

저온 상태의 원자로 압력용기의 과압방지를 위한 압력방출밸브 용량 결정에 관한 연구

이준[†] · 김유^{*}

The Study on Sizing of the Pressure Relief Valve for Overpressure Protection of a Reactor Pressure Vessel in Low Temperature Condition

Lee, Jun[†] and Kim, Yoo^{*}

ABSTRACT

The purpose of this study is to present a methodology to estimate the capacity of the pressure relief valve which prevents overpressure of the pressure vessel in a cold state. In this methodology, the transient behavior of the flow rate through the pressure relief valve and the pressure inside the pressure vessel are considered. The result of this study shows the followings; The more the relief valve capacity is considered in excess, the more the initial relief flow rate and the initial pressure inside the pressure vessel are high and low respectively. When the relief valve capacity is determined properly, the pressure inside the pressure vessel maintains almost the same value, so the ASME code requirement will be met.

Key Words : Reactor Pressure Vessel (원자로압력용기), Pressure Relief Valve (압력방출밸브), LTOP(Low Temperature Overpressure Protection) (저온과압방지)

기호설명

A : 상수
M_t : t번째 시간 간격의 끝점에서의 용기내
질량(kg)
M_{t-1} : t번째 시간 간격의 시작점에서의 용기
내 질량(kg)
m : 펌프 질량유량(kg/sec)
m_{RV} : 방출밸브를 통해 나가는 질량유량(kg/sec)
P_{BP} : 축적 배압(build-up back pressure)
P_{RV, ACC} : 방출밸브 축압

P_{SET} : 방출밸브 설정압력
P_{SPRING} : 방출밸브 스프링 압력
Q_{RV, ASSUM.} : 가정한 방출용량(m³/hr)
ΔP_{LOSS} : 계통과 방출밸브 사이의 연결부에서의
압력 강하
Δ_t : 시간 증분(sec)

1. 서 론

일반적인 보일러 압력용기와 마찬가지로 원자로 압력용기(이하 “원자로용기” 또는 “용기”라고 한다.)도 고온상태 및 저온상태에서 과압방지 되도록 설계되어야 한다. 고온상태에서의 과압방지는 통상적으로 안전밸브에 의해 이루어지며 저온상태에서의 과압방지는 방출밸브에 의해 이루어진다.

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail : jlee@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2963 FAX : (042)868-8990

* 충남대학교 기계공학과

이러한 이유는 요건, 계통 요구조건, 밸브의 개방 특성 등이 고려되어 경험적으로 설계되어 왔다.

고온상태에서의 과압방지의 경우, 과압시 설계 압력의 110%를 넘지 않아야 한다¹⁾는 것이 요건이다. 고온상태에서의 계통은 과압시 원자로용기 내 냉각재의 많은 유출 없이 급속히 감압되어야 하며 충분히 감압되어야 하는 것이 계통 요구조건이다. 이를 위해 통상적으로 안전밸브가 설치된다. 안전밸브는 주로 증기 또는 기체를 방출하는데 사용되며 상대적으로 축압(accumulation pressure) 비율이 작고 감압(blowdown pressure) 비율이 크다.

저온상태에서의 과압방지의 경우, 원자로용기를 취성파괴로부터 보호하기 위해, 원자로용기가 저온 조건에 있을 때 최대 압력이 제한되어야 하며 따라서 최저 서비스 온도 조건 이하에서 운전될 때 원자로용기 압력이 정수압 시험 압력의 20%를 초과하지 않아야 한다²⁾는 것이 요건이다. 저온상태에서의 계통은 상기 요건을 충족시키는 한도 내에서 압력상태가 유지되어야 하는 것이 계통 요구조건이다. 이를 위해 통상적으로 방출밸브가 설치된다. 방출밸브는 주로 액체를 방출하는데 사용되며 상대적으로 축압 비율이 크고 감압 비율이 작다.

본 연구에서는 저온 상태의 원자로 압력용기의 과압방지를 위한 압력방출밸브 용량 결정에 관한 연구를 수행하였다. 방출밸브 용량 결정시는 주어진 기본 조건 및 가정사항을 기초로 하여 반복 계산함으로써 요구되는 하나의 추정 방출용량 값을 예측하여야 하는데 이 경우 예측된 방출용량이 합리적으로 예측되었는지에 대한 평가 기준을 제시하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다. 평가 기준에는 방출밸브가 개방된 후의 방출용량의 시간적 거동, 원자로용기내 압력의 시간적 거동 등이 검토되었다.

본 연구에서는 첫째, 저온상태에서의 과압방지 요건을 살펴보았다. 둘째, 과압방지 계산을 위한 기본 조건 및 가정을 기술하였다. 셋째, 계산절차에 대해 기술하였는데 방출밸브가 개방되기 전의 과압 과정과 개방된 후의 과압 과정을 분리하여 계산절차를 기술하였다. 마지막으로 결과 및 고찰, 결론에 대해 기술하였다.

2. 요 건

아래 (1), (2), (3)항은 원자로용기의 압력-온도 한계곡선을 생산하는데 필요하나 이중 (1), (2)항은 본 연구와 직접적으로 관련이 없으므로 자세한 내용은 참고문헌³⁾으로 처리하였다.

(1) 볼트체결 최소온도는 원칙적으로 ASME Code Section III, Appendix G, paragraph G-2222(c)에 따르며, 플랜지와 인접한 동체영역 응력과 연관되어 있다. ASME Code Section III, Appendix G는 플랜지와 인접 동체영역이 볼트에비하중과 가동전 계통수압시험 압력의 20%를 초과하지 않는 압력에 의한 응력을 받을 때, 이 응력을 받는 영역에서의 최소금속온도는 최소한 초기 기준 무연성 천이온도에 방사선 조사에 의한 값을 더하도록 규정하고 있다. 생산된 볼트체결 최소온도를 15.6°C (60°F)이다³⁾.

(2) 최저운전온도는 수압시험 압력의 20%를 초과할 때의 하한 운전온도로 규정하고 있다. 이 경우 노심부근 이외의 영역에서 기준 무연성 천이온도를 사용하므로 본 원자로의 최대 허용 기준 무연성 천이온도인 -12.2°C(10°F)를 고려하면 생산된 최저운전온도는 54.7°C(130.5°F)이다³⁾.

(3) 최저운전온도 이하 최대 허용압력은 가동전 계통수압시험 압력의 20%를 넘지 않는 값이며 본 원자로의 설계압력은 17 MPa이므로 최저운전온도 이하 최대 허용압력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{가동전 수압시험 압력의 } 20\% &= 0.2 \times (1.25 \times \text{설계압력}) \\ &= 0.2 \times 1.25 \times 17 \text{ MPa} = 4.25 \text{ MPa}^3) \end{aligned}$$

따라서 이 수치는 넘어서는 안되는 것이 ASME Code 요건이다.

여기에 압력계기 오차, 노심대 영역과 압력계기 탭 사이의 높이차 등 0.25 MPa을 고려하면 최종 최저운전온도 이하 최대 허용압력은 4.0 MPa이다. Fig. 1은 생산된 계통의 압력-온도 한계곡선을 나타낸다. 계통운전은 (1), (2)선 우측에서 운전되어야 하며 압력계기 오차, 노심부근 영역과 압력계기 탭 사이의 높이차 등이 고려된 (3)선 아래에서 저온 조건에서의 과압방지를 위한 방출밸브의 설정압력이 설정(3.2 (1)항) 되어야 한다.

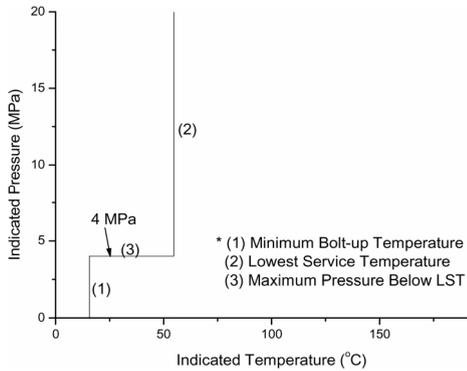


Fig. 1 System Pressure Temperature Limitations (Ex.)

3. 계산을 위한 기본 조건 및 가정사항

3.1 용기내 변수 관련

용기내 변수 관련하여 계산을 위한 기본 조건 및 가정사항은 다음과 같다.

- (1) 저온 조건에서의 용기내 물 체적은 11 m³ 이다.
- (2) 용기내 온도는 50 °C 라고 가정한다.
- (3) 용기내로의 질량 부가는 4대의 안전주입펌프(SIP) 및 2대의 충전펌프(MUP)의 비정상적인 작동을 가정한다.
- (4) 용기내에 부가되는 안전주입펌프 및 충전펌프 유량에 대한 최소 흡입 온도는 4 °C 라고 가정한다.
- (5) 충전펌프는 왕복동펌프 형태로 유량은 0.3 kg/sec 이며 고정 값이다. 안전주입펌프는 원심형 펌프 형태로 유량은 용기내 압력에 따라 변동되는 값이며, 참고로 용기내 초기 압력이 3 MPa인 경우 유량은 5.5 kg/sec 라고 가정한다.

3.2 방출밸브 변수 관련

방출밸브 변수 관련하여 계산을 위한 기본 조건 및 가정사항은 다음과 같다.

- (1) 최종 최저운전온도 이하 최대 허용압력 4.0 MPa(2.항)에서 가압기 상부와 방출밸브 사이의 높이 차 및 방출밸브 설정압력 오차허용도 등을 고려하여 최대 방출밸브 설정압력은 3.94 MPa 라고 가정한다.
- (2) 밸브가 개방될 경우 방출밸브를 통과하는 액체 질량을 최소화하기 위해 방출밸브 입구에서의

유체 온도는 200 °C 라고 가정한다.

(3) 방출밸브가 설정압력 위 10% 축압에서 완전 개방 위치까지 선형적으로 열린다고 가정한다.

(4) 배관 마찰 손실에 의한 압력 강하는 방출밸브를 통한 유량의 2승에 비례하고, 방출 압력은 설정압력의 110%를 넘지 않는다고 가정한다. 최대 배관 마찰 손실은 방출 압력의 3% 이다⁴⁾.

(5) 축적 배압은 유량의 2승에 비례하고, 최대 축적 배압은 0.3 MPa 이라고 가정한다.

(6) 참고적으로 반복 계산하여 예측한 방출용량은 144 m³/hr 이다.

4. 계산 절차

용기내 압력 과도상태는 작은 시간 간격 동안 여러가지 펌프들이 부적절하게 작동할 경우 용기내의 질량 균형에 근거하여 계산된다. 각각의 시간 증분 후에, 용기내 압력은 체적 변화에 따라 얻어진다. 용기내 액체 체적은 안전주입펌프/충전펌프 작동 및 방출밸브 개방으로 인한 용기내 질량 변화에 따라 변화된다.

4.1 방출밸브 개방 전

총 용기내 질량은 하나의 시간 간격의 시작 시점에서의 질량과 시간 간격 동안 4 대의 안전주입펌프 및 2 대의 충전펌프에 의해 부가된 질량의 합과 같다.

$$M_t = M_{t-1} + Total\ m_{SIP}\ \Delta t + Total\ m_{MUP}\ \Delta t \quad (1)$$

이후 상기 식에서 구한 질량과 초기 물 체적으로부터 비체적을 구한다. 그런 다음에 비체적과 초기 온도로부터 용기내 압력을 구하고 나아가 가압기 상부와 방출밸브 사이의 높이 차를 고려하여 방출밸브 입구 압력을 구한다. 방출밸브가 개방될 때 까지 반복한다.

4.2 방출밸브 개방 후

방출밸브가 개방된 후 그 때의 총 용기내 질량은 다음과 같다.

$$M_t = M_{t-1} + \text{Total } m_{SP} \Delta t \quad (2)$$

$$+ \text{Total } m_{MUP} \Delta t - m_{RV} \Delta t$$

방출밸브를 통해 나가는 질량유량을 구하는 절차는 여러 방법이 있으나^{5,6)} 여기에서는 다음과 같은 절차에 따라 계산하였다. Fig. 2는 방출밸브 개방압력 오차허용도 3% 및 축압 10%가 고려된 방출밸브 개방압력에 따른 노멀라이즈된 밸브 면적을 나타내고 있는데, 이 그림으로부터 방출밸브를 통해 나가는 체적유량을 밸브 면적 및 밸브 스프링 압력의 함수로서 기술하였다.

상기 3.2 (3)항의 가정에 의거, 방출밸브가 완전 개방 위치에 도달하기 전 까지, 방출밸브의 유동특성이 선형적이라는 전제 조건과 방출밸브의 스프링 상수(k)가 일정한 값을 가질 경우 밸브의 개도는 밸브 스프링 압력과 선형적인 관계를 가지는 전제 조건을 고려하면, Q_{RV} 및 δ_v 값을 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$Q_{RV} = Q_{RV, ASSUM.} \times \delta_v$$

$$\text{여기서, } \delta_v = \frac{(P_{SPRING} - P_{SET})}{(P_{RV, ACC.} - P_{SET})}, 0 \leq \delta_v \leq 1$$

따라서,

$$Q_{RV} = \frac{Q_{RV, ASSUM.}}{(P_{RV, ACC.} - P_{SET})} \times (P_{SPRING} - P_{SET}) \quad (3)$$

$$= A(P_{SPRING} - P_{SET})$$

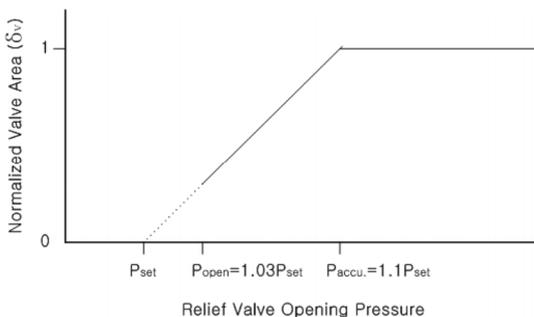


Fig. 2 Normalized Valve Area versus Relief Valve Opening Pressure

또한, 상기 3.2 (4), (5)항의 가정에 의거, 아래 (4), (5)식의 관계가 성립함을 알 수 있으며 나아가 (4), (5)식을 연립하여 정리하면 (6)식이 된다.

$$Q_{RV, ASSUM.}^2 : \Delta P_{LOSS, MAX} = Q_{RV}^2 : \Delta P_{LOSS} \quad (4)$$

$$Q_{RV, ASSUM.}^2 : P_{BP, MAX} = Q_{RV}^2 : P_{BP} \quad (5)$$

$$P_{BP} = (P_{BP, MAX} / \Delta P_{LOSS, MAX}) \Delta P_{LOSS} \quad (6)$$

여기서 MAX. 값은 모두 알고 있는 값이다.

그런데 방출밸브 입구 압력은 $P_{RV} = P_{SPRING} + P_{BP}$ 이므로

$$P_{SPRING} = P_{RV} - P_{BP} = P_{RV} - (6)식 \quad (7)$$

따라서 상기 식 (4) 및 (7)로부터 계통과 방출밸브 사이의 연결부에서의 압력 강하 및 방출밸브 스프링 압력을 구할 수 있으며, 계속하여 방출밸브 스프링 압력의 함수로서 방출밸브를 통해 나가는 체적유량 및 질량유량을 구할 수 있다.

방출밸브가 개방된 후 그 때의 총 용기내 질량 계산식에서 방출밸브를 통해 나가는 질량유량을 구하는 절차를 추가하는 것 이외의 나머지 절차는 방출밸브 개방 전의 절차와 동일하다.

5. 결과 및 고찰

저온 상태의 원자로 압력용기의 과압방지를 위한 압력방출밸브 용량 결정시 예측된 방출용량(3.2 (6)항)이 합리적으로 예측되었는지에 대한 평가 기준을 제시하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다. 평가 기준에는 방출밸브가 개방된 후의 방출용량의 시간적 거동, 원자로용기내 압력의 시간적 거동 등이 검토되었다.

계산을 위한 기본 조건 및 가정사항(3.항)을 근거로 하여 분석을 수행한 결과는 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 3은 방출용량 변화에 따른 시간 대비 방출량의 추이를 나타내고 있으며, Fig. 4는 방출용량 변화에 따른 시간 대비 용기내 압력

의 추이를 나타내고 있다.

Fig. 3에서는 방출용량이 적정용량 보다 큰 방출밸브를 사용할 경우는 초기 방출량이 크게 나타나고 있는 것은 일반적인 현상이다. 시간 간격 사이에서 방출량이 진동하고 있는데 이는 극히 짧은 시간동안에 발생하고 있기 때문에 수치적 현상으로부터 더 기인된 것으로 판단된다. 적정용량 보다 작은 방출밸브를 사용할 경우는 시간 간격 사이에서 방출량이 계속 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 적정용량의 방출밸브를 사용할 경우는 시간 간격 사이에서 방출량이 거의 일정하게 유지되고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에서는 Fig. 3에서의 상응하는 시간 간격에서의 용기내 압력의 추이를 비교하여 볼 수 있는데, 방출용량이 적정용량 보다 큰 방출밸브를 사용할 경우는 초기 용기내 압력이 낮게 나타나고 있는 것은 일반적인 현상이다. ASME Code 요건

측면에서 보면 요건은 충족시키고 있는 것을 알 수 있으나 용기내 물이 설계수준 이상으로 좀 더 방출되는 현상은 부정적인 요인이 될 것으로 판단된다. 적정용량 보다 작은 방출밸브를 사용할 경우는 시간 간격 사이에서 용기내 압력이 계속 증가하여 ASME Code 요건을 충족시키지 못하고 있는 것을 알 수 있다. 적정용량의 방출밸브를 사용할 경우는 시간 간격 사이에서 용기내 압력이 거의 일정하게 유지되고 있는 것을 알 수 있으며 따라서 ASME Code 요건을 충족시키고 있는 것을 알 수 있다.

결과적으로 시간 간격에 따라 계통과 방출밸브 사이의 연결부에서의 압력 강하 및 축적 배압 변수가 용기내 압력 변수와 연속적으로 상호 영향을 미치면서 나타나는 현상이라고 평가할 수 있다.

6. 결 론

저온 상태의 원자로 압력용기의 과압방지를 위한 압력방출밸브 용량 결정시 예측된 방출용량이 합리적으로 예측되었는지에 대한 평가 기준을 제시하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

방출용량이 적정용량 보다 큰 방출밸브를 사용할 경우는 적정용량 보다 크면 클수록 초기 방출량은 크게, 초기 용기내 압력은 낮게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 적정용량의 방출밸브를 사용할 경우는 시간 간격 사이에서 용기내 압력이 거의 일정하게 유지되고 있는 것을 알 수 있으며 따라서 ASME Code 요건을 충족시키고 있는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. "ASME Boiler and Pressure Vessel Code," Section III, NB-7311
2. "ASME Boiler and Pressure Vessel Code," Section III, NB-2322, 6221
3. J. O. Kim, 2003, "Procedure Development on Pressure-Temperature Limit Curve for SMART Reactor Pressure Vessel Beltline Using the Finite Element Method," KAERI/TR-2410-2003, KAERI

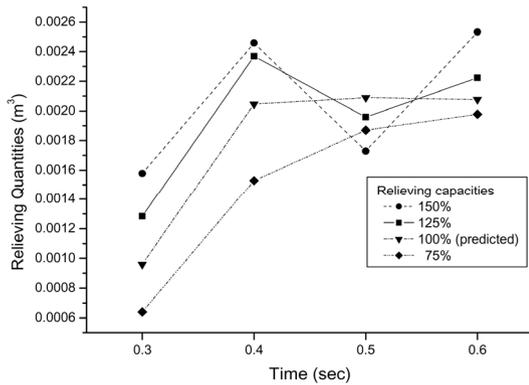


Fig. 3 Relieving Quantities vs. Time

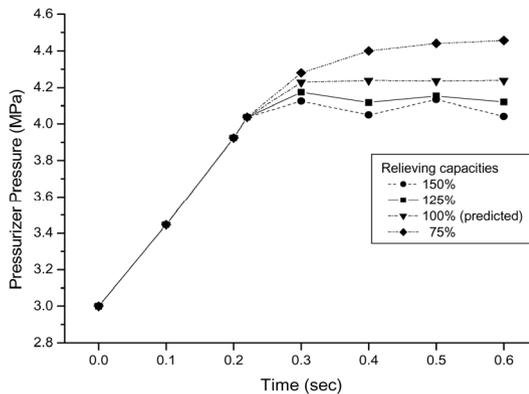


Fig. 4 Pressurizer Pressure vs. Time

4. "ASME Boiler and Pressure Vessel Code," Section III, NC-7141
5. CRANE CO., 1998, "Flow of Fluids, Through Valves, Fittings, and Pipe," Metric Edition-SI units, Chap. 2
6. R. J. Dodson and M. A. Feltus, 1996, "Low Temperature Overpressurization Protection System Setpoint Analysis Using RETRAN for SALEM," Ann. Nucl. Energy Vol. 23, No. 6, pp 487-498