

화학플랜트에서의 릴리프밸브 설계에 관한 고찰 -A Study on Engineering Design & Installation of Thermal Relief Valve in a Chemical Plant-

차 순 철 *

Char Soon Chul

황 순 용 **

Hwang Soon Yong

장 서 일 ***

Jang Seo Il

Abstract

Based on the practical process engineering design and commissioning and startup operation experiences focused on chemical process safety, the comprehensive review of engineering design and installation of the thermal relief valve with its surrounding facility in a chemical plant piping system is provided to enhance the better understanding of the piping system of characteristics of thermal relief valve which is comprised of the theoretical approach, correlation in terms of temperature and pressure increase caused by external heat supply in a piping system, consideration of thermal relief valve engineering design, pressure relieving system of serial thermal relief valves and exception of their installation.

It is earnestly suggested that following topic should be implemented during thermal relief valve engineering design, installation and normal operation as well.

Keywords: reliefvalve, TRV, externalheat, chemicalplant

* 기술사사무소 차스텍이앤씨(주) 대표, 화학장치설비기술사, 화학공장설계기술사, 화공안전기술사, 소방기술사, 가스기술사, 산업안전지도사(화공안전)

** 한국산업안전공단 여수중방센터 팀장, 화공안전기술사

*** 명지대학교 리서치파크 전임연구원(공학박사)

2006년 7월접수; 2006년 8월 수정본 접수; 2006년 8월 게재확정

1. 서론

오일 및 가스 플랜트, 정유 및 석유화학 플랜트, 저유시설 및 장거리 배관 이송시설 등을 포함하는 화학플랜트에서 배관시설과 관련된 안전설비를 충분히 검토하지 않거나, 다른 시설에 있는 안전설비를 검증 없이 참조하여 설계하는 경우가 아직도 상존하고 있다.

배관시설은 액상 원자재가 부두나 인접 플랜트에서 저장시설이나 플랜트로 이송하거나, 생산된 액상 제품을 저장시설, 인접 플랜트, 부두시설에 접안해 있는 배로 이송하게 된다. 이와 같은 배관시설은 현장에서 연속운전 되지만 정비 또는 특수한 경우에 일정시간대만 운전되거나, 액상 원료나 생산품을 채워둔 채 일정시간 외부 열원에 노출되는 경우가 발생되기도 한다. 이와 같이 배관시설이 외부의 열원에 노출되어 일정시간 경과하면 배관시설 내의 액체는 팽창하게 되며, 따라서 액체팽창을 고려한 적정안전설비를 설계하지 않았을 경우 배관시설의 변형 및 파열로 인하여 화재, 인접시설의 파괴, 환경오염(특히 해양) 및 자원의 낭비 등 상상을 초월한 재해를 불러일으킬 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 설치하여야만 하는 것이 원칙이다.

따라서, 본 연구에서는 배관시설에서 운전의 편의, 증설 또는 보수를 위하여 차단밸브(Block Valve)를 필요한 지점마다 설치했을 경우 어떻게 열팽창이 이루어지며, 압력상승과의 상관관계 및 외부 열원에 의한 배관계의 온도상승은 어떻게 이루어지는가를 이론적으로 고찰하고, 설계에 대한 Rule of Thumb을 간단히 서술하고자 한다.

2. 본론

2.1. 이론적 접근

폐쇄되어 있는 배관시설 내의 액체는 온도가 상승하면 부피가 팽창하고 배관시설의 팽창보다 클 경우에 압력이 기하급수적으로 증가하게 된다. 화공열역학의 액체 부피와 온도, 압력과의 관계는 다음 식과 같다[5,7,8,9].

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T dP \quad \dots\dots\dots (2.1.1)$$

액체의 부피인 V로 나누면

$$\frac{dV}{V} = \left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T dP \dots\dots\dots (2.1.2)$$

식 (2.1.2)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.

$$\left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = A \dots\dots\dots (2.1.3)$$

$$-\left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T = B \dots\dots\dots (2.1.4)$$

로 한다면 식 (2.1.2)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{dV}{V} = AdT - BdP \dots\dots\dots (2.1.5)$$

액체에서는 온도변화와 압력변화에 따른 부피변화는 [그림 1]에서와 같이 극히 작으므로 $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \cong 0$, $\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \cong 0$ 이다. 그러므로 식 (2.1.5)는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = A(T_2 - T_1) - B(P_2 - P_1) \dots\dots\dots (2.1.6)$$

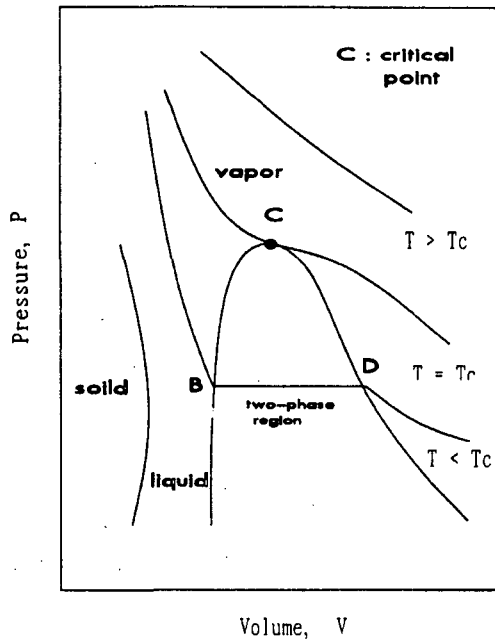
또한 폐쇄된 배관계 내에서 온도 및 압력변화에 따른 액체의 부피변화도 무시될 수 있으므로 식 (2.1.6)에서 $V_2 = V_1$ 이므로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_2 - P_1 = \frac{A(T_2 - T_1)}{B} \dots\dots\dots (2.1.7)$$

따라서, 식 (2.1.7)에 의해 액체의 온도변화에 따른 열팽창으로 인한 압력변화를 예측할 수 있다. 또한 식 (2.1.6)에서 온도변화에 따른 배관내의 압력변화가 없을 때 부피변화가 어떻게 일어나는가를 예측할 수 있으며, 이때 $B(P_2 - P_1) = 0$ 이다. 따라서 식

(2.1.6)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = A(T_2 - T_1) \dots\dots\dots (2.1.8)$$



<그림 1> 압력과 부피간의 각 Phase별 온도와의 관계도[8].

또한 $V_2 - V_1 \approx 0$ 이므로 식 (2.1.8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_2 - V_1}{V} = A(T_2 - T_1) \dots\dots\dots (2.1.9)$$

온도에 따른 부피변화는 식 (2.1.9)와 같으며, 상수 A, B는 Perry Handbook[2] Table 3-147, 3-175에 나타나 있다. 또한 Data book on Hydrocarbon[6]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 HAZOP Study를 수행하여 안전 설비를 확인해야 할 것이다.

설계 시 특히 고려할 사항은 릴리프밸브의 크기도 중요하지만 릴리프밸브의 배압에 관한 주의가 특히 요망된다.

2.2. 외부 열에 의한 배관계의 온도 상승에 관한 고찰

2.2.1. 태양열에 의한 온도 및 압력 상승

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 고려치 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 표현되며, 대류는 고려하지 않는다.

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

$$Q_S = R_S \times A_r \dots\dots\dots (2.2.1)$$

$$Q_P = (C_{P_l} W_l + C_{P_p} W_p)(T_a - T_p) \dots\dots\dots (2.2.2)$$

$$H = \frac{Q_P}{Q_S} \dots\dots\dots (2.2.3)$$

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.

$$Q_l = Q_{cov} + Q_{rad} \dots\dots\dots (2.2.4)$$

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

$$\text{즉, } Q_S = Q_l \dots\dots\dots (2.2.5)$$

따라서, 배관계의 열손실에 관한 대류와 복사에 관한 식은 다음과 같다[2].

$$Q_{cov} = 0.5 \left(\frac{1}{D} \right)^{0.25} (\Delta T)^{1.25} A_c \dots\dots\dots (2.2.6)$$

$$Q_{rad} = 0.1724 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] A_h \dots\dots\dots (2.2.7)$$

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

$$Q_{solar} = Q_{cov} + Q_{rad} \dots\dots\dots (2.2.8)$$

식 (2.2.1), 식 (2.2.4), 식 (2.2.6), 식 (2.2.7) 및 식 (2.2.8)을 정리하면 다음과 같다.

$$R_s \times A_r = 0.5 \left(\frac{1}{D} \right)^{0.25} (\Delta T)^{1.25} A_c + 0.1724 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] A_h \dots\dots\dots (2.2.9)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 \dots\dots\dots (2.2.10)$$

이때 ΔT 는 시행오차법에 의해 산출된다.

그리고 배관계가 최고대기온도에서 최고온도까지 상승하는데 걸리는 시간은 이미 언급한 바와 같이 배관계는 온도가 대기온도와 같아지면 이후 태양열에 의한 열유입도 일어나지만, 배관계 자체에 의한 대기로의 복사와 대류에 의해 열손실 현상이 일어난다. 배관계의 온도상승은 열유입과 열손실이 같아지는 온도 즉 열축적(Heat Accumulation)이 일어나지 않는 점까지 도달한다.

배관계에 축적된 열은

Heat acc = Heat gain - Heat loss 이므로

$$Q_{acc} = Q_S - Q_{cov} - Q_{rad} \dots\dots\dots (2.2.11)$$

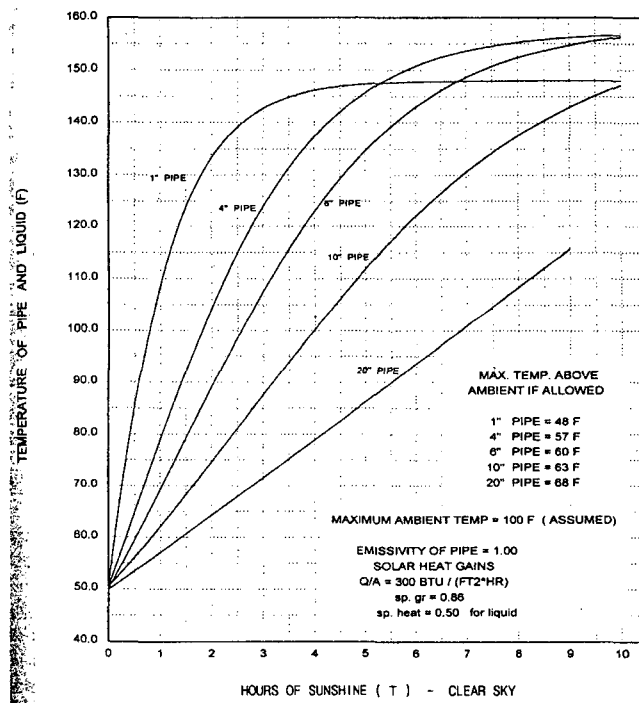
$$= C_{P_a} \Delta t \dots\dots\dots (2.2.12)$$

$$\Delta t_i = \frac{Q_{acc}}{C_{P_a}} \dots\dots\dots (2.2.13)$$

$$\Delta T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots\dots\dots (2.2.14)$$

매 시간마다 배관계의 온도상승은 식 (2.2.13)에 의해 Δt_i 를 산출하여 식 (2.2.10)과 같아질 때까지 시간의 합을 산출하면 배관계가 대기온도까지 상승하여 최고의 온도까지 도달하는 시간을 알 수 있다. 전체 시간의 합은 식 (2.2.3)과 식 (2.2.13)을 이용하여 식 (2.2.10)을 만족할 때까지 걸리는 시간의 합임을 알 수 있다.

또한, $\Delta T = T_2 - T_1$ 이므로 식 (2.1.7)에 의해 온도의 변화에 따른 압력상승을 산출할 수 있다. 태양노출시간에 따른 배관의 온도분포를 <그림 2>에 나타내었다.



<그림 2> 태양노출시간에 따른 배관의 온도분포[9].

2.2.2 태양열 외의 열원에 의한 온도 및 압력 상승

최저온 액체가 흐르는 관에 보냉(Cold Insulation)이 되어 있을 경우, 보냉의 결함 등의 요인에 의해 외부열의 침입이 예상되므로 반드시 릴리프밸브를 설치하여야 하며 [4], 또한 스팀트레이싱이 된 배관계, 주변의 고온장치에 노출되어 있는 배관계, 열교환기 내부의 튜브의 파손으로 인해 냉각유체가 흐르는 배관계 등은 릴리프밸브의 설계를 고려하여야만 한다. 또한 전기트레이싱(Electrical Tracing)의 경우도 배관계의 온도가 설정온도까지 상승하므로 이에 대한 검토가 요구된다. 각 경우별로 온도상승 및 압력상승은 위에서 고찰한 방법을 이용하면 어느 경우이건 계산할 수 있다.

2.3 릴리프밸브(Thermal Relief Valve)의 설계 시 고려사항

통상적으로 부지경계(Battery Limit) 내에서의 릴리프밸브의 크기는 4"×1"이면 충분하나, 대륙을 횡단하는 장거리 라인일 경우는 다음과 같이 구분하여 고려한다[1].

- 22" ~ 24" 파이프 외경, 20 마일까지의 길이인 경우
: 1" × 1½" 밸브 하나로 충분함.
- 24" ~ 30" 파이프 외경, 20 마일까지의 길이인 경우
: 1½" × 2" 밸브 하나로 충분함.
- 30" 이상 파이프 외경, 20 마일까지의 길이인 경우
: 2" × 3" 밸브 하나로 충분함.

그러나 석유화학 플랜트처럼 파이프 외경이 크지 않고 길이도 짧은 경우에 작은 릴리프밸브의 개방으로 인한 문제점이 발생되고 있다. 이는 설정압력(Setting Pressure)이 잘못되었거나 배압(Back Pressure)으로 인한 문제일 것으로 판단되어 진다. 특히 배압은 릴리프밸브의 배출 배관의 시스템 구성을 어떻게 하느냐에 좌우되며, 배압의 크기에 따라 릴리프밸브의 타입 및 크기가 달라질 수 있으므로 선정 시에 유의를 요한다.

2.4 릴리프밸브(Thermal Relief Valve)의 안전공학 면에서의 압력배출시스템

릴리프밸브의 선정이 잘못되었을 경우에 배관계의 압력이 갑작스럽게 상승되거나 릴리프밸브의 작은 개폐가 종종 발생하곤 한다. 이로 인하여 시스템 압력의 불안정, 배관시설의 진동 및 파손을 야기할 수 있다. 이와 같은 사고의 원인은 통상 릴리프밸브의 크기의 부족, 배출 배관계의 설계오류로 인한 배압의 상승이 액체를 충분히 방출하지 못함에 있다. 따라서 배압이 있을 경우 밸브 타입 및 크기를 선정하는데 신중을 기하여야 한다[4].

예로써 <그림 3>처럼 탱크로부터 부두에 접안해 있는 배에 유류를 로딩>Loading>하는 하역시설에서 각 릴리프밸브의 용량이 배압에 어떤 영향을 고찰해 본 결과, 다음과 같았다.

먼저, 차단밸브 간 배관길이가 같다고 가정하면 PSV-1의 릴리프밸브의 크기는 적어도 Cross Sectional Area에서 PSV-3의 크기보다 3배가 커야한다고 생각할 수 있다. 이와 같은 가정은 배압이 같다고 할 때 성립할 수 있다. 그러나 PSV-1의 배압은 탱크 레벨인 1.5 bar로 가정하고 설정압을 8.5 bar라고 한다면 PSV-1의 ΔP 는 $8.5 - 1.5 =$

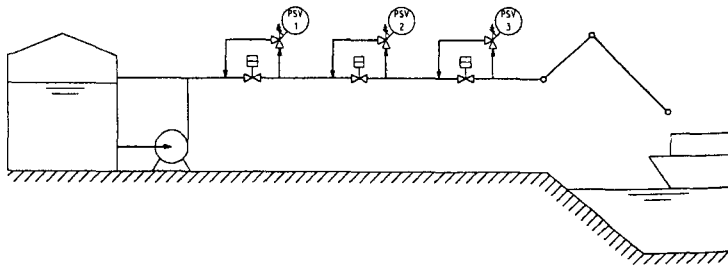
7 bar이다. PSV-2의 경우 똑같은 크기라면 ΔP 는 $Q = CA\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$ 에 의해 $7 \times \frac{4}{9} = 3.1$

우 똑같은 크기라면 ΔP 는 $7 \times \frac{1}{9} = 0.8$ bar이므로 설정압은 $11.6 + 0.8 = 12.4$ bar이다.

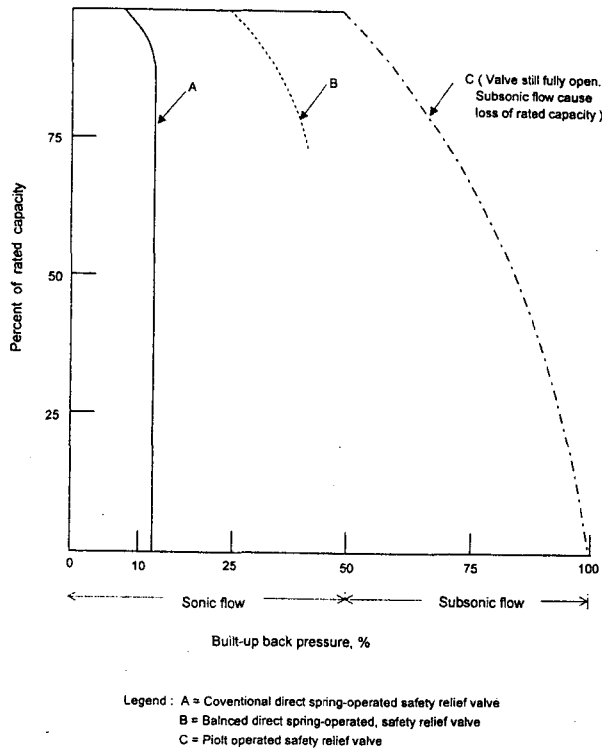
릴리프밸브의 타입은 <그림 4>에서 보는 바와 같이 conventional direct spring operated safety relief valve는 배압이 설정압의 10% 이상을 허용하지 못하며, balanced direct spring operated safety relief valve는 배압이 설정압의 25%까지만 허용되며, pilot operated safety relief valve는 배압이 설정압의 50%까지 허용됨을 알 수 있다.

PSV-1의 경우 배압은 설정압의 17.6%, PSV-2는 배압이 설정압의 73%, PSV-3은 배압이 설정압의 94%임을 알 수 있다. 따라서 <그림 4>에서 PSV-1은 balanced direct spring operated safety relief valve 타입일 경우, 운전조건을 만족시킬 수 있으나 PSV-2와 PSV-3는 배압이 너무 크므로 적절한 타입의 밸브가 없다. 그러므로 PSV-2와 PSV-3은 정상적으로 작동이 어려우며, 이러한 밸브를 설치했을 경우 사고의 위험을 초래한다. 정상적인 작동을 위해선 PSV-2 와 PSV-3의 설정압을 높여서 배압분율이 적어도 50% 이하가 되도록 하여야만 적절한 밸브타입을 선정할 수가 있다.

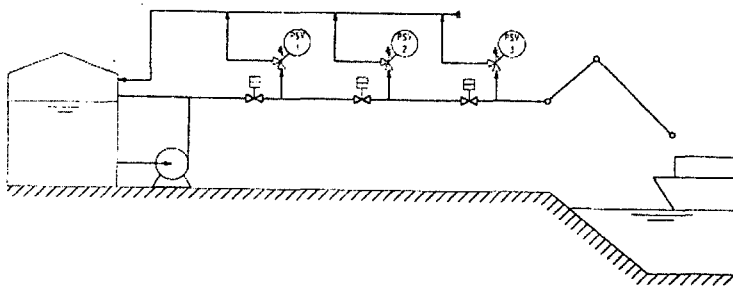
그러나 배압분율을 낮추기 위해서 설정압을 높일 경우 배관 시스템의 설계압력을 높여야 한다는 것을 간과해서는 안된다. 가장 이상적인 방법은 릴리프밸브의 배출 배관 시스템을 분리 설치하여 배압을 낮추어 주는 것이다.



<그림 3> 릴리프밸브의 배출라인집합관을 설치하지 않은 유류하역시설.



<그림 4> 릴리프밸브의 배압에 따른 타입별 용량의 변화도.
 (Typical back pressure vs. capacity, 10% overpressure)



<그림 5> 릴리프밸브의 배출라인집합관을 설치한 유류하역시설

<그림 5>에서와 같이 배출 배관 시스템을 분리하여 설치할 경우, 밸브크기, 설정압력, 파이프의 설계압력 및 타입 선정이 더욱 용이하다는 것을 알 수 있다. 어느 경우이건 직렬식으로 릴리프밸브의 배출 배관을 연결하는 것은 바람직하지 못하다. 특히 Hydrocarbon Processing (May 1982) 중 Effective Pressure Relief of Offsite Piping에

관한 내용에서 (page 214) 1. Blow to Upstream Case는 릴리프밸브의 배압에 의한 특성을 고려하지 않고 기술한 내용이므로 설계 시에 주의를 요한다[3].

2.5 릴리프밸브(Thermal Relief Valve) 설치 시의 예외사항

배관계에서 릴리프밸브의 설치를 고려하지 않아도 되는 경우는 다음과 같다.

- 부지경계 내의 배관계에 차단밸브가 설치되어 있으나 기기에 Pressure Relieving 설비가 부착되어 있는 경우
- Rundown 탱크 시설에서 배관길이가 120 m를 초과하지 않는 경우
- 배관집합관(Manifold)에서 밸브 사이의 거리가 80 m 이하이며, 150 lb solid wedge gate valve일 경우
- 외부로부터 열출입이 없는 지하배관
- 항상 65 °C 이상의 고온액체가 흐를 경우
- 가스배관 혹은 Two Phase 배관

3. 결 론

본 연구에서는 배관계의 열팽창, 압력상승과의 상관관계 및 외부 열원에 의한 배관계의 온도상승은 어떻게 이루어지는가를 이론적으로 고찰하였고, 또한 릴리프밸브의 설계 시 고려사항, 릴리프밸브의 안전공학 면에서의 압력배출시스템, 릴리프밸브 설치 시의 예외사항에 관하여 중점적으로 고찰하였다.

특히, 석유화학 플랜트처럼 파이프 외경이 크지 않고 길이도 짧은 경우에 잦은 릴리프밸브의 개방으로 인한 문제점이 발생되고 있으며, 이는 설정압력이 잘못되었거나 배압으로 인한 문제일 것으로 판단되어지기 때문에 릴리프밸브의 배출 배관의 시스템 구성, 배압의 크기에 따른 릴리프밸브의 타입 및 크기 선정에 유의를 요한다. 그리고 배압분율을 낮추기 위해서 설정압을 높일 경우 배관 시스템의 설계압력을 높여야 한다는 것을 간과해서는 안되며, 가장 이상적인 방법은 릴리프밸브의 배출 배관 시스템을 분리 설치하여 배압을 낮추어 주어야 한다. 또한 Hydrocarbon Processing 중 Effective Pressure Relief of Offsite Piping에 관한 내용에서 1. Blow to Upstream Case는 릴리프밸브의 배압에 의한 특성을 고려하지 않고 기술한 내용이므로 설계 시에 주의를 요한다.

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_l	:	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 부
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. 참 고 문 헌

- [1] Chemical Engineering, "Safer Relief Valve Sizing", Chemical Engineering, 1989.
- [2] John H. Perry, "Perry's Chemical Engineers Handbook", 6th Ed., 1984.
- [3] "Effective Pressure Relief of Offsite Piping", Hydrocarbon Processing, 1982.
- [4] Chemical Engineering, "Are Liquid Thermal Relief Valves Needed?", Chemical Engineering, 1984.
- [5] American Petroleum Institute, "Liquid Expansion", API-RP-521, Appendix C.
- [6] J. B. Maxwell, "Data Book on Hydrocarbons", pp 143-147.
- [7] Wayne C. Edmister, Byung Ik Lee, "Applied Hydrocarbon, Thermodynamics", Vol.1, 2nd Ed., 1984.
- [8] J. M. Smith, "Chemical Engineering Thermodynamics".
- [9] "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

황 순 용 : 한국산업안전공단 여수중방센터 팀장, 화공안전기술사, 관심분야는 정량적
위험성평가, 중대산업사고 예방 및 완화대책

장 서 일 : 명지대학교 리서치파크 전임연구원(공학박사), 관심분야는 공정시스템의
위험성평가, 안전관리 비용-편익분석

저 자 주 소

차 순 철 : 서울시 강남구 대치2동 은마APT 3-1401

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

장 서 일 : 경기도 용인시 남동 38-2 명지대학교 산업공학과