

중유보일러용 3단 저NO_x 버너의 연소특성 실험

김혁주*, 박병식*, 이승수†, 김종진*, 최규성*

Experimental study on the combustion characteristics of 7 MW-3 air stages low NO_x combustion system for a heavy-oil firing boiler

Hyouck-Ju Kim, Byoung-sik Park, Sung-Soo Lee, Jong-Jin Kim, Gyu-Sung Choi

ABSTRACT

Experiments were performed to investigate the characteristics of combustion of 7MW-3 air stages combustion system for a heavy oil firing boiler. Several fuel nozzles were developed for the purpose of lowering pollutions in another institute and Φ -jet nozzle among them was equipped to the combustion system. A variety of combustion phenomena were observed as air stage ratio, air fuel ratio and load are changed for each nozzle. Main combustion characteristics are shape of flame, NO_x and CO generations, smoke scale number. Through lots of adjustments, the combustion system reaches such goals as the low NO_x of 160 ppm, CO of 300 ppm corrected at O₂ of 4% and dust of 150 mg/Sm³.

Key Words : 삼단 버너, 개도올, 다단비, Φ -jet nozzle, NO_x, CO, smoke scale

1. 서론

화석연료의 주 사용처인 보일러에서 중요한 기술 개발 대상은 환경적인 측면과 에너지 절약 측면이다. 그 중에서도 가장 큰 문제는 국내에 가장 널리 활용되고 있는 중유 보일러(B-C유 점유율 83.1%)에서 NO_x 배출량이 규제치(250ppm(4%O₂))를 상회(250~350ppm(4%O₂))하고 있으며, 이는 현행의 환경규제치를 상회하고 있으며, 2005년부터는 신규보일러를 중심으로 규제치가 더욱 강화될 예정이다.

국내에 도입되는 중유용 증기분무식 저 NO_x 버너는 영국의 Hamworthy사나 Johnzink TODD 사, 일본의 NFK, 미국의 CE, B&W 등의 것이 많은 데 본 연구 대상 범위인 중소규모는 주로 유럽 쪽의 제품이며, 중유연소 시 220 ppm 전후의 배출량을 보증하고 있으며, 이는 국내의 환경 기준치를 만족하는 수준이다.

국내의 저 NO_x 연소기술의 연구실적은 기업체에서 수행한 저 NO_x 버너나 소형 가스 버너에 대한 것이 몇 가지 있으나 주로 가스버너 위주의 연구결과로서 학교나 연구소를 중심으로 수행되었다.

대용량 보일러에 사용되는 중유버너는 100% 증기 분무식인데, 증기분무식 버너는 10 ton/h 규모이상의 보일러에 적용되는 경우가 많다. 일반적으로 중유를 연소시키는 것은 상당히 어렵기 때문에 주로 완전 연소시킬 수 있도록 하는 데에 중점을 두어 왔다. 그러나 NO_x의 발생을 억제하

* 한국에너지기술연구원 열병합보일러연구센터

† ssl@kier.re.kr

기 위한 방법은 연소를 억제시키는 메카니즘이 적용되기 때문에 CO 또는 분진이 많이 발생되어 서로 상반되는 관계를 갖는 경우가 많다. 따라서 저 NOx 버너의 구조는 일반 버너에 비하여 그 구조가 다소 복잡해지고 정교한 가공 및 제어가 필요하다.

저NOx화에 적용된 기술은 주로 공기공급을 2단 또는 3단으로 다단계 공급하는 경우가 일반적이며, 연소가스의 자기 재순환에 의한 연소용 공기의 희석에 의해서 화염온도를 낮게 유지하는 방법을 병행하는 것이 있다. 특히 연소 안정과 관련된 보염구조는 NOx의 생성특성과 밀접한 관계를 갖으며, 화염의 분산과 연소효율에 미치는 영향이 크기 때문에 특히 정교한 설계가 요구되는 부품이다.

NOx 저감 기술에 대한 기초 연구는 가스연료를 위주로 이루어졌지만 주로 크게 문제가 되는 것은 가스에 비해서 저질연료의 경우로서, 국내의 경우에는 선진국의 버너 기술을 모방하는 수준으로 위에서 제기한 정도의 허용기준을 만족시키는 버너의 경우에는 기업화로 연결되지는 못하고 있는 실정이다. 특히 산업용 보일러에서 고부하 연소, 에너지 효율적 연소, 미연분(CO, Dust) 등의 또 다른 유해물질 배출 문제를 해결하면서 저 NOx화하는 방법은 용이하지 않다. 따라서 많은 시행착오적인 방법이 요구된다.

본 연구에서는 지금까지 사용되고 있는 Y-jet 노즐 또는 내부혼합식 노즐을 대신할 수 있는 새로운 2유체 분사노즐을 개발하여 저 NOx연소에 적합한 분무류의 설계가 가능하도록 하였다.

버너의 스케일업을 위하여 20MW 연소용량의 연소시험용 보일러를 설계 제작하였으며, 동시에 7MW 용량의 비교적 큰 용량의 공기 3단연소 방식의 버너 시제품을 설계 제작하였다. 부하, 공연비, 다단비 등을 변화하며 연소현상을 관찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 연소시험용 보일러

버너의 연소특성을 조사하기 위해서는 실제 사용하는 환경과 유사한 연소로는 필수적인 구비조건이다. 보일러의 구조에 따라서 연소기의 설계가 좌우되기도 하고, 연소기의 화염 특성에 따라서 보일러 연소실의 구조를 결정하기도 하는 보일러의 연소실과 연소기의 특성은 상호 밀접한 연관성을 갖는다.

본 연구에서 7MW 용량의 버너의 연소특성을 평가하기 위해서는 보일러의 용량도 이에 맞는 화

염크기를 수용할 수 있도록 연소실의 크기를 결정하고, 발생열을 처리할 수 있어야 하며, 또한 버너의 저 NOx화 연구에 필요한 다양한 조건변화가 가능한 구조를 염두에 두고 20MW 용량의 실험용 보일러를 제작하였다.

실험용 보일러 설계 시에 고려된 내용은 시제품 버너의 설치가 용이하고, 각종 유량, 온도, 배가스 성분 분석이 가능하고, 화염의 육안 관측과 화염온도의 측정이 용이한 구조 등이다.

보일러의 구조를 실제 사용되고 있는 구조로 설계하여 보일러 운전상에서 발생하는 제반 조건들과 유사하게 운전조건을 가져감으로서 버너 시제품의 저 NOx화 개발 결과가 실용화될 수 있도록 하고자 하였다.

Fig.1은 20 MW 실험용 보일러와 연소 실험 장면을 예시한다.

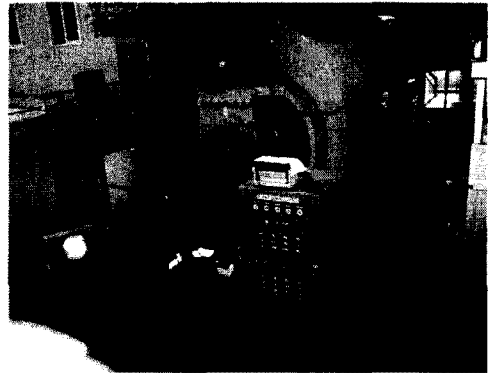


Fig.1 20MW test boiler

2.1.2 7MW 버너

액체 연료용 버너의 성능을 좌우하는 것은 주로 액체연료를 미립화시키는 분무노즐과 이 분무류가 잘 연소될 수 있도록 공기류를 혼합시켜 주는 에어레지스터 부분이다. 본 연구에서 지향하는 저 NOx화 기술도 크게는 이 두 부분의 구조설계를 통해서 달성될 수 있을 것으로 판단하고 있으며, 특히 다단계의 공기공급 유로 설계를 통해서 thermal NOx 생성의 절대적인 원인인 화염온도를 저하시킴과 동시에 상충되는 관계인 완전연소를 달성할 수 있도록 했다.

연소용 공기 공급계통의 연소용 공기를 3단으로 공급하는 구조로 설계하였으며, 1차 공기 공급영역에서는 적정하게 공기부족 상태를 유지하여 화염온도의 상승을 억제시키고, 2차 공기 공급구를 통해서는 다소 적은 유량의 공기를 보내서 연소를 지원하며, 3단 덕트를 통해서는 화염의 중심부에서 먼 곳에 공기를 공급하도록 하여 미처 연

소되지 못한 것을 완전연소에 도달하게 하는 것이다.

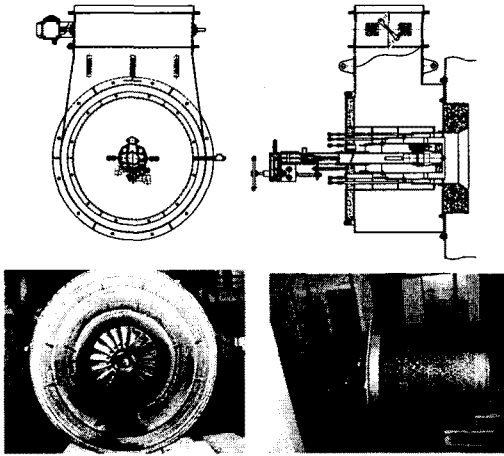


Fig.2 7 MW 3 stages burner

버너의 설계에 있어서 중요하다고 판단되는 것은 화염의 보염효과, 연료의 저공기비의 안정적인 연소, 2차 및 3차 공기의 공급량에 따른 저 NOx 연소특성 등이며, 이들은 스윌러를 포함하는 1차, 2차, 3차 연소용 공기 공급 구조에 의해서 결정된다. 연소에 필요한 공기량을 부하에 따라서 적정하게 변화시킬 수 있도록 공기 공급계통에는 연료량과 공기량을 개별적으로 조정하도록 별도의 콘트롤 모터를 사용하여 공기량을 연료량과는 독립적으로 조정하게 하였다. 그러므로 일정한 연료량에서 공기비 변동에 따른 연소특성 파악이 용이하게 하였다. 이렇게 조절된 공기가 버너 내부에서는 1차는 스윌러 부분을 통과하는 것, 2차는 3차 영역 분리격벽과 스윌러가 이루는 틈을 영역, 분리된 3차 영역을 통해서 공급되도록 하였다. 스윌러로 공급되는 공기는 공기류를 선회시켜서 재순환영역을 형성함으로써 화염이 버너 선단에서 안정적으로 연소가 지속되게 하는 것으로서 스윌러의 직경 및 스윌 베인의 각도가 매우 중요하다.

2차 영역을 통해서 공급되는 공기는 주 연소영역에 공급됨으로서 연료의 완전연소와 화염온도를 결정짓게 된다. 통상 이 영역은 고온영역으로서 NOx 형성이 대부분 여기에서 이루어진다고 보는데 이 부분의 연소상태를 공기가 부족한 환원염을 적정하게 형성하고자 하는 것이다. 3차 영역은 2차 영역에서 채 연소되지 못하고 지나가는 연소가스에 새로운 공기를 공급하여 완전 연소될 수 있게 하는 것으로서 연소공간을 보다 넓게 사용함에 따라 고온부위의 집중현상을 완화시키고자 했다.

2.1.3 Φ -jet nozzle

본 연구에서 6개의 Hole를 가진 분무각 $\theta=74^\circ$ 인 새로운 형태의 노즐인 Φ -jet 노즐(판통형 노즐)을 설계, 제작하였다.

2유체 분사노즐의 분사특성은 액체공급관 직경(DF), 공기공급관 직경(DA), 혼합실의 형상 및 직경(DM), 액체와 기체의 접촉 후 노즐 내에서의 혼합 길이 등에 따라 변화된다.

Φ -jet 노즐의 경우에 액체의 유량은 Mixing orifice의 직경이 커질수록 증가하는 것을 보이고 있고, 액체의 분무압력에 대해 공기압력이 증가할수록 감소하는 성향을 보인다.

액체의 압력이 일정할 때는 공기의 압력이 증가할수록 평균이 입경이 작아지는 경향을 보였다.

기존 내부혼합식 노즐과 Y-jet 노즐과 비교할 때, SMD와 분산도, 분무각 측면에서 가장 나은 성능을 지닌 Φ -jet 노즐을 개발하여 채택하였다.

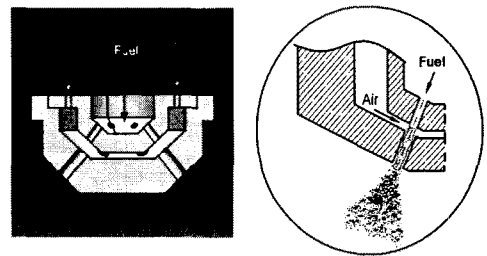


Fig.3 Φ -jet nozzle

2.1 실험방법

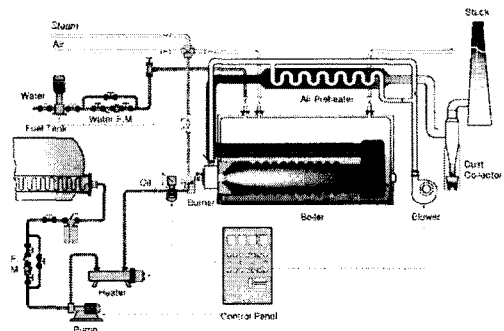


Fig.4 Schematics of experimental setup

Fig.4는 본 연구를 위해서 제작한 20MW 실험용 보일러에 각각 적용된 실험장치의 개략도이다. 장치는 크게 6개의 부분으로 나눌 수 있다. 우선 실험용 보일러를 들 수 있으며, 버너의 연료 및

공기 공급계통, 분무용 증기 공급계통, 보일러의 급수 및 배수계통, 배가스 성분 분석장치, 온도 및 유량 계측장치 등을 들 수 있다.

실험용 보일러는 노통연관식 증기 보일러를 제작하였는데 연소실은 연소량이 다소 큰 경우에도 실험이 가능하게 설계하였다.

연료 공급 계통은 서비스 탱크에서 중력에 의해 스트레이너를 거쳐 연료유량계를 통해서 펌프에 중유와 경유가 공급되며, 펌프에서 가압된 연료는 중유의 경우에 중유예열기에서 적절한 온도로 가열되어서 버너에 공급된다. 연료배관에는 유량 및 온도를 측정하는 센서가 설치되어 있으며, 각 물리량의 측정치는 data acquisition system에 의해서 자동으로 측정되도록 구성하였다. 연료유량 조절은 부하조절용 콘트롤 모터에 의해서 구동되는 연료조절 밸브에 의해서 조절되며, 연료의 공급 및 안전 차단은 솔레노이드 밸브에 의해서 이루어진다.

분무용 증기공급 계통은 별도의 보일러에서 공급되는 증기를 사용하거나 자체로 생산되는 증기를 사용할 수 있는 구조로 설계하였으며, 증기를 사용할 수 없는 경우를 고려하여 압축공기를 분무용으로 사용할 수 있도록 설계하였다.

공기 공급계통은 송풍기, 공기예열기, 덤퍼 및 덤퍼 모터 등으로 구성되며, 공기유량의 측정은 연소 배가스의 분석에 의해서 가능하고, 송풍기 출구, 공기 예열기를 거친 후 덕트에 온도센서를 설치하였다. 각 단의 공기량의 조절은 수동으로 이루어지며, 공기의 예열온도 변화는 공기예열기 및 바이패스 덕트를 각각 통과하는 유량비를 조절하여 가능하게 하였다.

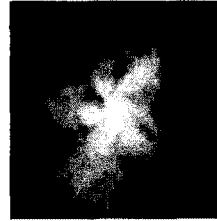
급수계통은 연수기를 통과한 상수는 수조에 저장되고, 펌프의 구동에 의하여 보일러 내에 공급된다.

실험용 보일러의 연소성능실험에서 주된 측정 항목은 공기비, 연소가스 온도의 위치별 변화, 배가스 성분(NO_x , CO , CO_2 , O_2 , 분진), 압력손실, 화염의 안정성 및 형상, 연료유량 및 급수유량, 보일러 및 열교환기 위치별 온도 변화 등이다.

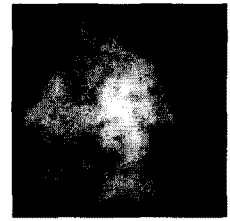
3. 실험결과

3.1 화염 형상

Fig. 5,6,7은 부하율을 100%, 62%로 변경시켜 가면서 1차, 2차, 3차 덤퍼 개도율이 각각 10%, 20%, 30%일 때 몇 가지 산소농도에 대해서 촬영한 화염의 사진이다.



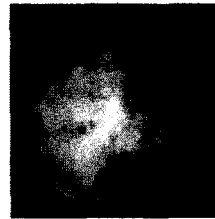
(a) O_2 4.1 %



(b) O_2 2.4 %

Fig.5 1'st = 10 : 2nd=30 : 3rd=30 at a load of 100%

부하율 100%에서 화염은 산소농도가 높을수록 노중심부에서 밝은 화염이 관찰되었다.



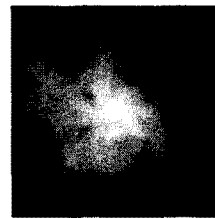
(a) 10 : 30 : 30



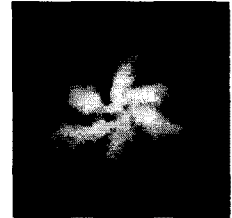
(b) 10 : 20 : 30

Fig.6 3.1% of O_2 at a load of 100%

Fig.6는 2단에서 공기공급비를 30, 20%변화시켰을 때 화염의 변화를 나타낸다. 2단의 개도율을 30%로 할 경우 화염의 밝은 부분이 한쪽으로 치우친 형상을 보인 반면 20%에서는 중심부에서 대칭적인 형상을 보이고 밝은 부분이 더 크게 나타났다. 이는 2단으로 흐르는 공기의 양을 줄여 공기의 속도가 내려가 분무기류를 중심부로 치우치게 하는 경향이 줄어들었기 때문이다.



(a) Load 100 %



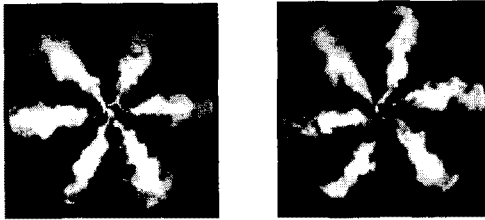
(b) Load 62 %

Fig.7 3.1% of O_2 at 10 : 20 : 30

Fig.7은 두 부하율, 100%와 62%에 대해서 다만 비를 10:20:30으로 고정하고 산소농도를 3.1%로 하여 연소할 경우의 화염의 차이를 나타낸다. 부하율 62%에서 연소에서는 노즐의 홀 갯수만큼 6개의 분지된 화염을 볼 수 있다. 부하율이 낮을수록 보일러 후면의 관측창에서 관찰되는 화염 현상은 선명하고 뚜렷했다.

100% 부하율에서 화염은 배가스 산소농도 3% 상태에서 3차 덤퍼를 10% 변화시킨 경우에 큰

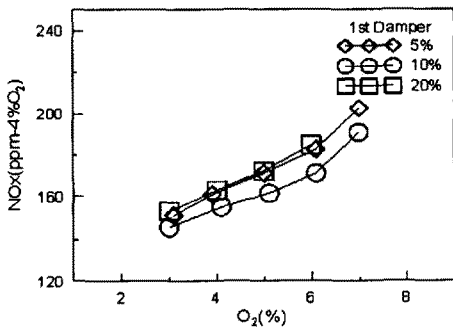
차이가 나타나지 않았다. 부하율 25% 때는 Φ -jet 노즐 6개의 구멍에서 나오는 분무류의 연소현상이 뚜렷하게 나타난다. 2차, 3차 댐퍼를 약간씩 닫아서 1차 댐퍼의 통과유량을 많게 할수록 화염이 더 뚜렷해지는 것을 알 수 있다. 25% 부하율에서 과잉산소농도가 4.0%이하에서도 연소상태가 양호했다.



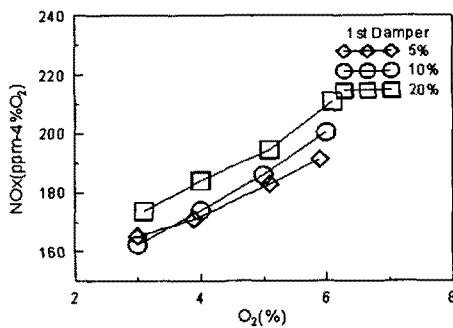
(a) 20 : 30 : 30 (b) 50 : 30 : 0
Fig.8 4 % of O₂ at a load of 25 %

3.2 연소 특성

3.2.1 NOx 발생



(a) Load 71 %



(a) Load 100 %

Fig.9 NOx generations at load of 71 and 100 %

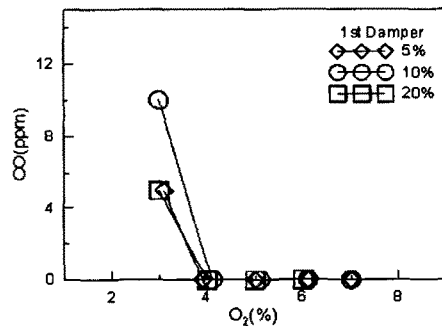
Fig. 9는 부하율 71과 100%에서 2차와 3차 댐퍼

의 개도율을 30%로 하고 1차 댐퍼의 개도율을 변화시킬 때 NOx 발생량을 나타낸다. 발생량은 4% 과잉공기비에 대해서 환산된 값이다.

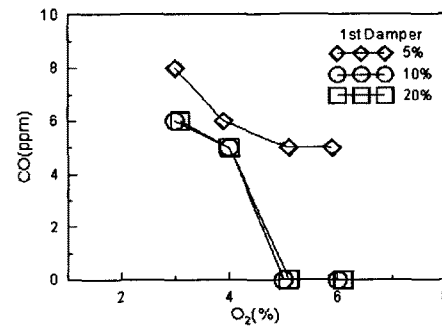
71% 부하율에서 배가스 산소농도를 3%에서 7.5%까지 변화하는동안 댐퍼 개도율에 따라서 NOx 발생량은 1차 댐퍼의 개도율이 높을수록 발생량이 증가하나 편차는 크지 않았다. 배가스 산소농도가 3%때 NOx 발생량은 150 ppm 정도가 되었으나 7.5%에 이르면 200 ppm에 도달했다.

100% 부하율에서는 개도율에 따른 발생량의 경향은 유사하지만 산소농도 3%에서 160 ppm을 상회하였다. NOx 발생량을 160 ppm 이하로 낮추기 위해서 배가스 산소농도를 3% 이하로 유지해야 한다.

3.2.2 CO 발생



(a) Load 71 %



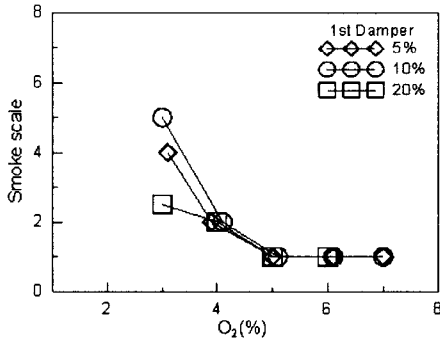
(b) Load 100 %

Fig.10 CO generations at load of 71 and 100 %

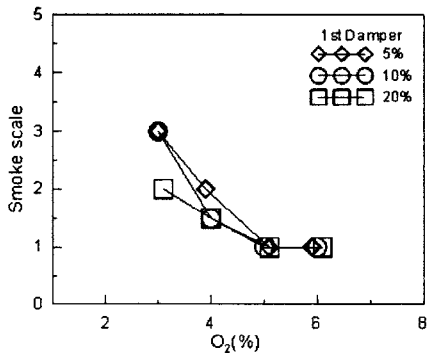
Fig.10은 위와 같은 연소조건에서 CO의 발생량을 부하율에 대해서 비교했다. 71% 부하율에서 1차 댐퍼의 개도율이 10%이고 산소농도가 3%인

연소 조건에서 10 ppm 발생하였으나 4% 이후에는 거의 발생하지 않았다. 100% 부하율에서는 1차 댐퍼의 개도율이 5%에서 CO는 줄어들지 않고 이외의 조건에서는 산소농도 5% 이후부터 배출되지 않았다.

3.2.3 Smoke scale number



(a) Load 71 %



(b) Load 100 %

Fig.11 Smoke scale numbers at load of 71 and 100 %

Smoke scale은 연소시에 연료의 불완전 연소에 의해 발생하는 분진의 양을 계량하는 한 척도로써, CO와 유사하게 과잉공기비가 높아질수록 낮아지는데 71% 부하율에서 1차 댐퍼의 개도율이 10%에서 5로 가장 높고 4% 이후에서는 1차 댐퍼의 개도율에 상관없이 동일하게 줄어들었다.

4. 결론

중유 연소 버너에서 NO_x 발생량을 줄이기 위

해서 3단 공기 공급 버너를 설계하여 부하율, 다단비 그리고 과잉공기비를 변화시킬 때 연소현상에 대한 실험을 수행하였다. 화염의 형상은 배기가스 중 산소농도가 높고 부하율이 낮을수록 연소시험용 보일러의 후면에서 관찰되는 화염이 선명하고 뚜렷해지는 경향을 나타내며 공기량이 적어질수록 흐려지고 전면의 화염이 가려지는 현상을 보였다. NO_x 발생량의 경우 배기가스중 산소농도가 커질수록 증가하는 경향을 보이고 1차 댐퍼의 개도율이 높을수록 발생량이 증가하나 편차는 크지 않았다. 부하율이 클수록 발생량은 전체적으로 컸으며 160 ppm 이하로 유지하기 위해서는 배기가스중 산소농도를 3% 이하로 유지해야 한다. CO는 10 ppm 이하로 낮게 발생하였고 전체적으로 산소농도가 증가할수록 감소하였다. Smoke scale은 CO 발생량의 경향과 유사하게 산소농도가 클수록 감소하는데 산소농도 3%에서 부하율 71%에서는 5, 그리고 부하율 100%에서는 3의 최대값을 가지고 1차 댐퍼의 개도율이 클수록 낮게 발생하였다.

후기

본 연구는 산자부 지원 하에 수행한 중유보일러용 기류분무식 저NO_x 연소시스템의 개발 과정의 일환으로 수행되었고 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Crawford A. R., Manny E. H., and Bartok, W., Field Testing: Application of Combustion Modifications to Control NO_x Emissions from Utility Boilers, U.S. EPA Report No. EPA-650/2-74-066, NTIS-PB-237-344/AS, 1974
- [2] Cato G. A., Muzio L. J. and Shore. D. E., Field Testing: Application of Combustion Modifications to Control Pollutant Emissions from industrial Boilers-Phase II, U.S. EPA Report No. EPA-600/2-76-086a, NTIS-PB-253-500/AS, 1976
- [3] Michelfelder S., Leikert K. and Chughtai. J., Experiment with Full Scale Staged Mixing Burners for NO_x Reduction from a 700MW Power Station and Considerations upon Their Application for In-Flame Desulphurization, in Proc. of the US-Duch Int. Symp., Maastricht, Netherlands, 1982.