

수소충전소용 압력안전밸브의 방출량 예측 및 유동 특성에 관한 수치해석적 연구

김정건¹ · 곽경민² · 이은하^{1†}

¹한국섬유기계융합연구원 에너지DX연구부, ²(주)대정밸브

A Numerical Study on Discharge Capacity Prediction and Flow Characteristics of Pressure Safety Valve for Hydrogen Refueling Stations

JEONG-GEON KIM¹, KYUNG-MIN KWAK², EUN-HA LEE^{1†}

¹Korea Textile Machinery Research Institute, 27 Sampung-ro, Gyeongsan, Gyeongsangbuk-do 38542, Korea

²Daejung Valve, 79, Hosandong-ro, Dalseo-gu, Daegu 42712, Korea

†Corresponding author :
eunha@kotmi.re.kr

Received 11 May, 2026
Revised 23 June, 2026
Accepted 23 June, 2026

Abstract >> Hydrogen gas utilized in hydrogen refueling stations (HRSs) is typically compressed and stored at a high pressure of 70 MPa. As environmental conditions fluctuate, the internal pressure varies accordingly. To mitigate over-pressure hazards, pressure safety valves (PSVs) are employed to maintain system safety and pressure stability. In this study, computational fluid dynamics (CFD) was conducted to analyze the discharge capacity of a 90 MPa ultra-high-pressure hydrogen gas PSV and to investigate the variations resulting from two gas model settings.

Key words : Hydrogen Refueling Station(수소충전소), Pressure Safety Valve(압력안전밸브), Discharge Capacity(방출량), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Real Gas Model(실제기체모델)

1. 서론

신재생 에너지기반 수소생산 기술의 향상과 연료 전지의 고효율화로 수소 에너지는 친환경 대체에너지로 각광받고 있다. 수소에너지의 대중화를 위해서는 수소충전소(Hydrogen Refueling Station, HRS) 인프라 구축이 필수이며, 이를 위해 핵심 부품 국산화 기술개발이 시급하다¹⁾. 산업통상부에 따르면 현재

국내에는 453곳의 수소충전소가 있으며, 사용되는 핵심부품 국산화율은 약 40%²⁾로 낮은 수준을 보이고 있다.

수소충전소용 수소가스는 70 MPa의 초고압으로 압축하여 저장된다. 충전 환경의 변화로 인해 내부의 압력이 함께 변화하며, 설정된 압력을 유지하기 위해 압력안전밸브(Pressure safety valve, PSV)의 사용은 매우 중요하다.

압력안전밸브는 압력용기, 배관 등에 설계 압력 이상의 과압으로 인한 기계 또는 설비의 사고를 방지하기 위한 핵심 요소이다. 충전소의 저장용기가 환경의 변화에 따라 미리 설정해 놓은 압력(설정 압력, Set pressure) 이상이 되면 개방되고, 내용물 방출에 따라 감압이 이루어지면 밸브는 다시 닫히게 되는 원리를 가지고 있다.

KS B ISO 19880-3에서는 수소충전소에 사용되는 각종 밸브의 규격 및 시험에 대해 명시되어 있다. 이 규격 요건에는 온도 환경(-40°C, 20°C, 85°C)에 따라서 재단힘 압력에 대해 명시되어 있는데, 밸브 설계자는 이를 규격에 맞춰 시험을 검증하도록 되어있다. 하지만 수소충전소용 압력안전밸브는 고압의 조건에서 수행되기 때문에 높은 수준의 정밀도를 가진 실증 설비가 필요하고, 그에 따른 많은 비용과 시간을 부담해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)을 활용한 성능 모사를 사용할 수 있다.

기존 연구에서는 동적 격자(Dynamic mesh)를 활용한 3차원 안전밸브의 개방 및 닫힘에 따른 Ideal air의 블로우다운 특성 및 예측 방법에 대해 조사가 수행되었고^{3,4)}, 수소압축기 안전밸브의 45 MPa 이상 고압에서의 작동유 유동 특성에 대한 실험 및 수치해석이 진행되었으며⁵⁾, 기존 관계식을 이용한 포화증기 안전밸브의 유량 추정값과 동적 거동 해석 수치계산 결과의 비교^{6,7)}, 물의 유동 및 구조 수치해석을 통한 압력안전밸브의 설계변수에 따른 구조안전성 예측⁸⁾이 수행되었다. 이러한 연구들은 물이나 공기 등 다양한 유체들에 대하여 수행되었으나, 고압의 수소를 작동유체로 하여 수치해석을 수행하지는 않았다.

최근의 연구들^{8,9)}은 내연기관용 인젝터 노즐을 통과하는 수소의 유동을 수치해석 하였다. 입출구에서 수소가스의 압력차가 약 10 MPa일 때, 격자 크기나 사용 모델에 따른 정확성 차이가 보고되었고⁹⁾, 실험 결과와의 비교가 수행되었다¹⁰⁾. 이러한 기존 문헌들을 조사한 결과는 수소 압력안전밸브를 70 MPa 이상의 고압에서 수치해석을 수행한 경우가 흔치 않다는 것을 보여준다.

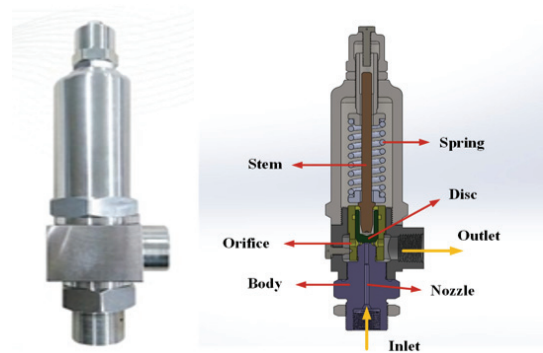


Fig. 1. Nomenclature of a pressure safety valve

본 연구에서는 90 MPa의 고압에서 압력안전밸브가 개방되었을 때 노즐(Nozzle), 디스크(Disc) 등을 통과하는 수소가스의 방출 현상을 전산모사하여 밸브 개방 정도에 따른 수소가스 방출량 및 온도, 압력, 속도 등 열유체역학적 특성과 밸브 방출 특성을 조사하였다. 또한, 이상기체(Ideal gas) 및 실제 기체(Real gas) 물성치 사용 시 결과상의 차이점을 비교하였다.

2. 이론 및 수치해석

2.1 수소충전소용 압력안전밸브

2.1.1 구조 및 작동원리

압력안전밸브는 액체 또는 기체의 종류에 따라 그 개폐 특성이 다르며, 기체용 압력안전밸브에서는 압축성 기체의 충격파(Shock wave), 임계 유동(Choked flow)과 더불어 강력한 팽창을 동반하여 급속하게 방출이 일어난다. 압력안전밸브에서 기체가 방출되는 방식은 스프링식(Spring-loaded type), 지렛대식(Lever-operated type), 추식(Weighted type)이 있으며 본 연구에서는 스프링식 개폐 구조의 방출 특성에 대한 연구를 수행하였다.

스프링식 안전밸브의 주요 구조는 디스크, 시트, 오리피스, 스템, 스프링, 바디 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 노즐(Nozzle) 및 입구(Inlet)는 압력 용기나 배관과 직접 연결되는 부분으로, 유체가 입구로 들어와 노즐을 통과하면서 유속이 급격히 빨라지게 된다.

노즐 끝에 있는 디스크(Disc)는 스템(Stem)을 통하여 스프링의 힘을 전달 받아서 노즐과 디스크가 맞닿는 접촉면(Disc seat)을 누르고 있다가 설정압력을 초과하면 위로 들어 올려져(Lift) 유로를 개방하게 된다¹¹⁾. 노즐 및 디스크를 통과한 유체는 오리피스(Orifice)를 통과하여 출구(Outlet)로 방출된다. 바디(Body)는 노즐 등 유로를 포함하고 내압을 받는 밸브 외형을 형성하고, 덮개(Bonnet)는 스템 및 스프링 등을 감싸서 보호한다.

2.1.2 압력안전밸브 방출량 계산

압력안전밸브의 개방 후 유체의 방출량은 API 520 part 1에서 권장되는 방법으로 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$W = A C K_d P_l K_b K_c \sqrt{\frac{M}{ZT}} \quad (1)$$

Eq. 1에서 W 는 압력안전밸브를 통과하는 유체의 질량 유량(kg/h)이고, A 는 유효방출면적(mm²), K_d 는 유효방출계수로, 일반적인 가스용 밸브의 경우 정확한 값을 산출하기 전 Preliminary sizing 목적으로 0.975를 적용하며¹²⁾, 추가적인 계산없이도 충분한 정확도를 얻을 수 있었다. P_l 은 상류측 릴리프 압력(90,000 kPa), K_b 는 배압보정계수로 다단감압이 없는 기존의 안전밸브에는 1.0을 적용한다. K_c 는 파열판(Rupture disk) 설치 시 발생할 수 있는 유동저항을 반영하는 보정계수로, 파열판이 없으면 1.0을 적용한다. T 는 방출온도(233.15 K)이고, M 은 유체의 분자량(2.016 kg/kmol), Z 는 방출조건에서의 압축성 인자(Compressibility factor)로 이상기체인 경우 1, 실체 기체인 경우 1.74를 적용하였다. C 는 유체의 비열비 계수로, Eq. 2로 계산할 수 있다. k 는 유체의 비열비로 1.41을 적용하였다.

$$C = 0.03948 \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2)$$

2.2 수치해석

2.2.1 밸브 디스크 모델링 및 해석 영역 설정

Fig. 2는 본 연구에서 전산모사를 수행한 압력안전밸브의 3차원 형상을 나타낸다. 압력안전밸브 상단부는 수동 개폐장치이며, 덮개와 바디 사이의 스페이서는 PTFE 소재로 저온의 수소가스로부터 단열을 실현하는 역할을 한다. 빨강색 점선으로 표시한 부분

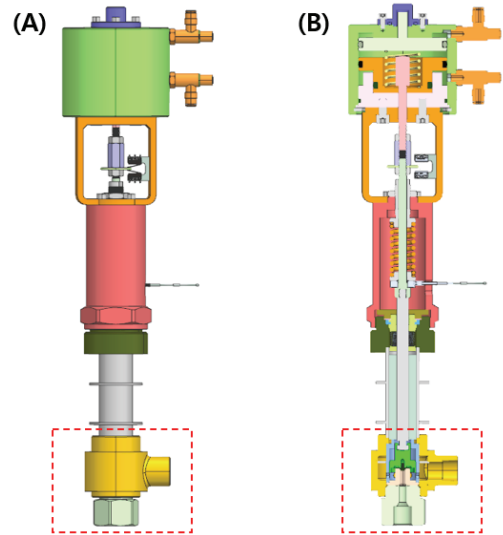


Fig. 2. 3D geometry of the PSV system: (A) external view, (B) cross-sectional view

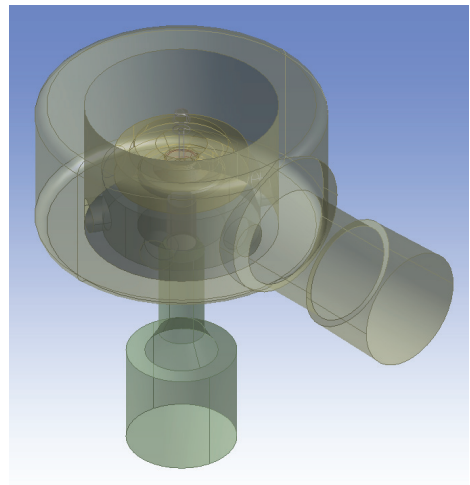


Fig. 3. Extracted fluid domain

이 압력안전밸브 바디에 해당되는 부분으로, 수소가 스 방출 전산모사의 대상이 되는 부분이다. 바디로부터 유동영역을 추출하여 나타낸 것이 Fig. 3이다. 전산모사를 위해 추출된 유동 영역의 최하단부 원형면은 수소가스가 저장용기로부터 유입되는 입구(Inlet)가 되고, 측면부 원형 면은 수소가스가 방출되는 출구(Outlet)이다. 설정 압력 초과 시 수소가스는 입구로부터 노즐과 디스크 사이를 통과하여 6개의 오리피스로 분기 후 출구 근처에서 다시 하나의 유동으로 합쳐져 방출된다. 해석은 밸브 닫힘 상태에서 디스크 시트가 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 mm 스프링 압축 방향으로 이동시켜 개방도를 조절하여 수행하였다.

2.2.2 밸브 수치해석모델

압력안전밸브 방출 현상의 전산모사는 상용 유한체적법 프로그램인 Ansys Fluent를 이용하여 수행되었다. 압력안전밸브는 Fig. 3에서와 같이 축대칭(Axisymmetry)이 아니므로 3차원으로 해석되어야 하며²⁾, 이로 인한 격자수 증가를 최소화하기 위해 격자는 밸브의 각 유동 영역마다 크기를 달리하여 생성되었다. 노즐과 디스크 사이의 좁은 틈새는 유속이 가장 빠른 구간 중 하나로, 문헌상의 추천 격자 크기인 1.44 mm / 0.045 mm (base / minimum size)⁹⁾를 참고하여 평균 격자 크기 0.1 mm로 조밀하게 구성하였다. 압력안전밸브 입구 근처와 같이 유동속도가 상대적으로 훨씬 낮을 것으로 추정되는 부분은 평균 격자 크기를 10 mm로 설정하여 영역별 특징에 따라 국소적인 크기 제어(Local sizing control)를 실시하였다. 격자 독립성 시험(Grid independence test)을 위해 평균 격자 크기 0.15 mm, 0.2 mm 크기의 격자에 대해서도 해석을 진행하였으며, 격자 수는 각각 약 288만개, 124만개, 78만개로 구성되었다. 그 결과 수소가스 방출량은 각각 0.946, 0.936, 0.903 kg/s로 약 1.5%, 3.1% 차이로 격자 수가 2배 이상 차이가 났지만 방출량은 큰 변화가 없음을 확인하였다.

경계조건(Boundary condition)은 입구에 압력 90 MPa, 온도 -40°C를 적용하였고, 출구에 상온 및 대기압을 적용하였다(Table. 1 참조). 그 외 유동영역의

Table 1. Boundary conditions

Number	Parameter	Value
1	Working Fluid	Hydrogen (H ₂)
2	Outlet Pressure	101.3 kPa
3	Inlet Pressure	90 MPa
4	Outlet Temperature	26.85°C (300 K)
5	Inlet Temperature	-40°C

경계면에는 모두 벽면(Wall) 경계조건이 적용되었다.

입·출구 사이의 극심한 압력차에 의해 대부분의 영역에서 강한 난류가 형성될 것이므로 밀도기반 솔버(Density-based solver) 및 대표적인 난류 유동 모델인 k- ω Shear Stress Transport (k- ω SST) 모델을 사용하였다. 이와 유사한 난류 모델 및 격자 크기 설정으로 압력안전밸브 내부 유동 해석을 실시하여 측정 결과와 평균 2.42%¹³⁾, 5%¹⁴⁾ 오차로 결과를 잘 예측하였다는 기존 문헌들이 있다.

압력 변화가 큰 경우, 유체의 물성치가 변화하게 되며, 이러한 물성치를 이상기체 방정식을 사용하여 수치해석을 수행하는 경우 수렴성 및 해석 결과의 정확성에 문제가 생길 수 있다. 예를 들어, -40°C & 90 MPa 조건에서 수소의 밀도는 약 53.8 kg/m³이며, 이상기체 가정 시 93.6 kg/m³으로 실제 기체 대비 74%의 차이가 발생한다. 본 연구에서는 이상기체 방정식과 미국 국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 제공하는 수소가스의 물성치를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 결과

3.1.1 밸브 개방에 따른 방출량 변화

밸브 개방도에 따른 전반적인 유속 및 온도, 압력 상황을 컨투어(Contour) 형태로 나타내었다. Fig. 4는 밸브 개방에 따른 수소가스 유량 변화를 나타낸다.

Eq. 1을 이용한 이론 유량 계산 결과, 수소가스 방출량은 개방도(Disc-Seal 사이 간격) 2.5 mm 이상에

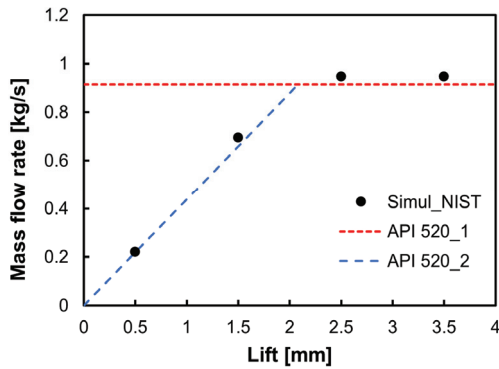


Fig. 4. Variation of mass flow rate with valve lift



Fig. 5. Schematic of valve opening (Lift)

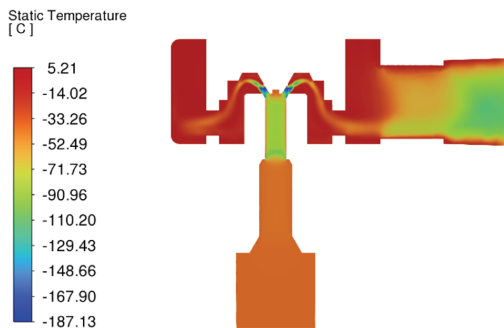


Fig. 6. Temperature contour (Lift = 2.5 mm)

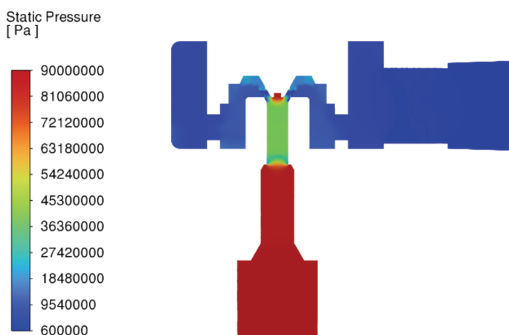


Fig. 7. Pressure contour (Lift = 2.5 mm)

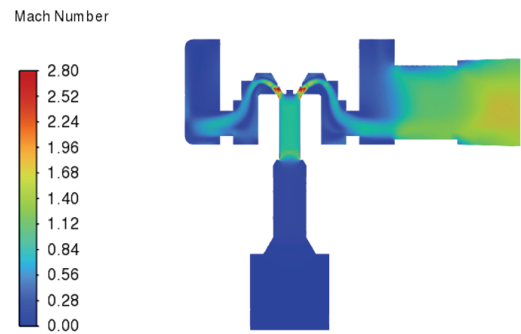


Fig. 8. Mach number contour (Lift = 2.5 mm)

서 유량 변화가 0.914 kg/s로 둔화되었고, 빨간색 점선으로 표시된 이론적 예측값(API 520_1)과 4% 이내의 오차를 보이며 추가적인 방출계수 산출 없이도 방출량예측이 잘 이루어짐을 확인하였다. 파란색 파선(Dashed line; API_520_2)은 밸브 완전 개방 이전의 방출량을 계산하기 위해 Fig. 5와 같이 유효방출면적을 디스크에 가려진 부분을 감안하여 수정하여 계산한 값이다. 평균적으로 3%의 오차를 보여 현재의 설계에서는 일반적인 방출계수를 사용하여도 방출량 예측이 용이함을 확인할 수 있었다. Figs. 6, 7, 8, 9는 각각 밸브 개방에 따른 수소가스의 온도, 압력, Mach 수 및 유속 변화 컨투어이다. 입구 영역 근처에서는 90 MPa의 압력에 유속 또한 0 m/s에 가까운 매우 낮은 상태이지만, 노즐과 디스크를 통과하며 가속되어 최고 유속이 2,450 m/s에 달한다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 이 때 수소가스의 Mach 수는 노즐목에서 1에 도달, 최대 2.8로 임계 유동이 발생함을 볼 수 있다. 또한 유체의 가속 및 팽창에 따라 개방도 2.5 mm의 경우 온도는 -180°C 이하, 압력은 1 MPa 이하로 감소한다. 이 상태는 수소의 임계점(Critical point)인 -240°C & 1.3 MPa과 약 60°C 및 0.7 MPa의 온도, 압력 차이가 존재하므로 방출 시 상변화를 고려해야 하는 조건과는 거리가 있다.

3.1.2 이상기체/실제기체 물성치 적용 결과

이상기체(Ideal gas)와 실제 기체(Real gas) 물성치를 적용하였을 때 유동 특성상의 차이를 조사하였다.

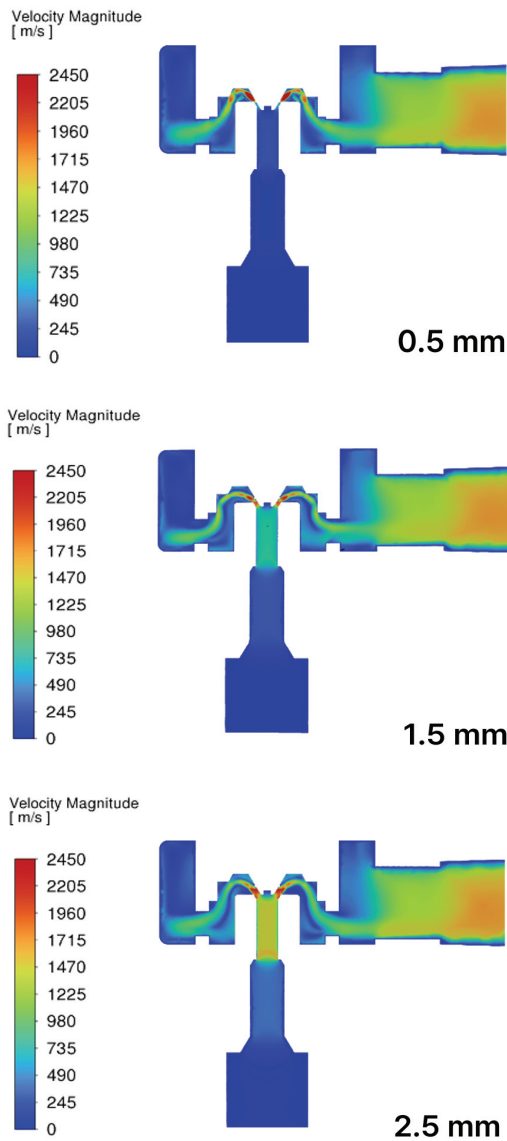


Fig. 9. Velocity contour (Lift = 0.5, 1.5, 2.5 mm)

Fig. 10은 기체 물성치를 적용한 경우에 대하여 밸브 개방에 따른 방출량을 나타낸 그래프이다. 전반적으로 이상기체 물성치를 적용한 경우가 동일한 압력차에서 더 높은 방출량을 가지는 것으로 나타났다. 개방도 2.5 mm 이상에서 이상기체 모델을 사용한 경우가 실제 기체 모델 적용 시의 방출 유량보다 17% 더 많은 방출량을 보였으며, 계산한 모든 조건에서 이상기체 모델을 적용한 경우가 평균 14% 더 많은

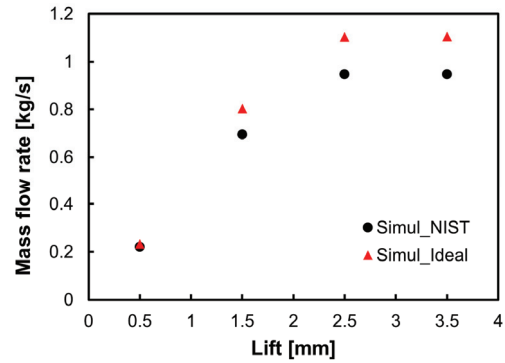


Fig. 10. Comparison of mass flow rate between ideal and real gas models based on valve lift

방출 유량을 가졌다. Eq. 1을 이용하여 방출 유량 계산식 적용 시(Compressibility factor, $Z = 1$) 방출량은 최대 1.205 kg/s로, 이론적 예측값과 수치해석 결과 값(1.105 kg/s) 사이의 오차는 이상기체 모델 적용 시 약 8% 수준으로 여전히 10% 미만의 오차로 방출량을 잘 예측하였다.

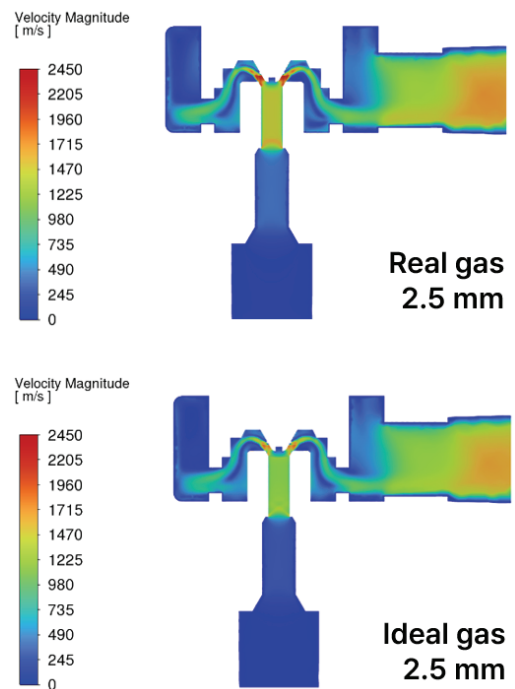


Fig. 11. Velocity contour (ideal vs real gas)

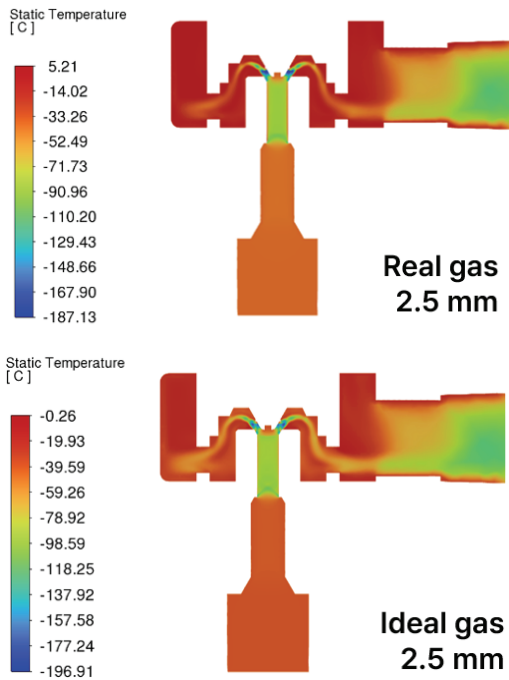


Fig. 12. Temperature contour (ideal vs real gas)

3.2 결과 고찰

Fig. 11과 같이 동일한 경계 조건에서 실제 기체 모델을 적용한 경우가 더 빠른 유속을 보이며, 이상 기체 모델을 적용한 경우가 밀도와 유량이 더 컸다. 빠른 유속과 팽창에 의해 실제 기체 모델을 적용한 경우가 더 낮은 온도를 가질 것이라는 예상과는 달리, Fig. 12와 같이 이상기체 모델을 적용한 경우가 유속이 더 느림에도 불구하고 전반적으로 더 낮은 온도 분포를 보였다. 이는 실제 기체 물성치를 적용하였을 때 이상기체보다 실제 기체의 정압비열이 더 높아져 후류에서의 온도가 더 높아지는 쪽으로 차이가 발생하고, 줄-톰슨 효과(Joule-Thomson effect)의 영향⁵⁾ 또한 반영된 것으로 추정된다.

4. 결론

본 연구에서는 수소충전소의 저장 용기에 사용되는 압력안전밸브의 성능 평가 및 분석을 위하여 전

산유체역학을 이용한 해석을 통해 밸브 개방 시 수소가스 거동을 전산모사 및 예측식을 이용해 계산하였다. 또한 속도, 압력, 온도 분포를 시각화하여 그 특성을 분석하였다. 이를 통해 성능평가시험 전 압력 안전밸브의 방출성능을 검토하였다.

- 1) 디스크 개방에 따른 압력안전밸브의 방출량을 API Standard 계산식과 전산유체해석을 통해 산출하였고, 계산 결과가 평균 3% 이내의 오차로 잘 예측됨을 확인하였다.
- 2) 유체 물성치 변화가 방출량 및 유동 특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 이상기체의 방출량은 밸브 완전 개방 시 1.105 kg/s로 실제 가스 물성치를 사용한 경우인 0.947 kg/s보다 약 14% 더 높은 유량을 초래하는 것으로 나타났다. 또한 유속은 실제 기체 물성치를 적용한 경우(최대 2,226 m/s)가 이상기체 물성치를 적용한 경우(최대 1,987 m/s)보다 전반적으로 더 빨랐으나, 이상기체 물성치 적용 시 수소가스의 전반적인 온도는 실제기체 물성치를 적용한 경우보다 약 5°C가량 더 낮은 경향이 있음을 확인하였다.

본 연구 결과는 수소충전소용 압력안전밸브의 설계 최적화 및 실험 비용 절감에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 실험적 검증을 추가하여 CFD 해석의 정확성을 더욱 강화할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 신재생에너지 핵심기술개발사업(RS-2024-00451324)의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사합니다.

References

1. J. N. Park, "Status of hydrogen station technology and policy", KIC News, Vol. 21, No. 3, 2018, pp. 10-19, Retrieved from <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=3612017>.
2. M. W. Kim, J. H. Lee, C. M. Kang, Y. J. Bang, B. M. Kang,

- H. Y. Kim, D. H. Jang, K. M. Im, and H. M. Wang, "Development of locally manufactured high-pressure relief valves for hydrogen stations", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 36, No. 4, 2025, pp. 407-412, doi:<https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.4.407>.
3. X. G. Song, L. Cui, and Y. C. Park, "Three-dimensional CFD analysis of a spring-loaded pressure safety valve from opening to re-closure", *Pressure Vessels and Piping Conference*, Vol. 5, 2010, pp. 295-303, doi:<https://doi.org/10.1115/PVP.2010-25024>.
4. X. G. Song, L. Wang, and Y. C. Park, "Transient analysis of a spring-loaded pressure safety valve using computational fluid dynamics (CFD)", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 132, No. 5, 2010, pp. 054501, doi:<https://doi.org/10.1115/1.4001428>.
5. S. B. Park, G. B. Kim, C. H. Jeon, S. N. Yun, and B. S. Kweon, "A study on the relief valve modeling and performance analysis of hydrogen compressor", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 20, No. 3, 2009, pp. 179-187, Retrieved from <https://www.koreascience.kr/article/JAKO200925265918471.pdf>.
6. D. W. Lee, S. G. Park, S. Y. Hong, Y. S. Kim, and R. H. Jung, "Analysis of safety valve performance with RELAP5/MOD3", *Proceedings of the KNS autumn meeting*, 2003, Retrieved from https://www.kns.org/files/pre_paper/20/173%EC%9D%B4%EB%8F%84%ED%99%98.pdf.
7. S. H. Sohn, "An analytical study on evaluation of opening performance of steam safety valve for nuclear power plant", *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 17, No. 1, 2014, pp. 5-11, doi:<https://doi.org/10.5293/kfma.2014.17.1.005>.
8. N. H. Kim and K. H. Lee, "Prediction of the structural safety of a relief valve using metamodel", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 9, 2015, pp. 5763-5768, doi:<https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.9.5763>.
9. R. Torelli, J. W. Park, and Y. Pei, "High-pressure hydrogen flows through single- and multi-hole nozzles: a computational study", *SAE International Journal of Sustainable Transportation, Energy, Environment, & Policy*, Vol. 6, No. 3, 2025, pp. 265-298, doi:<https://doi.org/10.4271/13-06-03-0024>.
10. R. Torelli, B. Wu, J. W. Park, and Y. Pei, "Multicycle large-eddy simulations of a direct-injection hydrogen-fueled optical engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 98, 2025, pp. 751-771, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.087>.
11. S. Kang, E. Jo, S. Han, and G. Min, "Shape design of metal disc in cryogenic pilot-operated safety relief valve for leak-tightness", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 36, No. 5, 2025, pp. 552-561, doi:<https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.552>.
12. A. P. I. Standard, "Sizing, selection, and installation of pressure-relieving devices in refineries", 2008, Retrieved from <https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/520parti>.
13. T. Pusztai and Z. Simenfalvi, "CFD analysis on a direct spring-loaded safety valve to determine flow forces", *Pollack Periodica*, Vol. 16, No. 1, 2021, pp. 109-113, doi:<https://doi.org/10.1556/606.2020.00122>.
14. C. Zong, F. Zheng, D. Chen, W. Dempster, and X. Song, "Computational fluid dynamics analysis of the flow force exerted on the disk of a direct operated pressure safety valve in an energy system", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 142, No. 1, 2020, pp. 011702, doi:<https://doi.org/10.1115/1.4045131>.
15. J. Q. Li, Y. Chen, Y. B. Ma, J. T. Kwon, H. Xu, and J. C. Li, "A study on the Joule-Thomson effect of during filling hydrogen in high pressure tank", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 41, 2023, pp. 102678, doi:<https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102678>.