

가연성 유해가스 처리를 위한 연소기 개발

Development of Combustor for Combustible Hazardous Gas

전 영 남 · 채 증 성 · 김 미 환
조선대학교 공과대학 환경공학과
(1996년 4월 20일 접수, 1996년 8월 21일 채택)

Young-Nam Chun, Jong-Seong Chae, Mi-Hwan Kim
Department of Environmental Engineering, Chosun University
(Received 20 April 1996; accepted 21 August 1996)

Abstract

Volatile organic compounds are air pollutants exhausting from industrial process, evaporation of solvent, and so on. Most of VOCs are the combustible gas of low calorific value as it is diluted by air. The systems burning such a hazardous gas need to increase enthalpy in order to increase flame stability.

In this study an incinerator with reciprocating flow in the honeycomb ceramic has been used for the experiment of VOCs control. By the reciprocating flow system, the enthalpy of combustion gas is effectively regenerated into the enthalpy increases of the combustible gas through the honeycomb ceramic, which provides a heat storage.

The position of the reaction zone is strongly dependent on the parameters of mixture velocity and time frequency. Flame front is changed to the point where burning velocity is coincided with burning velocity in the honeycomb ceramic. In this system it is important that flame front should be located symmetrically at the center of honeycomb ceramic for the purpose of increasing the reaction rate at one point. Peak temperature becomes higher with decreasing time frequency, at which the flow direction is regularly reversed.

Key words : volatile organic compounds (VOCs), hazardous gas, honey comb ceramic

1. 서 론

휘발성 유기화합물 (volatile organic compounds; VOCs)은 연소과정, 각종 산업과정, 용매의 증발과정 및 각종 오염원에서 배출되는 인체에 유해한 대기오염물질의 하나이다. 이러한 VOCs 대기오염물질은 보통 배출시 다량의 공기 및 불활성 가스에 의해 희석되어 있기 때문에 발열량이 약 250 kJ/m^3 이하로 소각시 화염의 안정성 (flame stability)이 문제가 된다. 따라서 기존

소각기술 (ordinary combustion technologies)로 이런 저발열량의 VOCs 가스 소각시 다량의 외부 에너지가 필요하다. 하지만 소각기내 자체열로 소각 (self-sustaining combustion)이 될 수 있다면 보조 에너지 및 외부에너지의 절약으로 인해 경제적이고 유해가스의 양도 감소시킬 수 있다.

고온의 연소가스로부터 상온의 반응물로 열전달 과정을 거쳐 열이 전달되는 축열에너지를 이용하는 소각기술은 초과 엔탈피 연소 (excess enthalpy burning)이다. 이에 대한 연구는 영국 Imperial대학의 Weinberg

와 Lloyd (1971)에 의해 회박혼합기를 연소시킬 수 있는 열재순환 시스템(heat-recirculation system)의 연소방식이 본격적으로 시도되었다. 그 후, Khoshoodi와 Weinberg (1978)는 모래를 통하여 열을 재순환 하는 방식인 spouted bed에 대해 연소영역의 확장을 보였고, Takeno와 Sato (1981)는 다공성 세라믹 블록 내에서 저발열량의 연료를 이용하여 화염이 안정됨을 보였다. Mizutani와 Satomura (1982)는 열재순환의 원리를 도입한 cyclone furnace에서의 회박연소의 가능성과 연소효율의 우수성을 보였다. Echigo *et al.* (1984)은 다공성 블록 내에서 내부 열재순환과 연소된 배기가스의 열을 복사열로 변환하여 미연혼합기를 예열하는 외부 재순환을 동시에 사용한 버너를 연구하였다. Kotani *et al.* (1984)은 다공매체내의 열전달의 기본이론에 근거한 접근을 하였고, 특히 Yoshio *et al.* (1988)은 다공물내의 열전달이 복사에 의한 것이라는 것을 이론적으로 규명하였다.

그러나 상기에 언급된 지금까지의 초과엔탈피 연소법은 본 연구에서 제안되어진 왕복식 소각기와는 달리 혼합가스가 단일방향으로 유입되도록 설계되어 열재순환 시스템의 효율을 높이기 위해서는 장치가 구조적으로 복잡하고 압력손실로 인한 동력비의 소모가 크다.

본 연구에서는 반응물의 엔탈피 증가를 위해 일정 시

간주기(time frequency)로 유입방향을 변환시켜 배기 폐열의 손실을 억제하여 내부의 엔탈피를 증가시킬 수 있는 왕복식 열교환 시스템(reciprocating heat exchange system)의 소각기를 새로이 고안하여 이에 대한 화염의 연소특성 및 안정성에 대해 연구를 수행하여 최적설계의 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 그림 1과 같이 종류 예혼합 화염이 내부에 형성되는 세라믹 소각기, 복사손실을 차단하는 복사차폐기(radiative insulator), 소각기 본체, 점화장치로 구성된 연소계와 혼합가스를 일정 시간주기로 왕복식으로 제어하며 연소계로 공급하는 유로계로 이루어졌다.

소각기 본체는 직경이 85 mm인 스테인레스관으로 제작되었고, 소각기는 격자의 수력반경(hydraulic diameter)이 1.1 mm인 격자형 세라믹(honeycomb ceramic)을 본체 내부중심에 90 mm의 두께로 삽입하였다. 소각기 내부에는 세라믹의 표면온도를 측정하기 위해 7.5 mm 간격으로 12개의 열전대($\phi=0.4$ mm, Pt/Pt-13% Rh)를 설치하였다. 소각기 중앙으로부터 양방향으로 각각 150 mm 되는 지점에 두께 10 mm의

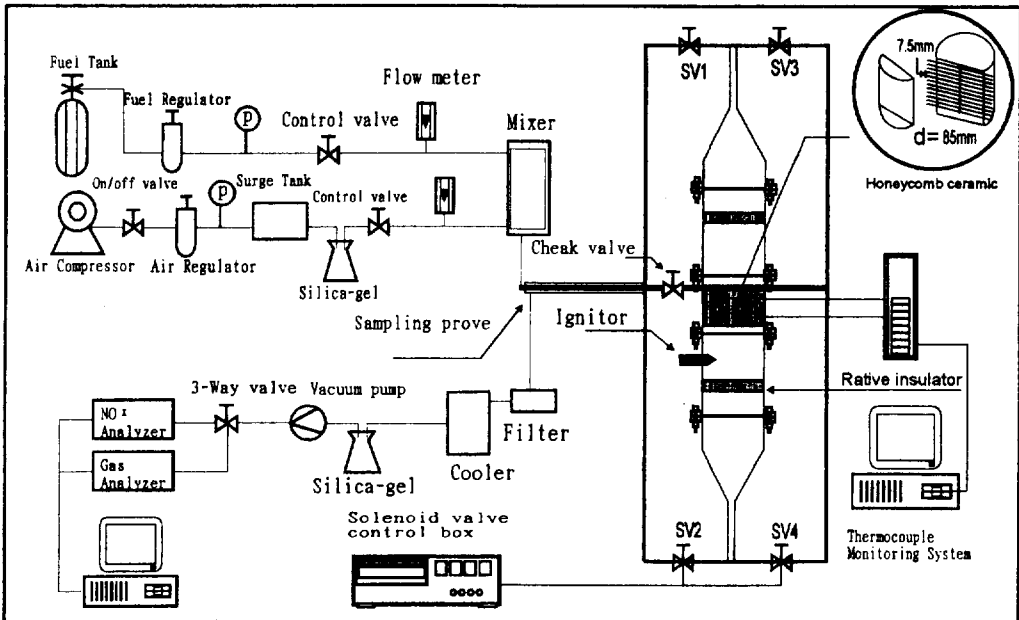


Fig. 1. Schematic flow system.

복사차폐기를 설치하여 세라믹 소각기로 부터의 복사열 손실을 차단하여 유입 혼합가스를 예열하도록 하였다. 점화장치는 세라믹 소각기 상단부에 전기적인 스파크를 발생시키는 전극봉을 소각기 본체에 절연시켜 장착하였다.

유로제는 공기압축기 및 프로판 펌프로부터 각각 유량 계를 거쳐 공기와 연료가 혼합기 (mixer)로 공급되어 일정 당량비의 혼합가스가 된다. 이 혼합가스는 이중관으로 되어있는 열교환기를 통과하면서 예열되어 역화방지인 체크밸브를 거쳐 유로제어시스템 (flow control system)에 의해 연소제로 유입된다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 화염을 3가지 형태로 칭한다. 화염 1 (Flame 1)은 화염대 (flame front: 소각기내 peak 온도 위치)가 무차원거리 (dimensionless coordinate: 화염대 위치/격자형 본체길이 (90 mm)) X 가 0.5인 지점에 왔을 때 혼합가스의 유입방향을 일정 시간주기로 왕복유입시켜 연소시키는 방법이다. 화염 2 (Flame 2)은 화염대가 $X=0.05$ 위치에서 안정화 되었을 때 혼합가스를 왕복 유입시키는 방법이고, 화염 3 (Flame 3)은 일반 연소 방법인 혼합가스를 단일방향으로만 소각기로 유입시키는 소각기법이다.

화염 1과 화염 2는 왕복식 연소법으로 혼합가스의 유로는 솔레노이드 밸브 SV1 (미연혼합가스)과 SV4 (연소배가스)를 거쳐 연소된 후, 밸브제어 시스템에 의해 일정 시간이 지난 후, 유로가 반대방향으로 전환되어 SV2 (미연 혼합가스)와 SV3 (연소배가스)를 거쳐 연소가 지속적으로 왕복진행된다. 단일방향 연소법인 화염 3의 유로는 SV1과 SV4로 고정되어 연소된다 (이하 유로 SV1에서 SV4를 정방향, SV2에서 SV3를 역방향이라 함).

온도측정은 열전대로부터 data logger (Stanford Research System, model SR360)로 환산 저장된 온도값을 RS232C로 전송시켜 시간경과에 대한 각각의 온도값을 기록하는 측정시스템 (thermocouple monitoring system)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염형태별 온도변화 특성

그림 2, 3은 화염을 각각 화염 1과 화염 2로 했을 때 시간경과에 대한 온도변화특성을 나타낸 것이다. 연소계의 열적구조는 세라믹소각기에서 온도차에 의한 전도열

전달, 세라믹 표면과 유입 가스간의 대류 및 복사열전달, 세라믹 소각기와 복사차폐기간의 복사열전달이다.

그림 2의 화염 1은 No.1과 같이 혼합가스 점화 후 화염대가 $X=0.5$ 에 위치했을 때 시간주기를 $T_c=15$ 초로 왕복운전한 경우이다. 시간경과에 따라 최대온도 (peak temperature)의 감소와 함께 화염대가 No.2, No.3와 같이 좌측으로 이동된다. 소각기내의 화염면이 좌측으로 진행되는 것은 역방향 운전시 혼합가스가 운전 시간이 경과됨에 따라 세라믹 표면으로부터 혼합가스로 열전달이 이루어지는 고온영역의 체류거리가 증가되어 고온의 연소배가스에 의한 대류열전달에 대한 열확산 (thermal diffusion)이 증가되기 때문이다. 그 후 정상연소 시간이 되면 No.4와 같이 화염대가 좌측선단까지 이동하여 최대온도가 증가하고 우측부분의 온도가 감소하여 안정화 되어 연소가 진행된다.

정상운전시 최대온도가 $X=0.05$ 영역에 위치하는 것은 소각기 좌측방향으로 열확산이 되어 좌측 복사차폐기의 보유열량이 증가한다. 이로 인해 혼합가스의 유입속도보다 연소속도가 증가하여 화염대가 혼합가스의 유입 방향의 반대로 이동하여 안정화 된다. 이 때 본 실험에 사용된 연소계에서 물리적 변수 (혼합가스 유입속도 U_m , 당량비 ER, 시간주기 T_c)의 일정조건에서 열적평형이 유지된 상태이다.

최대온도의 증가와 함께 우측영역의 온도가 감소하는 것은 역방향 운전시 미연 혼합가스의 엔탈피 증가량이며

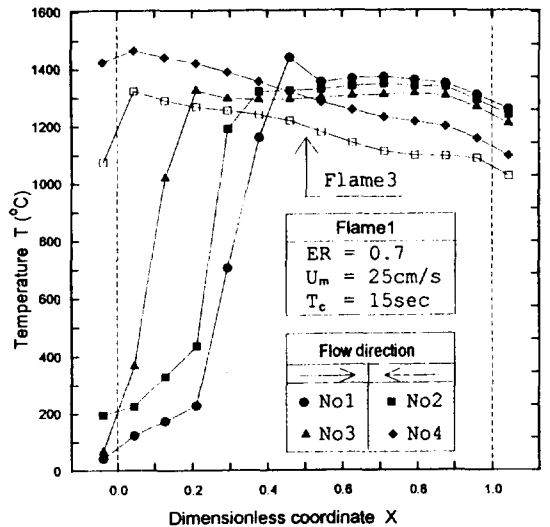


Fig. 2. History of temperature profiles in case of Flame 1.

이로 인해 화염대 부근에서 연소성이 증가되어 온도가 증가된다. 정방향 연소시는 좌측 복사차폐기의 온도가 감소된다.

화염 3에 비해 화염 1의 안정화 화염인 No. 4가 소각기 전영역에 걸쳐 온도가 높다. 이는 이미 언급된 바와 같이 왕복식 연소시 연소배가스로 부터 소각기에 축열된 에너지가 미연 혼합가스로 전달되어 엔탈피를 증가시켜 연소성이 단방향 연소보다 좋아지기 때문이다.

그림 3의 화염 2는 단방향 연소시 No. 1과 같이 화염대가 $X=0.05$ 에 위치하여 안정화 되었을 때, 시간주기를 $T_c=15$ 초로 전환하여 왕복연소시킨 경우이다. 소각기내의 온도는 안정화가 진행되는 과정에 전영역에서 증가되어 No. 4로 안정된다. 화염 2의 경우, 왕복식 운전 을 하기전 최대온도가 $X=0.05$ 에서 안정된 상태로 이때 우측보다 좌측 복사차폐기의 온도가 소각기로 부터 차폐기로의 복사열전달이 증가되어 보유열량이 크다. 이 때 왕복식 연소를 행하여도 열적구조를 보면 화염대를 기준으로 평형을 이루므로 미연 혼합가스가 소각기로 유입시 양방향 모두 동일한 엔탈피의 증가량이 유입되어 소각기 내 온도가 전체적으로 상승한다.

화염 2가 안정화 되었을 때 온도분포가 그림 2의 화염 1 (No. 4)와 같다. 화염 1과 화염 2의 차이는 왕복운전 을 시작할 때 화염대의 위치 차이이고, 물리적 변수인 부하와 유량이 동일한 경우이다. 결과적으로 왕복식 연 소법인 화염 1과 화염 2는 화염이 안정화 되어가는 과정

의 온도분포 시동특성의 차이이다. 정상운전 소요시간은 화염 1과 화염 2가 10분 정도로 거의 같다.

3.2 화염의 안정성

그림 4는 화염형태별 안정도 곡선을 나타낸 것이다. 화염형태에 무관하게 혼합기체의 유속이 10 cm/sec에서 20 cm/sec로 증가할 때 가연한한 범위 (lower flammability limits)가 급격히 확장된 후, 혼합기체의 속도가 증가함에 따라 왕복식 연소법 (화염 1, 화염 2)은 가연한계 당량비가 거의 일정하고 단방향 연소법(화염 3)은 감소한다. 단방향 연소시 예혼합화염 (premixed flame)은 유량변화에 따라 화염대가 임계점 (critical point)을 갖으며, 화염 3과 같이 본 연소계의 임계유속은 15 cm/sec이다 (민대기, 1989).

유속이 감소하는 하부영역에서의 화염이동은 열손실에 의한 것이다. 즉 유속이 15cm/sec 이하로 작아지면 화염으로부터 발생하는 발열량에 비해 연소계의 열손실이 상대적으로 증가하여 화염을 안정화시키기 곤란하다. 이 때 열손실은 반경방향의 방열손실로 가연 하한범위를 확장시키기 위해서는 소각기 본체의 벽을 단열시켜야 한다. 유속이 증가하면 연소계 벽을 통한 열손실보다는 상대적으로 유량증가에 의한 대류 열손실이 크다.

상부영역에서 화염 3과 같이 화염이 하류로 이동하는 것은 유속의 증가에 따른 유동방향의 대류열전달에 의한 배기손실로 가연하한영역이 다소 감소한다. 본 연소계의 경우는 상부 복사차폐기의 설치로 일반 예혼합소각기 보

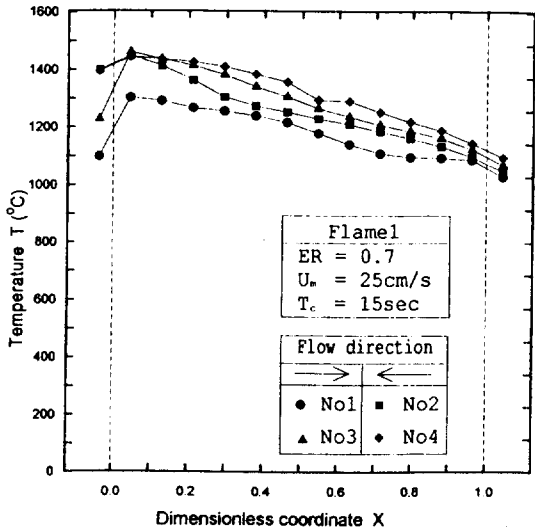


Fig. 3. History of temperature profiles in case of Flame 2.

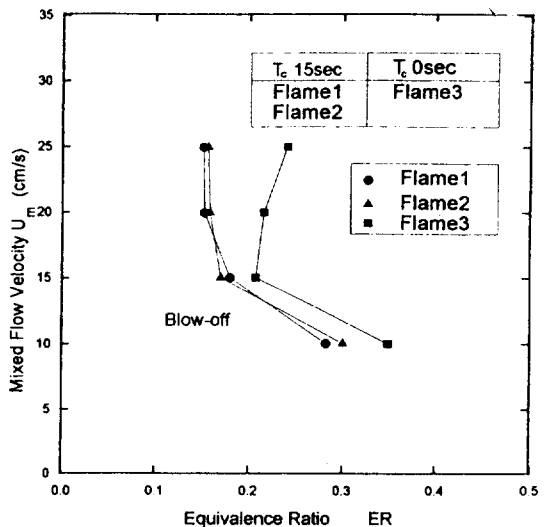


Fig. 4. Flame stability diagram.

다는 다소 확장된 상태이다.

화염 1과 화염 2와 같이 양방향 연소의 경우는 유량증가로 인한 대류열손실을 복사차폐기에 축열하여 방향전환시 소각기로 유입되는 미연 혼합가스의 엔탈피 증가로 이용되므로 유량증가에 대한 열손실의 차이가 크지 않아 가연 하한영역의 감소가 거의 없다.

따라서 본 연구의 왕복식 소각기법은 내부열재순환 방식으로 임계유속 상한부의 유속증가에 따른 blow-off 현상이 억제되어 가연 하한범위를 확장시킬 수 있다. 하지만 임계속도 하한부의 경우 열손실로 인해 가연 하한영역이 감소된다. 단일방향인 화염 3보다 왕복식 연소법이 소각기내 엔탈피 증가로 인한 연소성의 증가로 가연 하한이 확장되며 화염형태 화염 1과 화염 2의 차이는 거의 없는것을 알 수 있다.

이미 서론에서도 언급했듯이 VOCs의 경우 발열량이 약 250 kJ/m³인데 본 연구에서는 연료인 프로판이 공기에 의해 상당히 희석이 된 상태인 당량비가 0.15까지 연소영역이 확장된다. 이 때 혼합가스의 경우 발열량이 65 kJ/m³로 본 왕복식 소각기에서 공기에 의해 희석된 VOCs는 보조열원의 도움없이 소각이 가능한 것을 알 수 있다.

3.3 혼합가스의 유속변화

3.3.1 온도분포 특성

그림 5는 화염 1의 경우 온도분포 곡선으로 점선은 시간주기 T_c=0초 일 때 왕복운동 직전의 상태로 화염면이 X=0.5에 위치했을 때이다. 혼합가스의 유속증가에 따라 점차 증가한다. 실선은 점선온도와 같이 화염면이 X=0.5에 위치했을 때 속도변화에 따라 시간주기 T_c=15초로 왕복 운전한 경우이다.

유속이 증가함에 따라 소각기내의 온도가 증가하는데, 이는 혼합기체의 유량증가로 인한 부하량의 증가와 왕복식 소각기법에 의한 연소배가스 손실의 제어 때문이다.

3.3.2 Peak 온도 특성

그림 6은 화염 1과 화염 3에 대한 혼합가스의 유속변화에 대한 최대온도를 나타낸 것이다. 화염의 형태에 관계없이 혼합가스의 유속이 증가함에 따라 최대온도가 증가하고, 당량비가 증가함에 따라 최대온도가 증가한다. 이는 그림 5에서 언급했 듯이 유속이 증가함에 따라 부하증가에 따른 소각기내의 온도가 증가하기 때문이다.

임계유속이 15 cm/sec 이상의 영역에서는 화염 1보다 화염 3의 경우 최대온도가 다소 감소하고 하한영역에서는 큰 값을 갖는다.

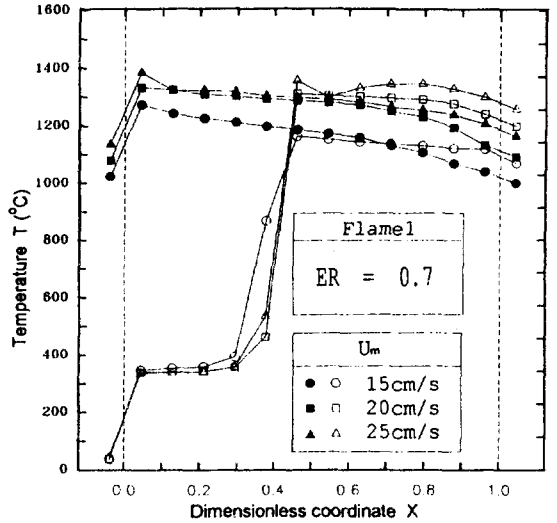


Fig. 5. Temperature distribution with variation of mixture flow velocity.

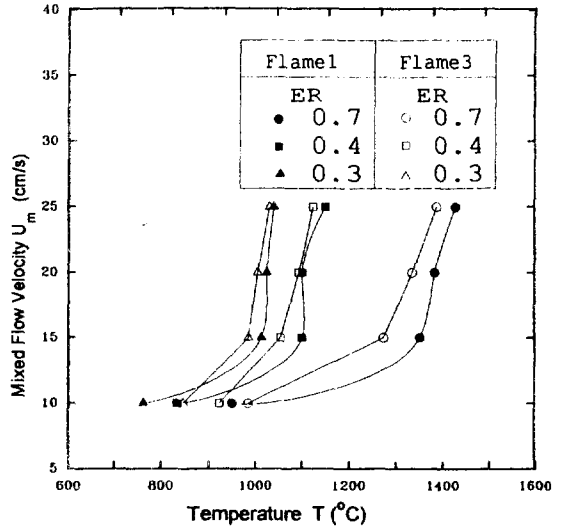


Fig. 6. Peak temperature with variation of mixed flow velocity.

그러나 임계속도 하한영역에서 최대온도가 화염 1이 증가한다. 이는 동일한 소각기 본체로의 열손실량이 존재할 때, 유량의 감소로 인한 열확산 영역이 감소하여 미연혼합기체의 엔탈피가 증가하여 소각기내의 온도증가가 화염대에 집중하기 때문이다. 임계속도 상한영역에서 화염 1의 최대온도가 감소하는 것은 유량증가로 인한 복사차폐기로의 열확산에 기인한 것이다.

3.4 최적 화염특성

그림 7은 화염 1로 단일방향으로 연소시켰을 때 최대 온도를 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 소각기 표면과 미연 혼합기체의 온도차가 커서 열전달율의 증가로 열이 좌측 방향으로 확산되기 때문이고, No.3과 같이 정상 연소의 전단계에서 소각기내 열확산율의 평형이 이루어지므로 온도분포가 평면화염 (flat flame)의 형태를 갖는다.

정상 연소시에는 No.4와 같이 소각기 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 소각기 유입구 선단측으로부터의 열전달량의 증가로 유입 연탈피가 증가하기 때문이다. 또한, 혼합가스 유량변화에 대한 배기 열손실율을 줄이고자 $T_c=10$ sec로 운전 하므로써 소각기내의 온도분포가 중앙으로 모인 것이다. 결과적으로 혼합가스의 유량이 증가할 수록 출구쪽으로의 열확산율을 감소시키기 위해서는 시간주기를 짧게 하

는 것이 유리하다.

4. 결 론

VOCs 소각을 위해 새로이 제안되어진 내부 열재순환 방식의 왕복식 소각기에 대해 화염의 안정성을 규명하고 자 영향변수별 연구를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 왕복식 소각기는 가연 하한이 당량비 0.15로 발열량이 65 kJ/m^3 까지 소각이 가능하므로 VOCs의 경우 외부열원의 도움없이 자체적으로 소각 가능한 시스템이다.
- 2) 왕복식 소각기의 시동특성은 가동시 초기 화염대가 다르더라도 다소의 정상화 시간의 차이가 있지만 안정된 화염을 형성한다.
- 3) 왕복식 소각기는 일정 임계속도를 가지며, 이 속도 이상에서는 혼합기 속도 증가에 따라 가연 범위가 거의 일정하여 화염이 안정되지만, 이하에서는 속도감소에 따라 열량감소로 인한 가연 한계가 작아진다.
- 4) 왕복식 연소시 최대온도 화염면을 중앙에 위치하기 위해서는 시스템 조건별 적정 혼합기 속도를 선택하여 연소속도와 평형을 이룬 위치가 격자형 세라믹의 중앙에 위치하도록 하여야 한다. 또한 소각기 축방향으로의 열확산을 억제하여 화염면 중앙에서의 최대 온도를 높이기 위해서는 시간주기를 가능한 범위에서 짧게 해주어야 한다.

감 사

이 논문은 1995년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

민대기 (1989) 격자형 세라믹 내에서의 층류 예혼합 연소, 공학박사 학위논문, 한국과학기술원.
 Echigo, E., Y. Yoshizaw, K. Hanamura, and T. Toniura (1984) Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation, Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference, San

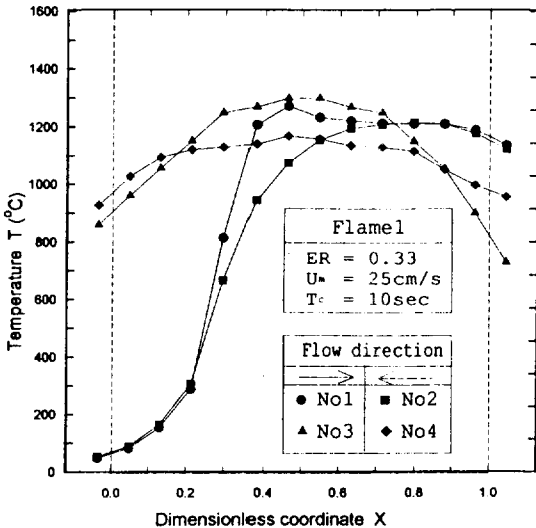


Fig. 7. Typical flame characteristics in Flame 1.

- Fransico, 2, 827-832.
- Khoshoodi, M. and F.J. Weinberg (1978) Combustion in spouted beds, *Combustion and Flames*, 33, 11-21.
- Kotani, Y. and H.F. Behbahani (1984) An excess enthalpy flame combustor for extended flow ranges, *Twentieth Symp. (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 20, 2025-2033.
- Mizutani Y. and M. Satomura (1982) Combustion of ultra lean combustible mixtures in a heat recirculation type cyclone furnaces system, *19th Symp. (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 529-536.
- Takeno, T and K. Sato, (1981) A theoretical study on an excess enthalpy flame, *18th Symp. (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 18, 465-472.
- Weinberg, F.J. and S.A. Lloyd (1971) Combustion temperature, *Nature*, 233, 239-241.
- Weinberg, F.J. and S.A. Lloyd (1971) A burner for mixtures of very low heat content, *Nature*, 251, 47-49.
- Yoshio, Y., S. Kiyoshi, and E. Ryoza (1988) Analytical study on the structure of radiation controlled flame, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31, 311-319.