

碩士學位論文

重油火力發電所에서 NO_x 低減
燃焼 技術의 適用事例 研究



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

文 盛 弘

2 0 0 1

碩士學位論文

重油火力發電所에서 NO_x 低減
燃燒 技術의 適用事例 研究

指導教授 許 喆 九



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

文 盛 弘

2 0 0 1

重油火力發電所에서 NO_x 低減 燃燒技術의 適用事例 研究

指導教授 許 喆 九

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2001년 12월

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

環境工學專攻

文 盛 弘



文 盛 弘의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2001년 12월 일

委員長 이 기 호 (인)

委員 허 철 구 (인)

委員 조 은 일 (인)

목 차

I. 서론		1
II. 이론적 배경		3
1. 질소산화물 생성기구		3
1) Thermal NO _x		3
2) Prompt NO _x		8
3) Fuel NO _x		9
2. 질소산화물 저감기술		14
1) 저 NO _x 연소법		14
2) 연소버너 개량법		17
3) 배연탈질법		18
3. 국내화력 발전소의 NO _x 저감설비 현황		20
1) SCR에 의한 배연탈질설비		21
2) SNCR에 의한 배연탈질설비		21
3) 저 NO _x 연소설비		22
III. 연구내용 및 방법		23
1. 연구대상 발전설비		23
1) 발전설비 개요		23
2) 연소설비 특성		25
3) 연구대상 설비에 적용된 NO _x 저감방법 및 효과		27
2. 연구내용 및 방법		29
IV. 결과 및 고찰		32
1. 발전부하 변동에 따른 영향		32
2. 공기비 변화에 따른 NO _x 저감특성		34
3. 배기가스 재순환에 의한 NO _x 저감특성		35

4. 다단연소에 의한 NO _x 저감특성 -----	36
1) 보조공기에 의한 영향 -----	36
2) COFA에 의한 영향 -----	37
3) SOFA에 의한 영향 -----	38
4) COFA & SOFA 동시 운전에 따른 영향 -----	39
5) 발전 부하별 COFA & SOFA Ratio에 따른 영향 -----	41
V. 결 론 -----	43
VI. 참 고 문 헌 -----	45



List of Figure

Fig. 1. Effect of fuel/air Ratio on NO formation. -----	6
Fig. 2. Effect of temperature on NO formation. -----	7
Fig. 3. Calculated equilibrium concentration in CH ₄ -Air flame. -----	7
Fig. 4. Prompt NO _x at C ₂ H ₆ -Air flame. -----	8
Fig. 5. Pathway of fuel Nitrogen conversion. -----	13
Fig. 6. Relationship of excess air and NO _x emission. -----	14
Fig. 7. De-NO _x process of Double-Stage combustion -----	16
Fig. 8. Schematic diagram of SCR. -----	19
Fig. 9. Schematic diagram of SNCR. -----	20
Fig.10. Flow diagram of the power plant on study. -----	24
Fig.11. Flow of flue gas. -----	25
Fig.12. Structure of oil firing system. -----	26
Fig.13. NO _x emissions and in-furnace temperature distributions with load change. -----	32
Fig.14. NO _x emissions and furnace temperature distributions with number of installed burners. -----	33
Fig.15. NO _x emissions with air ratio. -----	34
Fig.16. NO _x emissions with recirculation ratio of flue gas. -----	35
Fig.17. NO _x emissions with Auxiliary air flow ratio. -----	36
Fig.18. NO _x emissions with COFA flow ratio. -----	37
Fig.19. NO _x emissions with SOFA flow ratio. -----	38
Fig.20. NO _x emissions with the flow in case of simultaneous operation of SOFA & COFA. -----	40

Fig.21. In-furnace temperature distributions with simultaneous
operation SOFA & COFA --40

Fig.22. NOx emissions with load change, SOFA and COFA flow. -----41



List of Table

Table 1. Rate constants for Thermal NO formation reactions.	-----4
Table 2. Reaction involving Fuel NO _x formation during combustion.	----11
Table 3. NO _x control method applied to boiler.	-----28
Table 4. Experimental and operating condition for NO _x control test.	---30
Table 5. Measuring item and method.	-----31
Table 6. Combustion air distribution with load change.	-----42



A Case Study on De-NO_x Combustion Technology at Oil-Firing Thermal Power Plants

Sung-hong Moon

*DEPARTMENT OF CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING GRADUATE
SCHOOL of INDUSTRY CHEJU NATIONAL UNIVERSITY*

Supervised by Professor Chul-goo Hu

Summary

Nowadays, as the increase of the use of fossil fuel prompted by the industrial developments, NO_x (NO, NO₂) and SO_x (SO₂, SO₃), which are toxic to human body and formed during the process of fuel combustion, has been one of major cause of air pollution.

Since 70's, SO_x emissions have been in the trend of decline with the installation of preventive equipments and the developments of fuel oil-desulfurization technologies, while NO_x emissions are continuously increasing.

More than 70% of the artificial formations of NO_x are resulted from increasing fuel-firing industrial facilities of large scale such as thermal power plants.

To minimize NO_x emissions, USA, Japan and most European countries have made strict regulation standards on NO_x emissions as early as early 70's and have developed highly sophisticated De-NO_x technologies.

Far from above countries, Korea made regulation standards on NO_x as late as 80's and until now it has been very difficult to find successful application examples of the installation of De-NO_x equipments on general industrial facilities, that's because De-NO_x technologies are highly sophisticated and the cost of construction is too expensive.

The method of NO_x emissions control can be classified as two methods ; Flue Gas De-NO_x method, in which NO_x is directly controlled at the state of flue gas and combustion control method, characterized in the reduction of NO_x formation in the process

of fuel combustion.

On this study, a standard operation model of oil-firing burner for the extensive De-NOx is tested and suggested by searching of optimized De-NOx efficiency through modifications of various combustion conditions

The detailed results from this study are as follows :

1. As the load moved up, the NOx emission concentration showed a trend of increase. And in the same load, as AFR(air-fuel ratio) decreased, the NOx emission concentration was slightly went down. It was concluded that, however, when the AFR was below the actual operation ratio of 1.047, the application of low excess-air combustion method seemed to be limited due to the significant increase of CO formation.
2. When using flue gas recirculation method, at the recirculation percentage of 33%, the NOx emission concentration approached 125ppm. Compared to the recirculation percentage of zero, this indicated De-NOx efficiency of 14%.
3. In case of double-staged combustion method, as the ratio of supplied aux. air to the total supplied air increased, the NOx emission concentration decreased, but De-NOx efficiency was not so big ; the De-NOx efficiency was as low as 7% at the aux. air ratio of 0.12.
4. In case of multi-staged combustion method, when using COFA, with the ratio of COFA-air to the total supplied air indicating 0.12, the De-NOx efficiency was about 27%. When using SOFA, the efficiency went up to maximum 35%, and when incorporating COFA and SOFA simultaneously, 34% of De-NOx efficiency was available.
5. When we compared De-NOx efficiencies of all the De-NOx combustion methods applied to our study, it is shown that that of the multi-staged combustion method was much higher than that of other methods - low excess-air combustion method, flue gas recirculation method, double-staged combustion method.

However, as the ratio of partially supplied air to the total supplied air went beyond certain degree, the objectionable efficiency decrease occurred due to the increase of CO formation. So, determining a optimized AFR value without deteriorating the combustion condition might be of great significance.

I. 서론

오늘날 산업의 발달로 인한 연료의 사용 증가로 배출오염물질이 대기오염의 주요한 원인이 되고 있는 실정이다. 대기오염물질 중의 질소산화물은 황산화물과 더불어 우리 생활환경에 해를 끼치는 물질로 알려져 있다.

대기중에서 검출되는 질소산화물로서는 N_2O (Nitrous Oxide), NO (Nitric Oxide), NO_2 (Nitrogen Dioxide) 등이 있고 이 외에도 NO_3 , N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5 등이 존재하는 것으로 알려져 있으며 이를 통상 NO_x 라 부른다.

이들 NO_x 중 대기중에서 비교적 많이 검출되는 NO 나 NO_2 는 독성이 있고 광화학 반응을 일으키지만 N_2O 는 무독성이며 광화학 반응과 관계가 없기 때문에 N_2O 는 대기중에 상당량 존재하나, 환경오염물질로 간주하지 않으며 NO 나 NO_2 는 인공적으로 발생함에 비해 N_2O 는 대기중에서 자연적으로 발생한다.

이러한 질소산화물(NO , NO_2)은 탄화수소가 공존하고 일사량이 많은 경우에는 광화학 Smog를 생성시키고 산성비의 원인이 되기도 한다.

일반적으로 황산화물과 질소산화물의 배출량은 계속 증가하여 왔으나 1970년 이후 황산화물의 배출량은 방지시설의 개발 및 Oil 자체의 탈황기술의 발달로 감소 추세에 있으나 질소산화물은 계속적으로 증가하는 추세이다.

우리나라의 경우 인위적으로 배출된 질소산화물의 양은 1998년에 1,084천톤으로 발생원 별로 보면 자동차가 47%, 산업 33%, 발전 15%, 기타(난방 등) 5% 순으로 화력발전소에서 배출되는 질소산화물의 양은 연간 167천톤 정도이다.(2000, 환경백서)

질소산화물에 대한 법적 규제는 해당 국가의 사회, 경제 및 정치적인 사정과 오염원의 규모, 지역적 조건, 사용 연료 및 시설의 노후 정도 등에 따라 달리 설정되고 있으며 미국, 일본 및 대부분의 유럽국가들은 70년대부터 규제기준을 정하여 탈질기술을 개발하여 적용하고 있으나, 우리나라는 80년대 법적 규제치를 제정하였으나 탈질기술을 개발하고 방지시설을 설치하기는 거의 없는 실정이다. 향후 국제적인 환경협약에 따른 환경문제 인식, OECD 가입에 따른 국가 위상에 걸맞는 환경문제 제고 등으로 국내배출기준도 독일, 일본 등 선진국과 비슷한 수준까지 강화될 전망이다.

질소산화물의 제어방법은 배기가스로부터 질소산화물을 직접 제어하는 배연 탈질

법과 연소공정에서 질소산화물의 발생량을 억제하는 연소조절법으로 대별된다.

배기가스중의 질소산화물을 제어하는 배연탈질법에는 선택적촉매환원법, 비선택촉매환원법 등이 개발되어 이용되고 있으나 초기시설비 및 운영비가 많이 소요되어 기존 배출시설이나 소규모 연소시설에는 이의 적용이 용이하지 못하다. 반면에 연소조절법은 연소시설의 설비를 개조하거나 연소기술을 개발하여 적절하게 조절 운영하면서 적은 비용으로 질소산화물 배출기준을 만족할 수 있는 효과를 볼 수 있어 소형 발전설비의 보일러나 산업용 보일러의 경우는 탈질설비를 설치하는 것보다 저 NOx 연소설비의 설치와 연소조건 개선을 통하여 질소산화물을 저감시키는 것이 바람직하다고 생각된다.

본 연구는 저 NOx 연소기술을 실제 연소설비에 적용하였을 때 얻을 수 있는 실용적 저감효율을 비교 평가하고 NOx 저감을 위한 최적의 연소조건을 설정하는데 활용될 수 있는 자료를 얻기 위하여 제주화력발전소의 보일러 설비에 NOx 저감 연소기술을 적용하여 질소산화물 발생에 영향을 주는 여러 가지 연소조건 등을 변경하면서 각 조건에서 질소산화물의 발생량과 저감효율을 비교분석 하였다.



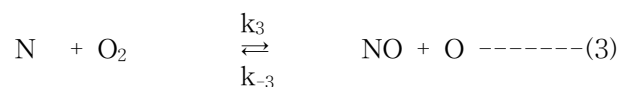
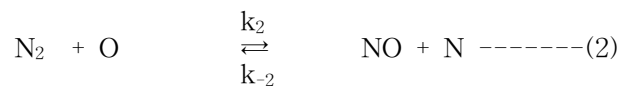
II. 이론적 배경

1. 질소산화물 생성기구

연소과정에서 발생하는 질소산화물은 NO 및 NO₂ 로 통상 NO_x라 총칭하며, 그 생성기구에 따라 분류하면 연소공기중의 질소분자가 고온상태에서 산화되어 발생하는 Thermal NO_x와 탄화수소계 연료에서 화염면 및 그 근방에서 급격한 연소로 생성되는 Prompt NO_x 및 연료중에 포함된 질소성분이 연소시에 산화되어 발생하는 Fuel NO_x로 나눌 수 있다.

1) Thermal NO_x

연소과정에서 대기중의 질소에 의한 NO 생성기구는 많은 학자들에 의해 연구되어 왔으며 이에 관한 최초의 연구는 1946년 Zeldovich에 의해 행하여 졌다. Zeldovich Mechanism이라고 알려진 NO 발생의 주된 반응식은



이며 이 반응식은 연료와 공기의 혼합물이 이론 연료/공기비 부근 또는 연료가 희박한 상태에서 연소될 때 잘 적용된다.

일반적으로 연소가스 중 산소분자는 1700℃ 전후의 온도에서 O₂의 분해반응에 의해 (반응식 (1)) 산소원자를 생성한다. 이 산소원자와 질소분자가 반응하여(반응식(2)) NO를 생성하고 동시에 질소원자를 유리한다. 이 질소원자는 산소분자와 반응하여 (반

응식 (3)) NO를 생성하고 산소원자를 발생시켜 연쇄 반응을 일으킨다. 위 반응식의 정반응과 역반응의 반응상수는 Table 1.에 나타난 바와 같이 많은 실험에 의해 밝혀졌으며 반응식 (2)의 정반응이 높은 활성화 에너지를 가지므로 연쇄반응이 일정속도 반응임을 알 수 있다.

Table 1. Rate constants for Thermal NO formation reactions.

Reaction	Rate Constant(m ³ /mol.s)	Temperature range(K)
N ₂ +O → NO+N	7.6 × 10 ⁷ exp(-38,000/T)	2000~5000
N+NO → N ₂ +O	1.6 × 10 ⁷	300~5000
N+O ₂ → NO+O	6.4 × 10 ³ T exp(-3,150/T)	300~3000
NO+O → N+O ₂	1.5 × 10 ³ T exp(-19,500/T)	1000~3000
N+OH → NO+H	1.0 × 10 ⁸	300~2500
NO+H → N+OH	2.0 × 10 ⁸ exp(-23,650/T)	2200~4500

또한 연료에 대한 산소의 비율이 적어지는 경우 (Rich Burn 경우) 반응식 (3)의 속도가 느려지게 되고 이 상태에서 OH기가 존재한다면 다음 반응도 NO 생성에 기여한다고 Lavoie 등이 제안하였다.



반응식 (2), (3)에 (4)의 식을 포함시켜 Extended Zeldovich Mechanism 이라고 부른다. 반응식 (4)의 반응상수 k₄를



의 반응이 평형상태라는 가정하에서 Campbell과 Thrush는 구하였으며 이와 더불어 질소원자 농도에 대해서 거짓 정상상태 가설 이론을 적용하면 NO 생성속도는

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_2[O][N] \frac{1 - [NO]^2/K[O_2][N_2]}{1 + k_{-2}[NO]/k_3[O_2] + k_4[OH]} \text{-----(6)}$$

로 나타낼 수 있으며 여기서 k₂, k₃, k₄는 각각 반응식 (2), (3), (4)의 정반응 반응상수이며 k₋₂, k₋₃, k₋₄는 역반응의 반응상수이다. 또 K는 K=(k₂/k₋₂)(k₃/k₋₃)이며 총괄반응 N₂ + O₂ ⇌ 2NO의 평형상수이다. 따라서 NO의 생성률은 국부온도와 그때의 국부적

인 O₂, N₂, O, OH의 농도가 주어지고 Table 1.의 여러반응에 대한 반응상수를 식 (6)에 대입함으로써 구할 수 있다. 그러나 여기서 Zeldovich는 실험을 통해서 NO 생성속도는 연소속도 보다 매우 느려서 NO의 생성은 연소가 완전히 종결된 후에 이루어진다는 결론을 내렸으며 따라서 NO 생성과정과 연소과정은 독립적으로 고려될 수 있어 연소반응의 평형상태로부터 NO 생성속도를 계산할 수 있게 된다.

이러한 가정하에서 각 성분에 대한 평형농도와 평형온도를 식 (6)에 대입하면 NO 생성속도 식은 매우 간단해진다. 즉 공기에 비해 연료가 희박한 (Lean Burn) 연소상태에서는 $k_4[OH]_{eq} \ll k_3[O_2]_{eq}$ 이므로 $[NO] \ll [NO]_{eq}$ 인 초기조건에서 NO 생성율은

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_2[O]_{eq}[N]_{eq} \quad \text{-----}(7)$$

가 되므로 산소의 평형농도는 다음식으로 구한다.

$$[O]_{eq} = \frac{k_0}{(RT)^{1/2}} \cdot [O_2]_{eq}^{1/2} \quad \text{-----}(8)$$

여기서 $k_0 = 3.6 \times 10^3 \exp(-31,090/T)P^{1/2}$ 이며 반응 $1/2O_2 \rightleftharpoons O$ 의 평형상수이다. 이 반응은 화염온도가 높고 연료의 농도가 낮을수록 더욱 실예에 가까운 값을 가질 수 있다. 따라서 식 (7)은

$$\frac{d[NO]}{dt} = 6 \times 10^{10} T_{eq}^{-1/2} \exp(-69090/T_{eq}) [O_2]_{eq}^{1/2} [N_2]_{eq} \text{ Mol/m}^3 \cdot \text{sec} \quad \text{-- (9)}$$

이 식 (9)은 NO 생성속도가 온도에 의해서 크게 좌우됨을 보여주고 있다. 즉 고온에서의 체류시간, 산소농도의 제공근에 비례하여 NO의 생성은 증가한다. 따라서 Thermal NOx의 생성은 Fig.1과 Fig.2에서 보는 바와 같이

- 연소영역에서 산소농도가 높을 때
- 연소온도가 높을 때
- 고온영역에서 연소가스의 체류시간이 길 때

증가하게 되며 연료/공기비와 온도를 변화시킬 때 계산에 의해 NO 생성량의 변화를 볼 수 있다.(1994, 제너럴시스템)

온도가 일정할 때 연료/공기비가 감소할수록 즉 공기량이 많아질수록 NO의 평형 농도는 증가하고 있으며 연료/공기비가 일정할 때는 온도가 증가할수록 NO의 평형 농도가 증가하고 있으나 Fig.3에서 보는 바와 같이 실제 연소과정에서는 온도와 당량비는 서로 독립적이 아니어서 NO의 최대농도는 연료/공기비가 이론 연료/공기비 보다 약간 작은 조건에서 나타난다. 이것은 연료와 공기중의 질소분자가 서로 경쟁적으로 산소와 결합하기 때문이다. 다시 말하면 연료의 농도가 약간 높을 경우 연소계의 온도가 최대가 되어지지만 연료에 의해 우선적으로 산소가 모두 소비되어 버린다. 또 연료/공기비가 작아져서 산소농도가 증가할지라도 온도저하로 인한 NO_x 생성 억제효과가 산소과잉에 의한 NO_x 생성 촉진효과를 능가하므로 NO 농도는 떨어진다.

이 그림이 일반적인 연소반응상태와 잘 일치 한다면 NO_x 억제는 이론연료/공기비 또는 그 근방에서 이루어져야 할 것이다. 그러나 대부분의 실제 연소장치에서는 매우 높은 온도이거나 긴 체류시간을 가지지 않는 한 그림에서와 같은 높은 NO 농도를 나타내지 않는다. 아울러 NO_x 생성량에 대한 체류시간의 영향은 매우 희박한 연료/공기비(≈ 0.4)일 경우는 NO 생성속도가 매우 느려서 체류 시간에는 영향을 받지 않는다. 다만 연료/공기비가 0.4 이상일 경우는 체류시간이 길수록 NO_x의 생성은 증가하

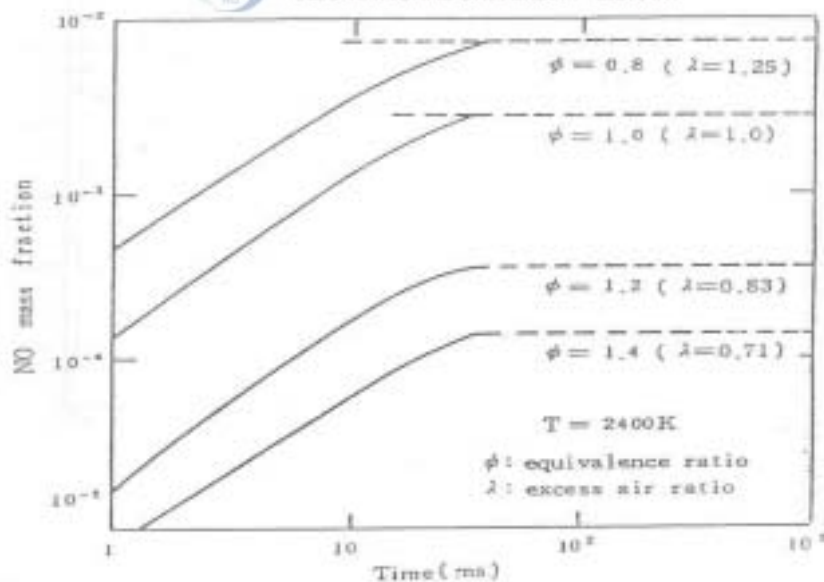


Fig. 1. Effect of fuel/air ratio on NO formation(CH₄-Air mixture).

고 있음을 알 수 있다. Zeldovich Mechanism에 의한 이론과 실험이 잘 일치하는 영역은 고온의 연소가스가 존재하는 화염후류 영역내에서의 NO 생성이다.

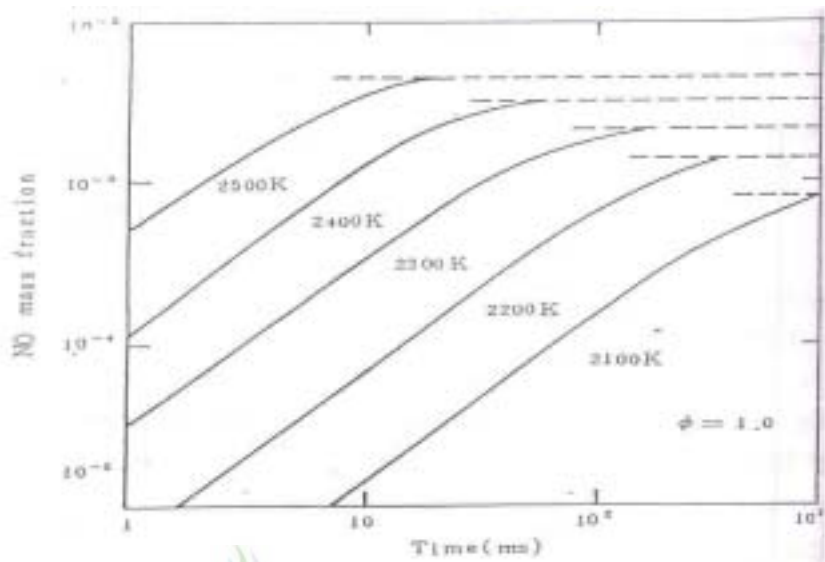


Fig. 2. Effect of temperature on NO formation (CH_4 -Air mixture).

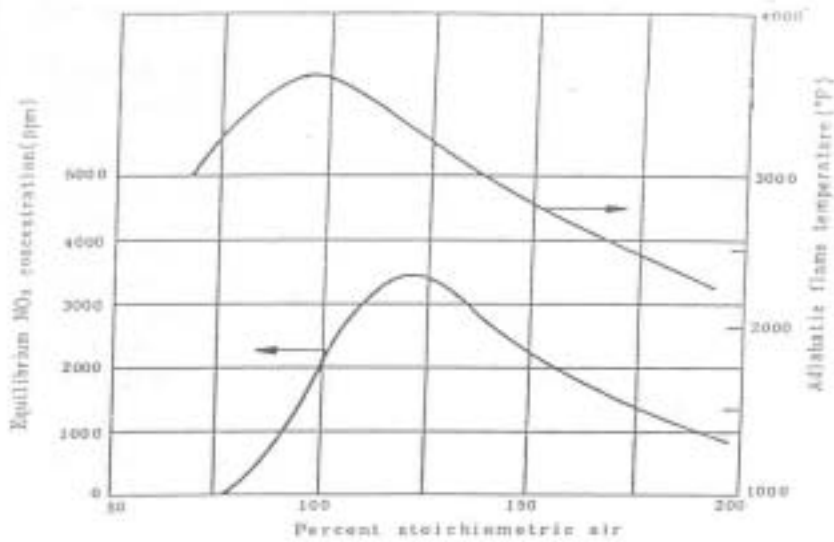


Fig. 3. Calculated equilibrium concentration in CH_4 -Air flame.

2) Prompt NOx

Fenimore는 에틸렌과 공기의 Pre-Mixed된 가스를 다공판을 사용한 Burner에서 연소시켜 얻은 Flat Flame의 화염면에서 상당한 량의 NO가 급격히 생성됨을 발견하고 이를 Prompt NO라고 하였다.

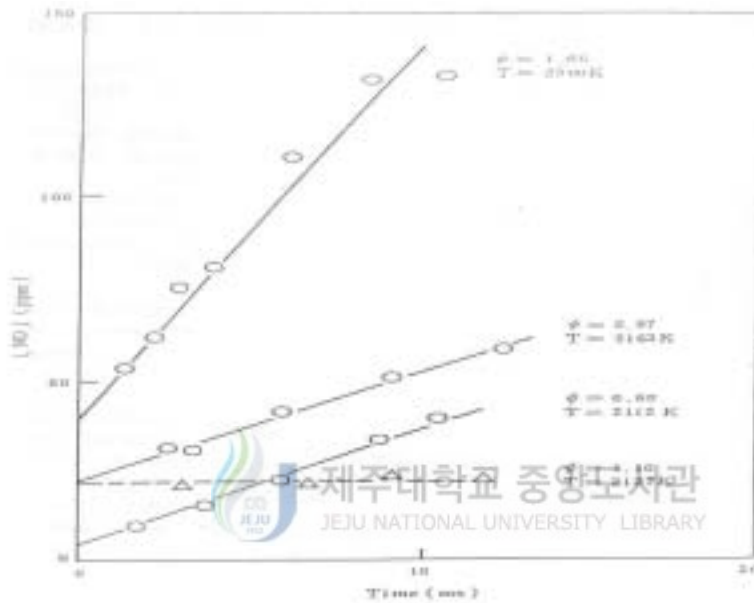


Fig. 4. Prompt NOx at C₂H₆-Air flame.

이 실험의 결과로서 NO 농도는 Fig.4에서 나타난 바와 같이 시간경과에 따라 직선적으로 증가하고 있어 반응이 일정속도로 진행하고 있음을 알 수 있다.

여기서 반응시간은 버너 표면에서 Probe 끝까지의 거리를 연소 생성물의 유속으로 나누어 계산된 값이며 아울러 반응물에는 질소화합물이 포함되어 있지 않으므로 그림에서 반응시간을 0까지 직선을 연장시키면 주 반응영역에서 반응초기에는 Zeldovich Mechanism 이외의 어떤 Mechanism에 의해 NO가 매우 짧은 시간에 급격히 생성된다고 고찰할 수 있다.

C.P. Fenimore의 Prompt NO의 생성현상은 CO나 H₂의 Air Flame에서는 일어나지 않으므로 탄화수소계 연료의 특유한 것임을 알 수 있다.

이처럼 Prompt NO의 생성이 중간물질을 경유하는 것에 착안하여



의 반응을 제안하였고 이 반응식은 추후 여러 종류의 탄화수소 연료를 사용하여 NO에 대한 상세한 실험을 하여 인정을 받았다. 이 반응에서 보듯이 분해된 질소원자는 반응식 (4)의 공급원이 되어 NO를 생성하고 동시에 HCN, CN도 산소를 포함한 화합물과 반응하여 NO를 생성한다.

또한 질소분자도 탄화수소연료와 반응하여



로 과농연료의 반응영역 근처에서 상당한 량의 HCN이 생겼다가 급격히 감소하는 사실을 실험에 의해 확인함으로써 반응식 (10), (11), (12)가 NO 생성과 관련이 있음을 밝혔다.

또한 일부 연구가들에 의해 Prompt NO는 온도, 연료형태, 연료/공기비에는 큰 영향이 없고 연료가 희박한 연소영역에서는 Prompt NO는 거의 무시할 정도로 작았고 Transient Formation 이므로 체류시간에도 무관하였음을 밝혔다.

이상에서 설명한 바와 같이 Prompt NO의 생성은 연료의 농도가 낮은 화염에서는 Zeldovich Mechanism에 의해, 연료의 농도가 높은 화염에서는 탄화수소기에 의한 Fenimore Mechanism에 의해 연소영역에서 일어난다고 할 수 있다. 그러나 아직까지 HCN, CN이 생성되는 단계를 잘 이해하기 곤란할 뿐만 아니라 N₂에 CH가 공격하여 HCN이 생성된다는 점에 대해서도 일부 제한된 정량적인 데이터만 있을 뿐 자세한 Prompt NO의 Model이 아직까지 정립되어 있지 않다. 또한 연소영역 근처에서 NO 생성속도가 평형상태에서 보다 다소 클지라도 실제 연소장치에 있어서 이러한 영역은 화염후류영역에 비해 작은 영역이므로 Thermal NO_x나 Fuel NO_x 보다 실제적인 면에서 크게 중요하지 않은 것으로 알려져 있다.(1994, 통산산업부)

3) Fuel NO_x

Fuel NO_x는 연료중에 화학적으로 결합되어 있는 질소성분이 연소중에 산소와 반응하여 NO_x로 전환된 것이다. 이는 기체 연료에 유기질소화합물을 혼합하여 연소실험을 한 결과 공기중 질소의 존재유무에 관계없이 다량의 NO가 생성됨을 Shaw와 Thomas가 1968년 관찰하고 그 생성원이 연료속에 포함된 질소임을 밝혔다. 또한 석

탄의 유동층 연소시 NO 생성을 연구하여 연소용 공기중의 질소를 아르곤(Ar)으로 바꾸어도 배기가스의 NO 농도는 영향을 받지 않음을 Jonke가 발견하였다.

Pershing 등은 미분탄을 공기 및 아르곤/산소 혼합가스에서 연소시키면 미분탄 연소시 발생하는 NO의 대부분이 Fuel NO라는 것을 확인하였으나 이는 아르곤/산소 혼합가스 화염에서의 높은 온도 때문에 생성된 NO가 전부 Fuel NO라 말하기 어려운 점이 있다. 그래서 이러한 미비점을 보완하기 위해 Pershing과 Wendt는 공기와 같은 열용량을 갖는 21% O₂, 18% CO₂, 61% Ar 혼합기체를 연소가스로 사용하여 Fuel NOx를 분리한 실험을 한 결과 이 실험에서 발생한 NO 생성량을 예열된 공기를 사용하였을 때의 전체 NO 생성량과 비교한 결과 석탄 연소시의 경우 일반적으로 전체 NO 발생량의 80% 이상이 Fuel NO이며 이 Fuel NO는 넓은 온도범위에서 화염온도의 영향을 받지 않음을 발견하였다. 이는 화염온도를 낮추면 Thermal NO의 생성은 줄일 수 있으나 석탄 연소시 NOx의 주 발생원인 Fuel NO 저감에는 큰 효과가 없다는 중요한 의미를 갖는다.

석탄에 함유되어 있는 질소화합물은 연소시 열분해(Pyrolysis) 등을 거쳐 NOx와 N₂로 전환되며 석탄연소시 발생하는 NOx는 휘발분중에 포함되어 있는 질소화합물에서 생성된 Fuel NOx가 대부분을 차지하며 이는 높은 온도와 낮은 연료/산소 혼합비에서 특히 두드러지는 현상이다. 또한 Char 중에 포함된 질소화합물이 NOx로 전환되는 양은 휘발분 중에 포함된 질소화합물의 전환량보다 적으므로 석탄연소시 발생하는 Fuel NOx 중의 60~80%가 휘발분 중의 질소화합물로부터 발생한다고 Pershing과 Wendt는 보고하였다.

또한 Martin은 Fuel NOx의 생성은 첫째 질소화합물이 NH₂, NH₃, NH, CN, HCN 등의 중간생성물을 경유하여 NO를 생성하는 것과 둘째 질소화합물이 분해되어서 질소원자가 방출되어 방출된 질소가 Fuel NOx의 생성기구에 의하여 질소의 관능기의 형태로 작용하는 것 등으로 추정하고 있으며 연료중에 함유되어 있는 질소산화물은 대단히 복잡한 형태로 되어 있어 연소 과정에서 Fuel NOx를 형성하게 되고 질소화합물이 불꽃 중에서 존재한다는 것은 이들의 상당한 부분이 질소산화물로 된다는 것을 C.P. Fenimore 등도 지적하고 있다.

Table 2를 참조로 하여 Fuel NOx 생성 Mechanism을 살펴보면 Chain Carrier Free Radical인 O, H, OH는 HCN 으로부터 수소원자와 결합하여 CN기가 된다. HCN

Table 2. Reaction involving Fuel NOx formation during combustion.

REACTION	RATE COEFFICIENT $\text{cm}^3 \text{mole}^{-1} \text{s}^{-1}$
Fuel NO path	
Fuel N \rightarrow HCN	FAST
HCN + OH \rightarrow CH + H ₂ O	$2 \times 10^{11} T^{0.634} \exp(-4,600/RT)$
HCN + H \rightarrow CH + H ₂	$2 \times 10^{11} T^{0.969} \exp(-18,400/RT)$
HCN + O \rightarrow CH + OH	$1.4 \times 10^{11} T^{0.68} \exp(-16,900/RT)$
CN + OH \rightarrow NCO + H	5.6×10^{13}
HCN + OH \rightarrow HNCO + H	2×10^{11}
NCO + H \rightarrow NH + CO	2×10^{13}
HNCO + H \rightarrow NH ₂ + CO	1×10^{13}
NH ₂ + H \rightarrow NH + H ₂	$1.4 \times 10^{11} T^{0.67} \exp(-4,300/RT)$
NH ₂ + O \rightarrow NH + OH	$9.2 \times 10^{11} T^{0.5}$
NH ₂ + OH \rightarrow NH + H ₂ O	$3 \times 10^{10} T^{0.68} \exp(-1,300/RT)$
NH + OH \rightarrow N + H ₂ O	$1.6 \times 10^{12} T^{0.56} \exp(-1,500/RT)$
NH + O \rightarrow N + OH	$8.4 \times 10^{12} T^{0.7} \exp(-100/RT)$
NH + H \rightarrow N + H ₂	$1 \times 10^{12} T^{0.68} \exp(-1,900/RT)$
NH + O \rightarrow NO + H	$5 \times 10^{11} T^{0.5} \exp(-5,000/RT)$
NH + OH \rightarrow NO + H ₂	$1.8 \times 10^{12} T^{0.56} \exp(-1,500/RT)$
	R : 산소를 함유한 화합물

은 동시에 OH기와 반응하여 HNC의 중간체를 형성하고 CN기는 OH와 반응하여 중간체로 NCO를 생성한다.

HNC와 OCN은 고온에서 불안정하므로 수소원자와 반응하여 아민화합물 NH_3 가 되고 이렇게 하여 생성된 NH_2 와 NH는 Chain Carrier Radical인 OH, H, O와 반응하여 NH기와 질소원자가 되며 이때 NH_3 화합물은 부분평형상태로 가정한다. 결국 Fuel NO는 NH 또는 질소원자가 OH, O와 반응해서 생기는 것을 보여주고 있다. Fig. 5는 Fuel NOx의 생성반응을 종합적으로 도식화한 것으로 Thermal NOx와 Fuel NOx의 상호작용도 표시되어 있다.

Fuel NOx의 생성기구를 정리하면 이론혼합비 또는 산소가 부족한 경우는 연료중에 함유된 질소성분이 실제적으로 거의 Fuel NOx로 전환되고 이 반응은 연소반응과 같은 속도로 일어난다. 그러나 연료가 과잉인 경우에는 연료 중에 결합된 질소가 우선적으로 HCN이 되고 이어서 다른 중간생성물로 전환되어 결국 Fuel NOx가 생성된다.

연료중의 질소함량은 원유중 300~2000ppm, 석탄에는 0.5~2%, 등유는 수ppm, 경유 20~140ppm, C중유 1,000~4,000ppm 정도 존재한다. 석탄에는 석유계 연료보다 다량의 질소분을 함유하며, 가스연료에도 질소분이 함유되어 있으나 그 형태가 대부분 N_2 이고 공기중의 질소와 같은 거동을 나타내어 Fuel NOx에는 관계가 없는 것으로 알려져 있다. 그렇지만 NH_3 , HCN 등을 함유하는 코크스로 가스등은 다량의 Fuel NOx가 생성된다. 연료중의 질소화합물은 모두 NOx로 변화하지 않는다. 연료중 질소분이 Fuel NOx로의 전환율은 석탄은 6~20%, 액체연료는 30~60% 정도이다.(1994, 통산산업부)

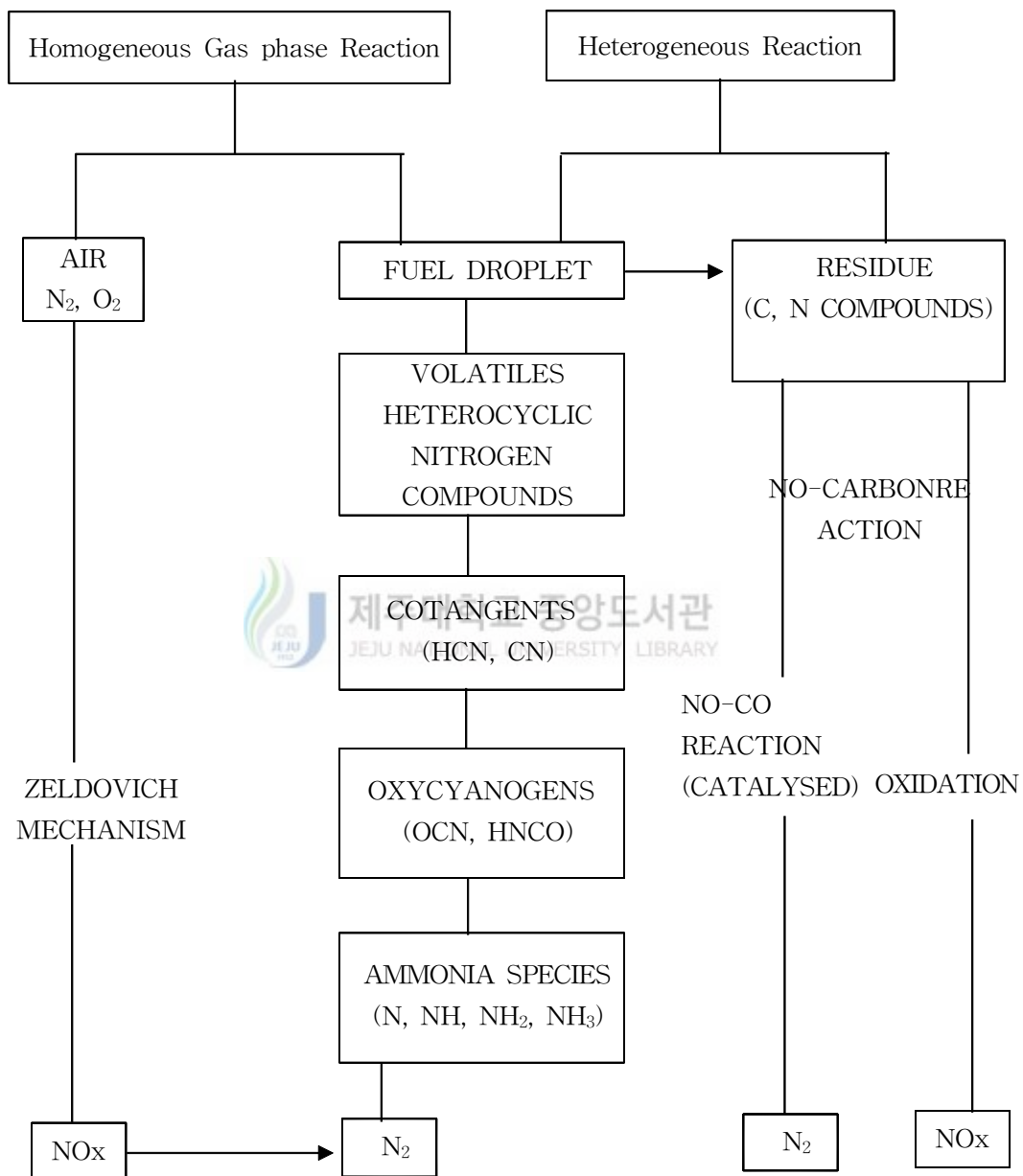


Fig. 5. Pathway of fuel Nitrogen conversion.

2. 질소산화물 저감기술

질소산화물의 발생량은 화염내 가스온도, 고온부 체류시간, 산소농도 등에 따라 다르다. 따라서 이들의 인자를 적절히 제어함으로써 NOx 발생량을 줄일 수 있게 된다. 질소산화물 저감기술은 생성자체를 억제시키기 위해 연소방식을 개선하는 전처리방법과 생성된 질소산화물을 배출하기전에 저감시키는 배연탈질의 후처리 방법이 있다.

1) 저 NOx 연소법

저 NOx 연소기술은 저 과잉공기연소, 2단연소, 배기가스 재순환 및 저 NOx 버너 연소법 등이 있으며 이들의 저감기술은 대부분 고온영역에서 질소와 산소가 원자상태에서 결합하여 생성되는 Thermal NOx를 억제하는 방법이다.

(1) 저 과잉공기 연소법(Low Excess Air Firing)

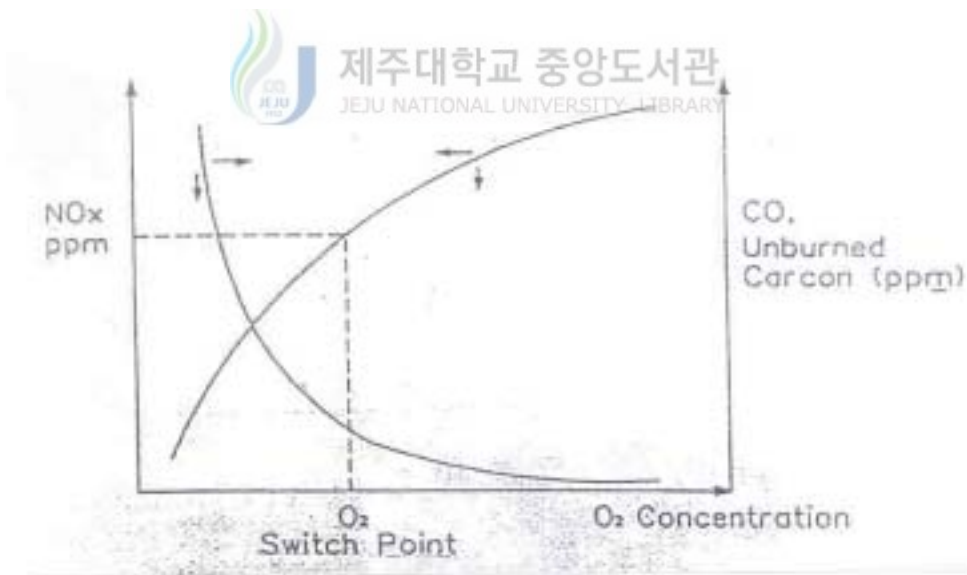


Fig. 6 Relationship of excess air and NOx emission

보일러의 연소공기를 감소시키고, 연소영역에서의 과잉산소를 감소시켜 NOx 발생을 억제하는 방법이다. 대부분의 보일러에서는 과잉공기의 양을 줄이면 NOx 발생이

줄어들지만, 미연분에 의한 효율저하에 지장이 없는 공기량의 범위에서 운전되어야 한다.

최소한의 과잉공기로 운전할 때의 조건은 Full load에서 모든 버너가 전부 가동될 때 얻어지며 부하가 변동될 때는 연소의 안정성을 위해 보다 많은 공기량을 필요로 한다.

저과잉 공기 연소에 의해 연소영역의 과잉산소농도가 1% 감소되면 NOx는 평균 25ppm정도 감소되는 것으로 알려져 있으며 운전조건만 만족시킨다면 저과잉공기 연소는 가장 쉬운 NOx 저감법이 될 것이다.

(2) 배기가스 재순환법(Flue Gas Recirculation)

배기가스 재순환이란 연소로내의 연소영역에 배기가스를 재순환시킴으로서 노내가스의 유량증가에 따른 열용량 증가에 의해 노내온도를 낮추고 연소영역의 산소농도를 희석시켜 NOx 발생을 억제하는 방법이다. 이 방법을 이용하면 산소농도의 희석효과 보다는 화염온도 저하의 효과가 크므로 Fuel NOx 보다는 Thermal NOx의 감소효과가 더 크다. 따라서 Thermal NOx의 저감을 최대한 얻기 위해서는 재순환되는 배기가스를 가능한 한 고온의 연소영역으로 분사시켜야 한다. 또한 이 방법은 Thermal NOx가 지배적인 가스, 경질유 등의 NOx 배출 억제법으로는 매우 효과적이나 석탄, 중유 등과 같이 연료중에 질소성분이 많은 연료에는 큰 효과가 없다. 이 배기가스 재순환법을 사용하여도 연소영역으로 공급되는 질소의 절대량은 변하지 않으므로 Fuel NOx에 대한 억제효과는 거의 없기 때문이다.

배기가스 재순환율의 최대값은 연소안정한계에 제한을 받게 되므로 통상 10~20%로 하고 있으며 20%이하로 한정하고 있다.

$$\text{배기가스 재순환율(\%)} = \frac{\text{재순환 배기가스유량(Nm}^3\text{/h)}}{\text{연소용 공기량(Nm}^3\text{/h)}}$$

배기가스를 재순환하여 주입하는 방법은 연소로 하부를 통해 공급하는 방법과 Windbox 내로 유입하는 방법이 있는데, 일반적으로 후자가 효과적이다.

(3) 다단 연소법(Staged Combution)

다단 연소법이란 연료 및 공기를 단계적으로 나누어 공급하여 우선 연료과잉영역

에서는 산소농도 감소에 따른 NO_x의 발생 억제 및 N₂로의 환원을 촉진시킨 후 충분한 공기를 공급하여 완전연소를 이룸으로써 효율의 저하없이 NO_x의 배출을 억제시키는 가장 대표적인 저 NO_x 연소법으로 공기를 단계적으로 공급하는 방법과 연료를 단계적으로 공급하는 방법이 있다. 전자에는 2단 연소인 OFA(Over fire air) Injection과 BOOS(Burners Out Of Service) 등이 있으며 후자는 MHI(Mitsubishi Heavy Industry)의 주도하에 최근에 개발된 MACT(Mitsubishi Advanced Combustion Technology)를 비롯한 Fuel Staging의 방법을 지칭한다. Fuel Staging을 Reburning 또는 After Burning이라 부르기도 한다.

그 밖에 버너가 여러개인 연소로의 경우 근접한 2개의 버너에서 하나는 연료과잉, 다른 하나는 공기과잉으로 운전하여 단계적 연소효과를 얻고 있는 Off-Stoichiometric Combustion(Biased Combustion)도 다단 연소법의 범주에 포함된다.

① 2단 연소법 (Double-Staged Combustion : Over Fire Air Injection)

연소공기를 2단계로 나누어 공급하는 것으로서, 1단계(Burner부)에서 공기비를 1이하에서 연소하고, 2단계(Burner의 상부에 Air Port를 설치함)에서는 1단계에서의 부족

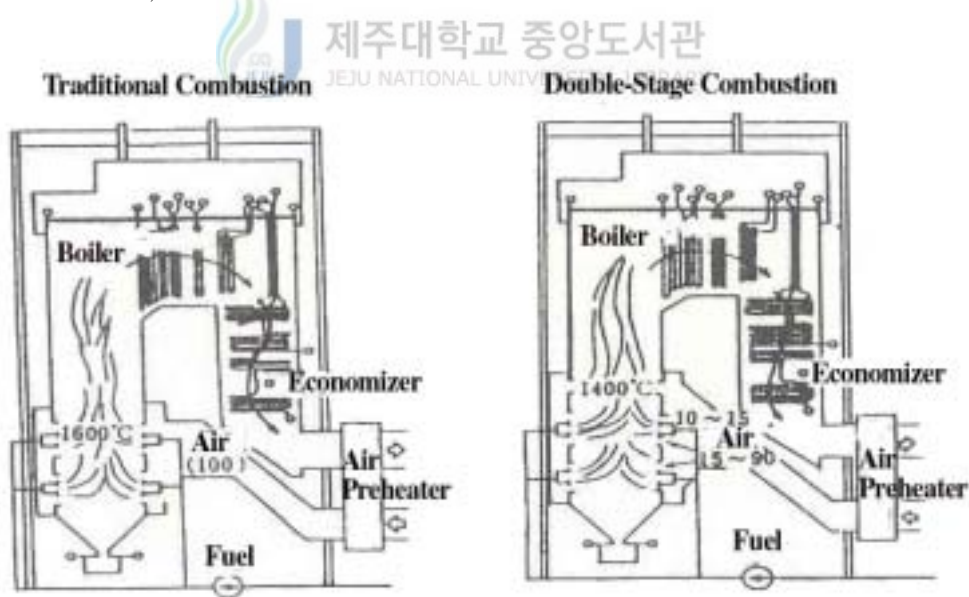


Fig. 7. De-NO_x process of Double-Stage Combustion.

분 공기를 공급하여 완전 연소시키므로 1단계에서의 저과잉공기에 의한 화염온도의 저하로 NO_x 발생을 억제한다.

일반적으로 연료의 연소에서 완전연소에 필요한 공기량은 약간 많아진다. 1단계와 2단계의 공기량 비는 보통 9:1 정도이고 2단계측의 공기량을 증가시킬수록 NO_x 억제효과는 증가하나 한도를 초과하면 분진발생이 많아져 문제가 된다. 결국 이 방식은 1단계 공기비를 저하시키기 때문에 연료중의 질소분이 NO_x로 되는 전환율을 저하시켜 Fuel NO_x의 저감효과도 가져온다. Fig.7은 Tangentially Fired 연소로에서 OFA 공급량에 따른 NO_x 저감률을 나타낸 것으로 30%정도의 NO_x 저감률을 얻을 수 있으며 과잉공기량의 감소에 따라 더욱 효과적이다. 그러나 유황함유량이 높은 석탄을 사용할 경우 국부적인 환원분위기로 인해 과열기 부식이 심각하게 대두되고, 노내의 Slag가 침적하는 경향이 있으며 보일러 연소효율의 저하로 인해 완전연소를 위한 과잉공기가 필요한 경우가 발생하는 등의 문제점들이 야기될 수도 있다.

② Burners Out Of Service(BOOS)

이 방법은 산업용 미분탄 연소보일러에서 단계적 연소 효과를 얻는 방법으로 다수의 버너가 있을 때 일부의 버너에는 연료를 공급하지 않고 공기만을 주입하며, 나머지 버너에 과잉의 연료를 공급하여 출력을 유지하는 방식이다. 연소로 내의 공기의 유량은 변하지 않게 유지되기 때문에 단계적 연소 효과를 얻게 된다. NO_x 저감 효과를 상승시키기 위해서는 제일 상부의 버너에 연소공기만 공급하기도 한다.

③ Off-Stoichiometric Combustion(OSC)

이 방법은 여러 개의 버너 중 몇 개를 연료과잉의 상태로 운전하고 그 주변의 버너들은 공기과잉 또는 공기만을 공급하여 운전함으로써 단계적 연소효과를 얻는 NO_x 저감법으로 BOOS의 개념을 확대한 것이다.

2) 연소버너 개량법

연소버너 개량법은 연료와 공기가 혼합되어 화염이 형성되는 부분인 버너의 구조, 버너 Tip의 형상 등을 NO_x 생성을 억제할 수 있는 구조로 개량하는 방법이다. 이와 같이 NO_x 생성을 줄일 수 있도록 개량된 버너를 저 NO_x 버너라고 한다. 저 NO_x 버너의 개발은 대부분 연료와 공기의 혼합특성을 조절하여 연소강도를 낮추고 연소초기 영역의 산소농도 및 화염온도를 낮추어 Thermal NO_x 및 Fuel NO_x의 생성을 억제시

키는 것이다.

저 NO_x버너는 연료분무방법과 연소용 공기 공급방법에 따라 다음과 같이 크게 4가지로 분류된다.

- ① 혼합촉진형 : Mixing Promoted(Controlled-mixing)
- ② 분할화염형 : Divided Flame
- ③ 자기재순환형 : Self Recirculation
- ④ 단계적연소형 : Staged-Combustion

혼합촉진형과 분할화염형은 화염을 급냉하거나, 방열을 촉진하기 위해 화염표면적을 증가시켜서 Thermal NO_x를 주로 저감시킨다. 그 반면에 자기 재순환형과 단계적 연소형은 연소초기영역을 연료과잉(Fuel Rich) 상태로 유지시켜 Thermal NO_x와 Fuel NO_x를 동시에 저감한다. 따라서 연료중의 질소성분이 거의 없거나 적은 연료인 가스나 경질유 연소버너의 경우는 혼합촉진형이나 분할화염형 등 Thermal NO_x 저감에 역점을 둔 저 NO_x버너가 적합하며, 연료중 질소성분이 많이 포함된 중질류나 석탄연소용 버너는 자기 재순환용 또는 단계적 연소형과 같이 혼합특성을 변경시키는 저 NO_x 버너가 적합하다. 특히 최근에 개발되고 있는 발전용 보일러와 저 NO_x 버너는 Fuel NO_x 억제에 역점을 둔 단계적 연소개념을 도입한 것이 대부분이다.

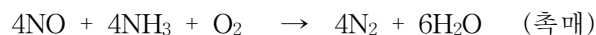
저 NO_x 버너는 이미 설치된 장치에 대해서도 비교적 용이하게 적용될 수 있는 장점이 있으므로 현재 여러 가지 구조의 버너가 개발되어 실용화 단계에 있다.

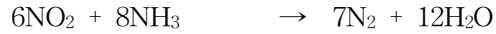
3) 배연탈질법

배기가스 중 NO_x를 제거하는 기술은 습식법과 건식법이 있으나 2차 오염이 없는 건식법이 주로 사용되고 있다. 건식법에는 NO_x만 선택적으로 제거하는 선택적 환원법이 대부분을 차지하고 있으며 촉매의 사용여부에 따라 선택적 촉매환원법과 선택적 비촉매 환원법으로 구분된다.

(1) 선택적 촉매 환원법(SCR : Selective Catalyst Reduction)

촉매층 전단에서 환원제를 분사하고 촉매층에 배기가스와 환원제를 동시에 통과시키면서 배기가스중의 NO_x를 질소와 수증기로 환원시키는 방법으로 반응식은 아래와 같다.





선택적 촉매환원설비의 기본구성요소는 촉매반응기, 암모니아 분사 및 조절체계, 암모니아 공급계통 등이 있으며, 촉매반응기는 가스채집기, Soot Blower, 촉매층 등으

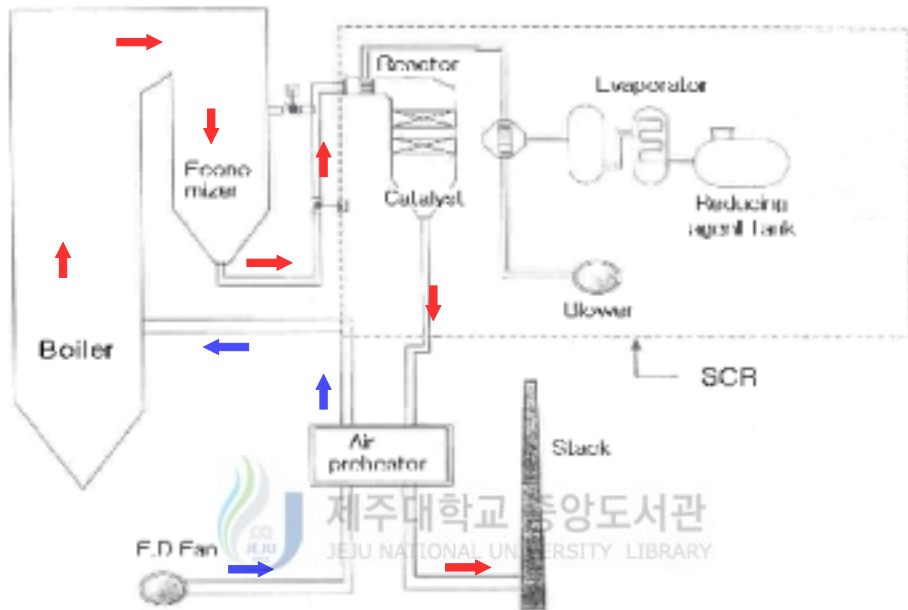
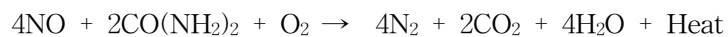


Fig. 8. Schematic diagram of SCR.

로 구성되어 절탄기 후단에 설치되고, 촉매는 활성성분(V_2O_5), 담체(TiO_2) 및 첨가제로 구성된다. 배기가스 중의 Ash 성분 에 의한 마모로 촉매의 교체주기는 2~4년 정도이며 운전유지비의 약65% 정도가 촉매교체에 소요된다. 암모니아 공급계통은 액상의 저장탱크에서 기화기(공기 또는 물을 20: 1로 혼합)를 거쳐 약 50℃로 가열되어 촉매 반응기 전단에 분사시킨다. NOx 저감효과는 70~90% 정도이다.

(2) 선택적 비촉매 환원법(SNCR : Selective Non-Catalyst Reduction)

연소과정에서 생성된 질소산화물을 암모니아(NH_3)를 보일러의 Fire Box에 직접 분사하여 질소가스와 수증기로 분리하여 제거하는 방법으로 반응식은 아래와 같다.



980~1090℃ 이상에서는 NOx를 생성하는 부반응이 일어나 환원제 주입전보다 NOx가 증가하므로 암모니아의 분사위치가 매우 중요하다. 보일러의 부하변화에 따라 노내 온도분포가 변하므로 여러개의 환원제 분사 Port를 만들어 놓고 노내온도에 따라 분사위치를 바꾸어야 한다. 환원제로는 보통 암모니아(NH₃)나 요소(Urea : NH₂CONH₂)를 사용한다. NOx 저감효과는 30~50% 정도이다.(2000, 한국전력공사)

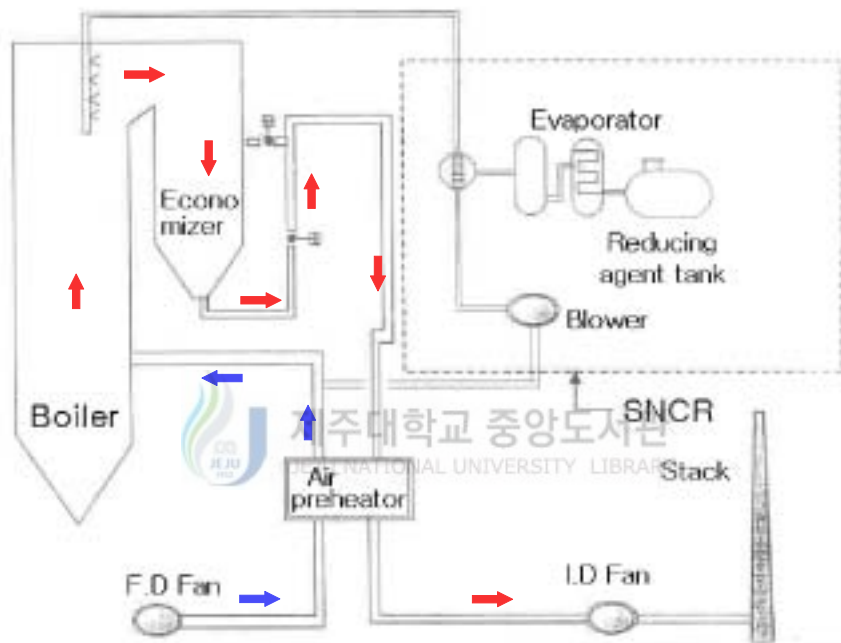


Fig. 9. Schematic diagram of SNCR.

3. 국내화력 발전소의 NOx 저감설비 현황

질소산화물 저감기술은 선진기술이며 이를 제어하기 위한 선진국들의 연구기술은 꾸준히 개발되어 지고 있으나 국내 산업시설이나 발전시설에 NOx 저감시설의 설치와

적용은 지금 시작단계에 들어서 있다. 연소조절에 의한 NO_x 저감기술은 일부 적용하고 있고 최근 남제주화력에 선택적 촉매환원법(SCR)에 의한 배연탈질 시설과 호남화력에 선택적 비촉매환원법의 설비를 설치한 것이 고작이다.

1) SCR에 의한 배연탈질설비

남제주화력은 내연10MW와 기력10MW의 시설용량을 갖고 있다. 내연발전기 특성상 고온연소로 질소산화물이 많이 배출되어 배연탈질을 위해 SCR을 설치하였다. 발전연료는 중유를 사용하고 환원제로는 요소를 사용한다.

SCR 설비는 과급기(Turbocharger) 전단에 설치되어 있고, 고온 및 고농도 먼지에 견딜 수 있는 설비로 엔진 1기당 1대가 설치되어 있다. 엔진으로부터 배출된 배기가스는 노즐을 통하여 분사된 요소(암모니아로 열분해)와 혼합되어 SCR 반응기의 촉매층으로 공급된다. 촉매층에서는 배기가스 중의 NO_x와 NH₃가 선택적으로 반응하여 N₂와 H₂O로 변환된다.

요소 주입량은 SCR 입구와 출구측의 배기가스 온도, NO_x 농도, 엔진부하 등의 정보를 통해 자동적으로 조절된다.



2) SNCR에 의한 배연탈질설비

호남화력발전소는 유연탄을 사용하는 기력발전 설비로서 시설용량은 250MW 2기이다. 배기가스 온도는 1060℃이며 보일러 형식은 자연순환식이다. 2005년 질소산화물 배출허용기준에 대비하여 선택적 비촉매환원 탈질설비(SNCR)를 '99.10월 준공하였으며 공정개요는 다음과 같다.

탱크로리로 운송된 요소입자는 Urea Storage Silo(170m³)에 저장되며 Lump Crusher를 통과하면서 덩어리 상태가 된 요소를 분쇄하고, Hopper Scale에서는 하부의 요소 용해탱크(10m³)에 요소를 정량 공급한다. 정량 공급된 물과 요소는 용해조에서 50% 용액으로 용해되며, 이송펌프에 의해 2기의 요소용액저장탱크(140m³)로 이송, 저장된다.

50% 요소용액은 주입펌프로 이송되며 회석수 펌프에서 공급한 회석수와 함께 분배모듈에서 압력, 유량, 주입농도(3~10%)가 조정되어 보일러 벽에 설치된 분사기(Injector)까지 공급된다. 분사기로 회석된 요소용액을 운반하기 위해 일정하게 회석수

가 공급되도록 희석수 펌프가 설치되어 있다. 분사기는 분배모듈로부터 주입된 희석 요소용액을 최종적으로 보일러 내에 분사시킨다.

성능시험결과 NH_3 Slip 15ppm이하, 표준당량비(NSR : Normalized Stoichiometric Ratio) 1.1이하의 조건에서 탈질효율 41~46%로 나타나 SNCR 설치 전 400~550ppm 인 NO_x 를 250ppm 정도로 저감 시킬 수 있다.

SNCR은 설치공간이 적게 소요되고 비교적 높은 탈질 효율을 얻을 수 있으므로 운전방법 및 연소설비 개선을 통한 탈질 방법으로 배출저감 목적을 달성하기 곤란한 경우 적용 가능한 방법이다. 따라서 기존 발전소에서 SCR을 설치할 수 있는 공간확보가 되어 있지 않은 경우 적용할 수 있는 대안으로 많이 활용되고 있으며, SNCR 설치 후에도 점차적으로 배출허용기준이 강화될 경우 일부의 촉매만 추가한 『SNCR + In-duct SCR』 공정으로 투자비를 최소화하고 탈질 효율을 높일 수도 있다.

3) 저 NO_x 연소설비

1970년대에 건설된 대부분의 중유화력 발전소들은 NO_x 배출을 고려한 연소설비를 채택하지 못했다. 1970년대 당시 환경규제가 그리 강화되지 않은 이유도 있겠지만 시설투자에 대한 막대한 투자비와 보일러 연소의 효율적인 면을 우선 고려하였기 때문이다.

중유화력발전소에서 발생하는 NO_x 는 Thermal NO_x 가 대부분이기 때문에 연소중에 저감이 가능한 연소기술을 채택했다. 따라서 NO_x 를 저감하기 위한 설비로는 저 NO_x 버너와 2단연소에 의한 OFA 설비 및 Flue gas recirculation에 의한 방법이 선별적으로 운영되고 있는 실정이다.

Ⅲ. 연구내용 및 방법

1. 연구대상 발전설비

1) 발전설비 개요

시험대상 설비는 제주화력발전소 3호기로 설비용량은 75MW이며 주 사용연료는 중유이고, 기동연료는 경유를 사용한다. 보일러는 Single Drum, 1단 재열방식이며 옥내에서 연소용 공기를 취입하는 옥내형이다. 보일러의 순환수는 자연순환방식으로 급수가열기에서 가열된 급수는 절탄기 입구헤더에 유입된다. 급수는 절탄기에서 연소가스의 여열에 의해 예열된 후 출구헤더에 모여 2개의 절탄기 출구 연결배관을 통해 Steam Drum에 보낸다. Steam Drum에 들어온 물은 Steam Drum내의 기수분리기에 의하여 물과 증기로 분리되어 물은 Downcomer를 통하여 재순환되고 증기는 과열기를 거치면서 과열증기가 된다. 과열기 출구의 증기온도는 45% 부하 이상에서, 재열기 출구의 증기온도는 50% 부하 이상에서 일정하게 제어되며, 과열기는 Desuperheater에 의하여, 재열기는 버너 Tilt에 의하여 일정하게 증기온도를 유지할 수 있다.

통풍계통은 평형통풍식으로서 2대의 원심형 압입통풍기가 병렬로 설치되어 실내 상층부로부터 공기를 흡입, 재생식 공기예열기에서 약 280℃ 정도로 가온하여 보일러에 공급되고, 보일러에서 연소된 연소가스는 공기예열기와 전기집진기를 통과한 후 병렬로 설치된 2대의 원심형 유인통풍기에 의하여 연돌로 배출된다. 보일러 노내 Convection Section의 연소가스 양을 증가시켜 Tube Bundle 내에서 전달되는 열량을 높여 온도를 제어하기 위하여 1대의 G/R(Gas Recirculation) Fan이 설치되어 있으며 GR Fan의 연소가스는 보일러 출구에서 취입되어 Furnace Bottom으로 주입된다.

주 연료인 중유(Bunker C) 공급계통은 연료공급 선박으로부터 하역, 연료저장탱크에 저장되며 중유가열기에서 90~100℃로 가열되어 버너를 통해 노내로 공급된다.

보일러 주요규격은 아래와 같다.

- 형식 : 평형통풍, 자연순환, 드럼형, 옥내형
- 최대 연속증발량 : 251ton/hr(BMCR, 과열기출구)

- 증기압력 : 주증기 132.2 kg/cm² / 재열증기 35.2 kg/cm²
- 증기온도 : 541℃
- 급수온도 : 245℃
- 보일러효율 : 89.27%(BMCR)

보일러에서 생성된 541℃, 127kg/cm²의 과열증기의 열 에너지는 고압터빈의 터빈 날개사이를 통과하면서 터빈을 3600rpm으로 회전시키고 온도와 압력이 떨어진 증기는 다시 보일러에서 가온, 가압되어 중압 및 저압터빈을 통하여 복수기에서 응축된다. 복수기에서 응축된 응축수는 각종 가열기를 거치면서 가열되고 급수펌프를 거쳐 보일러의 절탄기로 다시 보내진다.

터빈에서 생성된 회전력은 터빈과 연결된 발전기에서 13.8kV의 전압이 생성되고 주 변압기를 거쳐 154kV로 승압, 송전선로로 보내진다.(2001, 한국전력공사)

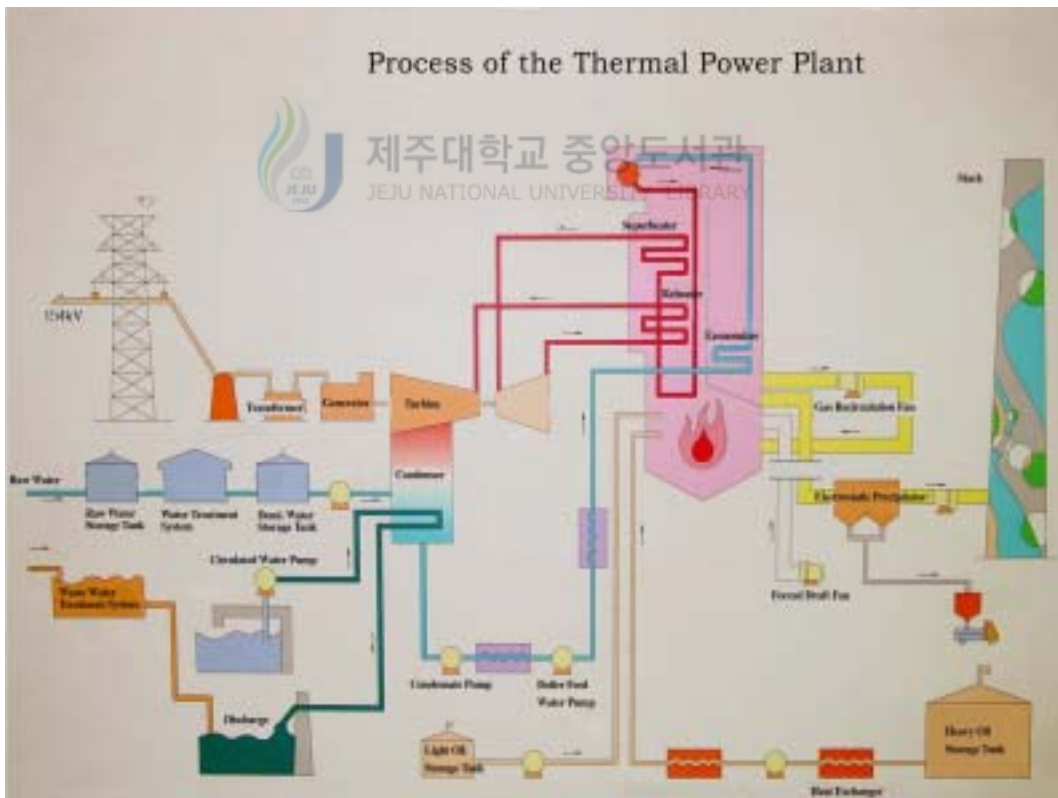


Fig. 10. Flow diagram of the power plant on study.

2) 연소설비 특성

(1) 연소공정

발전용 보일러의 일반적인 연소공정은 Fig.11과 같은데 압입송풍기에서 대기중의 연소용 공기를 취입하고 공기에열기에서 배기가스 중의 열을 흡수하여 Windbox 및 버너를 통하여 보일러로 연료와 함께 투입된다. 보일러 내에 투입된 연료와 연소용 공기는 서로 혼합되면서 완전 연소하게 되고 고온의 연소가스는 과열기, 재열기, 절탄기에서 열교환을 하여 최종적으로 공기에열기에서 여열을 연소용 공기에 전달하고 전기집진기를 거쳐 연돌로 배출된다.

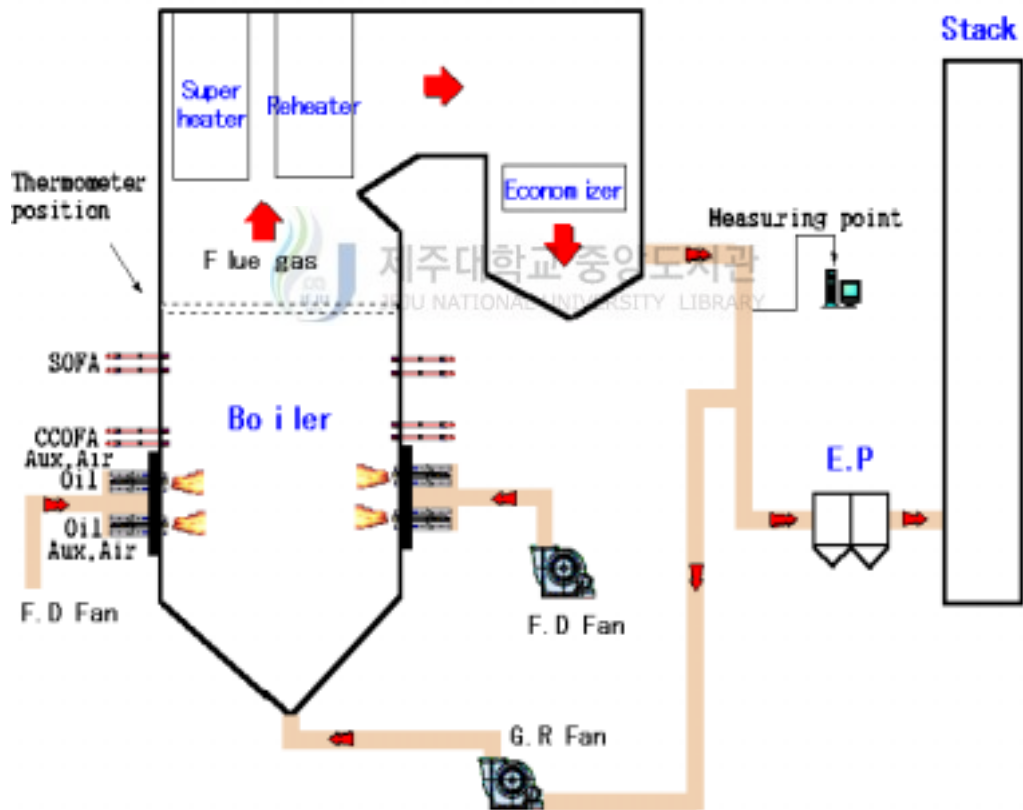


Fig. 11. Flow of flue gas.

(2) 연소설비 구조

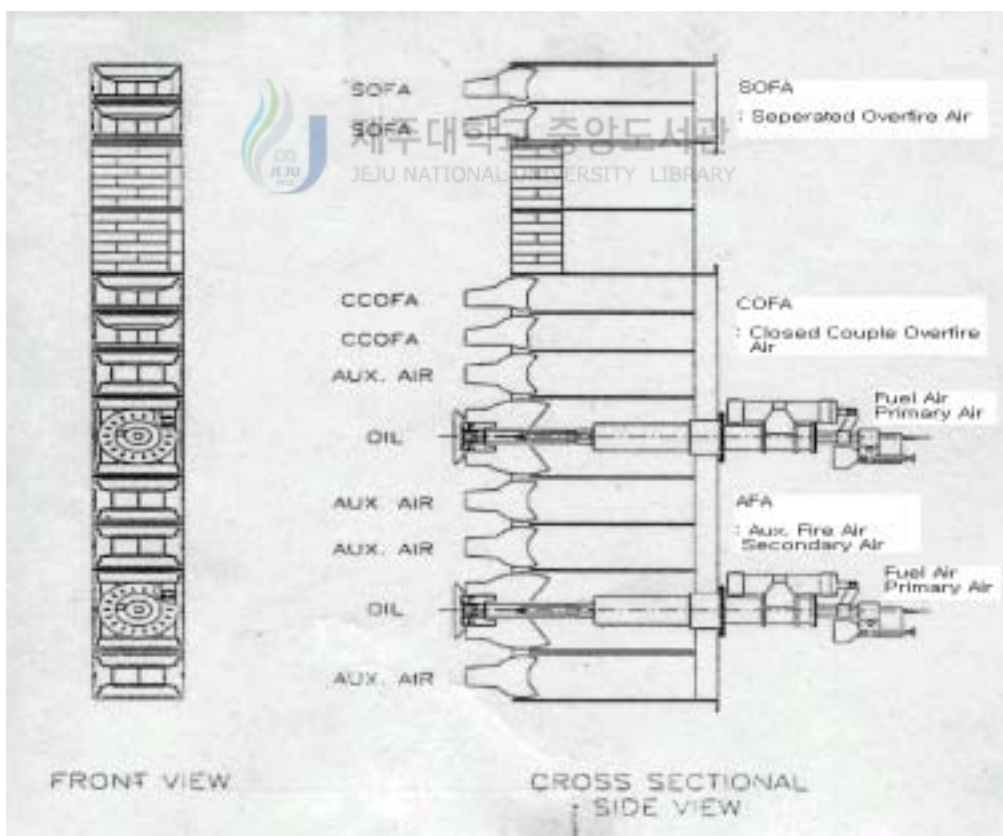
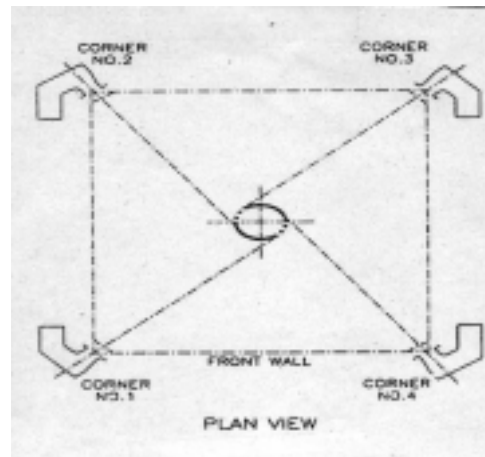


Fig. 12. Structure of oil firing system.

Fig.12와 같이 연소시 연료와 같은 Port로 1차공기가 주입되고 각 Oil층 상하부에 보조공기 Port로 2차 공기가 제공된다. 부하 25% 이내에서는 하부의 경유버너 만으로, 25% 부하 이상에서는 상부의 중유버너가 기동된다. 상부 중유버너가 모두 기동되면 부하에 따라 하부 버너도 중유버너로 교체된다. 중유버너 연소시 약 60%부하 이상이면 보조공기 Port로 연소용 공기의 일부분이 노내로 제공되는데, 부하증가에 따라 연소공기 량 증가로 연소로와 공기 Port 사이의 차압이 증가하고 차압이 설정치 이상이면 차압을 줄이기 위하여 보조공기 Port가 열려 2차 공기가 주입된다. 부하 증가에 따라 보조공기 량도 따라서 증가하게 되고 100% 부하에서 전체 연소용 공기의 약 25%에 이르게 된다. 노내온도 저감 및 증기온도를 제어하기 위해 G/R Fan(Gas Recirculation Fan)이 설치되어 있고 30~40% 부하에서 기동된다. G/R Fan은 연소로 출구에서 약 350~400℃의 연소가스를 노 하부로 주입한다. 재 순환되는 가스 량은 부하에 따라 다르지만 총 배기가스 량의 25% 정도이다.(2001, 한국전력공사)

1차 공기와 2차 공기가 완전히 분리되어 노내로 공급되기 때문에 버너층에서는 Fuel Rich 상태가 되고 보조공기는 분리되어 화염부근으로 공급된다. 버너층에서는 연료과잉 상태가 되므로 버너근처에서 완전연소가 이루어지지 않고 상하부의 보조공기와 만나면서 서서히 연소가 이루어진다. 이렇게 각 버너에서 만들어진 장염은 연소로 중앙에서 Fire Ball을 형성하고 반시계 방향으로 회전운동하며 노 상부로 이동하면서 연소가 이루어지고 보조공기에서 완전연소가 안된 미연소 배기가스는 COFA(Closed Couple Over Fire Air : 이하 COFA로 칭함)와 SOFA(Seperated Over Fire Air : 이하 SOFA로 칭함)에서 공급된 공기에 의해서 최종적으로 완전연소가 이루어 진다. 이러한 연소시스템 및 버너구조로 저 과잉공기 운전 및 지연연소가 가능하게 되어 NOx 배출농도가 Full Load에서 170~190ppm 정도로 타 유류 발전설비보다 30~50% 정도가 낮게 배출되고 있다.

3) 연구대상 보일러에 적용된 NOx 저감방법 및 효과

Table 3. NOx control method applied to boiler.

구분 설비(방법)	원 리	효 과
저 NOx 버너	<ul style="list-style-type: none"> -버너의 구조, Tip을 개량하여 연료와 공기의 혼합특성을 조절 -연소초기 영역을 Fuel rich 상태로유지 	화염온도 및 산소농도를 낮춤
2단연소	<ul style="list-style-type: none"> -연료와 공기를 단계적으로 공급 -연료과잉 영역에서 산소감소 및 N₂로 환원촉진후 2단에서 공기공급 완전연소 	자연 연소로 화염온도 저하
배기가스재순환	<ul style="list-style-type: none"> -배기가스를 재순환하여 노내온도를 낮추고 산소농도를 희석 	화염온도 저하 및 저과잉 공기 운전
접선연소	<ul style="list-style-type: none"> -연소실 4모서리에 버너를 설치연소 -OFA에 의해 산소와 균일하게 연소 	화염온도를 낮춤
저과잉공기	<ul style="list-style-type: none"> -연소영역에서 과잉산소 감소 	연소온도 및 산소농도 저하
BOOS (Burner Out of Service)	<ul style="list-style-type: none"> -일부버너에는 공기만 공급 -다른 버너에 과잉의 연료를 공급 -전체 공기량은 변화 없음 	단계적연소

2. 연구내용 및 방법

1) 연구기간 : 2001.01 ~ 2001.10

2) 연구내용 및 운전조건

연구대상 설비의 저 NO_x 연소설비 및 연소방법은 다양하나 각각의 운전방법, 효과에 대해서는 정립이 되어있지 않다. 따라서 각각의 저 NO_x 설비와 운전방법 변경에 의한 NO_x 저감효과 측정을 위주로 조사하였다.

본 연구의 주요내용은

첫째, 부하를 변화시키면서 NO_x와 노내온도 변화를 조사하였고

둘째, 일정한 부하에서 공기량의 변화에 따른 NO_x 배출특성을 조사하였으며

셋째, 배기가스 재순환에 의한 재순환율에 따른 NO_x 저감효과를 측정하였다.

위에서 기술한 시험조건에서 각각의 NO_x 발생량을 정확히 구분하기 위하여 보조공기는 사용하였으나 SOFA, COFA는 운전하지 않았으며, 공기량과 버너갯수는 부하에 따라 적절하게 운용하였다.

넷째, 이단연소에 의한 보조공기와 COFA 및 SOFA의 독립운전시 NO_x 변화조사, COFA와 SOFA 동시운전시 NO_x 발생량을 병행 조사하였다. 또한 COFA 및 SOFA를 동시운전 하면서 부하변동에 따라 NO_x 변화를 조사하였다.

이 내용을 요약하면 Table. 4와 같다.

Table 4. Experimental and operating conditions for NOx control test.

Experimental parameter	Operating Condition			
	Load (MW)	O ₂ (%)*	Number of Burner	Staged combustion
Load change	46~75	~0.86	5~8	AFA ○ COFA × SOFA ×
Air ratio	70	0.86~1.7	8	AFA ○ COFA × SOFA ×
Flue gas recirculation**	30	1.8	4	AFA × COFA × SOFA ×
Auxiliary air flow	46	1.39	6	AFA ○ COFA × SOFA ×
COFA flow	70	0.86	8	AFA ○ COFA ○ SOFA ×
SOFA flow	70	0.86	8	AFA ○ COFA × SOFA ○
SOFA & COFA flow	70	0.86	8	AFA ○ COFA ○ SOFA ○
Load change with SOFA & COFA flow	61~72	~0.86	7~8	AFA ○ COFA ○ SOFA ○

* O₂ concentration of flue gas

** with the change of recirculation ratio : 0~0.33

3) 측정항목 및 방법

시험내용에 따른 배출가스의 측정항목은 휴대용 계측기인 Testo-350 (Testo GmbH & Co, 독일)을 사용하여 보일러 출구에서 측정하였고 연돌에 설치된 연속 자동측정기와 측정값을 비교하였으나 두 계측기간 오차는 없었다.

노내온도 측정은 노 상부에 설치된 Flue Gas Temp. Monitoring System의 측정값을 이용하였다.

배기가스 측정값의 측정항목 및 방법은 다음과 같다.

Table 5. Measuring item and method.

Measuring Item	Method	Range
NOx	electrolyte	0~2000ppm
O ₂	electrolyte	0~21%
CO	electrolyte	0~2000ppm
In-furnace temp.	sonic wave	0~2000℃

IV. 결과 및 고찰

1. 발전부하 변동에 따른 영향

발전부하의 변동에 따른 질소산화물 배출특성을 파악하기 위하여 발전부하를 46MW에서 75MW로 변화시키면서 NOx 배출농도와 노내온도 변화를 측정된 결과를 Fig.13에 나타냈다. 여기서 보면 부하46MW에서 75MW로 증가할 때 NOx 배출농도와 노내온도 변화를 나타낸 그림이다. 이 부하 범위에서 NOx 배출농도는 115ppm에서 159ppm으로 점진적으로 증가하였고 노내 온도도 유사한 경향으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 발전부하 증가에 따라 노내 온도가 상승하고 이에따라 Thermal

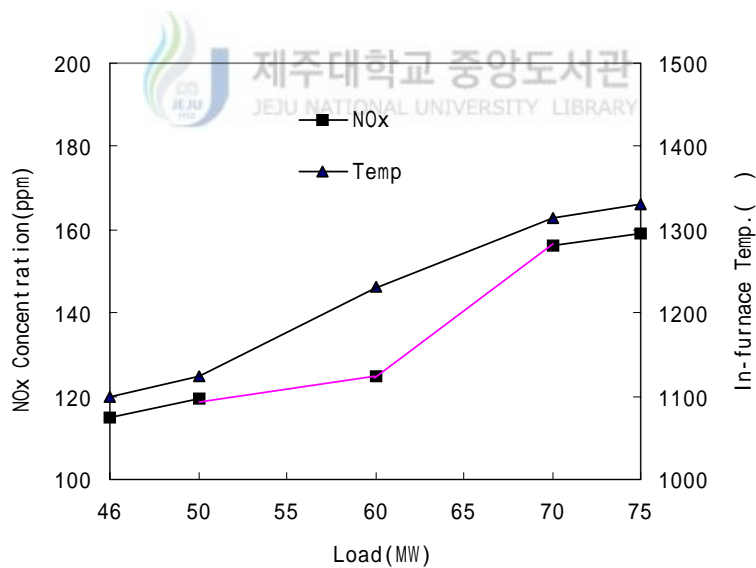


Fig. 13. NOx emissions and in-furnace temperature distributions with load change.

NOx 생성량이 많아지기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.14는 버너 장착개수에 따른 질소산화물 배출농도 및 노내온도 분포 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 동일 부하에서 버너장착 개수를 달리하면 버너 개수가 많은 경우가 적은 경우보다 질소산화물 배출량이 많음을 알 수 있다. 이는 같은 부하에서 노내 열 부하는 동일하나 버너장착 개수가 증가하면 버너출구의 연료유 분출속도가 낮아져 상대적으로 단염을 형성하기 때문에 화염온도 상승으로 NOx 배출농도가 높아지는 것으로 판단된다.

또한 버너장착 개수가 적으면 상대적으로 버너 주위로 투입되는 공기량이 적어지므로 자연 연소효과로 질소산화물 배출농도가 낮아진다. 즉 연소용 공기는 점화되지 않은 버너에서도 같은 양만큼 노내로 투입되기 때문에 동일 부하에서 버너 장착개수가 적으면 점화된 버너 주위에서 투입되는 연소용 공기량이 줄어들게 된다. 이는 동일부하에서 버너 장착개수가 많은 경우가 노내 온도가 높은 것으로도 알 수 있다.

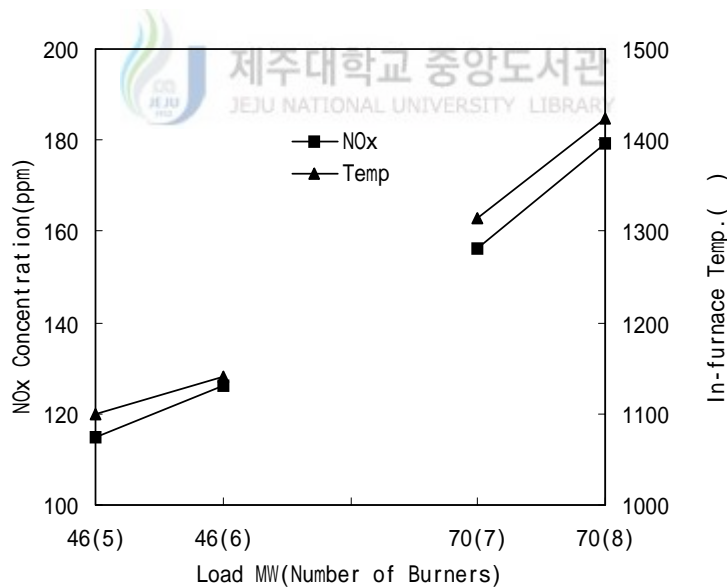


Fig. 14. NOx emissions and in-furnace temperature distributions with number of installed burners.

2. 공기비 변화에 따른 NOx 저감특성

시험대상 보일러는 접선연소방식을 채택하여 최소의 연소용 공기로도 와류와 확산에 의해 연료와 공기가 충분한 시간을 통하여 서서히 혼합되면서 완전연소가 가능하도록 설계되어 있다. 실제 운전시 부하 70MW 이상에서 연소가스 중 산소농도를 0.86%의 저과잉공기 운전을 하고 있다. 본 시험에서는 부하를 70MW로 동일하게 유지한 조건에서 공기비를 1.034에서 1.088까지 변화시키면서 공기비에 따른 질소산화물과 일산화탄소 배출농도를 측정하여 그 결과를 Fig.15에 나타냈다.

공기비를 1.034에서 1.088로 변화하였을 때 NOx는 166.8ppm에서 191.5ppm으로 증가하였다. 이는 공급 공기량 증가에 따라 노내 산소농도가 증가하여 NOx 발생량이 증가함을 보여주고 있으나 공기비가 1.061 이하에서는 NOx 생성량에 큰 영향이 없음을 나타냈다. 그리고 실제 운전 공기비인 1.047 보다 낮은 1.034로 운전시 NOx는 5ppm 정도 낮아졌으나 CO 농도는 7.6ppm에서 45ppm으로 급격히 증가하였다. 이는

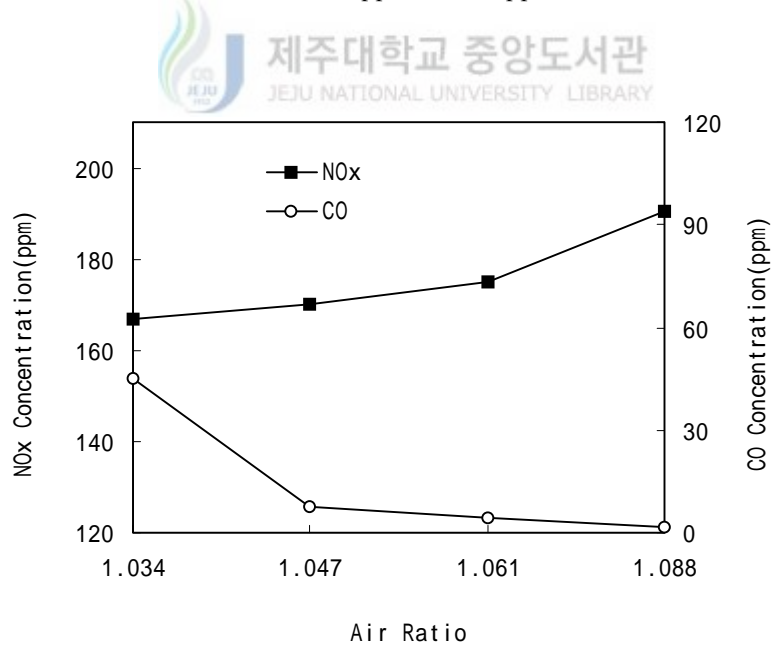


Fig. 15. NOx emissions with air ratio.

실제 운전시 저과잉공기로 운전되고 있어 이보다 저과잉공기 운전은 질소산화물 저감 효과가 극히 미미한 반면에 일산화탄소 농도가 급격히 증가하고 있어 실용적이지 못함을 알 수 있다

3. 배기가스 재순환에 의한 NOx 저감특성

노내온도 저감 및 증기온도를 제어하기 위해 G/R Fan이 설치되어 있고, 발전 최대 부하의 30~40% 이상에서 기동된다. 본 시험에서는 배기가스 재순환에 따른 NOx 저감효과를 파악하기 위하여 350~400℃의 보일러 출구 배기가스를 배기가스 재순환율 0에서 33% 범위가 되도록 보일러 하부로 주입하면서 NOx 배출농도를 측정하여 그 결과를 Fig.16에 나타냈다.

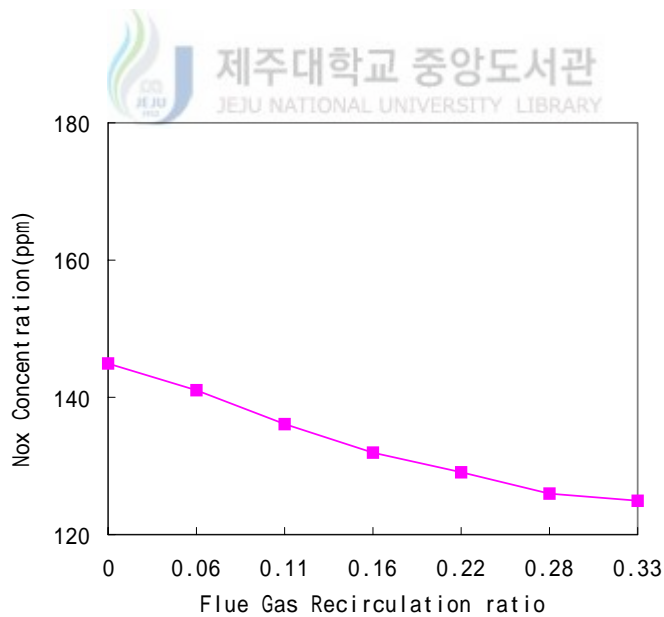


Fig. 16. NOx emissions with Recirculation ratio of flue gas.

부하 30MW 이하의 저 부하에서는 높은 공기비 운전으로 NOx 배출농도가 145ppm으로 상대적으로 높는데, 이 시점에서 G/R Fan이 기동되면 NOx 배출농도는 최저 125ppm으로 약14% 정도 감소되는 저감효과를 보였다. 이는 재 순환된 배기가스가 노내온도를 낮추고 산소농도를 희석시켜 NOx 발생량이 억제되는 효과를 나타낸 것으로 생각된다.

4. 다단연소(OFA 공기량 변화)에 의한 NOx 저감특성

1) 보조공기(Aux. Air)에 의한 영향

연소설비 특성에서 설명한 것과 같이 부하 46MW 까지는 Primary 공기 즉, Oil Compartment의 주 연소용 공기만으로 연소가 진행된다. 그 이상의 부하에서는 연소용 공기량 증가로 Windbox와 연소로의 차압이 설정치 이상으로 증가하여 Aux. Port가 열리게 된다.

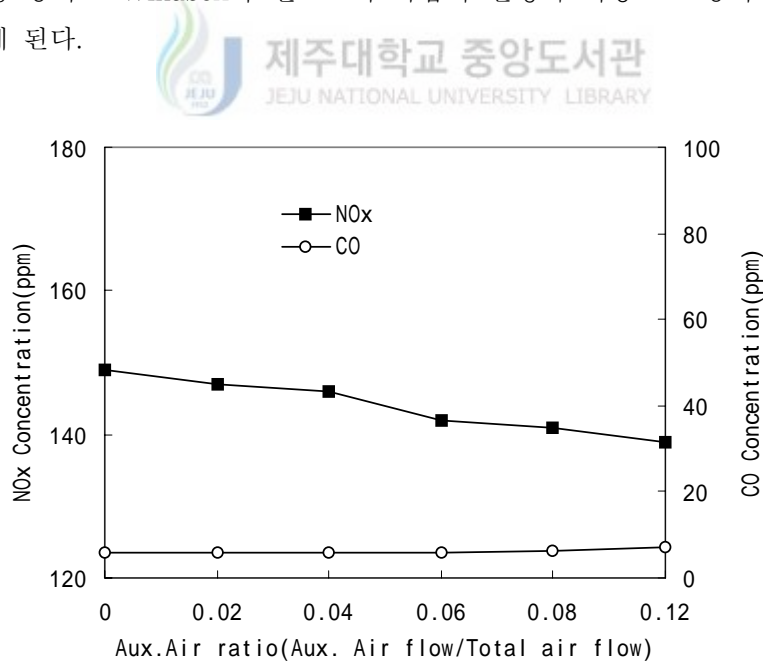


Fig. 17. NOx emissions with Auxiliary air flow ratio.

본 시험에서는 보조공기량에 따른 NOx 배출특성을 알아보기 위하여 발전부하와 공기비를 각각 46MW와 1.088로 일정하게 유지하면서 Aux. Air량을 총 공기량의 0에서 12% 까지 공급하였을 때 질소산화물과 일산화탄소 농도를 측정하여 그 결과를 Fig.17에 나타냈다.

그림에서와 같이 질소산화물은 150ppm에서 139ppm으로 7% 정도 감소하였고 CO 농도는 약간 증가하였다. 이는 Fuel Air 계통의 1단 연소에서는 연료과잉 상태로 산소농도 감소에 따른 NOx 발생이 줄어들고, Aux. Air는 화염 경계면 에서 이단연소를 시켜 줌으로서 NOx 저감효과를 본 것으로 판단된다.

2) COFA에 의한 영향

Fig.12에 나타낸 Oil Firing System과 같이 COFA는 Main Windbox 최상단에 위치한 2개의 Air Port를 지칭한다. Oil Compartment는 연료 연소를 위한 1차 공기를 받아들이고, 각 Oil Compartment 상, 하부에 각각 보조공기 Port를 통하여 보조공기를 받아들인다. COFA 운전시 Aux. Air중의 일부를 각 Corner별 2개의 COFA Port를 통하여 투입하게 되며 총 공기량은 동일하게 유지한다.

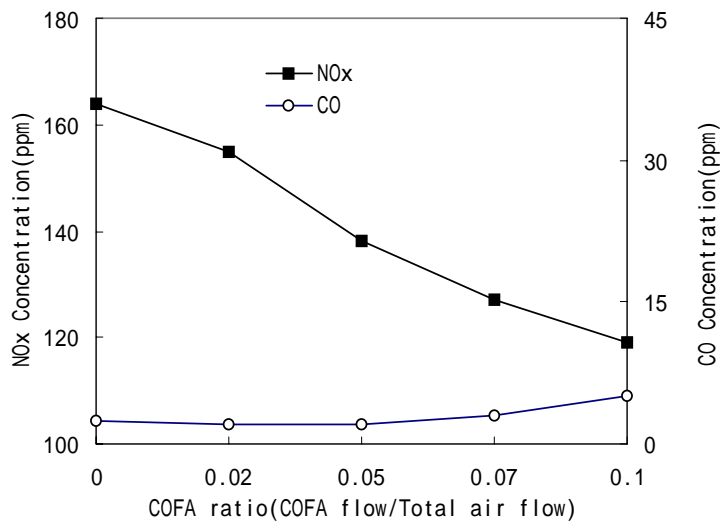


Fig. 18. NOx emissions with COFA flow ratio.

Fig.18은 부하 70MW, 공기비 1.045를 유지하고 COFA Flow 양에 따른 NOx, CO 농도의 변화를 나타낸 그림이다. COFA flow를 총 공기량의 0~12%까지 공급하였을 때 질소산화물은 164ppm에서 119ppm으로 약 27% 감소하였고 CO 농도는 거의 증가하지 않았다. 이는 Aux. Air중의 일부를 버너상단에 분산 공급함으로써 이단연소 계통에서 연료가 서서히 연소되어 열 부하가 노내에 분산되므로 COFA Air ratio 증가에 따라 NOx 발생량이 감소하는 것으로 보여진다.

3) SOFA에 의한 영향

Fig.12에 나타낸 바와 같이 SOFA는 Main Windbox와 분리되어 별도의 Windbox로 구성되어 있으며 Tilt도 별도로 구동할 수 있다. COFA와 마찬가지로 SOFA 개도를 열면 보조공기의 일부가 두 개의 SOFA Port를 통하여 노내로 공급되며, 이 때 총 연소용 공기량은 일정하게 유지된다.

Fig.19는 부하 70MW, 공기비 1.045, SOFA tilt를 0으로 유지하면서 SOFA Flow 양에 따른 NOx, CO 농도의 변화를 나타낸 것이다. SOFA flow를 총 공기량의 0~12% 까지 공급하였을 때 NOx 저감율은 최대 35% 정도로 크게 감소하였고, CO 농도

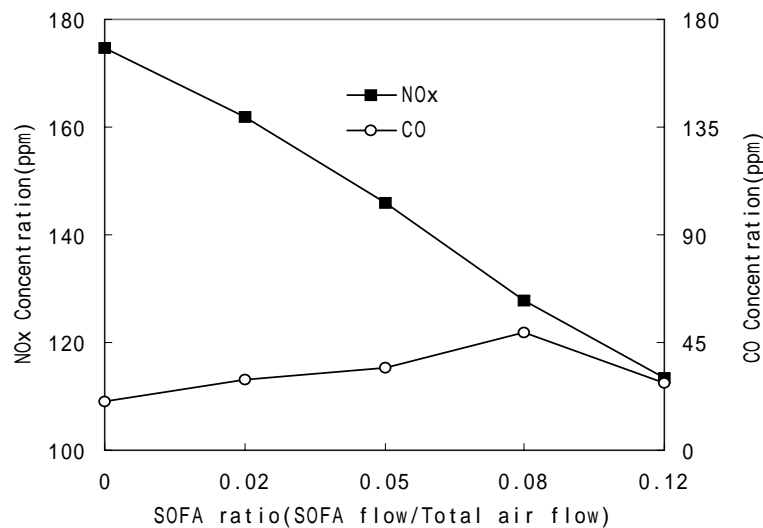


Fig. 19. NOx emissions with SOFA flow ratio.

는 전, 후 차이가 크지 않았다. 이는 COFA 연소와 마찬가지로 SOFA 연소에 의한 이단연소 효과이며, CO 농도 변화가 크지 않은 것으로 보아 노내 연소상태는 안정된 상태로 유지된 것으로 보인다.

한편 SOFA의 공급위치가 NOx 발생량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 SOFA flow가 총 공기량의 12% 일 때 SOFA Tilt를 -5~+15. 로 변화하면서 NOx, CO 농도변화를 측정하였다. 시험결과 SOFA Tilt를 버너방향으로 하향 조정하면 NOx는 약간 증가(1~5ppm) 하였고 15. 로 상향 조정하면 4~5ppm 정도 감소하였다. 이는 Tilt 하향 조정시는 주 연소영역으로 SOFA 공기가 주입되어 지연연소 효과를 상쇄하고, 상향 조정시는 주 연소영역과 더욱 분리시켜 OFA 공기가 노내로 공급되어 지연연소 효과를 상승시키기 때문으로 판단된다.

4) COFA & SOFA 동시 운전에 따른 NOx 영향

Fig.20은 COFA & SOFA를 동시에 운전할 경우 COFA와 SOFA로 공급되는 공기량의 비에 따른 NOx 저감특성을 파악하기 위하여 발전부하를 75MW, 공기비 1.045를 유지하면서 COFA & SOFA 공기량에 따른 NOx, CO, 노내온도 변화를 측정한 결과를 나타낸 그림이다. 이 때 COFA와 SOFA에는 같은 량의 공기량을 공급하였다. 이 결과에서 보면 전 시험구간에서 CO 농도가 23ppm이하로 유지되어 연소상태가 양호하게 유지되었고, COFA & SOFA ratio가 0.11에서는 COFA & SOFA를 가동하지 않은 경우에 비해 NOx 농도가 162ppm에서 114ppm으로 30%의 NOx 저감율을 보이고, COFA & SOFA ratio 0.15 에서는 34%의 NOx 저감율을 나타내고 있다. 이는 SOFA 단독 운전시와 거의 같은 다단연소에 의한 NOx 저감효과를 보이고 있는 것으로 판단된다. 그러나 총 공기량에 대한 COFA와 SOFA 공급 공기량의 비가 0.11보다 큰 조건에서는 NOx 저감효율은 큰 효과가 없는 반면에 CO가 현저히 증가하는 것으로 보아 보일러 효율은 다소 저하할 수 있는 문제점이 나타날 수도 있을 것으로 예상된다.

Fig. 21은 COFA & SOFA flow 변화에 따른 노내 최고온도 분포 변화이다. SOFA & COFA 공기량이 증가하면 노내온도가 감소하였는데 이는 SOFA & COFA flow가 증가하면 지연연소로 노내 최고화염온도가 감소하고 이에 따라 Thermal NOx 생성을 억제하여 NOx 배출농도가 감소하는 것을 잘 뒷받침해 주는 결과로 생각된다.

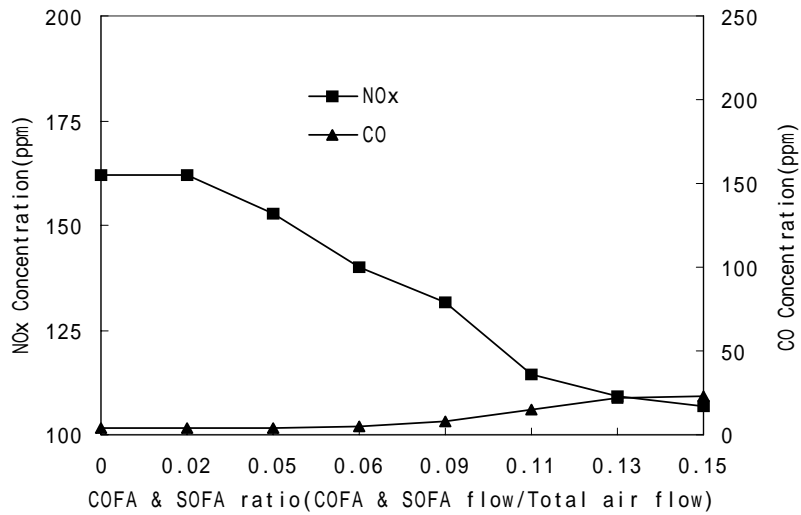


Fig. 20. NOx emissions with the flow in case of simultaneous operation of SOFA & COFA.

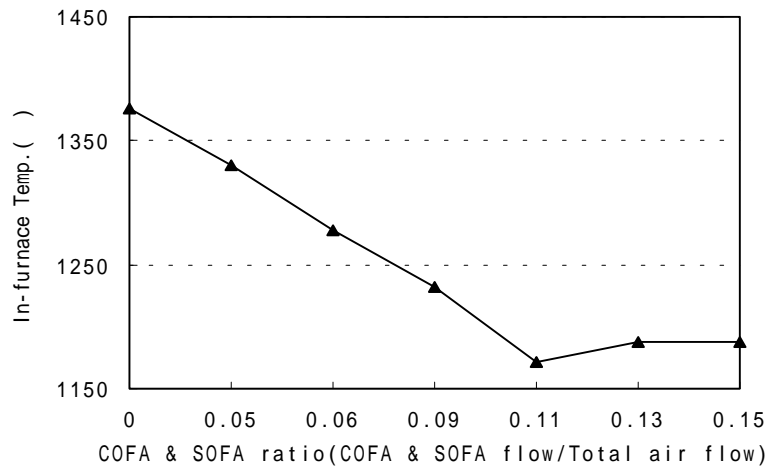


Fig. 21. In-furnace temperature distributions with simultaneous operation SOFA & COFA.

5) 발전 부하별 SOFA & COFA Ratio에 따른 영향

Fig. 22는 부하별 총 공기량에 대한 COFA와 SOFA 공급 공기량 비에 따른 질소 산화물과 일산화탄소 배출농도를 나타낸 그림이다 이 때 각 시험조건별 연소용 공기량의 비는 대략적으로 Table 6.과 같다.

Aux. Air 만으로 연소시 부하별 총 연소용 공기량 중의 Aux. Air 공기량은 약 16~32% 정도이고, 다단연소시 총 공기량의 3~13% 정도를 SOFA & COFA Port로 주입하였다.

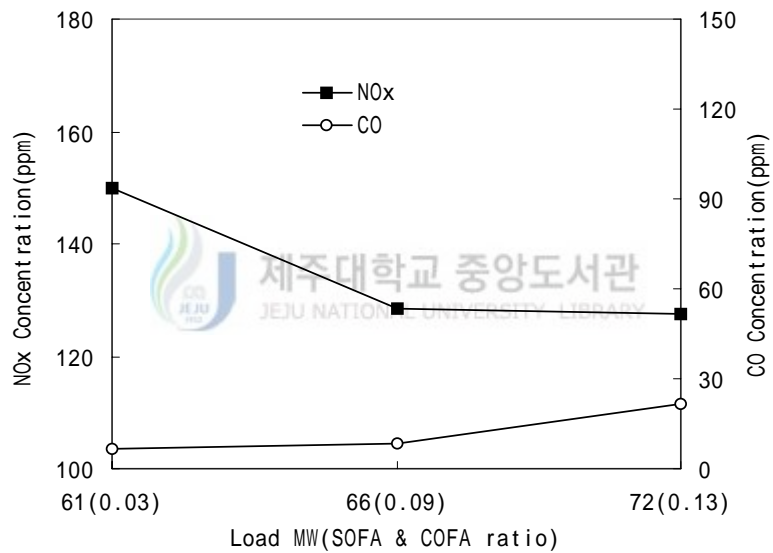


Fig. 22. NOx emissions with load change, SOFA & COFA flow.

Table 6. Combustion air distribution with load change.

Load Air i n j e c t i o n port	60MW			65MW			70MW		
	Primary Air	Aux. Air	SOFA & COFA	Primary Air	Aux. Air	SOFA & COFA	Primary Air	Aux. Air	SOFA & COFA
Air flow rate (ton/hr)	170	26	7	170	24	20	170	25	30

Fig.22에서 보면 이와 같은 조건으로 다단연소를 하였을 때는 부하증가에 따라 질소산화물 배출농도가 감소하는데, 이 결과는 보조공기만 공급하면서 발전부하 변동에 따른 NOx 배출농도 변화를 측정 한 결과와 상반되는 경향을 보이고 있다. 이는 부하증가에 따라 COFA & SOFA의 공급 공기량 비를 증가시킴으로서 다단연소에 의한 NOx 저감효과가 부하증가에 의한 NOx 증가율 보다 크기 때문인 것으로 판단된다.



V. 결론

중유화력 발전소에 적용할 수 있는 저 NO_x 연소기술의 NO_x 저감 효과를 파악하고 최적 운전조건을 찾아내기 위한 기초자료를 확보하기 위해 실제 운전되고 있는 발전소 연소설비에 저 NO_x 연소기술을 적용한 사례를 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 발전부하가 증가하면 연소실내 열부하가 증가하고 이에 따라 노내온도가 상승하여 질소산화물의 배출농도는 증가하는 경향을 보였으며, 동일부하에서는 공기비가 작을수록 NO_x 배출농도가 다소 감소하는 경향을 나타냈으나 NO_x 저감효과가 크지 않을 뿐 아니라 특히, 실제 운전 공기비인 1.047이하 에서는 CO 배출농도가 크게 증가하므로 저과잉공기 연소법의 적용은 제한적인 것으로 판단된다.
2. 배기가스 재순환법을 실제 적용한 결과 재순환율이 증가함에 따라 NO_x 배출농도는 감소하는 경향을 보였으며 재순환율이 33%일 때 NO_x 배출농도는 125ppm으로 재순환율이 없는 경우에 비하여 약 14% 정도의 NO_x 저감효과를 얻을 수 있었다.
3. 연소용 공기를 주 연소공기와 보조공기로 나누어 주입하는 이단 연소법에서는 총 공급공기 량에 대한 보조공기 량의 비가 클 수록 NO_x 배출농도는 감소하였으나 저감효과가 크지 않아 보조공기 량의 비가 0.12인 조건에서 NO_x 저감효과는 약 7% 정도 되었다.
4. 연소용 공기를 주 연소공기와 보조공기 공급 외에 COFA 또는 SOFA, COFA와 SOFA를 통해 연소용 공기를 분할 공급하는 다단 연소법에서는 COFA를 적용한 경우 총 공기량에 대한 COFA 공기량의 비가 0.12일 때 약 27%의 NO_x 저감효과를 보였으며, SOFA를 적용한 경우에는 최대 35%, COFA와 SOFA를 동시에 적용했을 경우에는 최대 34% 정도의 NO_x 저감효과를 얻을 수 있었다.

5. 본 연구에서 적용한 저 NO_x 연소법의 NO_x 저감 효과를 비교해 보면 다단 연소법이 지연연소 효과와 국부적인 최고 화염온도 감소, 고온부에서의 산소농도 감소효과 등이 동시에 나타나 저 과잉공기 연소법, 배기가스 재순환법, 이단 연소법 보다 더 큰 NO_x 저감효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 다만, 총 공급공기 량에 대한 분할 공급공기 량의 비가 일정수준 이상으로 커지면 CO 발생량 증가로 효율저하 등의 문제점이 우려되므로 연소상태를 저하시키지 않는 공급비를 산정하는 것이 중요할 것으로 생각된다.



VI. 참 고 문 헌

- 대기오염협회 대기오염공학, 도서출판 동화기술
- C.D. cooper, F.C.Alley 대기오염방지 공학, 신광문화사
- 대기환경기술전문자그룹세미나 자료집, 1999, 한국전력공사, 87-122
- 신규식, 최병선, 김재평, 김성철, 1986, 1987, 질소산화물 저감대책 연구, 한국전력공사 기술연구원
- 연소기술 교류회 기술세미나 자료집, 2001 한국전력 발전연구실
- 북제주화력 2,3호기 운전조작 설명서, 2001, 한국전력공사
- 환경기술업무자료편람, 1999, 탈질교육 습득, 한국전력공사, 13-19
- 환경대기실무, 2000, 한국전력공사
- Joseph G.SINGER, combustion Fossil Power systems, combustion Engineering, INC
- 선박용 NOx 후처리 시스템 개발, 1994, (주) 제너럴시스템 통산산업부
- Bosch H. and Janssen F., 1998, Catalysis Today, 2(4), 369.
- F.A. Bagwell, k.E. Rosenthal, D.P Reixeira, B.P. Breen, N. Bayare de Volvo, S. Kerho, 1971, Utility boiler operaring moods for reduced nitric oxide emissions, Journal of the Air Pollution Control Association, 702-708

- Fenimore, C.P., 1971, Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames, 13th. Symp.(Int.), 373.
- John macphail and Les king., 1999, New laws prompt focus on low NOx options, Modern power system, November, 29-23.
- NOx Control Training Combustion staging, 1997, Radian International LLC, 5-24.
- Shaw, J.T. and A.C. Thomas, 1968, Oxides of Nitrogen in Relation to the Combustion of coal, 7th. Inter. Conf. on Coal Sci., Prague, Czechoslovakia.



감사의 글

늦게나마 다시 시작한 배움의 길이 였지만 2년 6개월의 과정은 내 자신이 부족하고 모자람을 다시 한번 확인시켜 주었습니다.

이런 저에게 항상 용기와 자신감을 심어주고 동기를 주면서 격려를 아끼지 않으신 주위의 모든 분들께 이 자리를 빌어 깊은 감사를 드립니다.

특히 논문 완성을 위해 논문의 소재에서부터 작성요령 까지 자상하게 가르쳐주신 허철구 교수님과 논문 내용의 상세한 부분까지 지도와 조언을 주신 이기호 교수님, 조은일 교수님 그리고 대학원 전 과정 중에 언제나 바쁜 일정에도 시간을 빠뜨리지 않고 좋은 가르침을 주신 오윤근 교수님, 허목 교수님, 감상규 교수님, 이용두 교수님 께도 감사를 드립니다.

전력산업의 구조개편에 따라 회사가 6개로 나누어지는 아픔도 있었지만, 새로운 회사의 발족과 함께 경쟁력 있는 회사, 환경친화적인 회사의 목표 달성을 위한 의지로 질소산화물 저감 연소시험에 참여를 하여준 제주화력발전처 여러 직원들에게도 감사드립니다. 특히, 연소시험 전 과정에 참여하고 자료작성에 지원을 하여준 환경과 오동훈 씨에게 고마움을 전합니다.

우연하게도 재학기간 중에 장인과 아버님이 모두 타계하여 저 세상으로 가셨지만 살아 계셨으면 기뻐하고 격려하여 주리라 믿습니다. 생전에 자주 찾아 뵙지 못하고 효도하지 못한 죄송함을 이 작은 논문 한편으로 용서를 빕니다. 그리고 따뜻한 보살핌과 뒷바라지를 하여준 어머니, 장모님, 내 아내, 아들과 딸들에게 고마움과 미안함을 전합니다.

보잘 것 없는 이 작은 결실이 쾌적하고 깨끗한 대기환경을 개선하는데 조그만 도움이 되어지기를 바랍니다.

2001. 12

문 성 홍