

## 휘발성 유기물질의 고효율 연소 및 열회수 시스템

이시훈 · 현주수 · 임영준  
한국에너지기술연구원 청정에너지연구부

**Highly Efficient Combustion and Heat Recovery System  
for Volatile Organic Compounds**

Si-hyun Lee, Ju-soo Hyun, Young-jun Lim, and Young-jun Shon  
Clean Energy Research Department, Korea Institute of Energy Research

## 서론

저발열량 가스(LCVG : low calorific value gases)의 종류는 석탄 가스, coke oven gas, carbon black waste gas, 화학공정 폐가스, 휘발성 유기화합물(VOC) 등 다양하다. 발열량이 150~750 kcal/m<sup>3</sup> (석탄 가스는 2,000kcal/m<sup>3</sup>까지 있음) 정도의 가스를 말하며 주요 조성은 H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> 등이다. 화학공정 폐가스나 휘발성 유기물질 배출공정에서는 저농도(LEL25% 이하)의 유기물질이 주 조성이다.

LCVG 연소의 특징은 활성화 에너지가 높고 (high activation energy) 발생 에너지가 낮다는 (low energy output) 것이다. LCVG 연소는 연소가 어렵고 에너지가 많이 투입되어 고에너지 소비공정이 된다. Table 1에 주요 가연성 저발열량 가스의 종류와 특성을 나타내었다. 화학공정 폐가스와 VOCs는 종류가 다양하여 나타내지 않았다.

Table 1. Characteristics of low calorific gases.

	Carbon black waste gas (%)	Discharge cycle gases from coke ovens		Projected fuel composition from air blown lurgi gas process (%)
		Rich gas part of cycle (%)	Very lean gas part of cycle (%)	
O <sub>2</sub>	0	0.7	6.06	0
H <sub>2</sub>	6.02	2.4	2.4	19.6
CO <sub>2</sub>	2.76	3.4	3.4	13.3
N <sub>2</sub>	36.26	29.4	29.4	37.6
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.16	0	0	0
CH <sub>4</sub>	0.1	4.6	4.6	5.5
CO	6.3	4.6	4.6	13.9
H <sub>2</sub> O	48.0	54.9	54.9	10.1
	CV 1.49MJ/m <sup>3</sup> (355 kcal/kg)	CV 5.0 MJ/m <sup>3</sup> (1,190kcal/kg) much of CV comes from tars and hydrocarbons	CV 0.744MJ/m <sup>3</sup> (177 kcal/kg)	CV 5.06MJ/m <sup>3</sup> (1,210 kcal/kg)
Stoichiometric air/fuel ratio	0.48	2.03	0	2.16

LCVG 연소의 문제점은 발열량이 낮아 화염 안정성이 낮고 자체 발열량으로 연소온도 유지가 어려워 보조연료의 사용량이 많다는 것이다. 선회 연소시스템은 연소기 내에 강한 swirl flow를 만들어서 폐가스 연소를 위한 활성화에너지를 공급해주고 열밀도를 증가시키며 동일 입열량으로 고온의 연소온도를 유지하게 하는 고효율 연소시스템이다.

본 연구에서는 휘발성 유기물질을 대상으로 선회연소시스템을 적용하여 연소특성을 고찰하였다.

**Cyclone Combustor**

선회연소시스템은 고선회도 시스템으로 특징 지워지는데 이 경우 선회도는 다음과 같이 기하학적인 변수만으로 정의될 수 있다.

$$S = \frac{G_{\theta}}{G_x(D_e/2)} \quad (1)$$

여기서  $G_{\theta}$ 는 axial flux of angular momentum이며  $G_x$ 는 axial flux of axial momentum이다.  $D_e$ 는 배출구의 직경이다.

LCVG 연소를 위해 해결하여야 하는 과제는 위에서 제시한 두가지 문제, 즉 연소를 위한 high activation energy와 연소가스의 low energy output을 어떻게 해결하느냐 하는 것이다. 이 문제의 해결책이 바로 internal energy circulation이 가능한 cyclone combustor이다 [1-4].

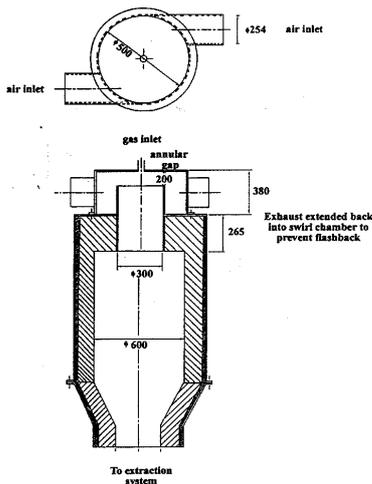


Fig. 2. Swirl burner/furnace system[1].

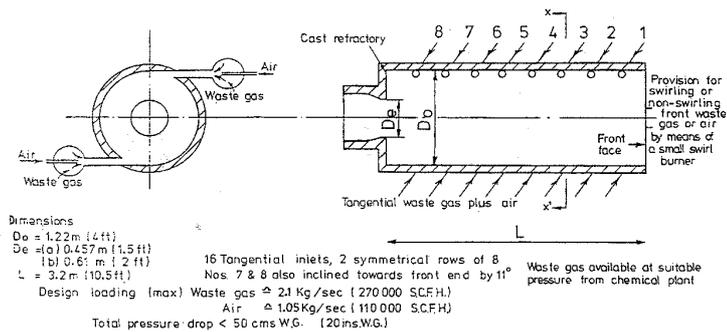


Fig. 1. Multi-inlet cyclone combustor[1].

Cyclone combustor 중에서 저발량 가스 연소에 사용되는 두가지 형태의 연소기를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 1의 multi-inlet cyclone combustor는 가연성 가스 연소시 화염안정성과 압력손실을 최소화하기 위한 목적으로 긴 원통형의 chamber에 작은 구경의 inlet을 여러개 만들어 사용하는 경우이다. 특히 화염안정성에 장점을 갖고 있는 것으로 알려져 있다. Fig. 2의 Swirl burner/furnace system은 coke oven gas의 연소를 위해서 cyclone 연소기를 burner 형태로 개조한 것이다.

**실험**

여러 가지 종류의 VOC(방향족류, 알콜류, 케톤류)를 대상으로 하였다. 기본 실험을 위한 가장 기본적인 형태의 cyclone combustor를 제작하였으며 pilot plant의 사진을 Fig. 3

에 나타내었다. 연소실 내부용적은 70L로 하였으며 버너실과 연소기 exit 부분을 합치면 약 100L의 크기이다. VOC를 포함한 공기를 공기에열기(cross flow type)를 거쳐 버너실과 연소실로 주입되도록 하였다.



Fig. 3. Pilot plant for VOC combustion.

주변장치로는 cross flow type 열교환기와 폐가스(VOC) 발생장치, FD fan, ID fan, 동력측정장치, 가스 버너, 연소가스 측정장치, VOC 측정용 gas chromatograph, data aquisition system, 압력차 측정장치, 유량 측정용 orifice와 manometer 등을 설치하였다.

VOC의 농도(% LEL)와 풍량, 온도를 변화시켜 실험하였다. 선회도를 변화시키기 위해서는 inlet 부분의 단면적을 줄일 수 있는 piece를 제작하여 inlet 부분을 막도록 하여 실험하였다. VOC 농도 변화는 약 30L 규모의 용기에 대상 VOC를 채우고 bubbling 시키는 유량과 온도를 달리하여 제어하였다.

### 결과 및 고찰

Swirl number 변화에 따른 실험결과를 Table 2에 나타내었다.

Swirl number를 2.8에서 11.1로 변화시켰을 때 동일한 input energy에서 연소온도의 평균값( $T_v$ ,  $T_h$ )은 큰 차이가 없었다. 온도 상승값인  $T_v - T_i$ 에서도 거의 유사한 결과를 나타내었다. 그러나 swirl number 증가에 따라, 연소실 상단과 하단의 온도차( $\Delta T_v$ )는 작아지고, combustor wall과

center 부분의 온도차( $\Delta T_h$ )는 커지는 경향이 뚜렷하였다. 이러한 연소온도 분포 결과는 auxiliary fuel인 LPG만 사용하는 실험에서도 유사한 결과를 보였다.

CO 가스 발생량은 swirl number 증가에 따라 감소하였다. 특히 swirl number가 11.1 일때는, LPG를 1.15 kg/hr으로 가장 적게 사용하는 경우에도 평균 연소온도는 20-30도 차이에 불과하였으나 CO 발생량은 33 ppm으로 낮았다. Swirl number 2.8에서 11.1까지의 변화에서 같은 운전조건에서 연소실 압력손실( $\Delta P$ )은 큰 변화가 없이 약 0.55 kWh 정도를 나타내었다.

결론적으로 swirl number 증가에 의해 평균연소온도는 차이가 없으며 연소성능이 향상되어 CO 발생량이 감소하는 효과가 있음이 입증되었다.

### 결론

LCVG 연소에 적합한 cyclone combustor의 연소특성을 고찰하였다. VOCs(toluene)를 대상으로 swirl number 변화, total air flow 변화, 3rd air flow 변화실험을 하였으며 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Swirl number 증가는 평균연소온도는 일정하나 연소성능이 향상되어 CO 발생량이 감소하는 효과가 있음이 입증되었다.

Table 2. Combustion results with swirl number variation

LPG (kg/hr)	Toluene (ppm)	Swirl number	Temperature(°C)				Tv-Ti (°C)	CO (ppm)	ΔP (mmAq)	Fan Power (kWh)	Input Energy (kcal/hr)
			Tv	Th	ΔTv	ΔTh					
2.88	0	2.8	938	736	297	349	649	1	18.9	0.451	34109
		5.5	934	672	222	433	648	1	20.7	0.49	34109
		11.1	947	782	163	472	647	1	18.4	0.471	34109
1.51	2400	2.8	889	772	160	242	523	22	23.2	0.521	27500
		5.5	874	696	111	319	508	18	26	0.587	27567
		11.1	912	771	39	321	533	2	19.9	0.541	27587
1.15	2400	2.8	848	-	135	-	482	111	23.2	0.521	23234
		5.5	834	-	94	-	467	128	25.8	0.6	23269
		11.1	858	-	30	-	474	33	19.9	0.541	23291

air to combustor/air to burner room = 0.87:0.13

Tv: average temperature in combustor, center-axial direction

Th : average temperature in combustor lower part, horizontal

ΔTv : temperature difference between upper and lower part of combustor

ΔTh : temperature difference between wall and center of combustor lower part

Ti : combustor inlet temperature

ΔP : pressure loss, inlet-exit

Fan power : power consumption of F.D Fan and I.D Fan

Input energy : higher heating value of toluene and auxiliary fuel

2. Total air flow를 2.44Nm<sup>3</sup>/min에서 1.94Nm<sup>3</sup>/min로 감소시켜 운전할 경우 retention time은 0.5초에서 0.6초로 증가한다. 이때 처리량은 약 20% 감소되는 단점이 있으나 Fan 소요 동력은 약 40% 이상 절약될 뿐만 아니라 적은 LPG 사용량에서도 연소성능이 더 우수하였다.

3. Combustor 상단에서 combustor wall에 대하여 tangential 방향으로 공급되는 3rd air 는 swirl effect를 증가시켜 연소성능을 향상시키고 fan 소요동력을 감소시키는 효과를 가져왔다.

## 감사

본 연구는 에너지관리공단에서 지원하는 에너지절약기술개발사업으로 수행되었음을 밝힌다.

## 참고문헌

1. Syred, N., Griffith, A.J. and Fick, W., Proceedings of International Symposium on Incineration & Flue Gas Treatment Technologies, Sheffield University, UK, 1/17, 1997
2. Syred, N. and Beér, J.M., Combustion and Flame, 23, 143(1974)
3. Chomiak, J., Longwell, J.P. and Sarofim, A.F., Prog. Energy Combust Sci., 15, 109(1989)
4. Fick, W., Syred, N., Klinge, T., Griffiths, A.J. and O'Doherty, T., J Institute Energy, 71, 12(1998)