Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 5, 2025, pp. 486~493
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.486

JHNE
pISSN 1738-7264 · eISSN 2288-7407

# Equal-Percentage 유량 타입의 고압 수소 밸브의 유동 특성에 대한 수치해석적 연구

권준영[1] · 석승훈[1] · 최정주[2†] · 허태규[3]

[1]동아대학교 고기능성밸브 기술지원센터, [2]동아대학교 기계공학과, [3]Mt.H콘트롤밸브 주식회사

# A Numerical Study on the Flow Characteristics of High Pressure Hydrogen Valves with Equal-Percentage Flow Type

JUNYEONG KWON[1], SEUNGHUN SUK[1], JEONGJU CHOI[2†], TAEGYU HEO[3]

[1]Technical Center for High-Performance Valve, Dong-A University, 37 Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea
[2]Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, 37 Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea
[3]Mt.H Control Valves Corporation 296 Noksansaneopjung-ro, Gangseo-gu, Busan 46754, Korea

[†]Corresponding author :
jchoi72@dau.ac.kr

Received 15 September, 2025
Revised 23 September, 2025
Accepted 30 September, 2025

**Abstract >>** This study analyzed the flow characteristics of cartridge-type high-pressure hydrogen valves with Equal-Percentage (EQ%) flow characteristic through experiments and CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis in accordance with the KS B 2101 standard. The flow coefficient (Cv) for each valve opening was measured using water as an incompressible fluid, and the CFD results showed strong agreement with the experimental values. Under hydrogen gas conditions, the EQ% flow curve was also consistently reproduced, confirming that water-based experiments and analysis can be reliably applied to the design and evaluation of hydrogen valves in high-pressure environments.

**Key words :** Equal-Percentage(등비율), Hydrogen(수소), (Needle Valve(니들밸브), Hydrogen valve(수소 밸브), Numerical analysis(수치해석), Flow coefficient (유량계수)

## 1. 서 론

전 세계는 온실가스 감축 노력과 2030년까지 강화된 탄소배출 제한 목표로 인해, 에너지 시스템의 탄소집약도를 빠르게 낮추기 위한 에너지 전환 전략이 절실히 요구되고 있다. 이러한 맥락에서 전력, 모빌리티, 플랜트 부문에서의 탈탄소화를 가속하기 위한 핵심 해법으로 수소에너지가 주목받고 있다. 수소는 사용 과정에서 탄소를 배출하지 않으며, 저장・운송・전환의 유연성을 통해 재생에너지의 간헐성을 보완하는 장점이 있다. 이로 인해 수소 생산(그린・블루), 액화 및 압축 저장, 장거리 수송, 충전 인프라, 연료전지 발전 및 모빌리티 등 전 밸류 체인에서 수소 시스템의 설계와 운영 수요가 급격히 증가하고 있다.

수소 시스템 확산은 필연적으로 유체 제어 장치의 성능 요구를 높이며, 그중에서도 밸브는 저장 탱크,

배관, 정압기, 충전 디스펜서에 이르는 모든 단계에서 유체의 제어와 차단 시스템 안전 확보의 핵심 역할을 담당한다. 특히 고압 수소 환경은 낮은 분자량과 점도, 매우 높은 확산계수로 인해 누설 위험이 크고, 압축성 및 초킹(sonic choking) 문제가 빈번히 발생한다. 여기에 온도·압력의 급격한 변동이 결합하면 과도응답이 커져, 실제 밸브의 유량 곡선과 설치 특성(installed characteristic)을 단순 이론만으로는 정확히 예측하기 어려우므로 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석을 기반으로 한 밸브 설계 기법들이 제안되었다. Nam[1]은 수소충전소용 유량제어 밸브의 설계를 위해 CFD 기법을 이용하여 차압 변화에 따른 질량 유량과 체적 유량의 차이를 규명하여 설계 반영될 수 있도록 제안하였다. 또한, 고압의 수소 시스템에서 밸브의 특성과 설치 조건을 정밀하게 이해하고 이를 설계에 반영하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해 Jang[2]은 고압 수소 차단 밸브의 내부 형상 변화가 유동 특성에 미치는 영향을 CFD 해석으로 분석하여 밸브 설계 시 내부 유로 최적화 방안을 제시하였고, Kim[3]은 고압 수소 밸브의 시동(opening) 과정에서 발생하는 과도 유동 특성을 분석하여 공급 압력에 따라 밸브 개방/폐쇄 시점과 초음속 유동, 충격파 등을 밸브 설계에 고려할 수 있는 방안을 제안하였다.

본 논문에서는 EQ% 특성을 갖는 카트리지형 고압 수소 밸브의 유량을 고려한 설계 방안을 제시하였다. 카트리지형 고압 수소 밸브는 밸브 개도(밸브가 열린 정도)가 증가할수록 유량이 지수함수적으로 증가하며, 이는 유량 변화 직전 유량의 특정 비율에 비례하여 유량이 변하는 등비율 특성을 가진다. 카트리지형 고압 수소 밸브를 액체 기반의 실험을 통해 도출한 Cv 값을 기반으로 기체 조건에서의 성능 보정 기준에 대해 제안하고자 한다.

밸브의 경우 국제적 규격에서도 물을 표준 시험 유체로 삼아 유량계수(Cv, Kv)를 평가하고 이를 기체 특성으로 환산하지만, 수소 고유의 물성과 EQ% 특유의 트림 구조로 인하여 실제 제품의 유량 특성에 미치는 영향은 추가적인 해석과 실험적 검증이 요구된다.

본 논문은 카트리지형 고압 수소 밸브의 EQ% 유동 특성을 확인하기 위해 먼저 물을 시험 유체로 한 실험적 Cv 측정과 CFD 해석을 통해 도출한 Cv와 미세 유로 손실, 개도-유량 곡선을 상호 검증하였다.

동일 형상, 동일 개도 조건에서 수소 기체로 해석을 확대하여 실제기체 모델과 압축성, 초킹 현상까지 반영함으로써 제품의 유동 특성을 확인하고, 실험-해석-기체 특성 간 신뢰성 있는 사상(mapping) 기준을 제안하였다. 이 과정에서 난류 모델 선정, 격자 독립성, 경계 조건 구현 등 표준화된 해석 프로세스를 적용하여, EQ% 특성을 가진 카트리지형 고압 수소 밸브 설계 예측성과 실증절차의 효율을 크게 높이고자 하였다.

## 2. 유량계수 측정 실험

### 2.1 시험장치 구성

EQ% 특성을 가진 카트리지형 고압 수소 밸브 유량계수 측정을 위한 시험장치는 KS B 2101[4] 규격에 기반으로 제작된 Fig. 1의 시험장치에 Fig. 2와 같이 시료를 설치하여 실험을 진행하였다.

고압 수소 밸브 유량계수를 측정하기 위한 시험 유체 물을 원활하게 공급하기 위하여 40t의 물을 저장할 수 있는 물탱크와 폐회로 시험 유체를 순환하는 구조로 장치를 구성하였다.

유량계수를 측정을 위해 KS B 2101 규격에 요구하는 위치에 각종 센서를 설치할 수 있도록 지그를

Fig. 1. Experimental device for Cv measurement

Fig. 2. Valve installation and device configuration

제작하고, 입구측 2D(D는 밸브 입구의 직경), 출구측 6D 이격된 위치에 압력계를 설치하고, 입구측 20D 이격된 위치에 유량계를 설치, 입구측과 출구측의 차압을 측정하여 유량계수 값을 측정할 수 있도록 구성하였다.

### 2.2 시험 결과

시험 장비를 통해 EQ% 특성을 가진 카트리지형 고압 수소 밸브 차압과 유량 값을 아래의 식 (1)과 같이 비압축성 유체의 유량계수 구하는 계산식[5]을 사용하였다.

$$Cv = Q\sqrt{\frac{G}{\Delta P}} \tag{1}$$

유량계수 값은 카트리지형 고압 수소 밸브의 Open Position 0~100% 사이의 구간 중 25%, 50%, 75% 100% 총 4구간을 측정하여 유량계수 값을 도출하였으며, 시험 결과 값은 아래 Table 1과 같이 정리하였다.

Table 1. Flow coefficient for incompressible fluid Water

| Open Position | Inlet Pressure (kPa) | Outlet Pressure (MPa) | Flow (m3/h) | Cv |
|---|---|---|---|---|
| 25% | 92 | 18 | 0.009 | 0.01 |
| 50% | 92 | 18 | 0.019 | 0.03 |
| 75% | 93 | 18 | 0.064 | 0.09 |
| 100% | 93 | 19 | 0.184 | 0.25 |

## 3. EQ% 특성 밸브 수치해석

### 3.1 적용 지배방정식

본 연구에서는 유한체적법(finite volume method) 기반인 ANSYS 2022 R2 (ANSYS, Canonsburg, PA, USA)를 활용하였으며 유동 해석에서 지배방정식은 연속방정식(Continuity), 운동량방정식(Navier–Stokes), 그리고 에너지방정식[6]으로 구성된다. 그러나 해석 대상이 비압축성 유체인지, 압축성 유체인지에 따라 적용되는 수식의 형태와 고려해야 할 물리적 요소가 달라진다. 이번 해석에서는 물을 대표적인 비압축성 유체로, 수소 가스를 압축성 유체로 설정하여 각각의 지배방정식을 비교하며, 다음과 같이 적용하였다.

첫 번째 연속방정식(Continuity Equation)은 비압축성 유체의 경우, 밀도 $\rho$를 일정한 값으로 간주할 수 있으므로 연속방정식은 다음과 같이 단순화된다.

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{2}$$

이는 속도장의 발산이 0임을 의미하며, 유체가 압축되지 않는 한 체적 유량의 보존이 항상 성립함을 나타낸다.

반면, 압축성 유체에서는 밀도가 시간 및 공간에 따라 변하므로 일반적인 보존식 형태를 유지해야 한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{3}$$

따라서 고속 유동이나 고압 조건에서 가스 해석 시, 밀도의 시간적·공간적 변화를 반드시 고려해야 한다.

또한 운동량 방정식(Momentum Equation)은 뉴턴 유체 가정 하에 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \tag{4}$$

여기서 $\tau$는 점성 응력 텐서를 의미한다. 비압축성 유체의 경우 밀도 $\rho$가 일정하므로 수식 전개가 단순화되며, 압축성 유체에서는 밀도 변화가 지배적으로 작용하여 속도, 압력, 밀도의 상호 의존성을 반드시 고려해야 한다[7].

에너지 방정식(Energy Equation) 경우에는 비압축성 유체 해석에서 일반적으로 열전달 현상이 주요 관심 대상일 때만 에너지 방정식을 고려한다. 등온 조건에서는 생략할 수 있다.

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u \bullet \nabla T\right)=k\nabla^2 T \tag{5}$$

반면, 압축성 유체 해석에서는 압력 변화와 체적 변화가 온도와 직접적으로 연결되므로 에너지 방정식이 필수적으로 포함된다. 특히 이상기체상태방정식($p=\rho RT$)과 연계하여 해석한다.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\nabla \bullet (v(\rho E+p)) = \nabla \bullet (kNABLAT+(\tau \bullet v)) \tag{6}$$

여기서 $E$는 단위 질량당 총에너지로, 내부에너지와 운동에너지를 포함한다. 따라서, 본 연구에서 수행한 밸브 유동 해석에서는 물을 이용한 비압축성 조건의 CFD 해석을 통해 구조적 유동 특성과 손실계수를 평가하고, 이를 압축성 수소 가스 해석 결과와 비교하여 상관성을 도출하였다.

### 3.2 밸브 형상 및 격자

유동 해석을 위해 카트리지형 고압 수소 밸브의 3D 모델링을 Fig. 3과 같이 형상을 제작하였다.

카트리지형 고압 수소 밸브의 입구와 출구측 직경은 2.8 mm이며, DISC 초기 리프트는 Full Open 상태로 형성하고, 유체가 통과할 때 직접적으로 접촉되지 않는 부품은 제외하고 Fig. 4와 같이 유동장을 형성하였다.

밸브의 격자는 fluent meshing의 polyhedral mesh를 사용하여 Fig 5와 같이 생성하였으며 mesh node 수는 10,789,287개이다. 또한 벽면에서의 속도 분포를 정밀하게 모사하기 위해 prism 격자를 생성하였으며 난류 모델은 SST k – omega를 사용하였다[8]. 자세한 경계조건 및 격자 정보는 Table 2에 나타내었다.

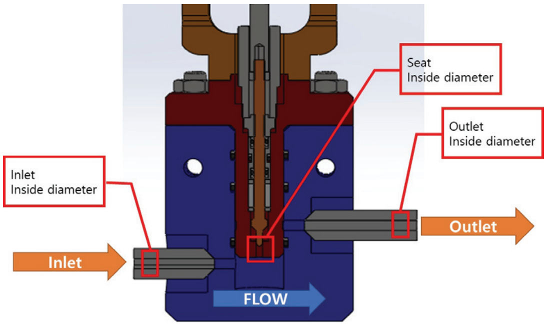


**Fig. 3.** Needle valve 3D model

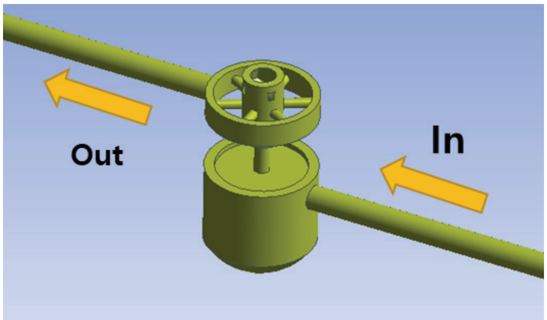


**Fig. 4.** Needle valve CFD model with EQ% characteristics

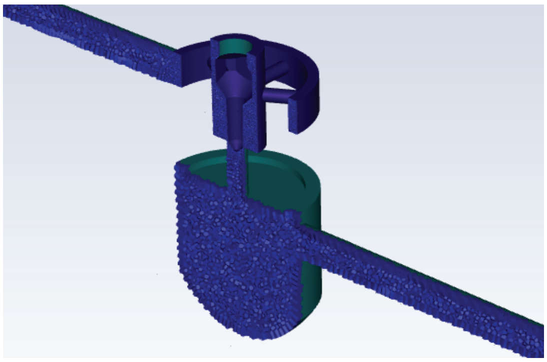

**Fig. 5.** Computational grid for numerical analysis

Table 2. Boundary conditions and mesh information

| Type of Fluid | Hydrogen Gas |
|---|---|
| Boundary Condition | Inlet Pressure : 74 kPa |
| | Outlet Pressure : 0 kPa |
| | Temperature : 300 K |
| Turbulent Model | SST k - omega |
| Mesh Information | |
| Mesh Nodes | 10,789,287 |
| Mesh elements | 3,917,906 |
| Type | Polyhedra |

### 3.3 경계조건 및 변수

비압축성 유체 물을 기준으로 유량계수 측정 시험 조건은 DISC를 Full Open (100%) 상태이고, 차압이 74 kPa 일 때 Cv 값을 확인 하였으며, DISC 높이를 조절하여 25%, 50%, 75%, 100% 총 4구간 유량계수 값을 확인하였으며, EQ% 특성을 가진 카트리지형 고압 수소 밸브 유량계수 그래프를 확인하였다.

유동 해석에서는 시험 결과와 동일하게 비압축성 유체인 물로 차압을 74 kPa 일 때 DISC 높이를 조절하여 동일하게 4구간에서의 유량계수 값을 확인하였다.

유동 해석 결과 값이 시험 결과와 유사한 그래프를 그리면 유체를 압축성 유체인 수소로 변경하여 동일하게 4구간에서 유량계수을 확인하였다. 다만 압축성 유체의 경우 밀도 및 압력 변화가 유동 특성에 큰 영향을 미치므로, 단순한 식 (1)만으로는 정확한 유량계수를 알기 어려우며, 따라서, ANSI/ISA-75.01.01[9] 표준에서는 압축성 유체에 대한 환산식을 제시하고 있고, 이를 바탕으로 한 유량계수 산정식은 다음과 같다.

$$Cv = \frac{Q}{7320 F_P P_1 Y}\sqrt{\frac{M_W T Z}{F_k x_T}} \tag{7}$$

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.

또한 $x_T$는 이론적 압력저하비를 나타내고 Y는 팽창계수(expansion factor)를 나타낸다.

팽창계수 Y는 다음과 같이 정의된다.

$$Y = 1 - \frac{x}{3(F_k x_T)} \tag{8}$$

수식 (8)에서 $F_k$는 비열비 계수[10]로, 시험 유체의 비열비를 공기의 비열비($k = 1.4$)로 나눈 값으로 계산된다. $x_T$는 압력차 비율 계수를 나타내고 $x$는 입구측 절대압력에 대한 차압비를 나타낸다. 이러한 식을 이용하여 수소 가스의 유량계수값을 구하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 압력 및 속도 분포

EQ% 특성을 가진 카트리지형 고압 수소 밸브의 차압이 74 kPa 일 때 밸브 DISC Open Position 4구간에서 수치해석을 실시하였고, Open Position 별 압력 분포와 관련하여 Fig. 6과 Fig. 7처럼 나타내었고, 속도 분포는 Fig. 8과 Fig. 9로 나타내었다.

시험과 동일하게 KS B 2101 기준에 따라 유량계수 값을 구하기 위하여 입구측 압력을 74 kPa, 출구측 압력을 0 kPa로, 유동장 내부에 물을 흘렸을 때 Open Position에 따른 압력 변화는 Fig. 6과 같이 100%에서 입구측 2D 지점은 약 73,610 Pa 의 압력이, DISC를 통과한 출구측 6D 지점의 압력은 약 –11,950 Pa로 확인되었다.

동일한 수치해석 방법으로 유동장 내부에 흐르는 유체를 수소 가스로 변경하였을 때 밸브 Open Position에 따른 압력 변화는 Fig. 7과 같이 100%에서 입구측 2D 지점은 약 74,020 Pa 의 압력이, DISC를 통과한 출구측 6D 지점의 압력은 약 5,124 Pa로 확인되었다. 또한 Fig. 8과 Fig. 9는 Open Position에 따른 유체의 유속을 확인한 것으로 100%에서 11.33 m/s로 밸브의 몸통 구조상 내부 디스크와 시트 공간이 협소하여 그 구간에서 최대 유속이 발생하는 것을 알 수 있었으며, Fig. 9와 같이 유체를 수소 가스 변경 하였을 때도 같은 구간에서 1010 m/s로 최대 유

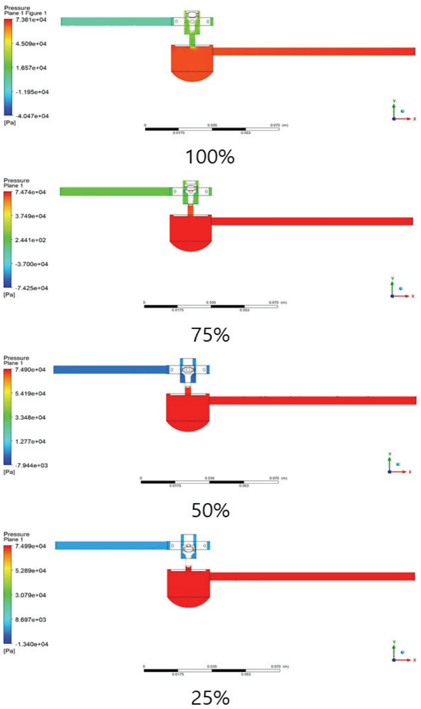


Fig. 6. Pressure distribution on vertical cross section (Valve opening ratio 25% / 50% / 75% / 100%)

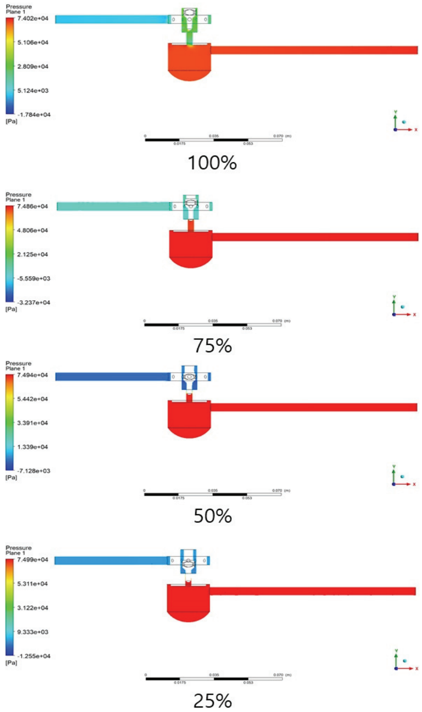


Fig. 7. Pressure distribution on vertical cross section (Valve opening ratio 25% / 50% / 75% / 100%)

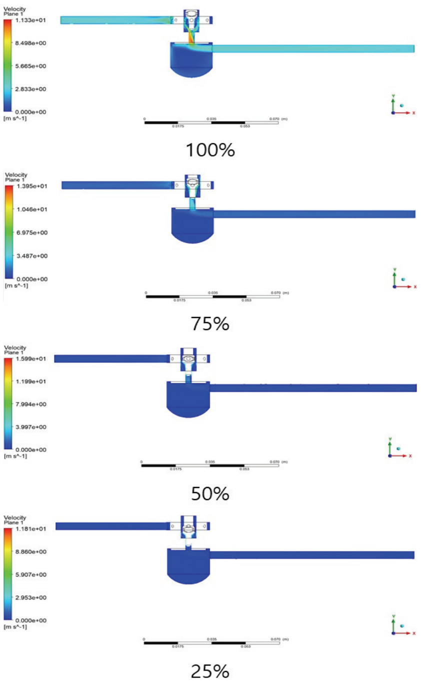


Fig. 8. Flow velocity distribution on vertical cross section (Valve opening ratio 25% / 50% / 75% / 100%)

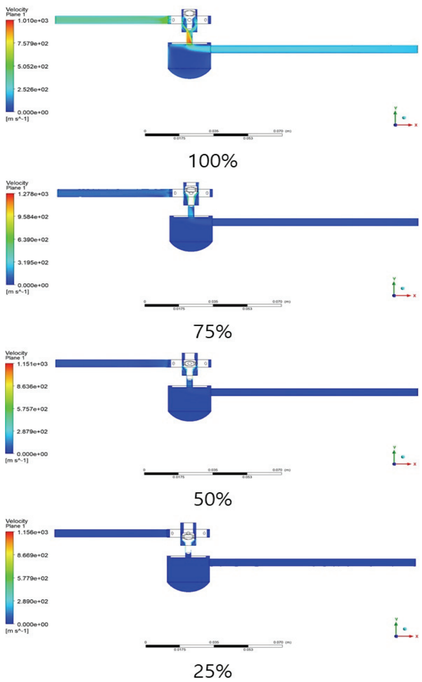


Fig. 9. Flow velocity distribution on vertical cross section (Valve opening ratio 25% / 50% / 75% / 100%)

속이 발생하였다.

동일한 방법으로 유체가 물이고, 동일한 Open Position 4구간에서의 압력, 속도와 유체가 수소 가스이고, 동일한 Open Position 4구간에서의 압력, 속도를 확인하였다.

### 4.2 유량계수

Fig. 10은 KS B 2101을 기준으로 시험하여 도출한 유량계수 값과 수치해석을 통해 유체가 물, 수소 가스 일때의 유량계수 값을 그래프로 표현한 것으로 x축은 Open Position의 각 구간을, y축은 값을 나타내며 유체가 물 일때는 시험과 수치해석 결과가 유사한 것을 확인하였으며, 유체가 수소 가스 일 때 유량계수 값은 다르나 유량계수 곡선은 경향이 같은 것을 확인하였다. 이는 압축성 유체와 비압축성 유체의 차이에 따른 것으로 판단된다.

Table 3은 EQ% 특성을 가진 니들 밸브의 Open Position이 25% 50%, 75%, 100% 일 때 물로 시험한 데이터와 물 및 수소 가스로 수치해석 결과 데이터를 나타내는 것이다.

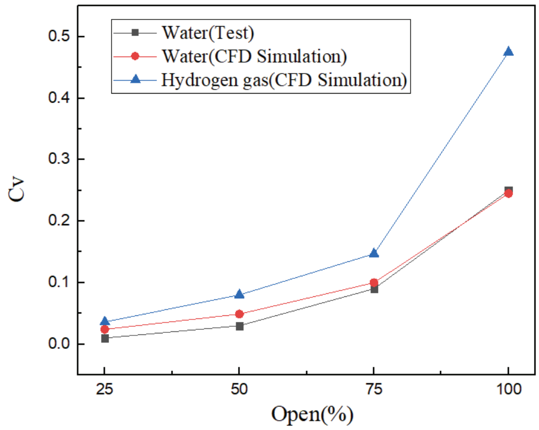


Fig. 10. Validation of CFD Cv with water experiment Cv data and extension to hydrogen

Table 3. Comparison table of test and interpretation results

| Valve Opening ratio | Test results (Water) | Interpretation results (Water) | Interpretation results (Gas) |
|---|---|---|---|
| 25% | 0.01 | 0.024 | 0.036 |
| 50% | 0.03 | 0.049 | 0.08 |
| 75% | 0.09 | 0.1 | 0.147 |
| 100% | 0.25 | 0.245 | 0.475 |

## 5. 결 론

본 연구에서는 EQ% 특성을 가진 카트리지형 고압 수소 밸브의 유량계수를 KS B 2101 규격 기반 시험장치로 비압축성 유체인 물을 이용한 실험을 수행하였으며, 동일 조건에서 CFD 해석을 통해 비압축성 물과, 압축성 유체 수소 가스의 유량 특성을 비교하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

1) 비압축성 유체인 물을 이용한 유량계수 측정 결과, 밸브 Open Position ratio (25%, 50%, 75%, 100%)에 따라 유량계수 값이 안정적으로 산출되었으며, 밸브의 EQ% 특성이 명확히 확인되었다.

2) CFD(물) 해석 결과는 실험값과 매우 유사한 경향을 보였으며, 다항식 피팅 결과 결정계수($R^2$)가 0.992로 나타나 해석 모델이 실제 시험 조건을 정밀하게 모사할 수 있음을 입증하였다.

3) 압축성 유체인 수소에 대한 CFD 해석을 수행한 결과, 물 해석과 유사한 개도율–유량계수 특성을 보였으나, 압력과 밀도의 변화로 인해 일부 차이가 발생하였다. 수소 CFD 결과 또한 피팅 시 결정계수 ($R^2$ = 0.976)를 확보하여, 밸브 개도 특성을 높은 정확도로 근사할 수 있음을 확인하였다.

4) 비압축성(물)과 압축성(수소) 해석 결과를 동일한 함수 형태로 피팅할 수 있었으며, 두 경우 모두 결정계수 값이 0.97 이상으로 도출되었다. 이는 물을 이용한 시험 및 해석 결과가 압축성 유체 해석의 경향을 충분히 대표할 수 있음을 정량적으로 입증한 것이다. 따라서 본 연구는 고압 수소 밸브와 같이 실제 시험이 까다로운 조건에서 물을 이용한 실험만으로 밸브의 유동 특성(EQ%)에 대한 경향을 확인할 수 있다는 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## References

1. C. Nam, R. Kim, and 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.
2. S. Jang, S. Oh, Y. Kim, and H. Suh, “Analysis of flow characteristics of high-pressure hydrogen gas with changes in the internal shape of hydrogen shut-off valve”, Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 33, No. 2, 2025, pp. 147-156, doi: https://doi.org/10.7467/KSAE.2025.33.2.147.
3. S. Kim, J. Kim, Y. Cho, S. Yang, and M. Shin, “A numerical study on the opening characteristics of high pressure hydrogen valves”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 689-697, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.689.
4. KS B 2101, “Test procedures for flow coefficient valves”, Korean Standards Association, 2020, Retrieved from https://www.standard.go.kr.
5. P. L. Skousen, “Valve Handbook”, 3rd ed., McGraw-Hill, USA, 2011.
6. ANSYS, “2020 ANSYS FLUENT solver theory”, 2020, Retrieved from https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Viwes/Secured/corp/v201/en/flu_th/flu_thhtml?q=ansys%20fluent%20guide.
7. F. M. White, “Fluid Mechanics”, 9th ed., McGraw-Hill, USA, 2021.
8. F. R. Menter, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”, AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, 1994, pp. 1598-1605, doi: https://doi.org/10.2514/3.12149.
9. ANSI/ISA-S75.02.01, “Control valve capacity test procedures”, International Society of Automation, 2008, Retrieved from https://www.isa.org.
10. IEC 60534-2-1:2011, “Industrial-process control valves – Part 2-1: flow capacity – sizing equations for fluid flow under installed conditions”, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2011, Retrieved from https://www.iec.ch.