

세라믹 화이버 버너의 배기 배출물과 분광학적 특성에 관한 연구

정용기* · 김영수* · 이대래* · 양대봉* · 류정완* · Alexander
Yun* · 하만영** · 장영준** · 전충환†

A study of the pollutant formation and spectral radiation properties in ceramic fiber radiant burner

Yong Ki Jeong, Young Soo Kim, Dae Rae Lee, Dae Bong Yang, Jung Wan Ryu,
Alexander Yun, Man Young Ha, Young June Chang, and Chung Hwan Jeon

Key Words: Radiation (복사), Spectral intensity (복사강도), CO(일산화탄소), NO(일산화질소)

Abstract

An experimental study was performed to investigate the effects of mixing quality, inlet pressure, Nozzle diameter on CO, NO emission and radiation characteristics in porous ceramic fiber radiant burners. Observations of combustion characteristics occurring inside the burner system which was insulated fiber mat, were investigated by measuring emission and radiation characteristics. Combustion was achieved at the firing rate of 88~99 kcal/hr, inlet pressure of 100~250mmH₂O. The fiber burner exhibit significant both spectral intensity peaks in the bands at 2.5 μ m and 4.0 μ m relatively. There is a small difference in the variable mixing tube. However spectral intensity increased with the firing rate. CO emissions were found to be strongly dependent on the operating conditions. There was a tendency that CO concentration increased as the firing rate increases. the reason for rise of CO concentration is that is becomes it the relatively rich condition. Relatively low NO emission was observed for the whole operating range. The NO concentration is maximal at the firing rate of approximately 2850 kcal/hr and an air ratio of about 1.

기호설명

AR : 공기비
Dn : 노즐출구직경
I : 복사강도
Pi : 초기공급압력
Po : 노즐출구압력
q : 열용량
 λ : 파장

1. 서론

세라믹 매트나 메탈 화이버 등의 다공물질을 이용한 다공성 복사 버너는 일반적인 개방(open) 화염과 비교하여 높은 연소강도와 낮은 배기배출물 특성을 가지고 있다.⁽¹⁾ 하지만 실제 적용에 있어 아직까지는 작동성과 연소현상의 복잡성으로 인해 널리 사용되어지는 것은 아니다.

다공성 복사버너를 이용한 가스연소는 다음과 같은 메카니즘에 의하여 그 적용이 광범위하게 증가하고 있다. 첫번째 다공성 복사버너는 미연 혼합기로의 예열효과의 상승으로 인해 예열재열 연소(regenerative combustion)와 완전연소가 가능하다. 다공성 복사버너의 열전달메카니즘으로 기연가스로 부터의 열이 복사버너내의 반응존으로

†책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학과

E-mail : chjeon@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2332 FAX : (051)512-5236

* LG전자 DAC 연구소

** 부산대학교 기계공학과

미연가스를 예열하기위해 재순환되어진다. 그것은 혼합기의 단열화염온도보다 높은 최고온도를 가지게 된다. 그러므로 인해 높은 복사량을 가지고 높은 화염연소속도와 연소강도가 나온다. 두 번째 효율적인 내부재순환에 의해 가연한계를 확장할 수 있다.⁽²⁾ 이는 많은 양의 공기 때문에 상대적으로 낮은 온도에서 화학반응이 존재하는 것을 의미한다. 절대적으로 온도에 영향을 받는 배기배출물인 NOx는 상대적으로 낮은 온도에 의해 일반적인 개방화염에 비하여 줄어들게 된다. 그리고 효과적인 내부 에너지 재순환과 연료예열효과로 인해 CO와 UHC(Unburned hydrocarbon)를 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 세번째 온도의 섭동 성분이 작기 때문에 전체적으로 안정된 연소를 유지할 수 있는 장점이 있다. 그리고 뜻하지 않은 순간적인 연료와 공기 공급의 중단에 의해 발생하는 소염 후 연료와 공기의 재공급으로 인해 재연소가 가능하다. 그 이유는 복사버너의 다공물질의 비열(specific heat)이 일정시간동안 점화온도 이상의 온도 유지가 가능하다.

이와 같은 특성으로 인해 다공물질을 이용한 다공성 복사버너의 연구가 활발히 진해되어지고 있고, 실제 여러곳에서 적용되고 있다. 이러한 단일화염은 평면화염의 형태로서 연소상태의 제어가 편리할 뿐만 아니라, 효과적인 복사열의 이용이 용이하여 현재 유리공정, 철강제련, 종이건조공정, 식품산업 등에 적용되어지고 있다.

Jugjai et al.^(3,4)는 다공성 물질을 이용한 연소시스템에 있어 액체연료를 사용하여 열전달 과정에서의 증발특성과 온도를 기본으로 하는 연소특성을 확인하였다. 다공성 물질의 표면과 연소실내의 온도로부터 복사열에 의한 회귀(feed-back)로 인해 다공성 연소기 내의 액체 케로신(kerosene)을 효과적으로 증발예열시키는 것으로 나타났다. 배기배출물 중 NOx는 전 작동범위에서 낮게 나타났고, CO는 작동상태와 다공성 복사체의 두께에 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다.

Mital⁽⁵⁾는 복사버너내의 반응존이 내부에 생기는 내부화염버너(submerged flame burner)를 대상으로 가연한계, 복사효율, 그리고 배기배출물 특성을 파악하였다. 열용량과 당량비의 관계를 연구하였으며 당량비의 증가는 효율이 증가하는 것으로 나타났고, 최대효율이 나오는 적절한 열용량이 있다고 보고하였다. 또한 당량비가 증가

함에 따라 CO와 NOx 그리고 탄화수소 배출물들은 증가하는 경향을 보였다.

Kulkarni et al.⁽⁶⁾는 복사특성과 배기배출물 특성을 파악하기 위하여 몇가지 종류의 복사표면버너(RSB, radiant surface burner)를 대상으로 실험과 수치해석을 병행하였다. 넓은 열용량(200~1200kW/m²) 범위에서도 안정화된 화염이 형성되었고, 열용량을 증가시킬수록 복사효율은 감소하는 경향을 보였다. 당량비와 열용량의 증가에 따라 NOx는 증가했고, CO는 열용량의 증가에 따라 증가하지 않았다. 배기가스가 당량비에 변화에 따른 뚜렷한 변화를 발견하지는 못했다.

Sathe et al.⁽⁷⁾는 다공성 복사버너의 열전달과 연소 특성을 1단계 반응 메카니즘(1 step chemistry)을 이용하여 수치 해석을 행하였고, 실험을 통해 이것을 검증하였다. 안정한 화염에 대해 두가지 반응존이 발생하며 하나는 다공질면의 상부에 그리고 하나는 다공질 끝의 아주 좁은 영역에서 형성되었다. 실험은 메탄과 공기를 예혼합기를 형성하여 그물모양의 LAS(Lithium Alumina Silicate) 세라믹체를 통해 화염을 형성하였다. 결과는 두개의 연소면이 형성되어졌고, 화염속도와 온도장이 수치적 해석과 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Kawaguchi et al.⁽⁸⁾은 지름이 50mm이고 두께가 4mm인 스테인리스 스틸 파이버 매트 버너에서의 예혼합 연소에 관한 연구를 수행하였다. 버너가 복사모드가 되는 작동 조건에서 매트 표면 근처에서의 가스를 분석했다. 여기에서는 열방출로 인한 매트에서 하류지점에서 CH₄가 사라지고, CO₂가 최고가 되는 지점에서 실질적인 연소반응이 일어나는 것을 알아냈다. 최대 복사효율과 최고 온도는 당량비 1 부근에서 각각 25%와 1800K로 나타났다.

Williams et al.⁽⁹⁾는 버너는 두께가 0.4cm인 alumina-silicate ceramic fiber matrix를 사용했고, 버너의 하류표면 근방에서 메탄-공기 혼합기의 연소(열용량: 300kW/m²~450kW/m², 당량비: 0.75 ~ 1.3)에 대해 연구를 수행하였다. CARS(coherent anti-Stokes Raman scattering) 시스템을 이용하여 온도측정을 하였으며 표면 하류방향에서 최고온도가 발행하였다. 당량비 1에서 복사효율은 27%로 가장 높게 나타났고, EINOx는 열용량에 따라 0.15g/kg에서 0.55g/kg 범위에서 발생하

였다.

Min et al.⁽¹⁰⁾은 다공성 세라믹 내에서의 열재순환 화염의 안정화 구조 등에 대한 수치해석 및 실험적 연구를 수행하여 다공성 세라믹 연소기내에서는 전체 연소발열량의 30%정도가 재순환되며 이 방식의 연소기에 의해 일반적인 가연한계 범위 이하인 당량비 0.5이하의 희박 연소가 가능하다는 연구 결과를 발표하였다.

Echigo et al.⁽¹¹⁾은 연소속도의 증가로 인하여 연소영역(combustion zone)의 많은 에너지가 예열영역(preheat zone)으로 이동하는 것을 알아냈다. 그리고 다공성물질을 사용하여 복사 열전달을 통한 열 재순환을 이용하여, 도시가스/공기 예혼합기의 희박가연한계를 당량비 0.1까지 낮추는데 성공하였다고 보고하고 있다.

실제 현장에서 적용하기 위해서는 연소상태가 안정되고 완전연소를 필요로 하며 배기배출물의 배기량이 일정기준이하이어야 한다. 기존의 가스버너는 확산화염 메커니즘으로 형상과 구조적 측면에서 열효율 증대와 CO와 NOx 저감에 대한 기술은 이미 한계에 직면하고 있다. 이를 극복하기 위해서 예혼합화염 형태의 열복사에 의한 열전달 메커니즘을 이용하는 다공성 복사버너 수요의 증대로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Fig. 1은 다공성 복사버너의 연소 메커니즘을 나타낸 것이다. 연료와 공기가 혼합되어 공급되며 다공성 매체인 메탈 화이버, 세라믹 화이버 등의 표면 혹은 내부에 예혼합화염이 형성되어 다공성 매체를 고온의 복사체로 만들며 이 표면으로부터 복사열을 방출한다. 이 다공성 복사버

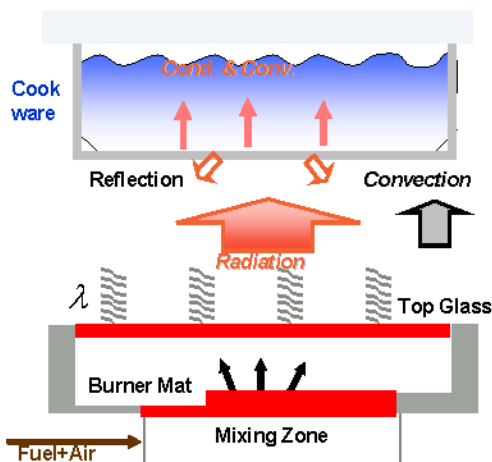


Fig. 1 Thermal radiation mechanism

너는 높은 복사효율과 낮은 배기가스 성능을 발휘하고, 이것은 세라믹 매트나 메탈 파이버 같은 다공물질, 복사매질의 두께, 매트나 파이버의 사이즈와 형상, 그리고 특히 예혼합관(mixing tube)의 형상등이 연소 성능에 중요한 역할을 한다. 이처럼 고성능 (높은 복사효율/ 출력, 낮은 배기배출물, 넓은 가연한계)을 가진 표면화염버너를 디자인 하기 위해서는 버너의 여러가지 형상과 다양한 작동 조건에서 연구를 수행하는 것이 필수적이다.

본 연구의 목적은 세라믹 화이버 매트를 이용한 표면화염버너의 연소특성을 파악하기 위해서 예혼합관의 형상, 다양한 열용량과 초기공급압력의 변화에 따라 CO, CO₂, O₂, NOx를 가스 분석기를 사용하여 배기배출물 특성을 파악하고, 적외선 분광계 (Infrared spectrometer) 사용하여 버너의 복사특성을 확인하고자 한다. 이에 더 나아가 복사버너의 화염구조와 배기배출물의 특성을 파악함으로써 친환경적인 가스버너를 개발하는데 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 실험장치 및 실험조건

2.1.1 화이버 버너

Fig. 2는 본 연구에 사용된 세라믹 화이버 표면화염버너 개략도를 나타낸 것이다. 본 연구에 사용된 복사버너는 크게 버너 하우징, 버너포트, 그리고 혼합관(Mixing tube)으로 나누어지며 버너 하우징에서는 화이버 매트에서 화염이 형성되어 배기되어지고 버너포트에는 버너 하우징에 예혼합기를 보다 균일하게 공급하기위해 혼합관을 장착하였다. 다공성 매체(porous medium)는 전체 체적 대비 미세 화이버 사이의 공간 체적비로 정의되는 다공성(porosity)이 약 95%이고 두께가 4mm인 것을 사용하였다. 연료는 고위발열량이 10,500 kcal/Nm³인 일반도시가스를 공급하였으며 조성은 CH₄ 89.95%, C₂H₆ 6.32%, C₃H₈ 2.54%, C₄H₁₀ 1.09%, C₅H₁₂ 0.01%, N₂ 0.09%이다. 연료의 유량은 습식유량계(wet gas meter)를 통하여 열용량을 조절하였다.

2.1.2 적외선 분광장치

적외선 분광 분석을 하기 위한 실험장치 개략

도는 Fig. 2에 나타내었다. 버너 매트 표면으로부터 15mm 높이에 특수 내열강화유리를 장착하여 적외선분광 분석장치(IR spectrometer, Acton research corp.)로 분광강도를 측정하였다. 분광 분석 실험장치는 단색화 장치(monochromator), 적외선 검출부, 초퍼(Chopper)로 이루어진 분광분석기(spectrometer), 제어부, 증폭부, PC로 구성되어 있다. 단색화 장치는 적외선 영역의 빛을 파장별로 정확하게 분리하는 장치로써 격자(Grating)는 300gr(1.8~5.0 μm)와 150gr(0.5~2.0 μm)의 두종류로 이루어져 있으며, 적외선 검출부는 적외선 파장용 센서로 이루어져 있다. 제어부(controller)에서는 초퍼의 회전수를 100~150rpm으로 조절하고, 격자를 선택한다. 증폭부는 검출된 신호를 증폭, 변환하여 PC로 보내어진다. 측정지점은 버너로부터 0.4m 떨어진 지점에서 분광분석기를 60도 기울여 측정하였다.

2.1.3 배기가스 농도 분포 측정

배기가스 중의 NO_x, CO₂, O₂, CO 농도를 측정하기 위해서 가스 분석장치(COPA-2000, HORIBA corp.)를 사용하였으며, CO₂, CO 검출은 NDIR 방식, NO_x는 CLA방식 그리고 O₂는 자기압력 방식의 센서(sensor)를 채택하여 배기가스 분석을 수행하였다. 배기배출물의 측정을 위하여 스테인

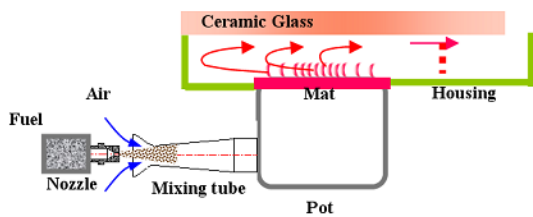


Fig. 2 Schematic of ceramic fiber burner

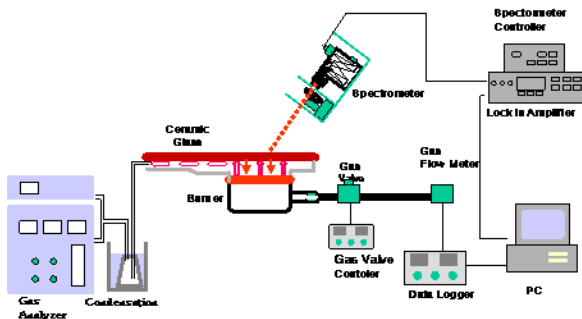


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Range
Nozzle	0.57-0.64
Mixing tube	Variables : Mixing tube I-V
Firing rate (kcal/hr)	1500-3300
Pi (mmH ₂ O)	100-250

레스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 막기 위해 샘플링 튜브 외측에 수냉식 2중관을 설치하였다. 여러 가지 희석정도의 영향을 제거하여 배출 수준의 순수한 비교를 하기위하여 환산농도(corrected concentration)를 사용하였으며 다음과 같은 식을 통하여 산출하였다.

$$x_{CO@0\%O_2} = x_{CO@3\%O_2} \frac{N_{mix@3\%O_2}}{N_{mix@0\%O_2}} \quad (1)$$

여기에서 x 는 몰분율, $N_{mix@3\%O_2}$ 는 3%O₂에서의 전체 혼합기의 몰수이다.

2.2 실험조건

예혼합연소를 형성하기 위하여 연료는 상용 LNG 연료를 사용하였고, 습식유량계를 사용하여 노즐의 열용량을 조절하였다. 공기는 강제공급식이 아니고, 자연공기 공급식 버너 시스템처럼 분사노즐(injector nozzle)로부터 가스가 분출되어 주위공기 사이에서 운동량 분배 과정(momentum-sharing process)을 통해 가스는 공기를 유입하게 된다. 가스/공기 혼합유체는 혼합관으로 들어가고, 버너 포트내부로 유입되어 연소하게 된다. 이때 노즐의 구경을 가변하여 열용량이 1500~3300kcal/hr에 대하여 실험을 수행하였고, 초기 연료공급압력을 100~250mmH₂O 범위에서 실험을 수행하였다.

Table 1은 상세한 실험 조건을 나타낸다.

본 연구에서는 표면화염버너에서 열용량과 초기연료공급압력, 기구적으로 분사노즐과 혼합관의 길이, 그리고 예혼합관의 형상 변화(혼합관의 목의 크기와 위치)에 따른 연소성능과 배기배출물 특성 파악에 초점을 맞추었다. 그리고 적외선 분광계(Infrared spectrometer) 사용하여 버너의 복사특성을 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소특성 범위

본 실험에서는 세라믹 화이버 매트 표면에 형성된 표면화염의 연소특성에 대한 실험변수들의 영향을 검토하기 위하여 노즐 크기와 초기공급압력 변화에 따른 운전범위를 확인하였다. Fig.4는 일정한 노즐 구경(0.58~0.64mm)에서 초기공급압력(100~250mmH₂O) 변화에 따른 노즐의 분사압력과 열량과의 관계를 보여주고 있다.

초기공급압력이 200mmH₂O, Dn=0.64mm인 경우는 노즐분사압력이 약 165mmH₂O이며 노즐직경이 0.58mm로 축소된 경우 노즐분사압력이 약 180mmH₂O로 약간 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 국내에서 공급되는 초기공급압력인 200mmH₂O를 기준으로 노즐 직경이 커질수록 노즐분사압력이 감소하는 것으로 나타났다. 다른 동일한 실험조건에서 압력 변화에 따라 비슷한 경향을 보였다. 하지만 분사압력의 변화에 비하여 동일한 노즐구경에서 초기공급압력에 따라 열용량 변화는 크게 나타났다. 일정한 노즐 구경에서 초기공급압력의 상승은 노즐의 분사압력을 선형적으로 증가시킨다. 이것은 다른 노즐에서도 동일한 경향을 보이고 있다. 초기공급압력의 증가는 노즐 분사압력의 증가뿐만 아니라 노즐 분사압력과 선형적 관계가 있는 열량의 증가를 가져왔다. 이는 초기공급압력과 노즐 구경의 증가는 질량유량의 증가를 의미한다.

3.2 배기배출물 특성

3.2.1 혼합관의 종류에 따른 배기배출물 특성

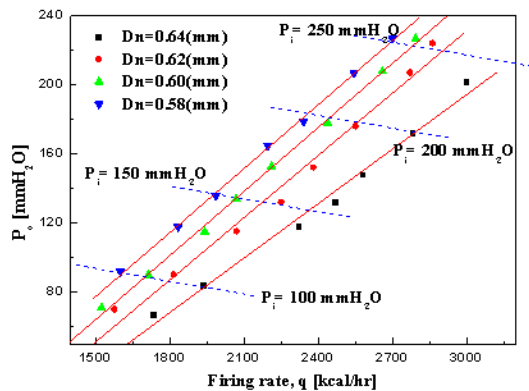


Fig. 4 Combustion region

Fig. 5는 초기공급압력 200mmH₂O에서 노즐구경의 변화에 따른 혼합관별 배기배출물 특성(CO)을 나타낸다. 비교적 열량이 낮은 영역(2100~2700kcal/hr)에서는 열량이 증가해도 혼합기

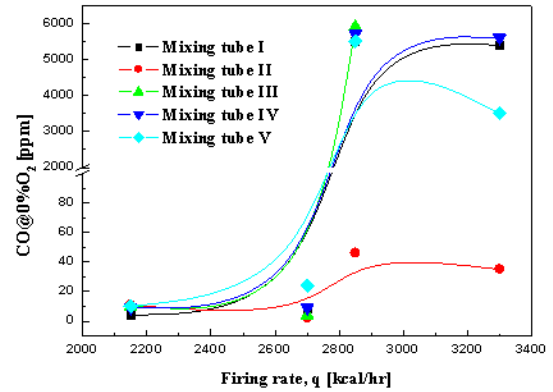


Fig. 5 CO concentration for the 5 different mixing tubes

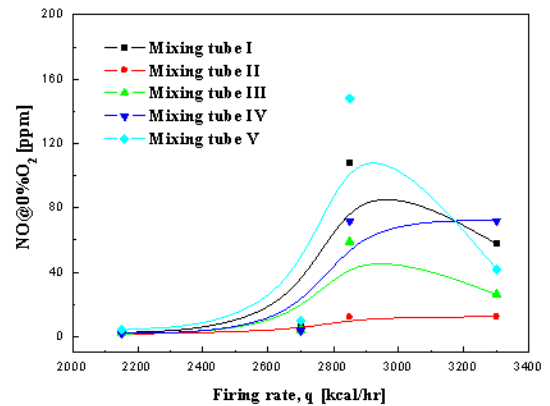


Fig. 6 NO concentration for the 5 different mixing tubes

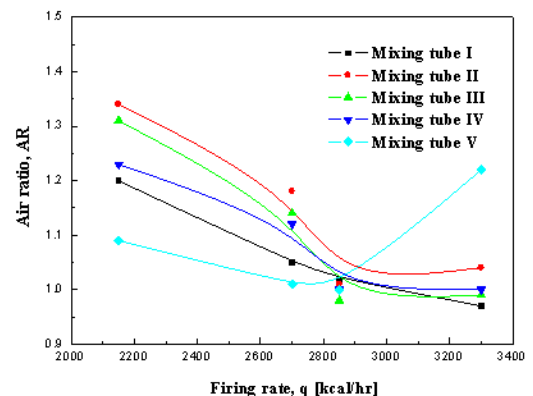


Fig. 7 Air ratio for the 5 different mixing tubes

종류에 따라 CO의 변화량이 미미하게 나타났고, CO의 양은 20ppm이하로 나타났다. 열량이 일정한 좁은 영역(2700~2800kcal/hr) 근처에서 CO의 양이 급격한 변화를 보인다. 혼합관 II를 제외하고 약 2800kcal/hr 이상에서는 CO의 생성량이 상당히 높은 편이다.

Fig. 6은 동일한 조건에서 초기공급압력 200mmH₂O을 일정하게 하고 혼합관의 종류에 따라 NO 특성을 나타낸다. NO는 CO와 상당히 비슷한 경향을 보이고 있다. 이는 열량의 증가는 단열화염 온도의 증가를 가져오고 단열화염온도와 밀접한 관계가 있는 열적 NO에 영향을 미치게 된다. 열량(2100~2700kcal/hr)에서는 NOx의 양이 15ppm이하로 상당히 낮게 나타났으며 열량이 2700kcal/hr 이상에서는 급격한 상승량을 보인다. 하지만 혼합관 II의 혼합관의 경우 NO의 상승량이 상당히 다른 모습을 보인다. 하지만 상당히 재미있는 사실은 일정한 열량 이상에서는 NO의 양이 줄어드는 것으로 나타났다.

배기가스의 경향은 공기비를 통하여 명확한 해석이 가능하다. Fig. 7은 배기가스 분석을 통한 CO₂와 CO를 이용하여 공기비(실제공기/이론공기)를 산출하였다. 이것은 인위적인 공기 공급 장치가 없으므로 자연 흡입식임으로 배기가스(CO와 CO₂) 등을 통하여 공기비를 산출하였다. 낮은 열량(2100kcal/hr)에서는 전체적으로 공기비가 1보다 큰 희박한 영역으로 나타났으며 열량이 2800kcal/hr 주변에서는 공기비가 이론 공연비 근처의 값을 나타내었다. 비교적 낮은 열량 영역에서는 공기비가 1이상인 곳으로 희박한 영역임으

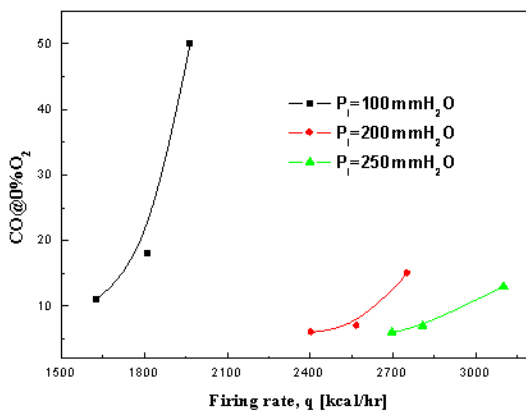


Fig. 8 CO concentration for the different inlet pressures

로 인해 CO의 양이 상당히 적은 것으로 보아 완전연소가 되었다고 사료된다. 그리고 열량이 약 2800kcal/hr 영역에서 공기비가 이론공연비 근처임으로 NO의 생성량이 가장 많고 그 주변의 열량에서는 NO의 생성량이 감소하는 것을 통해 공기비와 NO의 일반적인 관계를 확인할 수 있다.

3.2.2 노즐구경의 변화와 초기공급압력에 따른 배기배출물 특성

Fig. 8은 압력($P_i=100\sim 250\text{mmH}_2\text{O}$)과 노즐 구경의 변화($D_n=0.57\sim 0.64\text{mm}$)에 따른 배기배출물 특성을 나타낸다. Fig. 8에는 일정한 압력하에서 열량의 증가는 CO를 증가시키는 결과를 보여준다. 이것은 초기공급압력이 200mmH₂O인 조건인 노즐구경이 증가할 수록 즉 열량이 증가할수록 CO의 양이 증가하였다. 이것은 노즐의 구경이 커짐으로 인해 연료공급속도가 줄어들게 된다. 이는

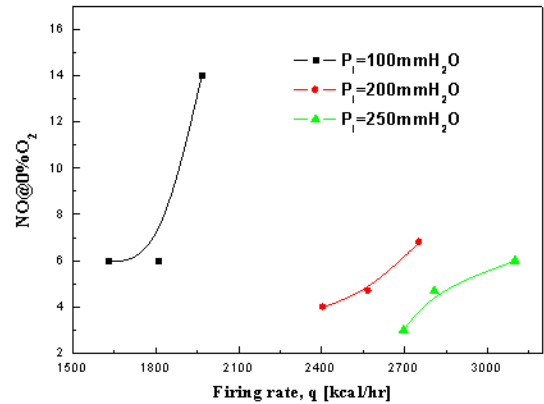


Fig. 9 NO concentration for the different inlet pressures

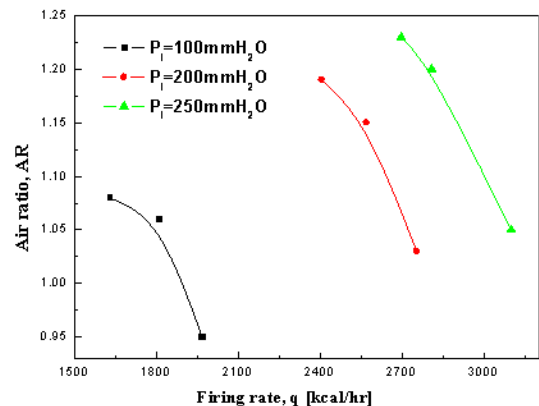


Fig. 10 Air ratio for the different inlet pressures

공기의 자연 흡입량을 감소시키게 됨으로서 공기의 부족으로 인해 비교적 과농상태가 됨으로써 CO의 양이 증가하게 된다. 그리고 또 연소장내에 연료공기혼합의 불균일로 인하여 CO의 양이 증가하게 된다. 이것은 공기비의 결과에서도 확인할 수 있다. 초기공급압력이 100mmH₂O인 경우 공기비가 1.1이하의 값을 가지며 노즐 구경이 커짐으로 인해 공기비가 감소하는 것으로 나타났다. 즉 더 과농한 상태로 이동하는 것으로 나타났다. 초기공급압력을 100mmH₂O에서 250mmH₂O로 증가시킴으로서 CO의 양은 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 분사노즐의 압력도 증가함에 따라 공기의 자연흡입량도 증가할 것으로 사료된다. 이것은 공기비가 1이상으로 희박영역의 존재에서도 확인할 수가 있다.

Fig. 9는 압력과 열량변화에 따라 배기배출물(NO) 특성을 보여준다. 모든 실험조건에서 NO의 양은 15ppm이하로 비교적 낮게 나타났다. 일정한 초기공급압력하에서 열량의 증가는 NO를 증가시키는 것으로 나타났다. 반대로 동일한 노즐구경에서 초기공급압력의 증가는 NO의 양을 감소시켰다. 이는 Fig. 10의 공기비의 결과에서 확인할 수 있듯이 초기압력이 100mmH₂O인 경우에는 공기비가 0.95~1.08로 이론 공연비 근처의 값을 가진다. 즉 이론공연비 근처에서 NO가 가장 높게 나타나고, 초기공급압력이 200mmH₂O이상으로 증가할 경우 공기비가 1 이상으로 약간 희박한 영역에서 연료공기비가 형성되었다. 이것은 이론 공연비 근처에서 온도에 대해 민감한 영향을 받는 NO가 높게 나타나고 초기공급압력이 250mmH₂O의 경우 이론 공연비근처에서 멀어지기 때문에 NO가 감소하는 것으로 사료된다. 이 결과는 본 연구에서의 시험범위보다 넓은 열량범위(1700~8500kcal/hr)에서의 배기가스 분석을 한 Fuse et al.⁽¹²⁾의 실험결과와 상당히 유사한 경향을 보인다.

3.3 분광학적 특성

3.3.1 혼합관의 변화에 따른 분광학적 특성

Fig. 11은 초기공급압력이 200mmH₂O이고 노즐 직경이 0.60mm의 조건에서 혼합관의 종류에 따른 Glass로부터 투과되는 파장에 따른 상대적인 복사강도를 나타낸 것이다. 연료가 연소한 후에는 H₂O, CO₂, 그리고 CO 등의 연소생성물이 발

생하게 된다. 이러한 고온의 연소생성물들은 복사에너지를 방출하게 되는데 이들 연소생성물은 특정한 파장대에서 복사 및 흡수특성을 가지게 된다. 흑체복사를 가정하면 이 특정한 영역에서의 복사강도를 측정함으로써 가스의 온도 및 농도를 알 수 있다.⁽⁹⁾ 특히 파장대가 2.7 μ m에서 H₂O와 CO₂에 의하여 최고치가 발생하고, 다른 하나는 4.3 μ m 주변에서 CO₂에 의한 최고치가 발생하게 된다. 본 연구에서도 CO₂와 H₂O의 전형적인 파장별 최고점의 복사강도를 보여준다. 최대 복사강도는 파장대가 2.5 μ m와 4 μ m에서 발생하였다. 전체적으로 최고강도가 발생하는 지점의 파장이 약간 낮은 곳으로 이동되어 나타난다. 혼합관의 종류에 따른 복사강도의 변화는 최고치 크기와 폭의 변별력이 미약한 것으로 나타났다. 이것은 실제로 초기공급압력과 노즐변화에 의한 연료공급량의 변화가 없음으로 인해 온도 변화가 거의 없는 것으로 사료되며 이것은 바로 복사강도의 값에서도 확인할 수 있다.

3.3.2 노즐구경과 초기공급압력의 변화에 따른 분광학적 특성

Fig. 12는 초기 공급압력 변화(100~250mmH₂O)에 따른 Glass로부터 투과되는 파장에 따른 상대적인 분광 복사강도 그래프이다. 저팽창 결정화유리는 자체 방사율이 0.95이고 2.5 μ m이하 파장영역의 투과율이 85%인 특성을 가지고 있으며, 2.5 μ m이상영역에서는 약 70% 흡수되고, 약 30%가 투과된다. 저팽창 결정화유리의 특성에 의해 흡수된 복사 파장대의 복사에너지는 Glass 온도를 상승시키는 요인이 된다.

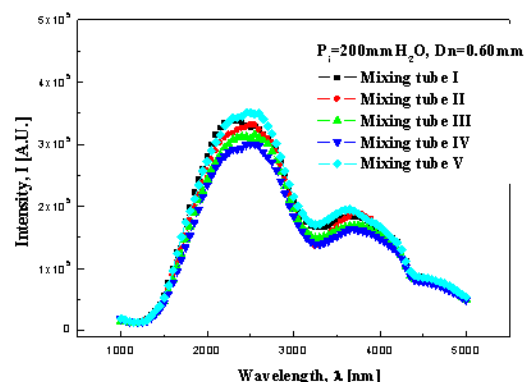


Fig. 11 Radiation intensity for the 5 different mixing tubes

노즐과 초기공급압력의 변화에 따라 복사강도 분포의 경향은 최대분광 복사강도의 파장대가 CO_2 와 H_2O 에 의해 발생하는 최고점의 복사강도가 $2.5\mu\text{m}$ 와 $4\mu\text{m}$ 에서 발생하는 전형적인 형태를 보였다. 이 복사 에너지는 대부분 가열된 표면으로부터 연속적 방사 스펙트럼에 의해 생성된다.

초기공급압력의 변화에 따라 분광강도 분포의 유형은 동일하지만 최고치의 상대적인 값이 다르게 나타나는 것을 Fig. 12에서 확인할 수 있다. 표면연소에 의한 복사 에너지는 대부분 가열된 표면으로부터 연속적 방사 스펙트럼에 의해 생성됨으로 복사강도는 온도를 반영한다. 초기공급압력의 증가는 복사강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 초기공급압력의 상승으로 열량이 증가함으로 인해 단열화염온도의 상승에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 13은 초기공급압력이 $250\text{mmH}_2\text{O}$ 이고 혼합관 IV인 경우에 노즐 직경의 변화에 따라 복사강도를 보여준다. 전 파장영역에서 $2.5\mu\text{m}$ 과 $4\mu\text{m}$ 지점에서 복사강도가 최고인 지점이 나타났다. 이는 앞에서 설명하였듯이 화염에서 복사의 두 가지 근원에는 주로 CO_2 와 H_2O 로부터 발생한다. 분자복사는 적외선 스펙트럼의 넓은 띠(band)에 집중되어 있다. Gore et al.⁽¹⁶⁾에 따르면 $2.5\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ 에서 스펙트럼의 복사강도는 현저한 최고값을 나타내고, 그 이유는 CO_2 와 H_2O 로부터 분자복사에 해당된다. 동일한 초기공급압력에서 복사강도 최고치는 노즐 구경이 0.64mm 인 경우가 가장 높게 나타나며 구경이 0.57mm 인 경우가 가장 낮게 나타났다. 노즐구경에 비례하여 분광강도의 최고값이 현저하게 커지고 있음을 알 수 있다. 노즐 구

경이 0.57mm , 0.60mm , 그리고 0.64mm 로 증가함에 따라 노즐 분사압력이 각각 $233\text{mmH}_2\text{O}$, $221\text{mmH}_2\text{O}$, $217\text{mmH}_2\text{O}$ 로 나타났다. 본 논문에는 첨부하지 않았지만 다른 초기공급압력 $100\text{mmH}_2\text{O}$, $150\text{mmH}_2\text{O}$, $200\text{mmH}_2\text{O}$ 의 경우도 노즐 구경이 증가할수록 분사압력은 감소하고 복사강도는 반대로 커지는 것으로 나타났다.

4. 결론

세라믹 화이버 버너의 배기배출물과 분광학적 특성에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일정한 노즐 구경에서 초기공급압력의 상승은 노즐의 분사압력을 선형적으로 증가시킨다. 초기공급압력의 증가는 노즐 분사압력의 증가뿐만 아니라 노즐 분사압력과 선형적 관계가 있는 열량의 증가를 가져왔다.

(2) 복사버너의 배기배출물 특성 중 CO의 경우 혼합관의 종류에 따라 비교적 열량이 낮은 영역($2100\sim 2700\text{kcal/hr}$)에서는 CO의 양은 20ppm 이하로 낮은 수준이고 좁은 영역($2700\sim 2800\text{kcal/hr}$) 근처에서 급격한 변화를 보인다. NO의 생성도 비슷한 경향을 보인다.

(3) 일정한 압력하에서 열량의 증가는 CO를 증가시키는 결과를 보여준다. 초기공급압력이 $100\text{mmH}_2\text{O}$ 에서 $250\text{mmH}_2\text{O}$ 로 증가됨으로서 CO의 양은 상당히 감소하는 것으로 나타났다. NO도 CO와 동일한 경향을 보인다.

(4) 적외선 분광분석기를 통해 파장대에 따른 복사강도 분석을 통해 최대 복사 강도가 CO_2 와

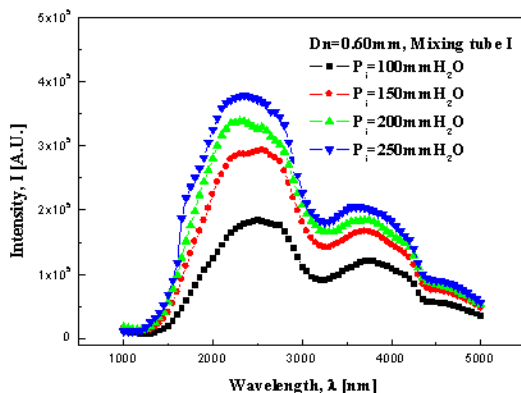


Fig. 12 Radiation intensity for the different inlet pressures

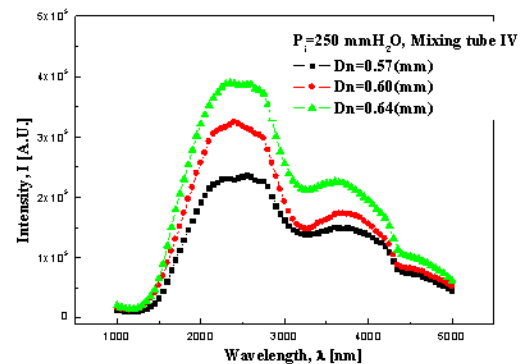


Fig. 13 Radiation intensity for the different nozzle diameters

H₂O(2.5 μ m와 4 μ m)에 의해서 발생하는 전형적인 파장별 최고점의 복사강도를 보여준다. 혼합관의 종류에 따른 복사강도의 변화는 최고치와 최고치의 폭의 변별력이 미약한 것으로 나타났다.

(5) 초기공급압력의 증가는 복사파장강도가 증가하는 것으로 나타났다. 초기공급압력이 250mmH₂O이고 혼합관 IV인 경우에 복사강도 최고치는 노즐 구경이 0.64mm인 경우가 가장 높게 나타나며 구경이 0.57mm인 경우가 가장 낮게 나타났다.

참고문헌

- (1) Kawaguchi, O., Otoh, T., S., Todoroki, A. and Murayama, Y., 1990, "Premixed combustion in a fiber Mat," *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The combustion Institute, Pittsburgh*, pp. 019-1024.
- (2) Weinberg, F. J., 1974, "The first Half-Million Year of combustion Research and Today's Burning Problems", *Fifteenth Symposium (international) on combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, pp. 1-17.
- (3) Jugjai, S., Wongpanit, N., Laoketkan, T., and Nokkaew, S., 2002, "The combustion of liquid fuels using a porous medium," *Experimental Thermal and Fluid Science* 26, pp.15~23.
- (4) Jugjai S. and Polmart N., 2003, "Enhancement of evaporation and combustion of liquid fuels through porous media," *Experimental Thermal and Fluid Science* 27, pp.901~909.
- (5) Mital, R., 1996, "An experimental and a theoretical Investigation of Combustion and Heat Transfer Characteristics of Reticulated Ceramic Burners", *PhD thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN*.
- (6) Kulkarni, M. R., Chavali, K. P. and Peck, R. E., 1992, "Emission Characteristics of Radiant Surface Burners," *Proceedings of the Western States Section of the Combustion Institute, October 12-13*.
- (7) Sathe, S. B., Kulkarni, M. R., Peck, R. E. and Tong, T. W., 1990, "An Experimental and Theoretical Study of Porous Radiant Burner Performance," *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, pp. 1011-1018.
- (8) Kawaguchi, O., Otoh, T., Nakamura, S., Todoroki, A. and Murayama, Y., 1990, "Premixed Combustion in a Fiber Mat," *Twenty-Third Symposium (international) on combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, pp.1019-1024.
- (9) Williams, A., Wooley, R. and Lawes, M., 1992, "The Formation of NO_x in surface Burners," *Combustion and flame, Vol. 89*, pp.157-166.
- (10) Min, D. K. and Shin. H. D., 1991, "Lamina Premixed flame Stabilized inside a Honeycomb Ceramic," *Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, no. 2*, pp. 341-356.
- (11) Echigo, R., Yochizawa, Y., Hanamura, K., and Tomimura, T. 1986, "Analytical and Experimental Studies on Radiative Propagation in Porous Media with Internal Heat Generation," *Proceedings, 8th International Heat Transfer Conference, Vol. 2*, pp. 827-832.
- (12) Fuse, T., Araki, Y., Kobayashi, N., and Hasatani, M., 2003, "Combustion characteristics in oil-vaporizing sustained by radiant heat reflux enhanced with higher porous ceramics," *Fuel* 82, pp. 1411-1417.
- (13) Cutting, R.D. and Stewart, I. M., 1975, "Furnace Temperature Profiles: Measurements by Spectroscopic Methods," *Appl. Opt., Vol. 14*, pp. 2707~2711.
- (14) Leonardi, S. A., 2000, "Partially-Premixed Combustion in Porous Radiant Burner," *Ph.D These, Purdue University*.
- (15) Kulkarni, M. R., 1996, "Radiant Surface Burner Performance: A Numerical and Experimental Study," *Ph.D Theses, Arizona State University*.
- (16) Gore, J. P., and Faeth, G. M., 1986, "Structure and Spectral Radiation Properties of Turbulent Ethylene/Air Diffusion Flames," *Twenty-First Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, pp.1521.