

Perforated Cordierite 재질 버너의 화염 형태 및 안정성 특성

양시원* · 황상순**

Flame Pattern and Stability Characteristics in Perforated Cordierite Burner

Si-Won Yang*, Sang-Soon Hwang**

ABSTRACT

The surface flames in perforated ceramic burner are experimentally characterized to investigate the effects of equivalence ratio and heating rate. The results show that the surface flames are classified into green, red radiant and blue surface flame as the decrease of equivalence ratio. Each flame is maintained very stable at the specified equivalence ratio and represents the same flame characteristics at any orientation of ceramic burner. Particularly the blue surface flame is found to be very stable at very lean equivalence ratio at 7000kcal/hr to 20000kcal/hr heating rates. And the exhausted NOx measurement shows that blue surface flame represents the lowest NOx emission regardless of the location of burner since it sustains very stable at lean mixture ratio.

Key Words :Perforated porous ceramic, Equivalence ratio, Lean blue surface flame, NOx

기 호 설 명

Φ : Equivalence ratio	Q : Total calorific value (kJ/Nm ³)
η_h : Thermal efficiency	V : Real gas volume (m ³)
C : Specific heat of water	t_g : Temperature in wet gasmeter
M : Water weight [kg]	P_m : Pressure in wet gasmeter
t_w : Water temperature(°C)	S : Saturated vapor pressure in t_g °C

1. 서 론

현재 고유가시대에 있어 에너지절약을 위하여 에너지 기기에서 열효율상승을 위한 많은 연구가 진행 되고 있다. 이러한 에너지 기기의 열효율 향상을 통한 기술개발과 아울러 날로 엄격해져가는 배기가스규제에 의하여 저공해 기술의 개발을 위한 많은 연구가 되어지고 있다[1]. 본연구에서는 에너지 기기중 가정용 난방 시설인 가정용 가

스보일러의 버너시스템의 고효율, 저공해화 연소 기술에 대해 연구하고자 한다. 가정용 가스보일러의 연소방식으로서 기존에 쓰이고 있는 분철편방식은 화염면의 형성이 다중화염형태로 각자 독립되어 있다. 균일한 온도분포를 얻기 위하여 열교환기까지 충분히 거리를 확보해야 하므로 전체 보일러의 크기가 커지게 되고 또한 부력의 영향을 받기 때문에 상향식 이외에 하향식이나 측향식으로 버너를 설치하는데 기본적으로 문제를 가지고 있다. 그리고 분철편방식은 공연비가 연료 과농혼합비로 정해지기 때문에 희박혼합비에 의한 저 NOx실현에 어려움을 갖고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 희박 예혼합 표면연소

* 인천대학교 기계공학과 대학원
 ** 인천대학교 기계공학과
 † 연락처: hwang@incheon.ac.kr

방식이 많이 연구 되어지고 있는데[2-4] 현재 주로 사용되고 있는 표면연소버너로서 metal fiber 혹은 다공철판을 이용한 표면연소버너가 사용되고 있다. 그러나 metal fiber의 경우 기본 재질이 스틸 재질의 섬유로 되어 있고 표면화염의 경우 운전조건에 따라 화염이 metal fiber에 직접 닿게 됨으로 인하여 고온조건에서 부식문제가 심각하게 나타나게 되어 기기의 안전성에 영향을 직접 미치는 내구성에 문제를 안고 있다[5]. 다공철판을 사용하는 경우도 같은 문제를 안고 있다. 또한 표면 화염 안정성범위가 좁아 저NOx 실현을 위한 희박공연비하에서 화염이 불안정해지는 특성을 보여준다[6,7]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본연구에서는 3000°C 이상의 고온조건에서도 내구성이 우수하고 다공질로 되어 있어 희박공연비하에서도 화염의 안정성의 증대를 기대할 수 있는 세라믹 재질인 cordierite를 사용하여 표면화염의 연소특성을 살펴보고자 한다. 특히 본연구에서 사용하는 perforated cordierite 세라믹은 기존의 porous cordierite 재질에 비해 저가에 제작할 수 있고 다공구멍의 크기는 소염거리보다 작아 역화를 막고 다공에 의한 표면연소의 특성을 그대로 이용할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 기존의 porous형 cordierite 세라믹(Fig. 1.a)의 경우 제조원가가 높아 적용에 어려움이 있으나 본연구에서 사용 될 소염거리(quenching distance)보다 작은 여러개의 구멍이 있는 perforated 형 cordierite 세라믹(Fig. 1.b)은 저가에 제작이 가능해 보다 경제적인 표면연소버너 제작가능성을 보여 주었다[8].

2. 실험장치 및 방법

2.1 2층구조 연료/공기 혼합장치(mixer) 개발

예혼합장치 즉 믹서의 설계는 연료가스와 공기의 혼합정도와 적절한 압력강하를 유도하는데 매우 중요한 인자로 작용한다. Fig. 2는 연료/공기 믹서로 적절한 혼합을 위한 벤추리 설침 및 2층 나선형 구조에 의한 최대한의 유로를 확보하도록 길게 설계하여 제작하였다. 이러한 예혼합기의

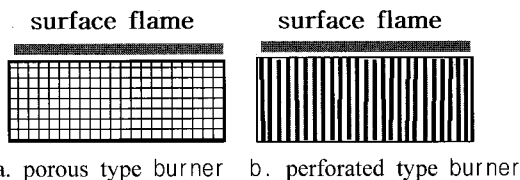


Fig. 1 Porous and perforated type ceramic burners

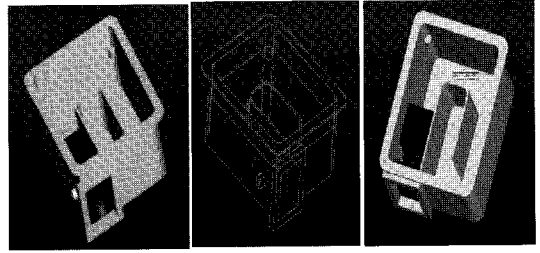


Fig. 2 3D modelling of mixer

설계는 상용 CFD 코드인 Fluent를 이용한 설계를 기본으로 하였고 프로 엔지니어를 이용하여 모델링하였다.

먼저 믹서의 구조를 살펴보면 층이 있는 2층구조로 되어 있어 연료/공기의 이동경로를 최대한 길게 설계함으로써 혼합시간을 최대한 하였지만 나선형 구조 특성상 중심에 유속이 높아지는 주흐름이 발생하였다. 이러한 주흐름은 균일한 유속을 만들지 못해 평면 예혼합화염의 생성을 어렵게 한다. 이러한 중심유선을 분산시키기 위하여 믹서와 세라믹 사이에 망(40/inch)과 다공성 베플 플레이트를 삽입하였고 적절한 유동해석과 압력강하를 고려하여 균일한 연료/공기의 유선을 만들었다. 또 공기와 연료가 최초로 혼합되는 지점에 혼합을 촉진시키기 위하여 벤추리를 삽입하였다. 벤추리의 구조는 공기의 흐름으로 인한 압력차이로 연료가 빨려 들어가는 구조이고 입구와 목부분의 면적을 약 2 배 정도의 차이로 설계하였다. 연료의 입구는 총 4 곳이며 위치에 따라 면적에 차이를 주어 연료분사구의 위치에 상관없이 균일한 양이 흘러갈 수 있도록 설계하였다. 이러한 벤추리는 기존의 분체버너와는 달리 공기의 양을 조절함으로써 당량비를 조절할 수 있고 본 실험의 청염영역에서의 균일한 연료/공기 혼합가스 유선을 만드는 데 매우 중요한 역할을 한다.

이와 같은 형태의 믹서와 버너를 사용하여 7000kcal/hr ~ 20000kcal/hr에서 부하비 3:1 조건에서 연소실험을 수행하였다. 앞서 설계된 믹서에 장착된 세라믹버너의 형태는 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 세라믹타일은 내열성과 내구성이 뛰어난 cordierite재질로 직경 0.9mm의 구멍이 평균 42개/cm²가 있는 perforated 다공 세라믹형태이고 다공성 세라믹의 크기는 132mm x 97mm x 13mm (length×width×thickness) 이다.

연소실험에 사용된 연료는 도시가스로 그 대표 조성은 CH₄ 89.3%, C₃H₆ 8.6%, C₄H₁₀ 0.6%로 구성되어 있고 고위발열량은 10,500 kcal/Nm² 이다. 연료의 유량은 압력 가버너를 이용해 가스의 압력을 감압 시킨후 버너의 연료가스 입구 노즐의 압력을 조절하여 제어하였으며 공기의 유량

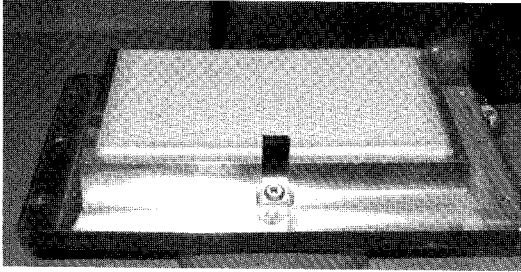


Fig. 3 Photograph of ceramic burner

은 DC 전압조절기를 사용하여 공연비 및 열용량을 조절하였다. 배기가스 측정은 NO_x , CO , CO_2 , O_2 측정이 가능한 API 200AH(API사, 미국)와 testo 300M (testo사, 미국) 배기가스 분석장치를 사용하였으며, 배기가스 측정단자의 직경은 4mm이며 측정단자 끝부분에 장착된 K형 열전대와 Fluke 온도 지시계를 사용하여 기연가스의 온도를 측정하였다[5].

세라믹 버너에 의한 연소특성을 파악하기 위하여 디지털 카메라(canon사, S-50, 일본)로 공연비, 열부하에 따른 화염의 거동을 촬영하여 각 조건에 따른 화염의 종류를 기록하였다. Fig. 4는 세라믹버너의 상향식 연소실험을 위한 실험장치의 개략도를 보여준다.

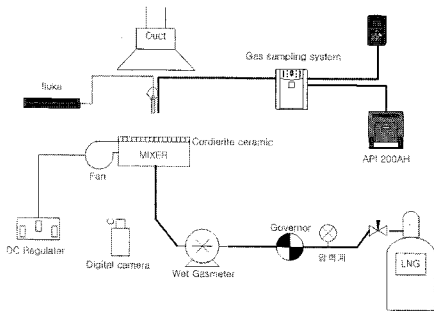
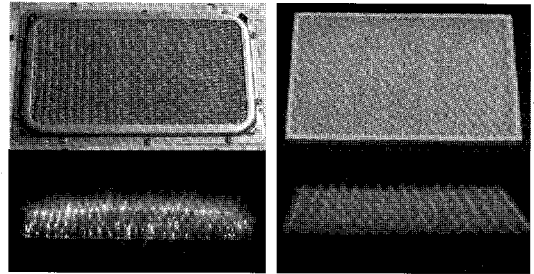


Fig. 4 Schematic of upward combustion experimental apparatus

2.2 다공성세라믹과 metal fiber버너의 화염특성비교

먼저 기존에 사용되고 있는 Metal fiber를 이용한 상향식버너와 본연구에서의 다공성세라믹을 이용한 버너의 화염특성을 상호 비교하여 보았다. Fig. 5. a는 Metal fiber를 이용한 버너로 화염이 매우 불안정하고 청염 아래부분에 적열현상을 볼 수 있는데 이것은 Metal fiber가 열을 흡수하여 적열광이 발생한 것으로 관찰되었다[9]. Fig. 5. b는 본 연구에 사용된 세라믹 버너로 전반적으로 안정된 청염을 띠고 있는 것을 볼 수 있다.



a. Metalfiber Burner b. Ceramic Burner

Fig. 5 Flame phenomena by type of burner material(10000kcal/hr $\Phi=0.65$)

이러한 화염의 특징은 Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 기연가스의 온도차이로도 나타난다. 기연가스 측정높이는 버너 상부 90mm(가정용 가스보일러 장착시 열교환기와 버너의 높이) 지점에서 측정하였다. 측정결과 기존 가정용 가스보일러의 버너로 사용되고 있는 metal fiber버너의 기연가스의 온도가 세라믹버너보다 전부하영역에서 $120^{\circ}C \sim 350^{\circ}C$ 정도 낮은 것을 볼 수 있었다. 이는 metal fiber버너 연소시 발생하는 황염과 적열모드로 인한 열손실때문인 것으로 판단된다.

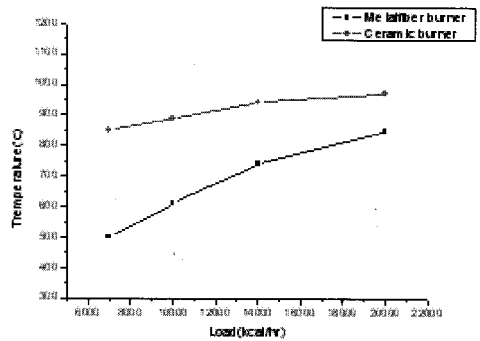


Fig. 6 Gas temperatures of Metal fiber and ceramic burner with load

NO_x 측정은 배기가스가 프루브를 지나 gas sampling system을 거쳐 API 200AH와 testo 300m으로 유입되는 방식으로 한다. 이때 gas sampling system에서 배기가스가 $4 \sim 5^{\circ}C$ 로 냉각되어 수분이 제거되고 API 200AH와 testo 300m에는 건가스만 들어가게 된다. API 200AH는 화학적 분광법에 의하여 NO_x 를 측정하고 Testo 300은 화학적 cell의 반응을 이용하여 배가스의 O_2 농도 및 CO , CO_2 의 농도를 측정하게 된다. 또한 배기가스의 온도는 Fluke(8020)와 T형 열전대를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 세라믹버너의 부하 및 공연비에 따른 화염 특성

화염은 부하별(7000kcal/hr ~ 20000kcal/hr)로 당량비 변화에 따라 실험하였다. 여기서 부하는 시간당 가스 소비량을 나타낸다. Fig. 7은 7000 kcal/hr인 경우이고 Fig. 8는 10000 kcal/hr, Fig. 9은 14000 kcal/hr, Fig. 10은 20000 kcal/hr의 경우 당량비 변화에 따른 화염형태를 찍은 사진으로 부하에 관계없이 거의 비슷한 당량비에서 같은 화염형태를 가지고 있는 것을 알 수 있다.

부하 7000 kcal인 Fig. 7. d에서 볼 수 있듯이 당량비 0.94 에서 화염면이 세라믹버너 위에 부착이 되면서 화염면이 연료 과잉상태에서 나타나는 여기된 C_2 에 의해 녹색을 띄는 표면화염이 생성됨을 관찰할 수 있었다. 연료과잉이기 때문에 1차표면화염 연소후의 미연 연료와 주위 공기와의 반응에 의한 2차 화염현상이 관찰되었고 이 화염을 녹색표면화염으로 분류하였다. 당량비가 이론혼합비 근방인 0.85에서의 화염이 세라믹 표면에 붙어 적열광을 내는 전형적인 복사모드의 화염이 생성되는 것을 알수 있었으며 이 화염을 복사표면화염으로 분류하였다. 이와 같이 적색의 복사화염은 좀더 희박한공기로 감에 따라 표면화염이 세라믹버너 표면을 벗어나 세라믹 바로 윗부분에 형성되는 청색표면화염(청염)으로 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. 당량비 0.65 근방에서는 희박에혼합비 상태에서의 청색 표면화염을 보였다. 당량비가 점차 희박 예혼합비로 가면서 전체 혼합기 유속은 커지고 연소 속도는 작아짐에 따라 평면화염면이 버너 표면에서 크게 이탈하는 화염날림이 발생하는 것을 알 수 있었다. 전체적인 당량비에 따른 화염형태 별로 구분하여 보면 당량비 감소에 따라 다음과 같이 변화됨을 알 수 있었다.

녹색화염 ==> 적열화염 ==> 청색화염
==> 화염날림

Figure 11은 당량비-부하에 따른 화염형태의 변화를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 당량비-부하에 따라 앞서 기술한 4가지 화염대로 구분하였다. 그리고 청색 표면화염은 열부하 범위내에서 당량비 약 0.6근방의 낮은 당량비에서 존재함을 알 수 있다. 청염1과 청염2는 청색표면화염이 존재하는 당량비의 경계치를 나타낸다. 복사표면화염도 당량비 0.7에서 0.85사이에서 일정하게 존재함을 알 수 있고 녹색표면화염은 당량비 0.9 ~ 1 사이에 존재함을 보여주고 있다.

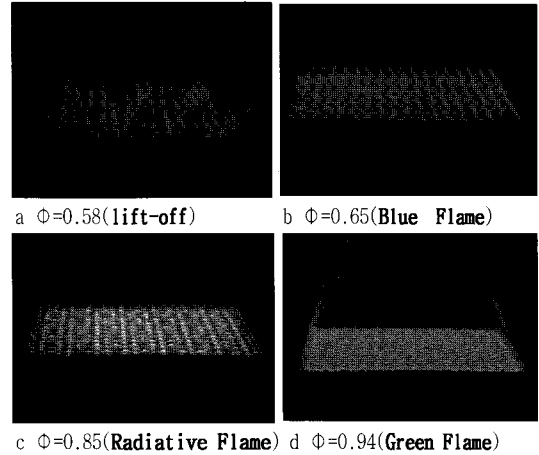


Fig. 7 Flame characteristic with Φ (at load 7000 kcal/hr)

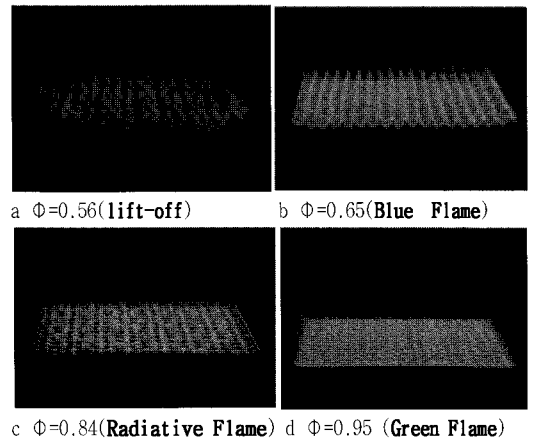


Fig. 8 Flame characteristic with Φ (at load 10000 kcal/hr)

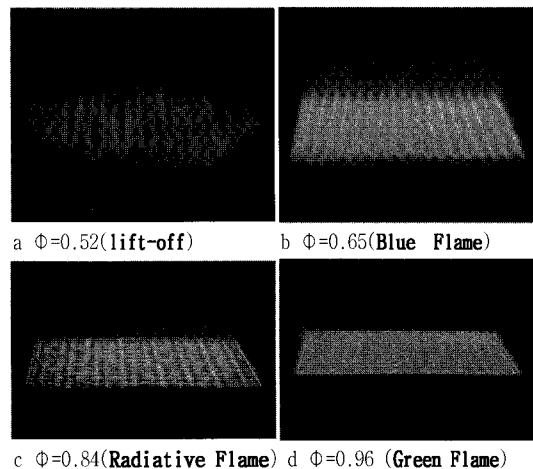


Fig. 9 Flame characteristic with Φ (at load 14000 kcal/hr)

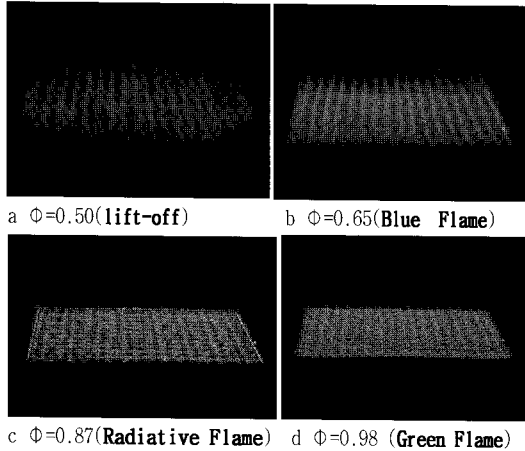


Fig. 10 Flame characteristic with Φ (at load 20000 kcal/hr)

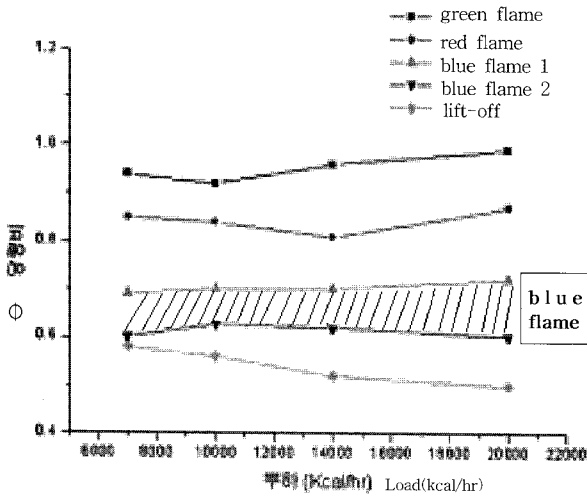


Fig. 11 Stability diagram of LNG/Air of ceramic burner flame

3.2 세라믹버너의 NOx 배출 특성

일반적으로 NOx의 배출특성은 이론혼합비 부근에서 최대이고 당량비가 작아 질수록 NOx 배출량도 감소한다. 따라서 낮은 당량비에 존재하는 청색화염의 NOx 배출이 가장 적은 값을 가진다.

Figure 12은 NOx배출이 작으면서 화염날림까지 가지 않는 안정된 청색화염에 대하여 부하에 따른 NOx 배출량을 보여준다. 청색화염은 당량비 0.63~0.67 사이에 대체로 존재하며 당량비 0.66의 NOx배출량은 각 부하별로 7000 kcal/hr는 10 ppm, 10000 kcal/hr에서는 15 ppm이고 14000 kcal/hr 일때 18 ppm, 20000 kcal/hr일때 약 22ppm 정도를 배출하였다. 세라믹버너에서의 NOx배출은 전 부하에 걸쳐 22 ppm 이하의 낮

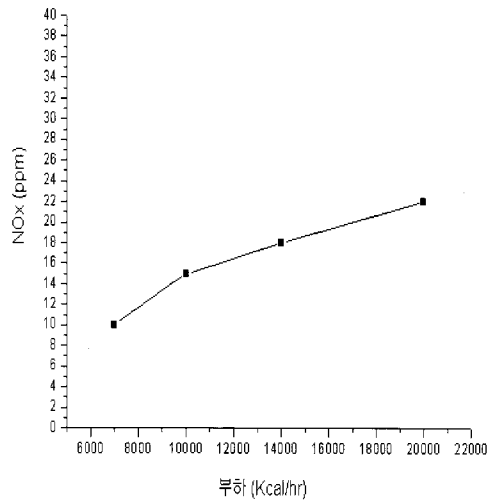


Fig. 12 NOx emission with load($\Phi=0.66$)

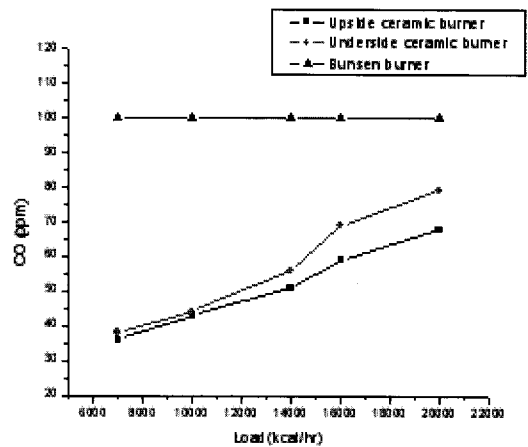


Fig.13 CO Emission at the kind of burner($\Phi=0.68$)

은 NOx 배출특성을 보여준다. 통상 분젠식 버너의 경우 NOx 배출량이 100 ppm 이상임을 감안할 때 매우 낮은 수준임을 알 수 있다.

3.4 버너에 따른 CO, NOx 배출 특성

기존의 분젠버너와 본연구의 Perforated ceramic 버너와의 CO의 부하에 따른 배출 특성을 나타낸 것이 그림 13에 나타나 있다. Fig.13에 나타나 듯이 두 버너 사이에 큰 차이를 보인다. 우선 Bunsen burner의 경우 당량비가 높아 CO의 배출량이 높으므로 통상 가정용 분젠버너의 설계시 CO배출량 100 ppm 수준으로 당량비를 조절하므로 부하에 따라 항상 일정한 값을 나타낸다.

세라믹 버너의 경우 당량비가 적은 희박 청염

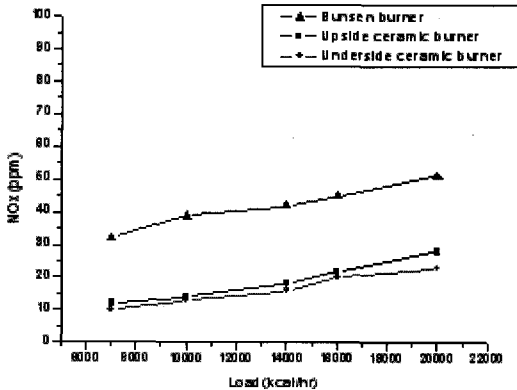


Fig. 14 NOx emission Emission at the kind of burner ($\Phi=0.68$)

화염형태이기 때문에 부하에 따라 증가하나 100 ppm 보다는 훨씬 적은 값을 나타낸다. 그러므로 기존의 분젠 버너와 같이 의도적인 CO 배출량 설정을 위한 당량비 조정이 필요 없게 된다.

Figure 14는 세라믹 버너와 분젠버너에서의 NOx 배출 특성을 보여준다. 분젠 버너의 경우 약 32 ~ 51 ppm 정도의 배출 특성을 보이며 세라믹버너의 경우 약 10 ~ 22 ppm으로 측정되었다. 공연비 0.65근방에서 청염화염을 이용하는 세라믹 버너의 경우 통상 1.5근방의 과농지역에서 연소가 일어나는 분젠 화염에 비해 낮은 NOx 배출 특성을 보여준다.

4. 결론

세라믹 버너를 이용한 표면화염 형태 및 NOx 배출특성에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 안정된 1차원 평면 예혼합화염을 위한 연료/공기 믹서의 개발로 perforated cordierite재질로 안정된 평면화염 버너를 구성할 수 있었다.
- 2) 당량비의 감소에 따라 안정된 녹염, 적염, 청염 및 화염으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 청염영역인 당량비 0.65 ~ 0.7 근방에서 9 ~ 22 ppm 수준의 저 NOx 배출특성을 보여줘 저 NOx형 버너로서의 가능성을 확인할 수 있었다.

4) 본 연구를 통해 개발된 세라믹 버너는 기존의 metal fiber재질의 버너에 비해 적열 및 황염이 적어 대류열전달의 증가로 인해 열손실 감소로 인하여 보다 나은 열 공급효율 특성을 가짐을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 2004년도 인천대학교 자체 공모연구 과제에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. S. R. Turns "An Introduction to Combustion," McGraw Hill, 2000.
2. 최경석, "저 NOx, 저 CO 고부하 표면연소버너," 가스안전 1996-11-12.
3. 한국에너지기술연구소, "메탈화이버 버너의 개발과 응용", 에너지 절약 기술 동향.
4. M. D. Rumminger, "Numerical and Experimental Investigation of Heat Transfer and Pollutant Formation in Porous Direct-Fired Radiant Burners," Ph.D Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of California-Berkely, 1996.
5. 임태균, 정태준, "다공성 복사 버너의 예혼합 연소," 기계학회 추계학술대회 논문집, 1999, pp 253-258.
6. D. G. Nicol et al, "The Importance of Nitrous Oxide Pathway to NOx in Lean-Premixed Combustion," Department of Mechanical Engineering, Combustion Laboratories, University of Washington, 1993.
7. K. H. Casleton et al. "Premixed Burner Studies of NOx Formation and Control," FE Fuel Cells and Coal-Fired Heat Engines Conference, 1992, pp 123-130.
8. 신의규 "고효율 저공해 세라믹버너의 연소특성에 관한 연구", 인천대학교 석사학위논문, 1999.
9. S. Charles et al. "Soot Volume Fraction and Temperature Measurement in Laminar Nonpremixed Flame Using Thermocouples," Department of Chemical Engineering and Center for Combustion Studies, Yale University, New Haven, CT, 1997