

메탈파이버 버너의 예혼합 연소 및 화염급냉에 따른 NO_x 배출 특성

김혁주* · 박병식* · 김종진* · 정해승**

The Characteristics of NO_x Emission for Premixed Combustion and Flame Rapid Cooling of MFB

Hyouck-ju Kim, Byung-sik Park, Jong-jin Kim and Hae-seung Jeong

Key Words: NO_x Emission, Metal Fiber Burner, Compact Boiler

Abstract

Experimental studies have been carried out to find out the characteristics of the heat transfer, combustion emission and noise in the boilers without any extra firing zone for complete combustion of fuel. For the experiments a burner of premixed type and some heat exchangers were designed and manufactured. Also test facilities including a data acquisition system and various measuring devices were set up in order to measure automatically the various temperatures and flow rates of water and combustion gas. Various experiments were performed to find out the heat transfer characteristics as well as combustion emission and noise. In general, the burner which has uniform holes in the burner nozzle plate generates big combustion noise - whistling. The noise reduction method is discussed in this study. Many experimental data such as noise level, the amount of pollutant emission and heat transfer rate for different combination of heat exchangers are given as comparison bases for numerical studies.

1. 서론

보일러를 작고 가볍게 만들고자 많은 노력의 결과로서 고부하 연소기술들이 개발되어 왔다. 이러한 고부하 연소기술

은 상대적으로 화염 온도가 높아져서 NO_x 발생량이 증가하는 경향을 갖는다.

지금까지의 일반적인 관념과는 달리 화염을 일부러 수관에 충돌하게 함으로써 저공해화와 소형화를 달성할 수 있는 새로운 개념의 연소법이 제안되었다.^{1)~4)}

* 한국에너지기술연구원

** 충남대학교 대학원

이 연소법은 가스 연료를 사용하는 보일러에 적용가능하며, 버너 바로 전단에 흡열면인 수관군을 설치하여 연소반응이 수관군 틈에서 일어난다. 이러한 연소환경은 급격한 연소반응에 의해서 발생하는 열을 인접한 수관에서 흡수하게 하여 화염 온도를 낮추어 NO_x의 발생을 억제할 수 있다. 동시에 기존의 보일러에서는 필수적이었던 연소공간에 수관을 설치하여 열을 흡수하기 때문에 보일러의 부피를 줄일 수 있다.

본 연구에서는 예혼합연소 방식의 MFB(Metal Fiber Burner)를 이용하였으며, 화염중에 설치하는 수관의 배치 형태를 변화시켜서 연소특성과 열교환 특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 연소기

가스 연소 시에 발생하는 공해물질의 저감을 위하여 최근에 각광을 받고 있는 Acotech사의 메탈파이버 Mat를 이용하여 버너를 제작하였다.

본 연구에서 사용한 Mat는 두께가 2mm이고, 장방향으로 천공 처리한 것을 버너 제작에 이용하였으며, 천공율은 34.7%이다. 또한 빠른 속도로 분출되는 혼합가스를 Mat 전면에 걸쳐서 균일하게 분산시키기 위해서 메탈파이버 버너의 Mat 전단에 천공된 분산판을 설치하였다.

이 버너는 공기와 연료가 잘 혼합되도록 설계하였다. Fig.1의 메탈파이버 버너의 구조에서 보듯이 혼합판에는 연료 노즐을 선회기의 앞쪽에 설치하여 공기 유동장에 직각방향인 노즐을 통해서 분출된 연료가 선회기를 거치는 동안 잘 혼합되도록 하였다.

장방향 메탈파이버 버너의 단위 표면적 당 연소부하는 최대 8,335 kW/m²로 설정하였고, 유효 연소표면적은 180 cm² (9cm× 20cm)로 최대연소용량은 150 kW/h이다.

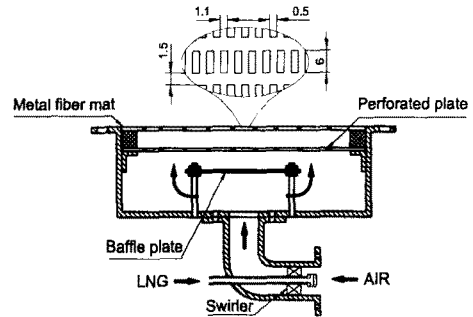


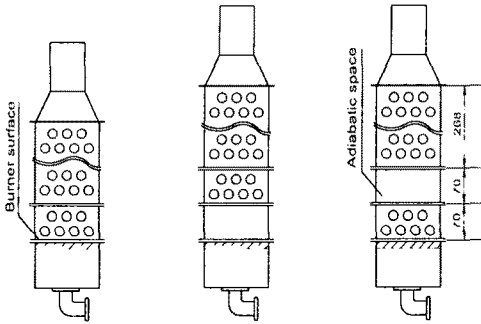
Figure 1. 메탈파이버 버너의 구조도

2.2. 열교환기

연소실 내에 설치한 수관군에 화염의 충돌여부에 따른 연소특성을 파악하기 위하여 열교환기를 다양하게 구성할 수 있도록 3개의 조각으로 제작하였다. 수관이 삼각배열의 형태로 첫열은 4개, 2열은 3개, 3열은 다시 4개가 되도록 반복적으로 배치되어 있으며, 물은 일열에 있는 수관을 차례로 지나서 2열로 넘어가며, 2열에 있는 수관을 차례로 지난 다음 배수 헤더로 흘러나간다. 열교환기는 이러한 수관군을 2열짜리 1개, 10열짜리 1개, 그리고 수관이 배치되지 않은 것(무수관 덕트)을 각각 제작하였다. 이때 사용한 수관은 외경 15.7mm의 동관을 사용하였으며, 이들 열교환기의 배치를 변경시킴으로서 [그림 2]와 같이 서로 조합할 수 있다. 각각의 열교환기의 구조 변화에 따른 연소특성과 열교환 특성을 파악하였다.

TYPE A는 버너 면에서 수관까지의 거리가 불과 15mm 밖에 되지 않도록 조

합한 것으로서 2열짜리 수관군을 상류에 설치하고, 다음에 10열짜리 수관군을 설치하였다.



(a) TYPE A (b) TYPE B (c) TYPE C

Figure 2. 실험용 열교환기의 구성

TYPE B는 가장 앞쪽에 무수관 공간(수관까지의 거리 85mm)을 설치하고 다음에 2열짜리 수관군, 그 뒤쪽에 10열짜리 수관군을 차례로 설치함으로써 전통적인 방식의 연소공간 배치에 따른 연소 특성을 파악하여 다른 2종의 수관군 연소방식의 열교환기의 연소특성과 비교하고자 하였다.

TYPE C는 버너 면에서 수관까지의 거리는 15mm, 2열짜리 수관군, 미연소 가스의 완전연소가 가능하도록 단열공간의 역할을 하는 무수관 공간을 설치하고, 다음에 10열짜리 수관군을 설치하여 냉각된 화염이 단열공간의 유무에 따라 어떠한 특성을 갖는지를 파악하고자 조합한 열교환기이다.

이들 열교환기는 화염에서 수관으로의 전열면적은 같다고 볼 수 있으며, 우선 화염의 냉각에 따른 연소화염을 관찰하기 위하여 2열짜리 열교환기와 무수관 연소통의 양측벽에는 60×200mm의 관측창을 설치하였다. 다만 열교환기의 외부는 보온을 하지않고 대기에 노출되어 있다.

2.3. 실험장치

Fig.3은 본 연구를 위해서 제작한 실험 장치의 개략도이다. 장치는 크게 시험용 보일러, 버너의 연료 및 공기 공급계통, 열교환기의 급수 및 배수 계통, 배기가스 성분 분석장치 등 5개의 부분으로 나눌 수 있다.

보일러에 공급되는 연료 및 공기의 공급계통에는 각각의 유량 측정장치, 유량을 조절하는 장치 및 조건을 맞출 수 있도록 구성하였다.

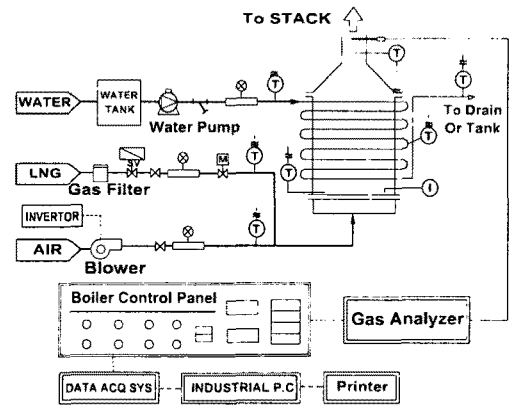


Figure 3. 실험장치 개략도

가스공급계통은 Fig.3에 나타난 바와 같으며, 가스는 직경 25mm 관에 1차압력 30kPa로 공급되고, 용량이 20Nm³/hr인 질량 유량 조절계(Mass flow controller, Sierra)를 설치하여 사용하였다. 연소실험 시 연료가스유량은 15kW 단위로 150kW까지 변화시켰다.

연소용 공기는 볼텍스식 송풍기(Vortex blower)를 이용하고, 송풍기는 송풍기의 회전수 제어에 의해서 버너에 공급되는 공기유량을 조절하였다. 연소실험 시 공기량의 변화는 배기가스 산소농도를 기준으로 1%에서 10%까지 8단계로 변화시켰다.

열교환에 사용하는 냉각수는 급수탱크

를 설치하고 수환펌프에 의해서 강제순환되도록 구성하였다.

열교환기의 전열면적이 키짐에 따라서관의 용 길이가 길어짐에 따라 배관내의 압력이 높아지게 되므로 열교환기의 공급 및 배출구에는 헤드를 설치하여 압력 손실을 최소화하였다. 또한 열교환기 입구 및 출구온도를 측정하기 위하여 T-type 열전대를 설치하였다.

연소 가스 온도측정은 소선의 직경이 0.5mm인 R type 열전대 (Pt/Pt-Rh 13%)를 사용하였다. 연소기 표면으로부터 하류방향 거리에 따른 가스온도를 측정하기 위하여 덕트의 측벽에 열전대 피복관과 동일한 삽입구를 설치하였다.

배기가스 성분은 가스연소기의 연소특성을 대표한다고 판단되는 배가스 성분으로 NOx, CO 및 O₂ 농도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 연소기의 화염 특성

메탈파이버 Mat의 연소현상은 연소가 화염면에서 발생하여 표면을 가열하는 표면적열 모드와 혼합가스의 속도가 높아서 Mat면으로부터 떨어져서 발생하는 청염모드로 나눌 수 있다. 일반적으로 연소부하가 일정할 경우 공기비의 증가에 따라 표면적열(Radiant mode → Blue flame mode)이 감소되며, 공기비가 일정할 경우에는 연소부하가 증가함에 따라 표면적열이 감소된다. 그러나 보일러에 사용되는 연소기는 단위 표면적 당 연소량이 상당히 크기 때문에 표면적열에 의한 고체복사 방식의 전열 형태보다는 자라리 대류 열전달 방식에 가까운 청염 연소 형태가 된다.

Photo 1은 장방형 전공 Mat를 이용한 연소량 30kW의 연소상태를 촬영한 사진

이며, 청염으로서 메탈파이버 버너의 전형적인 화염형상이다.

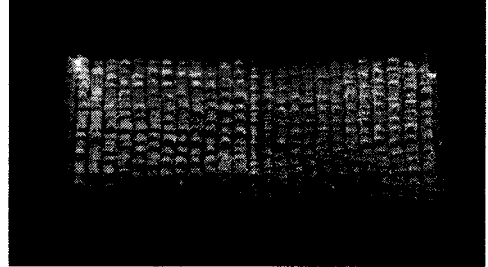
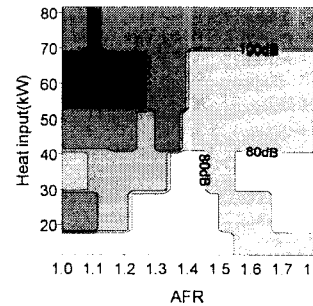
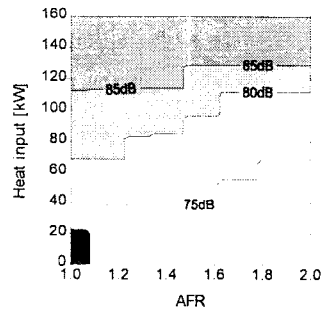


Photo 1. 메탈파이버 버너의 화염형상

3.2. 시험용 연소기의 소음특성



(a)



(b)

Figure 4. 시험용 연소기 소음특성

Fig.4는 연소기에서 발생하는 소음레벨을 공기비 및 연소량에 대해서 나타낸 것이다. 다만 본 실험을 수행하는 동안 연소용 블로워, 배풍기, 펌프 등 동일 공간에서 발생하는 소음이 포함되어 있는

상태임을 밝혀 둔다. 하지만 보일러의 연소시에 발생하는 이상 소음은 뚜렷하게 구분되는 경적음으로서 통상 85 dB를 넘어 선다.

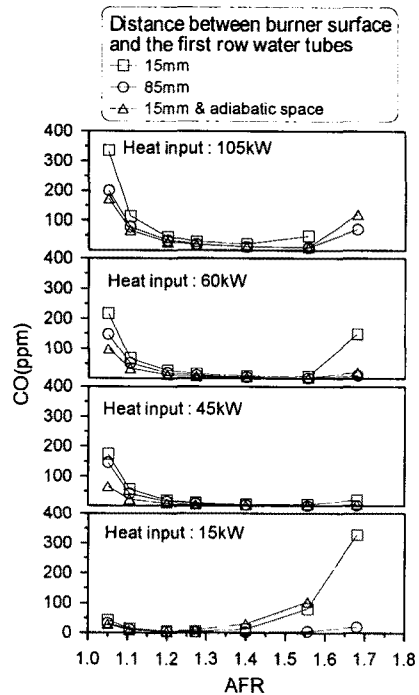
Fig.4(a)는 연소기의 유로설계 및 분산판을 설치하지 않은 상태에서 소음을 측정 한 결과이다. 전반적으로 전 연소범위에 걸쳐서 높은 경적 소음이 동반되는 것을 알 수 있다. Fig.4(b)는 다공판을 설치하고 혼합기의 유로를 단순하게 개선한 이후 측정 한 결과이다. 경적 소음은 15kW부하의 공기비 1.05에서만 경적음이 발생하였다.

3.3. 관군 배열이 연소특성에 미치는 영향

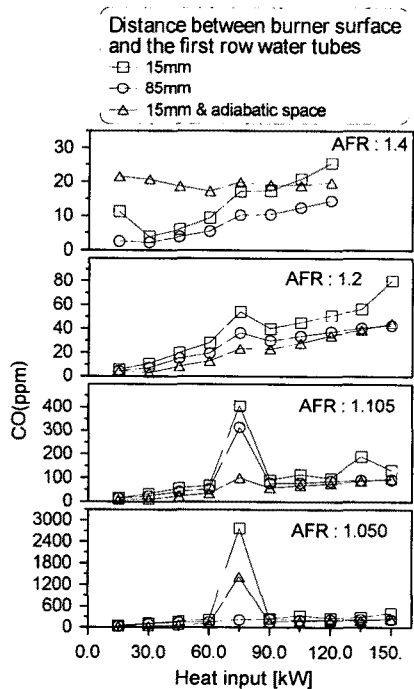
3.3.1 CO생성 특성

배가스 중의 CO농도는 연소효율(연소성)과 밀접한 관계가 있으며, 일반적으로 연소기의 성능을 1차적으로 판단할 수 있는 기준이 될 수 있다.

Fig.5는 각각 연소 공간의 유무 등 배치가 다른 3종의 열교환기에 따라서 연소가스의 CO 배출 특성에 어떻게 영향을 미치는 가를 부하별로 공기비의 변화에 따라 조사한 것이다. Fig.5(a)로부터 CO 발생특성은 공기비가 낮은 영역과 높은 영역에서 급격하게 증가하는 일반적인 특성을 띤다. 이 때 열교환기 별로 살펴보면 TYPE A의 경우가 더욱 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 공기비 = 1.2에서 1.4의 범위에서는 열교환기의 형태에 상관없이 100ppm 이하로 적정하게 됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig.5(b)에서와 같이 연료유량이 증가함에 따라서 약간 증가하는 경향을 보인다. 이 그림의 75kW 영역의 공기비 = 1.05와 1.105에서 CO 발생량이 급격하게 증가하는 것은 연소시스템의 공기 및 가스



(a)



(b)

Figure 5. 3 type 열교환기의 연소량 및 공기비 변화에 따른 CO 발생특성

의 유동 불안정에 의해서 심한 맥동현상이 일어나 연소상태가 불안정하게 되었기 때문이다.

3.3.2 NOx 생성 특성

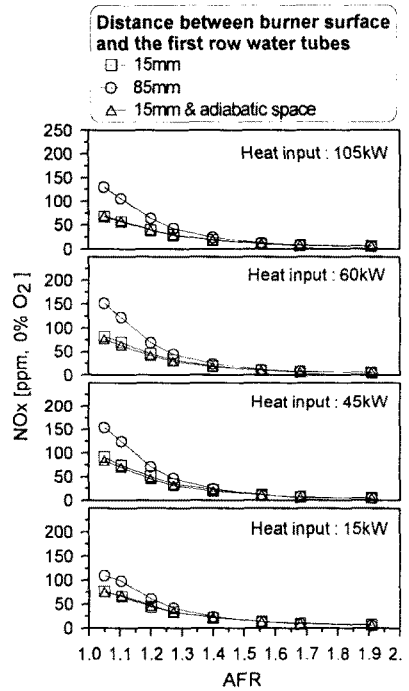
Fig.6은 역시 3종의 열교환기의 배치에 따른 연소 공간의 유무와 부하 및 공기비의 변화에 따른 연소가스의 NOx 배출 특성을 조사한 것이다. Fig.6(a)로부터 공기비가 낮은 영역에서는 NOx의 발생량이 많고, 공기비가 증가함에 따라서 감소한다. 공기비가 낮은 1.05 근처에서 화염온도가 가장 높게 나타나며, Fig.6(b)로부터 부하가 증가할수록 고온영역의 온도가 높아졌음에도 불구하고 NOx 발생량이 감소하는 경향을 갖는데 이는 연소가스의 속도가 증가함에 따라서 고온체류시간이 짧아진 때문으로 판단된다.

특히 연소실이 없는 열교환기 TYPE A와 열교환기 TYPE C의 관군연소의 경우, NOx 발생량은 현저하게 감소함을 알 수 있다. 또한 부하변화에 따른 NOx 발생량은 연료량의 영향이 그다지 크지않고, 공기비에 의해서 지배되며, 관군연소를 이용하는 경우 공기비 1.2 근처에서는 NOx 발생량을 50ppm이하로 낮게 유지시킬 수 있다.

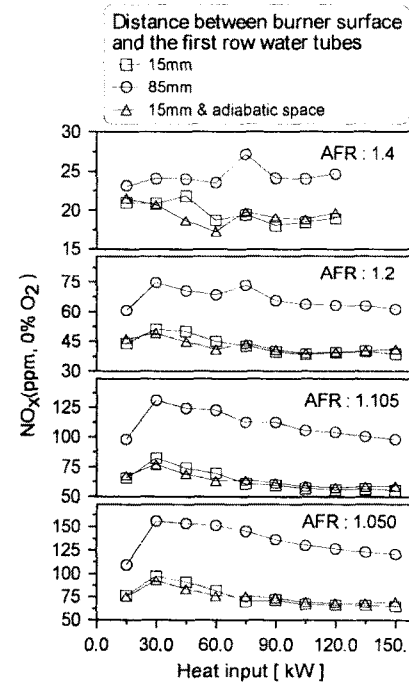
3.4. 관군배열이 열전달에 미치는 영향

Fig.7은 부하별로 수관에 전달된 열량을 공기비 변화에 따라서 나타낸 것이다. 열전달이 가장 잘 이루어진 것은 TYPE A의 열교환기임을 알 수 있다.

Fig.8은 공기비별 부하변화에 따른 배기가스로의 손실열량을 나타낸다. 보일러의 부하의 증가에 따른 손실열량이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 동일 조건에서 배기가스로 배출되는 열량은 3종의 열교환기가 거의 동일하게

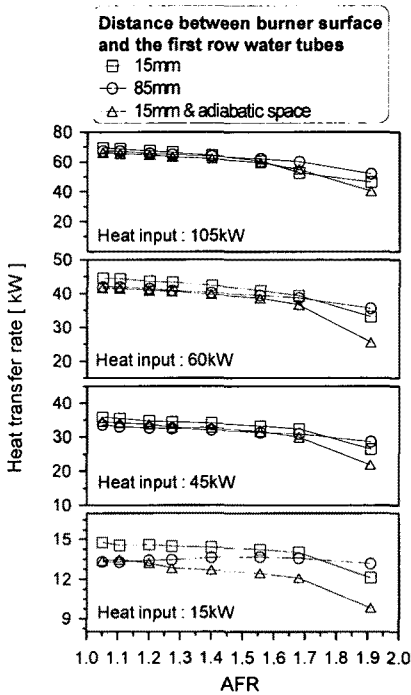


(a)

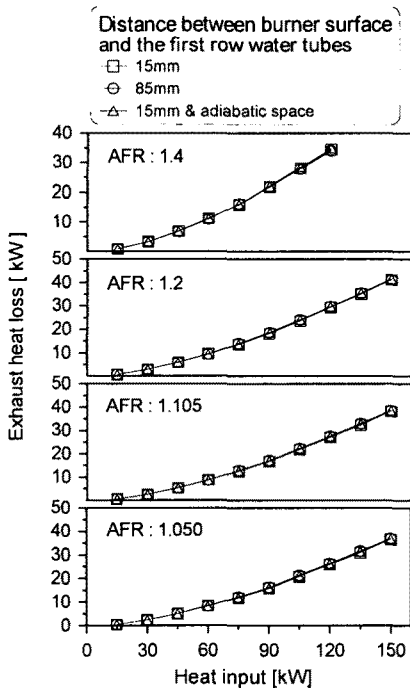


(b)

Figure 6. 3 type 열교환기의 연소량 및 공기비 변화에 따른 NOx 발생특성



[그림 7] 입열별 공기비에 따른 열전달량



[그림 8] 공기비별 입열에 따른 배기손실열량

나타났다.

4. 결론

1. 메탈파이버 버너는 $8,000 \text{ kW/m}^2$ 이상의 고부하 연소가 가능하며, 연소기의 설계기술에 의해서 버너의 경적소음 제거가 가능하다.

2. 화염내 설치한 수관에 의해서 화염의 연소 특성은 미연소성분의 발생이나 전열관의 국부과열이 발생하지 않으며, 유독성 공해물질인 NO_x 는 현저하게 저감한다.

3. 연소시스템의 공기 및 가스의 유동 불안정에 의해 심한 맥동이 동반되면 CO 배출이 급격히 늘어난다.

4. 적정 공기비에서 열전달이 가장 잘 이루어지는 관군 배열은 TYPE A 열교환기이다.

5. 일반적인 연소공간을 갖는 보일러의 구조와 비교하였을 때 연소실 공간이 없게 설계함으로써 보일러의 크기가 대폭 줄어든다.

참고문헌

- (1) Y. Ueda et al, Development of tube-nested boiler furnaces for jaggy fire ball combustion, J. of JSME, Vol. 59, No. 561, pp. 1733~1738, 1993
- (2) K. Kurimoto et al, Development of compact type boilers for next generation, boiler kenkyu, No. 266, 1994.6.
- (3) S. Ishigai et al, Jaggy fireball in tube-nested combustor : An advanced concept for gas-firing and its application to boiler, HTD-Vol. 199, Heat transfer fire and combustion

systems, ASME, pp. 189-195, 1992.

- (4) K. Kurimoto et al, Development of ultra low NOx and compact boiler utilizing premixed combustion, boiler kenkyu, No. 275, 1996.2.