

메탈 하이버 버너에서의 연소 특성 및 복사 효율에 관한 실험적 연구

박주원* · 정태용** · 신동훈**

A Study on the Combustion Characteristics and Radiation Efficiency of Metal Fiber Burners

Ju-Won Park*, Tae-yong Chung**, Dong-hoon Shin**

ABSTRACT

Radiant burners are applicable to drying, preheating and curing in materials manufacturing processes. High radiation efficiency is one of the most important performance criteria for these burners. The wide variation in reported radiation efficiencies are partly due to the differences in the measurement techniques. In the present work, water cooled radiant heat flux meter was used to measure radiant heat flux from a metal fiber mat burner. Non-contact type thermometer was also utilized to measure the surface temperature of the burner. Combustion gas was measured by gas analyzers. According to the thermal loads and stoichiometric ratios, radiant heat transfer ratio and combustion performance were discussed here in.

Key Words : metal fiber burner, combustion characteristics, radiation efficiency, CO, NOx.

기 호 설 명

η	radiation efficiency	LHV	Lower Heating Value
ϕ	equivalence ratio	Q_{rad}	radiative heat flux of burner
σ	Stefan-Boltzmann constant	Q_{chem}	total heating value of fuel
ϵ	emissivity	m_{fuel}	mass flow rate of fuel

1. 서 론

산업용 건조 및 가열 공정에서는 생산성 및 품질 향상을 위하여 신속, 균일 가열이 요구되고 있으나, 이같은 요구를 만족시키기에는 기존의 연소기 구조로는 기술적 한계가 있다. 또한 넓은 영역을 균일하게 가열하는 데에는 부적합하며, 불완전 연소로 인하여 다량의 유해 가스를 생성시키는 점 등의 문제를 가지고 있으므로, 주거 환경에서의 직접 난방이나 산업 공정에서의 직접 가열 등에 응용하는 데 어려움이 있다.

최근 이러한 어려움을 극복하기 위해 완전 연소와 균일 가열 특성을 효과적으로 얻기 위한 연소 장치로서 다공성 재료를 이용한 장치가 제안되고 있다⁽¹⁾. 이 연소기는 다공성 재료를 통하여 유입되는 예혼합 연료-공기가 반응 영역을 통과하면서 연소되고, 연소열의 일부는 높은 열축열률을 갖는 다공체에 축적되어 고에너지 환경에서 연속 연소가 가능하게 되어 완전연소를 이룰 수 있다.

다공체로서 세라믹 폼, 세라믹 섬유 등을 많이 사용해 왔으나, 최근에는 일정한 압력으로 적층한 고온 내열 메탈 하이버(metal fiber)를 이용하여 그 표면으로부터 발생하는 강력하고 균일한 고체 복사 에너지(연소가스 엔탈피의 약 35%)와 고온 연소 가스의 대류 가열 효과를 동시에 이용하고자 하는 방법이 널리 이용되고 있다. 메탈

* 국민대학교 기계공학과

† 연락처, krt702@kookmin.ac.kr

** 국민대학교 기계자동차공학부

화이버 버너의 산업 응용 분야로써 건조, 예열, 열처리 등 많은 제조 공정에 복사 버너가 적용되고 있으며, 이와 같은 버너에서의 복사 효율은 가장 중요한 인자라고 할 수 있다.

메탈 화이버를 이용한 연소는 원리적으로 여러 가지 유리한 조건을 갖고 있으며 연구가 활발히 진행되고 있으나, 메탈 화이버 소결 매트 버너(metal fiber sintered mat burner) 연소에서의 연소 특성에 대한 연구는 미미한 편이다. 본 연구에서는 메탈 화이버 소결 매트의 연소 부하에 따른 복사 효율 측정 실험과 복사 버너에서의 메탈 스크린(metal screen)이 복사 효율 및 표면 온도 분포에 미치는 영향, 당량비 및 연소 부하에 따른 온도 특성 및 배출 가스 특성을 알아보기 위한 연소 실험을 병행하여 그 결과를 고찰함으로써 실제 산업분야에 적용하기 위한 연소기 설계시 기초 자료 제공을 목적으로 하였다.

2. 이론적 고찰

Fig. 1에 나타난 것과 같이 다공성 매질 표층에서의 연소는 부정형의 고체와 고온 가스(연소반응 영역 및 연소가스)사이의 전도, 대류 및 복사 열전달을 포함하는 열유체 화학 반응의 상호간섭 및 열평형에 의하여 화염면의 위치가 결정된다.

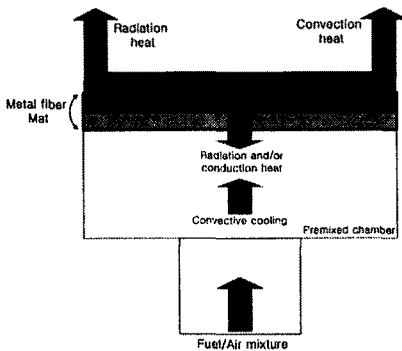


Fig. 1 Technology of surface combustion

일반적으로 다공성 매질을 이용한 연소기에서의 연소 형식은 다음과 같이 2가지로 나타난다.

(a) 복사 모드(radiant mode) : 연소는 다공성 구조 내에서 이루어지며 이로 인해 다공성 매질이 가열되어 에너지의 상당 부분이 복사에너지 형태로 발산한다.

(b) 청염 모드(blue flame mode) : 연소가 다공성 매질 위에서 이루어져 청염이 연소면 위로 부상하며 에너지의 대부분이 대류 에너지 형태로

발산한다.

따라서, 다공성 매질 표층에서 안정적인 연소 화염을 유지시키기 위해서는 가연성 혼합가스의 물리화학적 특성(열전도도, 발열량 및 연소 속도) 외에 다공성 매질의 물리화학적 특성(매질의 조성, 비열, 열전도도 및 복사, 흡수 계수 등) 및 구조적 형상(기공율, 기공의 크기, 화이버의 지름 및 매질의 두께 등)을 고려한 열유체 화학 반응의 정확한 메카니즘을 이해할 필요가 있다. 이에 관한 이론적 해석은 이미 여러 연구자들에 의해서 수행된 바 있다⁽²⁾.

3. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서 사용된 실험 장치는 메탈 화이버 버너를 이용해 LPG를 연소시키는 연소 장치와 가스 및 공기량, 매트 표면 온도, 복사 열유속 및 배출 가스 등을 측정하기 위한 계측 장치로 구성되어 있다.

3.1 연소 실험 장치

본 연구에서 사용된 연소 장치는 메탈 화이버 소결 매트 연소기, 연료 공급 장치, 연소용 공기 공급 장치 등으로 구성되어 있다. Fig. 2는 본 실험에서 사용된 연소 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

연료-공기 예혼합기는 지름 67mm인 관을 통해 예혼합실로 유입된다. 혼합기는 예혼합실의 배플(baffle)의 가장자리로 분배되어 버너 표면으로 균일하게 유입된다.

연소는 180 × 120mm의 소결 매트에서 이루어지며 매트 앞부분에 복사 효율을 증대시키기 위한 메탈 스크린(metal screen)이 장착되어 있다.

본 연구에서 사용된 표면 연소용 메탈 화이버 매트는 고 내열성 금속 섬유로 만들어진 다공성이 우수한 소결체이다. 메탈 화이버 소결 매트(metal fiber sintered mat) 및 메탈 스크린(metal screen)의 소재는 1,000℃ 이상의 고온에서도 탁월한 내 산화성을 갖는 견고한 FeCrAlloy이다.

3.2 계측 장치

3.2.1 표면 온도 측정

연소 부하 및 당량비에 따른 메탈 화이버 버너 매트 표면 온도를 측정하기 위해서 Fig. 3와 같이 비접촉식 적외선 온도계(Raytek, Raynger3i series)를 사용하였으며, 버너 표면의 20점에서 온도를 취득해 그 평균 온도로서 표면온도를 측정하였다.

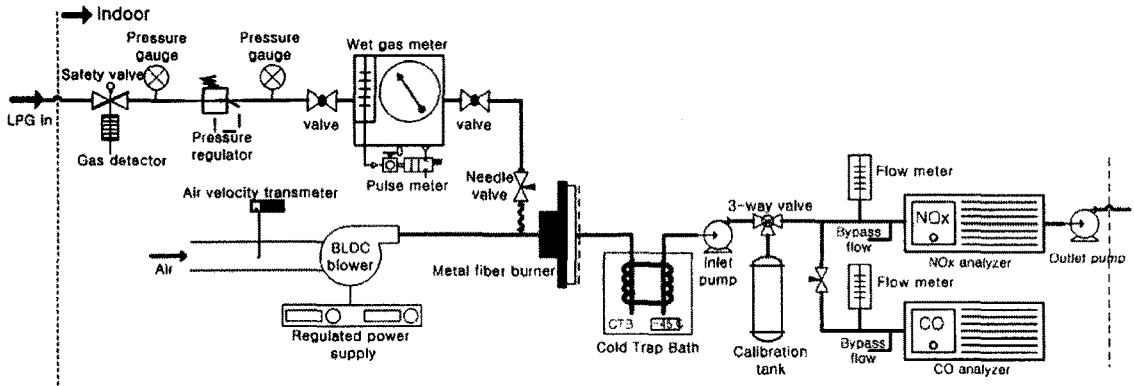


Fig. 2 Schematic diagram of combustion experimental apparatus



Fig. 3 Measurement of surface temperature

3.2.2 복사 효율 측정

메탈 하이버 버너에서 방사되는 복사 유속을 측정하기 위한 장치로서 복사 유속을 측정하기 위해 버너 표면으로부터 100mm, 300mm 지점에 버너와 평행하게 1400mm × 1200mm 격자망을 설치하고 수냉식 복사 유속계(water cooled radiant flux sensor)를 사용하여 각 격자점에서 복사 유속을 측정하였다.

$$Q_{\text{rad}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A (T_{\text{surface}}^4 - T_{\text{room}}^4) \quad (1)$$

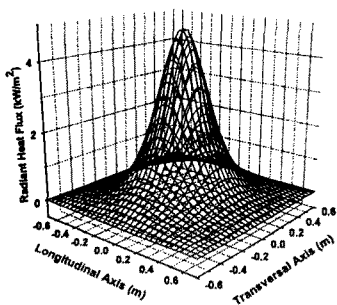


Fig. 4 Contours of radiative heat flux

버너 표면에서 방사되는 총 복사 에너지는 식 (1)과 같이 계산되며, Fig. 4는 버너로부터 측정된 복사 유속의 크기를 나타내는 그래프이다.

복사 효율은 총 에너지 입력에 대한 복사 에너지 출력의 비로써 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\eta = Q_{\text{rad}} / Q_{\text{chem}} = Q_{\text{rad}} / (m_{\text{fuel}} \times \text{LHV}) \quad (2)$$

3.2.3 배출 가스 농도 측정

배출 가스의 NO_x, CO 및 O₂ 농도를 측정하기 위한 장치로서 Fig. 2에 그 개략도를 나타내었다. 전기 화학 방식의 가스 분석기 Sensoic-5000 (Durac Industrial Elektronik)과 NO/NO₂/NO_x analyzer (Thermo Environment Instrument)를 사용하였고, 전처리 장치인 CTB(cold trap bath)를 사용하여 샘플 가스의 수분을 제거하였다.

3.3 실험 방법

본 실험에는 당량비 및 연소 부하에 따른 메탈 하이버 복사 버너의 메탈 스크린(metal screen)의 영향을 관찰하기 위하여 메탈 스크린이 있는 메탈 하이버 버너와 메탈 스크린을 제거한 버너에서의 표면 온도 및 복사 효율을 측정, 비교함으로써 복사 버너에서의 메탈 스크린의 영향에 대해 알아보았다.

실험조건을 당량비 1.0, 0.9 및 0.8로 변화시켰으며, 연소부하는 150kW/m²부터 350kW/m²까지 50kW/m²씩 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 당량비를 맞추기 위하여 연료는 실외의 연료 저장 탱크로부터 압력 조절기를 거쳐 2.74kPa로 분사하고 습식 가스 미터를 통해 유량을 측정하였으며 습식 가스 미터에 펄스 미터를 장착하여 순간 유량 및 적산 유량을 측정하였다. 연료량 조절은 배관 끝단에 니들 밸브로 조절하였다.

공기량 조절은 BLDC 블로어를 사용하여 가변 전압계(regulated power supply)와 연결하여 블로어의 회전속도를 조절함으로써 공기량을 조절하고, 블로어 앞단에 풍속계(air velocity transmitter)로써 공기량을 측정하여 최종 당량비를 조절하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 메탈 화이버 버너의 표면 온도 특성

본 실험에서는 메탈 화이버 버너 매트 온도 측정하여 연소 부하와의 관계를 알아보았다. Fig. 5는 메탈 스크린이 있는 메탈화이버 버너(Type A)의 경우 연소 부하 및 당량비에 따른 표면 온도를 나타낸 그래프이고, Fig. 6은 메탈 스크린이 없는 메탈 화이버 버너(Type B)에 대하여 연소 부하 및 당량비에 따른 표면 온도를 나타낸 그래프이다. Type A의 경우 당량비 1에서 연소 부

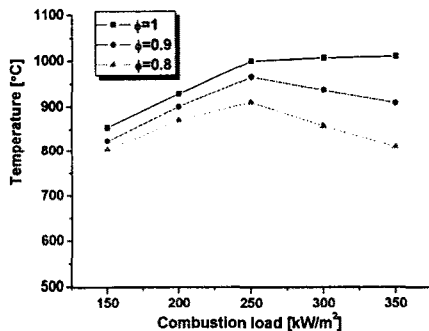


Fig. 5 Distribution of surface temperature for combustion load at Type A

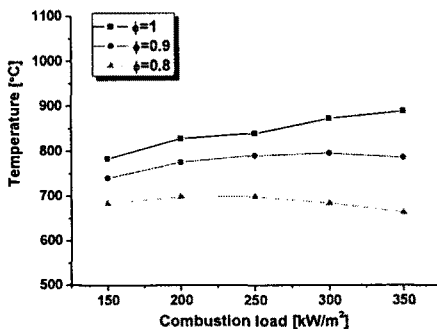


Fig. 6 Distribution of surface temperature for combustion load at Type B

하 증가에 따라, 온도가 증가하였으며, 연소 부하 150kW/m²에서 250kW/m²까지의 범위에서 855°C에서 1001°C로 상대적으로 급격한 증가율을 보이다가 250kW/m²부터 그 증가율이 감소하는 것을 볼 수 있고, Type B의 경우 표면 온도의 증가율이 완만하게 증가함을 볼 수 있다.

Type B의 경우 연소 부하 150kW/m²에서 790°C이며, 350kW/m²에서 950°C로 전 연소 부하 영역에서 온도의 증가율이 일정한 것을 볼 수 있다. Type A 및 Type B에서의 최고 온도차는 250kW/m²에서 나타났으며, Type A가 15% 정도 높은 것으로 나타났다. 실험이 이루어진 범위 내에서 동일한 당량비와 연소 부하에서 메탈 스크린을 장착한 경우가 장착하지 않은 경우보다 항상 표면 온도가 높았다.

이와 같은 결과가 나온 이유는 메탈 스크린의 영향으로 판단되며 버너 표면에서의 대류 및 복사 에 의해 메탈 스크린(metal screen)이 가열되고 가열된 메탈 스크린이 버너 표면 온도에 영향을 미치는 상호 작용에 의해 메탈 스크린이 없는 Type B의 경우 보다 상대적으로 높은 온도 분포를 나타내는 것으로 판단된다.

메탈 스크린을 장착하지 않은 Type B의 경우 다공물질을 이용한 열 재순환 화염으로 초과 엔탈피(excess enthalpy)연소가 이루어지는 반면 Type A의 경우 메탈 스크린을 장착함으로써 더 높은 연소 효율을 이룰 수 있다고 판단된다. 당량비가 0.9 및 0.8로 감소할수록 표면 온도는 감소하는 경향을 보였다. 이는 연소에 의해 생성된 열이 매트에 전달하는 열전달량보다 혼합기 유속의 증가로 인한 매트로부터의 열손실이 크기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 연소 부하 변화에 따른 복사 효율

본 실험에서는 연소 부하 변화에 따른 메탈 스크린이 있는 메탈 화이버 버너(Type A) 및 메탈 스크린이 없는 메탈 화이버 버너(Type B)에서의 복사 유속 및 복사 효율을 측정하였다.

실험조건으로는 Type A와 Type B 모두 당량비가 1.0일 때, 연소 부하를 150kW/m²부터 350kW/m²까지 50kW/m²씩 변화시켰다.

메탈 스크린이 있는 메탈 화이버 버너 및 메탈 스크린이 없는 메탈 화이버 버너에서의 연소 부하에 따른 복사 효율 분포를 나타내는 그래프를 Fig. 7에 나타내었다.

Type A의 경우 복사 효율은 연소 부하 150kW/m²에서 250kW/m²까지 증가하다가 250kW/m²부터 감소하는데 이는 연소 부하 150kW/m²에서 250kW/m²까지는 연소 부하 증가에 대한 복사 유속의 증가율이 연소부하 증가율보다 상대적으로 높기 때문이며, 250kW/m²이상의 연소부하 영역에서는 복

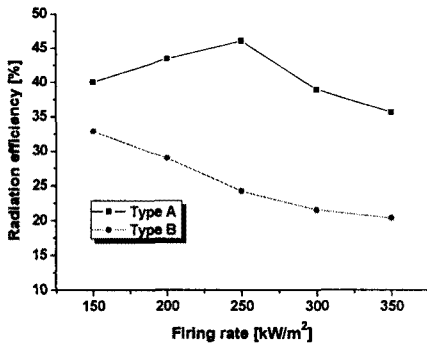


Fig. 7 Distribution of radiation efficiency for combustion load at Type A and Type B

사 유속의 증가율이 연소 부하 증가율보다 상대적으로 낮기 때문이다. Type A의 경우 버너와의 거리 100mm 지점에서 연소 부하 150kW/m²일 때 복사 효율 40%를 나타내며 연소 부하 250kW/m²에서 46%로 가장 높은 효율을 보이고, 350kW/m²에서 36%로 선형적으로 감소한다.

Type B의 경우 복사 효율은 연소 부하가 증가함에 따라 선형적으로 낮아지며 이는 전 연소 부하 영역에 걸쳐 복사 유속 증가율이 연소 부하 증가율보다 낮기 때문이다. Type B의 경우 복사 효율은 150kW/m²일 때 37.6%로 Type A와 큰 차이를 보이지 않으나, Type A와는 달리 350kW/m²으로 연소 부하가 증가함에 따라 25%까지 선형적으로 낮아진다.

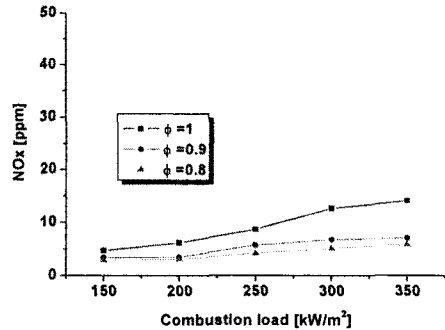
Type A 및 Type B의 복사 효율은 전 연소 부하 영역에 걸쳐 평균 9%정도 차이가 나며 Type A에서 높게 나타나고, 연소 부하 250kW/m²에서 최고 15%정도의 차이를 나타낸다.

4.3 배출 가스 특성

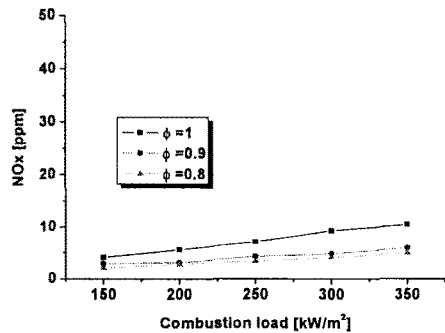
4.3.1 NOx 발생 특성

당량비 및 연소 부하에 따른 NOx 발생 결과를 Type A의 경우에는 Fig. 8 (a)에 나타내었고, Type B의 경우에는 Fig. 8 (b)에 나타내었다. NOx 측정치는 0% O₂ 상태로 표준화 하였다.

Fig. 9로부터 NOx는 연소 부하에 따라 증가하는 경향을 보이며, 당량비가 낮아지면 NOx의 발생이 감소함을 알 수 있다. 본 실험에서는 연소 부하 범위가 150kW/m²에서 350kW/m²으로 상대적으로 저 부하 연소 영역에 따른 표면 온도 110 0℃ 미만의 결과를 나타내며, 열적 NO의 생성이 억제되었다고 판단되며, 전 연소 부하 영역에서 20ppm 이하의 NOx발생 특성을 보인다.



(a) Type A



(b) Type B

Fig. 8 Distribution of NOx for combustion load at Type A and Type B

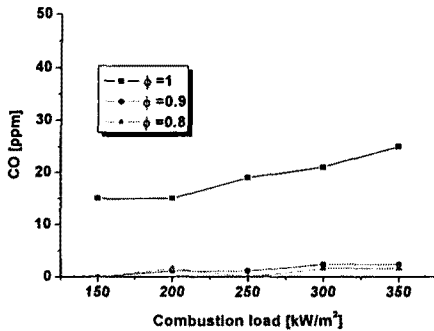
당량비의 증가에 따라 NOx의 발생은 적어지는데, 이는 당량비의 증가에 따라 유속의 상대적 증가로 인해 고온 영역에서의 체류시간이 짧아지기 때문에 온도 및 체류 시간에 영향을 받는 열적 NO의 생성이 억제되는 것으로 판단된다.

4.3.2 CO 발생 특성

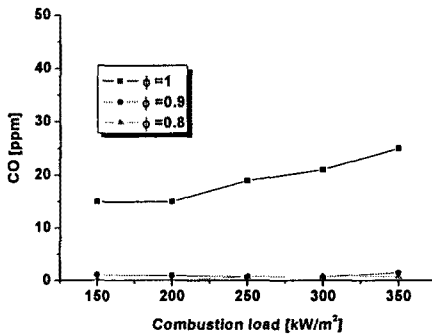
배출 가스 중의 CO 농도는 연소 효율과 밀접한 관계가 있으며, 일반적으로 연소기의 성능을 판단할 수 있는 기준이 될 수 있다.

당량비 및 연소 부하에 따른 CO 발생 결과를 Type A의 경우에는 Fig. 9 (a)에 나타내었으며, Type B의 경우에는 Fig. 9 (b)에 나타내었다.

당량비 0.9 및 0.8일 때 연소 부하에 따른 CO발생량이 거의 일정함을 보여준다. 즉 연소 부하가 증가하여도 연소 효율은 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 당량비 1.0에서 상대적으로 높은 CO 발생량을 보여주는데, 이는 순간적으로 공기 공급이 균일하지 않아 당량비가 1.0 이하인 과농 상태가 되기 때문인 것으로 판단된다.



(a) Type A



(b) Type B

Fig. 9 Distribution of CO for combustion load at Type A and Type B

당량비가 0.9 및 0.8일 때 CO 발생량이 약 10ppm 이하로, 이는 혼합기의 유속 증가로 인해 가스-공기의 혼합성능이 향상되고, 산화제인 O₂를 충분히 공급해줌으로 인해 완전연소에 가까워지기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 복사 버너로서의 메탈 화이버 버너에서의 연소 특성 및 복사 효율에 대하여 고찰하고, 메탈 스크린을 장착하지 않은 버너와 비교 분석을 하였다. 당량비 및 연소 부하 변화에 따른 메탈 화이버 버너의 표면 온도 특성 및 배출 가스 특성, 메탈 화이버 버너에서 연소 부하의 변화에 따른 복사 효율 특성을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복사 효율은 메탈 스크린이 있는 메탈 화이버 버너의 경우 연소 부하 증가에 따라 250kW/m²에서 약 46%로 효율이 높아지다가 350kW/m²에서 37%로 낮아지는 경향을 보였으며, 메탈 스크린이 없는 메탈 화이버의 경우 연소 부하 증가에 따라 복사 효율이 약 38%에서 26%로 선형적으로 감소하는 경향을 나타냈다.

(2) 본 실험의 범위 내에서 메탈 스크린의 영향으로, 메탈 스크린이 있는 메탈 화이버 버너의 경우 메탈 스크린이 없는 메탈 화이버 버너와 비교하여 표면 온도 분포에서 평균 9%정도 높게 나타났으며, 복사 효율은 평균 10%정도 높게 나타났다.

(3) 당량비 0.9 이상의 희박 연소시 CO 발생은 10ppm 이하로 유지하고 있으며, 전 연소 부하 영역에서 NO_x 발생량은 20ppm(0% O₂) 이하로 우수한 배출 특성을 보이는 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] Echigo, R., Effective Energy Conversion Method between Gas Enthalpy and Thermal Radiation and Application to Industrial Furnaces, Proceeding of the 7th International Heat transfer Conference, Hemisphere Publishing Corporation, Vol. 6. pp. 361~366, 1980.
- [2] Yoshizawa, Y. et al. Analytical Study of the Structure of Radiation Controlled Flame, Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 32, No. 2, pp. 311~319, 1988.
- [3] Shin, H. D. and Min, D. K., Laminar Premixed Flame Stabilized Inside a Honeycomb Ceramic, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 2, pp. 341~356, 1991.
- [4] Golombok, M. H. and Shirvill, L. C., Gas-Solid Heat Exchange in a Fibrous Metallic Material Measured By a Heat Regenerator Technique, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 33, No. 2. pp. 243~252, 1990.
- [5] Takeno, T. and Sato, K., An Excess Enthalpy Flame Theory, Combustion Science and Technology, Vol. 20, pp. 73~84, 1979.
- [6] Takeno, T. and Sato, K., A Theoretical Study on an Excess Enthalpy Flame, Eighteenth Symposium on Combustion, pp. 464~472, 1981.