

## 복사 버너의 연소특성에 관한 실험적 연구

위재혁\* · 이대래\*† · 김영수\*\* · 전충환\*\*\*

### An Experimental Study on Combustion Characteristics of Radiant Burner

Jae Hyug Wie\*, Dae Rae Lee\*†, Young Soo Kim\*\* and Chung Hwan Jeon\*\*\*

#### ABSTRACT

Energy efficient and low pollution combustion systems the use gaseous fuels have been in great demand in recent year. Radiant burner in many different forms are emerging as very desirable combustion systems for same reason. Porous radiant burners are used in drying, preheating and curing, and in other type of materials processing and manufacturing processes. However, little knowledge is available about the operating characteristics and the structure of flames in porous ceramic fiber radiant burners. The objective of the present work is to investigate the global performance characteristics of the ceramic fiber burner. A detailed study which includes the spectral intensity, gas temperature, radiation efficiency and global pollutant emissions. Another objective is to study the flame structure of the ceramic fiber burner by measuring the local gas temperature. The results indicate that ceramic fiber burner do offer a 19-44% gain in radiant efficiency. The ceramic fiber burner exhibit significant spectral intensity peaks in the band at 2.0-2.5 $\mu\text{m}$ . The local temperature distribution inside the mat and near the mat surface as a function of the equivalence ratio can be reasonably interpreted by the relation of the heat balance in the mat and movement of the reaction zone. Nox emission from ceramic fiber burner is less than 25ppm throughout the operating range.

**Key Words** : radiant burner, ceramic fiber, spectral intensity, radiation efficiency

#### 1. 서 론

세라믹 매트나 메탈 파이버등의 다공물질을 이용한 버너를 다공성 복사 버너라고 한다. 이런 복사버너는 크게 화염이 복사 튜브(radiant tube) 내부에 있어서 튜브의 표면에서 외부로 방사되는 간접화염(indirect-fired)버너와 화염이 개방되어 있는 직접화염(direct-fired)버너로 나눈다. 그리고 다시 직접화염 버너는 화염이 다공물질과 충돌하여 다공물질의 표면을 가열시키는 충돌(impingement)버너, 다공물질 기공의 크기가 소염길이보다 커서 각각의 기공에서 화염이 생기는 다중화염(multi-flame)버너, 기공이 소염 길이보

다 작아 다공물질의 내부에 단일화염이 생기는 내부화염(submerged-flame)버너와 다공물질의 표면에 단일화염이 생기는 표면화염(surface-flame)버너로 나눈다.[1] 이러한 단일화염은 평면화염의 형태로서 연소상태의 제어가 편리할 뿐만 아니라, 효과적인 복사열의 이용이 용이하여 현재 유리공정, 철강제련, 종이건조공정, 식품산업 등에 적용되어지고 있다. 이러한 복사버너는 다공성 세라믹 표면 혹은 내부에 예혼합 화염이 형성되어 1000 $^{\circ}\text{C}$  이상의 고온상태에서 연소되므로 세라믹 매트가 고온의 복사체가 된다. 따라서 고온의 세라믹 매트 표면으로부터의 고체 복사 열전달에 의해 주위로 열을 발산함에 따라 후류의 연소가스의 온도가 상대적으로 낮아지므로 생성속도가 온도에 매우 민감하게 달라지는 NOx의 생성 및 배출이 감소된다고 알려져 있다. 또한 고온의 다공성 세라믹 매트내에서 미연 혼합기의 예열효과가 향상되어 가연한계가 확장되

\* LG전자(주) DAC 연구소

\*\* LG전자(주) DAC 연구소

\*\*\* 부산대학교 기계공학과

† 연락처, ldr@lge.com

는 효과도 부수적으로 기대할 수 있다.[2]

Echigo et al.[3]는 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 회박가연한계를 당량비 0.1까지 낮추는데 성공하였다고 보고하고 있다.

Mital[4]는 그물 모양의 세라믹 버너의 성능특성에 대해 연구했다. 그는 작동범위, 복사효율, 배기가스의 온도 및 속도, 배기 배출물을 실험적으로 연구했다. 내부화염버너(submerged flame burner)가 표면화염버너보다 복사 효율이 20%~40%가량 더 높게 나왔다. 열용량(firing rate)을 고정시킬때 당량비를 증가시키면 효율이 증가하고, 당량비를 고정시킬때는 최대 효율이 나오는 적절한 열용량이 있다. 또한 당량비가 증가함에 따라 CO, NOx 그리고 탄화수소 배출물들은 증가한다. 여기서 NOx는 열용량이 증가함에 따라 증가하였지만 어떤 열용량에서는 CO와 HC가 감소한다. 화염구조 측정에서는 어떤 수준 이상의 열용량에서는 반응대가 상류쪽으로 이동하는 것을 관찰했다.

Williams et al.[5]는 Pyrocore 버너의 하류 표면 근방에서 메탄-공기 혼합기의 연소에 대해 연구했다. 여기에서 사용한 버너는 두께가 0.4cm 인 alumina-silicate ceramic fiber matrix를 사용했고, 열용량은 300kW/m<sup>2</sup>에서 450kW/m<sup>2</sup>까지이고, 당량비는 0.75에서 1.3까지의 범위에서 실험하였다. 복사효율과 표면 온도, 가스온도 그리고 배기 배출물을 측정하였다. 메탄은 다공성 물질 내부나 표면에서 산화되어지고 CO의 농도는 버너 표면에서 1mm 떨어진 지점에서 감소하고, 최대 복사 효율은 27%라고 말하고 있다.

Kawaguchi et al.[6]은 스테인리스 스틸 파이퍼 매트 버너에서 예혼합 연소를 연구했다. 버너가 복사모드가 되는 작동 조건에서 매트 표면 근처에서의 가스를 분석했다. 여기에서는 열방출로 인한 매트에서 하류지점에서 실질적인 연소반응이 일어나는 것을 알아냈다. 최대 복사효율은 24%이다.

Sathe et al. [7]는 다공성 복사표면버너의 성능에 대해 실험과 이론적으로 연구했다. 실험에서는 메탄과 공기를 예혼합하여 희박한 조건에서 화염이 그물모양의 12면체 Lithium Alminum Silicate(LAS) 세라믹 덩어리 내부에 형성되는지 확인했다. 세라믹 덩어리는 직경이 12.2cm, 두께가 5.1cm이며 공극의 크기는 4ppc(percent per centimeter)이다. 열용량은 300kW/m<sup>2</sup>에서 500kW/m<sup>2</sup>까지이다. 화염속도는 층류단열화염속도보다 크고 속도가 증가함에 따라 화염의 위치는 포러

스 층의 중심부분으로 이동한다. 화염의 온도는 단열화염처럼 당량비에 따른 변화가 크지 않다.

Min et al. [8]은 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 0.5이하의 희박 연소가 가능하다는 연구 결과를 발표하였다.

Kulkarni et al.[9]는 몇몇의 radiant surface burner에서의 배기배출물 특성에 관하여 실험적으로 연구했다. 가스 분석기를 사용하여 배기가스의 NO/NOx, CO, CO2 그리고 O2농도를 측정하였다. 당량비는 0.7-1.2, 열용량은 250kW/m<sup>2</sup>에서 650kW/m<sup>2</sup>까지의 범위에서 실험하였다. 당량비와 열용량의 증가에 따라 NOx emission은 증가했고, CO emission은 열용량의 증가에 따라 단조롭게 증가하지 않았다. 배기가스가 당량비에 변화에 따른 뚜렷한 변화를 발견하지는 못했다.

기존의 가스버너는 확산화염 메커니즘에 의한 외부불꽃이 형성되며 복사 및 열대류에 의하여 열에너지 전달의 이용하는 방식이며, 형상과 구조적 측면에서 열효율 증대와 CO 및 NOx 저감에 대한 기술은 이미 한계에 직면하고 있다. 이를 극복하기 위해서 예혼합 화염 형태의 열복사에 의한 열전달 메커니즘을 사용하는 버너에 대한 연구가 이루어지고 있다.

본 연구의 목적은 세라믹 매트를 이용한 표면화염버너의 연소특성을 파악하기 위해서 다양한 열용량에서 당량비의 변화에 따라 연소기 내부의 연소가스 온도분포와 세라믹 매트의 표면온도를 R-type 열전대를 사용하여 측정을 통하여 알아보고, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NOx를 가스 분석기를 사용하여 배기가스를 측정해서 얼마만큼 친 환경적인 연소시스템인지를 알아본다. 그리고 적외선 분광계(Infrared spectrometer) 사용하여 버너의 복사효율을 측정을 한다. 세라믹 매트를 사용한 표면화염버너에 대한 화염구조와 배기배출물의 특성과 친환경적인 가스버너를 개발하는데 기초 자료를 제시한다

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치 및 실험조건

본 연구에 사용된 다공성 세라믹 매트는 기공도(porosity)가 약 95%이다. 사용한 연료는 도시가스로 CH<sub>4</sub> 89.95%, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 6.32%, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 2.54%, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 1.09%, C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> 0.01%, N<sub>2</sub> 0.09%로 구성되어 있으며 고위발열량은 10,500 kcal/Nm<sup>3</sup>이다.

실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

본 연구에 사용된 복사버너는 크게 버너 하우스와 버너포트로 나누어지며 버너 하우스에서는 세라믹 매트에서 화염이 형성되어 배기되어지고 버너포트에는 버너 하우스에 예혼합기를 보다 균일하게 공급하기 분배장치(distribution manifold)를 장착하였다. 연료의 유량은  $N_2$ 로 조정이 되는 질량유량계(MFM; Millipore, FM-311V)를 사용하였으며 공기의 유량은 총류유량계(LFM; COSMO, DF2800)를 사용하여 당량비와 열용량을 조절하였고, 예혼합 챔버에서는 공기와 연료의 혼합이 보다 잘 이루어지게 하기 위해서 공기를 챔버의 접선 방향으로 공급하였으며, 예혼합 챔버 내에 하니콤(honeycomb)을 설치하여 예혼합기를 안정한 상태로 유지하였다. 그리고 외부로부터의 공기의 유입을 막기 위해 세라믹 강화유리를 사용하여 배기가스와 온도를 측정하였다.

## 2.2 적외선 분광 분석장치

적외선 분광 분석은 버너 매트 표면으로부터 25mm 높이에 특수 내열강화유리를 장착하여 Acton research corp의 적외선분광분석장치(IR spectrometer, Model SP-150)로 분광강도를 측정하였다. 분광 분석 실험장치는 크게 분광분석기(spectrometer), 제어부, 증폭부, PC로 나눌 수 있다. 분광 분석기는 단색화 장치(monochromator), IR 검출부, Chopper로 이루어져 있다. 단색화 장치는 적외선 영역의 빛을 파장별로 정확하고 예민하게 분리하는 장치로써 Grating은 300gr( $1.8^{\circ}5.0\mu m$ )와 1500gr( $0.5^{\circ}2.0\mu m$ )로 이루어져 있으며, IR 검출부는 IR 파장용 센서로 이루어져 있다. 제어부(controller)에서는 Chopper의 회전수를 100~150rpm으로 조절하고, Grating을 선택한다. 증폭부는 검출된 신호를 증폭, 변환하여 PC로 보내어진다. 측정지점은 버너로부터 0.4m 떨어진 지점에서 분광분석기를 60도 기울어 측정하였다.

## 2.3 평균온도측정

본 연구에서 연소기 내의 가스온도는 열전대에 의한 평균온도를 측정하였다. 열전대는 크게 두

Table 1. Experimental Conditions

Firing rate[kW/m <sup>2</sup> ]		95.12 ~ 285.35
Equivalence ratio		0.59 ~ 1.25
Temperature measurement point [mm]	vertical	-5 ~ 20
	horizontal	-60 60
Emission analysis		NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CO

개의 서로 다른 소선으로 연결되어 있는 감지부와 고온에 의한 감지부의 부식, 산화 등을 막기

위해 석영 유리관으로 구성되어 있는 보호관, 감지부를 외부의 측정기기에 연결하는 연결선으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 직경 76 $\mu m$  재질 Pt/Pt-Rh 13%의 R형 열전대를 사용하였다.[10] 연소기 내의 가스온도는 매트 중앙에서 매트 표면을 기준으로 상류, 하류방향으로 1mm씩 이동하면서 매트내부와 하류쪽의 온도를 측정하였으며, 매트 표면에서 하류방향으로 1, 5, 10, 15, 20mm 높이에서 매트 반경방향으로 10mm씩 이동하면서 온도를 측정하였다.

## 2.4 복사효율 측정

복사 효율은 복사버너의 중요한 성능 평가 기준 중의 하나이다. 복사 버너의 총 복사 출력은 세라믹 글라스에 입사된 복사열유속의 분포를 측정함으로써 얻어진다. 그림은 복사유속을 측정하기 위한 장치의 개략도이다. 특수 내열강화유리 표면의 온도를 측정하기 위해 적외선 카메라(IRCON; Model 100PHT)를 사용하였다. 복사효율은 ( $\eta_R$ )은 다음과 같이 정의하였다.[11]

$$\eta_R = \frac{\text{Radiant Flux}}{\text{Firing Rate}} \quad (1)$$

$$= \frac{\sigma(T_M^4 - T_G^4)}{\gamma_F \cdot \dot{m} \cdot HHV \left( \frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i} + \frac{1}{F_{ij}} + \frac{1 - \epsilon_j}{\epsilon_j} \right)}$$

여기서  $\epsilon$ 은 특수 내열강화 유리의 방사율(emissivity),  $\sigma$ 는 Stepan-Boltzman 상수,  $T_M$ 는 세라믹 매트 매트 표면의 절대온도,  $T_G$ 는 유리온도,  $\gamma_F$ 는 연료의 질량분율(mass fraction),  $\dot{m}$ 는 단위 면적당 연료와 공기의 질량유량[kg/m<sup>2</sup>-s], HHV는 연료의 고위발열량이다. 여기서는 열부하를 계산하기 위해 저위발열량(LHV) 대신 고위발열량(HHV)를 선택했다. 그 이유는 어떤 발열

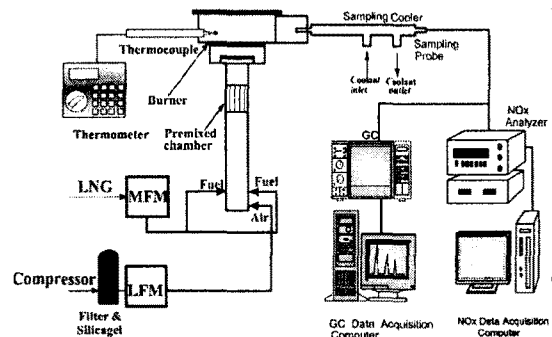


Fig. 1 schematic diagram of the experimental setup

량을 사용 했을때의 장단점이 명확하지 않기 때

문이다.

### 2.5 배기배출물 측정

배기가스 중의 NOx, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO 농도를 측정하기 위해서 HORIBA사의 COPA-2000(NOx : 0~100ppm, CO : 0~5%, CO<sub>2</sub> : 0~25%, O<sub>2</sub> : 0~25%)를 사용하였으며, CO<sub>2</sub>, CO 검출은 NDIR 방식, NOx는 CLA 방식 그리고 O<sub>2</sub>는 자기압력 방식의 센서(sensor)를 채택하여 배기가스 분석을 수행하였다. 배기배출물의 측정을 위하여 스테인레스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 막기 위해 샘플링 튜브 외측에 수냉식 2중관을 설치하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 스펙트럼 분석

Fig. 2는 열용량 285.35kW/m<sup>2</sup>에서 당량비의 변화에 따른 Glass로부터 투과되는 파장과 상대적인 분광 복사강도 그래프이다. 모든 열용량에서 당량비의 변화에 따른 분광강도 분포의 유형은 동일하고, 표면연소에 의한 복사 에너지는 대부분 가열된 표면으로부터 연속적 방사 스펙트럼에 의해 생성된다. 최대 분광강도가 나타나는 파장대는 2.0~2.5μm로 나타났다. 여기서 이론흘합기의 도시가스-공기 혼합기에 대한 단일화염온도는 2,439K이며, 분광강도가 최대로 나타나는 파장은 Wien의 변위법칙 (Wien's displacement law)를 사용하면 다음과 같다.

$$\lambda_{\max} = \frac{2897.8[\mu\text{m} \cdot \text{K}]}{T[\text{K}]} \approx 1.19\mu\text{m} \quad (2)$$

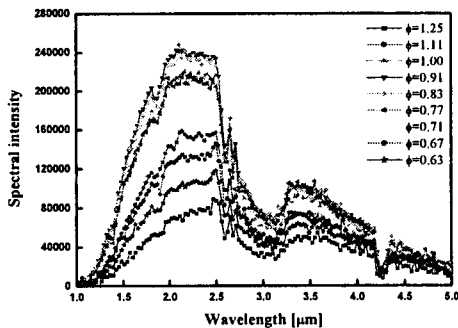


Fig.2 Variation of spectral intensity with wavelength at firing rate 285.35kW/m<sup>2</sup>

화염은 실제로는 단열이 아니기 때문에 실제 화염

온도는 2,439K보다 낮아야 하며 따라서 λ<sub>max</sub>은 1.19μm보다 더 커야한다.

그리고 분광강도는 당량비 0.83~0.91에서 가장 크게 나타났으며, 농후한 조건인 당량비가 1.25일 때가 가장 낮게 나타났고, 화염면이 매트(mat)표면에서 부상하는 당량비가 희박한 조건에서와 농후한 조건에서는 분광강도가 현저하게 떨어지고 있음을 알 수 있었다. 또한 열용량이 작아질수록 당량비의 변화에 따른 분광강도의 차이도 줄어드는 것을 알 수 있었다. 또한 모든 열용량에서 당량비 변화에 따라 분광강도는 2.5μm부터 감소하다가 2.7μm 부근에서 갑자기 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 화염에서 복사의 두 가지 근원에는 주로 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로부터 분자복사와 화염 내 그을음으로부터 흑체복사가 있다. 분자복사는 적외선 스펙트럼의 넓은 띠(band)에 집중되어 있다. Gore[12]등에 따르면 2.5μm~3μm에서 스펙트럼의 복사강도는 현저한 피크를 나타내고, 그 이유는 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로부터 분자복사에 해당된다. 본 실험에서도 2.7μm 부근에서의 스펙트럼의 복사강도가 피크를 나타내고 있는데 이것은 분자복사에 해당된다.

특수 내열강화유리의 특성에 의해 흡수된 복사 파장대의 복사에너지는 Glass 온도를 상승시키는 요인이 된다. 또한 Glass의 특성으로 인하여 파장이 2.5μm이상일때의 강도 분포는 Plank 분포 (Plank distribution)과 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 복사에너지는 곡선아래 면적으로써, 복사파장이 2.5μm이하영역에서 복사에너지가 큰 영역임을 알 수 있다.

Fig. 3은 당량비 0.83일때 열용량을 변화시키에 따른 분광강도를 나타낸 그래프이다. 열용량이 증가하면 분광강도도 증가하는 것을 볼 수 있고, 열용량을 감소시키면 최대 분광강도를 나타내는 파

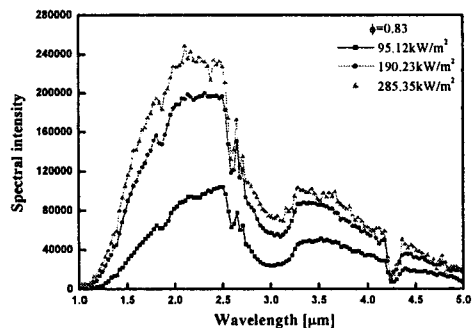


Fig.3 Variation of spectral intensity with wavelength for equivalence ratio 0.83 at various firing rates

장은 길어지는 것을 알 수 있었다. 이는 분광강도는 온도가 증가함에 따라 증가하고, 최대 강도를 나타내는 파장은 온도가 증가할수록 감소되기 때문이다.

### 3.2 연소기 내의 온도 분포

Fig. 4는 열용량  $285.35\text{ kW/m}^2$ 일때 다양한 당량비에 따른 매트 내부와 매트 표면에서 하류방향으로 1mm씩 증가하면서 측정한 가스온도 그래프이다. 각 당량비에 따른 최고온도는 당량비 0.59에서 0.71까지는 매트에서 하류쪽으로 2mm인 지점에서 나타났고, 당량비 0.77부터 0.9까지는 1mm지점에서 나타났으며 당량비 1.0부터 1.11까지는 매트표면에서 나타났다. 또한 당량비 0.91이상 일때는 미연혼합기의 온도가 600K이상으로 나타났다. 이것으로 당량비가 희박한 조건에서는 화염이 매트에서 부상하고 반대로 당량비가 농후한 조건에서는 화염이 매트표면에서 생성되는 것을 알 수 있다. 즉, 혼합기의 유속이 증가하면 반응대는 하류방향으로 이동하고, 혼합기의 유속이 감소하면 반응대는 상류방향으로 이동하는 것을 관찰하였다. Weinberg[13]에 의해서 미연 혼합기를 예열함으로써 연료 공기비가 희박하여 통상의 조건에서는 연소시킬 수 없는 초희박 혼합기를 안정하게 연소시킬 수 있음을 보고하였다. 이 방법 중 하나인 내부 열재순환법은 큰 열전도도를 갖는 다공성 블록(porous block)을 직접 화염대 내에 삽입시켜 화염대 내부구조를 변화시킴으로써 초과 엔탈피(excess enthalpy) 화염을 얻는 방법이다.

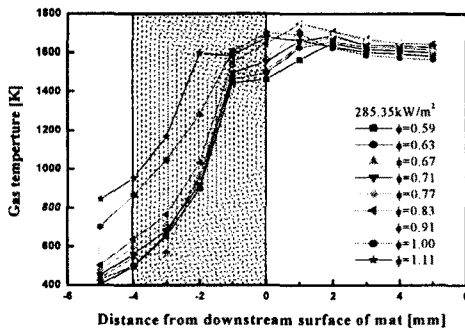


Fig.4 Gas temperature distribution inside the mat and downstream of the mat surface for various equivalence ratios at firing rate  $285.35\text{ kW/m}^2$

### 3.3 복사효율

Fig. 5은 다양한 열용량에서 당량비의 변화에 따른 세라믹 매트 버너의 복사효율을 나타낸 그래프이다. 복사효율은 25~58%로 메탈 매트 버너 [14]보다 우수한 것으로 나타났다. 복사출력은 R-type 열전대를 사용하여 세라믹 매트 매트 표면에 측정된 온도를 사용하여 구했다. 세라믹 매트 매트에서의 복사열전달은 상류방향과 하류방향으로 한다. 상류방향의 복사열유속은 버너의 실질적인 복사출력이 된다. 그리고 하류방향으로의 복사열유속은 매트내의 짧은 거리에서 미연가스를 예열시키는 작용을 한다. 당량비 0.83에서 최대 복사효율을 나타냈다. 당량비 0.83보다 희박해지면 복사효율은 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 희박한 조건에서는 화염온도가 낮아지고, 또한 혼합기 유속의 증가로 인하여 화염이 매트 표면에서 하류방향으로 부상하므로써 화염에서 매트로의 대류열전달이 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 당량비 0.83 이상인 경우에는 앞에서 말한 온도분포를 보면 미연혼합기의 온도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 당량비 1.0이상인 농후한 조건에서는 상류쪽으로 상대적으로 많은 에너지를 전달하기 때문에 하류방향의 복사 열전달이 감소하므로써 복사효율이 감소하는 것으로 사료된다. 또한 열용량이 증가함에 따라 복사효율은 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 열용량이 증가하면 혼합기 유속의 증가로 인하여 기연가스의 대류가 활발하게 이루어져서 배기단으로의 열손실이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.4 배기배출물

Fig. 5는 다양한 열용량에서 당량비의 변화에 따른 질소산화물( $\text{NO}_x$ ) 농도를 나타낸 그래프이다. 당량비와 열용량이 증가할수록  $\text{NO}_x$ 의 농도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 매트 표면 온도는 당량비 0.83까지 증가하다가 그 이후에는 감

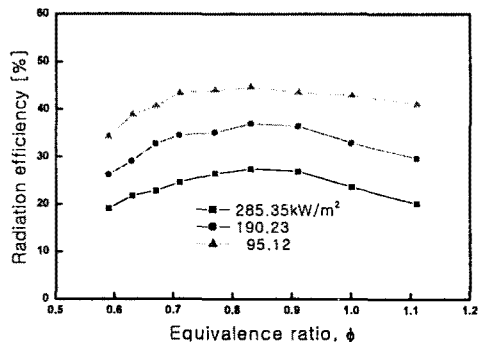


Fig.5 Radiation efficiency for various equivalence ratios at various firing rates

소하는 경향을 보이지만 온도에 민감하게 반응을 하는 NOx가 당량비 0.83이후에서 계속 증가하는 경향을 보이고 있다. 일반적인 분젠화염에서는 NOx는 이론당량비 근처에서 최대값을 가지는데 반해 세라믹 매트 버너는 NOx가 계속 증가하는 경향을 보인다. Glarborg et al.[15]에 따르면 연료가 농후한 화염에서 급속(prompt) NO 형성이 매우 중요하다. Miller와 Bowman[16]은 CH와 CH<sub>2</sub> 분자들 때문에 0.9 보다 큰 당량비에서 급속 NO가 중요하다고 말하고 있다. 본 세라믹 매트 버너에서도 열적(thermal) NO의 영향보다는 급속 NO의 영향이 큰 것으로 사료된다. 그리고 세라믹 매트 버너에서 열에너지의 보다 높은 손실은 가스 온도를 낮추는 결과를 가져오고 NOx를 더 적게 배출하게 할 것이다. 그러므로 버너의 복사성능을 증가시키므로써 NOx 배출물을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한 질소산화물의 농도는 25ppm 미만이며, 이러한 값은 상당히 우수한 배출특성이라고 할 수 있다. 최근의 가스 연소기구의 경향은 세계적으로 환경문제에 대한 관심의 고조에 맞추어 저공해형, 특히 저 NO형의 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 세라믹 매트 버너는 이러한 추세에 적합한 우수한 연소기가 될 수 있는 가능성이 있다고 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다공성 매체(porous medium)인

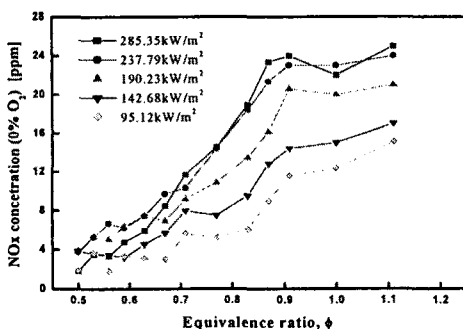


Fig.6 NOx concentration for various equivalence ratios at various firing rates

세라믹 매트 매트(ceramic fiber mat)를 사용한 예혼합 표면화염버너(Premixed surface flame burner)에 대하여 연료 및 공기유량, 당량비등의 변화에 따라 버너의 복사특성을 살펴보기 위해 스펙트럼 분석을 하였고, 화염구조를 살펴보기 위해 매트의 내부와 하류, 상류지역의 온도를 측정하였으며, 배기 배출물을 측정하였다. 이런 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 다양한 열용량에서 당량비 변화에 따라 최대 복사파장은 2.0~2.5 $\mu$ m였고 2.5 $\mu$ m이상의 장파장대는 유리로 흡수되어 유리의 온도를 상승시키는 요인이 되었다.

2) 열용량 285.35kW/m<sup>2</sup>에서 당량비가 증가할 수록 최고온도는 매트 표면에 가까워지고, 미연 혼합기는 400~800K까지 예열되는 것을 관찰하였다. 반응대는 혼합기의 유속이 증가하면 하류 방향으로 이동하는 것을 관찰하였다.

3) 세라믹 매트 표면화염버너의 복사효율은 19~44%로 우수한 특성을 보였다. 열용량을 증가시키면 복사효율이 감소하는 것을 관찰하였다. 이는 열용량이 증가함에 따라 혼합기 유속의 증가로 인한 대류의 영향이 커짐으로써 열손실의 증가로 인하여 복사효율이 감소되는 것으로 사료된다.

4) 배기 배출물 중 질소산화물의 농도는 29ppm 미만으로 상당히 우수한 특성을 나타내고 있으며, 이는 세라믹 매트가 열에너지를 방사, 흡수, 산란함으로써 화염온도가 감소되기 때문이다. 그리고 당량비가 증가함에 따라 질소산화물의 농도도 증가하는데 이는 탄화수소 활성화가 분자 상태의 질소와 반응에 의한 급속(prompt) NO 형성에 기인한 것으로 사료된다.

5) 본 실험을 통해 세라믹 매트 표면화염버너는 온도, 효율, 배기 배출물등을 고려해 볼때 각각의 열용량에서 당량비 0.83일때 가장 우수한 특성을 가지는 것으로 판단된다. 그리고 복사효율을 증가시키면 질소산화물의 농도도 감소할 것으로 사료되며 차후 복사효율을 증가시키기 위해 다양한 다공성 매체에 대한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] Leonardi, S. A., "Partially-Premixed Combustion in Porous Radiant Burner," Ph.D These, Purdue University, 2000.
- [2] Kulkarni, M. R., "Radiant Surface Burner Performance: A Numerical and Experimental Study," Ph.D Theses, Arizona State University, 1996.

- [3] Echigo, R., Yochizawa, Y., Hanamura, K., and Tomimura, T. "Analytical and Experimental Studies on Radiative Propagation in Porous Media with Internal Heat Generation," Proceedings, 8th International Heat Transfer Conference, Vol. 2, 1986, pp. 827-832
- [4] Mital, R., "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., 1996
- [5] Williams, A., Wooley, R. and Lawes, M., "The Formation of NO<sub>x</sub> in surface Burners," Combustion and flame, Vol. 89, 1992, pp.157-166.
- [6] Kawaguchi, O., Otoh, T., Nakamura, S., Todoroki, A. and Murayama, Y., "Premixed Combustion in a Fiber Mat," Twenty-Third Symposium (international) on combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1990, pp.1019-1024.
- [7] Sathe, S. B., Kulkarni, M. R., Peck, R. E. and Tong, T. W., "An Experimental and Theoretical Study of Porous Radiant Burner Performance," Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1990, pp. 1011-1018
- [8] Min, D. K. and Shin. H. D., "Lamina Premixed flame Stabilized inside a Honeycomb Ceramic," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, no. 2, 1991, pp. 341-356
- [9] Kulkarni, M. R., Chavali, K. P. and Peck, R. E., "Emission Characteristics of Radiant Surface Burners," Proceedings of the Western States Section of the Combustion Institute, October 12-13, 1992.
- [10] Mital, R., Gore, J. P., Viskanta., R. and McIntosh, A. C., 1998, Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 3163-3171
- [11] Rumminger, M.D., "Numerical and Experimental Investigation of Heat Transfer and Pollutant Formation in Porous Direct Fired Radiation Burners," Ph.D These, University of California-Berkeley, 1996.
- [12] Gore, J. P., and Faeth, G. M., "Structure and Spectral Radiation Properties of Turbulent Ethylene/Air Diffusion Flames," Twenty-First Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1986, pp.1521
- [13] Weinberg, F. J., "The first Half-Million Year of combustion Research and Today's Burning Problems", Fifteenth Symposium (international) on combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1974, pp. 1-17
- [14] Kawaguchi, O., Otoh, T., S., Todoroki, A. and Murayama, Y., "Premixed combustion in a fiber Mat," Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The combustion Institute, Pittsburgh, 1990, pp. 019-1024
- [15] Glarborg, P., Miller, J. A., and Kee, R.J., "Kinetic Modeling and Sensitivity Analysis of Nitrogen Oxide Formation in Well-Stirred Reactors," Combust & Flame, Vol. 65, 1986, pp. 177-202
- [16] Miller, J.A. and Bowman, C.T., "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," Prog. in energy of Combustion. Sc, Vol. 15, 1989, pp. 287-338
- [17] Turns, S. E. "An introduction to Combustion", McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, McGraw-Hill, York, 1996.