한국에너지공학회(2003년도)
춘계 학술발표회 논문집 P573-578

VOC를 대상으로한 Cyclonic recuperative thermal oxidation system의 연소특성 연구

현주수 · 이시훈 · 임영준
한국에너지기술연구원 청정에너지연구부

The Combustion Characteristics of Cyclonic Recuperative Thermal Oxidation System for Volatile Organic Compounds

Ju Soo Hyun · Si Hyun Lee · Young Jun Rhim
Clean Energy Research Department, Korea Institute of Energy Research

1. 서론

본 논문은 산업체에서 발생하는 휘발성 유기물질을 연소하는 직접연소기술에 선회연소 개념을 접목하여 개발된 Cyclonic recuperative thermal oxidation system의 연소성능 실험 결과이다.

기존의 recuperative system의 열효율이 75%로 regenerative thermal oxidation보다 낮아 운전비가 많이 소요되는 단점을 극복하기 위해 기존의 연소실에 cyclone 연소시스템을 적용하여 고효율화 시키고자 하는 것이 핵심이다.

가연성 폐가스는 발열량이 낮아 저발열량 가스(low calorific value gases)로도 불린다. 저발열량 가스의 종류로는 석탄가스(~2,000 kcal/m^3), coke oven gas(~1,200 kcal/m^3), carbon black waste gas(~350 kcal/m^3) 등과 휘발성 유기물질(~150 kcal/m^3)과 같은 화학공정 폐가스가 있다.[1,2] 이 중에서 석탄가스나 coke oven gas, carbon black waste gas 등은 LCVG(low calorific value gases) 중에서는 상대적으로 발열량이 높다. 본 논문에서는 자체 보유 열량이 가장 낮고 활성에너지가 높아 착화가 어려운 휘발성 유기물질을 우선 대상으로 하여 연소성능 실험을 수행하였다.

국내의 경우 연간 휘발성 유기물질 배출량은 약 100만톤으로 추정되며 도장공정이나 주유소, 세탁소 등에서 조사된 양이 약 65만톤, 그리고 기타 중소 산업체에서 35만톤 이상이 배출된다. 폐가스 처리기술중 가장 안정적인 방법인 thermal oxidation 중에서 중소형에 적합한 recuperative system을 효율을 증가시켜 적용하는 기술은 국내의 경우 매우 중요하다.

2. 이론

휘발성 유기물질의 연소에서 가장 큰 문제는 이들 가스가 활성화 에너지가 높고 energy output은 낮다는 것이다.[3] 즉 착화가 어렵고 연소온도가 낮아 완전처리를 위해서는 많은 양의 보조연료가 필요하다는 것이다. 대표적인 휘발성 유기물질의 LEL(lower explosion limit) 및 착화온도를 Table 1에 나타내었다.[4]

이러한 저발열량 가스의 문제점을 해결하기 위해서는 한가지가 해결되어야 한다. 연소에너지의 재순환이다. 연소에너지를 재순환시키는 방법은 두가지이다. 하나는 일반적인 방법으로 열회수 시스템인 열교환기를 운용하는 것이고 다른 하나는 연소기 내부에서 연소가스의 recirculation (recycling of combustion generated heat)을 유도하여 이 고온의 연소가스가 유입되는 가스의 착화에 필요한 활성화에너지를 낮추어주는 역할을 하게 하는 것이다. 연소열을 재순환 시키는 연소기술이 cyclone combustion 이다. Cyclone combustor는 1970년대에 Syred에 의해 개발되어[5] 1980년부터 미국의 TRW에서 발전소의 보일러에 적용하고 있는 기술이다.

Table 1. Lower explosion limit and ignition temperature of typical VOCs

Substance	Inflammability Limit(vol %)			Ignition Temperature(°C)	
	State	Lower	Upper	in air	in O_2
Acetone	g	2.55	12.9	561	-
Benzene	g	1.4	7.1	740	662
Carbon disulfide	g	1.25	50.0	120	-
Ethyl Alcohol	g	3.28	18.95	392	-
Ethylene	g	2.75	28.6	542-547	500-519
Gasoline	l	-	-	260-426	-
n-Hexane	g	1.18	7.4	260	-
IPA	g	2.0	-	-	-
Kerosene	l	-	-	254-293	-
Methyl Alcohol	g	6.72	36.5	470	-
Propylene	g	2.0	11.1	558	-
Toluene	g	1.27	6.75	810	552
Xylene	g	1.0	6.0	-	-

Cyclone combustor는 연소기 내부에 접선방향으로 고속으로 유입되는 연소용 공기로 선회 유동장을 형성하게 된다.[6-8] 따라서 연소가스가 burner쪽 고온부로 feed-back 되면서 열에너지를 갖고 있기 때문에 저열량의 휘발성 유기물질의 유입구 위치에서 착화를 촉진시킨다. 이러한 recirculation 효과로 활성화 에너지가 높아 착화가 어려운 휘발성 유기물질의 활성화 에너지를 낮출 수가 있으므로 보조연료 사용량을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다.

또한 강한 선회 유동장이 형성되어 체류시간이 증가되는 효과를 가져오며, 강한 난류 영역의 형성으로 연료와 공기의 혼합성이 향상되고, 열밀도의 증가로 동일한 입열량으로도 고온의 운전온도를 유지시킬 수 있는 효과가 있다. 즉 연소의 3대요소인 3T(time, temperature, turbulence)를 증가시키는 것이다.

Cyclone combustor는 저발열량 가스들, 발열량이 1.3MJ/m^3(300kcal/m^3) 이하의 가스 연소(최근에는 0.2 MJ/m^3(50 kcal/m^3))에 사용되고 있다.[9,10] 우수한 화염안정성을 갖고 있으며 가스의 자체 발열량이 1.3~1.4 MJ/m^3(300~340kcal/m^3) 이상일 경우에는 보조연료 없이 연소할 수 있다. 일반적인 연소기의 시설 투자와 유사하면서 낮은 압력손실로 운전이 가능한 것으로 보고되고 있다.

3. 실험

3-1. 실험장치 및 실험방법

실험용 cyclone 연소시스템을 설치하였다. 용량은 자체 열량이 50-200 kcal/m^3인 저열량 가스를 시간당 약 150 Nm^3 처리 할 수 있는 규모이다. 설계를 위해 이론적인 열수지 계산을 수행하였으며, 적정 체류시간을 부여하기 위한 연소실 체적 계산 및 연소기 운전온도 유지에 요구되는 보조연료 사용량, 연소용 공기 공급량을 계산하였다. VOCs 연소시스템의 scale-up이나 운전온도, 보조연료 소요량 등의 운전변수에 따른 연소성능의 예측이 가능하도록 하였다

본 연소기는 실험용이므로 고온 및 저온 열부식 상태 확인 및 내부 수리, 청소 및 향후 연소실 부피 변화 실험등이 가능하도록 연소기를 3개 section으로 분리 가능한 구조로 설계하였다. 기본계산 자료를 토대로 설계한 실험용 cyclone 연소기의 형태는 Fig. 1과 같다.

Fig. 2에 시스템 계통도를 나타내었다. 연소용 공기는 FD Fan으로 공급되며 cyclone 연소기 하단에 설치된 예열기에서 약 400°C까지 예열된다. 예열된 연소용 공기는 vortex burner로 공급되는 2차공기와 연소실에 접선방향으로 직접 공급되는 3차공기로 나누어져서 공급되게 된다. 2차공기는 vortex burner를 거쳐 연소실로 유입되는 보조연료 연소용 공기이다. Vortex burner tip에서의 LPG 분사용으로 공급되는 1차공기는 압력 손실을 고려하여 air compressor에서 생성된 압축공기를 사용하였다.

VOC가 함유된 연소용 공기는 vortex burner로 공급되는 2차공기와 cyclone 연소기로 직접 공급되는 3차공기로 구분된다. 2차공기는 보조연료 연소용 공기로서 LPG의 완전연소를 유도하고, 화염의 로벽 충돌을 방지하는 효과가 있으며, 3차공기는 선회유동장을 형성하여 cyclone 유동장을 형성하는 효과가 있다.

압축공기의 일부는 VOCs tank내의 액중으로 유입되어 기포가 생성되도록 하였다. VOCs 발생 농도 제어는 tank 온도와 압축공기량으로 제어하였다. 생성된 VOCs vapor는 상온에서 전체공기 공급 라인에 연결되어 연소용 공기와 혼합된 후에 예열기로 유입하였다.

Cyclone 연소기에서 연소된 약 800℃인 고온의 연소가스는 후단에 설치된 예열기를 통과하면서 VOCs가 함유된 연소용 공기를 예열 시킨 후 약 400℃로 온도가 낮아져서 배출된다. 시스템 후단에는 ID Fan이 설치되어 연소실 내부에 압력을 제어할 수 있도록 하였다. 연소실 내부 압력은 운전중에 -10mmAq에서 -2 mmAq 범위로 약간의 부압이 걸리도록 하였다.

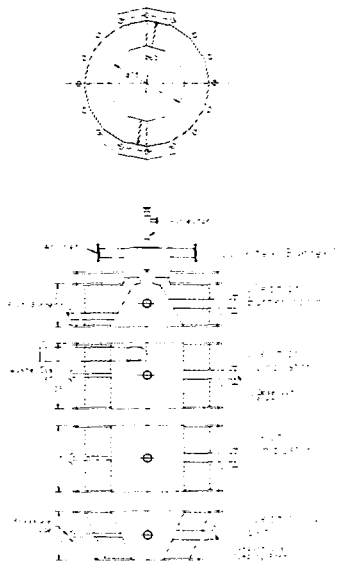

Fig.1. Cyclonic LCVG combustor

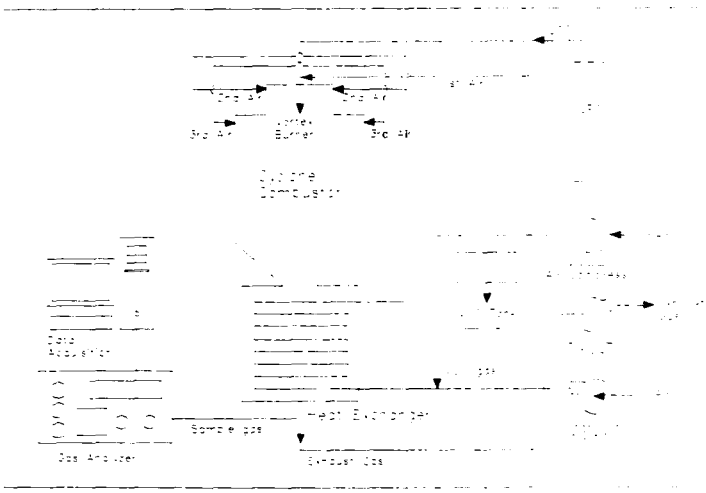

Fig. 2. Schemetic diagram of VOC combustion system

배출가스 라인에 샘플링 포트를 만들어 배기가스 조성(O_2, CO, CO_2, NO_x, VOCs)를 측정할수 있도록 하였으며, 연소기 전후단에 차압계를 설치하여 압력손실을 측정하였다.

본 연소시스템의 연소성능 실험을 위해서 swirl number와 VOCs 농도를 실험변수로 하였다. 이때 측정항목으로는 연소실과 주변장치 각 부위의 온도, 연소실의 압력손실, 보조연료 소요량, 배출가스 농도 그리고 각 운전조건에서 FD fan과 ID fan의 소요동력을 측정하였다.

연소실험용 VOCs는 톨루엔을 대상으로 사용하였다.

3-2. VOC 농도 변화실험

Swirl number 2.8인 조건에서 체류시간이 0.5초 가 되도록 연소용 공기를 약 2.4 Nm^3/min로 일정 하게 하고, 톨루엔의 농도만 변화시키면서 연소실험을 수행하였다. 이때 3차공기 비율은 전체의 77%였다.

Table 2에 실험 결과를 나타내었다. VOC 농도 1500ppm은 톨루엔 LEL의 약 12%에 해당되고, 2000ppm은 LEL17%, 2800ppm은 LEL23%에 해당된다.

연소온도 C1은 버너실 중심부 온도이며, C4는 연소실 배출구에서의 연소가스 온도이다. Avg.T는 연소실 중심부 4곳에서 측정한 온도의 평균치를 나타낸 것이다. 입열량(input energy)은 각 운전조건에서 소요된 보조연료 사용량과 농도에 따른 VOCs의 발열량을 합한 것이다. 소요 동력(fan power)은 일정한 공기공급과 연소실내 압력 유지를 위해 각 운전조건에서 구동된 FD Fan 과 ID Fan 의 소요 전기량을 표시한 것이다. 톨루엔 발열량은 농도 1500ppm, 2000ppm, 2800ppm 일 때 각각 58, 78, 109 kcal/m^3이었다.

실험은 LPG만 연소시킨 baseline 조건에서 톨루 엔 농도를 2800ppm 까지 증가시키면서 수행되었는데 baseline 조건에서 보조연료 LPG 사용량이 2.85 kg/hr 이었던 것이 톨루엔 농도 2800 ppm에서는 LPG 사용량을 1.04 kg/hr 까지 64%가 감소하였다.

이때 연소실 평균온도도 약 890°C로 비교적 일정하게 유지되었다. 그러나 연소실 상단과 하단의 온도차이 폭은 톨루엔 농도 증가에 따라 감소하는 경향을 뚜렷이 보이는데 이는 연료 입열량 중에 보조연료인 LPG 공급량은 줄고 톨루엔의 자체열량 비율이 23%에서 35%, 54%로 증가함에 따라서 연소실 상단에 위치한 vortex burner 화염부위 온도가 낮아지고 상대적으로 연소반응속도가 느린 톨루엔 연소가 연소실 분위기 온도를 지배하기 때문이다.

Table 2. Test results of toluene concentration changes

Toluene Concentration(ppm)	Combustion Temperature(°C)			Exhaust Gas Composition				LPG	Input Energy	Fan Power
	C1	C4	avg.T	O_2(%)	CO(ppm)	CO_2(%)	NO_x(ppm)	(kg/hr)	(kcal/hr)	(kWh)
0	1027	751	866	16.7	0	3.1	43	2.85	33707	0.903
1500	1022	842	908	16.4	1235	3.4	56	2.20	33832	0.987
2000	981	845	891	15.6	16	4.0	33	1.62	29697	0.987
2800	951	861	887	15.5	5	4.1	18	1.04	26640	0.987

C1 : temperature of burner room, C4 : temperature of combustor exit

3-3. Swirl number 변화실험

Cyclone 연소기에서 Swirl number(Sn)는 다음식으로 정의된다.

$$Sn = \frac{\pi D_o D_e}{4A_T} \quad (1)$$

연소기 내경(D_e), 출구경(D_o), 입구면적(A_T)에 의해 결정된다. 따라서 Sn은 저열량 가스 유입구 면적에 반비례하여 변하게 된다.

톨루엔 농도는 2400ppm(LEL20%), 처리유량은 1.9 Nm^3/min, 3차 공기비율은 87%로 일정한 운전조건에서 Sn를 2.8, 5.5, 11.1로 변화시켰다. 이때 baseline 조건은 LPG 2.88 kg/hr 만 전소시킨 것이며, 톨루엔 농도 2400 ppm에서는 LPG 사용량을 1.51 kg/hr와 1.15 kg/hr로 감소시키면서 연소성능을 측정하였다.

Table 3에 나타낸 실험 결과를 보면, Sn를 2.8에서 11.1로 변화시켜도 동일한 입열량 일 때 연소실 내부 온도의 평균치(Tv, Th)에는 큰 변화가 없이 일정하였다. 그러나 Sn 증가에 따라, 연소실 상단과 하단의 온도차는 작아지고, 로벽과 중심부의 온도차는 커졌다. 톨루엔이 공급되지 않은 LPG 전소 실험(LPG 2.88 kg/hr)에서도 유사한 경향을 보였다.

연소성능 판정에 주요한 변수인 CO 발생량은 Sn 증가에 따라 감소되었다. Sn 11.1, LPG 1.15 kg/hr 일때 평균 연소온도는 20-30°C 차이에 불과하나 CO 발생량은 128ppm에서 33 ppm으로 크게 낮아지는 효과를 보여주었다.

Sn 2.8에서 11.1까지의 변화에도 동일 운전조건에서 연소실 압력손실(del.P)은 큰 변화가 없어 동력손실이 약 0.55 kWh 내외였다. 이는 Sn 변화로 입구속도는 약 4배까지 가속되어도 전체 유입

량이 1.9 Nm^3/min 로 일정하여 연소 처리부하에 변동이 없었기 때문으로 생각된다.

Table 3. The test result of swirl number changes

LPG (kg/hr)	톨루엔 (ppm)	Swirl number	Temperature(°C)		CO (ppm)	del.P (mmAq)	Fan Power (kWh)	Input Energy (kcal/hr)
			Tv	Th				
2.88	0	2.8	938	736	1	18.9	0.451	34109
		5.5	934	672	1	20.7	0.490	34109
		11.1	947	782	1	18.4	0.471	34109
1.51	2400	2.8	889	772	22	23.2	0.521	27500
		5.5	874	696	18	26.0	0.587	27567
		11.1	912	771	2	19.9	0.541	27587
1.15	2400	2.8	848	-	111	23.2	0.521	23234
		5.5	834	-	128	25.8	0.600	23269
		11.1	858	-	33	19.9	0.541	23291

* Tv : average temperature of each vertical measuring points
* Th : average temperature of each horizontal measuring points
* del.P : pressure drop - pressure difference between combustor inlet and outlet
* Fan Energy : needed power to operate F.D Fan and I.D Fan
* Input Heat : total supplied heating value includ waste gas heating value

4. 결론

Cyclone 연소기술을 적용하여 휘발성 유기물질을 비롯한 가연성 폐가스의 에너지화를 위한 선회연소시스템을 개발하였다. 일차적으로 톨루엔을 대상으로 연소성능 실험을 수행하였으며 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 100L 규모(150Nm^3/hr)의 선회연소시스템 pilot plant 운전결과 운전온도 800°C, 체류시간 0.5초로 설계된 연소시스템에서 이론적으로 예측한 소요 입열량은 LPG 2.93 kg/hr 였으며, 실제 시스템 운전에서는 LPG 사용량 약 2.8 kg/hr으로 약 850°C 이상의 운전온도를 유지 할 수 있었다.

2) LEL 23%인 톨루엔(2800ppm) 연소시에는 보조연료로 LPG 사용량 1 kg/hr 만으로도 완전연소가 이루어졌다. 이때 전체 입열량중에 보조연료의 비율은 약 46% 였다. LEL 17%인 톨루엔(2000ppm)의 경우 LPG 사용량이 1.6 kg/hr 였으며 이때 보조연료의 비율은 약 65% 였다. 그러나 LEL 12%인 톨루엔은 보조연료의 비율 77%에서도 연소가 어려움을 알 수 있었다.

3) 축방향으로 설치된 vortex burner를 통해 유입되는 2차공기의 비율을 줄여 접선방향으로 공급되는 3차공기의 비율을 70%에서 90%까지 올릴 경우 평균 연소온도가 약 50°C 높아지고, 이때 fan 소요동력도 약 15% 감소되는 결과를 보였다.

4) 유입구 단면적을 변화시켜 swirl number를 2.8에서 11.1까지 변화시킨 경우 swirl number 증가에 따라 CO 발생량이 급감하는 효과가 있었다. 이때 유입속도가 약 4배 가속되나 전체 유입량은 동일하므로 연소실 부하에는 영향을 미치지 않으므로 압력손실도 일정하였다.

5) LEL 23% 톨루엔 연소시에는 base 조건의 약 80% 입열량으로도 동일한 운전온도를 유지할 수 있었다. 즉 VOC 가스 자체 열량이 높아질수록 동일한 입열량으로도 높은 운전온도를 유지할 수가 있으므로 보조연료 사용량을 더욱 절감시킬 수 있었다.

참고문헌

1. Syred, N., Dahmen, K., Styles, A. and Najim, S.: "A review of combustion problems associated with low calorific value fuels", J. Inst. Fuel, 50(405), 1977, 195-207
2. Fick W Syred N Klinge T Griffiths A J O'Doherty T: "Clean and efficient combustion of simulated low calorific value gases in swirl burner/furnace systems", J Inst of Energy, 71 (1998) 12-20
3. Chomiak, J., Longwell, J.P. and Sarofim, A.F.: "Combustion of low calorific value gases ; problems and prospects", Prog. Energy Combust. Sci., 15, 109-129 (1989)

4. Niessen, W.R.: "Combustion and Incineration Processes: Applications in environmental engineering", Pollution Engineering and Technology/7, Marcel Dekker, 1978
5. Syred, N. and Beer, J.M.: "Combustion in swirling flows: a review", Combust. Flame, 1974, 23, 143-201
6. Syred, N. and Dahmen, K.: "Effect of high levels of confinement upon the aerodynamics of swirl burner", J of Energy, 2(1), 8-15(1978)
7. Syred N Fick W O'Doherty T Griffiths A J: "The effect of the precessing vortex core on combustion in a swirl burner", Combustion Science & Technology, 125 (1997) 139-157
8. O'Doherty, T., Biffin, M. and Syred, N.: "The use of tangential offtakes for energy savings in process industries", Proc Instn. Mech. Engrs., 206, (1992) 99-109
9. Froud D Syred N O'Doherty T Biffin M: "Studies of a Swirl Burner Furnace System for the Efficient Combustion of Poor Quality Gaseous Fuels" in Transport Phenomena in Combustion, 2 (1996) 1307-1317
10. Syred N Mirzae H O'Doherty T: "Low-temperature natural gas fired combustors and NOx formation", Proc. Instn Mech. Engrs, 213 (Part A) (1999) 181-190