한국에너지공학회(2004년도)
춘계 학술발표회 논문집 P263-268

분무노즐 형상 및 운전조건 변경에 따른 10MWe급 중유화력 보일러의 NOx 배출 특성

김태형, 서상일, 김영주
한전 전력연구원 발전연구실

NOx reduction characteristics in the 10MWe class heavy-oil power boiler according to atomizer modifications & operation conditions

Tae-Hyung Kim, Sang-Il Seo, Ypung-Ju Kim
Power Generation Research Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

1. 서론

화석연료 연소시 보일러 내에서 발생하는 질소산화물(NOx)은 대부분 NO와 NO_2이며, 일반적으로 NOx의 95% 이상은 NO 형태로 존재한다[1,2]. NO는 무색, 무취의 유독성 가스이고, NO_2는 부식성과 강한 악취를 가지며 광화학 반응을 일으키는 환경오염물질로서 황산화물(SOx)과 함께 산성비와 스모그의 주원인 물질로써 이를 저감하기 위한 많은 연구가 시도되었다[3-6].

NOx를 저감하기 위한 기술에는 연소전에 행하는 연료탈질 또는 연료교체 방법, 연소중에 행하는 연소개선 방법, 연소 후에 행하는 배연탈질 방법으로 크게 나눌 수 있으며, 운영중인 기존설비에 적용하기 쉽고 경제성을 고려할 경우 연소개선에 의한 방법이 매우 합리적이다.

유류용 버너 분무노즐의 기하학적 형상은 연료유의 분무특성(분산도, 분사각, 분무입경, 연료분무량, 분사매체량 등)과 연소특성에 영향을 미치는 중요한 인자로 알려져 있으며, 버너 분무노즐의 기하학적 형상 변화와 운전조건 변경 등의 방법을 적절히 이용할 경우 연소시 배출되는 연소가스의 조성 성분에 변화를 줄 수 있다[7,8].

따라서 본 연구에서는 연소개선에 의한 방법으로 NOx를 저감하고자 분무노즐 형상과 운전조건을 변경하여 10MWe급 발전용 보일러에서 실험을 수행하였다.

2. 이론

연소 중에 발생되는 NOx는 반응된 질소의 종류와 질소를 산화시키는 화학반응에 의해 공기중의 질소분자가 고온상태에서 산화되어 발생하는 Thermal NOx, 연소시 연료에서 발생되는 탄화수소기가 연소용 공기중의 질소분자와 반응하여 생성되는 Prompt NOx 및 연료중에 포함된 질소 성분이 연소 과정에서 산화되어 발생하는 Fuel NOx로 나눌 수 있다.

일반적으로 Thermal NOx의 발생기구는 Zeldovich에 의해 제시된 반응식($O+N_2 \leftrightarrow NO+N$, $N+O_2 \leftrightarrow NO+O$, $N+OH \leftrightarrow NO+H$)으로 설명될 수 있다. 고온에서 O_2가 2O로 분리되어, 이 산소원자가 공기중의 질소분자와 반응하여 NO를 생성하고 동시에 질소원자를 생성하며 이것이 다시 공기중의 산소와 반응하여 NO를 생성한다. Thermal NOx의 생성은 주로 (i) 연소온도가 높을 때, (ii) 연소영역에서 산소의 농도가 높을 때, (iii) 고온영역에서 연소가스의 체류시간이 길 때 많이 발생한다고 알려져 있으며, 특히 온도의존성이 매우 크다.

고온의 화염후류 영역에서는 NOx의 생성에 대하여 Zeldovich 기구에 따른 이론과 실험결과가 비교적 잘 일치하고 있지만, 화염면 및 그 근방에서는 Zeldovich 기구 이외의 경로에 의하여 많은 양의 NO가 급격히 생성되는 것이 발견되었다. Fenimore는 메탄-공기, 에틸렌-공기의 예혼합 평판화염에 대하여 실험한 결과 화염대 근처에서 급속한 NO의 생성을 발견하고 이 NO를 Prompt NO라고 하였다. 현재까지의 많은 연구결과 Prompt NOx는 탄화수소계 연료에서만 생성되고 온도, 연료의 종류, 당량비 등에 대한 의존성이 비교적 낮고 연소가스의 체류시간에는 무관한 것으로 판명되었다.

화합물 형태로 연료에 포함된 질소성분이 산소와 반응하여 생성되는 NOx를 Fuel NOx라

고 하며, 연료중 질소의 결합 형태는 각각의 질소가 탄소나 다른 원소와 유기적으로 결합된 형태로 되어 있어, 이중구조의 형태보다 쉽게 끊어지므로 Fuel NOx의 생성속도는 Thermal NOx 보다 빠르게 일어난다. 일반적으로 연료중의 N 성분은 모두 중간생성물 HCN으로 변환하고 이것이 다시 변환되어 화염의 당량비에 따라 NO나 N_2로 발생되게 된다.

3. 실험

3-1 실험 분무노즐 비교

본 실험에 사용된 보일러는 발전용이며 중유전소 옥내 자연 순환형으로 버너가 2단 2열로 총 4개인 전면연소 방식이다. 버너 한 개당 용량은 시간당 920kg이고, 최대 중유 공급압력은 8kg/㎠(운전상한치 6kg/㎠), 최대 증기분무압력은 9.5kg/㎠ (운전상한치 7.5kg/㎠)이다. 기존의 버너 분무노즐은 혼합판(Mixing Plate)과 분사판(Spray Plate)이 한 조로 구성되며, 분사판에는 지름 3.5㎜ 크기의 노즐공이 8개 뚫어져 있고 분사각은 70°로 설계되어 있다. 본 실험을 위해 새로 설계된 버너노즐은 2종류로 하나는 분사각 70°로 기존 분무노즐과 같은 크기의 노즐공 7개와 중심부에 지름 2.6㎜ 크기의 노즐공 1개를 뚫었다(분무노즐 A). 또 다른 분무노즐은 기존 분무노즐과 노즐공 개수와 크기는 같으나 70°와 65°인 분사각이 지그재그를 이루도록 한 것이 특징이다(분무노즐 B).

3-2 실험방법

본 실험에 사용된 운전조건 변경 방법은 Fig 1과 같이 각각의 버너에 부착된 공기 레지스터의 1차 및 2차 공기댐퍼 위치와 버너 건(Gun) 위치를 수동으로 조작하는 방법을 사용하였다. 1차와 2차 공기댐퍼는 0~10의 번호가 새겨진 위치에 조작용 핸들을 위치시킴으로서 각각의 공기 댐퍼 개도를 조절하도록 되어 있다. 여기에서 0번은 공기댐퍼가 완전히 닫혀진 상태이고 번호가 1씩 증가함에 따라 공기댐퍼 개도가 7°씩 증가하여 열리게 됨을 의미한다. 버너 건 위치는 버너 건의 장착 위치를 나타내는 눈금을 지칭하는 것으로 0~22까지 새겨져 있으며, 버너 건이 뒤로 후퇴할수록 값이 커지게 되어 있다. 여기에서 버너 건 장착 위치 0은 버너노즐 끝부분과 버너타일 목부분이 일치할 때의 값이며, 눈금간의 간극은 5mm로 제작 되어 있다. 실험조건에 따른 결과는 2종류의 계측기를 병행 사용하여 배기가스 농도(NOx, CO, O2, Dust)를 측정하고, 제어실의 기록계에 기록되는 Spray Water, Smoke Density, 윈드박스 및 노내압력 값과 보일러 벽면에 부착된 관찰창을 통한 노내 연소상태를 점검하여 종합적으로 운전 지속가능 유무를 판별하였다. 또한 필요에 따라 1단과 2단에 위치한 관찰창을 통해 광고온계를 이용하여 노내 화염온도를 측정하였으며, 단별 노내화염온도 측정위치는 좌측 앞쪽, 버너 정면, 우측 앞쪽과 뒤쪽이며 Fig.2와 같다.

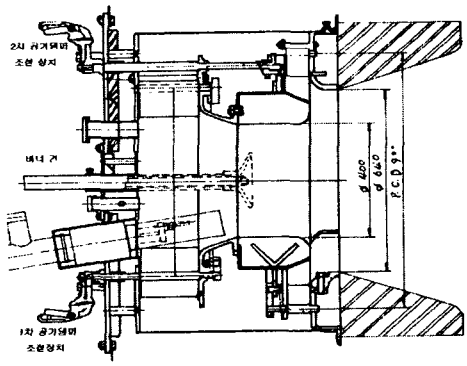

Fig 1 Burner System

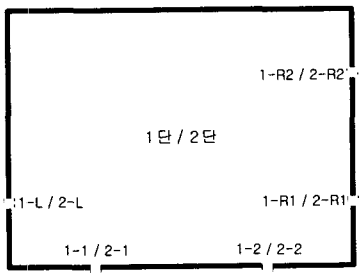

Fig 2 View Port Position

3-3 실험조건

분무노즐 A를 사용한 실험은 기존 분무노즐이 장착되어 운전중인 상태에서 1-2-3-4번 버너 순으로 분무노즐A로 교체되는 버너의 수량을 증가시킴과 병행하여 1차 및 2차 공기댐퍼 위치를 조절하면서 실험을 진행하였다. 실험조건별 공기 댐퍼 및 버너 건 위치는 Table 1과 같으며, 실험조건 1과 2는 1번 버너, 실험조건 3에서 8까지는 1번과 2번 버너, 실험조건 9는 1번, 2번 및 3번 버너 그리고 실험조건 10은 모든 버너에 분무노즐 A를 장착하여 실험한 것이다.

분무노즐 B 실험은 버너 4대 모두에 분무노즐 B를 장착한 후 각각의 버너에 부착된 1차 공기와 2차공기 댐퍼 위치 및 버너 건 위치를 조절하여 실험을 실시하였다. 시험조건별 1차 및 2차 공기댐퍼 위치와 버너 Gun 위치는 Table 2와 같다.

Table 1 Test Condition of the Spray Nozzle A

Test Condition	Primary Damper Position				Secondary Position				Gun Position
	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	9	5	8	5	4	3	4	3	13
2	6	4	9	5	4	2	4	5	13
3	6	4	9	5	4	2	4	5	13
4	5	4	9	5	4	2	4	5	13
5	5	3	9	5	4	2	4	5	13
6	5	3	9	5	2	2	4	5	13
7	9	5	8	5	4	3	4	3	13
8	9	5	8	5	4	3	4	3	13
9	9	5	8	5	4	3	4	3	13

Table 2 Test Condition of the Spray Nozzle B

Test Condition	Primary Damper Position				Secondary Position				Gun Position
	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	7	5	6	4	4	4	4	4	9
2	8	8	5	6	3	2	5	5	8
3	6	5	6	4	4	4	4	4	9
4	6	5	6	5	4	4	4	4	9
5	6	6	6	5	4	4	4	4	10
6	7	5	7	5	4	4	4	4	10
7	7	6	8	5	4	4	4	4	10
8	7	6	7	6	4	4	4	4	10
9	8	5	9	5	4	5	4	4	10
10	7	5	9	5	4	5	5	4	10
11	7	4	8	5	4	4	5	3	8

4. 결과 및 고찰

4-1 분무노즐 A 실험

실험이 진행되는 동안 연돌에 설치된 측정기로부터 NOx와 CO 배출농도 및 산소농도를 동시에 측정하였으며, 측정된 NOx와 CO 배출농도 값은 배기가스 중의 산소농도 4.0%를 기준으로 환산하여 정리하였다. Fig 2에 나타낸 NOx 저감율은 실험전 배출농도와 각각의 실험조건에서 배출된 농도를 비교하여 표현한 것이고, CO는 실험조건별 배기가스 중의 농도이다. 1차 및 2차 공기 댐퍼 위치와 버너 건 위치가 동일하고, 분무노즐 A의 장착 수량이 증가함에 따라 CO 발생이 증가하는 성향을 나타냈다. 이는 노즐이 다르면 적정 운전조건도 달라지는 현상으로 볼 수 있다. 1번과 2번 버너에 버너노즐 A를 장착하고 운전조건을 변화시킨 시험조건4에서 8.3%의 질소산화물 저감율을 보였다. 본 노즐의 경우 노즐 교체 수량이 증가함에 따라 0.1~0.2kg/㎠의 중유공급압력이 상승하였다.

실험조건별 윈드박스 압력과 노내압력 변화는 Fig 3과 같다. 윈드박스 압력은 운전조건이 동일할 경우 분무노즐에 의한 영향을 무시할 수 있으며, 실험조건 1과 7에 비해 실험조건 8과 9의 윈드박스의 압력과 노내압력 차이가 6mmAq 감소했으며, 윈드박스 압력과 노내압력이 운전조건에 따라 달라지는 것으로 나타났다.

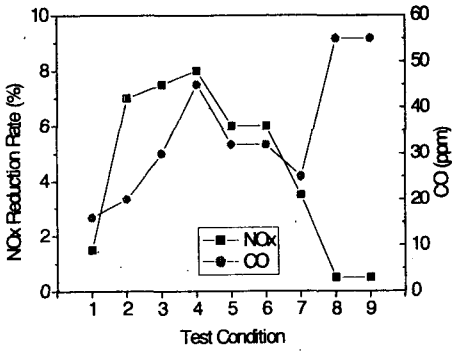

Fig. 3 NOx and CO for Test Condition Using Spray Nozzle A

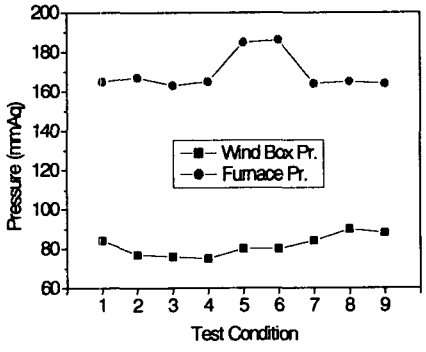

Fig. 4 Wind Box and Furnace Pressure for Test Condition Using Spray Nozzle A

4-2 분무노즐 B 실험

기존의 분무노즐을 분무노즐 B로 교체하고 운전조건을 변경하여 실험을 실시하고, 배기가스 중의 산소농도 4.0% 기준으로 NOx 저감율과 CO 발생량을 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 15% 이상의 높은 NOx 저감율을 나타낸 실험조건은 2, 7, 10 및 11 이었다. 특히 실험조건 11은 NOx 저감율이 18%로 배기가스 중으로 배출되는 NOx가 가장 적었다. Fig 5에서 CO 배출농도가 20ppm을 초과하는 실험조건은 2, 4, 5 및 8 이었으며, 가장 높은 CO 배출농도를 보인 실험조건 2에서도 노내 연소상태는 양호한 것으로 판명되었다. 또한 NOx 저감율이 15% 이상인 실험조건 중에서 시험조건 2를 제외하고는 CO 배출농도가 16ppm 이하로 나타났으며, 매우 적은양의 CO가 발생된 것으로 보아 불완전연소 현상이 거의 심화되지 않는 것으로 판단된다. 실험조건 1에 비해 실험조건 3의 NOx 저감율이 3.3% 증가하였지만, CO 발생의 급격한 증가 현상은 보이지 않았다. 실험조건 7과 8 및 실험조건 9와 10은 CO 변화가 거의 없었지만, NOx 감소율은 각각 3.4%와 3.9%의 차이가 있었다.

실험조건별 윈드박스 압력과 노내압력 변화는 Fig 6과 같다. 윈드박스 압력은 164~200mmAq, 노내압력은 81~94mmAq, 윈드박스 압력과 노내압력과의 차압은 76~109mmAq로 나타났으며, 노내압력 변화가 윈드박스 압력 변화보다 적었다. 윈드박스 압력은 실험조건 1에서 가장 높고 실험조건 4에서 가장 낮았으며, 노내압력은 실험조건 1이 가장 높고 실험조건 2가 가장 낮았다. 윈드박스 압력과 노내압력 차이는 시험조건 3이 가장 높고 실험조건 2에서 가장 낮았다. 실험조건 3은 실험조건 1에 비해 윈드박스 압력과 노내압력이 약간 감소하였고, 두 차압은 소폭 상승하였다. 실험조건 8은 실험조건 7보다 윈드박스 압력이 13mmAq 감소하고 노내압력은 1mmAq 감소함으로서 차압은 12mmAq 상승하였다. 실험조건 4와 실험조건 5를 비교하면 실험조건 5의 윈드박스 압력이 13mmAq 높아지고 노내압력은 8mmAq 높아졌다. 실험조건 10은 실험조건 9에 비해 윈드박스 압력은 3mmAq 상승하고, 노내압력은 1mmAq 상승하였다.

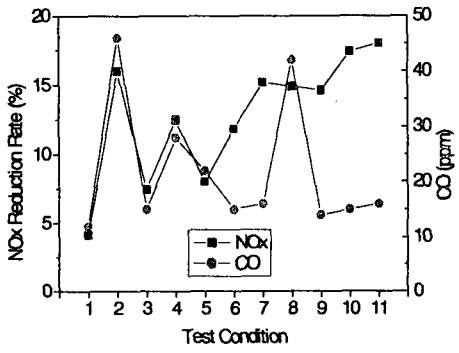

Fig. 5 NOx and CO for Test Condition Using Spray Nozzle B

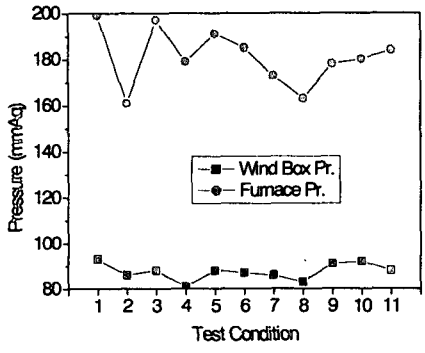

Fig. 6 Wind Box and Furnace Pressure for Test Condition Using Spray Nozzle B

모든 버너에 분무노즐 B를 장착하여 수행한 전체 실험조건 중 몇몇 조건에 대하여 측정된 노내 화염온도에서 운전조건별로 측정된 노내 화염온도 편차는 동일한 측정위치일 경우 1단에서 50~120℃, 2단에서 40~160℃로 나타나 2단에서의 변화폭이 크게 나타났다. 1단에서는 1-L의 온도가 1,370~1,420℃ 범위로 가장 높은 온도분포를 나타냈고, 2단에서는 2-R1의 온도가 1,400~1,440℃ 범위로 가장 높았다. 실험조건 1과 3은 1번 버너 1차공기 댐퍼 위치가 실험조건 1에서 7인 것을 실험조건 3에서는 6으로 변화시키고, 나머지 공기 댐퍼와 버너 건 위치는 동일한 운전조건이다. 실험조건 1의 1단 온도는 890~1,400℃, 2단 온도는 990~1,420℃ 범위이었고, 실험조건 3의 1단 온도는 850~1,410℃, 2단 온도는 1,030~1,420℃ 범위로 측정되었다. 실험조건 1을 기준으로 하여 실험조건 3의 노내 화염온도를 비교하면 1-1, 1-R2, 2-L, 2-4의 온도는 30~50℃ 감소하였고, 1-R1, 2-3, 2-R2 온도는 10~40℃ 상승했으며, 그 외에서는 동일하였다. 실험조건 6의 2번 버너 1차 공기 댐퍼를 5에서 6으로, 3번 버너 1차 공기 댐퍼를 7에서 8로 변화시키고, 나머지 운전조건에 대하여는 변화를 주지 않은 것이 실험조건 7이다. 실험조건 6의 1단 온도는 860~1,390℃ 범위이고, 2단 온도는 990~1,400℃ 범위이었고, 실험조건 7의 1단은 860~1,370℃ 범위이고, 2단 온도는 1,030~1,420℃ 범위이었다. 실험조건 6을 기준으로 실험조건 7의 온도를 비교하면 1-R2는 변화가 없고, 1-L, 1-1, 2-3 온도는 10~20℃ 감소하였고, 그 외에는 10~80℃ 상승하였다. 실험조건 10은 시험조건 9에서 1번 버너 1차공기 댐퍼를 8에서 7로, 3번 버너 2차 공기 댐퍼를 4에서 5로 변화시키고, 나머지 운전조건은 동일하게 유지한 것이다. 실험조건 9의 1단 온도는

910~1,390℃ 범위이고, 2단 온도는 990~1,410℃ 범위이었다. 실험조건 10의 1단은 890~1,390℃ 범위이고, 2단 온도는 1,010~1,420℃ 범위이었다. 실험조건 9를 기준으로 실험조건 10을 비교하면 1-1, 2-L, 2-R1, 2-R2는 10~20℃ 상승했고, 1-R2, 2-3, 2-4는 20~60℃ 감소되고 그 외에는 변화가 없었다.

발전용 터빈에 공급되는 증기온도 조건을 유지하기 위해 사용되는 Spray Water 소모량은 시간당 1.0~2.0톤 이었으며, 대부분의 조건에서 시간당 1.6톤 이상이 소모되었다. 실험조건 1에 비해 실험조건3의 소모량이 시간당 0.2톤 적었고, 실험조건 11은 실험조건 10보다 시간당 0.1톤 많이 소모되었다.

5. 결론

상업용 중유전소 발전용 보일러의 NOx 발생량을 저감시키기 분사각이 70°이고 노즐공이 8개인 기존 분무노즐을 분사각이 70°인 노즐공 7개와 중심부에 기존 노즐공의 지름보다 약간 작은 크기의 노즐공 1개를 분무노즐 중심에 배치한 것(분무노즐 A)과 기존 분무노즐과 노즐공 개수와 크기는 같으나 노즐공의 배열을 분사각 70°와 65°로 지그재그를 이루게 한 분무노즐(분무노즐 B)에 대하여 연소실험을 실시한 결과 분무노즐 B의 NOx 저감효율이 우수하였다.

일반적으로 NOx를 저감하는 운전조건일 경우 CO 증가 현상이 나타나기 쉬우나 CO 발생량을 증가시키지 않으면서 NOx 발생량을 줄일 수 있는 운전조건을 찾을 수 있었으며, 분무노즐 B를 장착하고 적정한 운전조건으로 조절한 경우 NOx 발생량을 18% 저감할 수 있었다.

실험 대상 보일러에 장착된 개별 버너의 연소용 공기량을 조절하기 위한된 공기댐퍼 위치에 따른 연소 특성이 동일하지 않은 것을 알 수 있었으며, 이는 기계적인 특성이 이상적인 설계조건과 다르기 때문으로 판단된다.

분무노즐 A는 기존노즐 사용시에 비해 CO 발생량 증가에 비해 NOx 발생량 저감율이 크지 않아 NOx 발생량을 저감하기 위한 실험 목적에 적합하지 않은 것으로 판단되었으며, 분무노즐 B는 NOx 저감효과가 기존노즐에 비해 매우 우수한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Cernansky, N. P. and Sawyer, R. F. : 15th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, (1974).
2. Hayhurst, A. N. and Vince, I. M. : Progress in Energy and Combustion Science, 6 (1980).
3. R. Perman, Y. Ma and J. McGilvray : "Natural resource and environmental economics", Longman, London (1996).
4. Kramlish, J. and Linak, W. P. : Progress in Energy and Combustion Science, 20 (1994).
5. L. D. Snoot, S. C. Hill and H. Xu : Prog. Energy Combust. Sci., 24, 385 (1998)
6. R. Wilk and A. Szlek : Energy Convers. Mgmt, 39, 1957 (1998)
7. A. H. Lefebvre : "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Co., (1989)
8. J. H Kent and D. R. Honnery : Combust. Sci. and Tech., 75, 167 (1991)