

시뮬레이터를 이용한 LH2 저장탱크 PRV시스템의 설계요소 영향분석

†채충근 · 임경태 · 김용규* · 채승빈**

(주)미래기준연구소, *아주대학교 환경공학과 박사과정, **광운대학교 화학공학과 박사과정
(2023년 12월 27일 접수, 2024년 5월 16일 수정, 2024년 5월 31일 채택)

An Analysis of the Impact of Design Factors Using a Simulator of LH2 Storage Tank PRV System

†Chungkeun Chae · Gyeongtae Im · Yonggyu Kim* · Seungbeen Chae**

Mirae EHS-Code Research Institute, Seoul, 08390, Korea

*Environmental Engineering, Ajou University, Suwon 16499, Korea

**Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897, Korea

(Received December 27, 2023; Revised May 16, 2024; Accepted May 31, 2024)

요약

한국에는 2030년까지 100여 기의 액화수소 탱크가 도입될 것으로 전망된다. 액화수소는 -253°C 상태로 진공단열구조 탱크에 저장되기 때문에 단열에 문제가 생기면 탱크가 파열되는 대체재의 가능성이 상존한다. 그래서 법령에서는 최후의 보루로 PRV를 설치하도록 규정하고 있다. 주의할 것은 액화수소의 경우 배관의 압력강하를 무시하고 용량을 잘못 계산하면 무용지물이 된다는 것이다. CGA S-1.3에서는 PRV 입·출구 압력강하율을 각각 3% 미만 및 10% 미만으로 하도록 하고 있다. 그러나 배관의 압력강하량과 유량 사이에 상호 의존성이 있어 이들 값을 단번에 계산하는 것이 불가능하다. 그래서 본 연구에서는 매트랩/시뮬링크를 이용하여 PRV시스템의 압력강하율을 계산하는 시뮬레이터를 개발하고, 설계 요소에 대한 압력강하율의 민감도를 평가하였다.

Abstract - More than 100 liquefied hydrogen tanks are expected to be introduced in Korea by 2030. Since liquefied hydrogen is stored in a vacuum insulation structure tank at -253°C , there is a possibility of a major disaster in which the tank bursts if there is a problem with insulation. Therefore, the law stipulates that PRV should be installed as the last bastion. It is important to note that in the case of liquefied hydrogen, it becomes useless if the pressure drop of the pipe is ignored and the capacity is calculated incorrectly. In CGA S-1.3, the pressure drop rate of the PRV inlet and outlet pipes is set to less than 3% and less than 10%, respectively. However, there is an interdependence between the amount of pressure drop and the flow rate of the pipe, making it impossible to calculate these values at once. Therefore, we developed a simulator that calculates the pressure loss rate of PRV system using MATLAB/Simulink and evaluated the sensitivity of the pressure drop rate to design elements.

Key words : liquefied hydrogen, PRV, pressure drop, simulator, simulink

I. 서론

한국 정부는 2022년 11월 9일 개최된 수소경제위

원회에서 2030년까지 수소상용차 3만대를 보급하고 이를 위해 액화수소 저장식 충전소 70개를 보급하겠다고 선언했다. 액화수소 저장식 수소충전소란 액화수소 탱크에 저장된 액화수소를 기화시킨 후 이를 모빌리티 등에 충전하는 수소충전소를 말한다. 각 충전소에는 1개 이상의 액화수소 저장탱크가 설치되어야

†Corresponding author: chae@meri.co.kr

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

하고 이들 시설에 액화수소를 공급할 액화수소 제조 시설과 액화수소 탱크로리도 투입되어야 하므로 2030년까지 국내에 액화수소 탱크 100여기가 도입될 것으로 예상된다.

액화수소는 0.101 MPa에서 초극저온인 -253 °C로 진공단열 탱크에 저장된다. 주변에 화재가 발생하고 단열이 파괴되면 압력이 급격하게 상승되어 탱크의 폭발을 피할 수 없게 된다. 이를 방지하기 위하여 온도 조절시스템, 진공 모니터링시스템, 화재 방지시스템 등이 설치·운영되겠지만 이들의 기능에 문제가 생겨 탱크 내부로의 열침입을 막아내지 못할 경우에는 최종적으로 과압을 외부로 방출하는 PRV(Pressure Relief Valve)에 탱크 과열을 방지하는 임무를 부과할 수밖에 없다.

한국에서 액화수소 제조시설의 액화수소 탱크용 PRV 설치기준은 KGS(Korea Gas Safety Corporation)에서 제정한 KGS FP112[1]에 규정되어 있고, 주변 화재 상황에서 PRV의 필요분출능력에 관한 기준은 이 기준 2.6.1.6.1에 규정되어 있다. 이 기준 2.6.1.8.1에서는 PRV 방출구의 위치를 지상에서 5 m 이상 또는 탱크 정상부에서 2 m 이상에 두도록 하는 기준만 규정하고 있을 뿐, 인입배관과 분출배관의 압력강하에 관한 기준은 규정하고 있지 않다.

그래서 한국 정부에서는 KGS FP112에 대한 보충 기준으로 “액화수소 저장식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 추가 안전기준[2]”을 제시하고 있는데, 이 기준에 탱크 내조와 과압안전장치 연결하는 배관에서의 압력강하는 과압안전장치 설정압력을 기준으로 3%를, 펌트 스택 연결 배관의 압력 강하는 10%를 초과하지 못하도록 규정하고 있다. 아울러 이에 관한 세부기준은 CGA(Compressed Gas Association)에서 제정한 S-1.3 Part 3을 참조하도록 규정하고 있다.

CGA S-1.3-2020에서는 PRV 인입배관 및 분출배관의 압력강하율(3% 및 10%) 계산방법을 상세히 규정하고 있고 구체적인 계산의 사례도 제시하고 있다. 또한 이 기준에서는 PRV의 필요분출량 산정 방법도 규정하고 있는데, 검토결과, 그 기준의 내용과 KGS FP112 기준 사이에는 다음과 같은 차이가 있는 것으로 나타났다.

- CGA 기준에서는 분출량 결정 온도를 적용하고 있으나 KGS 기준에서는 이를 미적용
- CGA 기준에서는 탱크 전체가 외부화재에 노출되는 것을 가정하고 있으나 KGS 기준에서는 지면으로부터 7.6 m 높이까지만 노출되는 것으로 가정
- CGA 기준에서는 단열재의 종류로 열전도율이 가장 높은(가장 보수적인) 기체 수소를 상정하고 있

으나 KGS 기준에서는 이에 관한 명확한 기준 미 규정

검토결과, CGA 기준이 KGS 기준보다 더 구체적이고 안전 관점에서 더 보수적인 결과 값을 얻을 수 있을 것으로 판단하여 이 논문에서 필요 분출량 산정은 CGA 기준에 따르는 것으로 하였다.

액화수소 탱크에 설치되는 PRV 인입배관 및 분출배관에서의 압력강하 문제를 직접 다루는 선행연구는 찾을 수 없었다. Derek 등[3]은 화재 상황에서 액화수소 저장탱크의 진공 단열 성능이 손상된 경우 안전 밸브의 역할에 대한 연구를 하였다. 그러나 이 연구는 PRV의 방출능력 부분에 한정된 것이었다. Alice 등[4]은 주변 화재 상황에서 액화수소 탱크 내부의 압력 거동에 대해 연구를 하였다. 그러나 이 연구는 화재 상황에서 탱크 내부의 온도 상승 속도와 탱크 과열 시간의 예측에 중점을 두고 있었다.

PRV 인입배관 및 분출배관의 압력강하율 계산에 적용되는 변수들은 상호 의존성을 가지고 있기 때문에 한 번에 결과 값을 산출해 내는 것이 불가능하다. 그래서 CGA S-1.3-2020에서는 반복법(Iteration)을 활용하여 수계산하는 방법을 규정하고 있다. 우리는 이를 쉽게 하기 위하여 “PRV시스템 시뮬레이터”를 개발하였다. 시뮬레이터는 인입배관의 압력강하율을 계산하는 단계(1단계), 분출배관 압력강하율을 계산하는 단계(2단계), 필요분출량을 계산하는 단계(3단계)로 구성하였다. 그리고 그 계산에는 NIST(National Institute of Standards and Technology) 데이터를 기반으로 하는 액화수소 물성 계산용 사용자 함수 여러 개를 자체 개발하여 적용하였다.

CGA S-1.3-2020에서 제공하는 예제를 통하여 개발한 시뮬레이터 실행 결과의 신뢰성을 확인하였고 이 시뮬레이터를 이용하여 배관의 구경, 배관의 길이 및 배관에 설치된 엘보우의 수에 대한 압력강하율의 민감도를 분석하였다. 시뮬레이터는 매트랩/시뮬링크로 구성하였으며 그 이유는 다음과 같다.

- NIST 데이터 호출의 용이성
- 함수를 사용한 다수 변수의 효과적 처리
- 최종 사용자에게 전문지식을 요구하지 않음
- 사용자의 시간을 절약

II. PRV시스템 시뮬레이터 개발

CGA S-1.3-2020에서는 한국의 산업통상자원부에서 제시하는 안전기준과 동일하게 PRV 인입 측 배관과 분출 측 배관의 압력강하율을 각각 3% 미만 및

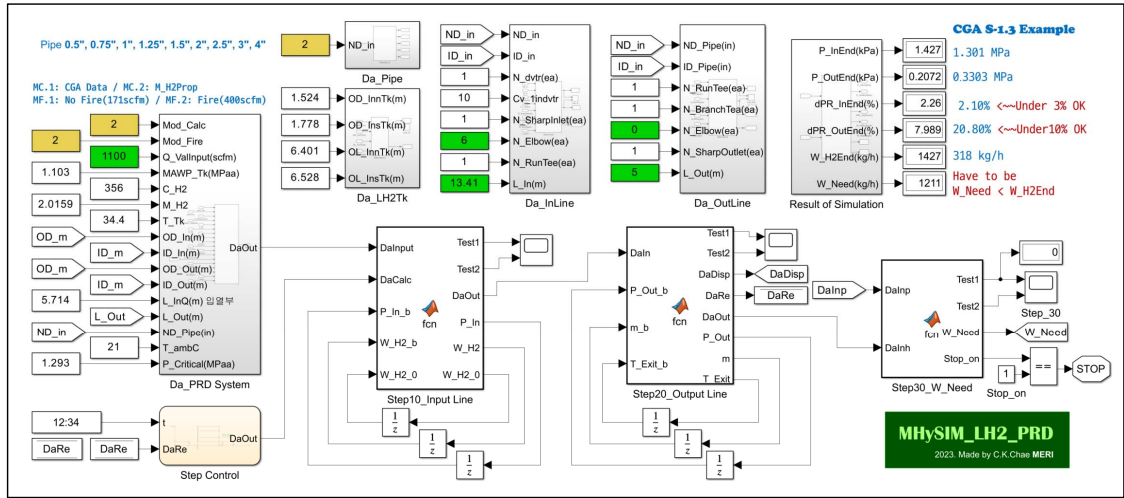


Fig. 1. Simulator of PRV system

10% 미만으로 하도록 규정하고 있다. 그리고 그 압력강하는 <식 1>에 따라 계산하도록 하고 있다. 이 연구에 사용한 수식들은 CGA S-1.3-2020을 참고하여 작성하였다[5].

$$\Delta P = \frac{6.253 \times 10^{-11} \times f \times l \times W_{prv}^2 \times v_{avg}}{d^5} \quad (1)$$

여기에서, ΔP 는 압력강하(kPa), f 는 마찰계수, l 은 배관의 상당길이(m), W_{prv} 는 PRV의 분출유량(kg/hr), v_{avg} 는 배관내 수소의 평균비체적(m^3/kg), d 는 직경(m)을 나타낸다.

이 식에서 확인할 수 있듯이 ΔP 를 계산하기 위해서는 W_{prv} 와 v_{avg} 의 값을 알아야 하고, W_{prv} 와 v_{avg} 를 계산하기 위해서는 ΔP 를 알아야 한다. 즉 상호 의존성을 가지고 있기 때문에 한 번에 계산해 내는 것이 불가능하다. 그래서 임의의 W_{prv} 와 v_{avg} 의 값을 입력하여 ΔP 를 계산한 후 그 결과를 이용하여 W_{prv} 와 v_{avg} 의 값을 보정하고, 보정된 값의 오차가 사전 설정된 기준 내로 들어오지 않을 경우 보정된 값을 활용하여 처음부터 계산을 다시 하는 반복계산 방식에 의해 W_{prv} 값과 맞아떨어지는 ΔP 값을 찾아낸다. 이 작업을 쉽게 빨리 해줄 수 있는 것이 바로 시뮬레이터이며, 우리는 매트랩/시뮬링크를 이용하여 그 시뮬레이터를 <Fig. 1>과 같이 개발하였다.

2.1. 분출량결정압력 및 분출량결정온도 설정

분출량결정압력(Flow rating pressure)이란 PRV의

분출유량을 결정하는 압력으로 인입배관 입구의 정압을 말한다. CGA S-1.3-2020에 따르면 비화재 상황에서 탱크가 하나의 PRV에 의해 보호되는 경우 이 압력은 MAWP(Maximum Allowable Working Pressure)의 110%로 하도록 되어 있고, 복수의 PRV에 의해 보호되는 경우 이 압력은 비화재 상황에서는 MAWP의 116%, 화재 상황에서는 MAWP의 121%로 하도록 되어 있다.

분출량결정온도의 경우에는 탱크에 저장되어 있는 액화가스가 초임계상태인지 아닌지에 따라 설정방법이 달라진다. 액화가스가 초임계상태가 아닌 경우에는 포화온도를 분출량결정온도로 하면 된다. 그러나 초임계상태인 경우에는 분출량결정압력에서 다음 <식 3>에 의해 계산된 값이 최대가 되는 경우의 온도를 분출량결정온도로 하여야 한다. 여기서 h 는 단위질량당 엔탈피(enthalpy)이며, v 는 비체적(specific volume)이다.

$$\theta = v \left(\frac{\delta h}{\delta v} \right)_P \quad (2)$$

$$\frac{\sqrt{v}}{\theta} \quad (3)$$

<식 2>에서 θ (Theta)를 비열투입량(Specific heat input)이라고 하며, 이 값과 v 값은 분출량결정압력에서 온도에 따라 그 값이 달라진다. 우리는 온도 변화에 따른 $\Delta h/\Delta v$ 를 계산하는 방식으로 θ 를 구하여 시뮬레이터에 적용하였다. <Fig. 2>는 시뮬레이션에서 사

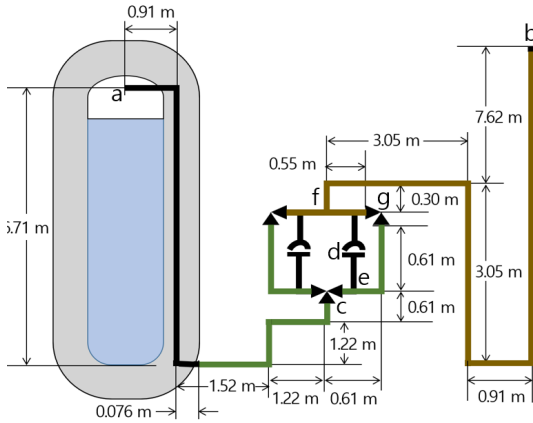


Fig. 1. PRV System Example

용한 CGV S-1.3-2020의 PRV 시스템을 나타낸 것이다. 여기서 a-g로 표기한 각 부분은 다음을 가리킨다: a) Sharp edge inlet, b) Sharp edge outlet, c) Diverter, d) Rupture disk, e) Run tee, f) Branch tee, and g) Relief valve

2.2. 배관의 압력강하량 계산식

PRV 인입배관의 ΔP 를 산정하기 위해서는 f (Friction Factor), l (Equivalent length), W_{prv} (Mass flow capacity) 및 v_{avg} (Average specific volume) 값을 알아야 한다.

f 는 Crane TP-410[6]에서 발췌한 <Table 1>에 의하여 구할 수 있다.

l 은 배관 자체의 길이에 배관부속품의 상당길이(Equivalent length)를 더하여 구한다. 배관부속품의 상당길이(l_{acc})는 <식 4>에 의해 계산할 수 있다.

$$l_{acc} = \frac{K_{acc}d}{f} \quad (4)$$

여기에서 K_{acc} 는 배관부속품(Accessories)의 손실 계수(Loss coefficient), d 는 배관의 직경이다. 한편, Diverter의 압력손실계수는 <식 5>에 의해 구할 수 있고, <식 6>에 의하여 Diverter의 상당길이를 구할 수 있다.

$$K_{dtr} = \left(\frac{29.84 \times d^2}{C_b} \right) \quad (5)$$

$$l_{dtr} = \frac{K_{dtr}d}{f} \quad (6)$$

Table 1. Friction Factor for Schedule 40 Steel Pipe

Nominal Size	0.5"	0.75"	1"	1.25"	1.5"	2"	2.5"	3"
f	0.026	0.024	0.022	0.021	0.020	0.019	0.018	0.017

여기에서 C_b 는 Diverter의 유량계수이다. C_b 값은 1 psi의 압력 강하에서 해당 Diverter를 통과하는 가스의 유량이 분당 얼마인치를 나타내는 값이다. 구경이 확대되면 C_b 값도 증가하며 유량의 증가는 밸브 구경 면적에 비례하고 그 면적은 직경의 제곱에 비례한다. 여기에서는 1인치 구경 Diverter의 C_b 값으로는 CGA S-1.3-2020 B2 Example에서와 같이 10을 사용하였고, 다른 구경 Diverter의 C_b 값은 10에 구경 증감률의 제곱을 곱하는 방식으로 계산된 값을 사용하였다.

저장탱크 내에 설치되어 있는 PRV 인입배관 입구(Sharp edge inlet)의 압력손실계수로는 0.78을 적용하였고 엘보우 상당길이(l_{Elbow}), 런티 상당길이(l_{Runtee}), 브랜치티(Branch tee) 상당길이($l_{Branch Tee}$) 및 분출구(Sharp edged outlet)의 상당길이(l_{Outlet})는 각각 <식 7>, <식 8>, <식 9> 및 <식 10>을 이용하여 계산하였다.

$$l_{Elbow} = 30d \quad (7)$$

$$l_{Runtee} = 20d \quad (8)$$

$$l_{Branch Tee} = 60d \quad (9)$$

$$l_{Outlet} = \frac{K_{Outlet}d}{f} \quad (10)$$

여기에서 분출구의 압력손실계수(K_{Outlet})는 1을 적용하였다. 단, <식 4>에서 <식 10>까지의 식을 적용할 때 단위는 ft로 해야 한다.

2.3. PRV 입구압력 및 분출량 선정 방법

PRV 입구 온도 및 압력과 분출량 산출 절차는 <Fig. 3>와 같다.

여기에서 F_n (Correction factor)은 <식 11>에 의하여 계산한다. 여기에서 P_{fn} 는 Flow rating pressure를 나타내고, n 은 인입 측 배관에 대한 계산의 Step 번호, i 는 Inlet, tk 는 Tank를 의미하는 기호이다. 이를 계산하기 위해서는 $P_{i,n-1}$ 와 $T_{i,n}$ 조건에서의 비체적 $v_{i,n}$ 가 필요하다. $P_{i,n-1}$ 와 $T_{i,n}$ 는 각각 <식 1>과 <식 12>(화재 제외) 및 <식 13>(화재 포함)을 통하여 계산한다.

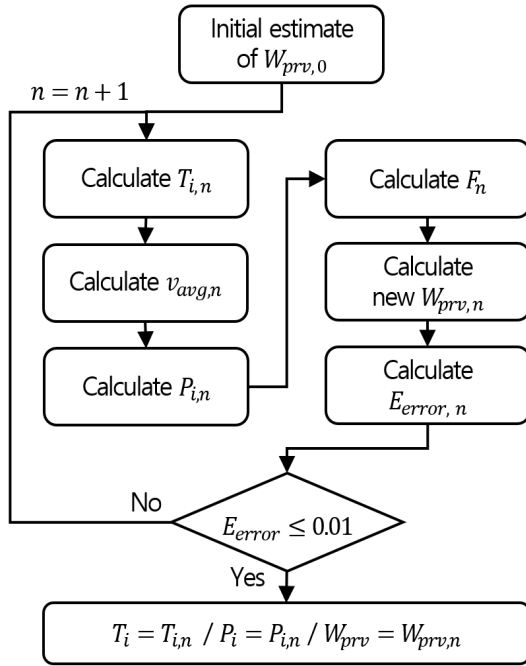


Fig. 3. PRV inlet pressure, etc. calculation

L_0 는 PRV의 출구부터 대기까지의 출구 사이 거리, D_0 는 출구 배관의 외경, C_p 는 정압비열을 의미한다.

$$F_n = \sqrt{\frac{P_{fr} v_{i,n}}{P_{i,n} v_{ik}}} \quad (11)$$

$$T_{i,n} = 328 - \frac{328 - T_o}{e^{\left(\frac{134.8 \times D_o \times L_o}{W_{prv,n-1} \times C_p}\right)}} \quad (12)$$

$$T_{i,n} = 992 - \frac{992 - T_o}{e^{\left(\frac{134.8 \times D_o \times L_o}{W_{prv,n-1} \times C_p}\right)}} \quad (13)$$

$$v_{avg,n} = \frac{v + v_{i,n}}{2} \text{ (inlet)} \quad (14)$$

<식 14> $v_{avg,n}$ 은 인입 배관 측 평균 비체적으로, 포화 온도와 분출량 결정 압력에서의 비체적 v 와 $P_{i,n-1}$ 와 $T_{i,n}$ 에서의 비체적 $v_{i,n}$ 의 평균으로 계산한다. 여기서 상태방정식의 사용보다 더 정확한 물성치를 얻기 위하여 NIST의 열역학 테이블에서 보간법(Interpolation)으로 비체적을 계산한다.

반면, <식 15>은 선택된 감압 밸브(Relief valve)의 정격 유량 용량(Rated flow capacity)을 나타낸다. 여기서 A 는 감압 밸브의 오리피스 면적, P 는 분출량 결정 압력(Flow rating pressure), K_d 는 감압 밸브의 방출 계수이다. 그리고 <식 15>을 계산하면, 초기 질량 유량 용량(Mass flow capacity)인 <식 16>을 계산할 수 있다. 여기서 C 는 비열비에 따른 가스상수, M 은 유체의 분자량, T 는 분출량 결정 온도, Z 는 분출량 결정 압력과 온도에서의 압축 계수를 의미한다. $W_{prv,n}$ 는 현재 반복에서의 질량 유량 용량(mass flow capacity)으로 <식 17>처럼 $W_{prv,0}$ 을 F_n 으로 나누어 계산한다. $W_{prv,n}$ 을 얻으면 <식 18>를 이용하여 E_{error} (Error)를 계산한다.

$$Q_{a,w} = 0.00699 \times K_d \times A \times P \quad (15)$$

$$W_{prv,0} = \frac{Q_{a,w} \times C}{92.34} \sqrt{\frac{M}{Z \times T}} \quad (16)$$

$$W_{prv,n} = \frac{W_{prv,0}}{F_n} \quad (17)$$

$$E_{error,n} = \left| \left(\frac{W_{prv,n-1} - W_{prv,n}}{W_{prv,n-1}} \right) \right| \quad (18)$$

만약 $E_{error,n}$ 이 0.01을 초과하면, 계산 반복횟수는 $n = n + 1$ 조건에 의하여 1부터 n 까지 계속 증가한다. 단, $E_{error,n}$ 이 0.01 이하가 될 때, n 은 최종적으로 결정되고 이때의 $P_{i,n}$, $W_{prv,n}$, $v_{i,n}$, $T_{i,n}$ 값을 각각 P_i , W_{prv} , v_i , T_i 으로 표기한다.

2.4. PRV 출구압력 산정 방법

PRV 분출 측 압력의 산출 절차는 <Fig. 4>와 같다. 2.3.에서 계산한 W_{prv} 값을 사용하여 화재 제외 상황의 <식 19> 및 화재 포함 상황인 <식 20> 상황에서 출구(exit) 온도를 계산한다.

$$T_{exit} = 328 - \frac{328 - T_o}{e^{\left(\frac{134.8 \times D_o \times L_o}{W_{prv} \times C_p}\right)}} \quad (19)$$

$$T_{exit} = 992 - \frac{992 - T_o}{e^{\left(\frac{134.8 \times D_o \times L_o}{W_{prv} \times C_p}\right)}} \quad (20)$$

여기에서 $P_{o,m}$ 은 출구 배관(Outlet piping)의 배압 지점(Back pressure point)에서의 압력을 의미하며 <식 23>와 같다. 한편, E_{error} (Error)는 $P_{o,m}$ 에 관한 식

으로 <식 24>에 의해 계산한다. 여기서 P_{atm} 은 대기압이다. T_o 는 PRV의 출구 온도이다. 여기서 o (Out)는 배관 내에서의 특정 출구, $exit$ 는 배관 최종 출구를 의미한다. 한편, <식 21>과 같이 출구 초기 압력은 $P_{o,0}$ 은 2.3.에서 계산한 P_i 로 둔다. 그러면, 출구 배관 측 평균 비체적 $v_{avg,m}$ 는 <식 22>와 같이 계산한다.

$$P_{o,0} = P_i \quad (21)$$

$$v_{avg,m} = \frac{v_{exit} + v_{o,m}}{2} \text{ (outlet)} \quad (22)$$

v_{exit} 는 대기압 및 T_{exit} 에서의 비체적, $v_{o,m}$ 는 $P_{o,m-1}$ 및 T_o 에서의 비체적이다. 초기 $v_{avg,m}$ 을 계산하면 <식 23>에 의하여 해당 단계의 $P_{o,m}$ 이 계산 가능해져 반복 계산 루프가 만들어진다. 반복 조건으로, <식

24>의 $E_{error,m}$ 값이 0.01 이하이면 종료, 초과이면 $m = m + 1$ 으로 갱신하여 반복 계산한다.

$$P_{o,m} = \frac{6.253 \times 10^{-11} \times f_o \times l_o \times W_{sys}^2 \times v_{ao,m}}{d_o^5} + P_{atm} \quad (23)$$

$$E_{error,m} = \left| \left(\frac{P_{o,m-1} - P_{o,m}}{P_{o,m-1}} \right) \right| \quad (24)$$

여기에서 m 은 분출 측 배관에 대한 계산의 Step 번호, o 는 Outlet을 의미하는 기호이다.

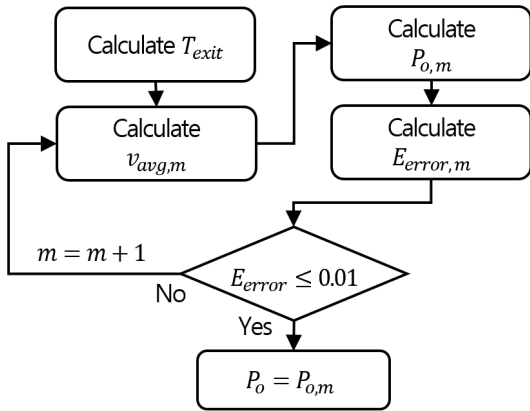


Fig. 4. PRV outlet pressure, etc. calculation

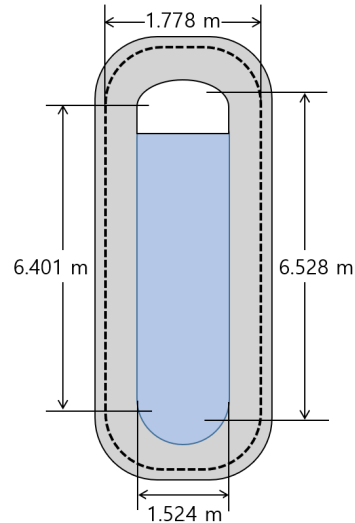


Fig. 5. LH2 Tank Example

Table 2. Sensitivity according to PRV System Specifications (no fire)

Test No.	Nominal Size(in)	Rated Flow Capa. (scfm)	Inlet Piping Pressure Drop(%)					Outlet Piping Pressure Drop(%)					Mass Flow Capa.(kg/hr)	
			L(1) (m)	Elbow (pcs)	ΔP (MPa)	Result (%)	Criteria	L(2) (m)	Elbow (pcs)	ΔP (MPa)	Result (%)	Criteria	Criteria	Result (kg/hr)
1	0.75	171	13.41	6	0.070	6.32	18.53	4	0.595	53.99	Shall be less than 10%	155	308	
2	1.00	171	13.41	6	0.027	2.46	18.53	4	0.247	22.44			322	
3	1.25	171	13.41	6	0.006	0.55	18.53	4	0.062	5.60			326	
4	1.00	171	13.41	6	0.027	2.46	5.00	2	0.106	9.64			322	

Note 1. 13.41 m of inlet piping have a)7.70m of piping inside outer tank, b)5.71m of piping outside outer tank, c) 1 diverter, d) 1 sharp edge inlet, e) 6 elbows, f) 1 run tee.

2. 18.53 m of outlet piping have a)1 run tee, b)1 branch tee, c)4 elbows, d)1 sharp edged outlet.

Table 3. Sensitivity according to PRV System Specifications (under fire)

Test No.	Nominal Size(in)	Rated Flow Capa. (scfm)	Inlet Piping Pressure Drop(%)					Outlet Piping Pressure Drop(%)					Mass Flow Capa.(kg/hr)	
			L(1) (m)	Elbow (pcs)	△P (MPa)	Result (%)	Criteria	L(2) (m)	Elbow (pcs)	△P (MPa)	Result (%)	Criteria	Criteria	Result (kg/hr)
1	2.50	1100	13.41	6	0.012	0.94	Shall be less than 3%	18.53	4	0.175	13.21	Shall be less than 10%	1211	1376
2	3.00	1100	13.41	6	0.006	0.47		18.53	4	0.092	6.95			1301
3	2.50	1100	13.41	6	0.012	0.94		10.00	4	0.106	8.00			1376
4	2.00	1100	13.41	6	0.030	2.26		18.53	4	0.399	30.14			1427
5	2.00	1100	13.41	6	0.029	2.26		5.00	0	0.106	7.99			1427

Note 1. 13.41 m of inlet piping have a)7.70m of piping inside outer tank, b)5.71m of piping outside outer tank, c) 1 diverter, d) 1 sharp edge inlet, e) 6 elbows, f) 1 run tee.
 2. 18.53 m of outlet piping have a)1 run tee, b)1 branch tee, c)4 elbows, d)1 sharp edged outlet.

2.5. PRV 필요분출량 산정

단열구조 액화수소 저장탱크에 설치되는 PRV의 필요분출량(W_{prv})은 CGA S-1.3-2020 6.3.3에서 규정하고 있는 <식 25> 및 <식 26>에 따라 계산할 수 있다.

$$Q_a = S \times G_i \times U \times A^{0.82} \tag{25}$$

$$W_{prv} = \frac{Q_a \times C}{92.34} \sqrt{\frac{M}{Z \times T}} \tag{26}$$

여기에서 Q_a 는 PRV의 부피유량(m^3/hr), S 는 보호수단보정계수로 일반적으로 적용되는 값은 1, U 는 기체수소를 단열재로 하는 경우의 총괄열전달계수($kJ/hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C$), A 는 탱크 단열재의 내부 및 외부 표면적의 산술평균(m^2), 그리고 G_i 는 단열 탱크의 가스계수이다. 분출량 결정 압력이 임계압력 미만인 경우에는 <식 27>, 임계압력 이상인 경우에는 <식 28>에 의해 계산한다.

$$G_i = \frac{241 \times (922 - T)}{C \times L} \sqrt{\frac{ZT}{M}} \tag{27}$$

$$G_i = \frac{241 \times (922 - T)}{C \times \theta} \sqrt{\frac{ZT}{M}} \tag{28}$$

여기에서 L 은 증발잠열(kJ/kg), θ 는 비열투입량(Specific heat input, kJ/kg)을 나타낸다.

III. PRV시스템 설계요소 영향분석

3.1. 화재 유무에 대한 민감도

액화수소 저장탱크 주변의 화재를 고려한 경우와

고려하지 않은 경우의 PRV시스템 시뮬레이션 결과는 각각 <Table 2> 및 <Table 3>과 같다. 비교 검토가 용이하도록 하기 위해 기본적인 시뮬레이션 조건은 CGA S-1.3-2020의 Appendix B와 동일하게 하였다. 액화수소 저장탱크 규격은 <Fig. 5>와 같고, PRV 인입 배관 및 분출 배관의 규격은 <Fig. 2>와 같다.

<Table 2>에 따르면 B2 Example과 동일 조건에서 배관의 호칭경을 1 in로 할 경우 인입 측 배관의 압력강하율은 2.46%로 “3% 미만” 기준에 적합하다. 그러나 출구측 배관의 경우에는 22.44%로 “10% 미만” 기준을 충족하지 못한다. 출구측 배관을 “10% 미만” 범위에 들어오도록 하는 방법에는 배관의 호칭경을 확대하는 방법과 출구측 배관의 압력강하 요인을 제거하는 방법을 생각할 수 있다. 호칭경을 1 in에서 1.25 in로 확대한 결과 출구측 배관 압력강하율은 22.44%에서 5.6%로 감축되어 기준을 만족하게 되는 것으로 나타났다. 출구측 배관의 길이를 18.53 m에서 5 m로 줄이고 엘보 수량을 4개에서 2개로 감축할 경우에도 압력강하율 9.64%로 감축되어 기준을 충족하게 되는 것으로 나타났다.

CGA S-1.3-2020에는 화재 조건에서 PRV시스템 배관의 압력강하율을 검토하는 예제가 없다. 그래서 화재 상황을 고려하되 나머지 조건은 B2 Example과 동일하게 하여 시뮬레이션 한 결과를 <Table 3>에 나타냈다.

비화재 상황과 화재 상황의 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 PRV의 분출요구량은 155 kg/hr에서 1211 kg/hr로 7.8배 증가하는 것으로 나타났다. 비화재 상황에서의 분출요구량은 CGA S-1.3-2020의 6.2.2에 따라 계산된 것이고, 화재 상황에서의 분출요구량은 6.3.3에 따라 계산된 것이다.

화재 상황의 경우로서 배관의 호칭경을 2.5 in로 할

경우에는 인입 측 배관의 압력 손실률이 0.94%로 “3% 미만” 기준에 적합하지만, 출구측 배관의 경우에는 13.21%로 “10% 미만” 기준을 충족하지 못하는 것으로 나타났다. 출구측 배관을 “10% 미만” 범위에 들어오도록 하기 위하여 호칭경을 3 in로 확대하면 분출 측 배관의 압력 손실률이 6.95%로 감축되어 기준을 만족하게 되는 것으로 나타났고, 호칭경은 2.5 in 그대로 두고 분출 측 배관의 길이를 10m로 감축하는 경우에도 압력 손실률이 8%로 감축되어 기준을 충족하게 되는 것으로 나타났다. 호칭경을 2 in로 하면서 분출 측 배관 길이를 5 m로 감축하고 엘보우를 모두 제거하는 경우에도 압력 손실률을 8%로 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

3.2. 배관 구경에 대한 민감도

PRV 인입배관과 분출배관의 관경 변화에 대한 압력강하의 민감도는 <Fig. 6>와 같다. 민감도 분석은 PRV의 정격 유량이 1100 scfm이고, 인입 측 배관 및 분출 측 배관의 길이는 각각 15 m이며, 양측 배관에는 엘보우가 각각 5개씩 설치되어 있는 것으로 가정하고 시뮬레이션을 한 것이다.

시뮬레이션 결과 배관의 호칭경이 1.5 in에서 2.0 in로 증가할 때 인입 측의 압력강하는 0.056 MPa이고 분출 측의 압력강하는 0.566 MPa인 것으로 나타나 분출 측 배관의 압력강하가 인입 측보다 10배 정도 높은 것으로 나타났고, 배관의 호칭경을 2.0 in에서 2.5 in로 확대할 경우에는 1.5 in에서 2.0 in로 확대할 경우보다 압력 강하의 정도가 약 1/3 정도로 감소하는 것으로 나타났다.

3.3. PRV 인입 배관 길이에 대한 민감도

PRV 인입배관과 분출배관의 길이 변화에 대한 압력강하의 민감도는 <Fig. 7>과 같다. 민감도 분석은 PRV의 정격 유량이 1100 scfm이고, 배관의 호칭경이 2.5 in이며, 양측 배관에는 엘보우가 각각 5개씩 설치되어 있는 것으로 가정하고 시뮬레이션을 한 것이다.

시뮬레이션 결과 배관의 길이가 11 m에서 13 m로 연장할 때 인입 측의 압력강하는 0.012 MPa이고 분출 측의 압력 강하는 0.121 MPa인 것으로 나타나 분출 측 배관의 압력강하가 인입 측보다 약 10배 정도 높은 것으로 나타났고, 배관의 길이를 13 m에서 15 m로 연장할 경우와 11 m에서 13 m로 연장할 경우 압력 강하 정도는 동일한 것으로 나타났다.

3.4. 배관 엘보우 수량에 대한 민감도

PRV 인입배관과 분출배관의 엘보우 수량에 대한 압력강하의 민감도는 <Fig. 8>과 같다. 민감도 분석은 PRV의 정격 유량이 1100 scfm이고, 배관의 호칭경이

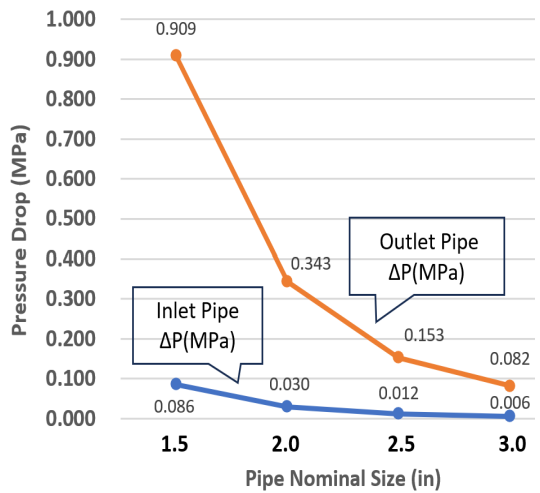


Fig. 6. Sensitivity to pipe diameters

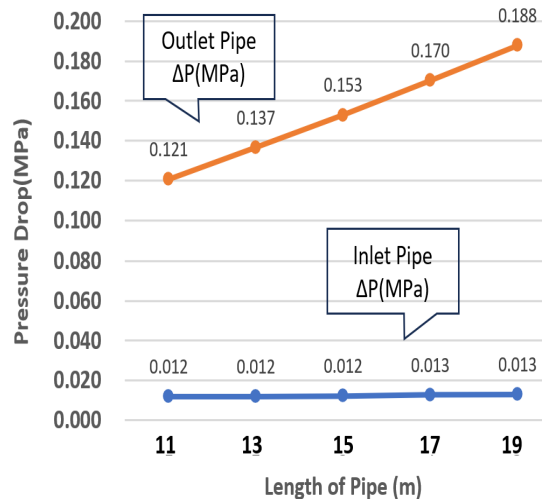


Fig. 7. Sensitivity to pipe lengths

2.0 in이며, 양측 배관 길이는 각각 15 m인 것으로 가정하고 시뮬레이션을 한 것이다.

시뮬레이션 결과 엘보우 수량이 1개에서 2개로 증가할 때 인입 측의 압력강하는 0.027 MPa이고 분출 측의 압력 강하는 0.274 MPa인 것으로 나타나 분출 측 배관의 압력강하가 인입 측보다 10배 정도 높은 것으로 나타났고, 엘보우 수량을 2개에서 3개로 증가시킬 경우와 1개에서 2개로 증가시킬 경우의 압력 강하 정도는 동일한 것으로 나타났다.

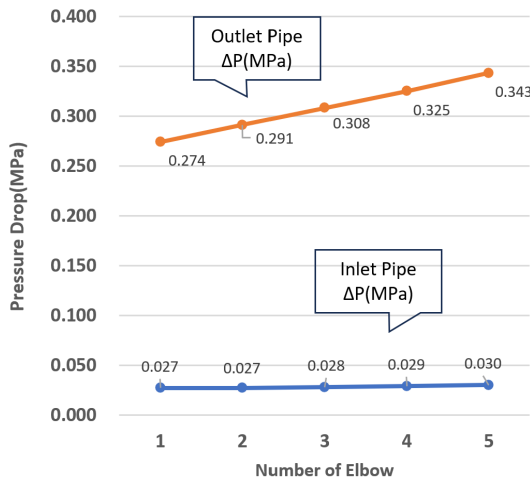


Fig. 8. Sensitivity to number of elbows

IV. 결론

액화수소 저장탱크용 PRV시스템의 배관 구경, 배관 길이 및 배관 부속품의 수량 등에 대한 인입배관과 분출배관의 압력강하율을 계산하고 그 민감도를 평가하기 위해 시뮬레이터를 개발하였다. 계산에는 NIST 데이터를 기반으로 액화수소의 압력, 온도, 비체적, 엔탈피, 비열투입량, 비점, 증발잠열, 열전도도 등을 계산해 낼 수 있는 사용자 함수를 자체 개발하여 적용하였다. 시뮬레이터는 인입배관의 압력강하율을 계산하는 단계, 분출배관 압력강하율을 계산하는 단계, 필요분출량을 계산하는 단계 등 3단계로 구성하였다. PRV의 정격유량이 1100 scfm일 때, 배관 구경 변화, 배관 길이 변화, 그리고 배관 엘보 수량 변화에 따른 시뮬레이션 결과는 다음과 같았다. (단, 각 실험에서 언급이 없을 때는 배관 구경 2.0 in, 배관길이 15 m, 엘보 수량은 5개인 것으로 한다.)

첫째, 배관 구경(호칭경)을 변화시킨 실험에서, 1.5 in에서 2.0 in로 증가할 때와 2.0 in에서 2.5 in로 증가할 때 압력강하는 후자의 정도가 전자의 약 1/3 수준이었다.

둘째, 배관 길이를 변화시킨 실험에서, 배관 길이를 11 m에서 13 m, 또 13 m에서 15 m로 연장하여 가며 실험

한 결과 2 m 연장할 때 압력강하 정도는 같았다.

셋째, 엘보 수량을 변화시킨 실험에서, 엘보 수 증가에 따른 압력강하는 동일한 것으로 나타났다.

세 실험 모두 분출 측 압력강하가 인입 측 압력강하보다 약 10배인 것으로 나타나 분출 측의 민감도에 인입 측의 약 10배인 것이 나타났다.

이 논문에서는 CGA 기준 예제의 경우와 동일하게 스케줄 40 강관을 기준으로 배관의 압력강하율을 계산하였다. 실제 사용되고 있는 스테인리스 강관을 기준으로 계산한다면 압력강하율은 많이 감소할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20203010040010)

REFERENCES

- [1] MOTIE, KGS FP112, “Facility · Technical · Inspection · Supervision · Safety Assessment Code for Production of High-pressure Gases”, (2023)
- [2] MOTIE, “Additional Safety Standards for Liquefied Hydrogen Manufacturing Facilities, Technology, Inspection, Supervision, and Safety Evaluation”, (2023)
- [3] Derek M. Machalek, Gabriela B. Anleu, and Ethan S. Hecht, “Influence of Non-Equilibrium Conditions on Liquid Hydrogen Storage Tank Behavior”, ICHS, (2021)
- [4] Alice Schiaroli, Giordano E. Scarponi, Valerio Cozzani, and Federico Ustolin, “Numerical modeling of liquid hydrogen tanks performance during fire engulfment”, ESREL, (2023)
- [5] CGA, “CGA S-1.3-2020 Pressure Relief Device Standards - Part 3 - Stationary Storage Containers for Compressed Gases, Ninth Edition”, (2020)
- [6] Crane Co., “Crane TP-410 Flow of Fluids through Valves, Fittings, and Pipe”, (2018)