

100 MPa급 수소충전소용 니들 밸브의 국산화 개발 및 성능평가

Performance Evaluation of Needle Valves for 100MPa Hydrogen Charging Station

박재현* · 임영훈** · 유동인*** · 이연원*** †

Jae-Hyeon Park*, Young-Hun Lim**, Dong-In Yu*** and Yeon-Won Lee*** †

(Received 05 June 2025, Revised 27 June 2025, Accepted 27 June 2025)

초록 : 니들 밸브는 적은 유량 내에서도 섬세한 유량 조절이 가능하여 수소의 안정적 공급과 제어에 유리한 밸브이다. 그리고 스템은 니들 밸브의 주요 부품으로 형상에 따라 니들 밸브의 유량제어 능력이 달라진다. 본 연구에서는 니들 밸브의 스템 형상 변화에 따른 유량계수와 유동특성을 KS B 2101에 따라 수치 해석하여 도출하였다. 또한 60 g/s의 수소질량유량 하에서 밸브 양단의 차압을 통해 스템 형상에 따른 밸브의 부하를 예측하였다. 여기서 스템의 길이(L, length)과 폭(W, width)로 표기하여 그 결과 L10W12 모델이 유량계수가 0.789~1.410으로 중간 열림도에서 가장 높은 유량계수를 가져 가장 우수한 모델로 선정되었다. 수소 질량유량 60 g/s 하에서 L8W12의 차압은 최대 145.7 kPa 그리고 L10W12는 최대 122.5 kPa로 계산되었다. 이는 L10W12 모델이 유체가 밸브를 통과하기 위하여 더 적은 에너지가 필요로 하다는 의미로 더 우수한 스템 형상임을 뒷받침한다.

키워드 : 니들 밸브, 수소충전소, 전산유체역학, 유량계수

Abstract : The needle valve is advantageous for stable supply and control of hydrogen as it can finely adjust the flow rate even within a small flow rate. And the stem is a main component of the needle valve, and the flow control ability of the needle valve varies depending on the shape. In this study, the flow coefficient and flow characteristics according to the change in the shape of the needle valve's stem were discovered by numerical analysis followed KS B 2101. Also, the load of the valve according to the shape of the stem was predicted through the pressure difference at both ends of the valve under the hydrogen mass flow rate of 60 g/s. Here, the length and width of the stem are expressed in terms of length (L, length) and width (W, width) As a result, the L10W12 model has the highest flow coefficient in the medium opening degrees with a flow coefficient 0.789 to 1.410 and was selected as the best model. Under the hydrogen mass flow rate of 60 g/s, the pressure difference of L8W12 was calculated to be up to 145.7 kPa and L10W12 to be up to 122.5 kPa. The lower pressure difference means L10W12 model requires less energy for fluid transport than L8W12.

Key Words : Needle Valve, Hydrogen Charging Station, Computational Fluid Dynamics, Flow Coefficient

*** † 이연원(<https://orcid.org/0000-0002-3749-8119>): 교수, 국립
부경대학교 기계공학부

E-mail : ywlee@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6162

*박재현(<https://orcid.org/0009-0002-8590-2718>) : 대학원생, 광주
과학기술원 기계로봇공학과

**임영훈(<https://orcid.org/0009-0007-6348-0469>) : 교수, 한국
폴리텍대학 부산캠퍼스 전기자동차과

***유동인(<http://orcid.org/0000-0002-6863-9658>) : 교수, 국립
부경대학교 기계공학부

*** † Yeon-Won Lee(<https://orcid.org/0000-0002-3749-8119>) :
Professor, School of Mechanical Engineering, Pukyong National
University, Busan.

E-mail : ywlee@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6162

*Jae-Hyeon Park(<https://orcid.org/0009-0002-8590-2718>) : Graduate
student, Department of Mechanical and Robotics Engineering,
Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju.

**Young-Hun Lim(<https://orcid.org/0009-0007-6348-0469>) : Professor,
Electric Vehicle Department, Korea Polytechnics University, Busan.

***Dong-In Yu(<http://orcid.org/0000-0002-6863-9658>) : Professor,
School of Mechanical Engineering, Pukyong National University,
Busan.

— 기 호 설 명 —

T	: 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
R	: 기체상수
p	: 압력 [Pa]
v	: 비체적 [m^3/kg]
SG	: 비중

그리스 문자

μ	: 점성계수 [$\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$]
κ	: 난류 운동에너지 [m^2/s^2]
ϵ	: 난류 운동에너지 소산율 [m^2/s^3]
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
Δp	: 밸브 전·후단부에서의 압력차 [Pa]

상첨자

Q'	: 체적 유량 [$\text{gal}/\text{min}, \text{US}$]
u'_i	: 변동속도 [m/s]

하첨자

C_v	: 유량 계수
P_c	: 임계압력 [Pa]
S_{ij}	: 변형율 [$1/\text{s}$]
T_c	: 임계온도 [$^{\circ}\text{C}$]
U_i	: 평균속도 [m/s]
x_i	: 데카르트 좌표계 [m]
μ_t	: 난류점성계수 [$\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$]

1. 서 론

최근 친환경 에너지에 대한 요구가 증가하면서 탄소 경제를 대체하는 수소 경제로의 에너지 패러다임의 전환이 이루어지고 있다. 특히 수소 차량의 경우, 이미 초기 시장이 열린 상태이며 수소 전기차의 보급 확대를 위하여 인프라 구축의 일

환으로 수소충전소의 확충이 필요하다. 이러한 상황에서 수소의 안정적인 유량 전달과 제어에 필요로 한 부품개발이 시급하다. 그중 니들 밸브는 작은 유량 내에서도 섬세한 유량 조절이 가능하다는 점에서 수소충전소의 유량 조절 밸브로 채택되고 있다. 국내 수소충전소에 사용되는 초고압 밸브는 모두 외산 제품이기에 국산화를 위한 노력이 지속적으로 증가하고 있다. 특히, 유량 조절에 핵심 부품인 스템에 대한 설계와 성능평가 그리고 유동 특성의 파악이 절대적으로 필요하다.

밸브의 유량제어 능력은 유량계수(flow coefficient)로 평가된다. 유량계수는 밸브 양단에 일정한 차압이 주어졌을 때 흐르는 유체의 체적 유량을 통해 추산되는 값이다. 국내에서는 한국산업 표준 KS B 21011)의 “밸브 용량 계수 시험방법”에 따라 74 kPa의 차압 내에서 흐르는 20 $^{\circ}\text{C}$ 청수(清水)의 체적 유량을 통해 유량계수를 산출한다. 실제 실험을 통해 유량계수를 산출할 수도 있지만, 전산유체역학(CFD; computational fluid dynamics)의 발전과 함께 수치해석 모델을 통해 유량계수를 도출하는 사례도 증가하고 있으며, 이는 유량계수뿐만 아니라 밸브 내의 유동 특성을 파악할 수 있는 장점이 있다. 예시로 Kim and Lee(2016)²⁾는 전산유체역학을 활용하여 원전용 밸브의 유량계수 산출에 관한 연구를 진행하였다. Ko, Kang and Han(2022)³⁾의 경우, 전산유체역학을 이용하여 볼(ball) 밸브의 개 폐도에 따른 유량계수와 내부의 유동 특성을 파악하여 유량제어 성능을 시험하였다. 그리고 Nam, Kim and Kim(2021)⁴⁾은 유량제어 밸브의 차압에 의한 유동 특성을 수치 해석적 연구를 통해 파악하여 개 폐도에 따른 유량, 온도변화 등을 통해 유량계수와 유량 비를 도출하였다.

이에 따라 본 연구에서는 니들 밸브의 스템 형상 변화에 따른 유량계수와 유동 특성 변화를 KS B 2101에 따라 수치해석을 통해 파악하였으며 가장 적합한 스템 형상을 선정하였다. 그리고 현재의 밸브의 성능평가를 위한 국내의 기준은 실험 유체가 물로 한정되어 있어 한계가 있다. 이에 따라, 실제 수소충전소의 환경에 부합하도록 상용

자동차를 대상으로 한 수소 충전 프로토콜을 규정한 SAE J 2601⁵⁾에 맞춰 최대 수소 질량유량 60 g/s 하의 밸브 양단에서 발생하는 차압을 조사하여 스템 형상에 따른 밸브의 부하를 추산하였다.

2. 해석 모델

2.1 해석 모델

해석 모델의 경우, 한국산업 표준에서 제시한 밸브의 용량 계수 시험방법(KS B 2101)에 따라 생성하였다. KS B 2101에 따르면 20℃의 청구를 이용하여 진행하며 밸브 양단에서 일정 압력 차(74 kPa) 하에서의 체적 유량을 통해 유량계수를 식 (1)과 같이 산출한다. 실험 대상의 니들 밸브가 수소충전소에서 사용된다는 점에서 SAE J 2601에 따라 최대 수소 질량유량의 60 g/s에서 니들 밸브 양단에서의 압력 차를 통해 밸브가 가지는 부하를 예상하고 유동 특성을 파악하였다.

$$C_v = Q' \sqrt{\frac{SG}{\Delta P}} \quad (1)$$

KS B 2101에 따르면, Fig. 1과 같이 밸브 전단 부분의 압력 측정 부분은 밸브로부터 파이프 지름의 2배 그리고 후단 압력 측정 부분은 6배만큼 떨어져 있다.

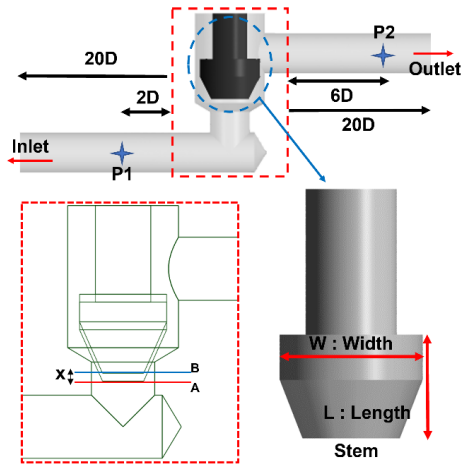


Fig. 1 Numerical analysis model for Needle valve followed KS B 2101

Table 1 Model case definition named by length and width of stem shape in Fig. 1

Case Name	L8 W11	L8 W11P5	L8 W12	L8 W12P5	L8 W12P7
Length/Width	8mm/11mm	8mm/11.5mm	8mm/12mm	8mm/12.5mm	8mm/12.7mm
Case Name	L10 W11	L10 W11P5	L10 W12	L10 W12P5	L10 W12P7
Length/Width	10mm/11mm	10mm/11.5mm	10mm/12mm	10mm/12.5mm	10mm/12.7mm
Case Name	L12 W11	L12 W11P5	L12 W12	L12 W12P5	L12 W12P7
Length/Width	12mm/11mm	12mm/11.5mm	12mm/12mm	12mm/12.5mm	12mm/12.7mm

입구와 출구 영역의 경우, 유동이 충분히 발달하여 해석에 영향을 미치지 않도록 해야 하며, 파이프 지름의 20배 떨어진 거리에 각각 위치시켰다. 스템 형상에 따른 유량계수와 유동특성 변화를 파악하기 위하여 Fig. 1 그리고 Table 1과 같이 스템의 길이(L, length)와 폭(W, width)을 조정하여 15개의 모델을 생성하였다. 밸브는 1~7회전까지 열림도가 증가하며, Fig. 1의 A가 밸브가 완전히 닫혀 있는 스템의 바닥면 위치라 할 때, 1회전마다 X는 1 mm씩 증가한다.

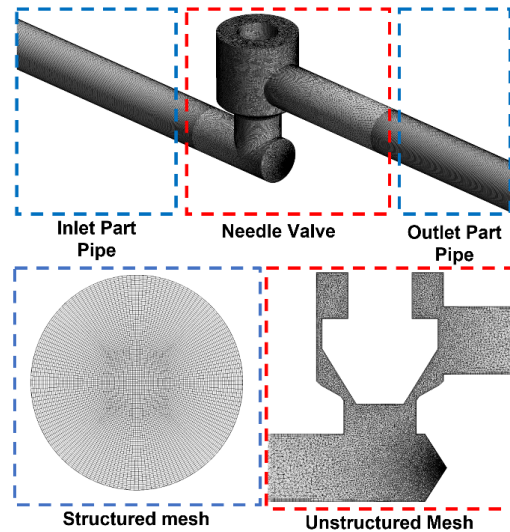


Fig. 2 Mesh shape for pipe (structured mesh) and needle valve (unstructured mesh)

2.2 격자 생성

격자는 Fig. 2와 같이 파이프 부분과 밸브 부분으로 나누어 생성하였다. 파이프의 경우에는 형상이 단순하여 O-grid의 정렬 격자를 생성하였으며 밸브 부분의 경우, 형상이 다소 복잡하여 비정렬 격자를 통해 생성하였다. Fig. 3은 1회전에서의 길이 8 mm, 10 mm 그리고 12 mm에 대한 폭 12 mm의 해석 모델에 대한 격자 단면을 나타낸 것이며, 격자의 개수는 모델 별로 다르나 격자의존성에 대한 충분한 사전검토를 거쳐 900~930만 개 정도이다.

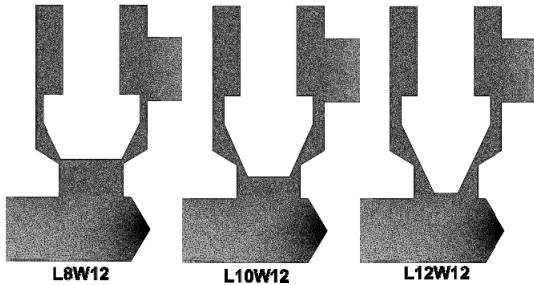


Fig. 3 Unstructured grid cross section for needle valve at 1 turn (L8W12 (left), L10W12 (middle) and L12W12 (right))

2.3 지배방정식 및 난류 모델

KS B 2101에 따른 해석의 경우, 대상 유체가 20℃의 청수라는 점에서 3차원, 비압축성, 정상상태의 난류 유동을 가정하였으며, 이에 따른 연속 방정식 및 운동량 방정식의 Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식은 식 (2)와 (3)과 같다. RANS 방정식은 운동량 보존방정식에 대해 속도 성분(u_i)을 시간 평균값(U_i)과 변동 성분(u'_i)로 분리하여 시간 평균화를 한 것이며, 이 과정에 있어 Reynolds 응력을 모델링하기 위해 난류 점성계수(μ_t , turbulent viscosity)를 이용하며 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = \quad (3)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho u'_i u'_j \right] - \rho u'_i u'_j = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

수소충전소 환경 하에서의 유동 해석의 경우, 니들 밸브 내부에서 급격한 압력 및 온도변화는 없을 것이기에 압축성을 고려하지 않는다. 하지만 고압 환경 하에서의 물성 변화를 고려하기 위하여 기체 모델을 추가한다. 이상기체방정식의 경우, 분자 간의 상호작용이 없는 가상의 이상기체 방정식이기에 실제기체 방정식으로 Peng-Robinson⁽⁶⁾ 방정식을 이용하며, 이는 기체의 온도와 부피에 대하여 식 (5)와 같은 압력 관계식을 제공한다.

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a(T)}{v^2 + 2bv - b^2} \quad (5)$$

$$a(T) = a_0 \left(1 + n \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right)^2$$

$$a_0 = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$n = 0.37464 + 1.54226\omega_a - 0.26993\omega_a^2$$

$$b = 0.0778 \frac{RT_c}{P_c}$$

난류 모델로는 RANS의 standard k- ϵ 모델을 적용하였다. standard k- ϵ 모델은 난류 점성계수(μ_t)를 결정하기 위하여 난류운동에너지(k)와 난류 운동에너지 소산율(ϵ)에 대하여 2개의 추가적인 수송 방정식이 개입된 난류 모델이다. k와 ϵ 에 대한 각각의 수송 방정식은 식 (6) 및 (7)과 같으며, 이를 통해 식 (8)과 같이 μ_t 를 모델링하여 RANS 방정식에 대한 닫힘 문제(closure problem)를 해결한다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \quad (6)$$

Table 2 Simulation setup for needle valve performance evaluation

Software	Ansys CFX 2022 R1	
Algorithm	Coupled	
Turbulence Model	RANS Standard k - ε	
Wall function	Scalable Wall Functions	
Fluid	1 atm 20℃ Water Liquid	
	100 MPa 25℃ Hydrogen Gas	
State Equation	Peng-Robinson	
Inlet	Water	Pressure Inlet ΔP = 74 kPa
	Hydrogen	Mass Flow Rate 60 g/s
Outlet	Pressure Outlet (=Reference Pressure)	
Wall	No Slip Condition	

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon U_i) = \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

여기서, 각 상수는

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.00, \sigma_\epsilon = 1.30$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44 \text{ 그리고 } C_{2\epsilon} = 1.92 \text{로 정한다.}^{7)}$$

본 해석을 위하여 상용 CFD 프로그램인 Ansys CFX 2022 R1을 이용하여 계산을 진행하였으며 상세한 시뮬레이션 설정은 Table 2와 같다.

3. 해석 결과

3.1 국산 시제품과 외산 품 유량계수 비교

Fig. 4는 수소충전소용 니들 밸브 국산 시제품

과 외산 품의 유동장을 나타낸 것이며, Fig. 5는 KS B 2101에 따라 모델링하여 국산 시제품과 외산 품의 열림도에 따른 유량계수를 비교한 것으로, 최대 유량계수가 국산 시제품의 경우, 1.328 그리고 외산 품은 1.282로 계산되었다.

최대 열림도에서 국산 시제품이 외산 품과 유사한 성능을 가졌으며, 유량계수가 지속적으로 증가한다는 점에서 유량 조절밸브에 적합한 모델이다. 하지만 1~3회전의 초기 열림도에 대해서는 외산 품에 비해 유량계수가 낮다는 한계점을 가지며 현장에서는 니들 밸브를 중간 열림 도의 3~5 회전에서 주로 이용한다는 점에서 유량계수가 급변하는 안정성의 문제를 가진다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 현재의 국산 시제품의 스템 형상을 변경하여 성능 개선을 개선하고자 하였다.

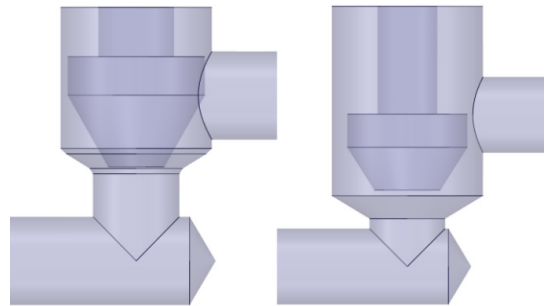


Fig. 4 Shape of Flow field in needle valve (Left: domestic prototype model and right: benchmark model)

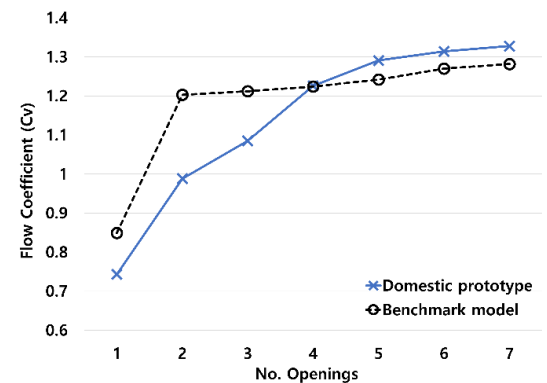


Fig. 5 Comparison of flow coefficients according to the openness

3.2 1회전에서의 유량계수 및 유동 특성

Fig. 6은 밸브가 완전히 닫혀 있는 상태에서 스템이 1 mm 상승한 1회전에서의 유량계수를 각 case 별로 나타낸 것이다. 전체 모델 중에서 1회전에서 가장 유량계수가 높은 모델은 L12W11로 1.04의 값을 가진다. 스템의 길이가 10 mm와 12 mm인 경우에 폭의 증가와 함께 유량계수가 급격히 감소하는 특징을 가진다. 길이가 8 mm인 경우에는 폭의 변화에 따라 유량계수의 변화가 미미하며 0.82~0.86 사이의 값을 가진다. 국내 시제품의 유량계수는 1회전에서 0.743으로, L10과 L12에 대하여 폭 12.5 mm 이상의 스템 모델은 초기 열림도에 대하여 기존의 모델보다 유량계수가 낮은 모델이다.

Fig. 7은 각 길이에 대하여 유량계수가 가장 높고 낮은 폭 형상에 대한 1회전에서의 유동을 streamline과 vector를 통해 가시화한 것이다.

유량계수가 가장 높은 폭 형상에 대하여 L8W11P5의 경우, 재순환 영역이 스템의 벽면에서 발생하였으며, L10W11과 L12W11 모델의 경우, 밸브 벽면 부분에서 발생하였다. 스템 벽면에서 재순환 영역이 발생하였을 때 밸브 벽면을 따라 유체가 이동하게 되며, 이는 유체가 출구 방향으로, 연속적으로 이동하지 못하게 한다. 이러한 이유로 L8 모델이 타 모델과 비교하면 스템의 크기가 작음에도 불구하고 큰 부하가 유체에 작용하여

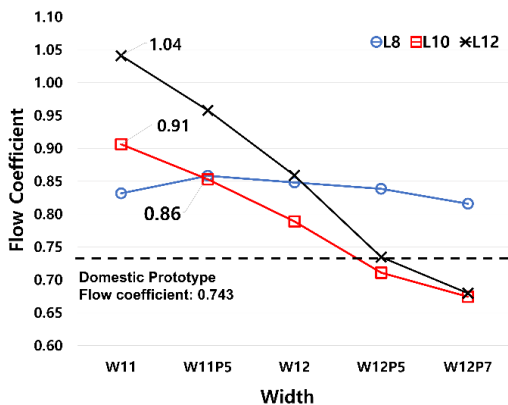


Fig. 6 Flow coefficients according to the stem shape in 1 turn

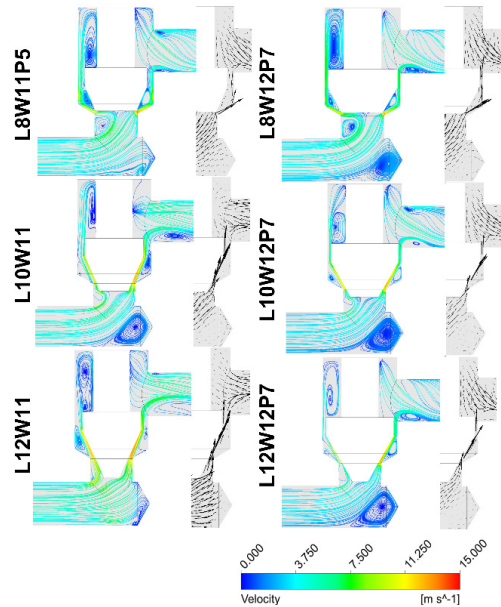


Fig. 7 2D streamline and vector in 1 turn of a needle valve at each stem length (Left: the highest flow coefficient model and Right: the lowest flow coefficient model)

유량계수가 낮게 나온 것이다. 밸브 벽면에서 재순환 영역이 발생하였다고 해서 반드시 유량계수가 높은 것은 아니다. L10과 L12의 경우, 폭의 증가와 함께 유로가 급격히 좁아지며 스템 상단에서의 흐름이 출구 방향의 유로를 막아 유량계수가 급격히 낮아진다. 이에 따라 L10과 L12, 폭 12.7 mm의 스템 모델이 재순환 영역이 밸브 벽면에서 발생하였음에도 유량계수가 낮게 계산되었다.

3.3 열림도에 따른 유량계수 및 유동 특성

총 7회전의 열림도 중에서 1회전의 결과만으로서 니들 밸브의 성능을 모두 파악할 수 없다. 따라서 L8, L10 그리고 L12에 대하여 1회전에서 가장 유량계수가 높은 폭의 모델을 선택하여 열림도에 따른 유량계수의 성능곡선을 파악하였다. 또한 각 길이에 대하여 폭 12 mm에 대한 모델을 추가하여 조사하였다. 따라서 열림도에 따른 유량계수 산출 모델은 L8W11P5, L8W12, L10W11, L10W12,

L12W12 그리고 L12W12 의 6개의 모델로 범위를 줄이도록 한다.

Fig. 8과 Table 3은 6개의 스템 모델의 열림도에 따른 유량계수를 나타낸 것이다. 초기 열림도(1~2 회전)에 대해서는 길이 L12의 모델이 높은 유량계수를 가졌으며, 타 모델의 경우, 유사한 유량계수의 값을 가졌다. 중간 열림도(3~5회전)에 대해서는 L10W12가 약 1.3의 값으로 가장 높은 유량계수의 값을 가졌다. 마지막으로 6~7회전의 열림도에 대해서는 L12W12 모델이 가장 높은 유량계수를 가졌으며, 약 1.4~1.5 범위의 유량계수를 가진다.

L8의 스템 모델의 경우, 국산 시제품과 비교할 때, 초기 열림도에 대해서는 국산 시제품보다 유량계수가 높았으나 4회전 이상의 열림도에 대해서는 유사하거나 더 낮은 유량계수를 가졌다. 따라서 길이 8 mm의 스템 형상은 적절하지 않은 모델이다. L10과 L12에 대해서는 공통으로 L8의 모델과 국내 시제품에 비해 유량계수가 높았으며, 초기 열림도와 완전히 개방된 열림도에 대해서는 L12W12의 유량계수가 높지만, 실제 현장에서 이들 밸브는 중간 열림도로 유지된 채 주로 사용되기에 중간 열림도에서 최대 유량계수를 보인 L10W12를 가장 우수한 이들 밸브의 스템 형상으로 정할 수 있다.

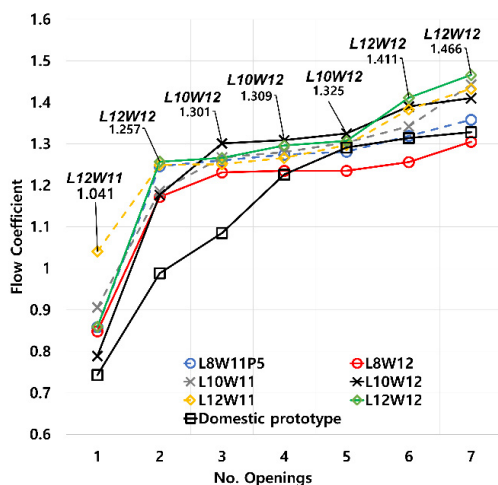


Fig. 8 Flow Coefficients according to the openness

Table 3 Flow coefficients according to the degree of openness in each stem shape

	L8 W11P5	L8 W12	L10 W11	L10 W12	L12 W11	L12 W12
1	0.858	0.848	0.906	0.789	1.041	0.859
2	1.246	1.172	1.186	1.177	1.249	1.257
3	1.260	1.231	1.267	1.301	1.251	1.266
4	1.274	1.234	1.280	1.309	1.266	1.296
5	1.281	1.235	1.303	1.325	1.297	1.307
6	1.319	1.256	1.342	1.390	1.383	1.411
7	1.358	1.305	1.443	1.410	1.433	1.466

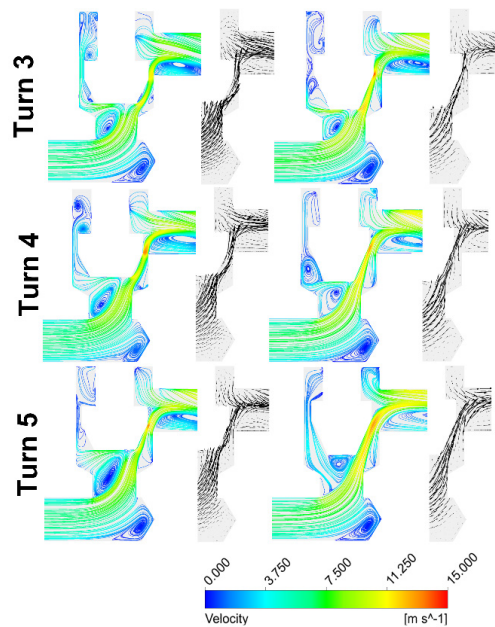


Fig. 9 2D streamline and vector according to the openness from turn 3 to 5 (Left: L8W12-the lowest flow coefficient model and Right: L10W12-the highest flow coefficient model)

Fig. 9는 중간 열림도에서 유량계수가 가장 낮은 L8W12와 가장 높은 L10W12를 비교한 것이다. L8W12의 경우, 4회전까지 스템 벽면에 재순환 영역이 형성되어 있음을 확인할 수 있으며, 5회전부터는 스템 벽면에는 재순환 영역이 발생하지 않

는다. 5회전에서 두 모델을 비교하였을 때, L8W12의 경우, 스템의 형상이 짧아 유동이 가속되는 영역이 제한적이다. L10W12의 경우, 모든 열림도에서 출구 방향으로 연속적인 유로가 생성된다.

3.4 수소충전소 환경 하에서의 유동 특성

L10W12와 L8W12의 스템 형상에 대하여 수소충전소의 환경과 같이 기준압(reference pressure) 100 MPa의 수소에서 유동 특성을, 수치해석을 통해 파악하였다. 입구조건을 SEA J 2601에 따라 수소 질량유량 60 g/s 하에서 열림도에 따른 밸브 전단 부분과 후단 부분에서의 차압을 통해 밸브가 유체에 가하는 부하를 예측한 결과, Fig. 10과 같이 L8W12는 최대 145.7 kPa 그리고 L10W12는 최대 122.5 kPa로 계산되었다. 밸브 양단에서의 차압이 높을수록 밸브가 유체에 가하는 부하가 높다는 뜻으로 L10W12가 L8W12 모델과 비교하면 더 적은 부하를 가지는 밸브임을 뒷받침해 준다.

Fig. 11은 L8W12와 L10W12의 열림도에 따른 각 모델의 압력 분포를 나타낸 것이다. 1회전에서 L8W12의 스템 주위의 영역이 매우 좁기에 유체가 출구 측으로 수송되기 위해서 많은 에너지가 요구되어 높은 압력 힘이 필요하다. 열림도가 증가하더라도 입구 측 관로에서 L10W12의 압력 분포가 L8W12보다 낮기에 더 낮은 부하를 가진다.

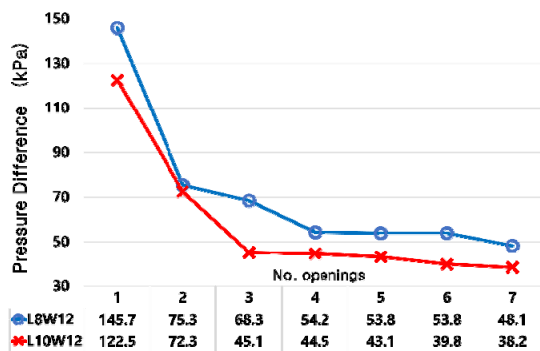


Fig. 10 Pressure difference at both ends of the valve in hydrogen mass flow rate 60g/s according to the openness for L8W12 and L10W12

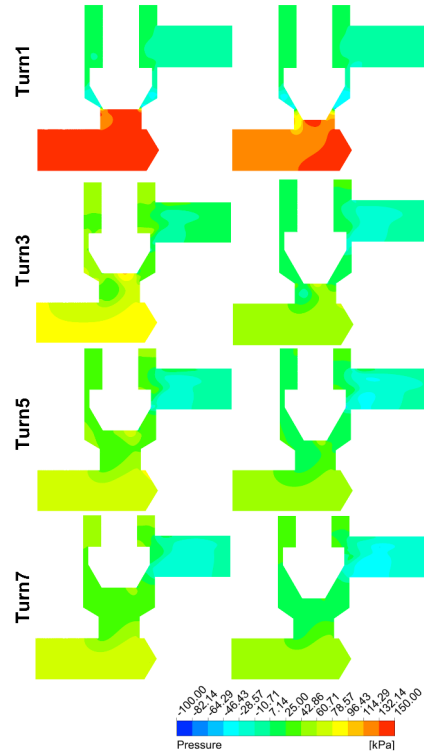


Fig. 11 Pressure contour according to the openness (Left: L8W12 and Right: L10W12)

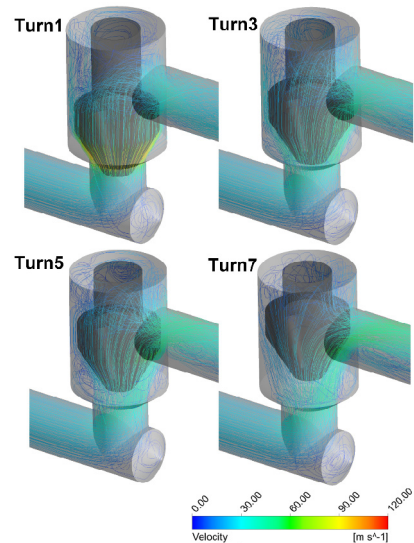


Fig. 12 3D streamline in hydrogen mass flow rate 60g/s according to the openness for L10W12

그리고 3회전 이후에는 L10W12의 경우, 밸브가 충분히 열려 압력 분포 변화가 열림도에 따라 큰 변화가 없다. 따라서 수소 유체 하에서 L8W12와 비교했을 때, L10W12가 같은 양의 수소 질량 유량 60 g/s를 수송하기 위해 더 적은 에너지를 요구한다.

Fig. 12는 최종 스템 모델의 L10W12의 3차원 유선이며, 최대속도는 1회전에서 94 m/s로 20℃에서의 수소 유체의 음속 997 m/s와 비교하였을 때 마하수는 0.1 이하로 압축성 효과는 없을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 수소충전소용 니들 밸브를 KS B 2101에 따라 수치해석 모델링하여 스템 형상에 따른 유량계수를 비교 분석하였다. 또한 실제 수소충전소 환경, 100 MPa 기준압과 수소 질량 유량 60 g/s 내에서 차압을 통해 밸브의 부하 예측과 유동 특성을 파악하였다.

1) 열림도 1 회전에서의 유량계수를 각 형상에 대해 비교하면 L8은 폭이 11.5 mm일 때 0.86, L10과 L11은 폭이 11 mm일 때 각각 0.91과 1.04로 가장 유량계수가 높았다. 1회전에서의 유동 특성을 비교하면 L8의 경우, 재순환 영역이 스템의 벽면에서 그리고 L10과 L12의 경우, 밸브의 벽면에서 발생한다. 스템의 벽면에서 재순환 영역이 발생하면 유체가 출구 방향으로 곧바로 이동하지 못하고 벽면을 따라 이동한다.

2) 니들 밸브의 열림도에 따른 유량계수의 경우 각 길이에 대해서 1회전에서 가장 높은 유량계수를 가진 폭 형상과 12 mm의 폭 형상에 대하여 비교하였다. 공통적으로 L10과 L12의 폭 12 mm에서 높은 유량계수를 가졌다. 높은 열림도에서 스템의 형상이 길수록 유량이 증가하는 데 유리함을 알 수 있으며, L8의 경우, 1회전에서의 재순환 영역이 스템의 벽면에 발생하여 유체에 작용하는 부하가 증가하고 공통으로 유량계수가 다소 낮았다.

3) 실제 현장에서 니들 밸브는 중간 열림도로 유지된 채 주로 사용하기에 중간 열림도에서 최

대 유량계수를 보인 L10W12를 최종 니들 밸브 스템 형상으로 정하였다.

4) 수소 질량 유량 60 g/s에서 L8W12의 차압은 최대 145.7 kPa(1회전) 그리고 최저 48.1 kPa(7회전)으로 계산되었으며, L10W12는 최대 122.5 kPa(1회전) 그리고 최저 38.2 kPa(7회전)이다. 이에 따라, 밸브가 유체에 가하는 부하는 L10W12가 더 낮음을 확인할 수 있다. 이는 L8W12 모델이 L10W12 모델과 비교하였을 때, 유체가 밸브를 통과하기 위하여 더 많은 에너지가 필요함을 의미한다.

5) 일반적으로 스템의 크기가 작을수록 유체에 가해지는 부하가 줄어들어 유량계수가 높아질 것으로 예상할 수 있으나, 본 연구를 통해 유동 특성에 따라 실제 스템의 크기보다 더 높은 부하가 유체에 가해져 유량계수는 낮아짐을 확인할 수 있다.

후 기

이 논문은 2023학년도 국립부경대학교 연구년 교원 지원사업에 의하여 연구되었음.

Author contributions

J. H. Park; Formal analysis, Data curation, Investigation, Visualization and writing - original draft. Y. H. Lim; Writing-review and Editing. D. I. Yu; Conceptualization and Writing-review. Y. W. Lee; Conceptualization, Writing-review, Supervision and Funding acquisition.

References

1. Korean Industrial Standards, 2020, "Test Procedures for Flow Coefficient Valves - KS B 2101", ICS (23.060.01).
2. J. H. Kim and J. H. Lee, 2016, "Study on Calculation of Flow Coefficient by CFD for Valve in Nuclear Power Plant", Journal of

- Computational Fluid Engineering, 21(4), 54-60.
3. H. B. Ko, H. L. Kang and S. H. Han, 2022, "Structural Conceptual Design and Flow Characteristics of Coaxial Counter-Rotating Ball Valve", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, 46(4), 215-221.
4. C. W. Nam, R. M. Kim and H. H. Kim, 2021, "A Numerical Study on Flow Control Valve to Flow Characteristics by Pressure Difference for Hydrogen Station", Journal of the Korean Institute of Gas, 25(2), 28-33.
5. Society of Automotive Engineers, 2016, "Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles SAE J2601".
6. D. Y. Peng and D. B. Robinson, 1976, "A New Two-Constant Equation of State", Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 15(1), 59-64.
7. ANSYS CFX - Solver Theory Guide, 2022, ANSYS CFX 2022R1, ANSYS Inc. USA.