



## 폐가스 회수장치를 이용한 플레어스택의 복사열 감소

이헌석 · 이동혁 · 유진환\* · 박철환 · †고재욱  
광운대학교 화학공학과, \*SK건설 플랜트설계 HSE팀  
(2011년 1월 14일 접수, 2011년 2월 24일 수정, 2011년 2월 24일 채택)

## Reduction of Thermal Radiation from Flare Stack by Flare Gas Recovery Unit

Heon Seok Lee · Dong Heuk Lee · Jin Hwan Yoo\* · Chulhwan Park · †Jae Wook Ko  
†Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University  
\*SK E&C Plant Engineering HSE Team

(Received January 14, 2011; Revised February 24, 2011; Accepted February 24, 2011)

### 요 약

공정운전 중 운전자의 실수나 장치의 고장 등으로 형성되는 과압을 방지하기 위해 blowdown system을 통해 가스를 방출시켜 과압을 해소한다. 방출된 가스는 대부분 탄화수소 혼합물로서 가연성과 독성을 가지고 있으므로 플레어스택에서 연소시킨 후, 공기 중으로 배출시킨다. 그러나 화학공장의 규모가 증가하고 복잡해지면서 폐가스의 양이 증가하여 안전상의 이유로 플레어스택의 높이를 높이거나 추가적인 플레어시스템을 설치하여야 하는 문제가 발생하였다. 이 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 버려지는 폐가스를 회수하여 연료로 사용하는 Flare Gas Recovery System을 도입한 해결방안을 제시하고자 하였다.

**Abstract** - During process operations, overpressure can be caused by operator's error or malfunction of the device. To prevent this overpressure, gas was released through blowdown system. Because most of released gases are the hydrocarbon mixture and have flammable and toxic properties, the gas is released after burning in flare stack. The increase of scale and complexity of plant requires higher or additional flare stacks. This study tried to solve this problem through flare gas recovery system.

**Key words** : flare stack, API 521, thermal radiation, FGRU

### 1. 서 론

정유·화학플랜트는 원유 또는 천연가스 등을 원료로 에틸렌, BTX, 합성수지, 합성석유원료 등과 같은 석유화학제품을 생산한다. 화학공정에서는 생산성을 높이기 위하여 고온, 고압으로 운전되며 모든 물질이 배관과 탱크와 같은 시설 내부에서 반응, 합성, 분리, 이송 및 저장된다. 정유·화학플랜트의 정상운전 중에 최적화된 안전장치에도 불구하고 운전

자의 실수나, 장치의 고장으로 인해 공정 내의 문제점을 야기시킨다. 그 중에서 가장 위험한 상황은 공정 내 이상과압이 형성되는 경우이다.

현재 대부분 정유·화학플랜트들은 생산성 향상을 위해 공정들의 대형화, 집중화가 이루어져 있으며 그로 인하여 공정내의 많은 탄화수소가 축적되어 있다. 만약 압력이 과도하게 상승하면 장치나 배관이 파열되면서 독성물질이나 가연성물질이 누출되는 원인이 된다. 이러한 유형의 사고를 예방하려면 공정 내에 과압을 해소해야 하며 과압을 해소하기 위해 내용물인 가스를 방출해야 한다. 이와 같이 가

†주저자:jwko@kw.ac.kr

스를 방출하는 장치를 **blowdown system**이라 한다. 정유·화학플랜트 내에서 사용되는 원료의 조성 중 가장 많은 비율을 차지하는 성분은 탄화수소이며 그 특성상 가연성이 있기 때문에 대기 중에 배출시키면 화재의 위험이 있다. 또한 미량 함유되어 있는 H<sub>2</sub>S의 독성으로 인해 인명피해가 발생할 수 있다. 비상 운전시 발생하는 폐가스를 안전하게 처리하기 위해 플레어스택에서 연소하여 배출시켜야 한다.

신규 건설되는 정유·화학플랜트의 경우, 폐가스 처리용량에 따라 플레어스택을 설계하기 때문에 폐가스 처리 운전에 위험성은 적으나, 국내의 대부분 정유·화학플랜트의 경우, 1990년대 이전에 설계·시공되어 운전중에 있으며, 업계 전망에 따라 공정에 대한 고도화와 증설이 많이 이루어져 있다. 하지만 플레어스택의 경우 생산성 향상에는 다소 상관성이 없으며, 비공정 지역에서 관리되는 경우가 많다. 만약 플레어스택의 처리량을 증설할 경우, 화염에 의한 복사열이 증가하여 운전원에게 피해를 주거나 주위 구조물을 손상시킬 수 있다. 이를 막기 위하여 플레어스택의 높이를 높이거나 추가적인 플레어스택을 설치해야 한다. 하지만 배관에서의 잠재적인 폭발가능성 및 화염의 역화를 방지하기 위해 질소와 같은 불연성 가스를 계속적으로 배출시켜야 하고 무연연소를 위해 다량의 스팀을 사용해야 하기 때문에 공정 증설에 따른 플레어스택의 증설에는 어려움이 존재하는 상황이다.

이 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 폐가스의 일부를 회수하여 원료 및 연료로 사용함으로써 경제성을 향상시키고 동시에 폐가스의 양을 줄여 안전성을 높일 수 있는 FGRU (Flare Gas Recovery Unit)을 도입하여 플레어시스템의 처리량 감소를 확인하고자 하였다.

## II. 플레어시스템

### 2.1. 플레어시스템의 구성

플레어시스템은 크게 knock-out drum, 플레어스택, 점화장치 등으로 구성되어 있다. 과압이 해소되는 과정에서 발생하는 폐가스는 관내에서 고속으로 이동하기 때문에 액적을 포함할 수 있으며, 이 액적이 폐가스와 함께 플레어시스템 내로 들어가게 된다. 가스 내에 액적이 포함되어 있을 경우 연소시 액체에서 기체로의 부피팽창에 의해 화염의 형상에 영향을 주게 되며 완전연소가 되지 않아 연소물이 지면으로 떨어져서 운전원에게 피해를 줄 수 있다. 그렇기 때문에 knock-out drum에서 가스 내에 포함되어 있는 직경의 길이가 300 μm 이상이 되는 액적을 분리시켜야 한다. Knock-out drum은 액적을 분리하여

안정성을 높여주고 폐가스의 양을 줄여주게 된다. 액적을 분리시킨 폐가스는 seal drum을 거쳐 플레어스택에서 연소된다.

정상적인 경우에는 폐가스가 플레어스택 최상단에 위치한 플레어팁에서 점화되어 화염을 형성하여야 하지만 만약 플레어스택 내에서의 산소 농도가 6%를 넘으면 역화가 발생하게 된다. 이를 방지하기 위하여 플레어스택 내에 퍼지가스를 투입하여 산소 농도를 낮추며 또한 역화가 발생하여 knock-out drum으로 확산되는 것을 막기 위해 seal drum을 설치한다. Seal drum에서는 drum내 물이나 부동액을 채워 가스 입구 배관을 방부에서 수중으로 100~500 mm 정도차로 넣어 가스를 수중으로 통과시켜 연소장치로 이동하게 함으로서 역화를 방지한다.

플레어팁은 플레어스택 최상단에 설치해 토출되는 가스를 연소시켜 주는 장치로서 불꽃을 항상 유지해야 하며 이를 확인하기 위해 온도계를 설치한다. 폐가스는 음속의 0.2~0.5배로 배출되며 순간적으로 과압이 해소되기 때문에 온도가 발화점 이하로 하강할 수 있다. 따라서 만약 플레어팁에서 불꽃이 꺼지게 되면 화염이 꺼질 수도 있고 결과적으로 가연성, 독성의 폐가스가 배출될 수도 있다[1].

### 2.2. 플레어스택에서의 복사열

플레어스택의 높이는 복사열에 따라 결정된다. API 521에 의하면 화염의 중심에서 발생하는 복사열은 플레어스택 바로 밑에서 작업 요원이 적절한 복장을 착용한 상태에서 차폐물 없이 수 분 정도 지속되는 비상조치가 가능한 복사열인 4.73 kw/m<sup>2</sup> 이하가 되어야 한다[2]. 화염의 중심에서부터 지면까지의 복사열은 거리에 따라 변화하며 이 거리를 구하기 위해서는 발열량에 의한 화염의 길이를 구하고 폐가스의 분출속도와 바람의 영향에 의해 변화하는 화염의 기울기 등을 고려해야 한다. 폐가스의 분출속도는 다음의 식으로 구할 수 있다[2].

$$Sonic\ Velocity = 91.2 \sqrt{\frac{KT}{M}} \quad (1)$$

$$Mach = (11.61 \times 10^{-2}) \frac{W}{PD^2} \sqrt{\frac{T}{KM}} \quad (2)$$

방출량에 의한 화염의 길이는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$L_f = 3.94[(Q \times 10^{-6})]^{0.474} \quad (3)$$

**Table 1.** Recommended Design Total Radiation[2]

Permissible Design Level (K)		Conditions
BTU/hr.ft <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	
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

화염의 중심에서부터 지면까지의 복사열은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\epsilon = 0.2 \times \left( \frac{50M + 100}{900} \right)^{0.5} \quad (4)$$

$$I = \frac{(W)(LHV)(\epsilon)}{4\pi R^2} \quad (5)$$

바람의 영향으로 인한 화염 형상의 변화는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{V_w}{V_{EX}} \right) \quad (6)$$

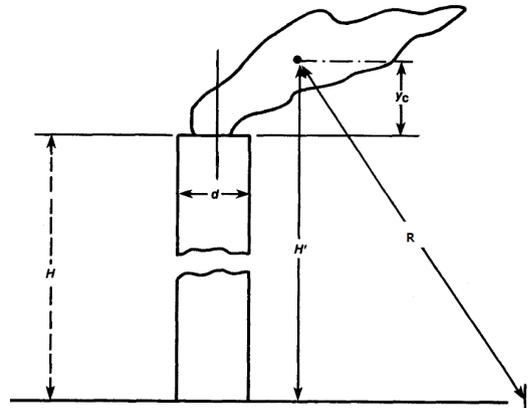
$$X_c = \frac{L_f}{3} \sin\theta \quad (7)$$

$$Y_c = \frac{L_f}{3} \cos\theta \quad (8)$$

위의 식으로부터 구한 값으로 플레어스택의 높이를 구할 수 있다.

$$H = R - Y_c \quad (9)$$

복사열은 폐가스의 양에 따라 결정된다. 따라서 가능한 정확한 flare load를 계산하는 것이 중요하다. flare load를 결정하기 위해서는 플레어시스템에 연결



**Fig. 1.** flare stack[1].

된 모든 공장에 대하여 냉각수 공급중단, 전원공급 중단 등과 같은 압력상승 요인별 총 분출량의 합을 계산하여 이중가장 큰 수치를 flare load로 결정한다. 하지만 화학공장의 규모가 점점 커지고 복잡해지면서 과압이 형성될 상황이 늘어나고 이에 의해 초기에 계산된 flare load 보다 초과될 수도 있다. 결국 복사열이 강해지고 사용할 수 없는 영역이 늘어나게 된다. 플레어시스템의 특성상 설치된 플레어스택 근처에 다른 플레어스택을 설치할 수 없고 플레어스택의 높이를 더욱 높이거나, 추가적인 플레어 시스템이 필요하게 되고 이는 막대한 비용과 시간이 요구된다.

### III. FGRU (Flare Gas Recovery Unit)

#### 3.1. FGRU의 구성

FGRU는 기존의 플레어시스템에 추가로 설치할 수 있으며 FGRU를 통해 나오는 가스는 연료가스로 사용할 수 있기 때문에 플레어스택에서 연소시키는 폐가스의 양을 감소시킬 수 있다. 따라서 플레어스택에서의 복사열도 줄일 수 있고 스티프의 사용량을 감소시키며 기타 운전비나 유지보수 비용을 줄일 수 있고 버려지는 에너지를 회수할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 2.에 FGRU를 그림으로 나타내었다.

FGRU는 크게 압축기, seperator, water cooler로 이루어져 있다. 발생한 폐가스는 knock-out drum에서 기체와 액적 등이 분리된 후 seal drum으로 이동되며 이 중 폐가스의 일부가 나뉘어져서 FGRU으로 들어 오게 된다. 압축기는 시스템내로 들어온 가스를 압축시킨 후 seperator로 보내는 역할을 한다. 폐가스는 조성이 다양하고 액적 등을 포함하고 있기 때문에 압축기에 무리를 줄 수 있다. 따라서 이런 환경에 잘 견딜 수 있는 liquid-ring-compressor가 주로 사용된다. 또한 liquid-ring-compressor 내부의 유체가 압축 중에 발생하는 열의 대부분을 흡수하기 때문에 폐가

스의 온도가 상승하는 것을 막아준다. 압축된 가스는 seperator로 보내져 가벼운 탄화수소는 기체로 분리되어 H<sub>2</sub>S 제거를 위해 amine treatment system으로 보내지고 무거운 탄화수소 액체는 분리되어 발전기 및 heater의 연료로 사용된다[3].

#### 3.2. FGRU의 제어

FGRU의 폐가스 처리용량은 플레어시스템의 처리용량보다 적어야 한다. 만약 플레어시스템으로 유입되는 폐가스의 양이 FGRU의 용량을 초과하면 초과된 양만큼의 가스는 플레어스택으로 보내져 안전하게 처리되며 만약 폐가스 량이 FGRU의 용량보다 작다면 recycle valve가 방출된 가스를 흡입구로 다시 돌려보내 FGRU의 용량을 일정하게 유지시킨다. FGRU는 플레어시스템에 영향을 주어서는 안 되고 갑작스런 폐가스 량의 증가에 대처할 수 있어야 한다. 특히 압축기의 압축과정에서 생기는 흡입력에 의해 flare header에 공기가 유입되는 것이 가장 큰 위험요인이다. flare header에 공기가 유입되면 탄화수소에 산소가 첨가되어 가연성가스혼합물이 생성되고 내부에서 폭발하는 결과를 초래하게 된다. 따라서 압축기는 플레어스택내의 압력이 정압을 유지하여 공기가 유입될 수 없도록 작동되어야 한다[5].

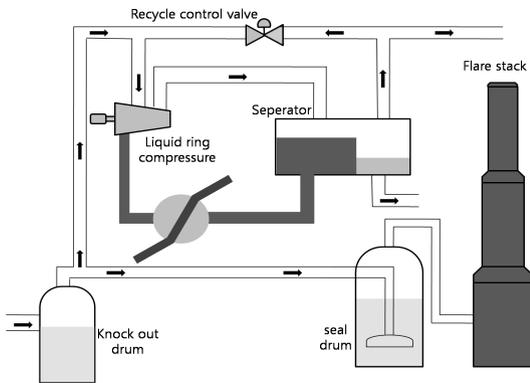


Fig. 2. Flare gas recovery unit.

### IV. 사례연구

앞서 상술한 바와 같이 플레어스택의 높이는 폐가스의 양이 가장 많이 발생하는 경우(전원공급중단, 냉각수공급중단 등)의 flare load 값으로 계산된다. 이 논문에서는 현재 운영 중인 GCDU (General crude distillation unit)를 대상으로 기존의 발생하는 폐가스의 양과 공정의 증설로 인해 폐가스의 양이 현재 발생량보다 2배 증가하였을 때 플레어스택의 높이를 비교하였고, FGRU의 존재 유무에 따른 플레어스택의 높이를 비교하고자 하였다. 폐가스의 조성 및 물성은 Table 2.에 나타내었으며 원활한 계산 및 비교를 위하여 공정모사프로그램인 Hysys를 사용하였다.

Table 2. Composition of flare gas

Component	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	i-C <sub>4</sub>	n-C <sub>4</sub>	i-C <sub>5</sub>	n-C <sub>5</sub>	n-C <sub>6</sub>	H <sub>2</sub> O	C <sub>7</sub>
Mol%	0.09	6.93	6.36	77.33	2.11	0.97	0.2	0.4	0.18	0.23	0.2	4.92	0.08
Temperature	45 °C												
Pressure	1 bar												
Flow	317203 kg/hr												
MW	20.45												
Wind Velocity	10 m/s												

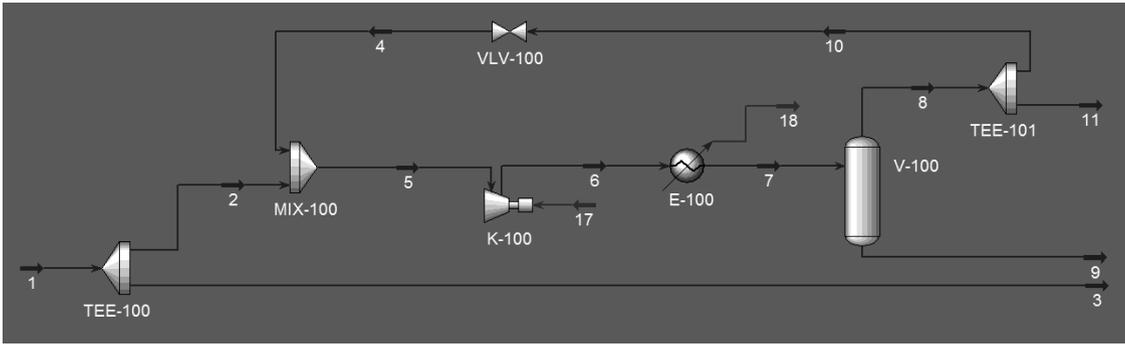


Fig. 3. Case study for efficiency of FGRU using Hysys.

Name	1	2	3	4	5	6
Vapour Fraction	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Temperature [C]	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00	204.0
Pressure [Pa]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	520.0
Molar Flow [kgmole/h]	3.096e+004	3.172e+005	-2.862e+005	-0.0000	3.172e+005	3.172e+005
Mass Flow [kg/h]	6.344e+005	6.501e+006	-5.866e+006	-0.0000	6.501e+006	6.501e+006
Liquid Volume Flow [m3/h]	1637	1.677e+004	-1.514e+004	-0.0000	1.677e+004	1.677e+004
Heat Flow [kJ/h]	-3.167e+009	-2.246e+010	2.929e+010	0.0000	-3.246e+010	-3.023e+010
Name	7	8	9	10	11	→ New →
Vapour Fraction	0.9414	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	
Temperature [C]	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	
Pressure [Pa]	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	
Molar Flow [kgmole/h]	3.172e+005	2.986e+005	1.896e+004	0.0000	2.986e+005	
Mass Flow [kg/h]	6.501e+006	6.025e+006	4.796e+005	0.0000	6.025e+006	
Liquid Volume Flow [m3/h]	1.877e+004	1.619e+004	590.6	0.0000	1.619e+004	
Heat Flow [kJ/h]	-3.443e+010	-2.935e+010	5.080e+009	-0.0000	-2.935e+010	

Fig. 4. States of flow in FGRU.

Name	1	2	3	4	5	6
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.0009	0.0009	0.0009	0.0010	0.0009	0.0009
Comp Mole Frac (H2S)	0.0636	0.0636	0.0636	0.0665	0.0636	0.0636
Comp Mole Frac (Methane)	0.7733	0.7733	0.7733	0.8210	0.7733	0.7733
Comp Mole Frac (Ethane)	0.0211	0.0211	0.0211	0.0222	0.0211	0.0211
Comp Mole Frac (Propane)	0.0097	0.0097	0.0097	0.0098	0.0097	0.0097
Comp Mole Frac (CO2)	1.877e+004	1.619e+004	0.6693	0.0732	1.619e+004	0.6693
Comp Mole Frac (i-Butane)	0.0020	0.0020	0.0020	0.0017	0.0020	0.0020
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.0040	0.0040	0.0040	0.0030	0.0040	0.0040
Comp Mole Frac (i-Pentane)	0.0018	0.0018	0.0018	0.0007	0.0018	0.0018
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.0023	0.0023	0.0023	0.0007	0.0023	0.0023
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.0020	0.0020	0.0020	0.0001	0.0020	0.0020
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.0008	0.0008	0.0008	0.0000	0.0008	0.0008
Comp Mole Frac (H2O)	0.0492	0.0492	0.0492	0.0000	0.0492	0.0492
Name	7	8	9	10	11	→ New →
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.0009	0.0010	0.0000	0.0010	0.0010	
Comp Mole Frac (H2S)	0.0636	0.0665	0.0166	0.0665	0.0665	
Comp Mole Frac (Methane)	0.7733	0.8210	0.0969	0.8210	0.8210	
Comp Mole Frac (Ethane)	0.0211	0.0222	0.0029	0.0222	0.0222	
Comp Mole Frac (Propane)	0.0097	0.0098	0.0009	0.0098	0.0098	
Comp Mole Frac (CO2)	0.0693	0.0732	0.0063	0.0732	0.0732	
Comp Mole Frac (i-Butane)	0.0020	0.0017	0.0064	0.0017	0.0017	
Comp Mole Frac (n-Butane)	0.0040	0.0030	0.0197	0.0030	0.0030	
Comp Mole Frac (i-Pentane)	0.0018	0.0007	0.0189	0.0007	0.0007	
Comp Mole Frac (n-Pentane)	0.0023	0.0007	0.0284	0.0007	0.0007	
Comp Mole Frac (n-Hexane)	0.0020	0.0001	0.0321	0.0001	0.0001	
Comp Mole Frac (n-Heptane)	0.0008	0.0000	0.0125	0.0000	0.0000	
Comp Mole Frac (H2O)	0.0492	0.0000	0.8397	0.0000	0.0000	

Fig. 5. Composition of flow in FGRU.

사례연구의 결과를 Table 3.에 나타내었다. Case1은 공정증설 전의 GCDU에서 발생하는 폐가스를 기준으로 계산된 결과이다. 폐가스의 연소로 인해 형성되는 화염의 길이는 103 m였으며 화염의 중심으로부터 지면까지의 복사열이 4.73 kw/m<sup>2</sup>이하가 되는 거리는 약 115 m였다. 따라서 플레어스택의 높이는 약 81 m로 계산되었다. Case2는 공정의 증설로 인해 폐가스의 양이 2배 증가하였으나 추가적인 플레어스택의 설치나 FGRU없이 기존의 설치된 플레어스택만으로 폐가스를 연소시킨 결과이다. 화염의 길이는 143 m로 증가하며 화염의 중심으로부터 지

Table 3. Result of case study

	폐가스 방출량 (kg/hr)	연소열량 (Mcal/hr)	화염의 길이 (m)	플레어스택의 높이 (m)
case1	317203	3027434	103	81
case2	634406	6054868	143	115
case3	634406	3027434	103	81

면까지의 복사열이 4.73 kw/m<sup>2</sup>이하가 되는 거리는 약 162 m로 계산되었다. 플레어스택의 높이는 약 115 m로 기존의 플레어스택의 높이보다 약 34 m가 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. Case3은 공정의 증설로 인해 폐가스의 양이 2배 증가함에 따라 FGRU의 설치를 통해 연소되는 폐가스를 감소시킨 결과이다. 이 경우에는 기존의 설치된 플레어시스템의 한계용량 이상의 초과량을 FGRU에서 처리하였기 때문에 폐가스의 양이 2배 증가한다고 해도 플레어스택의 높이가 높거나 추가적인 플레어스택을 설치하지 않아도 됨을 알 수 있었다.

## V. 결론

석유화학플랜트 설비가 고도화되고 복잡해지면 폐가스의 양이 증가함에 따라 플레어스택에서 발생하는 복사열이 허용범위를 초과하여 주변 사람이나 시설에 피해를 주는 문제가 발생하였다. 이 문제를 효과적으로 해결하기 위해 버려지는 폐가스를 자원으로 회수하는 FGRU를 설치하여 복사열 감소를 시도해보았다. FGRU의 존재 유무에 따른 효율을 비교해 보기 위해 현재 가동 중인 GCDU를 대상으로 기존의 폐가스 방출량에 따른 플레어스택의 높이와 공정증설로 인해 폐가스 방출량이 2배 증가했을 때

FGRU의 존재 유무에 따른 플레어스택의 높이를 비교하였다. 그 결과 공정증설시 FGRU가 없는 경우에 화염의 중심으로부터 복사열이  $4.73 \text{ kw/m}^2$  이하가 되는 지점은 플레어스택으로부터 약 102 m 떨어진 곳으로 계산되었다. 따라서 플레어스택 주변의 사람이나 시설이 복사열로 인해 문제가 발생할 수 있음을 확인하였다. 반면 FGRU가 있는 경우에는 평균적으로 폐가스가 발생할 때와 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

플레어스택은 flare load에 따라 높이를 결정하여 설치된다. 따라서 공장증설 등의 이유로 폐가스 량이 증가하면 플레어스택에서 발생하는 복사열 또한 증가하기 때문에 폐가스 량의 변화에 대응하기 어렵다. 또한 복사열에 의한 피해 때문에 이미 플레어스택이 설치된 곳에 추가로 설치할 수 없다는 단점이 있다. 반면 FGRU는 이미 설치된 플레어시스템에 설치할 수 있고 플레어스택에서 발생하는 복사열을 줄일 수 있으며 버려지는 폐가스를 자원화 하기 때문에 설치의 용이함 뿐만 아니라 경제성 측면에서도 큰 장점이 있다.

### 사용기호

D : 스택지름 (m)  
 H : 플레어스택의 높이 (m)  
 I : 열속 ( $\text{kw/m}^2$ )  
 K : 플레어가스의 비열비 (정압비열,  $C_p$ /정용비열,  $C_v$ )  
 LHV : 평균 연소열량 (kcal/kg)  
 $L_f$  : 화염의 길이 (m)  
 Mach : 음속에 대한 플레어가스 속도와 비율

$M_f$  : 플레어가스의 분자량  
 P : 플레어팁 안에서의 플레어가스 압력 (kPa)  
 Q : 총 연소열량 (Btu/hr)  
 R : 화염의 중심에서부터 지면까지의 거리 (m)  
 T : 플레어팁 안에서의 플레어가스의 온도, ( $^{\circ}\text{K}$ )  
 $V_{EX}$  : 플레어팁 방출속도 (m/s)  
 $V_W$  : 풍속 (m/s)  
 W : 플레어가스 질량유속 (kg/hr)  
 $X_c$  : 플레어스택과 화염의 중심까지의 가로길이 (m)  
 $Y_c$  : 플레어스택과 화염의 중심까지의 세로길이 (m)  
 $\theta$  : 방출가스의 꺾이는 각도 (degree)  
 $\epsilon$  : 방사율

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지안전 연구단”의 연구 결과입니다.

### 참고문헌

- [1] KOSHA CODE, “플레어시스템의 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] O. Zadakbar, “Flare gas recovery in oil and gas refineries”, *Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 63, No. 6, pp. 705-711, (2008)