

100kW용량 상용 가스버너의 배가스 재순환 연소특성

김경래*, 김혁주**, 박병식**, 김종진**

한국에너지기술연구원

Combustion Characteristics of 100kW Commercial Gas Burner by F.G.R.

Kyung-lae Kim*, Hyouck-ju Kim, Byung-sik Park, Jong-jin Kim

Korea Institute of Energy Research

1. 서 론

보일러는 여러 가지 열원으로부터 열매체인 물을 가열하여 여러 가지 형태의 에너지로 전환하는 가장 일반적인 산업설비의 하나이다. 최근 보일러에서 배출되는 다양한 배출물질 가운데 온실가스인 CO₂의 저감을 위한 논의들이 전세계적으로 이루어지고 있으며, 산성비의 원인이 되고 있는 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)의 배출은 많은 환경파괴의 부작용을 낳고 있어서 대단히 중요한 관심의 대상이다.

대기 중에 존재하는 질소산화물로서는 NO, NO₂, N₂O, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅ 등이 있는 것으로 알려져 있으나 연료의 연소에 의해서 생성되는 것은 NO와 NO₂이고, 이들을 총칭하여 질소산화물(NO_x)라고 한다. 보일러 등의 연소설비에서 발생하는 NO_x는 NO가 90~95%(용적)으로 대부분을 차지한다.

대기중의 질소분자나 연료중의 질소화합물이 고온 화염중에서 산화되어서 발생하며, 발생초기에는 거의 대부분이 NO 상태이지만 대기 중으로 배출되면 대기중의 산소에 의해서 서서히 NO₂로 산화됨으로서 대기 오염의 문제가 된다. NO₂는 대단히 위험한 성분으로 대기중에 50 ppm 정도 존재하면 생체에 죽음을 초래하는 것으로 알려져 있고, 0.05~0.2 ppm의 낮은 농도에도 호흡기 장애를 일으킨다.

연소과정에서 발생하는 NO_x는 연소온도에 의해서 형성된다고 알려진 Thermal NO의 저감에 관한 것으로서 연소최고 온도의 저감을 목표로 하고 있다. 배가스 재순환에 의한 방법은 이러한 원리를 이용한 저 NO_x 연소방법의 하나이다. 연소배가스의 일부를 재순환 송풍기에서 흡입하여 연소용공기의 덕트 중에서 혼합되고, 그 혼합기를 연소용공기로서 버너에 공급하도록 되어 있다.

이 배가스 재순환장치의 경우에 연소배가스와 혼합된 공기(혼합기)는 보통공기에 비하여 산소농도가 낮고 불활성가스의 농도가 증가한다. 이 경우에 배가스 재순환량이 증가될

수록 혼합기 중의 산소농도는 더욱 저하되고 불활성가스의 농도는 증대된다. 따라서 배가스 재순환은 배가스의 일부를 연소용 공기에 혼합시킴으로서 연료와 산소의 급격한 혼합을 억제시켜 완전한 연소와 동시에 가스유량의 증대로 인하여 불활성가스의 흡수열량도 증가하기 때문에 전체적으로 화염의 국부최고온도와 화염의 평균온도를 저하시켜 Thermal NO_x저감에 큰 효과가 있다.

배가스 재순환장치의 재순환가스량을 표시하기 위한 몇가지 방법이 있지만, 일반적으로 공기량에 대한 배가스 순환량의 체적비(%)를 배가스 재순환율이라는 용어로 정의하여 사용하고 있다. 이 배가스 재순환율은 다음과 같이 표시된다.

$$\text{배가스재순환율(\%)} = \frac{\text{재순환 배가스의 체적유량 (Nm}^3\text{/h)}}{\text{연소용 공기의 체적유량 (Nm}^3\text{/h)}} \times 100$$

2. 실험장치 및 방법

배가스 재순환 보일러의 연소특성을 파악하기 위해서는 연료 및 공기 유량의 변화와 연소실 내부에서 일어나는 화염의 특성 변화, 연소용 공기 및 배가스 조성을 측정해야 한다.

본 절에서는 실험용 설비인 보일러 및 연소기의 특성과 관련되는 실험장치의 구성 및 방법에 대해서 개략적으로 설명하고자 한다.

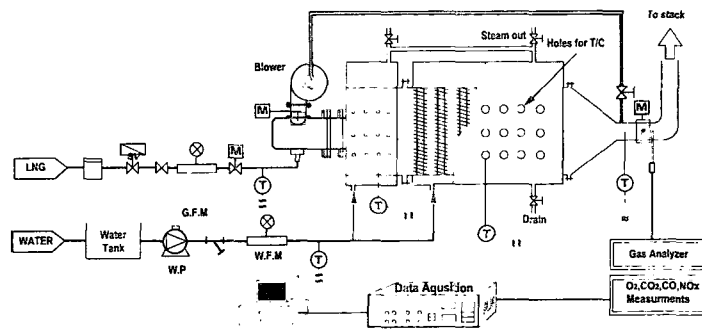


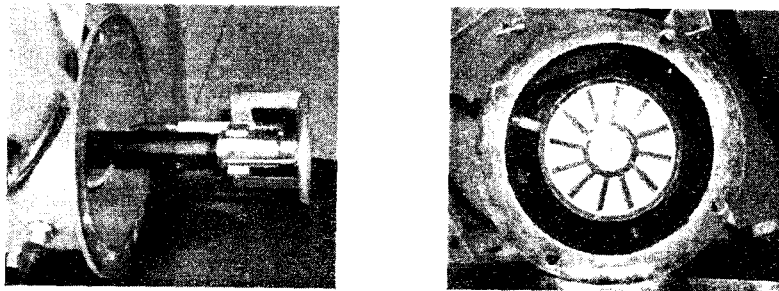
Fig. 1 Schematic of test system

Fig. 1은 실험장치의 개략도이며, 장치는 크게 5개의 부분으로 나눌 수 있다. 우선 실험용 보일러, 버너를 들 수 있으며, 버너의 연료 및 공기 공급계통, 열교환기의 급수 및 배수 계통, 배가스 성분 분석장치 등을 들 수 있다.

실험용 보일러는 증기발생 보일러이며, 사각 수관식 구조로서 실험실에서 사용할 수 있으나 약 100kW용량의 저압 증기를 배출한다. 보일러는 연소공간이 있는 워터 자켓과 수관으로만 구성된 두 부분으로 분리하여 제작하였다.

보일러에 공급되는 연료 및 공기의 공급계통에는 각각의 유량 측정장치, 유량을 조절하는 장치 등 연소조건을 적정하게 조절할 수 있는 구조이다. 맞출 수 있도록 구성하였다. 특히 시험용 보일러의 연소성능실험에서 주된 측정 항목은 공기비, 연소가스 온도의 위치별 변화, 배가스 성분(NO_x , CO , CO_2 , O_2), 압력손실, 혼합공기의 농도 연소실내 온도분포 등을 들 수 있다.

실험용 버너는 국내에서 제작한 소형가스 버너로서 연소량은 최대 100kW(약 10만 kcal/h)이다. 일반 상업용 가스버너를 수정하여 배가스 재순환 연소가 가능하도록 구성한 것으로서 배가스 굴뚝에서부터 덕트를 설치하여 일체형 송풍기의 측벽에 있는 흡입구를 통해서 배가스가 연소용 공기와 혼합되어 보일러 내로 들어가도록 구성하였다. 재순환연소 버너는 송풍기, 공기량 제어용 댐퍼모터, 풍압 스위치, 화염검출센서, 공기조절용 댐퍼 등으로 구성되어 있으며, [사진 2-3]은 버너 내부구조로서 보염기, 점화기 및 연료가스 배출구 등의 구조를 나타내고 있다.



(a) 측면

(b) 정면

Fig. 2 Configuration of test burner

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 버너 연소량 45, 75, 105 kW에 대해서 공기비 변화에 따른 NO_x 및 CO 배출량을 측정된 결과이다. 가스용 버너의 화염온도가 비교적 낮기 때문에 보일러의 NO_x 발생량이 높지 않지만 O_2 4%로 환산한 NO_x 배출량은 공기비 및 연료량의 증가에 따라서 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과는 버너의 배가스 재순환을 적용하지 않은 경우이다. 전반적으로 NO_x 배출량이 40ppm 이하로서 낮게 나타나는데 이는 버너의 특성이 고부하 화염이 아닐뿐만 아니라 화염의 크기가 작아서 보일러 수관으로의 열전달에 의한 화염의 냉각이 빠르게 진행되는 것에 원인이 있다.

이때 배출되는 CO 의 농도를 나타낸 것으로서 버너의 과잉 산소농도가 4~6% 인 경우에 낮게 나타나며, 버너의 과잉공기가 줄어들거나 늘어나는 경우에도 CO 발생이 증가하는 전형적인 현상을 나타내고 있다. Fig. 4는 실험용 버너의 화염 및 가스 온도분포 특성

을 나타낸 것이다. 화염 전반부의 온도는 1500°C 근처의 고온부위가 존재하지만 수관열에 의한 열회수로 인하여 온도가 급격하게 하락함을 알 수 있다.

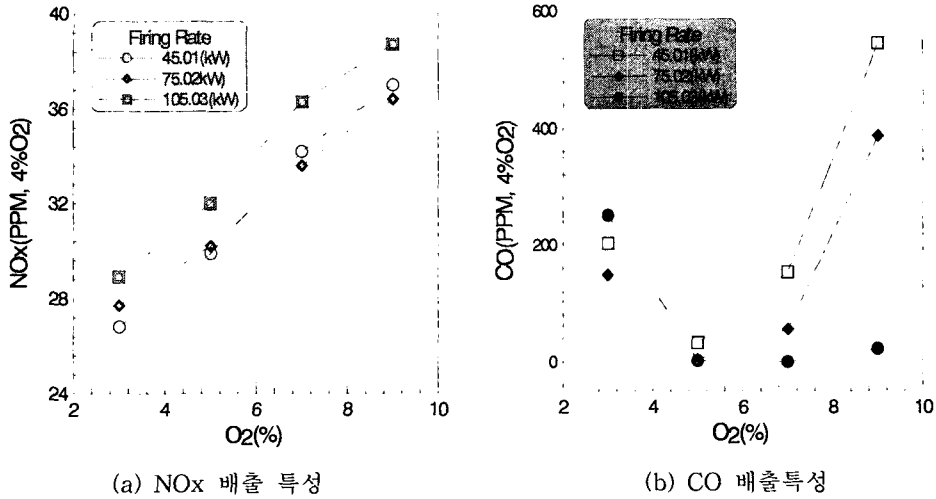


Fig. 3 NO_x and CO emission due to excess O₂ without FGR

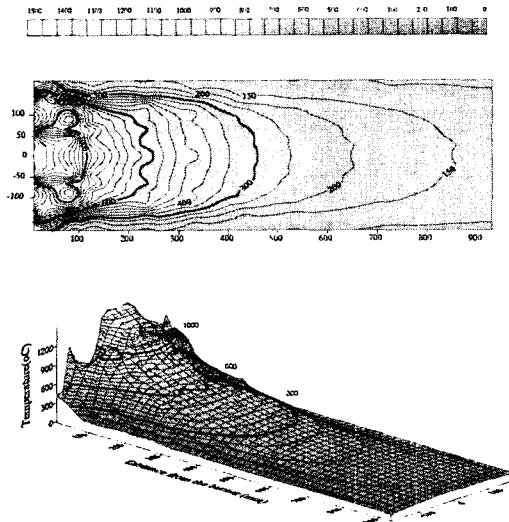


Fig. 4 Temperature distribution of flame and combustion gas in furnace

Fig. 5는 연소량이 35kW인 경우 배가스 산소농도에 따른 연소용 공기 산소농도 별 NO_x 및 CO 배출 특성을 나타낸 것으로서 공기비가 증가함에 따라서 환산 NO_x는 증가하는 경향을 나타내지만 그 변화 폭은 연소용 공기의 산소농도가 작아질수록(재순환율이 증가할수록) 작아짐을 알 수 있으며, 순수공기연소(재순환율이 0%)일 때 변화 폭이 가장 크

게 나타났다. 한편 재순환 배가스에 의한 연소용 공기의 산소 농도의 변화는 NOx의 생성에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 연소용 공기의 산소농도가 낮아짐에 따라서 급격하게 NOx가 감소하는 것으로 나타나 있다.

이와 같은 현상은 Fig. 6의 연소량이 35kW인 경우 재순환율에 따른 공기비 별 NOx 배출 특성을 나타낸 그래프에 의해서 더욱 확연하게 알 수 있는데, 재순환율이 20% 이상으로 증가함에 따라서 보일러의 NOx 배출량이 급격하게 줄어들어서 최대 70%이상 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 연소량을 58kW로 증가시킨 경우인 Fig. 8에 있어서도 같은 경향을 나타내고 있다. 따라서 일반적으로 배가스 재순환이 NOx 생성을 억제하는 것은 뚜렷하게 알 수 있다.

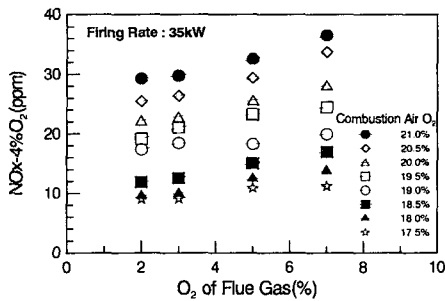


Fig. 5 NOx emission due to excess O₂ with FGR(capacity 35kW)

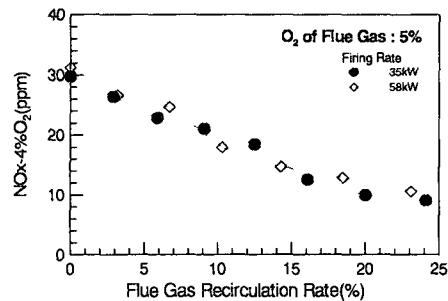


Fig. 6 NOx emission due to FGR rate (excess O₂ 5%)

Fig. 7, 8은 연소량 35kW, 58kW 때 배가스 재순환에 의한 NOx 및 CO 배출특성을 동시에 나타낸 것으로서 재순환량의 증가에 따라서 NOx 배출량은 크게 감소하지만 상대적으로 CO 배출량은 급격하게 증가하는 경향을 나타낸다. 본 실험에 사용한 상용 소형 가스 버너에 있어서 연소량이 NOx 생성량에 미치는 영향은 그다지 크지 않게 나타나고 있다.

그러나 일반적으로 이 때 연료가스의 반응 지연에 따른 화염크기의 증가가 발생하고 이에 따른 미반응 연료가스가 존재하여 미연분의 증가를 초래할 수 있는데 그 대표적인 측정인자가 CO이다. Fig. 7, 8에 나타난 재순환율에 따른 과잉공기별 CO 배출 특성은 본 실험용 버너의 성능은 과잉공기가 적은 영역에서, 그리고 재순환량이 증가함에 따라서 CO 배출량이 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 우선 버너의 연소성능이 전유량 범위에 걸쳐서 양호하지 못하다고 말할 수 있으며, 연소기에 부착된 송풍기의 용량이 많이 부족하여 정격 유량의 연소범위에 대해서는 재순환 연소실험이 어렵고, 연소실 내의 형상이 버너에서 수관까지의 거리가 충분하지 않은데 반해서 화염이 매우 긴 특성을 갖기 때문에 화염이 수관에 충돌하여 냉각됨에 따라서 CO의 생성을 촉진하였을 가능성이 매우 크다. 따라서 차후에는 연소실의 크기를 증가시키고 송풍기의 용량을 충분하게 하여

실험을 수행하고자 한다.

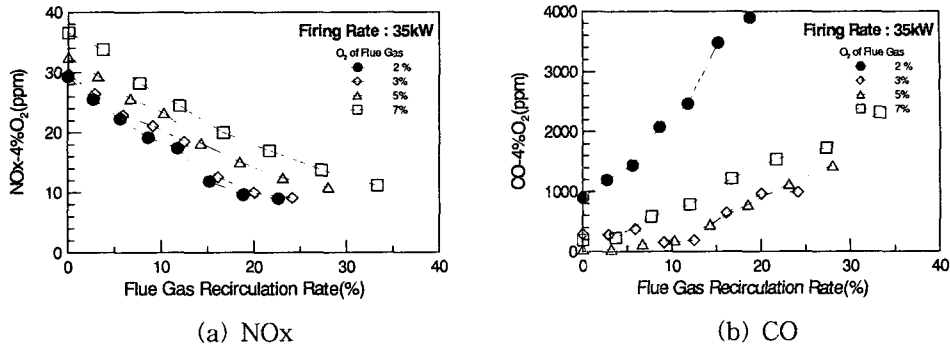


Fig. 7 NOx and CO emission due to FGR rate and excess O₂ (capacity 35kW)

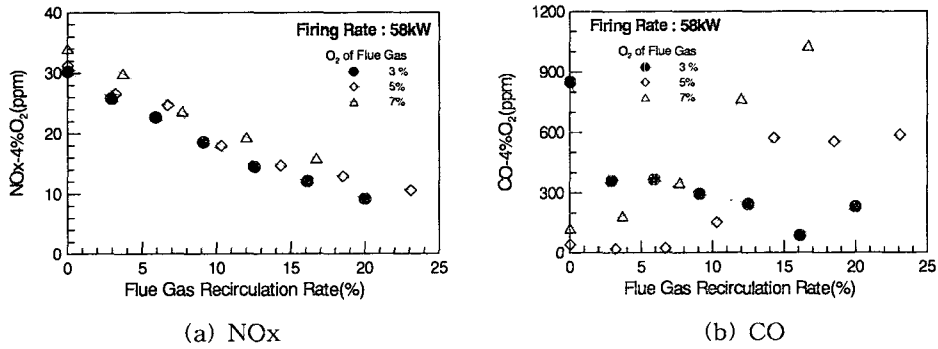


Fig. 8 NOx and CO emission due to FGR rate and excess O₂ (capacity 58kW)

4. 결론

보일러에 적용되는 저 NOx 기술의 하나로서 배가스 재순환에 의한 소형 상용 가스버너의 적용 가능성에 대한 연소실험을 수행하였다. 저 NOx화를 위한 연소기술을 개발하기 위한 장치의 설계 및 연소특성 실험, 저 NOx 연소시스템을 구성하여 성능을 분석한 결과를 통해서 살펴본 결과, 가스 보일러에 있어서 배가스 재순환에 의한 NOx의 저감은 연소기의 특성에 따라서 크게 다르지만 배가스 재순환량이 20% 정도에 이르면 최대 70% 정도의 열적 NOx의 저감이 일어나며, 재순환량이 증가함에 따라서 CO의 배출량이 증가함을 알 수 있었으며, 적절한 CO배출을 유지하기 위하여는 버너의 설계의 개선 및 송풍기의 풍량 증가가 필수적이다.