

## 휘발성 유기물질의 고효율 열산화 시스템 개발 연구

현주수<sup>†</sup> · 이시훈\* · 이종섭\* · 민병무\*

### Study on the Development of Recuperative Thermal Oxidation System for the Volatile Organic Compounds

Ju Soo Hyun, Si Hyun Lee, Jong Sup Lee, Byoung Moo Min

#### ABSTRACT

Volatile organic compounds (VOCs) are low calorific value gases (LCVG) emitted from chemical processes such as painting booth, dye works and drying processes etc. Characteristics of VOCs are low calorific values less than 150 kcal/m<sup>3</sup>, high activation energy for ignition and low energy output. These characteristics usually make combustion unstable and its treatment processes needs high-energy consumption. The cyclone combustion system is suitable for LCVG burning because it can recirculate energy through a high swirling flow to supply the activation energy for ignition, increases energy density to make a combustion temperature higher than usual swirl combustor and also increases mixing intensity. This research was conducted to develop optimized cyclone combustion system for thermal oxidation of VOCs. This research was executed to establish the effect of swirl number with respect to the combustion temperature and composition of exhausted gas in the specific combustor design.

**Key Words** : Volatile organic compounds, Thermal oxidation, Cyclone combustion, Low calorific value gas, Temperature distribution

#### 1. 서 론

본 논문은 중소 산업체에서 발생하는 휘발성 유기물질을 연소하는 열산화 시스템(recuperative thermal oxidation system)에 사이클론 연소기술을 적용하여 보조연료 사용량을 최소화하는 경제적인 열산화 시스템을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 기존 열산화 시스템의 열효율이 75%로 재생 열산화 시스템(regenerative thermal oxidation system)보다 낮아 운전비가 많이 소요되는 단점을 극복하기 위해 사이클론 연소기술을 적용하여 경제성을 향상시키고, 직접 열산화 처리가 가능한 VOC 농도 범위를 확대시키는 것이 핵심이다.

국내의 경우 연간 중소산업체에서 발생하는 휘발성 유기물질 배출량은 약 35만톤 이상이나 이들 업체에서는 부지선정에서부터 인력부족, 기술

부족 등의 이유로 처리기술의 선정에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 휘발성 유기물질을 처리하는 방법으로 사용되고 있거나 개발중인 방법들을 요약하면 Table 1에서 보는바와 같이 크게 제거와 회수의 두 가지 방법으로 대별된다. 휘발성 유기물질의 종류가 많거나 악취나 유독물질이 많은 경우에는 열산화시켜 제거하는 방법이 사용된다. 현재 일반 산업체에서 가장 많이 사용되는 방법은 thermal oxidation이며 촉매소각과 자외선용 이용한 분해기술 그리고 bio-filtration 등이 최근에 새롭게 개발되고 있고 코로나와 플라즈마 이용기술은 연구 단계에 있다.

실제로 다양한 적용기술들 중에서 사업장에서 선호하는 기술은 연소처리다. 연소처리는 다른 기술들과 달리 다양한 종류의 가스에 대한 적용 범위가 넓고, 농도변화에 민감하지 않으며 에너지를 회수할 수 있다는 장점이 있고 무엇보다도 처리효과가 99% 이상으로 확실하다는 것이 큰 장점으로 부각되고 있다.

<sup>†</sup> 연락저자, E-mail : hjs1261@kier.re.kr

\* 한국에너지기술연구원

휘발성 유기물질의 연소에서 가장 큰 문제는 이들 가스가 착화를 위한 활성화 에너지가 높고 energy output은 낮다는 것이다.<sup>1)</sup> 즉 착화가 어렵고 연소온도가 낮아 완전처리를 위해서는 많은 양의 보조연료가 필요하다는 것이다.

연소의 3대 요소로 3T 조건(Time, Temperature, Turbulence)을 들 수 있다. 따라서 난류 유동조건을 개선하여 연소조건을 향상시켜 보조연료 소모량을 최소화하여 경제적이면서, 발생하는 휘발성 유기물질의 농도 변화에도 안정적인 연소가 가능하고, 중소기업에도 적용이 용이한 형태의 직접 열산화 기술을 개발하는데 주요한 점을 두었다.

국내의 경우 연간 휘발성 유기물질 배출량은 약 100만톤으로 추정되며, 중소기업에 적합한 열산화 시스템을 효율을 증가시켜 적용하는 기술은 국내의 경우 매우 중요하다. 본 논문은 세가지 형태의 연소에서 동일한 실험조건에서 톨루엔을 모사가로 연소성능 실험을 수행한 결과이다.

Table 1. VOC abatement technology

Thermal Oxidation
- Recuperative Thermal Oxidation
- Regenerative Thermal Oxidation(RTO)
- Flameless Thermal Oxidation(FTO)
Catalytic Oxidation
- Regenerative Thermal Oxidation
Adsorption
- Adsorptive Removal
- Recovery or Concentration
- Concentration & Thermal Oxidation
Absorption
Condensation : Recovery
Plasma/Corona Destruction
Membrane Separation : Recovery

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험용 연소기

본 연구에서 실험용으로 자체 설계, 제작한 연소기는 3종으로 Type 1, Type 2, Type 3 이다. 세가지 형태의 연소기 실험에서 동일한 운전조건에서의 실험결과를 채택하여 연소성능을 비교 분석하였다.

톨루엔을 대상으로 하여 농도는 2000 ppm(LEL 16.7%, 자체열량 78 kcal/m<sup>3</sup>), 톨루엔 가스 처리량은 2.4 Nm<sup>3</sup>/min, 보조연료 LPG 사용량은 1.76 kg/hr, 체류시간은 약 0.65초, 보조연료용 버너 설치위치는 접선방향인 실험조건에서의 실험결과를

비교하였다. 이때 Swirl number는 Type 1 연소기는 6.0, Type 2 연소기는 25.5, Type 3 연소기는 22.0으로 VOC 가스 유입구의 형태와 단면적에 따라 차이를 보인다. Swirl number가 높을수록 톨루엔가스 유입속도가 빨라져 연료와 공기의 혼합성이 향상되는 반면에 압력손실이 커지는 단점이 있다. 약 650 °C로 예열된 톨루엔가스 유입속도는 Type 1 연소기에서는 15 m/sec, Type 2 연소기는 65 m/sec, Type 3 연소기는 56 m/sec로 계산된다.

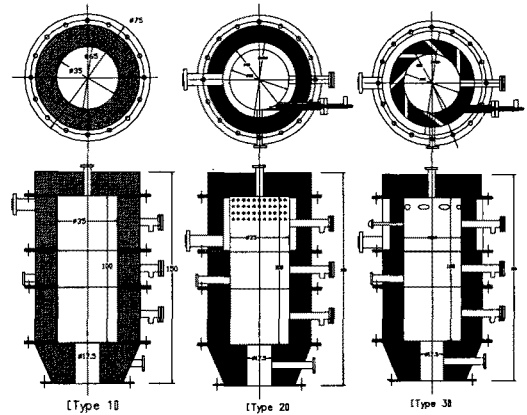


Fig. 1. Drawing of each combustor types

### 2.2. 실험장치

Fig. 2에 시스템 계통도를 나타내었다. 연소용 공기는 F.D. Fan으로 공급되며 cyclone 연소기 하단에 설치된 예열기에서 약 400~500°C까지 예열된다. FD Fan과 예열기 사이에 전체 연소용 공기공급량 측정용 오리피스를 설치하였고, 보조연료 버너로 공급되는 1차공기는 LPG 분사용으로 압력손실을 고려하여 air compressor에서 생성된 압축공기를 사용하였다. 압축공기의 일부는 VOC tank 내로 유입되어 VOC fume이 생성되도록 하였다. VOC 농도 제어는 tank 온도와 압축공기량으로 제어하였다. 생성된 VOC fume은 상온에서 전체공기 공급 라인에 연결되어 연소용 공기와 혼합된 후에 예열기로 유입하였다. 연소기에서 연소된 약 800°C의 연소가스는 후단에 설치된 예열기를 통과하면서 VOC가 함유된 연소용 공기를 예열 시킨 후 약 300°C 이하로 온도가 낮아져서 배출된다. 시스템 후단에는 ID Fan이 설치되어 연소실 내부에 압력을 제어할 수 있도록 하였다. 연소실 내부 압력은 운전중에 -5mmAq에서 0 mmAq 범위로 약간의 부압이 걸리도록 하였다. 배출가스 라인에 샘플링 포트를 만들어 배기가스 조성(O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC)를 측정하였으며, 연소기 전후단에 차압계를 설치하여 압력손실을 측정하였다.

온도와 압력, 유량 측정 data는 computer에서

data acquisition을 하여 자동 기록 및 저장이 되도록 하였다. VOC는 톨루엔을 대상으로 사용하고, VOC 농도와 VOC 처리량을 주 실험변수로 하였다. 이때 측정항목으로는 연소실과 주변장치 각 부위의 온도, 연소실의 압력손실, 보조연료 소량, 배출가스 농도 그리고 각 운전조건에서 FD fan과 ID fan의 소요동력을 측정하였다.

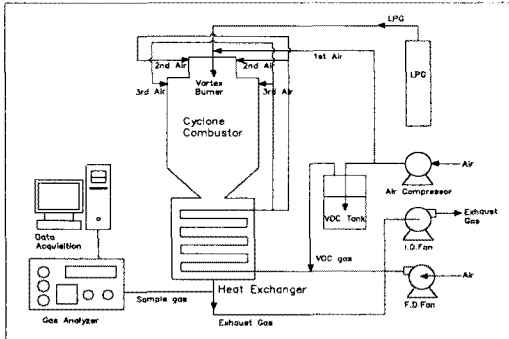


Fig. 2. Schematic process flow diagram of VOC combustion system

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 연소성능실험

Table 2와 Fig. 3, Fig. 4는 세가지 형태의 연소기에서의 톨루엔 농도, 처리량, 보조연료 사용량이 동일한 실험조건에서의 연소성능 실험 결과를 채택하여 비교한 것이다. Tc는 연소온도이며, Ti는 열교환기에서 예열된 후에 연소기로 유입되는 톨루엔 가스 온도이고, To는 연소후 열교환기를 거쳐 대기로 배출되는 배출가스 온도이다. 또한 CT는 연소실 상단에서 82.5 cm 지점에서 연소실 중심부 온도이며, WT는 연소실 상단에서 82.5 cm 지점에서 로벽부의 온도이다. ΔP는 연소기에서의 압력손실로 연소기 전 후단의 압력 차이를 측정된 결과이다. Fan Energy는 톨루엔 가스 처리량 약 2.4 Nm<sup>3</sup>/min, 연소실 내부 압력이 약 0~ -5 mmAq 가 되도록 운전한 FD Fan과 ID Fan 소요 동력이다. Input Heat는 보조연료 발열량과 톨루

엔가스 자체 발열량을 합한 전체 투입열량이다. 이때 톨루엔 농도 2000 ppm 이며, 처리량이 2.4 Nm<sup>3</sup>/min 인 실험조건에서 톨루엔 가스 자체 입열량은 약 33%를 차지한다.

압력손실은 Swirl number가 높은 순으로 증가하는 결과를 보여, Swirl number가 6.0으로 설계된 Type 1 연소기에서는 압력손실이 31 mmAq에 불과하였으나 Swirl number가 25.5인 Type 3 연소기에서는 102 mmAq으로 높아졌다. 따라서 Fan Energy 역시 Type 2 연소기에서 1.12 kWh로 가장 동력비가 많이 드는 것으로 나타났다.

그러나 연소성능을 판정하는데 주요한 변수인 CO 발생량을 보면 Type 2 연소기에서 가장 우수하여 12 ppm을 기록하였다. Type 3 연소기에서는 연소온도가 상대적으로 높았음에도 CO 발생량이 75 ppm으로 Type 1 연소기에서의 43 ppm 보다 많았다.

연소온도(Tc)는 입열량이 유사한 조건임에도 769 °C, 794 °C, 819 °C로 차이가 났는데, Type 3 연소기 실험에서 819 °C로 가장 높았다.

로중심부온도(CT)와 로벽온도(WT)를 보면 Type 1 연소기와 Type 2 연소기의 경우 로중심부 온도(CT)가 로벽온도(WT) 보다 약 20 °C 높은 것으로 측정되었으나, Type 2 연소기에서는 반대로 로벽온도(WT)가 약 30 °C 높았다. 이는 Type 2 연소기에서는 톨루엔 가스가 유입되는 로벽 노즐에서 톨루엔 가스의 착화가 용이하고 톨루엔가스와 보조연료 화염과의 혼합성이 향상되었기 때문으로 판단되며, 따라서 CO 발생량이 Type 2 연소기에서 현저히 감소되는 것으로 나타났다.

Type 2 연소기는 연소실 상부 측면에서 톨루엔 가스를 96개의 분사노즐을 통해 약 65 m/sec로 고속 분사 공급함으로써 혼합성을 향상시키고, 착화가 어렵고 자체 발열량이 낮으며 활성화 에너지가 높은 톨루엔 가스의 연소성을 향상시키기 위해, 보조연료는 환원성 분위기에서 연소가 이루어지며 산소함량이 높은 톨루엔 가스에 의해 분사 노즐에서 톨루엔 가스의 착화가 이루어지도록 설계된 것이다.

Type 3 연소기 역시 톨루엔가스의 착화와 혼합성을 향상을 위해 톨루엔가스의 유입속도가 56 m/sec가 되도록 접선방향으로 톨루엔 가스 분사 노즐을 6개 설치하여 자체 설계, 개발한 형태이다.

Table 2. Properties of each combustor types (Toluene 2000 ppm, 2.4 Nm<sup>3</sup>/min)

Combustor	LPG (kg/hr)	Combustion Temperature(°C)					Exhaust Gas Composition				ΔP (mmAq)	Input Heat (kcal/hr)	Fan Energy (kWh)
		Tc	Ti	To	CT	WT	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> (ppm)			
Type1	1.76	769	595	194	785	768	16.5	43	2.9	40	31	31345	0.84
Type2	1.76	794	667	257	778	807	16.5	12	2.9	53	102	31289	1.12
Type3	1.76	819	655	231	843	823	16.8	75	2.7	108	96	30522	1.04

그러나 실험결과 연료와 공기의 혼합성과 분사노즐에서의 톨루엔 가스 착화성이 Type 2 연소기에 비해 현저히 낮고, 압력손실도 높아 가장 단순한 구조인 Type 1 연소기보다도 오히려 연소성능이 낮은 것으로 나타났다.

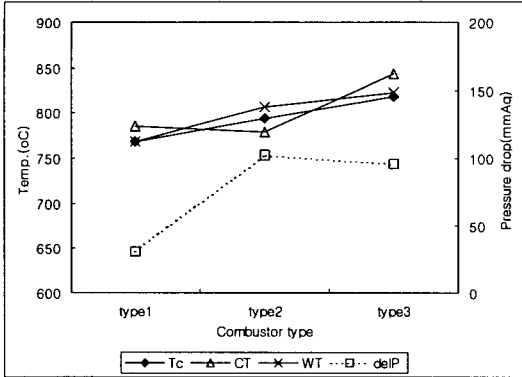


Fig. 3. Combustion temp. & pressure drop at each test

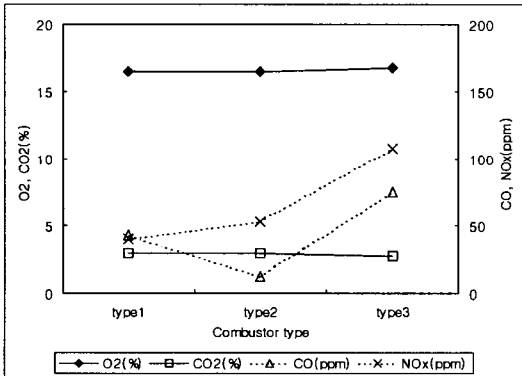


Fig. 4. Exhaust gas concentration at each test

3.2. 연소실 내부온도 분포

Table 3.과 Fig. 5., Fig. 6.은 각 연소기 종류별로 연소실 내부 온도분포를 길이방향과 직경방향으로 측정 한 결과이다. 연소실 길이방향 온도 분포 측정 결과에서, 연소실 상단의 온도가 높고 하단으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 그러나 Type 1 연소기의 경우 톨루엔 가스가 공급되는 위치한 연소실 상단의 온도가 785 °C로 가장 낮았다. 이는 연소실 상단에서 상대적으로 낮은 톨루엔가스가 유입되어 연소실이 냉각되었기 때문이다. 따라서 보조연료 화염 형성으로 고온부에 톨루엔 가스가 유입되더라도 유입구 면적이 커서 유입속도가 낮을 경우 유입구에서 저열량 톨루엔가

스의 착화가 어렵고 혼합성도 저하된다는 것을 알 수 있다. 그러므로 Type 1 연소기에서는  $l_p/l_0$  가 0.5인 위치에서 최고온도인 843 °C를 기록하였다. Type 2와 Type 3 연소기에서는  $l_p/l_0$  가 0.2위치에서 910 °C 이상을 기록하여 연소실 상단에서 톨루엔가스의 착화가 이루어지는 것을 알 수 있다.

Table 3. Combustion temperature distribution on vertical and radial direction

Combustor	Vertical temp. (°C)( $l_p/l_0$ )				Radial temp.(°C)( $r_p/r_0$ )				
	0.2	0.5	0.8	1.0	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0
Type 1	785	843	799	809	711	825	851	849	810
Type 2	915	845	800	813	873	863	849	841	840
Type 3	919	874	833	827	825	876	882	905	890

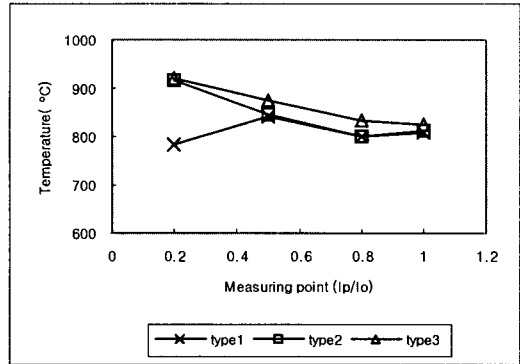


Fig. 5. Temperature distribution on the vertical direction at each test

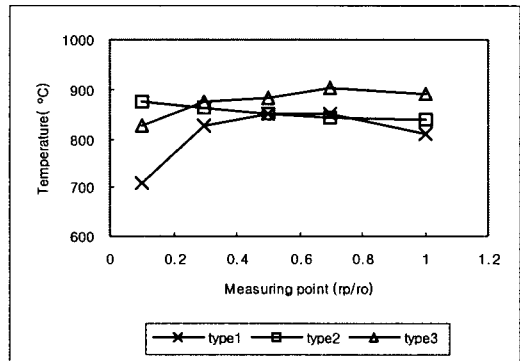


Fig. 6. Temperature distribution on the radial direction at each test

연소실 직경방향 온도분포 측정 결과에서, 로벽에서 로중심으로 갈수록 연소온도가 높아지는 경향을 보인다. 그러나 Type 2 연소기에서는  $r_p/r_0$  가 0.1인 로벽에서의 온도가 873 °C로 가장 높고  $r_p/r_0$  가 1.0인 로중심에서의 온도가 840 °C로 가장 낮

게 나타났으며, 온도차이도 33 °C에 불과하여 균 일한 온도분포를 보이고 있다. 이는 톨루엔 가스가 유입되는 로벽에서 톨루엔 가스의 착화가 이루어졌기 때문이다.

Type 1 연소기에서도 로중심인  $r_p/r_o$  가 1.0 위치 보다  $r_p/r_o$  가 0.5 위치에서 851 °C로 최고온도를 보여 선회연소가 이루어졌음을 알 수 있다. 그러나 톨루엔가스가 유입되는  $r_p/r_o$  가 0.1인 로벽에서의 온도가 711 °C로 상대적으로 크게 낮아 최고온도와 최저온도 차이가 140 °C로 가장 온도분포가 불균일한 현상을 보였다. Type 3 연소기에서는  $r_p/r_o$  가 0.7 위치에서 905 °C로 최고온도를 기록하고 최고온도와 최저온도 차이는 80 °C로 온도 구배는 Type 1 연소기와 Type 2 연소기의 중간치를 보이고 있다. 길이방향 온도측정에서 Type 3 연소기는 연소실 상단에서 착화가 이루어지는 것을 알 수 있으나, 직경방향 온도측정에서는 로벽에서 온도가 825 °C로 가장 낮아 톨루엔 가스 분사노즐에서의 톨루엔가스 착화는 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

**3.3. 비용 계산 및 경제성 비교**

유해가스 열산화 기술에서 직접열산화와 촉매산화의 비용 계산식을 사용하여 톨루엔 가스 처리량과 톨루엔 농도, 연소온도, 체류시간, 열교환기 효율 등의 운전변수에 변화에 따른 운전비용을 계산하였다.

Table 4는 보고 되고 있는 기존의 직접열산화와 촉매산화에서의 운전비용 계산 결과와 본 연구의 Type 2 연소기에서의 실험결과를 토대로 계산된 운전비용을 비교한 것이다.

기존의 저열량가스를 대상으로 한 직접열산화 기술에서 운전비용을 계산한 예를 보면 유량 15,000 scfm(424.5 Nm<sup>3</sup>/min)이고, 저열량가스의 자체발열량(heat content)은 55.4 Btu/lb(36.7 kcal/m<sup>3</sup>), 체류시간 0.75 sec, 가스온도는 120 °F(50 °C), 열교환기 효율은 70%, 산화처리 효율(destruction efficiency)이 99 % 일 때 연소실 운전온도는 1800 °F(982 °C)가 되어야 한다고 보고 되고 있다. 저열량가스의 자체발열량 55.4 Btu/lb(36.7 kcal/m<sup>3</sup>)는 본 실험에 사용된 톨루엔 가스로 환산할 때 톨루엔 농도가 960 ppm에 해당되는 열량이다. 이때 소요되는 LPG 량은 9.14 kg/min로 연간 보조연료비(연료비)는 195,900 \$/yr 이며, fan 동력비(전기료)는 77,700 \$/yr이고 연간 운영비(TAC : total annual cost)는 386,600 \$/yr로 계산되었다.

본 연구에서, 기존 직접열산화시스템 예(980 ppm)와 유사한 톨루엔 가스 농도 1000 ppm (LEL 8.3%) 실험결과를 토대로, 톨루엔 가스 처

리 유량 15,000 scfm로 scale up 하여 계산한 결과와 비교하면 이때 소요된 LPG 량은 5.08 kg/min로 연간 보조연료비(FC)가 약 44 % 절감되고, fan 동력비(EC)도 22 % 감소되어 연간 운영비(TAC)를 약 27 % 절약시킬 수 있는 것으로 나타났다.

그리고 역시 기존의 촉매산화기술에서 운전비용을 계산한 예를 보면 최대 유량은 20,000 scfm(566 Nm<sup>3</sup>/min)이고, 저열량가스의 자체발열량(heat content)은 28.4 Btu/lb(18.9 kcal/m<sup>3</sup>), 가스온도는 120°F(50°C), 열교환기 효율은 50%, 산화처리 효율(destruction efficiency)이 95 % 일 때 연소실 운전온도는 1200 °F(649 °C)가 되어야 한다고 보고 되고 있다. 저열량가스의 자체발열량 28.4 Btu/lb(18.9 kcal/m<sup>3</sup>)는 본 실험에 사용된 톨루엔 가스로 환산할 때 톨루엔 농도가 500 ppm에 해당되는 열량이다.

본 연구에서, 기존 촉매산화시스템의 예(500 ppm)에서 톨루엔 가스 처리 유량 20,000 scfm을 15,000 scfm으로 scale down 하고, 톨루엔 가스 농도 400 ppm(LEL 3.3%)에서 실험한 결과는 scale up하여 계산한 결과를 비교하였다.

먼저 기존 촉매산화시스템에서 소요되는 LPG 량은 7.59 kg/min로 연간 보조연료비는 162,500 \$/yr 이며, fan 동력비(Electricity cost)는 36,900 \$/yr이고 연간 운영비(total annual cost)는 363,800 \$/yr로 계산되었다.

본 연구에서 톨루엔 가스 농도 400 ppm 연소실 실험에 소요되는 LPG 량은 6.57 kg/min로 측정되었다. 따라서 연간 보조연료비(FC)는 약 13 % 줄고 fan 동력비(EC)는 67 % 증가되나 연간 운영비(TAC)는 약 13 % 절약되는 것으로 계산되었다. 이는 촉매산화의 경우에는 고가의 촉매를 2-3년 주기로 교체하여야 하므로 촉매 교체 비용이 연간 운영비에 추가되었기 때문이다.

**Table 4. Comparison of cost estimation results with different VOC oxidation system and with the results of this study**

	Conc. (ppm)	Qf (kg/min)	Tc (°C)	tr (sec)	FC (×1000\$)	EC (×1000\$)	TAC (×1000\$)
Thermal system	960	9.14	982	0.75	195.9	77.7	386.6
Catalytic system	500	7.59	649	-	162.5	36.9	363.8
Test1	400	6.57	780	0.65	140.7	61.5	315.2
Test2	1000	5.08	799	0.65	108.7	60.5	282.3

VOC flow rate : 425 Nm<sup>3</sup>/min, VOC heat content : 37 kcal/m<sup>3</sup>, VOC temperature : 50°C, Heat recovery efficiency : 70%, Combustion temperature : 980°C

따라서 본 연구에서 개발된 Type 2 연소기는

기존 직접열산화시스템에 비해 열밀도가 높고 혼합성이 향상되어 상대적으로 저온에서 완전연소가 가능하여 보조연료비용이 44 % 이상 절감되므로 연간 운영비가 27 % 이상 절감되며, 또한 기존 촉매산화시스템에 비해서는 보조연료비용은 13% 절감되는 반면에 fan 동력비가 67%나 더 소요되나 촉매 교체 비용을 절감할 수 있으므로 연간 운영비가 약 13 % 이상 절감되는 효과가 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

휘발성 유기물질의 직접 열산화 처리용 연소기를 3가지 형태로 제작하여 연소성능 실험과 연소실 내부 온도분포 측정실험을 수행하였다. 각 연소기의 연소실 내부 용적과 보조연료 버너 위치는 동일하나 휘발성 유기물질의 유입구 형태를 바꿔 보조연료 화염과 연소실로 유입되는 휘발성 유기물질의 혼합성을 변화시킨 형태이다. 이때 휘발성 유기물질 처리량과 보조연료 사용량 등 실험조건은 동일하도록 하였다. 실험결과 Type 2 연소기 실험에서 CO 발생량이 가장 적었으며, 연소실 내부 직경방향 온도분포도 균일한 특징을 보였다. 특히 휘발성 유기물질이 공급되는 로벽의 유입구 위치에서 최고온도를 보였다. 이는 보조연료가 환원성 분위기에서 연소가 이루어지다가 산소 함량이 높은 휘발성 유기물질이 고속으로 유입되는 유입구에서 휘발성 유기물질의 착화가 이루어졌기 때문이다. 따라서 동일한 연소온도와 체류시간이 유사하더라도 유입구 조건에 따라 혼합성을 향상시킬 경우 연소성능이 크게 향상되는 결과를 얻을 수 있었다.

그리고 일반적으로 촉매산화나 직접열산화 시키는 1000 ppm(LEL 8.3%)이하의 저농도 톨루엔 가스도 본 연구에서 개발된 열산화시스템에서 경제적인 연소처리가 가능함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 에너지관리공단에서 지원한 에너지절약사업 “가연성 폐가스의 에너지화를 위한 선화연소시스템의 상용화기술 개발” 과제의 연구결과이며, 이에 감사를 표합니다.

#### 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
- [11] Handbook: "Control Technologies for Hazardous Air Pollutants", Center for Environmental Research Information Office of Research and Development (1990)