information	
Mesh nodes	358,622
Mesh elements	134,791
Type	Polyhedra

MPa로 설정하였으며 유체의 온도 조건은 ISO 19880-3⁹⁾ 기준에서 요구하는 수소충전소용 밸브의 온도 조건인 -40°C에서 85°C 기준에 맞춰 20°C씩 7구간과 마지막 85°C 구간까지 총 8구간으로 변경하여 압력 및 속도 분포와 유량계수에 대해 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력 및 속도 분포

이동식 수소 충전 장비용 수소 밸브에 대해 유체 온도 변화에 따른 수치해석을 실시하였고 압력 분포와 관련하여 Fig. 4와 Fig. 5처럼 유체의 온도 조건에 따라 분류하여 나타내었다. ISO 19880-1⁹⁾와 SAE J2601:2020¹⁰⁾ 기준에 따라 압력을 선정하였기 때문에 온도에 따른 압력의 변화는 그림과 같이 입구측으로 94.0 MPa의 압력으로 수소 가스가 주입되며 출구측으로

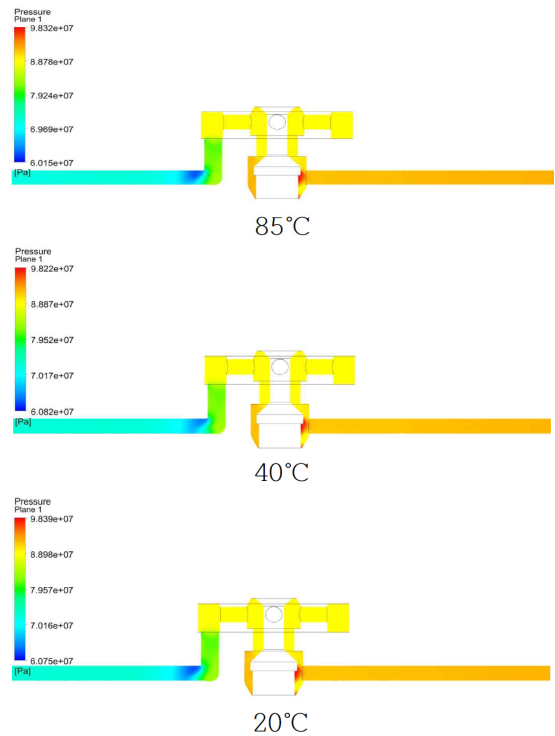


Fig. 4. Pressure distribution on vertical cross section (temp. 85°C/40°C/20°C)

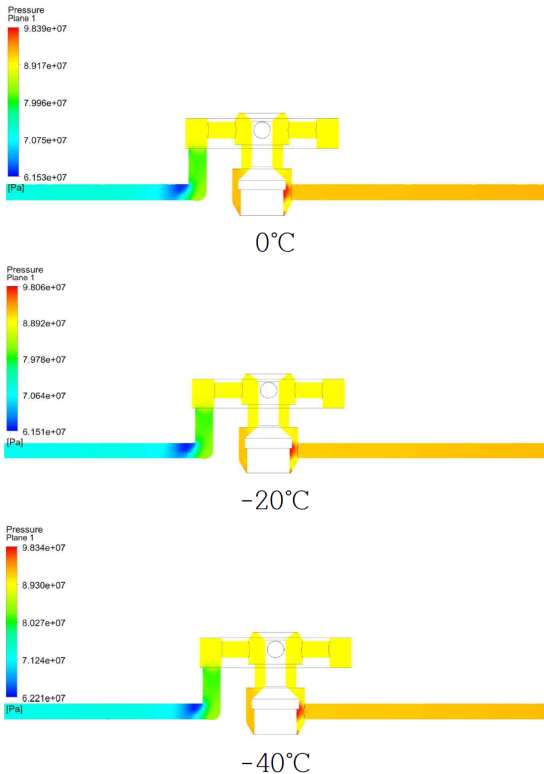


Fig. 5. Pressure distribution on vertical cross section (temp. 0°C/-20°C/-40°C)

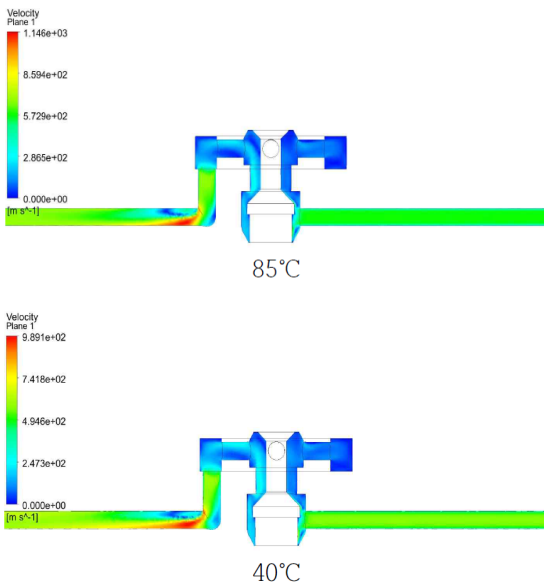


Fig. 6. Flow velocity distribution on vertical cross section (temp. 85°C/40°C)

는 70.0 MPa의 압력으로 토출되는 것으로 확인되었다. 또한 Fig. 6과 Fig. 7은 온도에 따른 유체의 유속을 확인한 것으로 밸브의 몸통 내부 구조상 원형으로 막혀 있는 형상을 가지고 있어 유속이 낮은 걸로 표현이 되고 있으나 실제 유체를 따라 유속을 가지며 이동하고 있으며 온도 상승에 따라 밀도가 낮아지고 동일 압력 조건을 가지게 되면 유속이 증가한다.

밸브의 몸통 구조상 입구측에서 고압의 수소 가스가 들어올 경우 내부 디스크와 시트 공간이 협소하여

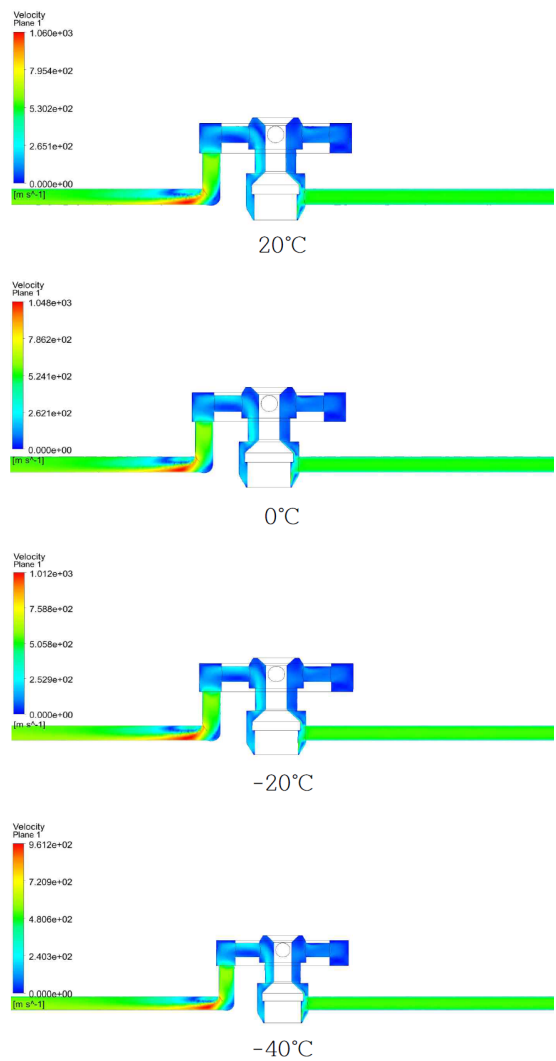


Fig. 7. Flow velocity distribution on vertical cross section (temp. 20°C/0°C/-20°C/-40°C)

그 구간에서의 압력이 최대로 발생하는 것을 알 수 있었으며 여기에 대한 구조적 안전성에 대해 고려해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 8의 x축은 유체의 온도를, y축은 유속을 나타내고 있으며 유체의 온도에 따른 입구측 유속 변화에 대해 나타내고 있다. 입구측 유속의 경우 일정하게 상승하는 경향을 보였으나 출구측 유속의 경우 358 K (85°C)에서 유속이 떨어지는 것을 확인하였다. 이는 출구 압력을 70.0 MPa로 고정하여 발생하는 것으로 판단되며 실제로는 그 이상의 압력으로 토출될 것으로 판단된다. 출구측을 기준으로 223 K (-40°C)의 수소 기체는 574.3 m/s의 속도로 흐르고 유속이 가장 빠를 때인 353 K (80°C)에서는 678.7 m/s의 속도로 유체가 흐르는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 유량계수

Fig. 9의 경우 x축은 유체의 온도를 나타내며 좌측의 y축은 체적유량을 우측의 y축은 질량유량을 나타내며 고압 수소의 흐름은 온도에 따라 질량유량과 체적유량 경향이 다르다는 것을 확인하였다. 질량유량의 경우 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이지만 체적유량의 경우 유체의 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 유체 온도에 따른 수소 가스의 밀도 차로 인한 것으로 판단된다. 또한 358 K (85°C)에서 발생 되는 유량 저하는 유속

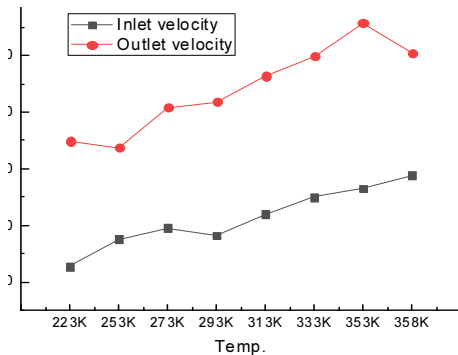


Fig. 8. Fluid temperature increase and flow velocity

과 관련한 것으로 출구측 압력의 고정값 설정으로 인해 발생 되는 것으로 판단된다.

Table 2는 수소 가스의 각 온도에 따른 밸브의 유량계수 데이터를 나타내는 것으로 그 변화가 근소하여 최대 유량계수 값과 최소 유량계수 값이 7.6% 정도 차이가 난다.

4. 결론

본 연구는 수소 가스의 온도 변화에 따른 이동식 수소 충전 장비용 수소 밸브의 유체 온도 변화에 따른 유동 특성에 대해 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

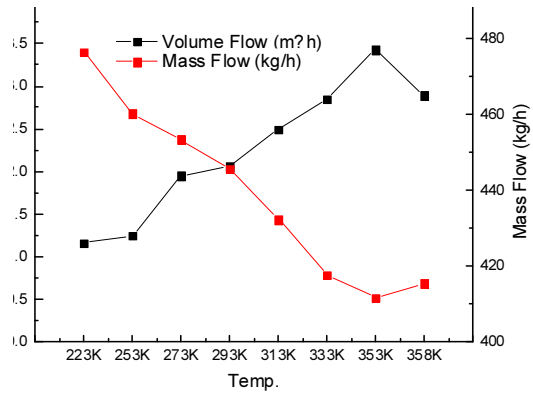


Fig. 9. Volume flow and mass flow for fluid temperature increase

Table 2. Fluid temperature increase and flow coefficient of hydrogen valve

Temp. (K)	Inlet pressure (MPa)	Outlet pressure (MPa)	Flow (m³/h)	Cv
223	94.2	70.0	11.16	0.074
253	93.8	70.0	11.24	0.075
273	94.1	70.0	11.95	0.076
293	94.3	70.0	12.06	0.078
313	94.1	70.0	12.49	0.078
333	93.9	70.0	12.84	0.078
353	94.0	70.0	13.43	0.079
358	94.0	70.0	12.89	0.080

1) ISO 19880-1⁹⁾ 기준과 SAE J2601:2020¹⁰⁾ 기준에 부합하는 사용 압력 및 차압 조건으로 수소 가스의 온도 변화에 따른 질량유량과 체적유량의 상반되는 경향에 대해 확인하였다.

2) 유체의 온도 변화에 따라 동일 압력을 기준으로 하였을 때 유속의 변화는 밀도의 변화와 밀접한 관계를 가지며 이로 인해 내부 유체의 유량에도 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

3) 이동식 수소 충전 장비용 수소 밸브의 유량계수는 일반적인 상온 조건(20°C±5°C) 상태에서의 데이터와 최저 사용 온도(-40°C)와 최고 사용 온도(85°C)에서의 데이터를 비교하였을 때 8% 이내의 차이를 보인다.

이동식 수소 충전 장비용 유량 조절 수소 밸브의 유량계수를 측정하는 시험에서 본 연구를 유용하게 활용할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부/한국산업기술진흥원의 지원으로 수행되었다(과제번호 P170600022).

References

1. Future Vision and Strategy Bureau, "2050 carbon neutral strategy of the republic of Korea", Ministry of Economy and Finance, 2020. Retrieved from <https://www.korea.kr/archive%20expDocView.do?docId=39241>.
2. 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>.
3. International Organization for Standardization (ISO), "ISO 19880-3:2018. Gaseous hydrogen - Fuelling stations - Part 3: Valves", ISO, 2018. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/64754.html>.
4. 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>.
5. J. Ye, J. Cui, Z. Hua, J. Xie, W. Peng, and W. Wang, "Study on the high-pressure hydrogen gas flow characteristics of the needle valve with different spool shapes", International Journal of Hydrogen Energy, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.073>.
6. ANSYS, "ANSYS fluent theory guide (Release 15.0)", ANSYS Inc. and SAE IP Inc., 2013. Retrieved from <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>.
7. H. K. Versteeg and W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method(2nd ed.)", Pearson Education Ltd., England, 2007. Retrieved from http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM702/Versteeg_Malalasekera_2ed.pdf.
8. E. Brazda, "ISA75.02, Control Valve Capacity Test Procedures", International Society of Automation (ISA), 2008. Retrieved from <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa75-02>.
9. ISO, "ISO 19880-1:2020. Gaseous hydrogen - Fuelling stations - Part 1: General requirements", ISO, 2020. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/71940.html>.
10. SAE International, "Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles. J2601_202005", SAE International, 2020. Retrieved from https://www.sae.org/standards/content/j2601_202005/.