

# 메탈 화이버 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. Radiation efficiency is one of the 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

$\eta$	Radiation efficiency	LHV	Lower heating value of LPG, 84,507 kJ/kg
$\phi$	Equivalence ratio	$Q_{rad}$	Radiative heat flux of burner
$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant	$Q_{chem}$	Total heating value of fuel
$\epsilon$	Emissivity, 0.71	$m_{fuel}$	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 연소장치로서 다공성 재료를 이용한 장치가 제안되고 있다[1,2]. 이 연소기는 다공성 재료를 통하여 유입되는 연료-공기 예혼합 가스가 반응 영역을 통과하면서 연소되고, 연소열의 일부는 높은 열 축열률을 갖는 다공체에 축적되어 고에너지 환경에서 연속 연소 및 완전연소를 이룰 수 있다.

다공체로서 세라믹 폼, 세라믹 섬유 등을 많이 사용해 왔으나[3], 최근에는 일정한 압력으로 적층한 고온 내열 메탈 화이버(metal fiber)를 이용하여[4] 그 표면으로부터 발생되는 강력하고 균일한 고체 복사 에너지(연소가스 엔탈피의 약 35

\* 국민대학교 기계공학과 대학원  
 \*\* 국민대학교 기계자동차공학부  
 † 연락처, d.shin@kookmin.ac.kr

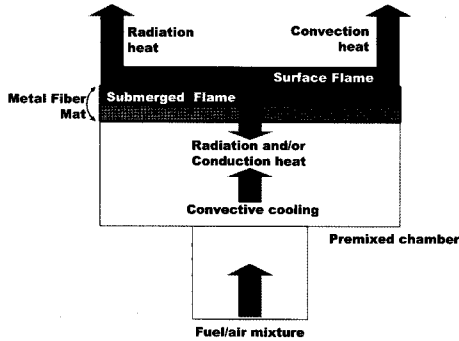


Fig. 1 Technology of surface combustion

%)와 고온 연소 가스의 대류 가열 효과를 동시에 이용하고자 하는 방법이 널리 이용되고 있다. 메탈 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

Figure 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.

일반적으로 다공성 매질을 이용한 연소기에서의 연소 형식은 다음과 같이 2가지로 나타난다 [3,4].

(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 부

Table 1 Characteristics of metal fiber mat and Metal Screen

Metal Fiber Mat	
Face density	3 kg/m <sup>2</sup>
Mat thickness	2.2 mm
Mean pore size	85 μm
Fiber diameter	50~60 μm
Porosity	81 %
Metal Screen	
Overall size	120 mm×180 mm
Wire diameter	2 mm
Wire distance	5 mm

상하며 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 매카니즘을 이해할 필요가 있다. 이에 관한 이론적 해석은 이미 여러 연구자들에 의해서 수행된 바 있다[1,2,5,6].

## 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.

연소용 공기는 F.D fan을 통해 예혼합실로 유입되며 프로판과 혼합 후에 버너 표면으로 균일하게 유입된다.

연소는 Fig. 3에 나타난 180 × 120 mm의 소결 매트에서 이루어지며 Type A의 경우 매트 앞부분에 복사 효율을 증대시키기 위한 메탈 스크린(metal screen)이 12 mm 전방에 장착되어 있다.

본 연구에서 사용된 표면 연소용 메탈 화이버 매트는 고 내열성 금속 섬유로 만들어진 다공성이 우수한 소결체로서 Table 1에 그 특성이 나

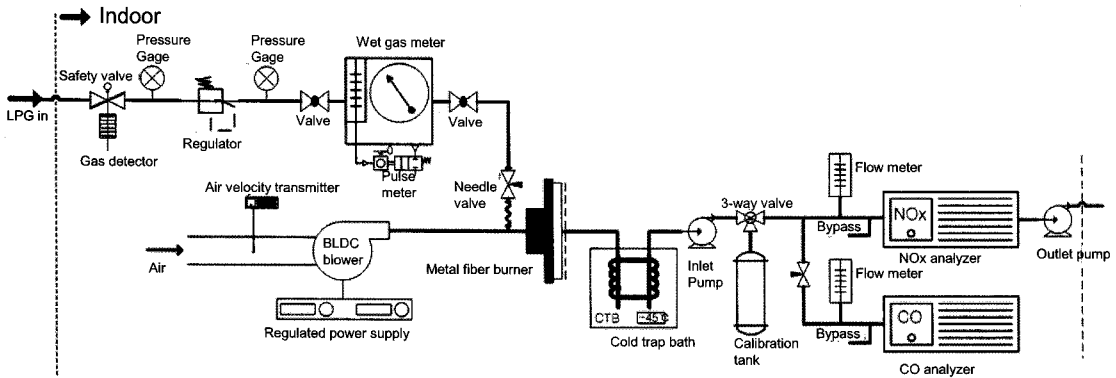


Fig. 2 Schematic diagram of combustion experimental apparatus

타나 있다. 메탈 화이버 소결 매트(metal fiber sintered mat) 및 메탈 스크린(metal screen)은 국내 (주)Fibertech의 제품으로서 소재는 1,000℃ 이상의 고온에서도 탁월한 내 산화성을 갖는 견고한 Fecralloy이며, 메탈 화이버 소결매트는 50에서 60 μm 정도의 메탈 파이버를 적층한 형태로 되어 있다.

3.2 계측 장치

3.2.1 표면 온도 측정

연소 부하 및 당량비에 따른 메탈 화이버 버너 매트 표면 온도를 측정하기 위해서 비접촉식 적외선 온도계(Raytek, Raynger3i series)를 사용하

였으며, 버너 표면의 20점에서 온도를 취득해 그 평균 온도로서 표면온도를 측정하였다.

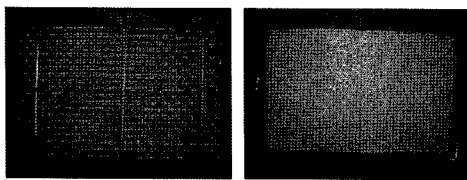
3.2.2 복사 효율 측정

메탈 화이버 버너에서 방사되는 복사 유속을 측정하기 위한 장치로서 복사 유속을 측정하기 위해 Fig. 4에 나타난 바와 같이 버너 표면으로부터 100 mm 지점에 버너와 평행하게 100 mm 간격으로 1400 mm × 1200 mm 격자망을 설치하고 수냉식 복사 유속계(water cooled radiant flux sensor)를 사용하여 각 격자점에서 복사 유속을 측정하였다.

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

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

복사 효율은 총 에너지 입력에 대한 복사 에너지 출력의 비로써 식 (2)와 같이 계산된다. LPG의 LHV는 주 성분인 Propane의 발열량인 84507 kJ/kg으로 설정하였다.



(a) Type A (b) Type B  
Fig. 3 Two types of burners

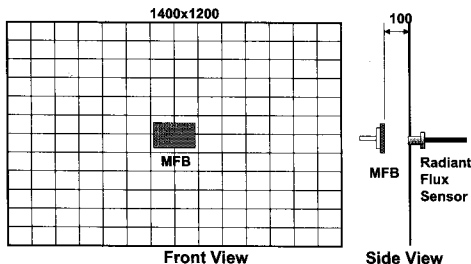


Fig. 4 Radiative heat flux measurement grid

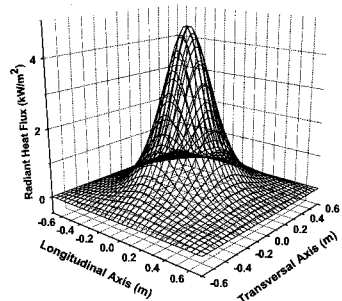


Fig. 5 Contours of radiative heat flux

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

### 3.2.3 배출 가스 농도 측정

배출 가스의 NO<sub>x</sub>, CO 및 O<sub>2</sub> 농도를 측정하기 위한 장치로서 Fig. 2에 그 개략도를 나타내었다. 전기 화학 방식의 가스 분석기 Sensonic-5000 (Duracz Industrieelektronik)과 NO<sub>x</sub> analyzer (Thermo Environment Instrument)를 사용하였고, 전처리 장치인 CTB(cold trap bath)를 사용하여 샘플 가스의 수분을 제거하였다. 각 화학종의 농도는 버너표면을 상향으로 설치하고, 버너 표면 중앙에서 5 cm 떨어진 거리에서의 값을 취하였다.

### 3.3 실험 방법

본 실험에는 당량비 및 연소 부하에 따른 메탈 화이버 복사 버너의 메탈 스크린(metal screen)의 영향을 관찰하기 위하여 메탈 스크린이 있는 메탈 화이버 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 150 kW/m<sup>2</sup>부터 350 kW/m<sup>2</sup>까지 50 kW/m<sup>2</sup>씩 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 연료는 습식 가스 미터에 펄스 미터를 장착하여 순간 유량 및 적산 유량을 측정하였다. 연료량 조절은 배관 끝단에 니들 밸브로 조절하였다.

공기량 조절은 BLDC (brushless direct current) 블로어를 가변 전압계(regulated power supply)와 연결하여 블로어의 회전속도를 조절함으로써 공기량을 조절하고, 블로어 앞단에 열선 풍속계(air velocity transmitter)로 공기량을 측정하여 당량비를 조절하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 메탈 화이버 버너의 표면 온도 특성

본 실험에서는 메탈 화이버 버너 매트 의 온도를 측정하여 연소 부하와의 관계를 알아보았다. Table 2는 높은 평균온도를 보이는 당량비 1, 연부하 250 kW/m<sup>2</sup>의 조건에서 버너 표면 온도측정 한 예를 보여준다. 최소값과 최대값은 53℃ 정도의 차이를 보이고 있어서 거의 균일한 온도로 판단된다. Fig. 6는 메탈 스크린이 있는 메탈 화이버 버너(Type A)의 경우 연소 부하 및 당량비에 따른 표면 온도를 나타낸 그래프이고, Fig. 7은 메탈 스크린이 없는 메탈 화이버 버너(Type B)에 대하여 연소 부하 및 당량비에 따른 표면 온도를 나타낸 그래프이다. Type A의 경우 당

Table 2 Measured temperatures on the mat surface

		x (mm)				
		18	54	90	126	162
y (mm)	15	973	1009	1005	1010	968
	45	992	1020	1023	1024	1008
	75	971	1005	1024	1011	1000
	105	969	1001	1011	1008	985

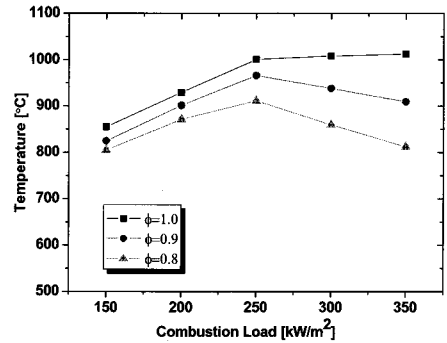


Fig. 6 Distribution of surface temperature for combustion load at Type A

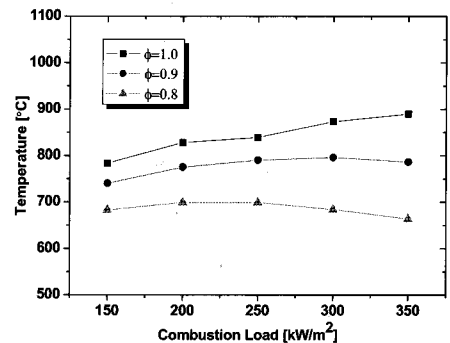


Fig. 7 Distribution of surface temperature for combustion load at Type B

량비 1에서 연소 부하 증가에 따라, 온도가 증가하였는데, 연소 부하 150 kW/m<sup>2</sup>에서 250 kW/m<sup>2</sup>까지 범위에서는 855℃ 에서 1001℃ 로 상대적으로 급격한 증가율을 보이다가 250 kW/m<sup>2</sup>부터 그 증가율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 한편, 당량비가 0.9 및 0.8인 경우 연소 부하 250 kW/m<sup>2</sup>를 정점으로 연소 부하가 증가하거나 감소하게 되면 온도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 당량비 감소에 따른 단일 화염온도 감소 및 예혼합기 유

량 증가에 따른 대류 열손실이 크기 때문인 것으로 판단된다.

Type A에 비하면 Type B의 경우는 연소부하에 따른 온도변화가 심각하지 않은 것으로 나타났다. 당량비 1일 경우에는 연소 부하가 증가함에 따라 버너 표면 온도가 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며 당량비 0.9인 경우에는 연소 부하 300 kW/m<sup>2</sup>에서 최고 온도를 보였다. 당량비 0.8의 경우에는 200~250 kW/m<sup>2</sup> 범위에서 최고 온도를 보였다.

실험이 이루어진 범위 내에서 동일한 당량비와 연소 부하에서 메탈 스크린을 장착한 경우가 장착하지 않은 경우보다 항상 표면 온도가 높았으며 Type A 및 Type B에서의 최고 온도차는 250 kW/m<sup>2</sup>에서 나타났다. 평균적으로 Type A의 표면온도가 Type B보다 15 % 정도 높은 것으로 나타났다.

이 결과는 Type A에 설치된 메탈 스크린이 연소 가스가 가지고 나가는 현열을 흡수하고, 버너 표면에 에너지를 역으로 전달하는 상호작용에 의해 연소반응을 촉진시키기 때문이다.

#### 4.2 연소 부하 변화에 따른 복사 효율

본 실험에서는 메탈 스크린이 있는 메탈 화이버 버너(Type A) 및 메탈 스크린이 없는 메탈 화이버 버너(Type B)의 당량비 1인 조건에서 연소 부하 변화에 따른 복사 유속을 측정하였으며, 연소 부하별 복사 효율을 Fig. 8에 나타내었다.

Type A의 경우 복사 효율은 연소 부하 150 kW/m<sup>2</sup>에서 250 kW/m<sup>2</sup>까지 증가하다가 250 kW/m<sup>2</sup>부터 감소하는데 이는 연소 부하 150 kW/m<sup>2</sup>에서 250 kW/m<sup>2</sup>까지는 연소 부하 증가에 대한 복사 유속의 증가율이 연소부하 증가율보다 상대적으로 높기 때문이며, 250 kW/m<sup>2</sup>이상의 연소부하 영역에서는 복사 유속의 증가율이 연소 부하 증가율보다 상대적으로 낮기 때문이다.

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 150 kW/m<sup>2</sup>일 때 37.6 %로 Type A와 근접한 값을 보이나, 연소 부하가 증가함에 따라 350 kW/m<sup>2</sup>에서는 25 %까지 선형적으로 낮아진다.

Type A 및 Type B의 복사 효율은 전 연소 부하 영역에서 평균 9 %정도 차이가 나며, 연소 부하 250 kW/m<sup>2</sup>에서 최대 15 %의 차이를 나타낸다.

#### 4.3 배출 가스 특성

##### 4.3.1 NOx 발생 특성

당량비 및 연소 부하에 따른 NOx 발생 결과

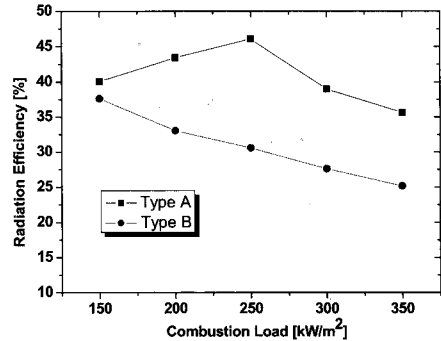
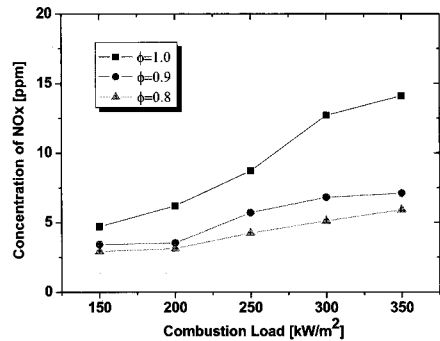
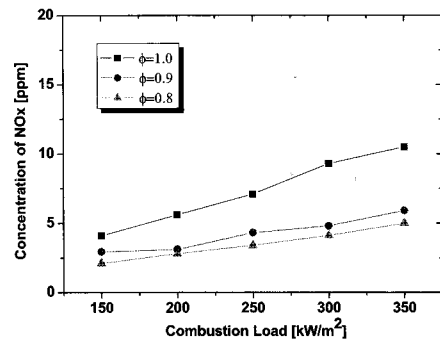


Fig. 8 Distribution of radiation efficiency for combustion load at Type A and Type B



(a) Type A



(b) Type B

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

를 Fig. 9에 나타내었다. NO<sub>x</sub> 측정치는 0 % O<sub>2</sub> 상태로 표준화 하였다.

NO<sub>x</sub>는 연소 부하에 따라 증가하는 경향을 보이며, 당량비가 낮아지면 NO<sub>x</sub>의 발생이 감소함을 알 수 있다. 전 연소 부하 영역에서 20 ppm 이하의 NO<sub>x</sub> 발생 특성을 보이는데 이는 연소 온도가 1100°C 이하에서 유지되어 열적 NO<sub>x</sub>의 생성이 억제되었기 때문이다.

당량비의 감소에 따라 NO<sub>x</sub>의 발생이 감소하는데, 이는 당량비의 감소에 따라 공기 유량의 상대적 증가로 인해 온도의 저하 및 고온 영역에서의 체류시간이 짧아지는 영향으로 열적 NO<sub>x</sub>의 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 된다.

당량비 및 연소 부하에 따른 CO 발생 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 당량비가 0.9 및 0.8일 때 CO 발생량이 약 10 ppm 이하로, 이는 혼합기의 유속 증가로 인해 가스-공기의 혼합성능이 향상되고, 산화제인 O<sub>2</sub>를 충분히 공급해줌으로 완전 연소에 가까워지기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 연소 부하에 따른 CO 발생량이 거의 일정하게 나타나, 연소 부하가 증가하여도 연소 효율은 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 당량비 1.0에서 상대적으로 높은 CO 발생량을 보여주는데, 산소 부족으로 인해 발생하지만 25 ppm 이하로 유지되는 것은 연소 효율이 높음을 나타낸다.

## 5. 결론

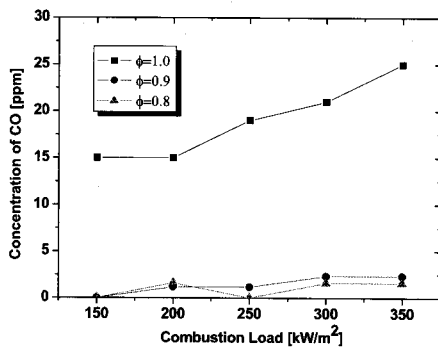
본 연구에서는 복사 버너로서의 메탈 화이버 버너의 연소 특성 및 복사 효율에 대하여 고찰하고, 메탈 스크린의 장착 효과에 대해 비교 분석을 수행하였다. 당량비 및 연소 부하 변화에 따른 버너의 표면 온도 특성 및 배출 가스 특성, 연소 부하의 변화에 따른 복사 효율 특성을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 메탈 스크린이 있는 경우 연소 부하 250 kW/m<sup>2</sup>까지는 연소 부하가 증가함에 따라 버너 표면 온도가 선형적으로 증가하였으며, 당량비가 줄어들수록 온도는 낮게 나타났다. 연소 부하가 250 kW/m<sup>2</sup>에서는 버너 표면 온도 증가율이 둔화되었고 당량비가 0.9 및 0.8인 경우 오히려 온도가 저하되는 것은 당량비 감소에 따른 단일 화염 온도 감소 및 예혼합기 유량 증가에 따른 대류 열손실이 크기 때문인 것으로 판단된다.

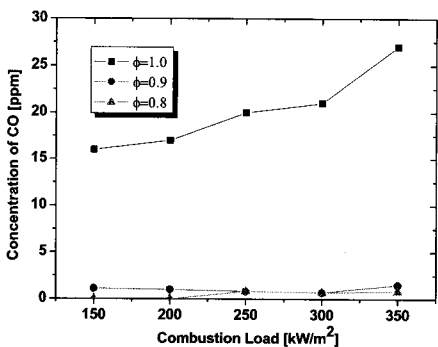
메탈 스크린이 없는 경우, 연소 부하별 버너 표면 온도는 비교적 변화가 적게 나타났다. 당량비가 1인 경우 연소 부하가 증가함에 따라 버너 표면 온도는 다소 증가하는 경향이 있지만 당량비가 줄어들수록 버너 온도는 낮아지고, 연소 부하 증가에 따라 온도 상승폭이 줄어들거나 오히려 감소하는 것은 메탈 스크린이 있는 경우와 같은 원리로 나타나는 현상이다.

(2) 복사 열유속 측정 결과는 메탈 스크린이 있는 경우가 없는 경우에 비해 월등히 높은 것으로 나타났다. 메탈 스크린이 없는 경우, 연소 부하가 증가할수록 복사 효율이 감소하는 것은 연소 부하 대비 온도 상승이 미미하기 때문이다. 메탈 스크린이 있는 경우는 250 kW/m<sup>2</sup>의 지점에서 최고 복사 열효율을 보였다.

(3) CO 및 NO<sub>x</sub>는 모든 경우에 대해 낮게 나타



(a) Type A



(b) Type B

Fig. 10 Distribution of CO for combustion load at Type A and Type B

나 메탈 화이버 버너의 연소 특성이 타 연소기기에 비해 우수한 것을 알 수 있다. 메탈 스크린이 있는 경우는 버너의 온도가 높은 영향으로 NOx 생성량이 다소 높게 나타났다. 당량비가 감소할수록 NOx 및 CO의 농도는 낮아지는 것을 확인하였다.

### 참고문헌

[1] R. Echigo, "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. 1980, pp. 361-366.  
 [2] Y. Yoshizawa, *et al.* "Analytical Study of the Structure of Radiation Controlled Flame," Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 32, No. 2, 1988, pp. 311-319.

[3] H. D. Shin and D. K. Min, "Laminar Premixed Flame Stabilized Inside a Honeycomb Ceramic," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 2, 1991, pp. 341-356.  
 [4] M. H. Golombok and L. C. Shirvill, "Gas-Solid Heat Exchange in a Fibrous Merallic Material Measured By a Heat Regenerator Technique," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 33, No. 2, 1990, pp. 243-252.  
 [5] T. Takeno and K. Sato, "An Excess Enthalpy Flame Theory," Combustion Science and Technology, Vol. 20, 1979, pp. 73-84.  
 [6] T. Takeno and K. A. Sato, "Theoretical Study on an Excess Enthalpy Flame," Eighteenth Symposium on Combustion, 1981, pp. 464-472.