

전 영 남, 채 종 성\*

조선대학교 공과대학 환경공학과

\*조선대학교 환경보건대학원

## I. 서 론

휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds: VOC)은 연소과정, 각종 산업공정, 용매의 증발과정 및 각종 오염원에서 배출되는 주요 대기오염물질의 하나이다. 이러한 VOC 대기오염물질은 보통 다량의 공기 및 불활성 가스에 의해 희석되어 있기 때문에 발열량이  $250 \text{ kJ/m}^3$  이하이다. 따라서 기존 연소기술(Ordinary combustion technologies)로 이런 저발열량의 VOC가스 연소시 다량의 외부 에너지가 필요하다. 하지만 self-sustaining combustion이 될수있다면 보조 에너지의 절약으로 인해 경제적이고 유해가스의 양도 감소시킬 수 있다.

고온의 연소가스로 부터 상온의 반응물로 여러가지 열전달 과정을 거쳐 열이 전달되는 연소기법인 초과엔탈피연소(Excess enthalpy burning)에 대한 연구는 열재순환 시스템(Heat-recirculation system)을 이용한 대류열교환기(Weinberg,1971), 다공성물질내의 열전도(Kotani et al., 1984), 다공물내의 복사열전달(Yoshizawa,1988)등이 있다. 그러나 상기에 언급된 지금까지의 초과엔탈피 연소법은 열재순환 시스템의 효율을 높이기 위해서는 장치가 구조적으로 복잡하고 압력손실로 인한 동력비의 소모가 크다.

본 연구에서는 반응물의 엔탈피 증가를 위해 일정 시간주기(Time frequency)로 유입방향을 변환시키는 왕복식 열교환 시스템(Reciprocating heat exchange system)을 구성한 초단열 연소법(Super adiabatic combustion technology)에 대하여 화염의 연소특성 및 안정성에 대해 연구를 수행하였다.

## II. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 Fig.1과 같이 층류 예혼합 화염이 내부에 형성되는 세라믹 연소기, 복사손실을 차단하는 복사차폐기(Radiative insulator), 연소기 본체, 점화장치로 구성된 연소계와 혼합가스를 일정 시간주기로 왕복식으로 제어하며 연소계로 공급하는 유로계로 이루어졌다.

연소기 본체는 직경이 85mm인 스테인레스관으로 제작되었고, 연소기는 격자의 수력반경(Hydraulic diameter)이 1.1mm인 세라믹 서브스트레이트(Hyneycomb ceramic substrate)를 본체내부중심에 90mm의 두께로 삽입하였다. 연소기 내부에는 세라믹의 표면온도를 측정하기 위해 7.5mm간격으로 12개의 열전대( $\phi=0.4\text{mm}$ , Pt/13%Rh)를 설치하였다. 연소기 중앙으로 부터 양방향으로 각각 150mm되는 지점에 두께 10mm의 복사차폐기를 설치하여 세라믹 연소기로 부터의 복사열손실을 차단하여 유입 혼합가스를 예열하도록 하였다. 점화장치는 세라믹 연소기 상단부에 전기적인 스파크를 발생시키는 전극봉을 연소기 본체에 절연시켜 장착하였다.

유로계는 공기압축기 및 프로판 볼베로 부터 각각 유량계를 거쳐 공기와 연료가 혼합기(Mixer)로 공급되어 일정 당량비의 혼합가스가 된다. 이 혼합가스는 이중관으로 되어있는 열교환기를 통과하면서 예열되어 역화방지기인 체크밸브를 거쳐 유로제어시스템(Flow control system)에 의해 연소계로 유입된다.

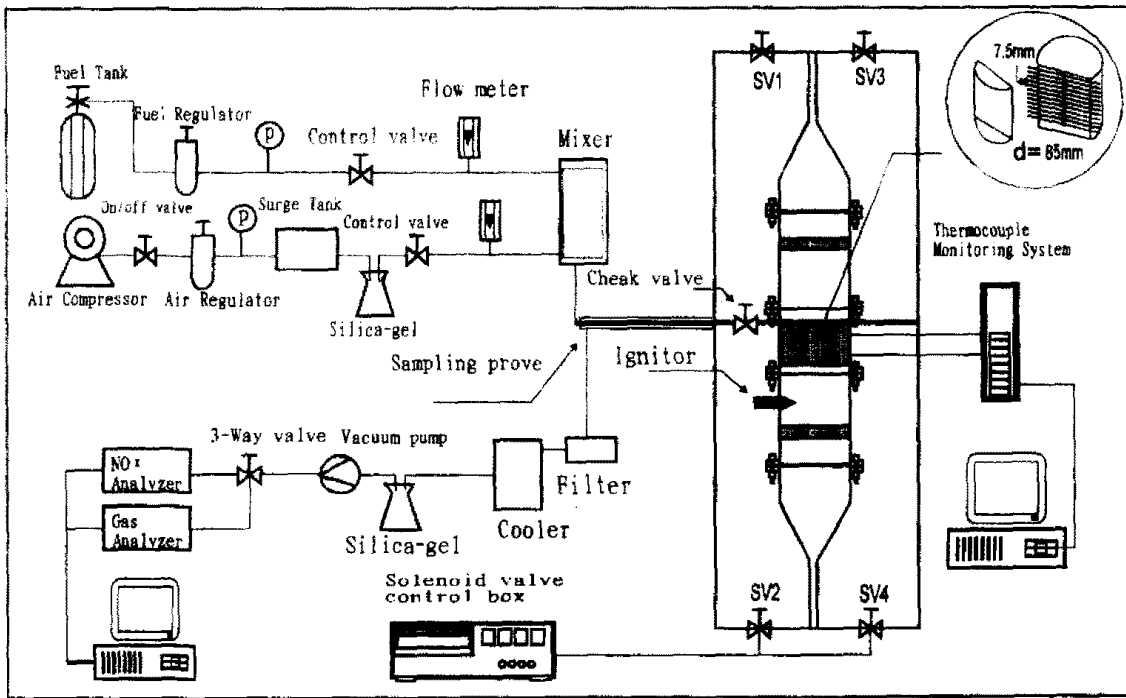


Fig.1 Schematic of flow System

## 2.2 실험방법

본 연구에서는 화염을 3가지 형태로 정의한다. Flame1은 화염대(Flame front: 연소기내 Peak온도위치)가 무차원거리(Dimensionless coordinate: 화염대위치/연소기 총길이)  $X$ 가 0.5인 지점에 왔을때 혼합가스의 유입방향을 일정 시간주기로 왕복유입시켜 연소시키는 방법이다. Flame2는 화염대가  $X=0.05$  위치에서 안정화 되었을때 혼합가스를 왕복 유입시키는 방법이고, Flame3는 일반연소 방법인 혼합가스를 단일방향으로만 연소기로 유입시키는 연소기법이다.

Flame1과 Flame2는 왕복식 연소법으로 혼합가스의 유로는 솔레노이드 밸브 SV1(미연혼합가스)과 SV4(연소배가스)를 거쳐 연소된 후, 밸브제어 시스템에 의해 일정 시간이 지난후 유로가 반대방향으로 전환되어 SV2(미연 혼합가스)와 SV3(연소배가스)를 거쳐 연소가 지속적으로 왕복진행된다. 단일방향 연소법인 Flame3의 유로는 SV1과 SV4로 고정되어 연소된다. (이하 유로 SV1에서 SV4를 정방향, SV2에서 SV3를 역방향이라 함)

온도측정은 열전대로 부터 Stanford Research Systems(MODEL SR360)로 환산저장된 온도값을 RS232C로 전송시켜 시간경과에 대한 각각의 온도값을 기록하는 monitoring system을 이용하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 3.1 화염형태별 온도변화 특성

Figs.2,3은 화염을 각각 Flame1과 Flame2로 했을때 시간경과에 대한 온도변화특성을 나타낸 것이다.

연소계의 열적구조는 세라믹연소기에서 온도차에 의한 전도열전달, 세라믹 표면과 유입 가스간의 대류 및 복사열전달, 세라믹 연소기와 복사차폐기간의 복사열전달이다.

Fig.2의 Flame1은 No.1과 같이 혼합가스 점화후 화염대가  $X=0.5$ 에 위치했을 때 시간주기를  $T_c=15$ 초로 왕복운전한 경우이다.

시간경과에 따라 peak온도의 감소와 함께 화염대가 No.2, No.3와 같이 좌측으로 이동된다.

연소기내의 화염면이 좌측으로 진행되는것은 역방향 운전시 혼합가스가 운전시간이 경과됨에 따라 세라믹 표면으로 부터 혼합가스로 열전달이 이루어지는 고온영역의 체류거리가 증가되어 고온의 연소배가스에 의한 대류열전달에 대한 열확산(Thermal diffusion)이 증가되기 때문이다.

그후 정상연소 시간이 되면 No.4와 같이 화염대가 좌측선단까지 이동하여 Peak 온도가 증가하고 우측부분의 온도가 감소하여 안정화 되어 연소가 진행된다.

정상운전시 peak온도가  $X=0.05$ 영역에 위치하는 것은 연소가 좌측방향으로 열확산이 되어 좌측 복사차폐기의 보유열량 증가로 정방향 운전시 혼합가스의 엔탈피 증가로 연소속도가 증가하여 화염대가 혼합가스의 유입방향의 반대로 이동하여 안정화 된다. 이때 본 실험에 사용된 연소계에서 물리적 변수 ( $U_m, ER, T_c$ )의 일정조건에서 열적평형이 유지된 상태이다.

peak온도의 증가와 함께 우측영역의 온도가 감소하는 것은 역방향 운전시 미연 혼합가스의 엔탈피 증가량이며 이로 인해 화염대부근에서 연소성이 증가되어 온도가 증가된다.

정방향 연소시는 좌측 복사차폐기의 온도가 감소된다.

Flame3에 비해 Flame1의 안정화 화염인 NO.4가 연소가 전영역에 걸쳐 온도가 높다. 이는 이미 언급된 바와 같이 왕복식 연소시 연소배가스로 부터 연소기에 축열된 에너지가 미연 혼합가스로 전달되어 엔탈피를 증가시켜 연소성이 단방향 연소보다 좋아지기 때문이다.

Fig.3의 Flame2는 단방향 연소시 NO.1과 같이 화염대가  $X=0.05$ 에 위치하여 안정화 되었을 때, 시간주기를  $T_c=15$ 초로 전환하여 왕복연소시킨 경우이다.

연소기내의 온도는 안정화가 진행되는 과정에 전영역에서 증가되어 NO.4로 안정된다.

Flame2의 경우 왕복식 운전을 하기전 peak온도가  $X=0.05$ 에서 안정된 상태로 이때 우측보다 좌측 복사차폐기의 온도가 연소기로 부터 차폐기로의 복사열전달이 증가되어 보유열량이 크다.

이때 왕복식 연소를 행하여도 열적구조를 보면 화염대를 기준으로 평형을 이루므로 미연 혼합가스가 연소기로 유입시 양방향 모두 동일한 엔탈피의 증가량이 유입되어 연소기내 온도가 전체적으로 상승한다.

Flame2가 안정화 되었을 때 온도분포가 Fig.2의 Flame1(NO.4)와 같다.

Flame1과 Flame2의 차이는 왕복운전을 시작할 때 화염대의 위치차이 이고, 물리적 변수인 부하와 유량이 동일한 경우이다. 결과적으로 왕복식 연소법인 Flame1과 Flame2는 화염이 안정화 되어가는 과정의 온도분포 시동특성의 차이이다.

정상운전 소요시간은 Flame1과 Flame2가 10분정도로 거의 같다.

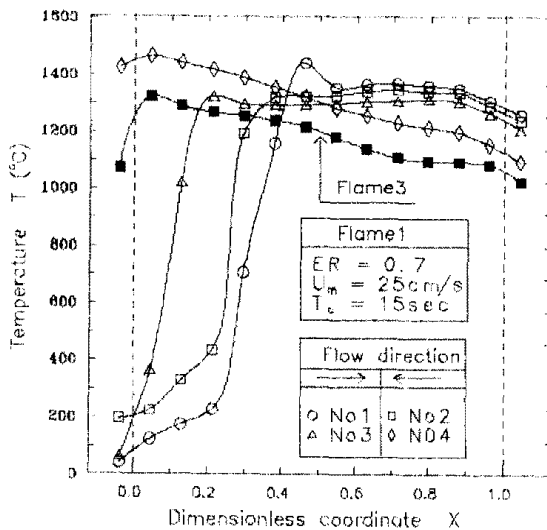


Fig.2 History of temperature profiles in case of Flame1

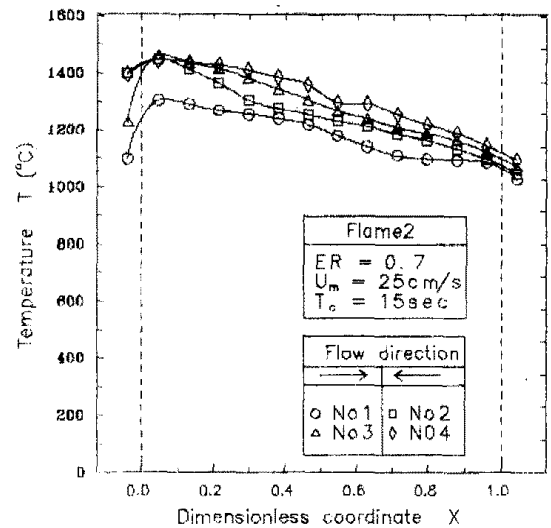


Fig.3 History of temperature profiles in case of Flame2

### 3.2 화염의 안정성

Fig.4는 화염형태별 안정도 곡선을 나타낸 것이다.

화염형태에 무관하게 혼합기체의 유속이 10cm/sec에서 20cm/sec로 증가할때 가연하한범위(Lower flammability limits)가 급격히 증가한 후, 혼합기체의 속도가 증가함에 따라 왕복식 연소법(Flame1, Flame2)은 가연한계 당량비가 거의 일정하고 단방향 연소법(Flame3)은 감소한다.

단방향 연소시 예혼합화염(Premixed flame)은 유량변화에 따라 화염대가 임계점(Critical point)을 갖으며, Flame3과 같이 본 연소계의 임계유속은 15cm/sec이다(민대기,1989).

유속이 감소하는 하부영역에서의 화염이동은 열손실에 의한 것이다. 즉 유속이 15cm/sec이하로 작아지면 화염으로 부터 발생하는 발열량에 비해 연소계의 열손실이 상대적으로 증가하여 화염을 안정화시키기 곤란하다. 이때 열손실은 반경방향의 발열손실로 가연하한범위를 확장시키기 위해서는 연소기 본체의 벽을 단열시켜야 한다.

유속이 증가하면 연소계 벽을 통한 열손실 보다는 상대적으로 유량증가에 의한 대류 열손실이 크다. 상부영역에서 Flame3과 같이 화염이 하류로 이동하는 것은 유속의 증가에 따른 유동방향의 대류열전달에 의한 배기손실로 가연하한영역이 다소 감소한다. 본 연소계의 경우는 상부 복사폐기의 설치로 일반 예혼합연소기 보다는 다소 확장된 상태이다.

Flame1과 Flame2와 같이 양방향 연소의 경우는 유량증가로 인한 대류열손실을 복사차폐기에 축열하여 방향전환시 연소기로 유입되는 미연 혼합가스의 엔탈피 증가로 이용되므로 유량증가에 대한 열손실의 차이가 크지 않아 가연하한 영역의 감소가 거의 없다.

결론적으로 본 연구의 왕복식 연소기법은 내부열재순환 방식으로 임계유속 상한부의 유속증가에 따른 Blow-off현상이 억제되어 가연하한범위를 확장시킬 수 있다. 하지만 임계속도 하한부의 경우 열손실로 인해 가연하한 영역이 감소된다.

단일방향인 Flame3보다 왕복식 연소법이 연소기내 엔탈피 증가로 인한 연소성의 증가로 가연하한이 확장되며 화염형태 Flame1과 Flame2의 차이는 거의 없는것을 알 수 있다.

### 3.3 혼합가스의 유속변화

#### 3.3.1 온도분포 특성

Fig.5는 Flame1의 경우 온도분포 곡선으로 점선은 시간주기  $T_c=0$ 초일때 왕복운동 직전의 상태로 화염면이  $X=0.5$ 에 위치했을 때이다. 혼합가스의 유속증가에 따라 점차 증가한다.

실선은 점선온도와 같이 화염면이  $X=0.5$ 에 위치했을 때 속도변화에 따라 시간주기  $T_c=15$ 초로 왕복 운전한 경우이다.

유속이 증가함에 따라 연소기내의 온도가 증가하는데 이는 혼합기체의 유량증가로 인한 부하량의 증가와 왕복식 연소기법에 의한 연소배가스 손실의 제어 때문이다.

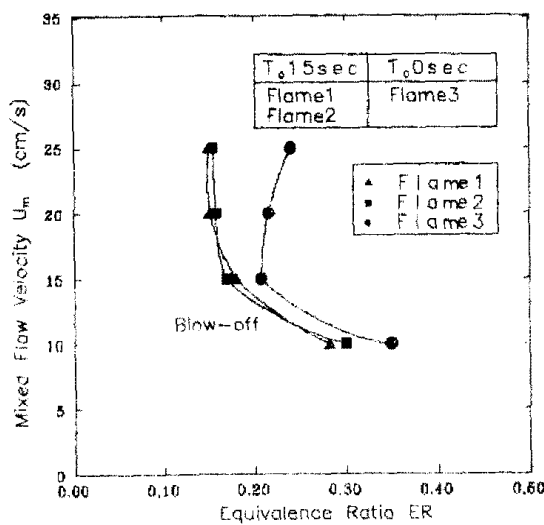


Fig.4 Flame stability diagram

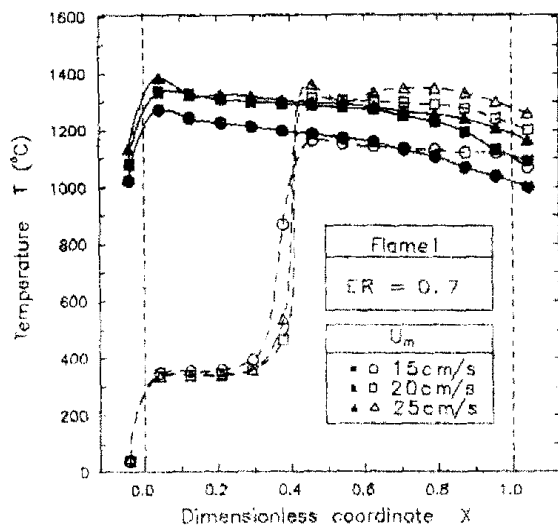


Fig.5 Temperature distributions with variation of mixture flow velocity

### 3.3.2 Peak 온도특성

Fig.6은 Flame1과 Flame3에 대한 혼합가스의 유속변화에 대한 peak온도를 나타낸 것이다.

화염의 형태에 관계없이 혼합가스의 유속이 증가함에 따라 peak온도가 증가하고, 당량비가 증가함에 따라 peak온도가 증가한다. 이는 Fig.5에서 언급했듯이 유속이 증가함에 따라 부하증가에 따른 연소기 내의 온도가 증가하기 때문이다.

임계유속이 15cm/sec이상의 영역에서는 Flame1보다 Flame3의 경우 peak온도가 다소 감소하고 하한 영역에서는 큰값을 갖는다.

임계속도 하한영역에서 최대온도가 Flame1이 증가하는 것은 동일한 연소기 본체로의 열손실량이 존재할 때 유량의 감소로 열확산 영역이 감소하여 미연혼합기체의 엔탈피 증가에 의한 연소기내의 온도증가가 화염대에 집중하기 때문이다.

임계속도 상한영역에서 Flame1의 Peak온도가 감소하는 것은 유량증가로 인한 복사차폐기구의 열확산에 기인한 것이다.

### 3.4 최적화염특성

Fig.7은 Flame1로 단일방향으로 연소시켰을 때 peak온도를 갖는 화염대가 No.1과 같이  $X=0.5$ 에 위치하여 화염이 안정화된 상태에서  $T_c=10$ 초로 양방향 연소시킨 경우이다.

시간경과에 따라  $X=0.5$ 를 기준으로 하여 우측영역의 온도는 감소하고 동시에 좌측영역의 온도는 지속적으로 No.2와 같이 증가하여, No.3과 같이 중심부근의 온도가 다소 감소한 상태로 대칭을 이룬다. 이는 정방향 연소시 보다 역방향 연소시 세라믹 연소기 표면과 미연 혼합기체의 온도차가 커서 열전달율의 증가로 열이 좌측방향으로 확산되기 때문이고, No.3와 같이 정상 연소의 전단계에서 연소기내 열확산율의 평형이 이루어 지므로 온도분포가 평면화염(Flat flame)의 형태를 갖는다.

정상 연소시에는 No.4와 같이 연소기 좌,우측 선단측의 온도가 중심부 보다 감소하고  $X=0.5$ 를 기준으로 No.3보다 온도가 증가하여 안정화 된다. 화염대가 중앙에 위치한 연소조건에서 왕복운전을 지속적으로 수행하므로써 미연 혼합가스의 유입구측의 복사차폐기 및 연소기 유입구 선단측으로 부터의 열전달량의 증가로 유입 엔탈피가 증가하기 때문이다. 또한 혼합가스 유량변화에 대한 배기 열손실율을 줄이고자  $T_c=10$ sec로 운전하므로써 연소기내의 온도분포가 중앙으로 모인것이다. 결과적으로 혼합가스의 유량이 증가할수록 출구쪽으로의 열확산율을 감소시키기 위해서는 시간주기를 짧게 하는것이 유리하다.

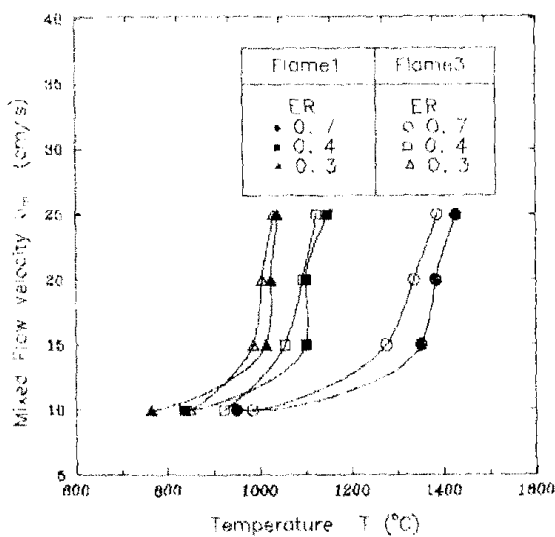


Fig.6 Peak temperature with variation of mixed flow velocity.

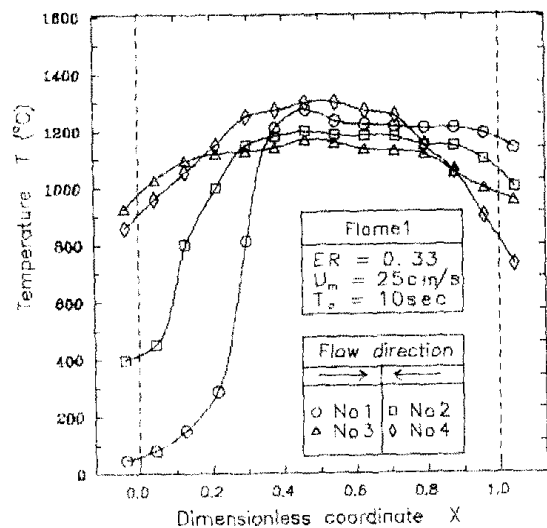


Fig.7 Typical flame characteristics in Flame1

#### IV. 검토 및 토의

본 연구는 초단열연소법을 도입한 최적의 VOC의 소각장치 설계에 앞서 연소에 영향을 미치는 물리적 요인을 영향변수로 하여 실험을 수행하였다.

단일연소법시 저칼로리 혼합가스의 경우 상대적으로 많은 배가스에 의한 유효에너지 손실을 제어하고자 왕복식 연소법을 도입하여 연소기내 열적 구조해석으로 효율적방법임을 확인하였다.

왕복식 연소시 이상적인 화염의 형태는 화염대가 연소기 중앙에 위치하고 연소기 양측단에서 연소배가스에 의해 축열된 엔탈피를 미연 혼합가스 유입시 가스측으로 열재순환하는 형태이다.

본 연구에 사용된 연소장치의 경우 이러한 화염의 형태를 유지하기 위해서는 VOC 열량변화에 대하여 단일연소시 화염대가 중앙에 오는 직경유속 및 시간주기를 설정해야 하는데 이는 부하변동에 대한 적응성이 크지 않다는 것을 의미한다.

Fig.7의 결과에서도 확인되었듯이 초단열 연소의 기본원리는 화염을 연소기 중앙에 모이게 하여 단열 화염온도(Adiabatic flame temperatuer)이상의 온도로 연소 시키는 것이다. 이는 화염이 안정화 되기 전에도 연소기내의 온도가 화염면을 기준으로 대칭의 분포를 갖는 시동특성이 관건이다. 따라서 연소기의 중앙에 열원을 삽입하여 양방향 대칭의 열분포를 갖은 상태에서 왕복운전을 하면 효과적으로 부하변동량에 대한 적응성이 좋은 VOC소각장치의 개발이 가능하리라 사료된다.

#### 참 고 문 헌

Weinberg, F.J.(1971) Combustion temperature: the future?, Nature233, 239-241.

Kotani, Y., Behbahani,H.F. et al.(1984) An excess enthalpy flame combustor for extended flow ranges, Twentieth Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, 2025-2033.

Yoshizawa, Y. et al.(1988) Analytical study on the structure of radiation controlled flame, Int. J. Heat Mass Transfer 31,311-319.

민대기(1989) 격자형 세라믹 내에서의 층류 예혼합 연소, 공학박사 학위논문, 한국과학기술원