

Perforated Cordierite 재질 버너의 표면화염 연소특성 연구

양시원* · 황상순**†

A Study on the Combustion Phenomena of Surface Flame in Perforated Cordierite Burner

Si-Won Yang*, Sang-Soon Hwang**†

ABSTRACT

The surface flames in porous ceramic burner are experimentally characterized to investigate the effects of equivalence ratio and firing rates. The results show that the surface flames are classified into green, red radiant and blue surface flame as the decrease of equivalence ratio. And each flame is maintained very stable 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 firing rates. And the exhausted NOx was analysed to find out which flame has lower NOx emission. The blue surface flame shows the lowest NOx emission regardless of the location of burner since it sustains very stable at lean mixture ratio.

Key Words : Porous ceramic, Equivalence ratio, Lean, Blue surface flame, NOx

기 호 설 명

Φ : Equivalence ratio	Q : Total calorific value (kJ/Nm ³)
η_i : 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

1. 서 론

현재 고유가시대에 있어 에너지절약을 위하여 에너지 기기에서 열효율상승을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 에너지 기기의 열효율 향

상을 통한 기술개발에 덧붙여 날로 엄격해져가는 배기가스규제에 의하여 저공해 기술의 개발도 많은 연구가 되어지고 있다.⁽¹⁾ 본연구에서는 에너지 기기중 가정용 난방 시설인 가정용 가스보일러의 버너시스템의 고효율, 저공해화 연구를 수행하고자 한다. 가정용 가스보일러의 연소방식으로서 기존에 쓰이고 있는 분젠방식은 화염면의 형성이 다중화염형태로 각자 독립되어 있다. 균일한 온도분포를 얻기위하여 열 교환기까지 충분

* 인천대학교 기계공학과 대학원

** 인천대학교 기계공학과

† 연락처, hwang@incheon.ac.kr

히 거리를 확보해야 하므로 전체 보일러의 크기가 커지게 되고 또한 부력의 영향을 받기 때문에 상향식 이외에 하향식이나 측향식으로 버너를 설치하는데 기본적으로 문제를 가지고 있다. 그리고 분젠화염방식은 공연비가 연료 과농혼합비로 정해지기 때문에 희박혼합비에 의한 저 NOx 실현에 어려움을 갖고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 희박 예혼합 표면연소방식이 많이 연구 되어지고 있는데^(2,3,4) 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 표면화염 안정성범위가 좁아 저NOx 실현을 위한 희박공연비하에서 화염이 불안정해지는 특성을 보여준다.^(6,7) 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 3000도 이상의 고온조건에서도 내구성이 우수하고 다공질로 되어 있어 희박공연비하에서도 화염의 안정성의 증대를 기대할 수 있는 세라믹 재질인 Cordierite를 사용하여 표면화염의 연소특성을 살펴보고자 한다. 특히 본 연구에서 사용하는 Perforated형 Cordierite 세라믹은 기존의 Porous형 Cordierite재질에 비해 저가에 제작할 수 있고 다공구멍의 크기는 소염길이보다 작게되어 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 본 연구에서 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 줄 수 있다.⁽⁸⁾

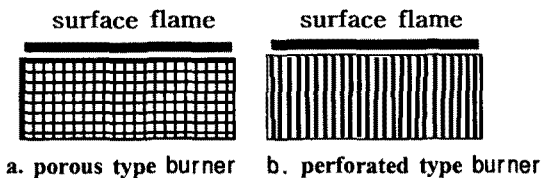


Fig. 1 Porous and perforated type ceramic burner

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 벤추리와 유로를 최대한 길게 설계하여 제작하였다. 이러한 예혼합기의 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 Ma 주흐름이 발생하였다. 이러한 주흐름은 균일한 유속을 만들지 못해 평면 예혼합화염 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 2배정도의 차이로 설계하였다. 연료의 입구는 총 4곳이며 위치에 따라 면적에 차이를 주어 연료분사구의 위치에 상관없이 균일한 양이 흘러갈 수 있도록 설계하였다. 이러한 벤추리는 기존의 분젠버너와는 달리 공기의 양을 조절함으로써 당량비를 조절할 수 있고 본 실험의 청염영역에서의 균일한 연료/공기 혼합가스와 유선을 만드는데 매우 중요한 역할을 한다.

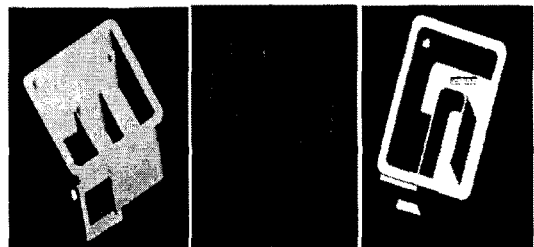


Fig. 2 Premixed equipment (mixer)

이와같은 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.

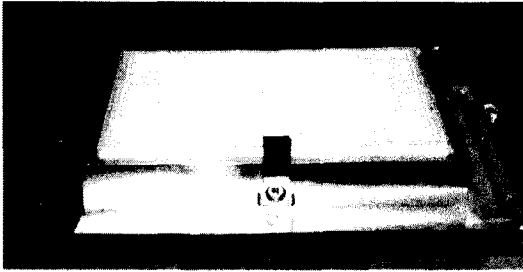


Fig. 3 Photograph of Ceramic Burner

연소실험에 사용된 연료는 도시가스로서 그 대표 조성은 CH_4 89.3%, C_3H_8 8.6%, C_4H_{10} 0.6%로 구성되어 있고 고위발열량은 $10,500 \text{ kcal/Nm}^2$ 이다. 연료의 유량은 압력 가버너를 이용해 가스의 압력을 감압 시킨후 버너의 연료가스 입구 노즐의 압력을 조절하여 제어하였으며 공기의 유량은 DC 전압조절기를 사용하여 공연비 및 열용량을 조절하였다. 배기가스 측정은 NO_x , CO , CO_2 , O_2 측정이 가능한 API 200AH와 testo 300M 배기가스 분석장치를 사용하였으며, 배기가스 측정단자의 직경은 4mm이며 측정단자 끝부분에 장착된 K형 열전대와 Fluke를 사용하여 기연가스의 온도를 측정하였다.⁽⁵⁾

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

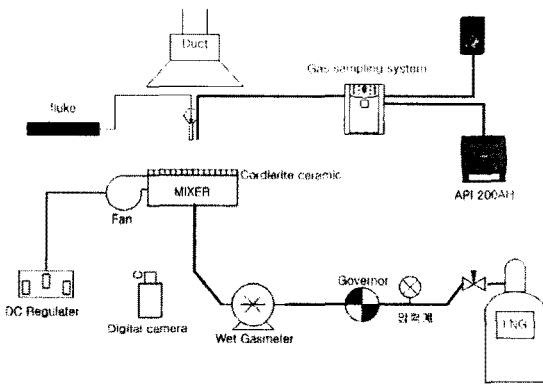


Fig. 4 Schematic of upside combustion experimental apparatus

2.2 다공성세라믹과 metalfiber버너의 화염특성비교

먼저 기존에 사용되고 있는 Metal fiber를 이

용한 상향식버너와 본연구에서의 다공성세라믹을 이용한 버너의 화염특성을 상호 비교하여 보았다. Fig. 5. a는 Metalfiber를 이용한 버너로 화염이 매우 불안정하고 청염 아랫부분에 적열현상을 볼 수 있는데 이것은 Metal fiber가 열을 흡수하여 적열광이 발생한 것으로 관찰되었다. Fig. 5. b는 본 연구에 사용된 세라믹 버너로 전반적으로 안정된 청염을 띠고있는 것을 볼 수 있다.

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 사용되고있는 Metal fiber버너의 기연가스의 온도가 세라믹버너보다 전부하영역에서 $120^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ 정도 낮은 것을 볼 수 있었다. 이는 Metal fiber버너 연소시 발생하는 황염과 적열모드로 인한 열손실때문인 것으로 판단된다.

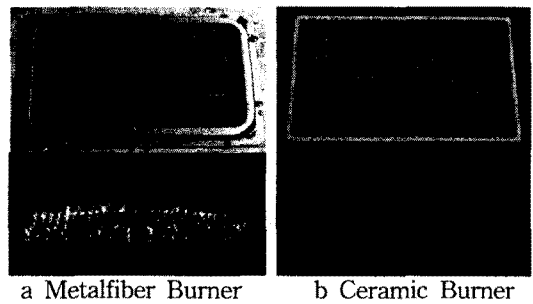


Fig. 5 Flame phenomena according to burner (10000kcal/hr $\Phi=0.65$)

기연가스 측정 높이는 버너 상부 90mm(가정용 가스보일러 장착시 열교환기와 버너의 높이) 지점에서 측정하였다.

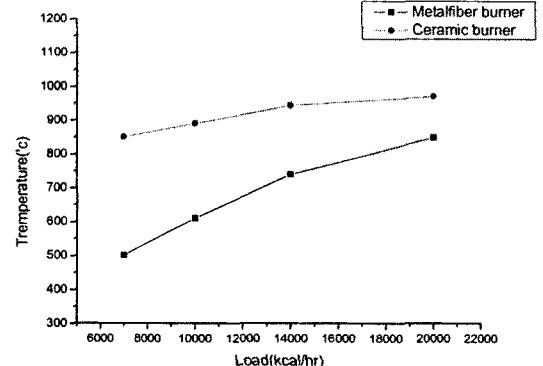


Fig. 6 Metalfiber and ceramic burner temperature by load

2.3 세라믹버너 상향식(현열 열교환기) 효율 실험장치

Fig.7의 현열 열교환기는 L사에서 현재 양산중인 모델로 현재 13000kcal ~ 20000kcal급의 가정용 가스보일러에서 사용중인 열교환기를 사용하였다. Fig.8은 믹서에 산화제공급은 L사에서 양산중인 DC FAN이다. 역시 현재 가정용 가스보일러에 쓰이고 있는 모델이다. 윗부분에 관이 3개 아랫부분에 2개 총 5열의 핀/관이 존재하며 버너 장착부에서 열교환기까지의 거리는 90mm이다.

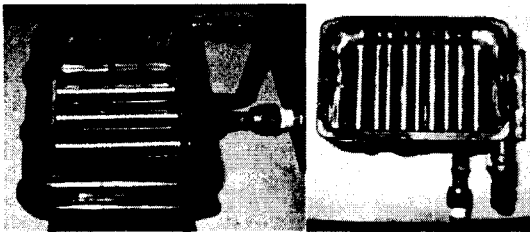


Fig. 7 Heat exchanger of L company(13000~20000kcal/hr)



Fig. 8 DC Fan

Fig.9는 상향식 세라믹버너 효율을 측정하기 위한 장치로 제일 하단에 위치한 세라믹 버너에서 연료가스 연소시 발생한 고온의 배기가스가 동으로 된 핀/튜브형태의 열 교환기(현열 열교환기)를 지나면서 열 교환을 하고 이 효율을 측정하기 위한 것이다.

이러한 상향식 효율실험은 기존의 분첼버너에 같은 열교환기를 장착한 후 열효율을 비교하였다. 분첼버너의 경우 당량비 약 1.5 근방에서 화염이 형성되는 부분 예혼합 화염으로 화염길이가 길기 때문에 연소실이 커지며 공해물질인 NOx의 경우도 상당히 많이 배출되는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 구조적으로 에너지절약, NOx 배출측면에서 문제점을 가지고 있는 분첼버너식 가스보일러의 경우 점차 강화되는 에너지 절약정책 및 배기가스규제를 만족시킬 수 없게 된다.

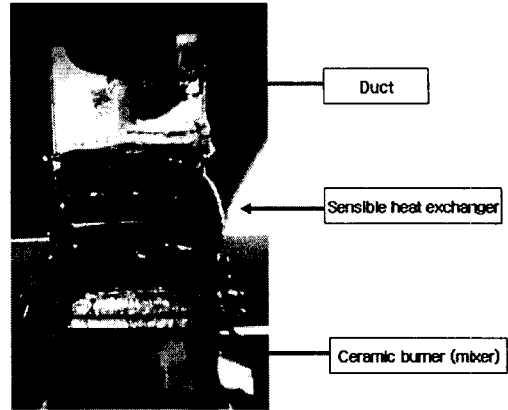


Fig. 9 Upside combustion of ceramic burner efficiency test system (Only sensible heat exchanger)

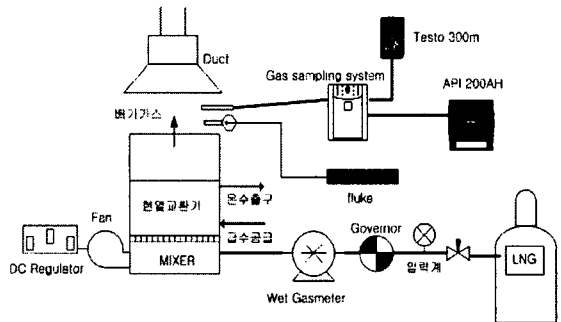


Fig. 10 Schematic of upside combustion of ceramic burner efficiency experimental apparatus

Fig.10은 현열 열교환기를 장착한 상향식 효율실험 개략도를 보면 LNG분배로부터 공급된 연료가스는 가버너를 거쳐 일정한 압력과 온도로 공급되고 Wet gasmeter에서 유량을 확인한 후 믹서로 공급하게 된다. 이때 믹서입구의 연료가스 공급 압력은 KS규격에 따라 100 mmH₂O 이하로 유지된다. 또 현열 열교환기에 공급된 급수와 출탕된 온수의 온도차이는 40℃이고 1시간이상 가동하였다. 당량비를 측정하기 위한 방법으로 FAN의 송풍량을 고려하였으나 FAN의 DATA에 대한 신뢰성과 여러 변수에 따른 송풍량의 차이로 인해 배기가스의 산소농도를 기준으로 당량비를 측정하였다.

NOx 측정은 배기가스가 포루브를 지나 gas sampling system을 거쳐 API 200AH와 testo 300m으로 유입되는 방식으로 한다. 이때 gas sampling system에서 배기가스가 4~5℃로 냉각되어 수분이 제거되고 API 200AH와 testo 300m

에는 건가스만 들어가게 된다. API 200AH는 화학적 분광법에 의하여 NOx를 측정하고 Testo 300m은 화학적 cell의 반응을 이용하여 배가스의 O₂농도 및 CO, CO₂의 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) 당량비 변화에 따라 실험하였다. 여기서 부하는 시간당 가스 소비량을 나타낸다. 각화염의 부하에 따라 어느 정도 차이는 있으나 당량비에 따라 거의 비슷한 화염형태를 나타내었다. 부하7000kcal Fig. 11. d에서 볼 수 있듯이 당량비 0.95 에서 화염면이 세라믹버너 위에 부착이 되면서 화염면이 연료 과잉상태에서 나타나는 여기된 C₂ 에 의해 녹색을 띄는 표면화염이 생성됨을 관찰할 수 있었다. 연료과잉이기 때문에 1차표면화염 인 소후의 미연 연료와 주위 공기와의 반응에 의한 2차 화염현상이 관찰되었고 이 화염을 녹색표면 화염으로 분류하였다. 당량비가 이론혼합비 근방인 0.85에서의 화염이 세라믹 표면에 붙어 적열 광을내는 전형적인 복사모드의 화염이 생성되는 것을 알수 있었으며 이 화염을 복사표면화염으로 분류하였다. 이와같이 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 희박에혼합비로 가면서 전체 혼합기 유속은 커지고 연소 속도는 작아짐에 따라 평면화염면이 버너 표면에서 크게 이탈하는 화염날림이 발생하는 것을 알 수 있었다. 전체적인 당량비에 편차에 따른 화염형태 별로 구분하여 보면 당량비 감소에 따라 다음과 같이 변화됨을 알 수 있었다.

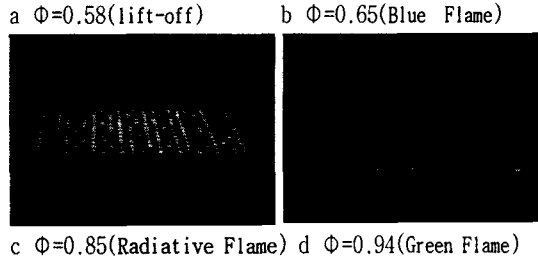
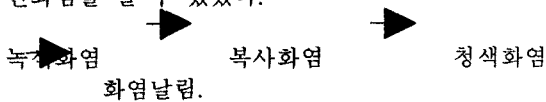


Fig. 11 Flame characteristic by Φ (Load 7000 kcal/hr)

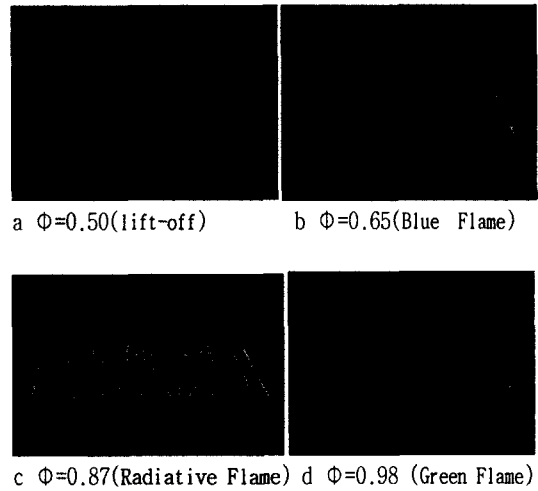


Fig. 12 Flame characteristic by Φ (Load 20000 kcal/hr)

Fig. 11은 7000kcal/hr인 경우이고 Fig. 12는 20000kcal/hr의 경우 당량비 변화에 따른 화염형태를 찍은 사진으로 부하에 관계없이 거의 비슷한 당량비에서 같은 화염형태를 가지고 있는 것을 알 수 있다

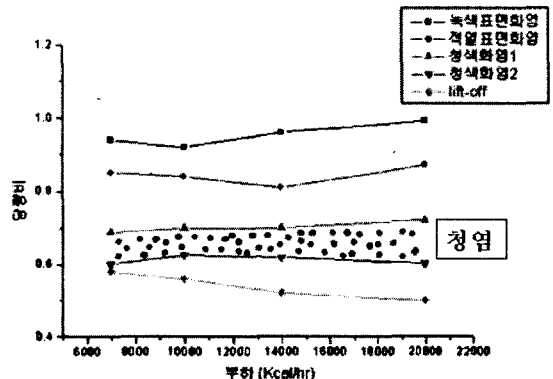


Fig. 13 Stability Diagram of LNG/Air at Ceramic

Burner

Fig. 13은 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 위치를 나타낸다. 복사 표면화염도 당량비 0.7에서 0.85사이에서 일정하게 존재함을 알 수 있고 녹색표면화염은 당량비 0.9 ~ 1 사이에 존재함을 보여주고있다.

3.2 세라믹버너의 NOx 배출 특성

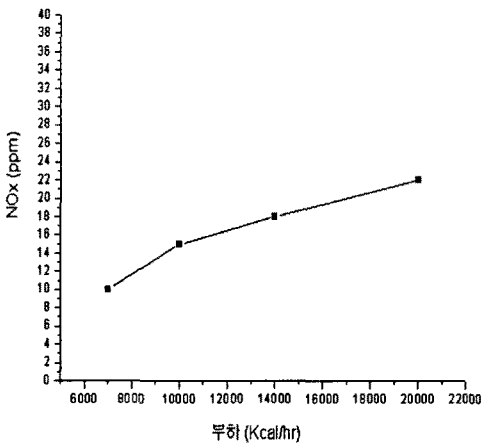


Fig. 14 NOx emission by load($\phi=0.66$)

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

Fig. 14는 NOx배출이 작으면서 화염날림까지 가지 않는 안정된 청색화염에 대하여 부하에 따른 NOx 배출량을 보여준다. 청색화염은 당량비 0.63~0.67 사이에 대체로 존재하며 NOx배출량은 각부하별로 7000kcal/hr는 10ppm, 10000kcal/hr에서는 15ppm이고 14000kcal/hr일때 18ppm, 20000kcal/hr일때 약 22ppm 정도를 배출하였다. 세라믹버너에서의 NOx배출은 전 부하에 걸쳐 22ppm 이하의 저NOx 배출특성을 보여준다.

3.3 세라믹버너 상향식(현열 열교환기)열 효율 측정

실험시 Wet gasmeter 내부의 압력과 온도, 급수의 온도차, 시간당 흐른 물의 양, 소비된 연료가스의 양과 소요시간 등을 측정하여 식(1)로

계산한다.

열효율계산시 사용한 식(1)은 KS B 8127에 의거한 온수성능식을 사용하였다. 시험조건으로 우선 급수조건은 10 ~ 25℃의 물을 98kPa(제조자가 지정하는 사용압이 그보다 높을 경우 그 지정하는 압력)의 수압으로 흐르게 한다. 보일러의 배관에 물을 98kPa로 가득 채운다. 시험방법은 온수 온도를 시험 온수 온도가 되도록 조절하고 안정된 온수 온도상태로 된 후 측정 한다. 가스미터의 지침이 1회전이상 정수회전을 하는 동안 온수를 공급하고 그 동안의 가스사용량(V), 온수량(M), 온수 온도(t_{w2}), 및 급수 온도(t_{w1}), 그밖에 필요한 값을 측정하여 열효율을 다음식에 따라 산출한다.^(10,11,12)

$$\eta_t = \frac{M \times C(t_{w2} - t_{w1})}{V \times Q} \times \frac{101.3 \times (273 + t_g)}{(B + P_m - S) \times 273} \quad (1)$$

여기서,

η_t : 상승온도 $t(=t_{w2} - t_{w1})$ ℃의 열효율(%)

C : 가열하는 물의 비열 4.18 [kJ/(kg · K)]

M : 온수량(출탕한 온수무게) [kg/h]

t_{w1} : 급수온도(℃)

t_{w2} : 온수온도(℃)

Q : 가스의 총발열량(kJ/m³N)

V : 실측 가스 용량(m³)

t_g : 측정시 가스미터안의 온도

P_m : 측정시 가스미터안의 압력

S : 온도 t_g ℃에서의 포화수증기압(kPa)

위 식(1)은 KS규격에 따른 효율실험 방법이며 가동시간은 전부하 모두 1시간이상 가동후 측정하였고 측정시간은 평균 75.0 sec이고 열효율은 총발열량 기준으로 총 3회 측정하여 계산하였다. 전부하에서 Table 1과 같은방법으로 측정하였고 표시출력 7000kcal/hr 일때 가스소비량 8540kcal/hr, 10000kcal/hr 일때 12200kcal/hr, 14000kcal/hr 일때 17080kcal/hr, 20000kcal/hr 일때 24400kcal/hr 를 기준으로 하였다.

아래의 Table1은 연료가스 40L가 흐를 때 측정 한 값으로 표시가스 소비량 19300kcal/hr 표시출력 16000kcal/hr 이다.

Table 1 Upside ceramic burner efficiency data (Only sensible heat exchanger)

Fuel gas Temp [℃]	Hot water weight (kg)	ΔT [℃]	Exhaust gas Temp [℃]
27.7	7.85	40	151

27.7	7.91	40	150
27.7	7.95	40	150.5

Fig.15는 부하에 따른 세라믹버너와 분젠버너의 효율을 보여준다. 현열 열교환기가 내구성을 고려하여 가질 수 있는 이론상 최대효율은 84%이고 세라믹 버너의 경우 83.8 ~ 84%의 효율을 보였고 분젠버너의 경우 82% 정도의 효율을 보였다. 이와 같은 효율의 차이는 평면 화염의 특성상 버너 표면 전 영역에서 거의 비슷한 온도분포를 가지고 있고 이러한 분포로 기인하여 단위 면적당 열전달률을 증가시킬 수 있었다. 이는 효율뿐만 아니라 열교환기 자체의 수명에도 많은 영향을 준다. 실제로 실험에 사용된 세라믹버너에 비하여 열교환기의 내부 공간이 필요 이상으로 컷음에도 불구하고 이러한 고효율을 보여줌으로써 좀더 콤팩트한 열교환기 장착시 더 높은 효율을 기대할 수 있다.

또한 안정된 화염형태와 고효율의 특성을 볼 때 컨덴싱보일러 버너로의 적용 가능성을 알 수 있었다.

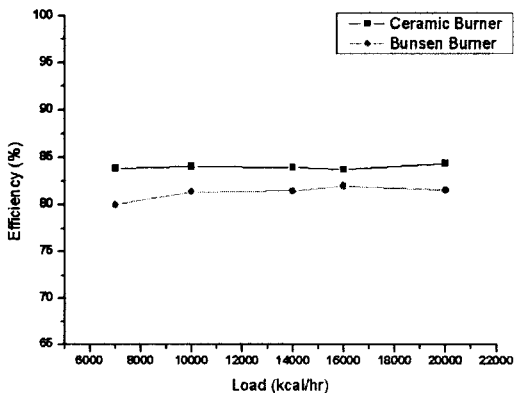


Fig. 15 Efficiency of bunsen and ceramic burner by load

3.4 버너에 따른 NOx 배출 특성

Fig. 16은 전부하 영역에서 부하에 따른 NOx 배출 특성을 나타낸다. 기존의 분젠버너의 경우 7000kcal/hr의 경우 약 31ppm의 NOx를 배출하였고 부하에 따라 10000kcal/hr 일때 39ppm, 14000kcal/hr 일때 42ppm, 16000kcal/hr 일때 46ppm, 20000kcal/hr 일때 52ppm의 배출특성을 보였다. 반면 세라믹 버너의 경우 7000kcal/hr의 경우 약 12ppm, 10000kcal/hr 일때 16ppm, 14000kcal/hr 일때 18ppm, 16000kcal/hr 일때 22ppm, 20000kcal/hr 일때 26ppm의 배출특성을 나타냈다.

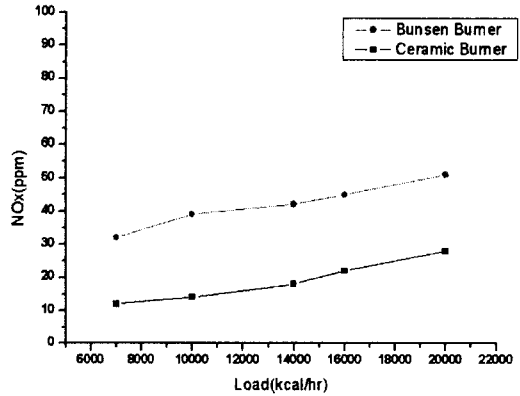


Fig. 16 NOx emission of bunsen and ceramic burner by load

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 Cordierite재질로 안정된 평면화염 버너를 구성할 수 있었다.
- 2) 기존의 Metal fiber재질의 버너에 비해 화염구성이 녹염, 적염, 청염 및 황염으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 청염영역인 당량비 0.65 ~ 0.7 근방에서 9 ~ 26ppm 수준의 저 NOx 배출특성을 보여줘 저 NOx형 버너로서의 가능성을 확인할 수 있었다.
- 4) 본 연구를 통해 개발된 세라믹 버너는 기존의 Metal fiber재질의 버너에 비해 적염 및 황염이 적어 대류열전달의 증가로 인해 열손실 감소로 인하여 보다 나은 열 공급효율 특성을 가진다.
- 5) 현열 열교환기를 장착한 보일러 실험에서 84%의 고효율을 확인함으로써 가정용 가스보일러 버너로의 가능성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Stephen R. Turns "An Introduction to Combustion" McGraw Hill, 2000
2. 최경석, "저NOx, 저 CO 고부하 표면연소버너" 가스안전 1996-11-12

3. 한국에너지기술연구소, "메탈화이버 버너의 개발과 응용", 에너지 절약 기술 동향
4. Marc D. Rumminger, PH.D "Numerical and Experimental Investigation of Heat Transfer and pollutant Formation in Porous Direct-Fired Radiant Burners", 1996
5. 안광찬 외 다수, "메탈화이버 표면연소기의 연소특성에 관한 연구", 1999
6. D. G. Nicol et al, "The Important of Nitrous Oxide Pathway to NO_x inlean-Premixed Combustion", Department of Mechanical Engineering, Combustion Laboratories, University of Washington, 1993
7. Kent H. Casleton et al. "Premixed Burner Studies of NO_x Formation and Control" FE Fuel Cells and Coal-Fired Heat Engines Confernce, 1992
8. 신의규 "고효율 저공해 세라믹버너의 연소특성에 관한 연구", 인천대학교 석사학위논문, 1999
9. Charle S. et al. "Soot Volume Fraction and Temperature Measurment in LaminaNonpremixed Flame Using Termocouples" Department of Chemical Engineeringand Center for Combustion Studies, Yale University, New Haven,CT, 1997
10. 한국산업규격(KS), "가정용 가스 연소기기의 시험방법(KS B 8010)", 1999
11. 한국산업규격(KS), "가스 온수보일러 (KSB 8109)", 1998
12. 한국산업규격(KS), "콘텐싱 가스 온수 보일러 (KS B 8127)", 2001