Proceedings of
The Second National Congress on Fluids Engineering
August 22-24, 2002, Muju, Korea

메탈화이버를 이용한 플랫 버너의 연소특성에 관한 연구

이진석*·이용후*·윤봉석*·이도형**

A Study on the Combustion Characteristics of Flat Burner using Metal Fiber

Jin Seok Lee*, Young Hoo Lee*, Bong Seok Yun*, and Do Hyung Lee**

Key Words **:** *Combustion Characteristics(연소특성), Flat Burner(플랫 버너), Metal Fiber(메탈화이버)*

Abstract

The purpose of this study is to investigate the combustion characteristics of the flat burner using metal fiber. By changing the excess air ratio which affects strongly to the combustion characteristics, the flame stability range in the metal fiber were found and the range of the blue flame mode and radiant mode were distinguished and NOx and O_2 distributions in combustor were measured at two conditions which represents the blue flame mode and radiant mode.

1. 서 론

현재 산업용 연소기는 고효율, 저공해, 고른 열플럭스 등 에너지 효율측면과 함께 저공해 연소를 통한 환경적인 면에서 많은 개발과 함께 연구되어지고 있다. 최근 들어 냉난방기기에서는 공간적인 제약을 극복하기 위한 콤팩트화도 많이 시도되고 있다. 하지만 기존의 연소방식에 의한 연소기기의 경우, 연소효율과 환경오염의 측면에서 상반되는 경향과 함께 화염에 의한 국부적인 가열로 인한 최적의 연소기기 개발에 많은 제약을 받고 있다. 이러한 제약을 극복하기 위해 다공성 물질인 세라믹을 이용한 연소방식이 개발되었지만 가공의 어려움과 연소기 형상의 다양화에 부합하지 못하면며, 이를 극복하기 위해 최근에는 내열합금섬유를 이용한 연소기가 많이 개발되고 있다. 내열합금섬유를 이용할 경우, 연소면에서의 고른 열플럭스를 얻을 수 있으며 사용조건에 따라 복사 및 대류에너지를 이용할 수 있으므로 고효율과 저공해가 가능하다. 또한 화염면이 아주 짧기 때문에 연소기기의 콤팩트화를 할 수 있다. 이러한 내열합금섬유는 메탈화이버라 부르며 MF라고 약칭하기도 한다. 이를 이용한 국외 연구의 경우, 일본에서는 Kawaguchi, O.에 의한 Fiber Mat에서의 예혼합연소에 대해 연구된 바 있으며, 그 이후 동경가스(주)에서 현재까지 지속적인 연구가 진행 중에 있다. 국내에서는 소결형 메탈화이버를 이용한 연구가 진행되고 있으나 니트형 메탈화이버의 경우 국내에서는 아직까지 그 연구가 미비한 실정이다.

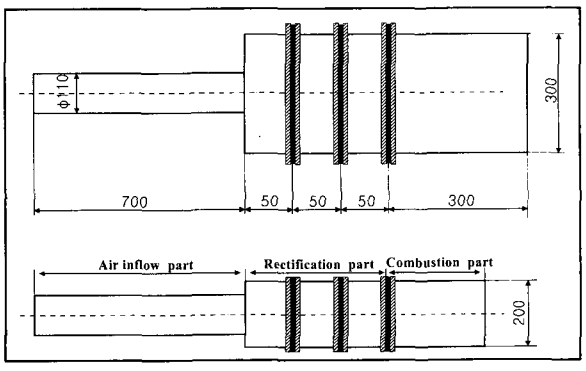
본 연구에서는 니트형 메탈화이버를 이용한 플랫 버너에서 공기비 변화를 통해 화염의 안정화 영역을 직접사진을 통해 선정하였다. 안정화 영역에서 복사영역 및 청염영역을 선정하고 선정영역의 온도특성 및 NOx, O_2의 배출특성을 조사하였다.

* 부경대학교 대학원, jinstone@mail1.pknu..ac.kr
** 부경대학교 기계공학부, leedh@pknu.ac.kr

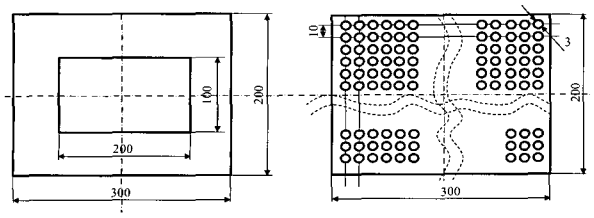
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 메탈화이버를 이용한 플랫 버너의 상세도를 Fig. 1에 나타내었다. (a)에 나타낸 전체 연소기는 크게 공기 유입관부(Air infow part), 정류부(Rectification part), 연소부(Combustion part)의 3부분으로 나눌수 있다. 공기유입관부는 길이 700 mm, 직경 110 mm이다. 정류부에는 배플(Baffle), 천공판(Perforation Panel), 메탈화이버의 전단부로 나누어지고, 각각의 설치물간의 간격은 50 mm이다. 연소부의 내부면적은 300×200×300 mm이며 설치물을 제외한 모든 강판의 두께는 10 mm이다. 이때, 공기유입부를 제외한 연소기의 전체길이는 450 mm인 직사각형의 형상이다. (b)의 배플은 공기유입관에서 유입되는 혼합류가 연소기의 중심에 집중되어 유입되는 것을 분산시키기 위해서 설치된다. (c)의 천공판은 직경 3 mm의 구멍을 10 mm등간격으로 551개를 뚫었으며, 이는 배플에서의 흐트러진 혼합류를 연소부의 메탈화이버에 안정적이고 균일하게 전달하기 위해 설치된다.



(a) Detail of Flat Burner



(b) Baffle (c) Perforation Panel

Fig. 1 Detail of flat burner

Fig. 2는 본 연구에 사용된 메탈화이버의 직접사진으로 벨기에 Acotech. Ltd의 NIT 100S를 사용하였다.

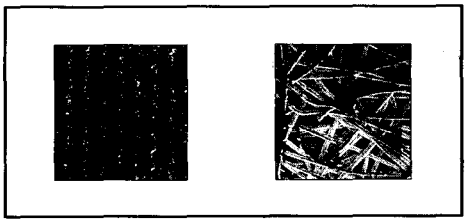


Fig. 2 Picture of metal fiber

본 실험에 사용된 장치는 예혼합 방식이므로 각 요소들의 연결부위를 고온에 잘 견디는 내열실리콘과 세라믹 단열재를 사용하여 기밀을 충분히 유지하였다. Fig. 3에서는 연소기의 3차원 형상을 나타내고 있다. 연료노즐은 내경 7 mm(외경 22 mm)의 노즐 선단에 직경 1.0 mm인 분공 8개를 분사각 60°로 하여 제작하였고, 혼합을 촉진하기 위해 공기흐름방향의 대향류로 설치하였다.

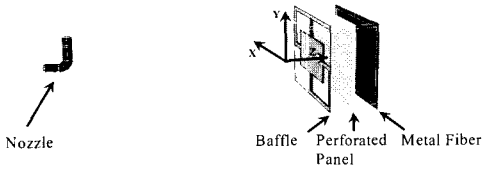


Fig. 3 Dimension of Flat Burner

Fig. 4는 본 연구에서 사용된 플랫 버너의 실험장치도를 나타낸 것이다. 연소용 공기는 원심형 송풍기(5 HP)에서 공급되고 송풍기의 모터는 인버터(3.75 kW)에 의해 제어된다. 공급된 공기는 유로의 밸브와 함께 디지털 유량계(KFC DIG-SID)를 거쳐 연소기에 공급된다. 본 연구에 사용된 연료는 상용 프로판가스(C_3H_8)를 사용하였으며, 연료분사압력은 49 kPa이다. 연료 탱크에서 공급된 연료는 유량조절기(MFC)를 거쳐 공기유입관에 대향류로 설치된 분사 노즐을 통해 분사시켰다.

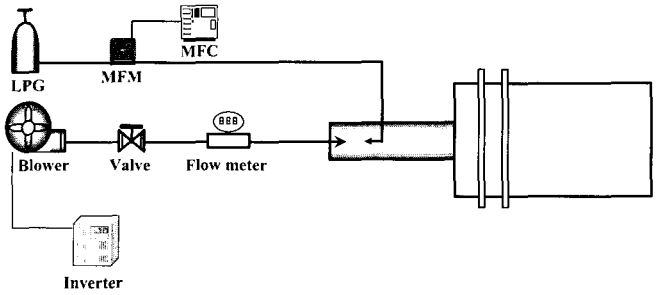


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험방법

본 연구에서는 연소용 공기의 속도를 0.876 m/s로 일정하게 공급하고 연소용 연료의 양을 변화시켜 공기비 α=0.13~2.45의 범위에서 실험하였다.

화염 안정화 범위는 메탈화이버의 정면에서 공기비 변화에 따른 화염의 직접사진을 통해 관찰하였다. 또한 화염의 안정화 범위 내에서 청염영역과 복사영역의 대표영역을 선정하였다. 두 가지 대표영역에서는 평균온도를 측정하여 연소면에서 발생되는 청염 및 복사영역의 온도특성을 고찰하였다.

일반적으로 화염내의 온도 측정에는 여러 가지 방법이 있지만 본 연구에서는 열전대를 사용하였으며, 측정부의 정보를 디지털 데이터 기록계(YOKOGAYA LR4210)를 통해 기록하였다. 측정용 프로브는 0.5 mm Pt/Pt-Rh 13%의 R-type 열전대를 사용하였으며, 고온에서의 변형과 표면반응을 방지하기 위해 석영관과 자기관을 이용하여 3중 수냉식으로 자체 제작하였다. 배출가스 측정을 위한 흡입 프로브도 배출가스의 흡입시 2차 반응을 방지하기 위해 3중 수냉식으로 자체 제작하였다. 온도 및 농도 측정은 본 연구의 연소기가 축대칭이므로 자동3축이송대에 필요한 측정 프로브를 설치하여 X방향의 1/2영역에 대해 일정한 등간격으로 측정하였다. 측정값은 평균치를 기록하였으며 반복 실험에 대한 재연성은 충분히 확보하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염의 안정화

Fig. 5는 메탈화이버를 이용한 표면연소에서 화염의 안정화 범위를 찾기 위해 공기비 변화에 따른 화염의 형상을 직접사진으로 나타내었다. (l) α=2.45(202 kW/m²)에서는 화염이 착화가 되고 (j) α=2.18에서는 메탈화이버에서의 화염이 확대되지만 화염이 안정화되지 못해 쉽게 화염이 꺼져버리는 불안정한 상태에 있다. (i) α=2.1이 되면 다소 화염이 안정되면서 계속적인 메탈화이버에서의 청염영역과 함께 부분적으로 표면연소가 일어나는 것을 볼 수 있다. (h) α=2.06에서는 연소기의 상층부에서 표면연소의 범위확대가 더욱 가속화되고, 아울러 하층부에서는 안정된 청염이 발생된다. 이와 같이 연소기의 상층부와 하층부에서 경계를 이루며 표면연소와 청염이 나누어지는 이유는, 연소용 공기와 연료가 충분한 혼합이 이루어지지 않기 때문으로 사료된다. 이후 공기비를 계속 변화시켜 (g) α=1.92를 지나 (f) α=1.87이 되면서 전체 연소면적에 대해 청염과 표면연소에 의한 복사가 차지하는 면적비가 거의 동일함을 볼 수 있다. 여기서 직접사진에서는 잘 나타나지 않지만 (f) α=1.87(266 kW/m²)까지는 표면연소에 의한 복사가 발생되는 영역에서도 청염이 아주 균일하게 발생되는 것을 확인할 수 있었다. (e) α=1.78(278 kW/m²)이 되면서 청염은 대부분 사라지고 복사가 시작되는 것을 확인하였으며, 차츰 공기비가 감소함에 따라 복사영역이 넓어지고 복사강도는 강해진다. (c) α=1.5에서는 연소기의 벽면부근을 제외한 모든 영역에서 강한 복사가 발생하고 (d) α=1.4(354 kW/m²)에서는 메탈화이버의 형상이 보이지 않을 정도의 강한 표면연소에 의한 복사가 발생하였다. 공기비를 더욱 낮추어 (a) α=1.3에서는 연료 과농에 의해 메탈화이버 이후에서 2차연소가 발생하였다. 위와 같은 결과를 통해 공기비 변화에 따른 화염의 안정화 범위는 α=1.4(354 kW/m²)~α=2.06(240 kW/m²)영역임을 알 수 있었다. 그리고 화염안정화 영역에서의 표면연소에 의한 복사영역은 α=1.4(354 kW/m²)~α=1.78(278 kW/m²)에서 찾

을 수 있었으며, α=1.87(266 kW/m²)~α=2.06(240 kW/m²)에서 청염영역를 찾을 수 있었다.

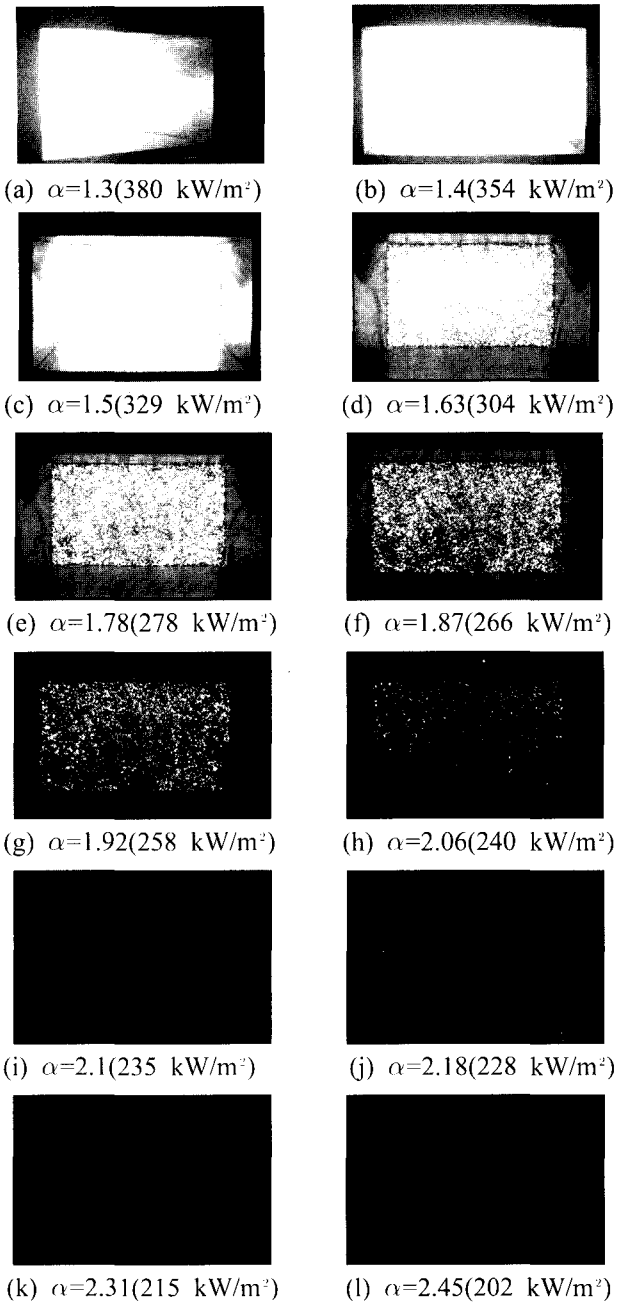


Fig. 5 Direct photographs at different air rate

3.2 청염영역과 복사영역에서의 온도특성

공기비 변화에 따른 화염의 안정화 범위를 기초로 하여 두 가지 실험조건을 선정하였다. 청염영역인 α=1.92와 복사영역인 α=1.4를 각각의 대표단면으로 선정하여 CASE 1, CASE 2로 정하고 평균등온분포를 통해 온도 특성을 조사하였다.

Fig. 6은 청염영역인 CASE 1 조건에서의 Z축방향의 대표단면(Z=10, 40, 80, 200 mm)의 평균등온분포를 나타낸 것이다. 연소면에서의 고른 청염에 의해 전체적으로 고른 등온분포를 나타내고 있다. Z=40 mm지점에서는 Y=-100 mm지점부근에서는 낮은 저온영역이 존재하는 것을 볼 수 있으며, 연소기의 하류로 갈수록 그 영역이 확대되는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 표면연소의 특징인 짧은 화염길이와 낮은 연소강도에 의해 부력이 발생하여 온도 경계층이 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 복사영역인 CASE 2 조건에서의 Z축방향의 대표단면(Z=10, 40, 80, 200 mm)의 평균등온분포를 나타낸 것으로, CASE 1에 비해 연소면에서 강한 복사와 연소강도를 통해 평균온도가 상승하며 고른 온도분포를 나타내고 있다. 그리고 청염영역에 비해 온도경계층이 Z= 80mm지점에서 발생하였다.

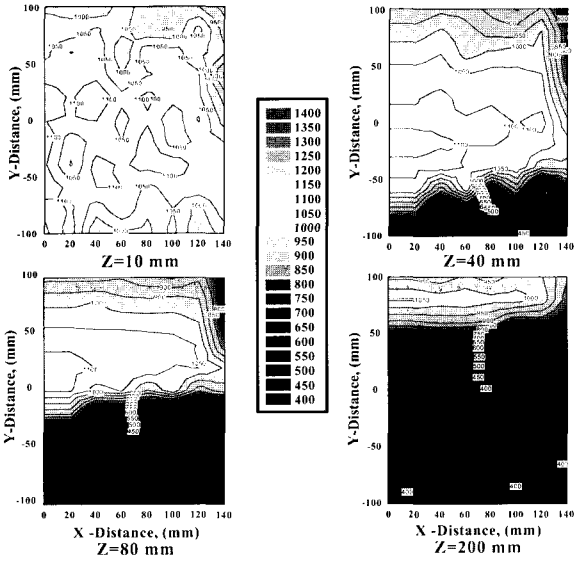


Fig. 6 Isothermal lines of X-Y plane for the CASE 1

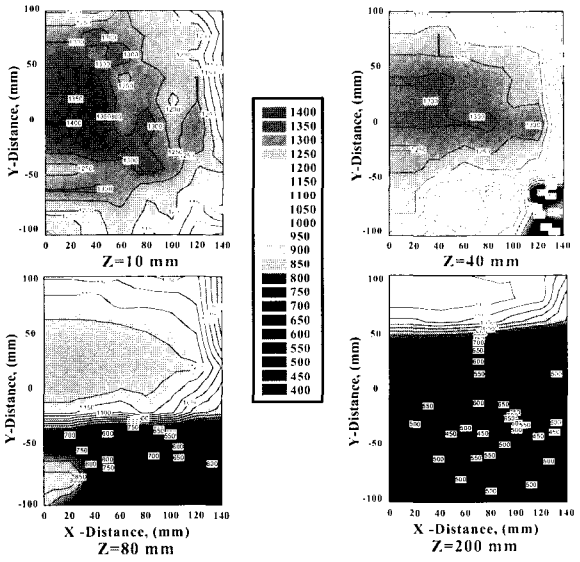


Fig. 7 Isothermal lines of X-Y plane for the CASE 2

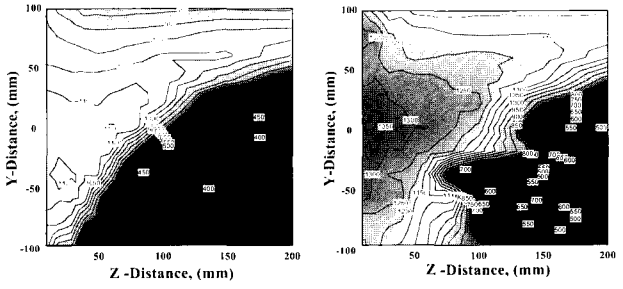


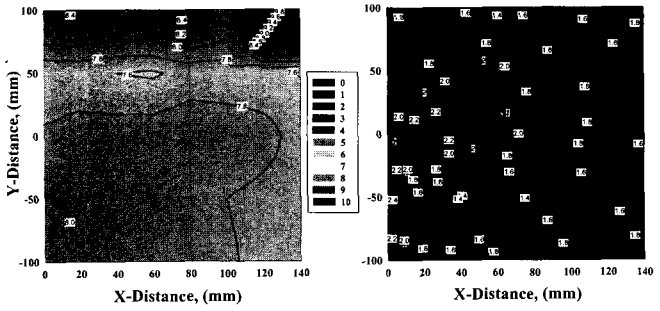
Fig. 8 Isothermal lines of Y-Z plane for the CASE 1 and CASE 2

Fig 8은 연소기의 측면인 X=0 mm지점에서 CASE 1과 CASE 2조건의 평균등온분포를 나타낸 것으로 청염영역보다 복사영역이 연소면에서의 균일한 고온부가 형상되는 것을 확인할 수 있으며 또한 고온 영역이 복사영역에서 확대되어 있음을 확인하였다. 이를 통해 메탈화이버를 이용한 플랫 버너의 경우 축방향의 온도경계층이 존재함을 알게 되었고, 피가열물을 설치할 경우 설치기준을 알게 되었다.

3.2 청염영역과 복사영역에서의 NOx 및 O_2 배출특성

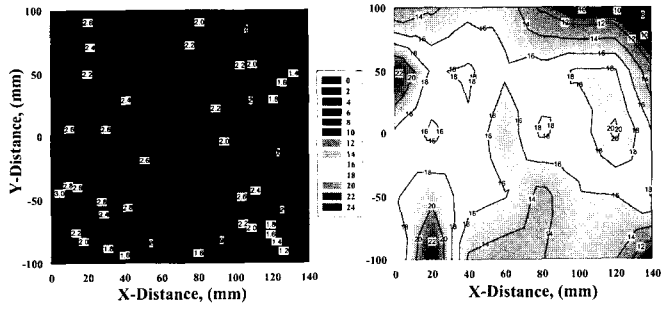
Fig. 9는 각각의 조건에서 연소면으로부터 축방향 Z=10 mm 지점에서의 O_2농도를 나타낸 것이다. 두 조건에서 연소면에 걸쳐 고른 O_2농도분포가 나타나는 것은 이 위치에서 메탈화이버의 전체면에 대해 균일한 연소가 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 단면에서의 NOx분포를 나타내고 있다. 청염영역인 CASE 1에 비해 복사영역인 CASE 2의 NOx 발생량이 다소 높게 나타나고 있지만 그 배출량이 최고 22 ppm 정도로 낮은 배출특성을 가지고 있음을 확인 할 수 있다.



CASE 1 CASE 2

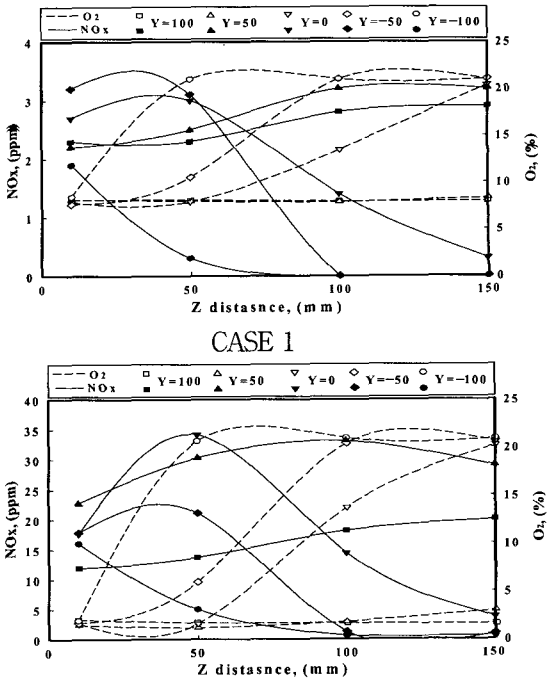
Fig. 9 O_2 concentration of Z=10 mm for the CASE 1 and CASE 2



CASE 1 CASE 2

Fig. 10 NOx concentration of Z=10 mm for the CASE 1 and CASE 2

Fig. 11은 두 가지 실험조건에 대하여 연소기의 중심인 X=0, Y=0 mm인 위치와 X=0 mm 및 Y방향의 상하 각각 50, 100 mm위치에서의 축방향(Z방향)으로 NOx, O_2의 배출량을 나타낸 것이다. 두 가지 경우 모두 대체로 고온부에서는 NOx발생량이 많고 O_2는 적게 분포되어 있어, 배출특성이 타당한 것으로 판단된다. 그러나 CASE 2에서 확연히 드러나듯이 Y=0 mm, Y=-50 mm인 경우에는 Z=10 mm 위치보다 50 mm에서 NOx분포가 높게 나타나고, 그 이후에서 급격한 감소를 보인다. 이는 고온영역에서 많이 생성된 NOx가 연소기 하류방향으로 약간 이동하였고, 온도 경계층을 지나는 위치에서는 NOx양이 급격히 감소하였음을 알 수 있다.



CASE 1

CASE 2

Fig. 11 Distribution of NOx, O_2 for Z-distance variation within X=0 mm at CASE 1 and CASE 2

4. 결 론

메탈화이버를 이용한 플랫 버너의 연소특성에 관한 연구에 의한 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 공기비 변화에 따른 화염의 안정화범위는 α=1.4에서 α=2.06 사이에 있음을 알 수 있었으며, 이러한 화염안정화범위에서 표면연소에 의한 복사영역은 α=1.4~α=1.78이며 청염영역은 α=1.87~α=2.06으로 나타냈다.

2. 화염안정화 범위에서 청염영역과 복사영역의 대표조건인 CASE 1(α=1.4), CASE 2(α=1.92)에서 온도특성은 두 가지 조건 모두 메탈화이버 표면에서 고른 열플럭스가 발생되었다. 하지만 두 가지 조건 모두 연소면의 후류에서 부력에 의한 온도경계층이 급격히 발생되었고 이러한 경계층은 피가열물의 설치위치 선정에 주의해야 함을 의미한다.

3. 표면연소에 의한 배출가스 중 O_2와 NOx의 농도를 분석한 결과 플랫 버너 부근에서는 전체에 걸쳐 고른 O_2와 NOx분포를 보이므로 연소면에서의 연소의 균일성을 확인할 수 있었다.

4. 연소기 중심부근에서 축방향 NOx분포는 연소기의 약간 하류에서 최대치를 나타내고 온도경계층을 지나서는 급격히 낮아진다.

참고문헌

[1] Kawaguchi, O. et al., "Premixed Combustion at a Fiber Mat", 23rd Symp. on Combustion, (1990) pp. 1019-1024.

[2] 한국에너지기술연구소. "산업용 공해, 고부하면 연소시스템 기술 개발에 관한 연구(Ⅰ)" 연구보고서, (1993).

[3] ACOTECH, Ltd