

미분탄 저 NOx 버너 개발을 위한 실험적 연구

박주식, 한웅, 김성완, 최상일, 이익형*
 한국에너지기술연구소, 한국중공업(주)*

Empirical Studies on the Pulverized Coal Combustion for Developing the Low NOx Burner.

Chu-sik Park, Woong Han, Sung-one Kim, Sang-il Choi, Ik-hyung Lee*
 Korea Institute of Energy Research, Korea Heavy Industries & Construction Co.*

1. 서론

연료 중 질소 함유량이 상대적으로 낮은 기체 및 액체 연료의 연소에서는 thermal NOx의 제어가 중하게 다루어지는 반면 1~2wt%의 질소 함유율을 갖는 미분탄의 연소에서는 연료 중 질소의 산화 생성물인 fuel NOx의 효율적인 생성억제와 환원이 low NOx burner의 개발에 있어 관건이 된다.

미분탄에 함유되어 있는 질소성분을 함유 형태별로 휘발분 질소(volatile-N)와 석 질소(char-N)으로 구분할 수 있다. 휘발분 질소는 미분탄의 탈 휘발과정에서 탄화수소화합물로 구성되는 휘발분의 방출시 함께 방출되는 질소성분으로 정의되며 석 질소는 탈 휘발과정에서 석에 잔존하게 되는 질소성분으로 정의된다.(Fig. 1) 이러한 휘발분과 질소성분의 방출

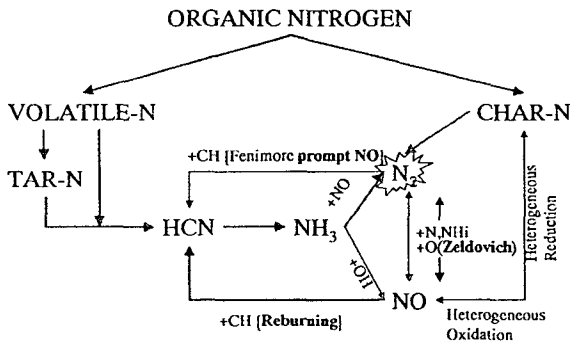


Fig. 1 Fate of fuel-N in coal combustion

율은 가열분위기에 따라 상이한 결과를 보여준다. 일반적으로 휘발분과 질소성분의 방출율은 저속 가열상태에서 이루어지는 미분탄의 공업분석 결과보다 급속가열상태에서 증가하는 것으로 알려져 있다.

저 NOx 버너를 이

용한 질소산화물 방
출 저감은 휘발분과
화 중의 일부 질소
성분이 방출되는 연
소초기 영역에서 휘
발분과 질소성분의
방출율과 산화, 환원
반응에 대한 효과적
인 제어로 달성되어
진다.(Fig. 2)

본 연구에서는 저
NOx 버너 개발을 위
하여 기존 저 NOx

Fig. 2 Concept of low NOx burner

버너 제품에 도입된 개념들에 대하여 조사하였으며 이들 개념들에 대한 검증
을 위하여 DTF(Drop tube furnace)를 이용한 기초 연소실험과, 분출조
건을 다양하게 조절할 수 있는 개념 검증용 버너를 제작하여 연소시험을
수행하였다. 기초연소실험과 개념 검증용 버너 연소시험의 결과를 분석하
여 NOx 방출을 효과적으로 저감할 수 있는 주요 연소 인자를 선별, 최적
화하는 작업을 수행하였다. 앞서 얻어진 결과들을 토대로 하여 독창적인
형태의 저 NOx 버너를 설계하였으며 버너에 대한 성능 평가 연소시험을
수행하였다. 본 발표에서 저 NOx 버너 개발을 위하여 수행된 일련의 연구
과정과 결과를 간략히 설명하고자 한다.

2. 실험

먼저 DTF를 이용한 기초실험에서는 미분탄 연소실험, 탈휘발 실험, 다
단 연소실험등이 수행되었다.(Fig. 3) 이들 실험에서 사용된 미분탄 시료는
Alaska탄이었으며 200-400mesh로 체분리된 시료를 사용하였다. 시료의 공

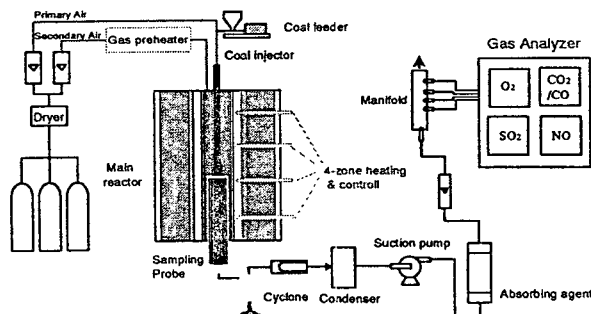


Fig. 3 Schematic diagram of DTF

급속도는 평균 0.5g/min이었으며, 연소실험과 다단연소실험에서는 압축공기를 분위기 가스로 사용하였으며, 탈 휘발실험에서는 Ar 가스가 사용되었다. 분위기 가스의 공급속도는 3.0 l/min이었다. 또한 각 실험에서는 반응거리를 조절하여 체류시간의 변화에 따른 각각의 특성변화를 밝히고자하였다.

DTF 실험의 결과는 각 실험 조건에서 포집된 촉와 생성가스의 분석으로부터 얻어진다. 수 냉각 probe에 연결되어 있는 1차 포집기(cyclone)와 2차 포집기(thimble filter)에 의하여 촉가 먼저 분리 포집되고 생성가스는 on-line으로 O₂, CO, CO₂, NO, NO_x, SO₂분석기로 보내어진다. 각각의 포집된 촉에 대하여는 원소분석과 공업분석을 수행하여 이들 결과로부터 연소효율, 휘발분을 포함한 가연성분의 방출을 결과들을 산출할 수 있었다.

개념 검증용 버너와 저 NO_x 버너 연소시험은 700 ID x 3000 L(mm)의 시험 연소로에서 수행되었다.(Fig. 4) 미분탄 공급량은 30kg/hr이었다. 개념

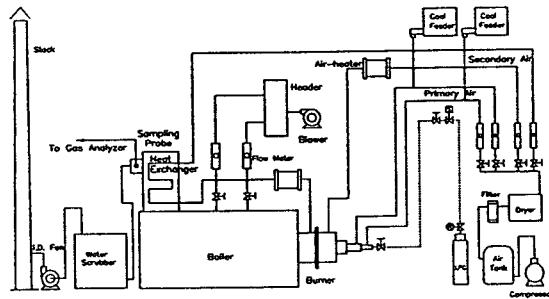


Fig. 4 Schematic diagram of test furnace

검증 연소시험에서는 Quarl 형상 변화, 석탄 공급비 변화(center/outer), 배가스 산소농도 변화, 1/2차 공기비 변화, 1,2차/3차 공기비 변화, 2차공기 swirl강도 변화 등이 검증을 위한 주요 시험변수로 선정되었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 1500℃ DTF 연소실험에서 반응거리에 따라 측정된 NO_x 농도를 산소농도 6%로 환산하여 나타낸 그림이다. 반응거리 5cm에서 이미 많은 양의 질소산화물이 생성되었음을 보여준다. 공기비 1.126인 경우 반응거리가 증가함에 따라 NO_x 농도 또한 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이에 반하여 공기비 1.0 이하인 연소조건에서는 반응거리의 증가에 따라 반응거리 5cm에서의 NO_x 농도보다도 낮은 값을 보여주고 있어 NO_x가 환원되어지고 있음을 알 수 있다. 특히 공기비 0.75이하의 연소조건에서는 NO_x의

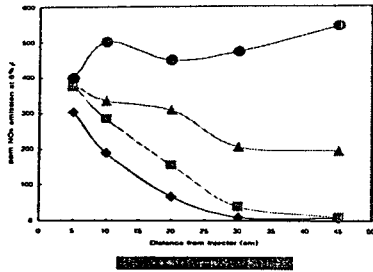


Fig. 5 Variation of NOx emission in DTF combustion (1500°C)

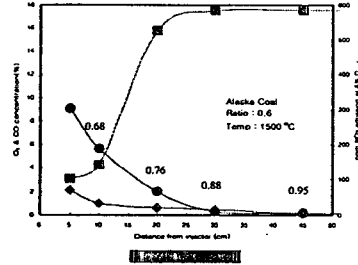


Fig. 6 Variation of NOx & CO emission in DTF combustion (1500°C)

방출농도가 급격히 감소되고 있음을 보여준다.

Fig. 6은 공기비 0.6의 연소조건에서 NOx, CO, O2의 농도변화를 비교하여 나타낸 것이다. 반응거리 10cm에서 공급된 대부분의 산소가 반응에 의하여 소진되고 있음을 보여주며 이후로 CO농도는 급격하게 증가함을 보여준다. NOx농도 변화 곡선에 표시한 수치는 동일 조건에서 분석된 연소 효율을 나타낸 것으로 반응거리 10cm 이후에서도 연소가 지속적으로 진행되어짐을 보여주고 있다. 따라서 NOx의 환원은 부분연소에 의한 환원성분 위기 하에서 생성된 CO 및 활성탄화수소의 산화반응에 기인한 것으로 판단할 수 있다.

이상의 미분탄 연소실험으로부터 NOx의 방출 저감은 연소 초기의 공기비를 1.0이하의 낮은 공기비로 유지하는 것에 의하여 달성될 수 있음을 보여준다. 그러나 낮은 공기비에서의 연소는 연소효율의 저하를 가져오기 때문에 추가공기의 공급을 필요로 한다. 따라서 연소효율을 증가시키고 추

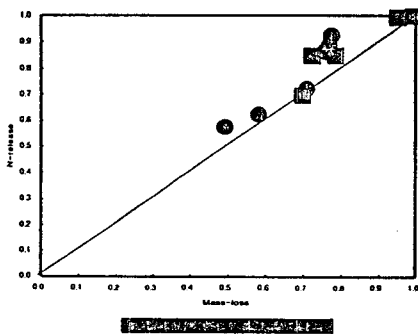


Fig. 7 Comparison of fuel-N release from devolatilization and combustion test.

가 NOx 생성을 억제할 수 있는 추가공기 공급위치의 선정과 연소초기 적정 공기비 설정이 효율적인 NOx 저감을 위하여 무엇보다 중요함을 알 수 있다.

Fig. 7은 탈 휘발실험과 공기비 0.6의 연소실험에서 얻어진 최악의 원소 분석으로부터 얻어진 연료 중 질소 성분의 방출율과 최악의 무게 감소를 비교하여 나타낸 것이다. 전반적으로 fuel-N release는 mass-loss에 비례함을 보여주고 있다. 탈 휘발 실험의 경우 휘발 초기단계에서 약

60%정도의 질소 성분이 석탄 입자로부터 방출되고 있음을 보여주고 있으며 체류시간의 증가에 따라 mass-loss는 80%, N-release는 90%까지 방출됨을 보여준다. 실험에 사용된 미분탄 시료의 공업분석에 의한 휘발분 함량이 43wt%인 것과 비교할 때 급속가열상태에서는 1.4~1.9배의 mass-loss가 발생함을 알 수 있다.

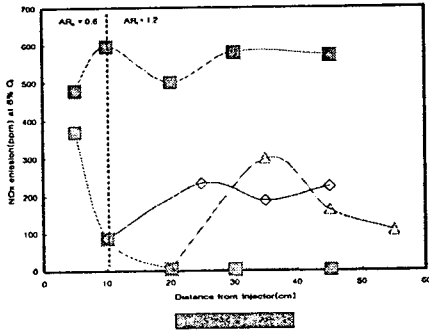


Fig. 8 Comparison of NOx emission from air staged and non-air staged combustion.

Fig. 8은 초기 공기비를 0.6으로 고정하고 반응거리 10cm 이후에 추가로 공기를 공급 전체 공기비를 1.2로 맞춘 다단 연소의 경우와 단일 연소에서 NOx 농도변화를 비교하여 나타낸 결과이다.

다단 연소의 경우 추가 공기 공급에 따른 좌의 연소진행으로 인한 NOx의 증가 결과를 보여준다. 그러나 최종 NOx 방출농도는 200ppm 이하로서 단일 연소와 비교하여 400ppm정도가 감소된 결과를 보여주었다.

동일 조건에서의 연소효율은 공기를 추가로 공급한 시점 이후로 증가하여 단일 연소분위기에서의 결과와 큰 차이가 없었다.

DTF를 이용한 기초 연소실험과 개념 검증 연소실험으로부터 다단 연소가 NOx 방출을 저감하기 위한 가장 중요한 개념임을 확인 할 수 있었다. 본 연구에서는 이러한 결과들을 재현할 수 있는 저 NOx 버너의 설계에 있어 버너 침단에서 연소분위기를 촉진시키는 구조, 환원 영역 이후에 3차 공기가 유입되는 구조에 주안점을 두었다.

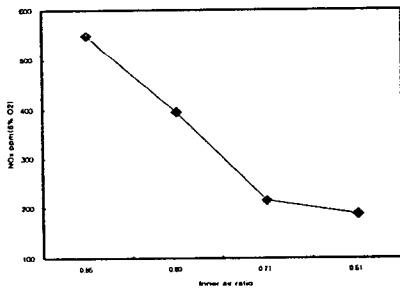


Fig. 9 NOx emission plotted against primary air ratio

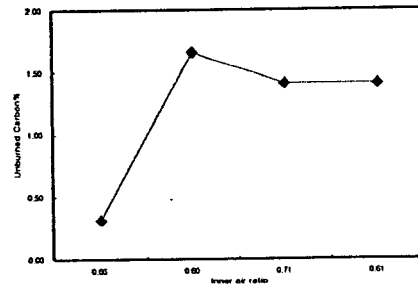


Fig. 10 Unburned carbon plotted against primary air ratio

Fig. 9과 Fig. 10은 저 NO_x 버너 성능 평가 연소시험에서 얻어진 대표적인 결과이다. 이들 결과는 1차 공기변화에 따라 나타낸 결과로서 전체 공기비는 1.14이었다. 공기비가 0.71로 낮아짐에 따라 NO_x 방출농도는 급격하게 감소하며 이후 감소폭이 둔화됨을 알 수 있다. 동일 조건에서 미연 탄소분의 함량은 공기비가 0.8이하로 감소함에 따라 증가하였지만 비산화 중 미연탄소분 함량은 약 1.5wt%로서 매우 높은 연소효율 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 우수한 평가 결과는 연소초기 저공기비 하에서 미분탄 입자와 연소용 공기의 급속 혼합을 가능하게 하는 선회흡, splitter등의 구조와 최적의 다단 연소조건을 구현한 diffuser의 설계에 기인한 결과로 판단된다. 현재 자체 설계한 저 NO_x 버너 구조에 대하여 특허 출원 중이다.

4. 참고문헌

1. L. L. Baxter, R. E. Mitchell and R. H. Hurt, *Energy & Fuels*, 10, 188-196, 1996
2. W. X. Wang and K. M. Thomas, *Energy & Fuels*, 10, 409-416, 1996
3. A. C. Bose, K. M. Dannecken and J. O. L. Wendt, *Energy & Fuels*, 2, 301, 1988
4. T. Abbas, M. Costa, P. Costern, S. Godoy, F. C. Lockwood, J. J. O. C. Romo-Millares and J. Zhou, *Fuel*, 73, 1423, 1994
5. R. P. Vander Lans, P. Glarborg and K. Dam-Johansen, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 23, 349, 1997
6. L. K. Chan, A. F. Sarofim and J. M. Beer, *Combustion and Flame*, 52, 37(1983)
7. H. Yamashita and A. Tomita, *Energy and Fuels*, 7, 85(1993)
8. W. A. Hahn and F. Shadman, *Combustion Sci. and Technology*, 10, 89(1983)
9. J. A. Muholland and R. E. Hall, *J. of Eng. for Gas Turbines and power*, 109, 207(1987)