

〈논 문〉

## 세라믹 매트릭스 버너에 형성된 예혼합 화염의 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출특성

정종수\* · 이교우\*

(1995년 6월 20일 접수)

### Nitric Oxide and Carbon Monoxide Emission from a Premixed Flame Stabilized in a Porous Ceramic Matrix Burner

Jongsoo Jung and Gyo Woo Lee

**Key Words :** Premixed Type Combustor (예혼합 연소기), Lean Flammability Limit (희박 가연 한계), Blowout (취염), Flashback (역화), Nitric Oxide (질소 산화물), Carbon Monoxide (일산화탄소), Flame Stabilization Mechanism (보염 기구), Heat Recirculation (열 재순환), Ceramic Porous Media (세라믹 다공성물질)

#### Abstract

Emission characteristics of nitric oxides and carbon monoxide from a porous media combustor has been experimentally studied. The relationship between the change of flame shape and emission has also been examined. As the equivalence ratio decreases, the flame shape on the ceramic matrix plate changes from a diffusion flame, R (radiant)-type flame, to B (Blue)-type flame. With large fuel flow rate, R-type flame turns to be two dimensional R-II type flame around the equivalence of 0.7. Carbon monoxide emission increases very rapid with decreasing equivalence ratio. It changes a lot from some 10 ppm to 100-10,000 ppm with the change of flame type from R-I to R-II type. Nitric oxide emission from the premixed burner is less than 25 ppm over all range of fuel flow rate, which is less than 20% of NO<sub>x</sub> emission from conventional gas burners.

#### 1. 서 론

예혼합 연소 (premixed combustion)는 연료와 공기를 미리 혼합시킨 예혼합기 (pre-mixture)를 연소기나 연소실에 공급하여 연소시키는 연소방법이다. 확산(diffusion) 연소방법이라고 부르는 비예혼합(non-premixed) 연소방법과는 달리 연소기나 연소실 내부에서의 연료와 산화제간의 혼합 과정이 단축되므로 연소속도가 빨라져서 반응 시간이 짧

고 연소실의 부하를 크게 높일 수 있으며, 완전 연소가 이루어지기 쉬워서 불완전 연소에 의한 연소 배출물질의 발생을 억제할 수 있는 장점이 있어서 최근 예혼합 방식에 의한 실용적인 연소기의 개발에 대한 관심이 높아지고 있다.

환경보호측면에서의 연소장치에 대한 요구 조건으로 NO<sub>x</sub>, 일산화탄소 및 미연 탄화수소에 대한 규제 조건이 날로 가혹해지고 있다. 현재로서는 일반적인 연소기로부터의 일산화탄소 및 미연 탄화수소의 배출량의 문제는 거의 해결이 되어 있는 수준이지만, NO<sub>x</sub> 배출의 문제는 대부분 만족할 만한 수준까지는 도달하지 못하고 있다. 따라서 희박 예

\*회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

혼합 연소방식은 NOx 배출량을 크게 줄일 수 있는 방법으로써 상당한 가능성이 있으며 일부의 연소장치에는 이미 적용이 되고 있다. 예혼합 연소방법에 대한 연구로는 다공성물질(porous material)을 연소기로 이용하는 방법은 근래에 들어, Takeno 등<sup>(1~3)</sup>이 열 재순환이 있는 경우의 연소속도와 화염의 안정성을 이론적으로 예측하기 위하여 열 재순환 연소기를 개발하여 이에 대한 실험을 수행하였으며, Kotani and Takeno<sup>(4)</sup>는 화염대에 다공성물질을 삽입한 시스템에 대하여 열 재순환 해석을 수행하였다. 연소기에서 예혼합된 반응물과 와류를 일어나게 하고 연소가스 일부를 재순환시켜 고온 연소를 얻는 시스템의 개발 사례 및 이들의 연구로부터 희박예혼합 연소방법에 의한 NOx 배출 수준은 일반적인 확산화염형 연소기배출량의 약 20% 미만이라고 보고되고 있다.<sup>(5)</sup> 또한 Kawamura 등<sup>(6,7)</sup>은 동축관 모양의 열교환기를 이용하여 일반적인 희박화염한계의 75%까지 감소시켰으며, Echigo<sup>(8~10)</sup>는 다공성물질을 사용하여 복사 열전달을 통한 열 재순환을 이용하여, 도시가스/공기 예혼합기의 희박가연한계를 당량비(equivalence ratio) 0.1까지 낮추는데 성공하였다고 보고하고 있다. 한편 Gaydon 등<sup>(11)</sup>은 예혼합기의 공급 온도에 대하여 희박 화염의 가연 한계치는 최종화염온도에 의하여 좌우됨을 보였다. 즉 최종화염온도가 높을수록, 안정 화염을 형성시킬 수 있는 공급 예혼합기의 온도를 낮게 할 수 있다는 것이다. 국내에서의 연구로는 민대기 등<sup>(12~14)</sup>이 다공성 세라믹 내에서의 열 재순환 화염의 안정화 구조 등에 대한 수치해석 및 실험적 연구를 수행하여 다공성 세라믹 연소기내에서는 전체 연소발열량의 30% 정도가 재순환되며 이 방식의 연소기에 의해 일반적인 가연한계범위 이하인 당량비 0.5 이하의 희박 연소가 가능하다는 연구 결과를 발표하였다. 그러나 예혼합 연소방법은 연료-공기의 예혼합기를 사용하게 되므로 예혼합기의 폭발이나 역화 등의 위험성을 제거하기 위한 정밀한 연소제어가 필요하며 이 기술의 실용화를 위해서는 이러한 문제 등에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.<sup>(15,16)</sup>

한편 최근 임인권<sup>(17)</sup>의 연구에서는 1차원 자유전파 총류화염 모델을 다공성물질내의 화염전파에 대한 연소 모델로 적용하고 C<sub>2</sub>까지의 51개 화학종에 대한 235개의 상세반응을 고려하여 다공성물질 연소기내의 예혼합 화염의 구조와 NOx 및 CO 배출특

성에 대한 수치해석을 수행하고, 다공성물질 연소기의 우수한 NOx 및 CO의 배출특성을 계산 결과로부터 설명하고 있다.

본 연구에서는 세라믹 연소기의 실용화를 위한 설계 자료를 얻기 위하여 연구를 수행하였으며, 연구 방법으로는 세라믹 매트릭스를 이용한 연소기에 형성된 예혼합 화염에 대하여 연료 및 공기 유량, 당량비 등을 변경하면서 이들 작동 변수들의 변화에 따른 희박가연한계, NOx 및 CO의 배출특성에 대한 실험을 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험 장치의 주요부의 개략도를 Fig. 1(a)에 나타냈다. 연소용 공기와 노즐에서 분출된 연료는 연소기 하단의 혼합실에서 잘 혼합된 후, 확대 노즐을 지나 스테인리스 스틸제 정류망(100 mesh)을 통과하여 세라믹 매트릭스 연소기의 하단으로 유입된다. 실험에 사용한 연소기(Fig. 1(a) 참조)는, 세라믹 매트릭스를 이용한 예혼합 방식의 연소기로 내경이 90mm이고 두께가 20mm인 다공성 세라믹 매트릭스를 연소기로 사용하였으며, 코디어라이트(cordierite) 재질로 자동차의 배기가스 정화를 위한 삼원 촉매장치의 본체로써 사용되는 미국의 Corning 사의 세라믹 매트릭스이다. 세라믹은 내열성이 우수하고 고온에서도 화학반응에 대한 촉매 역할을 하지 않으므로 연소기내에 안정된 예혼합 화염을 생성시키기가 용이하다. 실험에서 사용된 연료는 상용 액화석유가스(commercial-grade LP gas)이며 표준 저위 발열량은 24,200kcal/Nm<sup>3</sup>이다. 화염형태의 관찰을 위하여 연소기의 지지대와 세라믹 사이에는 내경이 90mm인 파이렉스관을 설치하였다.

이러한 세라믹 매트릭스 버너에서는 다공성 세라믹 표면 혹은 내부에 예혼합 화염이 형성되어 1000°C 이상의 고온상태에서 연소되므로 세라믹 매트릭스가 고온의 복사체가 된다. 따라서 고온의 세라믹 매트릭스 표면으로부터의 고체 복사열전달에 의해 주위로 열을 발산함에 따라 후류의 연소가스의 온도가 상대적으로 낮아지므로 생성속도가 온도에 매우 민감하게 달라지는 NOx의 생성 및 배출이 감소된다고 알려져 있다. 또한 다공성 세라믹 매트릭스내에서 고온의 다공성 세라믹에 의해 화염대로 들어오는 미연 혼합기의 예열효과가 항상

되어 가연한계가 확장되는 효과도 부수적으로 기대할 수 있다.

화염대와 배기가스의 온도측정에는 직경 0.5mm 의 R-type(Pt-13% Pt/Rh) 열전대를 사용하였으며, 이로부터 발생하는 기전력을 디지털 온도계 (Yokogawa Electric Co., Model YEW 2851)를 사용하여 측정하였으며, 배기가스 중의 각종 화학종의 농도는 Combustion Analyser (Kane-May Co., Model KM9006)로 측정하였는데 이 측정기로 측정가능한 화학종은 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 등이다.

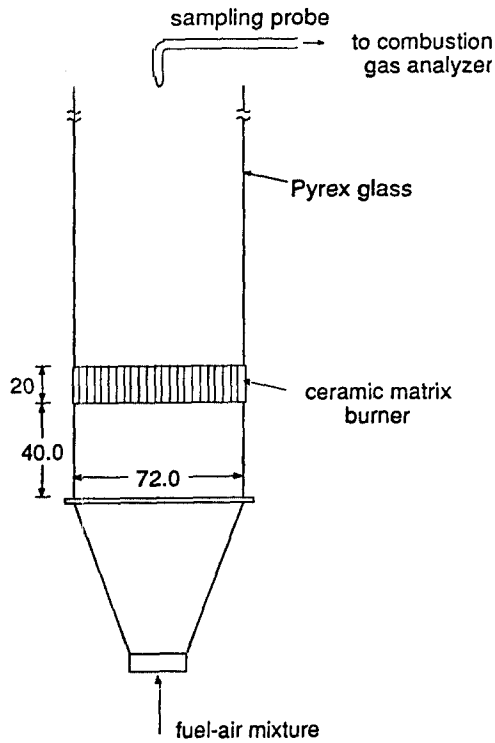


Fig. 1 (a) Experimental apparatus

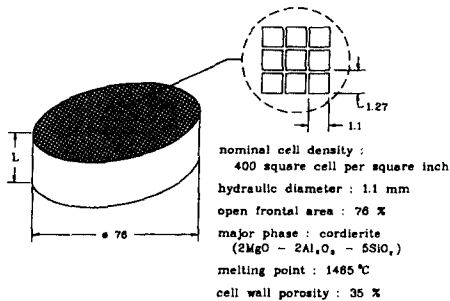


Fig. 1 (b) Ceramic matrix burner for experiments

### 3. 실험 결과 및 검토

#### 3.1 화염 형태

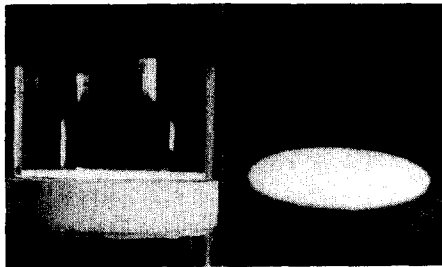
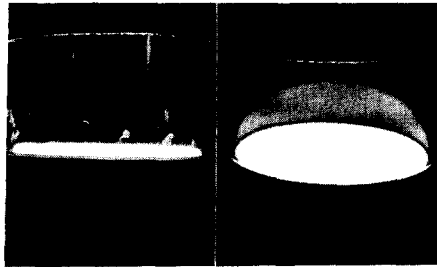
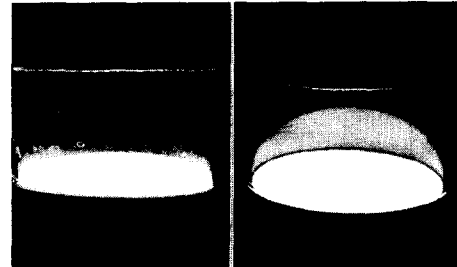
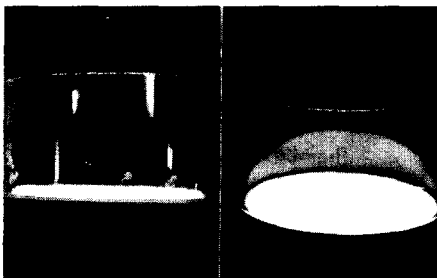
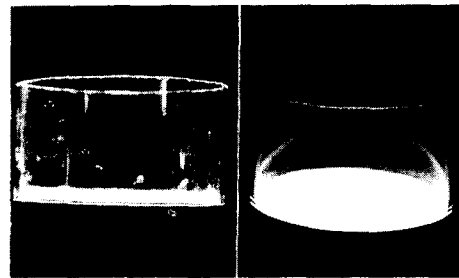
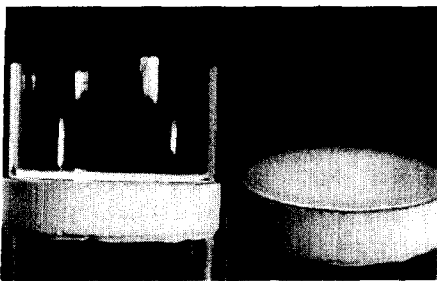
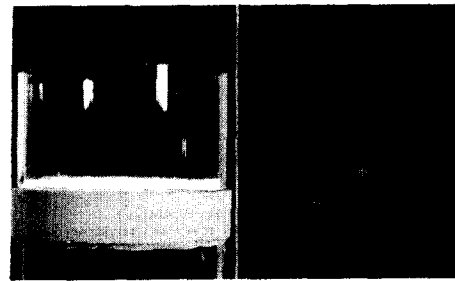
본 실험에서는 세라믹 매트릭스 표면에 형성된 에혼합 화염의 연소특성에 대한 실험변수들의 영향을 검토하기 위하여 당량비 및 유량의 변화에 따른 화염형태의 변화를 육안으로 관찰하고 직접사진 촬영을 통해 살펴보았다.

Fig. 2는 연료 유량을 0.7 l/min로 고정하고, 공기유량을 증가시키에 따른 화염의 형태의 변화를 보여주는 사진들이다. 사진 (a)는 연료과잉조건(당량비 1.34)에서의 화염 형태를 보여주는 사진으로, 세라믹 연소기의 표면 부근에 어두운 적색의 1차 화염이 형성되고, 파이렉스관 상부에 약한 청색의 2차 화염이 관찰된다. 이러한 2차 화염은 1차 화염내에서 미연소된 연료와 형성된 일산화탄소가 2차적으로 외부의 공기와 반응하여 형성되는 것으로 생각된다. 한편 Fig. 2(b)와 (c)의 화염은 당량비가 각각 0.83과 0.67인 경우의 화염형태로 화염이 세라믹 연소기의 표면 약간 안쪽에 형성되어 화염 후류의 고온의 연소가스에 의하여 가열된 세라믹 매트릭스 표면이 밝게 빛나는 강한 복사 열전달이 일어난다. 이하 이러한 세라믹 매트릭스 표면으로부터 강한 복사 열전달을 내는 유형의 화염을 R-type(Radiant)의 화염이라 정의한다. 한편 Fig. 2(d)는 당량비가 0.56인 공기 과잉 조건에서의 화염의 형태를 보여주는 사진으로, 이 조건에서는 안정된 청염(안정된 청염을 이하 B-type의 화염이라고 정의한다)이 세라믹 연소기의 상단 표면에 형성된다.

Fig. 3은 연료유량을 1.2 l/min로 증가시킨 경우의 화염을 나타내는 사진들로, 역시 공기유량의 증가에 따라 Fig. 2에서 나타난 것과 유사한 화염 형태의 변화를 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 연료과잉조건(당량비 1.6)에서의 화염의 형태로, 앞서의 Fig. 2에서의 마찬가지로 1차 및 2차 화염이 분명하게 관찰된다. Fig. 3(b)는 당량비가 1.15인 조건에서의 화염의 형태로 복사를 나타내는 R-type의 1차원 평면화염의 형태이다. 또한 Fig. 3(d)는 당량비가 0.7인 공기과잉 연소조건으로 비교적 안정된 B-type의 청염이 연소기의 상단표면에 약간 떨어져서 형성된다. 그런데 사진 Fig. 3(c)에 나타나는 화염의 형태는 연소기인 세라믹 매트릭스의 중

심부는 어둡고 가장자리 주위에 밝은 링 형태의 화염이 관찰되며 다른 화염의 형태와 확연히 구별된다. 이 경우는 거의 이론당량비인 당량비 0.96인 경우이다. 이러한 현상은 외곽 부분의 화염은 표면

부근에 형성되는 반면 중심 부분의 화염은 상류 쪽으로 이동하여 화염이 연소기의 상류 부분으로 움푹 파인 (Fig. 4 (b))와 같은 2차원적인 형태가 되는 것으로 생각된다. 이러한 화염 형태가 관찰되는

(a)  $\phi=1.34$ (a)  $\phi=1.59$ (b)  $\phi=0.83$ (b)  $\phi=1.14$ (c)  $\phi=0.67$ (c)  $\phi=0.95$ (d)  $\phi=0.56$ (d)  $\phi=0.70$ 

**Fig. 2** Premixed flame shapes stabilized in a ceramic matrix burner with different equivalence ratios (fuel flow rate=0.7 l/min)

**Fig. 3** Premixed flame shapes stabilized in a ceramic matrix burner with different equivalence ratios (fuel flow rate=1.2 l/min)

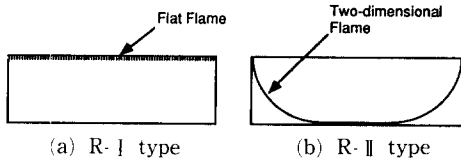


Fig. 4 Flame shapes of two different R-type inside a ceramic matrix burner

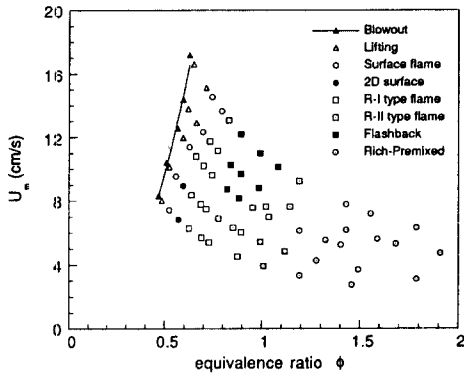


Fig. 5 Flame stability diagram inside a ceramic matrix burner

것은 다음과 같이 설명할 수 있을 것이다. 즉, 화염의 온도가 높아서 연소속도가 빠른 연소기의 중앙부에서는 화염이 연소기의 상류 쪽으로 이동하고, 연소기의 외주 부분에서는 연소기의 외벽으로부터 발생하는 외부로의 열손실에 의해 온도가 상대적으로 낮게 되어 연소속도가 느리므로 화염이 연소기의 하류표면 부분에 형성되는 것으로 생각된다. 이러한 화염형태는 화염이 매트릭스 내부에 형성되고 표면으로부터의 복사가 강하다는 점에서 R-type의 화염의 특징을 가지므로 R-type의 일종으로 분류할 수 있으나 1차원적인 R-type의 화염과는 배기가스 배출특성 등에서 상당한 차이가 있으므로 R-type을 각각 R-I 및 R-II type으로 구분하기로 한다.

3.2 화염 안정화 범위

Fig. 5는 본 연구에서 실험한 세라믹 매트릭스 버너에서 평균유속과 당량비를 기준으로 화염의 형태별로 분류하여 정리한 그림이다. 화염의 안정화 특성에 가장 큰 영향을 미치는 취염(Blowout) 특성을 살펴보면 당량비가 증가하면 화염이 소멸되는 조건에서의 평균유속이 급격히 증가해 가는 것이

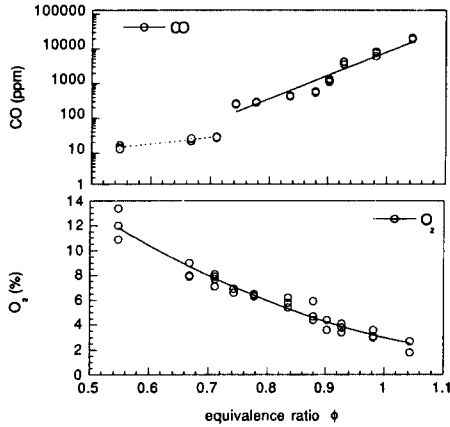


Fig. 6 Relationship between CO and Oxygen concentrations (fuel flow rate=0.7 l/min)

관찰된다. 그러나, 거의 당량비 0.5 부근에서는 연료유량이 변화에 무관하게 취염(Blowout)현상이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 한편 역화(flashback)현상은 당량비 0.8보다 높은 경우 발생하기 시작하는데, 흥미 있는 현상은 연료 유량이 작아서 유속이 8cm/s 이하가 되는 경우에는 역화(flashback)현상이 관찰되지 않고 화염의 형태가 R-I을 거쳐서 R-II type으로 변하는 것이 관찰된다. 화염의 형태가 R-I으로부터 R-II type으로 전환되는 현상은 대략 당량비 0.7 부근에서 일어나며 이러한 화염형태의 전환에 따라 화염의 특성이 크게 달라지며 배출특성도 달라지게 된다.

3.3 배출가스 특성

최근 공해배출문제에 대한 관심이 날로 높아지고 있는 추세에 따라서 연소 시스템의 설계에 있어서는 배출특성이 가장 큰 조건으로 요구되고 있다. 본 실험에서는 세라믹 매트릭스 연소기의 배출 특성을 측정하기 위하여 연소분석기(Combustion analyser, Model KM9006)를 사용하여 일산화탄소(CO) 및 질소산화물(NOx) 등의 공해물질과 배출가스 중의 산소의 농도 등을 측정하였다. 배출가스의 포집은 연소기의 하류에 300 mm 길이의 파이렉스관을 설치하고 이 파이렉스관의 출구 부분에 연소 가스 포집용 프로브를 삽입하여 배출가스를 포집하고 연소가스 중의 각종 화학종의 농도를 측정하였다.

Fig. 6은 연료유량을 0.7 l/min로 고정하고 공기유량을 변화시키면서 수행한 배출가스 측정결과로

당량비의 변화에 따른 일산화탄소 (CO)와 산소 ( $O_2$ )의 농도변화를 나타낸 그래프이다. 전체적인 경향은 당량비가 증가함에 따라 배기가스 중의 산소의 농도는 거의 직선적으로 감소하고 일산화탄소의 농도는 증가하는 것이 관찰된다. 당량비 0.7 부근을 경계로 일산화탄소의 농도는 급격한 도약 (jump)이 관찰된다. 즉, 당량비 0.7 이하에서 수십 ppm 정도를 나타내는 일산화탄소의 배출 농도가 이 조건을 경계로 수백 ppm에서 수만 ppm의 매우 높은 값이 측정되고, 이 이후에는 당량비 증가에 따라 급격한 증가를 나타내고 있다. 이와 같은 일산화탄소(CO) 배출특성의 변화는 다공성 세라믹 연소기내의 연소에서만 일어나는 특이한 현상이라고 생각된다. 이러한 현상은 세라믹 매트릭스 연소기내의 화염의 형태와 밀접한 관계가 있다. 즉, 앞서 설명한 대로 당량비가 0.7보다 작은 희박 연소 조건에서는 예혼합화염의 연소속도가 비교적 작아서 연소기의 표면에 부착된 형태의 화염이 형성된다(Fig. 4 (b)의 R-II type). 반면에 이론 당량비 근처가 되면 연소속도가 상대적으로 빨라지고 연소기 중심부의 화염면은 연소기내의 상류쪽으로 이동한다. 그러나, 연소기 외벽 부근에서는 외부로의 열손실 때문에 연소속도가 상대적으로 느리므로 하류에 그대로 잔류하게 된다. 따라서 화염면의 형태는 Fig. 4 (b)의 R-II type와 같은 2차원 형상을 갖게 된다. 일단 화염이 R-II type와 같은 형상이 되면 연소기의 중심부에서는 연소기 벽면으로의 열 전달로 인해서 화염면을 지난 연소가스의 온도가 급속하게 떨어지게 된다.<sup>(14)</sup> 일반적으로 CO의 배출량은 화염대의 온도와 매우 밀접하게 관계되며, 연소가스 온도가 감소하게 되면 CO 성분의  $CO_2$ 로의 반응속도가 감소하여 변환율이 감소하게 되며, 최종적으로 배출되는 CO의 농도가 증가하는 것으로 생각된다. 따라서 세라믹 매트릭스 연소기에서 CO의 배출특성을 억제하기 위해서는 화염을 R-I type의 형태로 형성시켜 주는 것이 중요하며 이때의 CO의 농도는 수십 ppm 이하로 억제할 수 있다.

Fig. 7은 동일한 조건에서 배기가스 중의 CO와  $O_2$ 의 상관관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보면  $O_2$ 의 농도가 감소하면 CO의 농도가 증가하여 일반적인 확산화염에 대한 배출특성에 대한 예상과 일치하는 결과를 나타내고 있는데, 특히 CO의 농도가  $O_2$ 의 농도에 따라 거의 하나의 선에 잘 일치

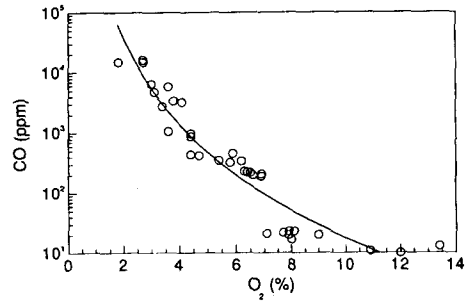


Fig. 7 CO and Oxygen concentrations with the change of air flow rate (fuel flow rate=0.7 l/min)

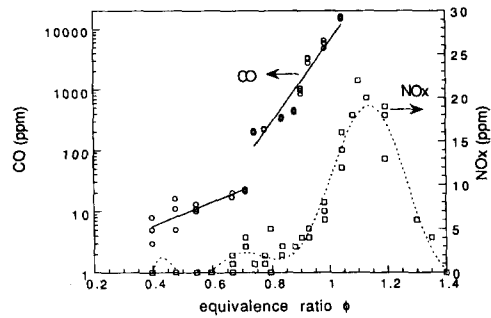


Fig. 8 Nitric Oxides and carbon Monoxide concentrations with the change of equivalence ratio (fuel flow rate=0.7 l/min)

하는(fitting) 결과를 보이고 있다.

Fig. 8은 당량비의 변화에 따른 CO와 NOx의 변화를 나타낸 그림이다. 앞에서 관찰한 것처럼 CO의 농도는 당량비가 증가함에 따라 급격하게 증가하는데 반하여, NOx는 당량비가 증가함에 따라 서서히 증가하다 이론 당량비 근처에서 최대값을 나타낸 후 서서히 감소하게 된다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 본 실험에서 사용한 세라믹 매트릭스 연소기의 배출가스 중의 질소산화물의 농도는 거의 25ppm 미만이며, 이러한 값은 상당히 우수한 배출특성이라고 할 수 있다. 최근의 가스 연소기구의 경향은 세계적으로 환경문제에 대한 관심의 고조에 맞추어 저공해형, 특히 저 NOx형의 연소기구를 표방하고 가스연소기구의 설계의 주안점도 저 NOx형에 맞추어 가고 있는 추세이고 일본의 경우 배출가스 중의 NOx농도가 50ppm인 점을 저공해형 연소기구의 기준으로 하여 이러한 연소기구의 개발과 보급을 장려하고 있는데, 본 실험에 사용된

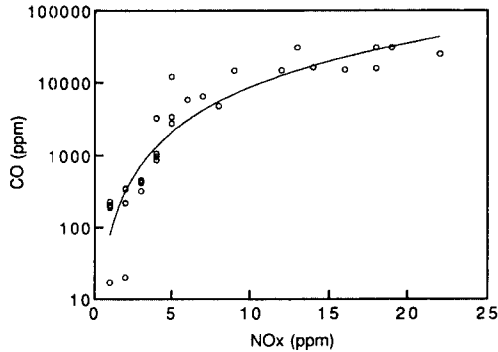


Fig. 9 Relationship between Nitric Oxides and carbon Monoxide concentrations

세라믹 연소기는 이러한 추세에 적합한 우수한 연소기가 될 수 있는 가능성이 있다.

Fig. 9는 배출가스 중의 CO와 NOx농도간의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 확산 화염형의 연소기에서는 NOx의 배출량이 감소하면 CO배출량이 증가하는 소위 NOx-CO Trade-Off라는 관계가 나타나는 경향을 보이는 것이 일반적이다. 그런데 세라믹 매트릭스를 이용한 예혼합 연소기의 경우, NOx는 5 ppm 이하로 매우 낮은 수준으로 유지되는 연소 조건에서도 CO의 농도가 수십 ppm 정도에서 수만 ppm 수준으로 급격하게 증가하는 경우가 관찰되며, 이러한 현상은 앞서 설명한 바와 같이 세라믹 연소기내의 화염의 형태가 R-I type으로부터 R-II type으로 변화하는 현상과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각되며, 실용 연소기의 설계시에는 일산화탄소 배출특성과 관련하여 가능한 한 R-I type의 화염형태를 유지하도록 사용연료 유량범위 등을 설계하여야 할 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 세라믹 매트릭스 버너에 형성된 예혼합 화염에 대하여 연료 및 공기유량, 당량비 등의 변화에 따른 화염형태의 관찰, 희박가연한계 및 배출가스 특성에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 세라믹 매트릭스 표면에 형성된 예혼합 화염의 화염 형태는 당량비 및 유량의 변화에 따라 상당히 크게 변화한다. 동일한 연료유량에 대하여 공기 유량이 증가하여 당량비가 감소함에 따라 1차 화염 및 2차 화염, 세라믹 연소기의 표면 약간 안

쪽에 형성되어, 표면으로부터 강한 복사 열전달이 일어나는 R-type의 화염, 세라믹 연소기의 표면으로부터 약간 떨어져서 형성되는 B-type의 청색 화염이 관찰되며, 연료유량이 비교적 큰 경우에는 외곽 부분의 화염은 표면 부근에 형성되는 반면 중심 부분의 화염은 상류쪽으로 이동하여 화염이 연소기의 상류 부분으로 움푹 파인 2차원적인 형태의 R-II Type의 화염이 나타난다.

(2) 당량비가 증가하면 화염이 소멸되는 조건에서의 평균유속이 급격히 증가하며, 당량비 0.5 이하에서는 연료 유량변화에 무관하게 취입(Blow-out)이 발생한다. 역화(flashback)현상은 당량비 0.8보다 높은 경우 발생하기 시작하는데, 연료유량이 작아서 유속이 8cm/s 이하가 되는 경우에는 역화(flashback)현상이 관찰되지 않고 화염의 형태가 R-I을 거쳐서 R-II type으로 변하는 것이 관찰된다.

(3) 당량비가 증가하면 배기가스 중의 산소의 농도는 거의 직선적으로 감소하고 일산화탄소의 농도는 급격히 증가하며, 당량비 0.7 부근을 경계로 일산화탄소의 배출특성이 수십 ppm 정도로부터 수백~수만 ppm의 매우 높은 값으로 크게 변화하며 이러한 현상은 당량비 0.7을 경계로 연소기내에서의 화염의 형태가 R-I type으로부터 R-II type으로 변화하는 현상과 밀접하게 관련되어 있을 것으로 생각된다.

(4) 본 실험에서 사용한 세라믹 매트릭스 연소기의 배출가스 중의 질소산화물의 농도는 거의 25 ppm 미만으로 상당히 우수한 배출 특성을 나타내고 있다.

#### 참고문헌

- (1) Takeno, T. and Sato, K., 1979, "An Excess Enthalpy Flame Theory", *Combustion Science and Technology*, Vol. 20, pp. 73~84.
- (2) Takeno, T. and Sato, K., 1981, "A Theoretical Study on an Excess Enthalpy Flame", *Eighteenth Symposium on Combustion*, pp. 464~472.
- (3) Takeno, T. and Hase, K., 1983, "Effects of Solid Length and Heat Loss on an Excess Enthalpy Flame", *Combustion Science and Technology*, Vol. 31, pp. 207~215.
- (4) Kotani, T. and Takeno, T., 1983, *Nineteenth*

*Symposium (Int.) on Combustion., The Combustion Institute*, p. 1503.

- (5) Master, J. and Webb, R. J., 1983, "The Development of a Recuperative Burner for Gas Fired Furnaces", *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 393, p. 19.
- (6) Kawamura, T., Asato, K. and Hayashi, T., 1983, *ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conference (Honolulu)*, Vol. 4, p. 93.
- (7) Kawamura, T., 1988, "An Experimental Study on Combustion of Ultra Lean Fuel and Air Mixture by Heat Recirculation", *Trans. JSME*, pp. 2575~2584.
- (8) Echigo, R., Kurusu, M., Ichimiya, K. and Yoshizawa, Y., 1983, *ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conference (Honolulu)*, Vol. 4, p. 99.
- (9) Echigo, R., 1984, "Effective Energy Conversion Method between Gas Enthalpy and Thermal Radiation and Application To Industrial Furnaces", *7th Int. Heat Transfer Conference*, Vol. 6, pp. 361~366.
- (10) Echigo, R., 1984, "Analytical and Experimental Studies on Radiative Propagation in Porous Media with Internal Heat Generation", *8th Int. Heat Transfer Conf*, Vol. 2, pp. 827~832.
- (11) Gaydon, A. G. and Wolfhard, H. G., 1984, "Flames", Chapman and Hall, Ltd., p. 484.
- (12) 민대기, 신현동, 유명돈, 1988, "다공성 물질에 의한 열 재순환 화염에 관한 실험적 연구 (I)", Vol. 12, No. 5, pp. 1113~1120
- (13) Min, D.-K. and Shin, H. -D., 1989, "Laminar Premixed Flame Stabilized inside a Honeycomb Ceramic", *Int. J. Heat and Mass Transfer*
- (14) 민대기, 1990, "격자형 세라믹내에서의 층류 예혼합 연소", 한국과학기술원 박사학위 논문
- (15) 정종수 등, "저공해 연소를 위한 초회박 혼합기 연소 시스템 개발", 과학기술처 특정연구보고서, 1990, N635-3915-2 1991, UCN705-4165-2, 한국과학기술연구원.
- (16) 임인권, 1995, "다공물질 연소기의 NOx 및 CO 배출특성," 대한기계학회논문집, Vol. 19, No. 2, pp. 559~567.