



플레어스택의 정량적인 복사열 분석

정상용 · 이현석* · 김범수* · 유진환* · 박철환* · *고재욱*

한국가스안전공사 가스안전연구원, *광운대학교 화학공학과
(2010년 2월 3일 접수, 2010년 2월 28일 수정, 2010년 2월 28일 채택)

Quantitative Analysis of Thermal Radiation in Flare Stack

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

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

**Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University*

(Received 3. February. 2010, Revised 28. February. 2010, Accepted 28. February. 2010)

요 약

공정내의 가연성 혹은 독성가스를 연소시켜 안전한 물질로 전환시키는 것을 목적으로 플레어시스템이 설치되어 있다. 플레어시스템은 공정의 안전성 향상을 위하여 폐가스의 안전한 연소가 가장 중요한 요소이다. 연소의 복사열이 공정의 위험요인이 되지 않도록 API 521 Code에 규정되어 있다. 플레어스택에서 발생하는 화염의 형상은 방출되는 가스의 압력과 질량유속에 의하여 jet fire의 형상을 하고 있으며, 이를 API 521 Code 방식이 아닌 Chamberlain Model을 이용하여 화염의 형상을 확인하고, 이로 인한 복사열을 분석하였다.

Abstract - The most important element for improving the process safety that occurs from the flare system installed to convert into safe materials by burning the inflammable or toxic gases within the process and this is specified in the API 521 Code so that the radiation does not cause a risk factor. The flames that occur from the flare stack holds the shape of jet fire due to the pressure and flow velocity of discharge gas. This study has identified the shape of flames by using the Chamberlain Model rather than the API 521 Code method, analyzing the radiation due to this.

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

1. 서론

화학공정에서 발생할 수 있는 가장 위험한 상황 중의 하나는 밀폐계 내의 압력이 설계압력 이상으로 상승하는 것이다. 이는 운전상의 오조작, 계기 오작동, 외부 화재, 열팽창, 발열반응 등에 의해 발생할 수 있다. 이때 밀폐 계에 적절한 보호 장치가 없다면, 과압에 의한 치명적인 손상이 발생하여 기계적 파손, 제품 손실, 독성물질의 방출, 인명피해 등이 발생할 수 있다.

릴리프시스템은 공정 내에 과압을 방지하여 공정

의 안전성을 높여주는 역할을 한다. 릴리프시스템에서 방출되는 폐가스로 인한 폭발, 복사열, 독성가스 확산을 막기 위하여 플레어시스템을 설치한다.

플레어시스템은 공정 내 폐가스가 그대로 대기 중에 배출될 경우, 석유화학제품 특성상 증기운을 형성하여 공장 및 인근 지역에서 화재·폭발을 일으킬 수 있으므로 이를 방지하기 위한 설비이다[1]. 플레어시스템은 대부분의 대단위 석유화학 플랜트에 설치되어 있는 설비로서 중요한 안전설비 중의 하나이다. 플레어시스템의 설계에 있어서 가장 중요한 것은 방출되는 가연성 가스의 안전한 연소이다. 또한 연소 과정에서 방출되는 열은 공장내 설비 및 작업자에게 악영향을 미치기 때문에 플레어시스템 설계시에는 안전한 연소 뿐만 아니라, 연소

*주저자:jwko@kw.ac.kr

후의 복사열도 반드시 고려해야 한다.

이 연구에서는 Chamberlain 모델을 이용하여 플레어스택에서의 화염의 형상(크기, 길이)을 분석하고 거리와 대기의 상태를 고려하여 복사열을 감소시킬 수 있는 스택의 안전높이를 구하고자 한다.

II. 플레어시스템

2.1 플레어시스템

장치산업인 정유 및 석유화학 공정에서 설계압력 이상으로 발생하는 가스는 압력해소를 통한 공정의 안전성 확보를 위해 신속히 외부로 배출시키도록 규정되어 있으나, 제거되는 가스 그대로 대기 중에 배출될 경우, 석유화학제품 특성상 증기운을 형성하여 화재·폭발을 일으킬 수 있으므로 이를 방지하기 위한 설비로서 가장 일반적으로 사용되는 플레어스택은 공정 특성상 사용되지 않는 일부 경우를 제외하고는 대부분의 대단위 석유화학 플랜트에서 일반적으로 접할 수 있는 설비로서 중요한 안전설비 중의 하나이다. 2005년 3월 23일 미국 BP Texas의 Isomerization Unit 폭발 사고를 통해 공정내 가연성 가스의 위험성을 확인할 수 있다. 하지만, 자료(safety valve schedule, flare load summary 등)의 부족으로 인해 설비의 위치, 용량 등 적합성 여부를 판별하는데 어려움이 있고 업체 또한 플레어스택이 offsite에서 관리되고 있어 중요 검토항목을 잘 인식하지 못하는 경우가 있다[1].

2.2 플레어스택

플레어스택의 주요 기능은 정유 및 석유화학공정에서의 릴리프 밸브, rupture 디스크, 압력제어 밸브

등을 통해 방출되는 가연성, 독성 또는 부식성 증기를 연소를 통하여 위험하지 않은 상태로 연소시켜 처리하는 시스템이다. Elevated 플레어스택에 대하여 플레어량(flare load)이 산정되었을 경우에 기본 공정 설계 시 플레어의 안전에 영향을 미치는 주요 검토 항목은 다음과 같다[2].

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

위와 같이 플레어스택의 설계에 있어서 가장 중요한 것은 방출되는 폐가스의 처리 이다. 폐가스의 완전한 연소와 처리과정에서 방출되는 열이 공장내 설비 및 작업자에게 악 영향을 미치기 때문에 플레어시스템 설계시에는 복사열도 반드시 고려해야 한다.

이 때 방출되는 가연성 가스는 플레어 팁에서 점화되며, 그 화염은 jet fire를 형성한다.

2.3 복사열 강도

플레어설계에서, 많은 양의 배출가스 연소로 인한 열복사에 대한 운전원과 설비의 영향을 반드시 평가하여야 하며, 안전운전을 위해 플레어 주변의 복사열 수준을 평가하여 플레어스택의 높이를 산정해야 한다. 그 높이는 지면에서 복사열이 4,000 kcal/m²hr (= 4.73 kW/m²) 이하로 규정되어 있다. 이 수치의 복사열은 받는 사람이 16초 이내에 통증을

Table 1. Recommended Design Total Radiation.

Permissible Design Level (K)		Conditions
BTU/hr.ft ²	kW/m ²	
5000	15.77	Heat intensity on structures and in areas where operators are not likely to be performing duties and where shelter from radiant heat is available (for example, behind equipment)
3000	9.46	Value of K at design flare release at any location to which people have access (for example, at grade below the flare or a service platform of a nearby tower); exposure should be limited to a few seconds, sufficient for escape only
2000	6.31	Heat intensity in areas where emergency actions lasting up to 1 minute may be required by personnel with. out shielding but with appropriate clothing
1500	4.73	Heat intensity in areas where emergency actions lasting several minutes may be required by personnel without shielding but with appropriate clothing
500	1.58	Value of K at any location where personnel with appropriate clothing may be continuously exposed

느끼는 복사열에 해당한다. 이는 **Stoll and Greene** 실험을 기준으로 설정된 기준이다. 허용 가능한 복사열은 노출 시간의 함수이므로, 반응 시간 및 사람의 이동을 포함한 요인을 고려해야 한다. 비상 방출의 경우, 반응시간이 3~5초 정도가 걸리며, 또한 개인이 보호 덮개를 찾거나 해당 지역을 빠져 나오기 전에 10초 정도가 경과할 것이다. 결과적으로 운전원에 대한 전체 노출 시간은 13~15초 정도가 될 것이다.

화학공정에서는 **API 521**에 규정된 복사열 강도에 따라 공정설비의 재질 등이 설계시에 반영되며, Guide는 Table 1과 같다.

III. Thermal Radiation

3.1 열복사

플레어탑에서 방출되는 가스가 점화되어 방출되는 열량이 지면까지 도달하는 복사열은 플레어스택의 설계에 있어서 가장 중요한 요인이다. 복사열은 거리에 따라서 감소하며, 대기의 상태에 따라서 전달율(τ)이 변한다. 복사열은 다음과 같이 표현된다.

$$q = Q \times VF \times \tau \quad (1)$$

3.2 View factor

Fig. 1은 플레어스택에서의 방출되는 화염은 **jet fire**를 이루며, 화염에서 방출되는 열량은 화염표면과 지면(또는 observer)의 거리에 따라서 전달되어지는 열량이 다르다. **View factor**는 다음과 같이 계산된다.

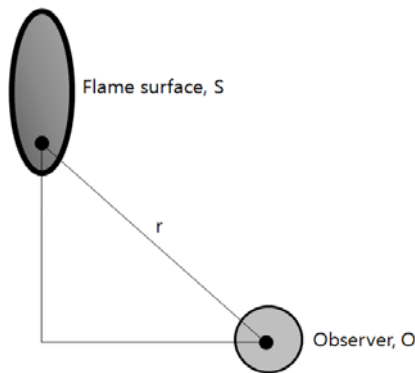


Fig. 1. View factor.

$$VF = \iint_{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 \quad (2)$$

3.3 대기투과율

대기 투과율(τ)은 열복사에 있어서 매우 중요한 요인이다. 열복사는 대기를 투과하면서 흡수되기도 하고 분산되기도 한다. 이 때문에 발열체에서 나오는 열에너지가 감소되어서 전해진다. 대기 투과율은 대기 중의 발열체와 관측체의 거리와 대기의 수증기압(P_w)에 반비례한다.

$$\tau = 2.02(P_w r)^{-0.09} \quad (3)$$

3.4 표면적 열방출 분율

Jet fire에서의 표면적 열방출 되는 열의 분율은 가스의 방출되는 속도(v_j)에 따라 달라지며, 다음과 같이 계산되어 진다.

$$F_s = 0.21e^{-0.00323v_j} + 0.11 \quad (4)$$

3.5 복사열에 따른 높이 선정

공정내에서 설계이상의 과압이 형성될 경우, 폐가스가 방출되며, 플레어스택에서 연소된다. 하지만 플레어스택에서의 연소시에 방출되는 복사열은 플레어스택의 바로 아래 지표면에서 작업자가 차폐물은 없이 적절한 복장을 착용하고 수 분 정도 지속되는 비상조치를 할 수 있도록 열강도로서 플레어스택의 높이를 높여서 바로 밑 지면에서의 복사열을 최대 4.73 kW/m² 를 유지할 수 있게 한다. 이는 **API 521**에 규정되어 있다.

IV. API 521 Code와 jet fire model을 이용한 플레어스택의 높이 선정

국내의 화학공장내의 플레어스택은 공정내의 원료에 따라 높이가 다양하다. **NCC** 공정의 경우 원료의 특성상 폐가스 방출량이 매우 상대적으로 많으며, 이에 따라 플레어스택의 높이가 가장 높게 설계되어 있다[4].

이 연구에서는 **OO** 산단의 **NCC** 공정을 적용하였으며, 가장 폐가스를 많이 배출할 **Cold Water Failure** 상황일 때 방출되는 폐가스가 연소되는 경우를 선택하여 높이를 계산하였다. Table 2는 **NCC** 공정에서 방출되는 폐가스의 성분, 온도, 압력 등의

Table 2. 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

플레어스택의 높이 산정에 필요한 자료이다.

4.1 API Code에 따른 플레어스택의 높이

API 521 Code[2]에는 플레어팁에서 폐가스가 강한 바람에서도 화염이 꺼지지 않도록 폐가스 방출 속도(v_j)와 플레어팁의 지름(D)이 규정되어 있으며, 식은 다음과 같다.

$$v_j = Mach \times 91.2 \times \left(\frac{kT}{M_f} \right)^{0.5} \quad (5)$$

$$Mach = 1.185 \times 10^{-3} \frac{W}{PD^2} \sqrt{\frac{T}{kM_f}} \quad (6)$$

API Code에 따라서 폐가스의 방출속도는 171 m/s로 플레어팁의 지름은 1.29 m로 계산되었다.

플레어스택에서 방출되는 폐가스는 점화장치에 의해 점화되며, 화염의 길이(L_f)는 식 (7)에 의해 계산된다[3].

$$L_f = 118D \quad (7)$$

플레어스택의 높이는 지면에서 근무하는 작업자가 차폐복 없이는 약 20초 정도, 차폐복 착용 중에는 수 분 정도 견딜수 있도록 최대 복사열이 4.73 kW/m²를 유지 하게 한다. 따라서 폐가스가 점화되면서 방출하는 열량이 화염의 중심부와 지표면까지 도달하면서 4.73 kW/m² 이하가 되도록 거리(플레어스택의 높이)를 조절하여 설계한다. 화염의 중심부부터 지표면 거리까지는 아래와 같이 계산되며, 거리는 140.8 m이다.

$$R^2 = \frac{W H_{COMB} \epsilon}{4\pi I} \quad (8)$$

방출되는 폐가스가 점화되면서 바람에 의해 휘어진 flame의 각도는 아래와 같이 계산된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_w}{V_j} \right) \quad (9)$$

Flame 중심부에서 플레어스택까지의 가로, 세로의 거리는 다음과 같이 계산된다.

$$X_c = (L_f/3)\sin\theta \quad (10)$$

$$Y_c = (L_f/3)\cos\theta \quad (11)$$

플레어스택의 높이(H)는 식 (12)을 이용하여 계산된다.

$$H = R - Y_c \quad (12)$$

계산된 높이는 90.1 m 이다. 하지만 실제 플레어스택 높이는 공정의 안전성 향상을 1.1배 더 높게 설치하여 왔다. 따라서 플레어스택은 99.1 m의 높이를 가진다.

4-2. Jet fire model을 이용한 플레어스택의 높이

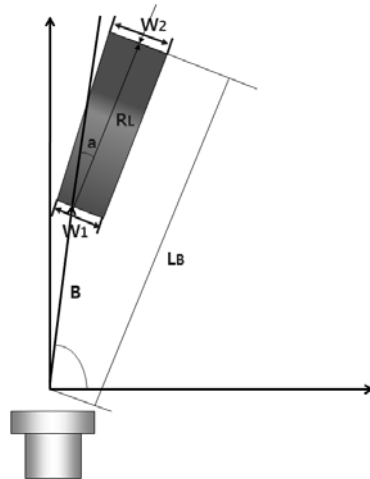


Fig. 2. Flame sizing in flare stack.

플레어스택 입구에서부터 화염의 끝단까지의 길이(L_B)는 60.7 m이며, 실제 화염의 길이(R_L)는 56.1 m로 계산되었다. 또한 바람의 영향으로 인한 θ 는 3.03°이며, 화염이 형성되는 부분에서의 a 는 25.66°로 나타났다[4].

API 521 Code에는 플레어스택의 밑 지면에서의 복사열을 최대 4.73 kW/m² 이하로 유지할 수 있도록

규정되어 있다. 식 (1)에 대기중의 습도를 고려하여 대기 투과율을 0.3~0.5으로 하여 계산을 하면 지면으로부터 화염의 중심이 계산되었으며, 식 (11)을 이용하여, 화염의 중심의 Y 값을 20.1 m 로 계산된다.

플래어스택의 높이는 식 (12)을 이용하여, 94.9 m 로 계산되어진다.

V. 결론

화학공정에서는 운행중 이상반응 또는 오조작으로 인하여 공정내 압력이 높아지는 것을 방지하며, 폐가스인 가연성 혹은 독성가스를 연소시켜 안전한 물질로 전환시키는 것을 목적으로 플래어시스템을 설치한다. 플래어스택의 설계시 그 높이는 API 521 Code에 따라 결정되어 왔다. 이 연구에서는 Chamberlain Model을 사용하여 계산한 결과, 기존의 설계방법보다 작업자의 안전을 위하여 플래어스택의 높이를 더 높게 설계해야 하는 것을 판단된다. 하지만, API 521 Code의 방법에 따라 설계시 계산되어진 높이 보다 약 10% 정도 높게 설치하여 왔으므로, 작업자의 안전에는 지장이 없는 것으로 판단된다.

사용기호

q	= kilowatts per square meter (kW/m^2)
Q	= heating value
VF	= view factor
τ	= fraction of transmitted through the atmosphere.
A_I	= surface of observer
r	= the path length distance from the flame surface to the target
\underline{P}_w	= the water partial pressure (Pascals, N/m^2)
F_s	= Fraction of heat radiated from the surface of the flame
v_j	: velocity of the flare gas at the flare tip (m/s)
D	: flare tip diameter (m)
R	= distance between flame center and

	destination area
W	= weight
H_{COMB}	= caloric value
ϵ	= emmissivity
I	= heat Intensity
V_w	: wind speed (m/s)
L_f	: length of flame (API Code : m)
θ	: angle of released gas
Y_c	: Y celebration flame centers
X_c	: X celebration flame centers
H	: height of flare stack
L_B	: length of flame (Chamberlain : m)
R_L	: length of flame

감사의 글

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

참고문헌

- [1] Jung, S. Y., Lee, H. S., Yang, J. M. and Ko, J. K., “Quantitative Analysis of Thermal Radiation and Decrease Combustibility Gas In Flare-Stack”, KICChE, Theories and Applications of Chemical Engineering, 15 (1), p.1129 (2009).
- [2] API Recommended practice 521 Fourth edition, “Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems”, American Petroleum Institute, (March 1997).
- [3] Banerjee, k. “Flare gas systems pocket handbook”, Gulf Publishing Company, p.84 (1985)
- [4] Lee, H. S., Kim, B. S., Jung, S. Y., Yoo, J. H., Park, C., and Ko, J. K., “Analysis of Flame Shape in Flare Stack” , KIGAS 13(3), pp 49-53. (2009)