

밀폐배관계에 있어서의 열팽창에 대한 안전설계 및 시스템 최적 설정에 관한 고찰

- A Study on Safety Engineering & System Optimization in the Closed Piping System -

차순철 *

Char Soon Chul

황순용 *

Hwang Soon Yong

강경식 **

Kang Kyung Sik

Abstract

To improve the practical application of the thermal expansion of closed long pipeline exposing to external heating sources such as solar energy, safety engineering and system optimization for relief valve in the closed piping system are suggested through theoretical approach, correlation in view of temperature and pressure increase caused by external solar energy in the closed piping system. The profile for thermal relief valve including relieving capacity, influx heat energy, sizing criteria, set pressure, selection against back pressure is also presented. It is noted that following topic on solar relief valve should be applied to engineering, installation and commissioning.

Keywords : 밀폐계 배관, 열팽창, 릴리프밸브(Relief Valve), 안전밸브(Safety Valve)

* 명지대학교 산업공학과 박사과정

** 명지대학교 안전경영연구소 소장

2007년 1월 접수; 2007년 2월 수정본 접수; 2007년 2월 게재확정

1. 서론

특히 장거리 배관 이송시설에서 태양열에 의한 에너지에 의하여 밀폐계 배관의 설계압력을 초과하여 배관시설이 파열하는 경우가 종종 발생한다.

배관시설은 액상 원자재가 부두나 인접 플랜트에서 저장시설이나 플랜트로 이송하거나, 생산된 액상 제품을 저장시설, 인접 플랜트, 부두시설에 접안해 있는 수송선으로 이송하게 된다. 이와 같은 장거리 밀폐계 배관시설은 액상 원료나 생산품을 채워둔 채 일정시간 외부 열원에 노출되는 경우가 발생되기도 한다. 배관시설이 외부의 열원에 노출되어 일정시간 경과하면 배관시설 내의 액체는 열팽창하게 되며, 따라서 액체팽창을 고려한 안전설비를 설계하지 않았을 경우 배관시설의 변형 및 파열로 인하여 화재, 인접시설의 파괴 등 상상을 초월한 재해를 유발시킬 수 있다.

안전설비로서 고려할 수 있는 방법은 릴리프밸브(Thermal Relief Valve)를 설치하거나 또는 구간별로 차단된 배관계의 액체를 드레인하는 방법 등이 주로 사용되고 있다. 그러나 드레인하는 방법은 운전원의 주의가 필요하며, 만약 부주의로 적절한 조치를 취하지 못했을 경우 대형사고의 발생요인이 되므로 근본적으로 릴리프밸브를 설치하여야 하는 것이 원칙이다.

따라서, 본 연구에서는 액체를 취급하는 배관계에서 어떻게 태양열에 의한 열팽창이 이루어지며 태양열원에 의한 온도상승과 압력상승과의 이론적인 상관관계와 열팽창용 안전밸브의 설치대상을 고찰하였다.

2. 본론

2.1 용어의 정의

- 1) "릴리프 밸브(Relief valve)"라 함은 열팽창용 안전밸브를 말한다.
- 2) "열팽창용 안전밸브(Thermal relief valve or solar relief valve)"라 함은 2개 이상의 밸브 또는 맹판(Blind flange)등으로 차단된 배관 내의 액체가 외부 열원에 의한 열팽창으로 인해 배관이 파열되는 것을 방지하기 위하여 설치하는 안전밸브를 말한다.
- 3) "열원"이라 함은 태양열, 수증기, 열매유, 전기 등과 같이 내부 액체의 온도를 상승시킬 수 있는 에너지 발생원을 말한다.
- 4) "배관계"라 함은 열원에 의하여 액체가 가열되는 가열로, 열교환기, 용기 등 화학설비를 포함한 배관 시스템을 말한다.
- 5) "상변화(Phase change)"라 함은 액체가 증기 또는 액체의 일부가 증기로 기화하는 상태변화를 말한다.
- 6) "최대허용사용압력(MAWP; Maximum allowable working pressure)"이라 함은 용기, 배관, 밸브, 플랜지 등의 제작에 사용된 재질의 두께(부식여유 제외)를 기준하여

산출된 사용 가능한 최고의 압력을 말한다.

7) "설정압력(Set pressure)"이라 함은 안전밸브의 설계상 정한 분출압력 또는 분출개시 압력으로서 안전밸브 명판에 표시된 압력을 말한다.

8) "배압(Back pressure)"이라 함은 안전밸브의 토출측에 역으로 걸리는 압력을 말한다.

2.2 이론적 접근

밀폐계 배관시설 내의 액체는 온도가 상승하면 부피가 팽창하고 배관시설의 팽창보다 클 경우에 압력이 기하급수적으로 증가하게 된다. 화공열역학의 액체 부피와 온도, 압력과의 관계는 다음 식과 같다[8,10,11,12].

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T dP \dots\dots\dots (2.2.1)$$

액체의 부피인 V로 나누면

$$\frac{dV}{V} = \left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T dP \dots\dots\dots (2.2.2)$$

식 (2.2.2)에서 $\left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$ 는 온도증가에 따른 등압부피팽창계수(Liquid Thermal Expansion Coefficients)이고, $\left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$ 는 압력증가에 따른 등온압축상수(Liquid Isothermal Compressibilities)이다.

$$\left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = A \dots\dots\dots (2.2.3)$$

$$-\left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T = B \dots\dots\dots (2.2.4)$$

로 한다면 식 (2.2.2)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{dV}{V} = AdT - BdP \dots\dots\dots (2.2.5)$$

액체에서는 온도변화와 압력변화에 따른 부피변화는 극히 작으므로 $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \approx 0$, $\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \approx 0$ 이다. 그러므로 식 (2.2.5)는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = A(T_2 - T_1) - B(P_2 - P_1) \dots\dots\dots (2.2.6)$$

또한 폐쇄된 배관계 내에서 온도 및 압력변화에 따른 액체의 부피변화도 무시될 수 있으므로 즉, 식 (2.2.6)에서 $V_2 = V_1$ 이므로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_2 - P_1 = \frac{A(T_2 - T_1)}{B} \dots\dots\dots (2.2.7)$$

또한 식 (2.2.6)에서 온도변화에 따른 배관내의 압력변화가 없을 때 부피변화가 어떻

계 일어나는가를 예측할 수 있으며, 이때 $B(P_2 - P_1) = 0$ 이다. 따라서 식 (2.2.6)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = A(T_2 - T_1) \dots\dots\dots (2.2.8)$$

또한 $V_2 - V_1 \approx 0$ 이므로 식 (2.2.8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_2 - V_1}{V} = A(T_2 - T_1) \dots\dots\dots (2.2.9)$$

온도에 따른 부피변화는 식 (2.2.9)와 같으며, 상수 A, B는 Perry Handbook[2] Table 3-147, 3-175에 나타나 있다. 또한 Data book on Hydrocarbons[9]은 압력별로 부피팽창을 보여주고 있다.

일반적으로 액체의 부피팽창계수는 배관자체가 갖는 부피팽창계수보다 높으므로 폐쇄된 배관 내에서 외부로부터 열이 전달될 때 압력이 상승하게 된다. 특히 배관계의 설계압력보다 액체의 팽창으로 인한 압력이 높아질 경우 배관계가 파열되거나 또는 플랜지, 밸브의 개스킷 및 밸브 실링재료의 손상이 일어난다. 이러한 손상 및 파열로 인하여 해양오염, 화재 등의 손실은 예측할 수 없는 재난을 초래한다. 따라서 이러한 재난을 방지하기 위해서는 설계단계에서부터 철저한 공정위험성평가를 수행하여 안전 설비를 확인해야 할 것이다.

2.3 태양열에 의한 배관계의 온도 및 압력 상승에 관한 고찰

태양 복사에너지는 지역에 따라 다소 차이가 나며, 대기 중의 오염물질의 유무나 혹은 농도 차이에 따라 영향을 받는다. 일반적으로 678~813 kcal/m²·hr 이다. 그리고 배관시설이 지하에 매설되었거나 또는 보온을 한 배관은 태양열에 의한 온도상승의 영향이 작으므로 고려하지 않는다.

태양열에 의해 영향을 받는 면적은 태양과 직각으로 만나는 직사각형의 면적(원통형 일 경우)을 노출면적으로 계산하여야 하며, 방사율(Emissivity)은 물질에 따라 다르나 배관계에서는 1.0으로 보는 것이 통상적이다.

날씨가 맑은 날 배관계가 최고대기온도에 도달할 때까지는 외부로 열손실(Heat loss)이 일어나지 않고 열축적(Heat accumulation)만 일어나며, 열 축적은 태양복사에너지와 전도의 함수로 표현되고, 대류는 무시한다.

태양열에 의한 배관계의 도달할 수 있는 최고온도를 산출하는 방법은 먼저 배관계가 최고대기온도까지 도달하는 시간을 다음과 같이 산출한다.

$$Q_S = R_S \times A_r \dots\dots\dots (2.3.1)$$

$$Q_P = (C_{P_i} W_i + C_{P_p} W_p)(T_a - T_p) \dots\dots\dots (2.3.2)$$

$$H = \frac{Q_P}{Q_S} \dots\dots\dots (2.3.3)$$

배관계가 최고대기온도에 도달한 이후, 태양열에 의해 최고온도에 도달하는 경우는 배관계가 태양복사에너지를 받고 동시에 배관계 자체는 대류와 복사에 의해 대기열을 방출하게 된다. 따라서 배관계의 열손실은 에너지는 다음과 같다.

$$Q_l = Q_{cov} + Q_{rad} \dots\dots\dots (2.3.4)$$

또한, 배관계가 최고의 온도로 상승할 수 있는 한계는 태양복사에너지로 인한 배관계의 열유입(Heat gain)과 열손실(Heat loss)이 동일할 때까지이며, 이 때 온도가 최대 로 상승한다.

$$\text{즉, } Q_s = Q_l \dots\dots\dots (2.3.5)$$

따라서, 배관계의 열손실에 관한 대류와 복사에 관한 식은 다음과 같다[5].

$$Q_{cov} = 0.5 \left(\frac{1}{D} \right)^{0.25} (\Delta T)^{1.25} A_c \dots\dots\dots (2.3.6)$$

$$Q_{rad} = 0.1724 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] A_h \dots\dots\dots (2.3.7)$$

태양열에 의한 배관계의 열유입과 열손실이 같아질 때 배관계가 최고온도에 도달하 므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{solar} = Q_{cov} + Q_{rad} \dots\dots\dots (2.3.8)$$

식 (2.3.1), 식 (2.3.4), 식 (2.3.6), 식 (2.3.7) 및 식 (2.3.8)을 정리하면 다음과 같다.

$$R_s \times A_r = 0.5 \left(\frac{1}{D} \right)^{0.25} (\Delta T)^{1.25} A_c + 0.1724 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] A_h \dots\dots (2.3.9)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 \dots\dots\dots (2.3.10)$$

이때 ΔT는 시행오차법에 의해 산출된다.

2.4 릴리프밸브(Thermal Relief Valve) 설치대상 및 설치제외대상

2.4.1 설치대상

열팽창용 안전밸브는 인화성 물질, 가연성 가스, 독성물질 및 물 등 액체 상태로 취급하 는 배관계가 2개의 밸브로 차단되어 다음과 같은 열원에 의해 가열되는 경우에 설치한다.

- 1) 식 (2.2.7)에서 계산한 압력이 시설의 최대허용사용압력(MAWP) 보다 클 경우
- 2) 가열로 또는 열교환기와 같은 공정열
- 3) 수증기, 열매유, 또는 전기에 의한 배관 가열
- 4) 태양의 복사열
- 5) 대기온도 상승

2.4.2 설치제외대상

- 1) 식 (2.2.7)에서 계산한 압력이 시설의 최대허용사용압력(MAWP) 보다 작을 경우, 그리고 플랜트엔지니어링 실무에서는 다음과 같은 경우에 릴리프밸브의 설치제외대상으로 간주한다.
- 2) 차단된 배관계에 열팽창을 흡수할 수 있는 용기를 설치하는 경우
- 3) 액체의 흐름이 완전히 차단되지 않도록 밸브 자체에 기계적 조치 등을 한 경우
- 4) 전기 등을 이용하여 배관계를 가열할 때 배관내의 액체가 운전온도 이상으로 과열되지 않도록 온도 조절장치 또는 전원 차단장치를 설치한 경우
- 5) 태양의 복사열 또는 대기온도 상승에 의한 열원이 배관계 내로 유입되는 것을 방지할 수 있도록 배관을 지하에 매설한 경우
- 6) 부지경계 내의 배관계에 차단밸브가 설치되어 있으나 기기에 Pressure Relieving 설비가 부착되어 있는 경우
- 7) Rundown 탱크 시설에서 배관길이가 120 m를 초과하지 않는 경우
- 8) 배관집합관(Manifold)에서 밸브 사이의 거리가 80 m 이하이며, 150 lb solid wedge gate valve일 경우
- 9) 항상 65 °C 이상의 고온액체가 흐를 경우
- 10) 가스배관 혹은 Two Phase 배관

3. 결 론

본 연구에서는 배관계의 열팽창, 압력상승과의 상관관계 및 태양 열원에 의한 밀폐 배관계의 온도상승이 어떻게 이루어지는가를 이론적으로 고찰하였다.

상기 2항의 식 (2.2.7), (2.2.9), (2.3.10)으로부터 밀폐배관계 내 물질의 태양열에 의한 온도상승과 부피증가에 따른 배관 내 압력을 계산할 수 있고, 또한 산출된 압력(P2)이 배관계의 최고허용사용압력(MAWP)보다 클 경우에는 릴리프밸브를 설치하여야 함을 알 수 있다.

즉, 식 (2.2.7)에 의해 액체의 온도변화에 따른 열팽창으로 인한 압력변화를 예측할 수 있고 열팽창으로 인한 압력(P2)이 최대허용사용압력(MAWP) 이하이면 릴리프 밸브를 설치 않아도 됨을 알 수 있다.

특히, 석유화학플랜트처럼 파이프 외경이 크지 않고 길이도 짧은 경우에 잦은 릴리프밸브의 개방으로 인한 문제점이 발생되고 있으며, 이는 설정압력이 잘못되었거나 배압으로 인한 문제일 것으로 판단되기 때문에 릴리프밸브의 배출 배관의 시스템 구성, 배압의 크기에 따른 릴리프밸브의 선정에 유의하여야 하며, 밀폐배관계에서의 열팽창 배관에 대하여 특히 global engineering practice guideline인 API Code 520 및 521과 KOSHA Code D-27-2002에 준하여 안전설계 및 시스템 최적설정을 수행하여야 할 것이다.

Nomenclature

A	:	등압부피팽창계수 (1/F)
A_c	:	배관의 외부면적
A_h	:	배관의 외부면적의 1/2
A_r	:	배관 측면의 Cross Sectional Area
B	:	등온압축상수 (1/psia)
C_{P_a}	:	$C_{P_i} \times W_i + C_{P_p} \times W_p$
C_{P_i}	:	배관 내 액체의 열용량
C_{P_p}	:	배관 자체의 열용량
D	:	관경
H	:	배관계가 최고대기온도까지 걸리는 시간
Q_{acc}	:	열축적
Q_{cov}	:	배관계의 대류에 의한 열손실
Q_i	:	배관계의 열손실
Q_p	:	배관 자체 및 배관내에 있는 액체의 일정온도 상승을 위한 열용량
Q_{rad}	:	배관계의 복사에 의한 열손실
Q_s	:	태양열에 의한 복사에너지
R_s	:	단위면적당 태양열에 의한 복사에너지
T	:	배관계 내의 액체온도
T_1	:	최고대기온도 (절대온도)
T_2	:	배관계의 온도 (절대온도)
T_a	:	최고대기온도
T_p	:	배관계의 초기 온도
V	:	배관계 내의 액체의 부피, 배관계의 부피
W_i	:	배관 내 액체의 중량
W_p	:	배관의 중량
ΔP	:	압력차
ΔT	:	배관계의 온도와 최고온도와의 차이
dV	:	배관계 내의 액체부피 변화
dT	:	배관계 내의 액체온도 변화
dP	:	배관계 내의 액체압력 변화

4. 참고 문헌

- [1] KOSHA Code D-27-2002 "열팽창용 안전밸브의 기술지침"
- [2] Kellogg, U.S.A "Utility manual", 1980
- [3] Kellogg, U.S.A "Engineering Guideline", 1980
- [4] Chemical Engineering, "Safer Relief Valve Sizing", Chemical Engineering, 1989
- [5] John H. Perry, "Perry's Chemical Engineers Handbook", 6th Ed., 1984
- [6] "Effective Pressure Relief of Offsite Piping", Hydrocarbon Processing, 1982
- [7] Chemical Engineering, "Are Liquid Thermal Relief Valves Needed?", Chemical Engineering, 1984
- [8] American Petroleum Institute, "Liquid Expansion", API RP 520 & API RP 521 Appendix C
- [9] J. B. Maxwell, "Data Book on Hydrocarbons", pp 143-147
- [10] Wayne C. Edmister, Byung Ik Lee, "Applied Hydrocarbon Thermodynamics", Vol.1, 2nd Ed., 1984
- [11] J. M. Smith, "Chemical Engineering Thermodynamics"
- [12] "Relieving Thermal Expansion of Liquids Engineering in Piping", Aramco Engineering Standards, AES-L-19

저 자 소 개

차 순 철 : 기술사사무소 차스텍이앤씨(주) 대표, 화학장치설비기술사, 화학공장설계기술사, 화공안전기술사, 소방기술사, 가스기술사, 산업안전지도사(화공안전), 관심분야는 플랜트공정설계, 공정시스템의 위험성평가, 방폭 및 내화구조

황 순 용 : 한국산업안전공단 국장(1급), 화공안전기술사, 관심분야는 중대산업사고 예방 및 완화대책, 방폭 및 내화구조

강 경 식 : 현 명지대학교 산업공학과 교수, 명지대학교 안전경영연구소 소장, 명지대학교 산업대학원 원장, 대한안전경영과학회 회장, 경영학박사, 공학박사

저 자 주 소

차 순 철 : 서울시 서초구 양재1동 64-2 양재대일빌라 2차 101호

황 순 용 : 서울시 강남구 도곡1동 895-8 역삼한신아파트 2동 801호

강 경 식 : 경기도 성남시 분당구 정자1동 파크뷰 APT 611동 3103호