

중소규모 화학공장의 압력방출시스템에 대한 안전성 검토

임지표 · 진대영 · 마병철* · 강성주** · 정창복***

한국산업안전보건공단 · *화학물질안전원 · **전남대학교 응용화학공학부
(2015. 6. 22. 접수 / 2015. 10. 26. 수정 / 2015. 11. 10. 채택)

Review of Safety for Pressure-Relieving Systems of Small to Middle Scale Chemical Plants

Ji-Pyo Yim · Dae-Young Jin · Byung-Chol Ma* · Sung-Ju Kang** · Chang-Bock Chung***

Korea Occupational Safety & Health Agency

*National Institute of Chemical Safety

**School of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University

(Received June 22, 2015 / Revised October 26, 2015 / Accepted November 10, 2015)

Abstract : A variety of safety issues were investigated for chemical reactors using a toluene solvent in case of a fire at small to middle scale chemical plants. The issues covered the operation of pressure-relieving valves and the subsequent discharges of the toluene to the atmosphere either directly or through an absorber, which represent the current practice at most small chemical plants. It was shown that the safety valve on the reactor may not operate within about twenty minutes after an external fire breaks out, but, once relieved, the toluene vapor released directly to the atmosphere may form a large explosion range on the ground. It was also shown that if the discharge is routed to an existing absorber used for the scrubbing of volatile organic compounds or dusts, the column may not operate normally due to excessive pressure drops or flooding, resulting in the hazardous release of toluene vapors. This study proposed two ways of alleviating these risks. The first is to reduce the discharge itself from the safety valve by using adequate insulation and protection covers on the reactor and then introduce it into the circulation water at the bottom of the absorber through a dip line pipe equipped with a ring-shaped sparger. This will enhance the condensation of toluene vapors with the reduced effluent vapors treated in the packing layers above. The second is to install a separate quench drum to condense the routed toluene vapors more effectively than the existing absorber.

Key Words : pressure-relieving system, pressure safety valve, absorber, quench drum

1. 서론

화학공장에서는 인화성액체나 인화성가스를 고온·고압에서 대량 취급하고 있어 누출될 경우 화재나 폭발이 발생할 위험이 상존하고 있다. 특히 반응기 등은 정전, 냉각수 차단, 외부화재 등이 발생할 경우 용기 압력이 상승함에 따라 설비가 파손되어 위험물질이 대량 누출될 수 있으므로 설비의 설계압력 이하에서 내용물을 긴급하게 방출하여야 한다. 이럴 때 과압이 발생할 경우 내용물을 긴급 방출하는 장치가 안전밸브와 파열판이다. 안전밸브는 과압시 방출 후 일정 압력에서 다시 차단되는 밸브이며 파열판은 파열되어 내용물을 배출한 후 다시 차단되지 않는 안전장치이다.

하지만 안전장치에서 배출되는 위험물을 연소 등을 통해 안전하게 처리하지 않고 대기로 방출하면 증기운 폭발(VCE) 등에 의해 건축물이 파괴되는 등¹⁾ 대형사고를 일으킬 수 있다. 2011년 PS(폴리스티렌) 반응기가 과압에 의해 파열판이 파열되었으나 SM(Styrene) 등의 인화성액체가 옥내로 배출된 후 증기운폭발과 화재가 연이어 발생하여 7명이 부상당한 사고가 있었다²⁾.

이 때문에 대형 정유 및 석유화학공장에서는 안전밸브 등에서 배출되는 위험물을 플래어스택에서 연소처리하고 있다. 플래어스택은 공장의 운전과정에서 정전 등에 의해 반응기 등에서 배출되는 위험물을 모아 연소시켜 대기로 방출하는 소각탑이다. 하지만 플래어스택은 타 공정설비로부터 최소 20 m 이상의 안전거리를

* Corresponding Author : Chang-Bock Chung, Tel : +82-62-530-1884, E-mail : chungcb@jnu.ac.kr
School of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University, 77, Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

확보하여야 하며 설치 및 유지 비용이 상당히 많이 든다. 그래서 중소규모 화학공장에서는 공간 및 비용 측면에서 플래어스택을 설치하여 운영하기가 곤란한 측면이 있다. 이에, 중소규모 화학공장에서는 플래어스택을 설치하지 않고 안전밸브 등에서 배출되는 위험물을 일정 높이에서 대기로 방출하거나 마지못해 분진 등을 처리하기 위해 설치한 흡수탑에 연결하여 대기로 배출하고 있다.

그러나 바로 대기로 배출할 때 방출구의 높이가 충분하지 않을 경우에는 지면이나 주변 건물에서 폭발분위기를 형성하여 점화원에 의해 폭발할 수 있다. 또한 흡수탑에 연결할 경우 톨루엔과 같이 뚜렷한 흡수제가 없는 물질의 경우에는 흡수탑에서 충분히 제거되지 않아 지면에서 폭발분위기를 형성할 수 있다. 대부분의 중소규모 화학공장에서는 에탄올이나 톨루엔과 같은 응축성 물질을 용매나 원료로 많이 사용하고 있다. 다행스럽게도 이 물질들이 흡수탑에서 흡수는 되지 않지만 일부는 응축되어 흡수탑 하부에 축적됨으로서 대기로 배출되는 양을 감소시킬 수 있다.

중소규모 화학공장에서는 대부분 회분식반응기를 보유하고 있으며 용매로는 톨루엔을 가장 많이 사용하고 있다. 대부분의 반응기는 승온이나 냉각을 위해 스팀이나 냉각수를 공급할 수 있는 자켓과 반응이 이루어지는 동체로 이루어져 있다. 동체는 대부분 0.5 MPa 이하의 저압에서 운전되고 있으며 설계압력은 0.99 MPa 이하이다. 또한 과압에 의한 파손을 예방하기 위하여 설계압력 이하로 설정된 안전밸브나 파열판을 설치하고 있다.

이 연구에서는 톨루엔을 용매로 사용하는 반응기 주변에서 화재가 발생할 경우 안전밸브를 통한 방출가능성 및 물에 흡수되지 않는 톨루엔이 안전밸브에서 대기로 바로 배출되거나 흡수탑을 통해 배출될 때의 위험성을 검토하고자 한다. 아울러 중소규모 화학공장에서 외부화재에 대비하여 안전밸브에서 방출되는 위험물을 처리할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 중소규모 화학공장의 압력방출시스템

2.1. 외부화재시 안전밸브 작동 가능성 검토

중소규모 화학공장의 반응기 주변에서 화재가 발생할 경우 반응기 내부의 압력과 온도 등을 ASPEN Plus를 사용하여 모사할 수 있다. Aspen plus에서는 외부화재시 반응기 내의 위험물에 전달되는 에너지를 적절한 배유설비 또는 소화설비가 없다고 가정할 때 다음 식을 사용한다³⁾.

$$Q = 70,900FA_w^{0.82} \tag{1}$$

여기서,

Q : 총입열량(J/s)

F : 환경변수(-)

A_w : 내부액체에 접촉하는 탱크의 면적(m²)

환경변수는 열전도도 및 분출 유체의 온도로부터 계산할 수 있다³⁾.

중소규모 화학공장에서는 반응기의 용매로 톨루엔, 에탄올, 아세톤 등을 많이 사용하며 대부분 충전가스(질소)를 이용하여 내부 압력을 유지하고 있다. 톨루엔을 용매로 사용하는 반응기의 운전 및 설계조건을 바탕으로 외부화재시 반응기 내부의 온도와 압력을 모사하여 보았다. Table 1은 중소규모 화학공장에서 사용하고 있는 운전 및 설계 조건의 예이다.

Table 1. Operation and design condition of reactor

| Operation temperature (°C) | Operation pressure (MPa) | Design temperature (°C) | Design pressure (MPa) | Safety valve pressure (MPa) |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 50 | 0.2 | 200 | 0.5 | 0.5 |

모사결과에 의하면 반응기 주변에서 화재가 발생할 경우 화염에 의해 열이 반응기 내부에 전달되지만 톨루엔은 LPG 등의 액화가스와 다르게⁵⁾ 증기압이 낮아 20분 이내에는 작동하지 않을 수 있음을 알 수 있다. 즉, 반응기 주변에서 화재가 발생하여도 20분 이내에 적절한 소화가 가능하다면 안전밸브는 작동하지 않을 수 있다. Fig. 1은 1시간 동안 반응기 내부의 온도와 압력의 경향을 나타내고 있다.

2.2. 안전밸브 배출용량 및 크기

모사결과에 의하면 반응기 주변에서 화재가 발생하

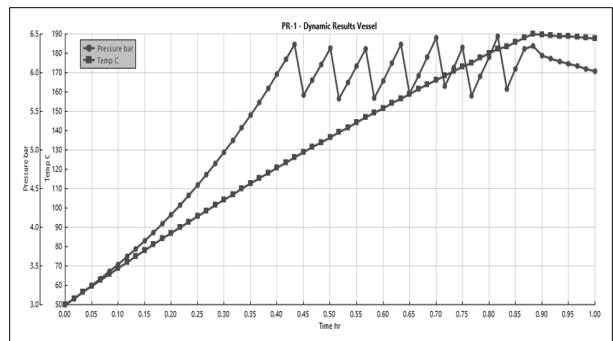


Fig. 1. Simulation result for reactor at external fire.

더라도 20분간은 안전밸브 작동되지 않지만 반응기에 설치된 안전밸브는 최악의 경우에 작동할 수 있다. 일반적으로 반응기에 설치된 안전밸브는 정전, 냉각수 차단, 외부화재 등이 발생할 경우 반응기에서 과압이 발생하여 작동한다. 플래어스택이나 흡수탑 등 긴급 방출물 처리설비의 처리 용량은 각각의 작동원인에 의해 파열될 수 있는 모든 안전밸브의 배출용량 합계를 기준으로 계산된다. 특히, 외부화재의 경우에는 반경 15 m 이내의 설비가 동시에 화재의 영향을 받은 것으로 가정하여 계산되므로 반응열이 높지 않은 중소규모 화학공장의 경우 긴급 방출물 처리설비의 처리 용량은 외부화재가 기준이 되는 경우가 많다. 이 연구에서는 중소규모 화학공장에서 외부화재가 발생하여 반경 15 m 이내 설비의 안전밸브가 작동되어 톨루엔 증기가 방출되는 경우를 가정하여 연구를 수행하였다. 톨루엔은 인화점이 60°C 이하인 인화성액체로서 물에 거의 녹지 않으며 상온에서는 응축되는 물질이다.

톨루엔을 취급하는 설비 주변에서 화재가 발생할 경우 안전밸브에서 배출되어야 하는 양은 다음 식⁴⁾에 의해 계산될 수 있다.

$$W = Q/\lambda \quad (2)$$

여기서,

W : 배출용량(J/s)

λ : 증발잠열(J/kg)

중소규모 화학공장에서는 적절한 소화설비 및 배유 설비를 갖추고 운전하는 것이 어렵다. 또한 보통 보온재로 암면(Rock wool)이나 퍼라이트(Perlite)를 사용하고 보온재를 보호하기 위한 덮개를 알루미늄을 이용하므로 화재시 보온재의 역할을 할 수 없으므로 환경변수(F)를 적용할 수 없다⁵⁾. API에 의하면 환경변수를 사용하려면 보온재가 2시간 동안 904°C에 견디어야 하며 보온재의 덮개로 스테인레스강을 사용하여야 한다³⁾.

지름이 1.8 m이고 높이가 2 m인 수직형 반응기에 1.5 m 까지 액체가 채워져 있는 경우를 가정하면 외부화재시 안전밸브의 배출용량은 (1)과 (2)식에 의해 약 4,401 kg/h이다. 이로부터 안전밸브의 오리피스 필요면적을 계산하면 545 mm²이며 실제 사용되는 안전밸브는 오리피스 면적이 830 mm²인 J(2 in × 3 in)를 설치하여야 한다. 이때 15 m 반경 내에 10개의 반응기가 설치되어 있을 경우 동시에 배출될 수 있는 양은 약 44,010 kg/hr이다.

2.3. 대기방출의 위험성

일부 중소규모 화학공장에서는 공간 및 비용 측면에서 플래어스택을 설치하지 않고 건물의 최상층 높이에서 수평방향으로 대기 방출하고 있다. 톨루엔 증기가 3층(10 m) 높이에서 수평으로 44,010 kg/hr로 방출될 때 확산되는 농도를 PHAST를 이용하여 계산하면 Fig.2에서 보듯이 토출지점으로부터 약 20 ~ 100 m 떨어진 지면에서 폭발하한계(LEL)를 형성한다. 또한 누출지점에서 100 ~ 185 m 떨어진 지면에서 폭발하한계의 50%, 185 ~ 245 m 떨어진 지면에서 폭발하한계의 25%를 형성할 수 있다. 마찬가지로 톨루엔 증기가 10m 높이에서 수직으로 배출될 때에도 Fig. 3에서 보듯이 비록 지면에서는 폭발하한계 이상의 농도를 형성하지는 않지만 누출지점에서 약 60 ~ 75 m 떨어진 지면에서 폭발하한계의 25%를 형성하고 동일 높이의 주변 건물이 있을 경우에는 약 25 m 떨어진 지점까지 폭발하한계의 50%를 형성한다. 그러나 누출지점에서 약 20 m 떨어진 지면에서는 폭발범위를 형성할 수도 있다. 폭발범위는 풍속, 표면거칠기, 온도 등에 영향을 받지만 특히 풍속의 영향이 가장 크며⁶⁾ 이번 연구는 최악의 누출시나리오⁷⁾에 의해 1.5 m/s의 풍속을 이용하였다. 결국 톨루엔 증기가 대기로 방출될 때에는 지면이나 주변 건물에 폭발범위를 형성하므로 미지의 점화원에 의해 화재나 폭발이 발생할 수 있다. 이때 누출되는 톨루엔은 Aspen plus 모사에 따르면 126°C의 증기상태이므로 10개의 안전밸브에서 동시에 배출되는 것을 충분히 처리할 수 있도록 10 in(250 mm) 토출구를 사용하였다.

2.4. 흡수탑 처리의 위험성^{8,9)}

흡수탑은 암모니아나 염화수소와 같이 물에 잘 녹거나 적절한 흡수제가 알려져 있는 가스를 처리하기 위해 사용되지만 미량의 VOC(휘발성유기화합물)와 먼지

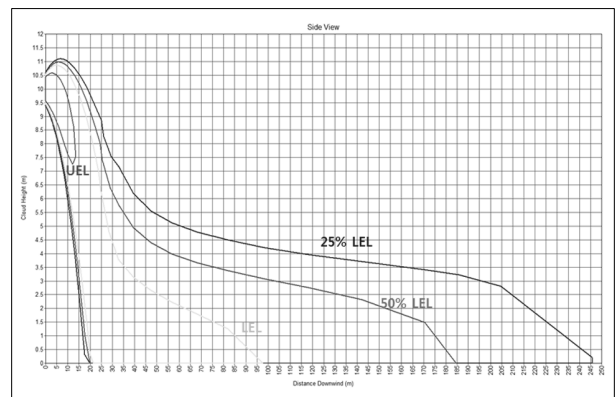


Fig. 2. PHAST result for horizontal discharge.

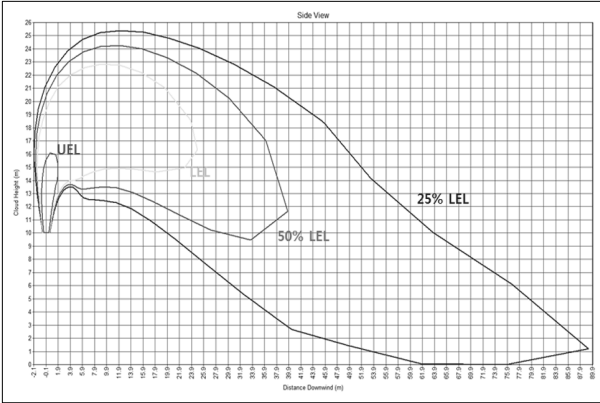


Fig. 3. PHAST result for vertical discharge.

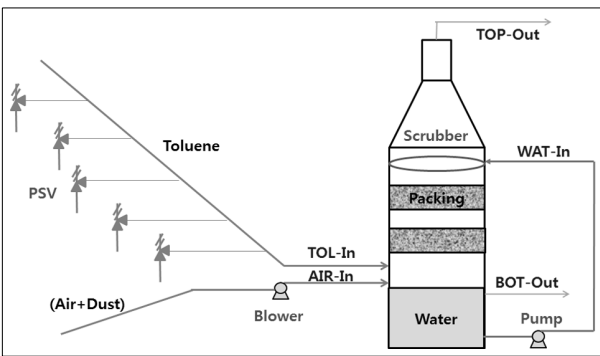


Fig. 4. Pressure-relieving system.

(dust) 등을 처리하기 위해 설치되기도 한다. 하지만 대부분의 중소규모 화학공장에서는 물에 녹지 않는 톨루엔 증기를 고압에서 배출하는 안전밸브 후단을 VOC나 먼지를 제거하기 위한 흡수탑에 연결한다. 톨루엔 증기는 물에 흡수되지는 않지만 다행스럽게도 저온의 물과의 접촉에 의해 일부 응축된다. 그러나 안전밸브에서 배출되는 톨루엔 증기 중 응축되지 않고 대기로 방출되는 톨루엔의 양은 정확히 파악되지 않는다. 또한 흡수탑 내의 충전제에 의한 압력손실에 대해 검토 없이 사용하고 있다. 톨루엔 증기를 배출하는 안전밸브와 연결된 흡수탑 공정은 Fig. 4와 같다.

먼저 톨루엔을 흡수탑에 연결하지 않았을 때의 충전탑의 지름과 높이 및 압력손실을 계산할 수 있다⁹⁾. 사업장에 설치된 바와 같이 송풍기 용량 100 m³/min(공기 + 먼지), 액가스비 2 liter/m³, 물펌프 용량 0.2 m³/min(12,000 kg/hr)일 때, 충전층(2 in pall ring)의 지름은 식(3)으로 탑단면적당 배출가스량을 계산한 후, 식(4)에 의해 익류점을 감안하여 구할 수 있다.⁹⁾

$$G' = \sqrt{\frac{Kg\rho_L\rho_G}{F_P\mu_L^{0.2}}} \quad (3)$$

여기서,

G' : 탑단면적당 배출가스량(kg/m²·s)

K : 총괄인자(-)

g : 중력가속도(m/s²)

ρ_G : 처리가스(공기) 밀도(kg/m³)

ρ_L : 흡수제(물) 밀도(kg/m³)

F_P : 충전물 계수(m⁻¹)

μ_L : 세정액(물)의 점도(cP)

$$D = \sqrt{\frac{4V'}{\pi f G'}} \quad (4)$$

여기서,

D : 충전층 지름(m)

V' : 처리가스량(kg/hr)

f : 익류점(flooding point)

Eckert의 상관도표⁸⁾ 등에 의해 총괄인자와 충전물 계수로 각각 0.17과 82를 사용하면 충전층의 지름은 1.0 m이다. 탑단면적당 처리가스량과 처리가스의 밀도 등은 Table 2와 같다.

Table 2. Data for packed tower diameter

| G' (kg/m ² ·s) | ρ_G (kg/m ³) | ρ_L (kg/m ³) | μ_L (cP) | f (-) |
|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|------------|
| 4.9 | 1.2 | 1,000 | 1 | 0.5 |

충전층의 높이는 총괄전달 단위높이(H_{OG})와 최고전달 단위수(N_{OG})의 곱에 의해 계산할 수 있다. 총괄전달 단위높이는 다음 식⁸⁾에 의해 계산된다.

$$H_G = \frac{\alpha G'^\beta}{L'^\gamma} \sqrt{\frac{\mu_G}{\rho_G D_G}} \quad (5)$$

여기서,

H_G : 기상전달 단위높이(m)

μ_G : 처리가스의 점도(cP)

D_G : 가스상의 확산계수(cm²/s)

α, β, γ : 충전물 계수(-)

$$H_L = \phi \left(\frac{L'}{\mu_L} \right)^\eta \sqrt{\frac{\mu_L}{\rho_L D_L}} \quad (6)$$

여기서,

H_L : 액상전달 단위높이(m)

D_L : 액체상의 확산계수(cm^2/s)

ϕ, η : 충전물 계수(-)

Z : 충전층의 높이(m)

G : 가스의 공탑질량속도($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$)

L : 액체의 공탑질량속도($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$)

a, b : 충전물의 실험정수(-)

$$H_{OG} = H_G + \left(m \frac{G_M}{L_M}\right) H_L \quad (7)$$

여기서,

H_{OG} : 총괄전달 단위높이(m)

m : 평형곡선의 기울기

G_M : 가스의 공탑몰속도($\text{kgmol}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$)

L_M : 액체의 공탑몰속도($\text{kgmol}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$)

식 (5)와 (6)에서 충전물 계수는 Table 3의 값을 사용하였다.

Table 3. Packing factor

| α | β | γ | ϕ | η |
|----------|---------|----------|--------|--------|
| 1.1643 | 0.41 | 0.45 | 0.0038 | 0.22 |

평형곡선의 기울기로 먼지의 제거에 주로 사용하는 1.7×10^{-5} 를 이용하고 가스상의 확산계수와 액체상의 확산계수를 공기의 주성분 중 하나인 산소로 가정하여 0.206과 1.8×10^{-5} 을 사용하면 계산된 총괄전달 단위높이는 0.57 m이다. 또한 총괄전달 단위수는 처리(집진) 효율이 0.8일 때 다음 식⁸⁾에 의해 1.6이 계산되므로 충전층의 높이는 0.9 m이다.

$$N_{OG} = \ln\left(\frac{1}{1-\theta}\right) \quad (8)$$

여기서,

N_{OG} : 총괄전달 단위수(-)

θ : 처리(집진) 효율(-)

마지막으로 충전층에서의 압력손실은 식(9)로 계산할 수 있는데, 이때 충전물의 실험정수 a, b 로 각각 0.259×10^{-6} 과 0.683×10^{-2} 를 이용하면 $9.1 \text{ kg}/\text{m}^2(\text{mmH}_2\text{O})$ 이다. 이는 VOC 또는 먼지를 공기와 함께 공급하는 송풍기의 압력(300 mmH₂O)보다 작으므로 흡수탑의 정상적인 운전이 가능하다.

$$\Delta P/Z = a 10^{bL/\rho_L} G^2 / \rho_G \quad (9)$$

여기서,

ΔP : 압력손실(kg/m^2)

이 연구에서는 먼지 등을 제거하기 위해 설치된 흡수탑에 안전밸브 토출 측을 추가로 연결하였을 경우 대기로 배출되는 톨루엔의 양과 충전물에 의한 압력차를 공정모사 프로그램인 ASPEN Plus를 이용하여 계산하였다. 먼저 안전밸브의 토출측을 흡수탑에 연결하지 않았을 경우에 ASPEN Plus를 이용하여 충전층에서의 압력차를 계산하면 14 mmH₂O로 흡수탑은 정상적으로 운전된다. 이때 순환되는 물의 양이 4 m³ 이상이면 20분 동안은 순수한 물이 계속 공급될 수 있으므로 정상상태로 가정하여 모사할 수 있다. 실제로 반응기 주변에서 화재가 발생할 경우 적절할 소화설비가 되어 있지 않아도 소방차는 20분 이내에 도착할 수 있으므로 20분 동안은 정상상태로 모사해도 무방할 것이다. 이때 안전율을 고려하여 충전층의 지름과 높이는 1.2 m와 1 m를 이용하였으며 충전층은 각단의 높이가 0.5 m인 2단으로 가정하였다.

하지만 ASPEN Plus의 모사결과에 의하면 44,010 kg/hr의 톨루엔 증기(약 126°C)가 추가로 흡수탑에 연결하면 흡수탑에 익류점(Flooding point)을 형성함으로써 충전층 내의 공간을 거의 액체가 채우게 되어 정상적인 운전이 불가능하다. 물론 충전층의 압력손실도 가스의 공탑질량속도의 제공에 비례하여 증가하므로 흡수탑 인입 측의 톨루엔 증기의 압력으로는 충전층을 통과할 수 없을 뿐만 아니라 최악의 경우에는 흡수탑이 파열될 수 있다.

3. 압력방출시스템의 항상 방안

중소규모 화학공장에서 외부화재에 의해 반응기에서 과압이 발생할 경우 반응기를 보호하기 위하여 안전밸브 또는 파열판이 설치되어 있다. 하지만, 안전밸브 또는 파열판에서 배출되는 위험물을 안전하게 처리하지 못할 경우에는 대형사고로 이어질 수 있다. 현재 사용하고 있는 흡수탑의 경우 톨루엔 등 비수용성 물질을 완벽하게 처리하지 못한다. 반응기에 설치된 안전밸브가 작동하였을 경우의 안전성 향상을 위해 2가지 방안을 제시하고자 한다.

3.1. 흡수탑을 이용한 처리

중소규모 화학공장에서 사용하는 보온재는 고온에

Table 4. Result after reduction of required capacity

| | TOL-In (kgmol/hr) | AIR_In (kgmol/hr) | WAT-In (kgmol/hr) | Top-Out (kgmol/hr) | BOT-Out (kgmol/hr) |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Toluene | 72 | 0 | 0 | 24 | 48 |
| Air | 0 | 249 | 0 | 249 | 0 |
| Water | 0 | 0 | 666 | 19 | 647 |
| Total | 72 | 249 | 666 | 292 | 695 |

서 견딜 수 없어 일반적으로 환경변수(F)로 1을 사용한다. 하지만 보온재를 고온에서 견디는 재질로 변경하고 보호덮개를 알루미늄에서 스테인레스강으로 변경하여 환경변수를 낮출 수 있다. 보온재의 두께를 50 mm로 하여 환경변수가 1에서 0.15으로 낮춰지면⁴⁾ 총 배출용량은 44,010 kg/hr에서 6,601 kg/hr로 감소한다. Table 4는 안전밸브의 배출용량을 감소시켜 흡수탑에 연결하였을 때의 ASPEN Plus 모사 결과를 나타낸다.

모사결과 충전층에서의 압력손실은 37.4 kg/m² (mmH₂O)로 안전밸브를 연결하지 않았을 때보다는 다소 증가하지만 정상운전이 가능하다. 이는 흡수탑 설계시 안전율을 어느 정도 주고 설계하기 때문이다. 또한 흡수탑 상부 토출측(Top-Out)은 공기, 수증기 및 톨루엔 증기의 혼합가스가 배출되는데 톨루엔의 몰비가 약 8.1 %로 톨루엔의 폭발하한계(1.2%)보다 높지만 착지농도는 낮아 2차적인 피해를 줄 일수 있다. Fig. 5는 흡수탑을 통과한 혼합가스가 흡수탑 상부로 배출될 때의 주변 농도를 PHAST를 이용한 모사결과이다.

모사결과에 의하면 지면에는 혼합가스의 폭발범위를 형성하지 않으며 누출지점 주변에 일부 폭발범위를 형성하지만 흡수탑의 토출구가 주변 건물보다 높다면 안전하다.

결과적으로 보온재에 의해 감소된 톨루엔 증기를 기존의 흡수탑에 연결한 후 일부 변경을 하면 적은 양의 톨루엔 증기의 처리가 가능하다. 즉, 흡수탑에 유입되

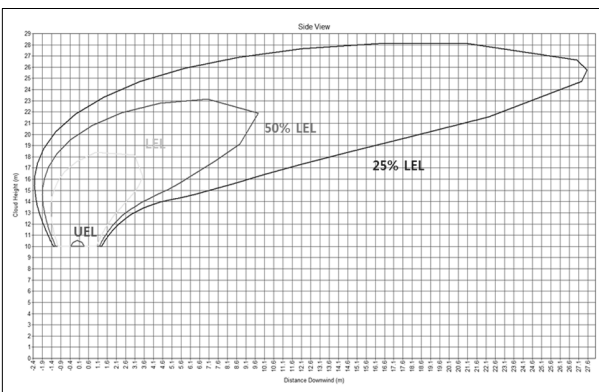


Fig. 5. PHAST result after reduction of required rate.

는 안전밸브 토출측 배관을 흡수탑 하부의 순환수에 침액되는 구조로 설치하여 응축되는 양을 증대시켜야 한다. 이때 톨루엔 증기의 인입배관을 환상구조로 설치하여 순환수와 접촉을 증가시키는 것이 더욱 효과적일 것이다.

하지만 안전밸브에서 배출되는 위험물의 양이 많을 경우에는 한계가 있다. 결국은 흡수탑의 처리용량을 증대시켜 안전밸브에서 배출되는 톨루엔 증기를 안전하게 처리하기 위해서는 충전탑의 지름과 높이뿐만 아니라 순환펌프의 용량을 증대시켜야 한다. 충전층의 지름과 높이만 증대시키면 압력손실은 감소하여 정상적인 운전은 가능하나 대기로 배출되는 톨루엔의 양은 감소하지 않으며, 순환펌프의 양만 증대시키면 대기로 방출되는 톨루엔의 양은 감소하지만 압력손실이 감소하지 않아 흡수탑을 정상적으로 운전할 수 없다. 위에서 사용한 수식에 의해 안전밸브에서 배출되는 톨루엔 증기와 같은 용량(44,010 kg/hr)의 가스를 추가로 처리하기 위한 충전층의 지름은 2.5 m이며 순환펌프의 용량은 액가스비로 5 liter/m³를 적용하여 1.8 m³/min (97,600 kg/hr)이다. Table 5는 흡수탑의 처리용량을 증대시켜 톨루엔 증기를 처리하였을 때의 ASPEN Plus 모사 결과를 나타낸다.

Table 5. Result after increase of absorber's capacity

| | TOL-In (kgmol/hr) | AIR_In (kgmol/hr) | WAT-In (kgmol/hr) | Top-Out (kgmol/hr) | BOT-Out (kgmol/hr) |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Toluene | 478 | 0 | 0 | 19 | 458 |
| Air | 0 | 249 | 0 | 249 | 0 |
| Water | 0 | 0 | 5,418 | 15 | 5,403 |
| Total | 478 | 249 | 5,418 | 283 | 5,861 |

모사결과 충전층에서의 압력손실은 14.0 kg/m² (mmH₂O)로 정상운전이 가능하며 흡수탑 상부 토출측(Top-Out)은 공기, 수증기 및 톨루엔 증기의 혼합가스가 배출되는데 톨루엔의 몰비가 약 6.9 %로 2차적인 피해를 예방할 수 있다.

3.2. 냉각드럼 설치

기존 흡수탑은 VOC, 먼지 등을 처리하기 위해 이미 적정 규모로 설치되어 있어 안전밸브 토출 측을 추가로 연결할 경우 톨루엔 증기를 완전히 처리하기에는 한계가 있다. 또한 대형 흡수탑을 추가로 설치하면 톨루엔을 충분히 처리할 수 있지만 비용과 공간 등을 고려할 때 바람직하지는 않다. 하지만 API³⁾에 의하면 적

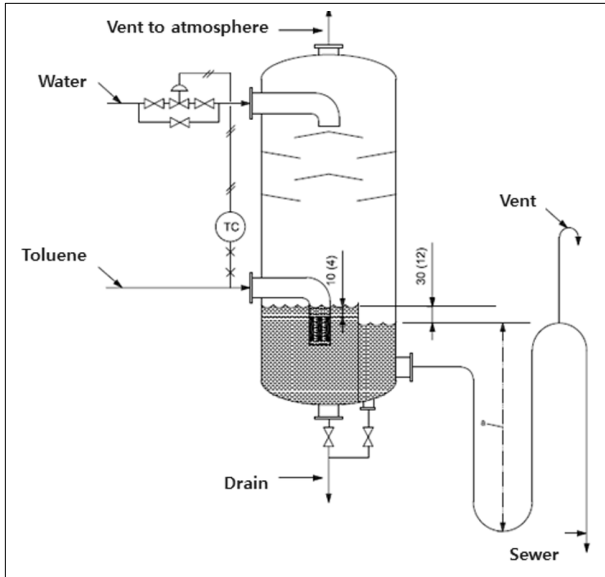


Fig. 6. Quench drum.

절한 기능을 가진 냉각드럼을 설치할 경우 응축성 가스는 플래어스택에서 연소처리하지 않고 안전하게 처리할 수 있다. 그러므로 흡수탑을 변경하는 것보다는 별도의 냉각드럼을 설치하여 톨루엔 증기를 완전히 제거하는 것이 바람직하다. Fig. 6은 응축성 가스를 처리할 수 있는 냉각드럼을 나타내는 그림이다.

냉각드럼은 안전밸브에서 배출되는 응축성 위험물을 물에 10cm 정도 침액시켜 1차적으로 응축시킨 후 드럼의 상부에서 물을 분산시킴으로써 대기로 배출되는 응축성 위험물 및 수증기의 양을 최소화시킬 수 있다. 아울러, 상부에서 분사시키는 물의 양은 냉각드럼에 유입되는 위험물의 온도에 따라 조절함으로써 효과를 극대화시킬 수 있다. 냉각드럼의 용량은 이번 사례에서와 같이 안전밸브에서 44,010 kg/hr 배출된다고 가정했을 때 톨루엔 증기(0.5 MPa, 126°C)의 증발잠열(83 kcal/kg)을 기준으로 약 9.9 m³ (직경 2 m, 높이 3 m)이다. 이는 안전밸브 배출용량을 충분히 응축시킬 수 있도록 상부에서 충분한 양(1.66 m³/min, 이론 공급량의 150%)의 물을 펌프를 통해 공급하고 1시간 동안 배출되는 양의 5%(2,200 kg)를 응축시킬 수 있는 물을 드럼 하부에 저장할 수 있게 하여 추정된 결과이다. 여기서 인입배관의 온도를 감지하여 펌프가 자동으로 작동될 때까지 드럼하부에서 응축되어야 하는 양은 전체 배출용량의 5%(3분 동안 배출되는 양)로 선정하였으며 드럼의 크기는 하부 크기(3.3 m³)의 3배로 하였다. 실제 인입배관의 온도를 감지하여 냉각드럼 상부에서 물이 분사되는 시간은 수초 이내이다. 이때 냉각드럼은 그림에서와 같이 응축되는 위험물이 포함된 물은 일정

액위 이상 되지 않도록 폐수처리장 등으로 바로 배출한다. 또한 대기로 연결된 배관에는 화염이 냉각드럼 내부로 전파되지 않도록 화염방지기를 설치하는 것이 바람직하다. 약 10 m³ 용량의 냉각드럼과 물공급 펌프를 설치하는 것은 20 m 이상의 안전거리를 확보하여야 하고 기·액 분리를 위한 녹아웃드럼(Knockout drum), 역화방지용 밀봉드럼(Seal drum), 지속적인 연소를 위한 파일럿버너 등으로 구성된 플래어스택을 설치하는 것보다는 훨씬 경제적인 것이다.

4. 결론

이 연구에서는 중소규모 화학공장의 반응기 주변에서 화재가 발생할 경우 안전밸브가 작동하여 위험물이 배출될 때 연소처리하지 않고 대기로 방출하거나 흡수탑을 통해 대기로 방출될 때의 안전성을 검토하였다. 안전밸브가 작동하여 고온의 톨루엔 증기가 대기로 방출되면 지면에 폭발범위를 넓게 형성할 수 있으며, 흡수탑에 연결할 경우에는 과도한 압력손실이 발생하거나 익류점을 형성하여 흡수탑이 파손되거나 정상가동되지 않아 2차적인 위험을 초래할 수 있음을 보였다.

중소규모 화학공장의 이런 위험성을 제거하기 위하여 다음과 같은 두 가지 방안을 제시하였다. 첫째, 900 °C 이상에 견디는 보온재와 스테인레스 재질의 덮개를 사용함으로써 안전밸브에서 배출되는 양을 근본적으로 감소시킨 후, 충분한 용량의 흡수탑에 톨루엔 증기의 인입 배관을 순환수에 침액되는 환상구조로 연결하여 응축시키는 것이다. 둘째, 흡수탑 대신 충분한 용량의 냉각드럼을 설치하여 고온의 톨루엔 증기를 최대한 응축시키는 것이다.

감사의 글: 이 논문은 2014년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

References

- 1) S. W. Lee, J. R. Lee and Y. J. Huh, "A Study on Estimation of Structure Damage Caused by VCE", Journal of the Korea Society of Safety, Vol. 22, No. 5, pp. 65-70, 2007.
- 2) Korea Occupational Safety & Health Agency, "Major Industrious Accident Investigation Report-vapor Cloud Fire and Explosion Accident", pp. 1-19, 2011.
- 3) API Standard 521, "Pressure-relieving and Depressuring System", pp. 36-54, 2014.
- 4) KOSHA Guide D-18, "The Technical Guideline for Design

- and Installation of Safety Valve”, KOSHA, pp. 7-10. 2012.
- 5) J. P. Yim, B. C. Ma and C. B. Chung, “A Study on the Safety of Small LPG Storage Tanks at External Fires”, Journal of the Korea Society of Safety, Vol. 30, No. 4, pp. 64-72, 2015.
 - 6) K. D. Lee and C. S. Shin, “A Study on the Damaging Distance and the Explosion Effect by the LPG Release”, Journal of the Korea Society of Safety, Vol. 14, No. 2, pp. 109-115, 1999.
 - 7) KOSHA Guide D-107, “The Guideline for Selection of the Worst Release Scenario”, KOSHA, pp. 2-4. 2012.
 - 8) Daegu Regional Environmental Office, “Air Pollution Control Technology Design Working Reference”, pp. 134-158, 1999.
 - 9) W. L. McCabe, J. C. Smith and P. Harriott, “Unit Operation”, McGraw Hill, pp. 535-570, 1991.