



플레어스택의 화염 형상 분석

이헌석 · 김범수 · 정상용* · 유진환 · 박철환 · †고재욱
광운대학교 화학공학과, *한국가스안전공사 가스안전연구원
(2009년 6월 9일 접수, 2009년 6월 26일 수정, 2009년 6월 26일 채택)

Analysis of Flame Shape in Flare Stack

Heon Seok Lee, Bum Su Kim, Sang Yong Jung*, Jin Hwan Yoo, Chul Hwan Park, †Jae Wook Ko

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University,

**Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation*

(Received 9. June. 2009, Revised 26. June. 2009, Accepted 26. June. 2009)

요 약

릴리프시스템은 공정 내에 과압 방지하여 공정의 안전성을 높여주는 역할을 한다. 릴리프 시스템에서 방출되는 폐가스로 인한 폭발, 복사열, 독성가스 확산을 막기 위하여 플레어스택을 설치한다. 플레어스택에서는 공정의 안전성 향상을 위하여 안전한 연소가 가장 중요한 요소이며, 안전한 연소를 위하여 방출되는 가스량과 속도 제어는 API 521 code의 기술기준을 따르며, 플레어스택에서 발생하는 화염의 형상은 방출되는 가스의 압력과 질량유속에 의하여 jet fire의 형상을 하고 있다. 이는 화염의 형상은 완전 연소와 열 방출에 영향을 미치는 요소로 이 논문에서는 화염의 형상을 분석하였다. 화염의 길이는 API code와 jet fire 모델이 유사한 값을 보였으며, 화염은 지면에 더 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Abstract - Relief systems can improve the process safety because it has the function for the prevention of overpressure. Flare stacks is necessary to avoid explosion, radiation, or toxicity by waste-gas emitted from relief system. Safe combustion is one of the important factors to improve safety and the quantity and velocity emitted is ruled in the API code 521. Due to the pressure of released gas and mass flow, a flame from flare stack is similar to jet fire. In this study, we have investigated the effect of flame form on complete combustion and heat emission. API code was similar to jet fire model in flame length, the flame had an effect on the ground.

Key words : relief system, flare stack, API 521, jet fire, frustum

1. 서 론

2005년 3월 23일 BP Texas isomerization unit 폭발 사고의 경우, 공정내의 가연성 가스의 대기 방출에 대한 위험성이 잘 나타나 있다. 사고 당시 15명의 사망자와 170명의 부상자 초기손실액이 약 2백만 달러인 사고가 발생하였다. 이는 isomerization unit의 raffinate splitter column의 후단에 있

는 blowdown drum & stack(F-20)에서 누출된 탄화수소 증기가 점화되어 폭발된 사고로 F-20은 정유 및 석유화학 산업에서 잠재적 위험 요소로써 인식되어 closed relief system에서 플레어스택(flare stack)으로 연결하는 추세이며, splitter의 relief line을 플레어스택으로 연결할 기회가 있었음에도 불구하고 변경하지 않고 F-20을 계속해서 raffinate splitter의 relief 및 venting system으로 사용함으로 위와 같은 사고가 발생하였으나, 플레어스택을 공정에 설치 또는 연결하였다면 사고를 방지할 수 있었다.

†주저자:jwko@kw.ac.kr

플레어시스템은 공정 내 폐가스를 그대로 대기 중에 배출할 경우, 석유화학제품 특성상 증기운을 형성하여 공장 및 인근 지역에서 화재·폭발을 일으킬 수 있으므로, 이를 방지하기 위한 방법으로 폐가스를 연소 시켜서 안전한 가스로 배출하는 설비이다. 이는 폐가스를 연소를 통하기 때문에 연소로 인한 복사열이 발생하여, 발생한 복사열로 인한 공정 내 설비에 영향을 미치지 못하도록 하는 것이 가장 중요한 설계 기준이 된다.

본 연구에서는 플레어스택에서 발생하는 화염 형상 분석을 통하여 폐가스 배출속도와 바람의 영향을 고려하여, 화염의 길이를 분석하고자 하였으며, 거리에 따른 복사열 감소를 분석하기 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

II. 플레어스택

2.1 플레어시스템

안전밸브 등에서 배출되는 가연성 가스를 모아 플레어스택에서 소각시켜 대기 중으로 방출하는

데 필요한 일체의 설비를 플레어시스템이라 말하며 플레어헤더(flare header), 녹아웃드럼(knock-out drum), 실드럼(seal drum) 및 플레어스택 등 과 같은 설비를 포함한다[1].

플레어시스템은 일반적으로 Fig. 1과 같이 안전밸브, 릴리프밸브 또는 긴급이송설비에서 방출되는 가스를 주 배관에 모아 녹아웃드럼으로 보내지고 이곳에서 액체와 고체성분 등을 제거하고, 역화방지 등을 위한 목적으로 실드럼을 거쳐 플레어스택으로 이송된다. 플레어스택은 가스를 높은 장소에서 연소·배출하는 플레어스택(elevated flare stack)과 지상에서 소각·배출하는 플레어스택(ground flare stack)이 있다.

2.2 플레어스택 설계의 중요변수

플레어스택의 주요 기능은 정유 및 석유화학공장에서의 릴리프 밸브, Rupture 디스크, 압력제한밸브 등을 통해 방출되는 가연성, 독성 또는 부식성 증기를 연소를 통하여 위험하지 않는 상태로 연소(산화)시켜 배출가스를 처리하는 시스템이다.

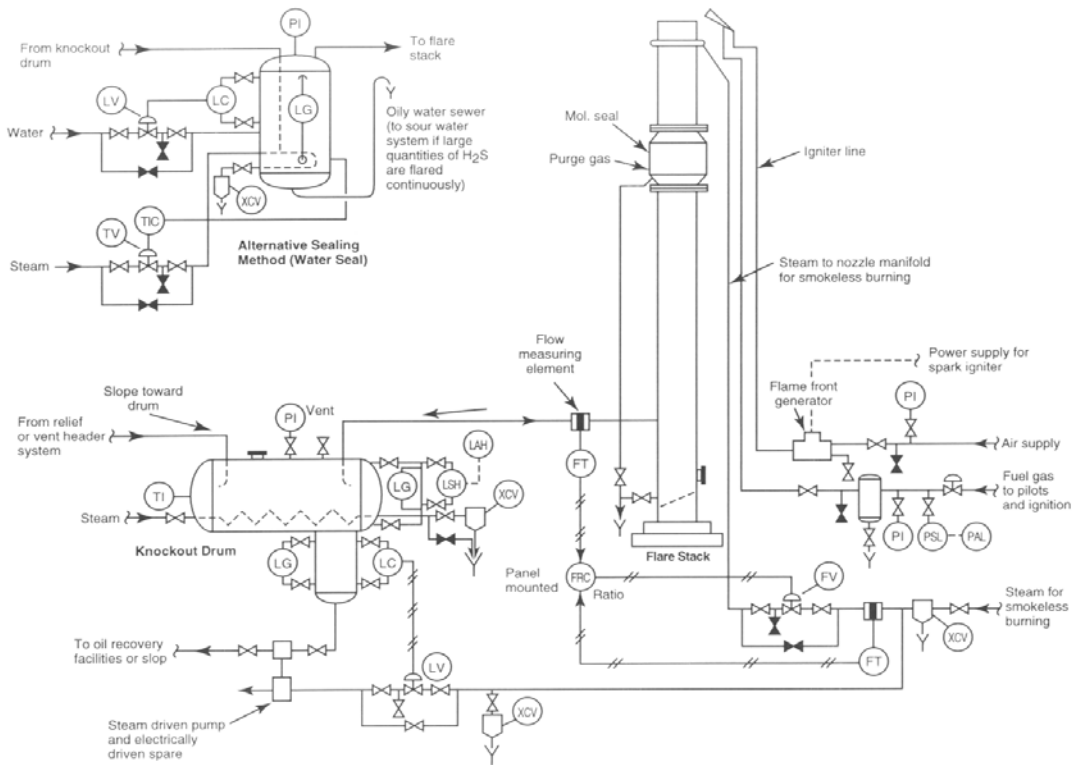


Fig. 1. Typical flare installation.

Elevated 플레어스택에 대하여 플레어량(flare load)이 산정되었을 경우에 기본 공정 설계 시 플레어의 안전에 영향을 미치는 주요 검토 항목은 다음과 같다.

- 플레어 크기와 용량
- 화염의 안정
- 파일럿과 점화 시스템
- 역화방지
- 복사열
- 녹아웃 드림

플레어는 안정된 화염과 안전한 복사열 방출을 유지하기 위하여 폐가스의 용량을 규정하고 있다. 이는 불완전 연소를 막기 위한 것이며, 화염은 방출되는 폐가스의 유량속도로 인하여 jet fire의 형상을 하고 있다. 이는 복사열 분석에 중요한 변수로 작용한다.

III. 가스 방출량

3.1 플레어가스 방출량 계산

플레어스택에서의 가스 방출은 안정된 화염을 가지기 위한 적당한 플레어량 산정이 필요하다. 설계시 플레어량이 초과 산정되어 있을 경우, 플레어팁 내부에서 연소가 발생하는 경우가 생기며, 낮은 모멘텀으로 인해 화염이 바람에 쉽게 꺼질 수 있다. 플레어량을 적게 산정할 경우, 과도한 유량으로 인하여 화염이 플레어팁 위로 지나치게 높게 올라가거나 꺼지게 되어 불완전 연소가 일어날 수 있다.

3.2 플레어가스 방출속도

다음의 식 (1)은 플레어가스의 방출 속도를 계산하는데 사용된다[2].

$$v_j = Mach \times 91.2 \times \left(\frac{kT}{M_f} \right)^{0.5} \quad (1)$$

3.3 플레어스택 직경

플레어스택의 직경은 플레어가스의 속도에 의하여 결정되며, 플레어팁에서의 압력손실은 일반적으로 0.14 kgf/cm²를 적용하고, 플레어가스의 속도가 마하수(Mach) 0.2~0.5사이가 되도록 다음 식에 의하여 플레어스택의 직경을 결정한다[2].

$$Mach = 3.23 \times 10^{-5} \sqrt{\frac{T}{kM_f}} \quad (2)$$

IV. 화염의 형상

4.1 화염의 길이

플레어스택에서 화염은 jet fire를 형성하므로 발열량을 계산하기 위해서는 화염의 길이를 계산하여야만 한다. 플레어팁에서의 바람의 속도와 방향을 고려한 화염의 길이 계산식은 식 (3)과 같이 표현된다[3].

$$L_B = L_{B0} \left(0.51 e^{-0.4 V_w} + 0.49 \right) \times \left[1 - 6.07 \times 10^{-3} (\theta_j - 90) \right] \quad (3)$$

4.2 지면 점화된 거리

폐가스가 플레어팁에서 방출되어 바람의 영향을 받아 옆으로 치우치면서 원뿔 모양으로 점화된다. 점화전까지 거리 B는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$B = L_B \frac{\sin((0.185 e^{-20R} + 0.015)\alpha)}{\sin(\alpha)} \quad (4)$$

4.3 절두체의 길이

절두체(화염의 모양)의 길이(R_L)는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$R_L = \sqrt{L_B^2 - B^2 \sin^2 \alpha} - B \cos \alpha \quad (5)$$

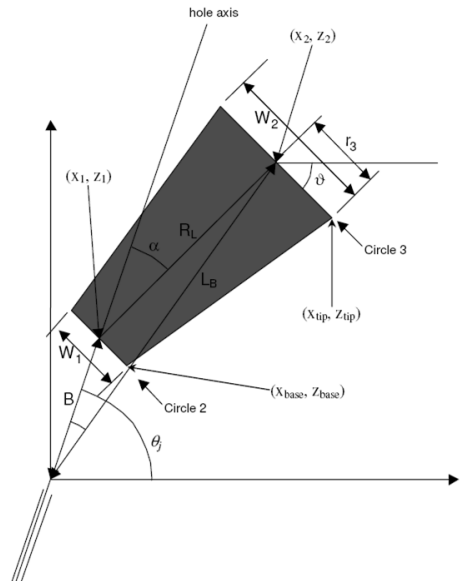


Fig. 2. Jet fire flame shape.

4.4 절두체의 지름 계산

JFSH-Chamberlain과 Cook 모델식의 경우, 절두체의 지름(W_1 , W_2)은 스택의 지름과 절두체 길이, 방출되는 가스의 밀도로 식 (6) 및 (7)과 같이 표현된다.

$$W_1 = D_s (13.5e^{-6R_L} + 1.5) X \tag{6}$$

$$\left\{ 1 - \left(1 - \frac{1}{15} \sqrt{\frac{\rho_{amb}}{\rho_j}} \right) e^{-70R} \right\}$$

$$W_2 = L_B (0.18e^{-1.5R_L} + 0.31) (1 - 0.47e^{-25R_L}) \tag{7}$$

V. 실제 사례로 API 521 code와 Jet fire Model 비교

공정내 비상상황으로 인한 가스 배출량이 많은 NCC 공정을 대상으로 플레어스택으로 이송되는 가스 방출량을 분석하고, 그 가스량에 따른 플레어스택의 설계 높이를 분석하였다. NCC 공정에서 Cold Water Failure(C.W. Failure)와 Power Failure, Fire Case, Single Events 상황을 예상하여 비상시 방출되는 각각의 가스의 양을 확인하였다. 이 중에서 C.W. Failure 상황에서 가장 많은 폐가스를 방출함을 확인하였으며, 이 상황을 대상으로 플레어스택의 높이를 계산하였다.

5.1 API code에 의한 플레어 형상 계산

API 521 code에 의한 플레어탑에서의 폐가스 방출속도 계산을 위하여 식 1을 적용하였으며, 지름의 크기는 식 2를 적용하여 결정하였다.

$V_j = 171 \text{ m/s}$, $D = 1.29 \text{ M}$
 Flame length(L_f)는 아래와 같이 계산된다[4].

$L_f = 118D = 152.22$

Table 1. Basic data of flammability gas.

| | |
|------------------|---------------------------------------|
| Material | Ethylene |
| Flow rate | 735,000 Kg/hr |
| Temperature | 85 °C (=358 K) |
| Maximum pressure | 0.5 Kg/Cm ² (152 kPa/A) |
| Wind Velocity | 9 m/s |

바람에 의해 휘어진 flame의 각도는 아래와 같이 계산된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_W}{V_j} \right) = 3.03$$

Flame 중심부에서 플레어스택까지의 가로, 세로의 거리는 다음과 같다.

가로거리
 $X_c = (L_f/3)\sin\theta$
 $= 2.95 \text{ m}$

세로거리(높이)
 $Y_c = (L_f/3)\cos\theta$
 $= 55.77 \text{ m}$

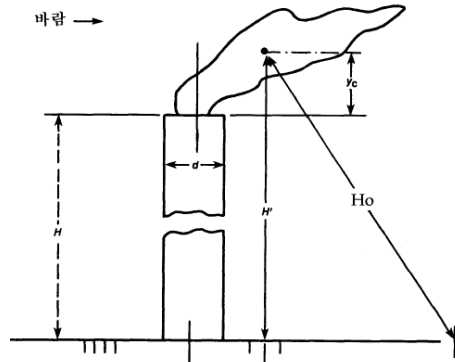


Fig. 3. Flame shape in flare stack.

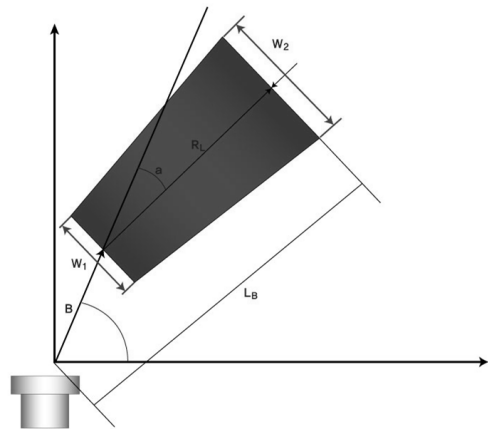


Fig. 4. Flame Sizing in flare stack.

플래어스택의 화염 형상 분석

분석결과, 화염의 길이는 167.56 m이며 이는 바람에 의해 약 3도 기울어져서 화염을 형성하고 있으며, 화염의 중심은 바람의 반대방향으로 2.95 m, 높이는 55.77 m에서 형성되고 있음을 확인하였다.

5.2 Jet fire 모델에 의한 jet fire 형상 분석

플래어스택 입구에서부터 화염의 끝단까지의 길이(L_B)는 60.65 m이며, 실제 화염의 길이(R_L)는 56.14 m, 바람의 영향으로 인한 θ 는 3.03° 이며, 화염이 형성되는 부분에서의 α 는 25.66° 로 나타났다. 또한 화염(절두체)의 지름은 각각 4.8 m, 25.3 m로 분석되었다.

VI. 결 론

플래어스택에서 방출되는 가스의 방출속도와 기상상태에 따라서 화염의 길이가 변형되며, jet fire 모델을 이용하여 화염의 최대높이(화염의 중심부)를 분석해 본 결과 API code 와 비교하여 화염의 길이가 약 0.6% 증가함을 확인할 수 있었다. 또한, 화염의 기울기가 지면쪽으로 더 많이 기울어지는 것으로 분석되었으며, 이는 화염의 면이 지면과의 접촉이 증가하여 복사열의 강도가 더 클 것으로 판단된다.

사용기호

v_j : 플래어팁 방출속도 (m/s)
 $Mach$: 음속에 대한 플래어가스 속도와 비율
 T : 플래어가스의 온도 (K)
 M_f : 플래어가스의 분자량
 D : 스택지름 (m)
 W : 플래어가스 질량유속 (kg/hr)
 P : 플래어팁 안에서의 플래어가스 압력 (kPa)
 T : 플래어팁 안에서의 플래어 가스의 온도, ($^{\circ}K$)

k : 플래어 가스의 비열비(정압비열, C_p /정용비열, C_v)

L_B : 화염의 길이 (m)

L_{B0} : 대기중에서의 화염의 길이 (m)

V_w : 바람의 속도 (m/s)

θ : 방출가스의 꺾이는 각도

B : 방출된 후부터 점화되기전 거리(m)

R : 플래어팁부터 화염중심까지 거리(m)

X_c : 플래어팁부터 화염중심까지 X축 거리(m)

Y_c : 플래어팁부터 화염중심까지 Y축 거리(m)

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지 안전연구단”의 연구 결과입니다(세부과제번호: 2007-M-CC23-P-02-1-000).

참고문헌

- [1] KOSHA CODE, "플래어시스템의 공정설계 기술 지침", 한국산업안전공단 (2003)
- [2] API Recommended practice 521 Fourth edition, "Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems", American Petroleum Institute, (March 1997)
- [3] Chamberlain, G. A., "'Developments in design methods for predicting thermal radiation from flares'", Chem. Eng. Res. Des., Vol. 65, pp 299-309, (July 1987)
- [4] Banerjee, k. "Flare gas systems pocket handbook", Gulf Publishing Company, pp84 (1985)