

## 플레어 스택의 열복사열의 정량적 분석

이헌석, 박희은, 이지연, 고재욱\*  
 광운대학교 화학공학과  
 (jwko@kw.ac.kr\*)

## Quantitative Analysis of Thermal Radiation and Decrease Combustibility Gas In Flare-Stack

Heon-Seok Lee, Hee-Eun Park, Jee-Yoen Lee, Jae-Wook Ko\*  
 Department of Chemical Engineering Kwangwoon University  
 (jwko@kw.ac.kr\*)

서론

장치산업의 정유 및 석유화학 공정에서 설계압력 이상으로 발생하는 가스는 압력해소를 통한 공정의 안전성 확보를 위해 신속히 외부로 배출시키도록 규정되어 있으나, 제거되는 가스 그대로 대기중에 배출할 경우, 석유화학제품 특성상 증기운을 형성하여 화재·폭발을 일으킬 수 있으므로 이를 방지하기 위한 설비로서 가장 일반적으로 사용되는 플레어스택은 일부공정 특성상 사용되지 않는 경우를 제외하고는 대부분의 대단위 석유화학 플랜트에서 일반적으로 접할 수 있는 설비로서 중요한 안전설비중의 하나이다. 2005년 3월 23일 미국 BP Texas Isomerization Unit 폭발 사고를 보면 공정내의 가연성 가스의 위험성은 잘 나타다 있다. 하지만, 자료의 부족(Safety valve schedule, Flare load summary 등)으로 인해 시설의 적합성 여부를 판별하는데 어려움이 있고 업체 또한 플레어스택이 Offsite에서 관리가 되고 있어 중요검토항목을 잘 인식하지 못하는 경우가 종종 있었다.

본론

플레어 스택의 주요 기능은 정유 및 석유화학공장에서 의 릴리프 밸브, Rupture 디스크, 압력제어 밸브 등을 통해 방출되는 가연성, 독성 또는 부식성 증기를 연소를 통하여 위험하지 않는 상태로 연소(산화)시켜 배출가스를 처리하는 시스템이다. Elevated 플레어 스택에 대하여 플레어 Load 가 산정되었을 경우에 기본 공정 설계 시 플레어의 안전과 성능에 영향을 미치는 주요 검토 항목은 다음과 같다.

- 플레어 크기와 용량(Flare Size or Capacity)
- 화염의 안정(Flame Stability)
- 파일럿과 점화 시스템
- 역화방지(Flashback protection)
- 복사열(Thermal Radiation)
- 무연운전(Smokeless Operation)
- 소음수준(Noise Level)
- 녹아웃 드럼(Knock-Out Drum)
- 시일드럼(Seal Drum)

그중에서도 화학공정에서의 안전성 확보를 위해서는 플레어에 대한 적절한 크기와 용량 선정과 화염의 안정(Flame Stability) 및 복사열(Thermal Radiation)은 중요하다. 이 항목들은 화학공정에서 설비에 열적 영향을 미칠 수 있는 항목들로 이는 “API 521”에 규정된 복사열강도에 Guide가 나와 있으며 “플레어 시스템의 설치에 관한 일반 기술기준” 및 고법고시 제 3관 벤트스택·플레어스택에 복사열에 관한 기준에 따르면 다음과 같다.

표 2 API 521에 규정된 복사열강도에 대한 Guide

허용 설계 수준(K)		조 건
BTU/hr.ft <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	
5000	15.77	운용자가 업무를 수행할 가능성이 없으며 복사열에 대해 차폐물을 이용할 수 있는(예 : 장비의 뒤쪽) 구조물 및 지역에서의 열강도
3000	9.46	사람들이 접근할 수 있는 장소에서 설계 플레어 방출 시의 K 수치(예 : 플레어 이하의 지면이나 가까운 타워의 서비스 플랫폼). 노출은 도피에 필요한 수 초 이내로 제한되어야 한다.
2000	6.31	작업 요원이 차폐물은 없으나 적절한 복장을 착용하고 1분 정도 지속되는 비상조치에 필요한 지역에서의 열강도.
1500	4.73	작업 요원이 차폐물은 없으나 적절한 복장을 착용하고 수분 정도 지속되는 비상조치에 필요한 지역에서의 열강도.
500	1.58	작업 요원이 지속적으로 노출되는 지역에서의 설계 플레어 방출 시의 K 수치

플레어스택의 복사열은 스택 바로 밑의 지표면에서 복사열 1,500 BTU/hr · ft<sup>2</sup>(4,000Kcal/m<sup>2</sup> · hr) 이하가 되도록 위치 및 높이를 설정하여야 하며, 이 수치의 복사열은 받는 사람이 16초 이내에 통증을 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 전체 노출 시간은 13~15초를 소요할 것이다.

따라서 설계 시에 스택 바로 밑의 지표면에서의 복사열을 정량적으로 계산해야 한다. API 521에서 아래와 같은 식을 사용한다.

$$K = \frac{\tau F Q}{4 \pi D^2} \quad \text{식 1}$$

여기서, D : 화염의 중앙에서 지면의 관심대상까지의 거리, m

$\tau$  : 전달되는 복사열 강도의 비율, 1.0 적용

F : 방출 복사열 비율, 0.3 적용

Q : 연소열량, kcal/h

K : 최대허용 복사열량

표. 2 거리에 따른 물질별 복사열량

D(m)	물질별 K (KW/m2)					
	수소	메탄	에탄	부탄	암모니아	일산화탄소
0.2	19.91	8.30	7.78	7.62	3.10	1.68
0.4	4.98	2.70	1.94	1.91	0.77	0.42
0.6	2.21	0.92	0.86	0.85	0.34	0.19
0.8	1.24	0.52	0.49	0.48	0.19	0.10
1.0	0.80	0.33	0.31	0.30	0.12	0.07
1.2	0.55	0.23	0.22	0.21	0.09	0.05
1.4	0.41	0.17	0.16	0.16	0.06	0.03
1.6	0.31	0.13	0.12	0.12	0.05	0.03
1.8	0.25	0.10	0.10	0.09	0.04	0.02
2.0	0.20	0.08	0.08	0.08	0.03	0.02

표 2은 식 1에 따라 각 물질별로 1Kg의 거리에 따른 복사열에 대한 값을 나타낸 것으로 수소가 1Kg 당 가장 높은 열량을 가지고 있음을 볼 수 있다. 하지만 이는 단순히 물질별 열량을 이용하여 계산한 값으로 정량적 위험성평가 프로그램인 PHAST v6.5를 이용하여 계산한 결과는 다음과 같다.

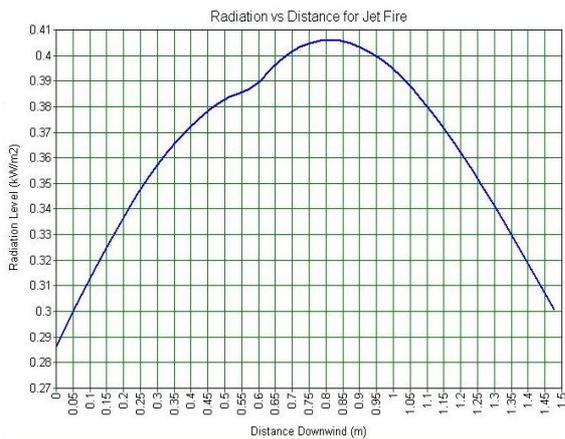


Figure 1. Hydrogen

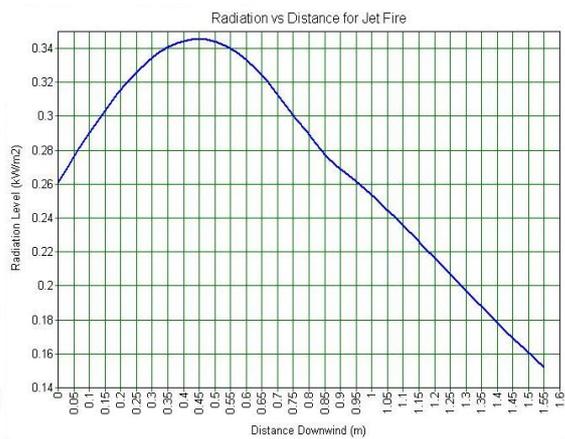


Figure 2. Methan

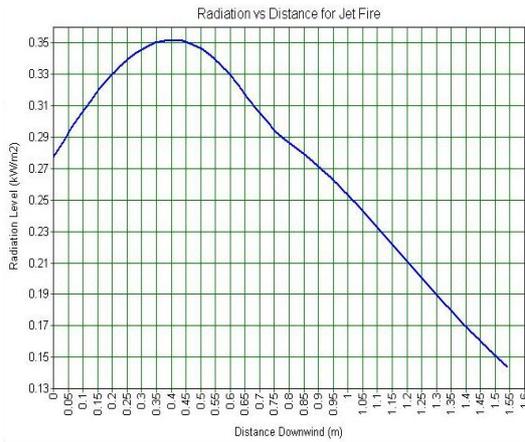


Figure 3. Ethan

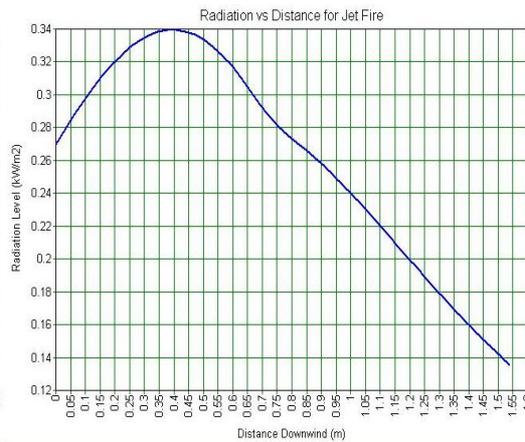


Figure 4. Buthan

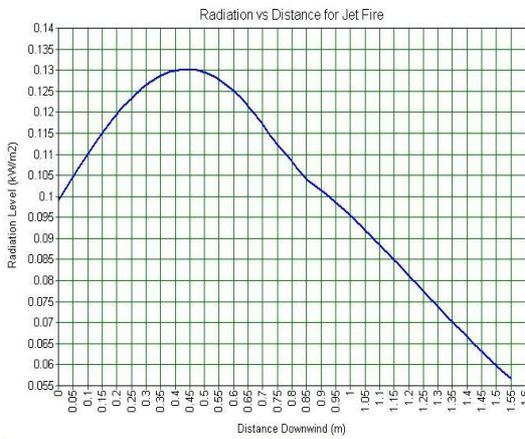


Figure 5. Ammonia

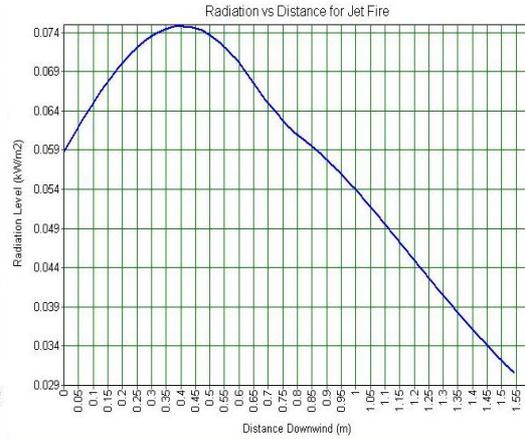


Figure 6. Carbon monoxide

계산식과 다르게 PHAST v6.5의 결과와는 다르게 나왔는데 이는 프로그램에서의 수직형 파이프에서의 가스가 배출되는 상황으로 설정하여 가스 분출되어 나온 이후에 점화가 되는 상황으로 복사열의 최대치가 가스 분출 된 후 약 0.4m에서 점화되는 것으로 계산되었다.

**결론**

플레어 스택에 있어서는 가장 중요한 운영 요인은 배출된 가스의 소각 처리를 안전하게 하기 위해서는 배출된 가스의 연소열은 공정 내 장치뿐만 아니라 작업자의 안전을 위하여 기준에 맞추기 위해서 플레어 스택의 높이를 결정하는데 사용된다. 하지만 이는 단순한 발열량으로 계산하여 그 정확성이 떨어지고 있다. 이는 플랜트 설계의 비용 과다, 혹은 작업자 및 공정에 악영향을 미칠 수 있으므로 정확한 계산의 방법이 수립되어야 할 것이다.