

# 다공세라믹 버너를 이용한 표면화염의 연소 및 배기특성

황상순\*

## Combustion and Emission Characteristics of the Surface Flames in Porous Ceramic Burner

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 decrease of equivalence ratio. And each flame is maintained very stably and shows the same flame characteristics at any orientation of ceramic burner. Particularly the blue surface flame was found to be very stable at very lean equivalence ratio at 200 to 800 kw/m<sup>2</sup> firing rates. And the exhausted NO<sub>x</sub> was analysed to find out which flame has lower NO<sub>x</sub> emission. The blue surface flame showed the lowest NO<sub>x</sub> emission regardless of the location of burner since it sustained very stable at lean mixture ratio.

**Key Words** : porous ceramic, green, red radiant, blue surface flame, NO<sub>x</sub>, lift-off, condensing boiler.

### 1. 서 론

세라믹 타일이나 메탈 파이버(metal-fiber) 등의 다공물질용 버너에 의하여 형성되는 화염의 종류에는 크게 두가지로 나눌 수 있다[1]. 첫째로 다공물질의 기공이 크기가 소염길이보다 커 기공에서 각각의 화염이 형성되어 여러 개의 화염이 형성되는 다중화염 형태와 또 하나는 기공이 소염길이 보다 작아 화염이 다공물질의 표면이나 내부에서 형성되는 평면화염형태의 화염면이 하나인 단일 화염으로 이루어진다.

다중화염형태는 일종의 예혼합 분철회염형태로 여러개의 분철회염의 조합으로 생각할 수 있다. 다공물질에 의하여 형성되는 단일화염형태는 주로 예혼합화염형태로 Fig.1에서 보는 바와 같이 이를 다시 표면화염(surface-flame)와 내부화염(submerged-flame)로 나눌 수 있다. 이러한 단일 화염은 평면화염의 형태로서 버너의 위치에 크게 상관없이 안정된 화염을 유지하고 단위 면적 당 높은 열부하 및 균일한 온도분포특성을 가지고

있고 특히 복사 모드에 의한 고효율 열전달 특성은 철강제련, 유리공정 등에 적용이 검토되고 있다. 단일 화염중에 내부화염은 통상 초과엔탈피 화염으로 불리워 지는데 이 화염은 Weinberg[2]에 의하여 개념이 제안된후 이 화염의 특성인 초단열 화염속도(super adiabatic flame velocity)의 존재 및 가연한계의 확장 그리고 저용량연료의 가연성 확대라는 장점에 의하여 많은 연구자에 의하여 연구가 되어 왔다[3-5]. 특히 다공물질의 복사 및 열적특성에 따른 연소특성 및 공연비에 따른 화염거동에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서 다루려는 표면화염은 내부화염과는 달리 화염이 다공물질의 표면에 형성되는 것으로 열유속이 450 kW/m<sup>2</sup>이하의 경우 표면전체에서 발광하는 복사모드형태가 존재하고 혼합기의 유속이 빨라질수록 화염이 다공물질 표면을 떨어져 나가 청염화염(blue flame)형태로 존재하는 특성을 보이는 것으로 알려져 있다[6-7]. Williams et al[8]은 환형형태의 세라믹 파이버를 이용하여 복사모드에서 표면화염의 NO<sub>x</sub>배출 특성을 조사하여 300 kW/m<sup>2</sup> 이하의 복사모드에서 Prompt NO<sub>x</sub>형성기구가 중요함을 연구하였고

\* 인천대학교 기계공학과

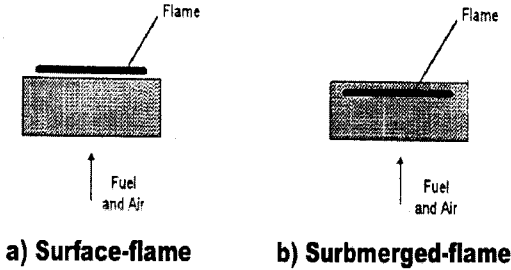


Fig.1 단일평면화염 형태구분

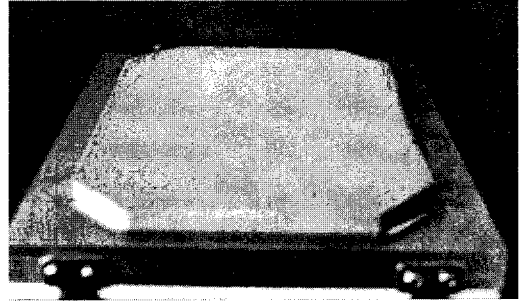


Fig.2 다공세라믹 타일 장착도

Kendall[9]은 다단계 화학반응식을 이용한 수치 계산에서 복사모드에서의 표면화염의 특성을 조사하였다. 이와같이 이제까지의 연구는 주로 표면화염에서 복사모드에 대한 실험 및 수치해석 연구에 집중되어 왔다[10-12]. 이러한 표면화염 중 청염화염은 평면화염으로서 단위면적당 높은 열유속을 나타내고 또한 위치에 상관없이 화염을 안정되게 유지할 수 있고 복사모드에서의 열적 내구성문제를 피할 수 있어 열효율향상과 저공해 특성을 가진 버너의 화염형태로 많은 주목을 받고 있다. 특히 하향식 연소방식은 고효율 저공해 보일러로서 개발되고 있는 응축 열교환기에서 생겨나는 응축수로 인한 백화현상을 방지 할 수 있고 또한 타 연소방식에 비해서 열분포가 균일하여 열교환기의 위치를 연소기에서 훨씬 더 가깝게 설치할 수 있어 보일러의 소형화를 가능하게 하는 잇점을 가지고 있다.

실제 이러한 표면화염은 열용량 및 공기연료비에 따라 복사 모드에서 청염화염형태로의 천이가 일어나고 이에 따라 화염 거동 및 배기 특성이 달라지는 등 전반적인 표면 화염 현상에 대한 보다 기본적인 연구가 요청되고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 세라믹 다공물질을 이용하여 열용량 및 공연비에 따른 표면화염의 연소 모드 변화 및 배기특성, 아울러 상향식, 하향식, 측향식과 같이 버너위치 변경에 따른 표면화염의 안정성을 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 쓰인 다공성 세라믹은 Fig.2에 보는 바와 같이 188mm×138mm×22.65mm (Length×Width×Thickness)의 크기이며 기공이 65ppi (pore per inch, Pore 크기 300 $\mu$ m)이므로서 기공도가 약 80%인 High-Tech사 제품을 사용하였다.

세라믹의 재질은 Cordierite이며, 표면에는 열방사율을 높이기 위해 실리콘 카바이드가 코팅되어 있고 다공 세라믹의 밀도는 0.45 g/cm<sup>3</sup>, 열팽창율은 1.2 10<sup>-6</sup>/°C이다.

사용한 연료는 도시가스로서 그 대표조성은 CH<sub>4</sub> 89.3%, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 1.5%, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 8.6%, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 0.6%로 구성되어 있고 고위발열량은 10,500 kcal/Nm<sup>3</sup>이다.

실험장치의 개략도는 Fig.3에 나타나 있는 데 연료의 유량은 N<sub>2</sub> 로 조정이 된 MKS 사의 질량 유량계(MFC 1559a-100L)를 사용하였으며 공기의 유량은 Rotameter를 사용하여 공연비 및 열용량을 조절하였다. 배기가스측정은 NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 측정이 가능한 ECOM-A 배기가스 분석 장치를 사용하였으며, 배기가스 측정단자의 직경은 4mm이며 측정단자 끝부분에 장착된 B형 열전대를 사용하여 기연가스의 온도를 측정하였다.

세라믹 버너에 의한 연소특성을 파악하기 위하여 비디오 카메라로 공연비, 열부하 그리고 버너 위치에 따른 화염의 거동을 촬영하여 각 조건에 따른 화염의 종류를 기록하였다.

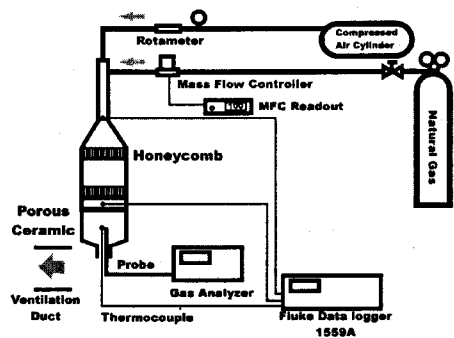


Fig.3 실험장치 개략도

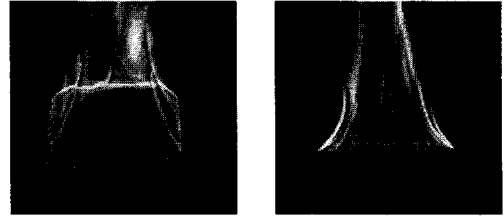
### 3. 결과 및 고찰

실험은 버너의 위치를 상향식, 측향식, 하향식으로 하여 각 경우에 대하여 공연비와 열부하를 변화시켰으며 버너위치별로 화염현상을 살펴보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

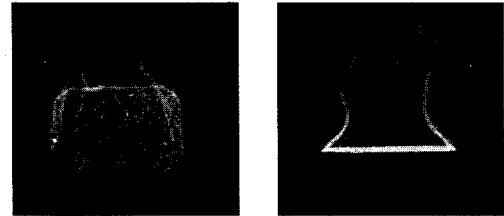
#### 3.1 상향식 세라믹버너에서의 연소형상

Fig.4는 상향식버너에서 당량비에 따른 연소형태를 비디오 카메라를 이용하여 촬영한 것이다. 촬영은 화염현상을 계속적으로 촬영하여 대표 현상만을 추려내었다. 화염은 연료과잉에서 공기과잉상태(당량비 3.33-0.52)로 변경하면서 실험을 하였고 열부하는 285.5kW/m<sup>2</sup>에서 최대 856kW/m<sup>2</sup>로 변화시키면서 실험을 하였다. 각 열 부하에 따라 화염의 형태는 약간의 정도의 차이는 있으나 공연비에 따라 발생하는 순서가 거의 일치하므로 대표적인 571kW/m<sup>2</sup>에서의 공연비에 따른 화염형태를 Fig.4에 나타내었다.

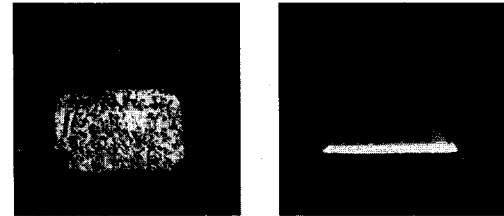
그림에 나타나듯이 당량비 3.33의 연료과잉상태를 나타내는 Fig.4-1에서는 화염면이 세라믹버너 표면에 부착되지 못하고 일종의 분젠화염과 같은 형상을 보이고 화염 끝단에서의 황염이 관찰 되었다. 화염분류를 위해 이 화염을 연료과잉 분젠화염으로 분류하였다. Fig.4-2의 당량비 2.0의 상태에서는 화염면이 세라믹버너위에 부착이 되면서 화염표면이 연료과잉상태에서 나타나는 여기된 C<sub>2</sub>에 의해 녹색을 띄는 표면화염이 생성됨을 관찰할 수 있었다. 연료과잉상태이기 때문에 1차표면화염연소후의 미연 연료와 주위 공기와의 반응에 의한 2차 화염현상이 관찰되었고 이 화염을 녹색표면화염으로 분류하였다. 당량비가 이론 혼합비 근방인 당량비 0.88의 화염 현상인 Fig.4-3에서는 화염이 세라믹타일표면에 붙어 적열광을 내는 전형적인 복사모드의 화염이 생성되는 것을 보여주고 있으며 이 화염을 복사 표면 화염으로 분류하였다. 이와같은 적색의 복사화염은 좀더 희박 공연비로 감에 따라 표면화염이 세라믹타일표면을 벗어나 타일 바로 위에 형성되는 청색표면화염(청염)으로 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. Fig.4-4는 당량비 0.625에서의 희박혼합비 상태에서의 청색표면화염을 보여주고 있다. 공연비를 점차 희박혼합비로 가면서 전체 혼합기 유속은 커지고 연소속도는 작아짐에 따라 Fig.4-5에서 보듯이 평면화염면이 버너표면에서 크게 이탈하는 Lift-off가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 고부하로 갈수록 당량비에 따라 조금씩 변하지만, 화염현상은 비슷하므로 앞서 분류된 연료과잉분젠화염, 녹색표면화염, 복사표면화염, 청색표면화염, lift-off을 측향식, 하향식에서의 화염구분에 그대로 사용하고자 한다.



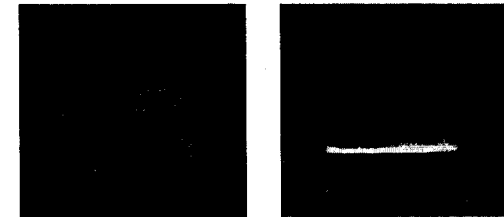
4-1)  $\phi=3.33$  에서의 연료과잉분젠화염



4-2)  $\phi=2.0$ 에서의 녹색표면화염



4-3)  $\phi=0.83$ 에서의 복사표면화염



4-4)  $\phi=0.62$ 에서의 청색표면화염



4-5)  $\phi=0.59$ 에서의 Lift-off

Fig.4 상향식 571 kW/m<sup>2</sup> 의 연소형상

다.

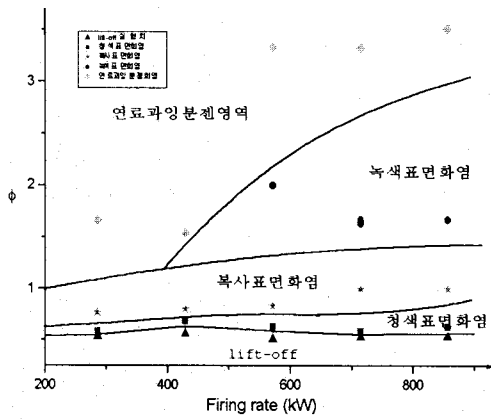


Fig.5 세라믹버너에서 메탄/공기의 연료과잉 확산화염, 녹색, 복사, 청색표면화염구간을 보여주는 안정성 선도

그림.5는 표면화염들의 당량비-열용량에 대한 안정성도를 나타내 준다.

그림에서 알 수 있듯이 당량비-열용량에 따라 앞서 기술된 4가지 화염대로 구분할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 청색 표면화염이 측정된 열용량내에서 당량비 약 0.6근방의 낮은 당량비에서 존재함을 알 수 있다. 복사표면화염도 당량비 0.7에서 1.2사이에서 일정하게 존재함을 알 수 있고 그리고 녹색 표면화염은 열용량 400 kw/m<sup>2</sup>이상의 공연비 1.2-2.5 사이에 존재함을 보여주고 있다.

3.2 측향식 세라믹버너에서의 연소현상

버너를 중력과 수직방향으로 위치시켜 촬영한 측향식버너의 화염면형태가 Fig.6에 나타나 있다.

전반적인 공연비 및 열 용량에 따른 화염면의 형태는 상향식과 대개 일치하는 것을 알 수 있었다. Lift-off가 상향식에서 0.59근방에서 발생한 것에 비해 측향식에서는 약 0.52에서 발생을 해 측향식이 좀 더 넓은 공연비에서 표면화염의 안정성을 유지하였다. Fig.6-1에서의 녹색표면화염에서 표면화염 형태는 상향식과 큰 변화가 없으나 버너상부에서 일어나는 2차연소에 의한 화염이 부력에 의하여 위로 휘어져 올라가며 복사표면화염이나 청색표면화염 형태는 상향식과 동일함을 알 수 있어 방향성에 상관없이 표면화염의 안정성을 확인할 수 있었다.

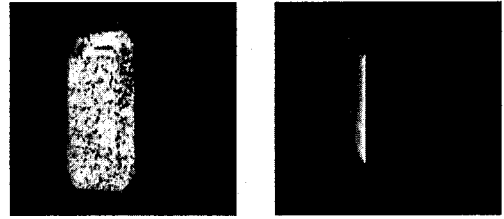
다음의 사진은 각 상황에 따른 화염면의 사진을 나타내고 있다.

3.3 하향식 세라믹버너에서의 연소현상

중력방향으로 버너를 위치시킨 하향식버너에서



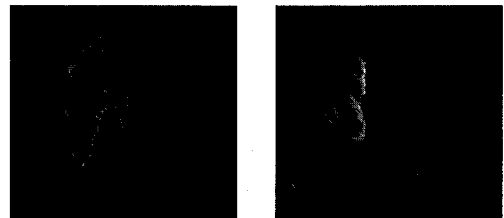
6-1)  $\phi=1.53$ 에서의 녹색표면화염



6-2)  $\phi=1.0$ 에서의 복사표면화염



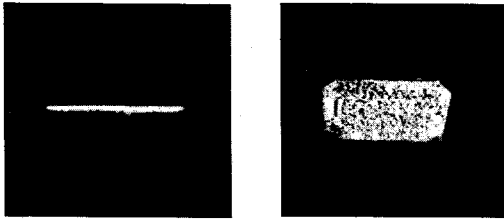
6-3)  $\phi=0.59$ 에서의 청색



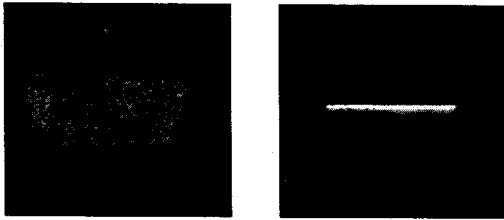
6-4)  $\phi=0.52$ 에서의 Lift-off

Fig.6 측향식 714 kW/m<sup>2</sup> 의 연소현상

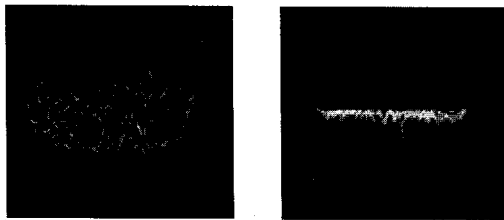
의 화염형태가 Fig.7에 나타나 있다. 하향식에서의 대표적인 형상은 청색표면화염의 형태를 구분하기가 쉽지 않고 이론혼합비보다 과 농할수록 복사표면화염상태에서 soot에 의한 황염발생이 크게 나타나는 경향을 보이는 것을 알 수 있었으며 복사표면화염이나 청색표면화염의 형태는 앞서의 상향식이나 측향식버너와 동일함을 확인할 수 있었다. Lift-off는 당량비 1.9에서 발생하나



7-1)  $\phi=0.83$ 에서의 복사표면화염



7-2)  $\phi=0.59$ 에서의 청색표면화염



7-3)  $\phi=0.52$ 에서의 Lift-off

Fig.7 하향식 571 kW/m<sup>2</sup> 의 연소형상

부력에 의하여 보다 안정된 lift-off 형태를 띄고 다른 방식에 비해 보다 희박한 공연비까지 blow-off되지 않고 안정되게 lift-off된 상태를 유지함을 알 수 있었다.

### 3.4 하향식 세라믹버너에서의 열용량에 따른 NOx 배출량의 측정

앞서 화염면 형태를 열용량과 공연비에 따라 구분한 화염분류에서 청색표면화염의 경우 매우 희박한 당량비 조건에서도 화염면을 안정하게 유지하는 것을 알 수 있어 희박혼합기에서의 낮은 연소온도에 따른 저 NOx 배출 가능성을 알아보기 위하여 각 열부하에서 당량비에 따른 NOx 배출량과 아울러 배기가스 온도를 측정하였다. 다른 상향식이나 측향식버너도 결과가 비슷하므로 실제적인 유용성이 있는 하향식에 대하여 그 결과를 도시하였다.

대표적인 2가지 열부하에서 NOx의 배출량을 당량비에 도시한 것이 Fig.8, Fig.9에 나타나 있다.

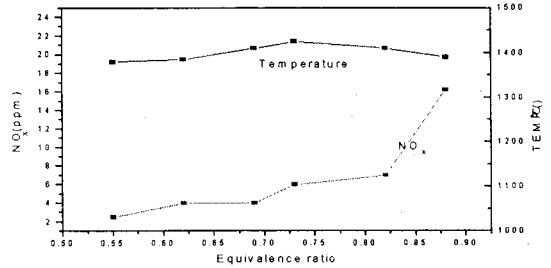


Fig.8 열용량 285.5 kW/m<sup>2</sup>에서의 하향식버너의 당량비에 따른 NOx배출 및 온도

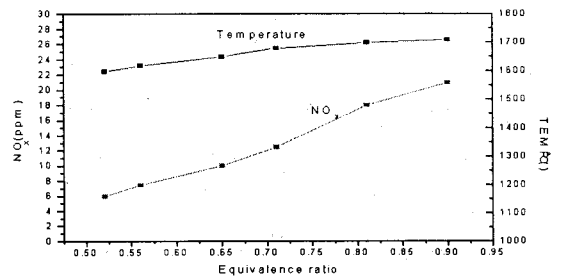


Fig.9 열용량 571 kW/m<sup>2</sup>에서 당량비에 따른 NOx 배출 및 온도

그림에서 알 수 있듯이 당량비가 0.5-0.65 사이의 희박혼합비에서 안정된 청색표면화염을 얻는 하향식 버너에서의 NOx의 배출량은 약 10-5 ppm 정도로서 청색표면화염의 초저 NOx 배출 특성을 확인할 수 있었다. 당량비 0.8-1 사이의 복사표면화염에서는 청색표면화염에 비해 온도도 높고 아울러 NOx의 배출량도 20-10 ppm 정도의 값을 나타냄을 파악할 수 있었다.

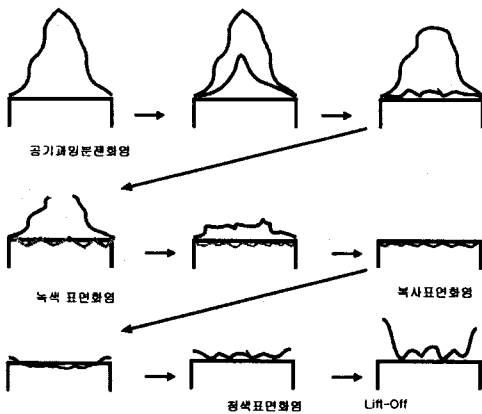
Fig.8에서 당량비 0.8에서 0.9사이의 복사표면화염 영역에서 화염온도는 거의 일정한 값을 가지는데 비해 NOx배출량이 증가되는 현상을 보여주고 있다. 이는 일반적인 열적 NOx 배출측면에서 온도의 증가를 수반하지 않은 것으로서 NOx형성 경로중 prompt NOx의 생성 가능성을 보여주고 있다. 최근의 연구[13]에서 메탄/공기 연소에서 NOx배출에 있어 상당부분 prompt NOx에 기인된 것을 발표하고 있어 이에 대한 향후 연구가 필요하다고 생각된다. 그리고 Fig.9에서 당량비 0.6근방에서 청색표면화염 구간에서도 화염온도가 단일화염온도보다 높은 값을 가짐을 알 수 있는데 열용량이 클 경우 세라믹표면 바로 위의 화염면의 복사에너지에 의해 세라믹이 가열되어 미연 혼합기 온도가 가열되는 부분적인 열순환기구의 가능성을 알아보기 위해 미연가스 온도 및 유속 측정을 수행하고 있다.

본 연구를 통해 표면화염으로서 청색표면화염

이 희박혼합비에서도 안정된 화염을 유지하고 저 NOx 배출특성을 가짐을 알 수 있었고 또한 녹색표면화염, 복사표면화염, 청색표면화염으로 대표되는 표면화염의 경우 버너위치변경에 상관없는 화염면의 안정성을 확인할 수 있었다.

### 4. 결론

세라믹 버너를 이용한 표면화염의 현상적인 화염형태 및 NOx 배출 특성에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.



- 1) 버너의 위치에 상관없이 당량비 변화에 따라 형성되는 화염의 형태는 연료과잉분체화염, 녹색표면화염, 복사표면화염, 청색표면화염으로 구분될 수 있음을 알 수 있었고 이를 그림으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.
- 2) 표면화염은 버너의 위치에 상관없이 안정된 화염면을 유지하는 것을 알 수 있었으며 특히 청색표면화염인 경우 당량비 0.5-0.65사이의 희박혼합비에서도 안정된 화염형태를 유지함을 확인할 수 있었다.
- 3) NOx 배출에 있어서 희박혼합비에서 안정된 화염면을 유지하는 청색표면화염이 10-5ppm의 낮은 배출량을 나타냄으로서 같은 열용량에서도 청색표면화염모드가 저 NOx 배출 특성에 유리함을 알 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 인천대학교 교내 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- [1] Tidball, R. K., Donaldson, R. J., and Gotterba, J. A., "Radiant Burner Technology Base-Burner Research and Development, Final Report," *Alzeta Report* No. 89/723-724/148, March, 1989.
- [2] Weinberg, F. J., "The First Half-Million Years of Combustion Research and Today's Burning Problems," *Fifteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburg, 1974.
- [3] Hsu, P F., Mattews, R. D., "Experimental and Numerical Study of Premixed Combustion within Inhomogeneous Porous Ceramics," *Combustion Science and Technology*, Vol. 90, 1993, pp. 149-172.
- [4] Howell, J. R., Hall, M. J. and Ellzey, J. L., "Combustion within Porous Inert Media," in *Heat Transfer in Porous Media and Two-Phase Flow*, (Y. Bayazitoglu and U.B. Sathuvalli, Ed.) ASME HTD-302, 1995, pp 1-28.
- [5] Lim, I. G., Chung, S. H., "Experimental Study on Flame Behavior within a Porous Ceramic Burner," *Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers B*, 1997, 21, 4.
- [6] Rumminger, M. D., "Numerical and Experimental Investigation of Heat Transfer and Pollutant Formation in Porous Direct Fired Radiation Burners," Ph.D Theses, University of California-Berkeley, 1996.
- [7] Sullivan, J. D. and Kendall, R. M., "Thermal Performance and NOx Emissions from Porous Surface Radiant Burners," *International Gas Research Conference*, Orland, Florida, 1992.
- [8] Williams, M. A., Woolley, R., and Lawes, M., "The Formation of NOx in Surface Burners," *Combustion and Flame*, Vol. 89, 1992, pp. 157-166.
- [9] Kendall, R. M., DesJardin, S. T., Sullivan, J. D., "Basic Research in Radiant Burner," *Gas Research Institute*, Report Number 92-7027-17, 1992.
- [10] Mital, R., Gore, J. and Viskanta, R., "A Study of the Structure of Submerged Reaction Zone in Porous Ceramic Radiant Burners," *Combustion and Flame*, Vol. 111, 1997, pp. 175-184.

- [11] Anderson, F., "Heat Transport Model for Fiber Burners," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 18, 1992, pp. 1-12.
- [12] Sathe, S. B., Peck, R. E. and Tong, T. W., "A Numerical Analysis of Heat Transfer and Combustion in Porous Radiant Burners," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, 1990, pp. 1331-1338.
- [13] Lim, J. M., Gore, J. and Viskanta, R., "A Study of the Effects of Air Preheat on the Structure of Methane/Air Counter Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 121, 2000, pp. 262-274.