

<技術論文>

2단 연소에 의한 NO 배출 저감에 관한 연구

유현석* · 최정환* · 오신규**

(1994년 6월 9일 접수)

Reduction of NO Emission by Two-Stage Combustion

H. S. You, J. H. Choi and S. K. Oh

Key Words : Two-Stage Combustion(2단 연소), Flue Gas Recirculation(배기가스 재순환), Thermal NO(열적 NO), Natural Gas(천연가스), Air Staging(공기다단), Fuel Staging(연료다단)

Abstract

In order to investigate the reduction of NO emissions, natural gas was fueled for two-stage combustion apparatus. NO and CO emissions were described by five variables : total air ratio, primary air ratio, secondary air injection position, secondary air injection velocity, and swirl ratio. It was mainly observed that, as the primary air ratio increased, NO emission increased but CO emission decreased drastically between the primary air ratios of 0 and 0.4. NO emission decreased with increasing the secondary air injection position and secondary air injection velocity. The effect of weak swirl on NO emission was found to be insignificant.

기호설명

D : 연소로 직경

L : 버너출구로부터 축방향거리

V_{2nd} : 2차 공기 주입속도

S : 신회도

λ_{1st} : 1차 공기비

λ_t : 총 공기비

1. 서론

연소과정 중에 생성되는 NOx는 주로 NO와 NO₂이며 NO는 공기 중의 질소와 산소로부터 생성되는 Thermal NO와 연료 중의 질소성분으로부터 생성되는 Fuel NO의 2종류가 있다. 또 Thermal NO는 생성기구에 의해 Zeldovich NO와

Prompt NO의 2가지 종류로 구분된다.

연소시 배출되는 NO를 저감시키기 위해서는 질소성분의 함유율이 낮은 연료를 사용하거나, NO생성이 억제되도록 연소기술을 개선하거나, 촉매등을 이용하여 생성된 NO를 제거하는 방법을 사용하여야 한다.

연소기술의 개선에 의하여 NO생성을 억제시키는 방법으로는 배기가스 재순환,⁽¹⁾ 물⁽²⁾ 또는 증기 분사⁽³⁾ 또는 단계적 연소기법 등이 있다. 이 중 단계적 연소기법은 Thermal NO와 Fuel NO 모두에 효과적인 방법⁽⁴⁾으로 활발한 연구와 개발이 진행되고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

단계적 연소방법은 연료 및 공기를 단계적으로 나누어 공급하여 국부적으로 연료과농의 환원 분위기를 형성시켜 NOx의 생성억제 및 N₂로의 환원을 촉진시킨 후 충분한 공기를 공급하여 완전연소시킴으로써 연소효율의 저하없이 NOx 배출을 저감시키는 방법으로서 공기를 단계적으로 공급하는 방법

*한국가스공사 연구개발원

**정회원, 한국가스공사 연구개발원

과 연료를 단계적으로 공급하는 방법이 있다. NOx 배출 저감을 위한 단계적 연소기법은 현재 저NOx버너⁽⁸⁾, 가스터빈 연소기⁽⁹⁾, 및 보일러⁽¹⁰⁾ 등에서 이용이 되고 있으나 단계적 연소시의 NO 저감의 주요 변수인 1 및 2차 공기비나 주입위치 등에 관한 기초자료는 거의 발표되어 있지 않다.

국내에서 사용되고 있는 천연가스는 사용의 편리성으로 인하여 그 수요가 급격히 증가되고 있는 추세이나 연소시 연료의 종류에 관계없이 생성되는 NO는 해결되어야 할 과제이다. 그러나 국내에서 사용 중인 천연가스는 질소 함유율이 낮기 때문에 연소시 배출되는 NO는 대부분 Thermal NO이므로 그 생성 원인을 제거함으로써 NO 배출을 줄일 수 있다.

그러므로 본 연구는 천연가스를 연료로 사용할때 생성되는 Thermal NO를 저감시키기 위한 기초 자료를 획득하기 위하여 수행되었으며 공기를 단계적으로 주입할 수 있는 소규모 실험 장치를 사용하여 공기 2단 주입에 따른 NO 배출 특성에 대해 고찰 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구를 수행하기 위해 사용된 실험 장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 연료 및 공기의 공급부, 연소기부 및 배기가스농도 측정부로 나뉘어진다.

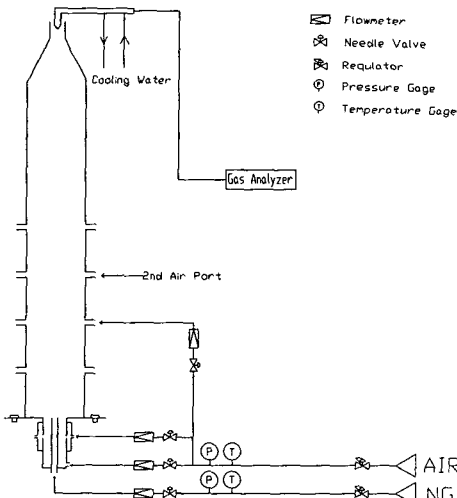


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

연소용 공기는 공기압축기를 지나 수분증발기를 통과하면서 압축시 발생하는 수분이 제거되고, 긴급안전차단변과 압력조정기들을 지나면서 설정된 압력으로 감압된다. 유량계의 조절변에서 적정의 유량이 조절된 후 연소기로 공급된다. 연료는 긴급 안전차단변, 압력조정기, 유량계를 거쳐 연소기로 공급된다.

연소기는 동축분류 선회확산화염을 형성하기 위하여 연소용 공기가 Fig. 2와 같은 접선방향주입 (tangential entry)이 되도록 제작하였으며 선회용 공기는 outer tube에 설치된 4개소의 접선방향 주입구를 통한 후, 균일한 선회유동을 형성하기 위하여 다시 inner tube에 뚫린 4개소의 접선방향 슬롯을 통과하여, 축방향으로 주입되고 있는 공기와 섞여 최종적으로 열고자 하는 선회강도의 유동장을 형성하게 된다.

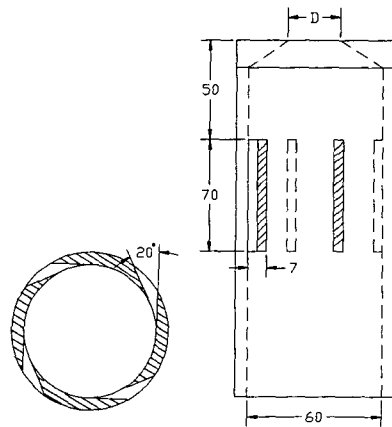


Fig. 2 Details of swirl generator

Table 1 Composition of fuel

Composition	Rate(Vol%)
CH ₄	88.987
C ₂ H ₆	8.829
C ₃ H ₈	1.237
i-C ₄ H ₁₀	0.381
n-C ₄ H ₁₀	0.537
i-C ₅ H ₁₂	0.016
N ₂	0.013
Heating value	43.95 MJ/Nm ³

그리고 직경 100 mm, 높이 900 mm인 2단 연소 용 연소로에는 2차 공기 주입시 기연가스와 2차 공기의 혼합을 양호하게 하기 위하여 2차 공기 주입구를 연소로 둘레에 등간격으로 설치하였다.

연료는 현재 국내 공급중인 Table 1의 조성을 갖는 천연가스를 사용하였으며 연소기의 용량은 4.4 kW이다.

배기가스 채취를 위하여 stainless steel tube로 제작된 80°C의 물이 순환되는 수냉 채취기를 사용하였으며 배기가스 채취시 채취위치에서의 화학반응을 동결시키고자 배기가스가 급속팽창 되도록 채취기 선단의 직경을 0.9 mm에서 2 mm로 변화시켰다.

배기가스 중의 산소 농도는 자기식(SIEMENS, OXYMAT 5E), CO/CO₂는 비분산 적외선법(NDIR)(SIEMENS, ULTRAMAT 22P), NO는 화학발광법(analysis automation limited, 400 chemiluminescence NOx analyzer)을 이용한 가스분석기를 사용하였다.

배기가스의 온도를 측정하기 위한 열전대는 직경 0.3 mm의 R-type(Pt/Pt-Rh 13%)이며, 고온에서의 촉매작용을 방지하기 위하여 실리카(silica) 피막을 입혔고 화염장의 고온으로 인한 열전도를 방지하기 위하여 수냉식 지지대를 사용하였다.

2.2 실험방법

상기의 실험장치를 이용하여 총 공기비(공급된 연료를 연소 시키는데 소모된 총 공기량과 이론공기량과의 비), 1차 공기비(1차 공기로 공급된 공기량과 이론공기량과의 비), 2차 공기 주입위치, 2차 공기 주입유속, 1차 공기 선회도 등의 실험변수에 따른 NO 배출특성에 관해 실험을 수행하였으며, 선회강도는 LDV 시스템을 이용하여 유속을 측정하여 계산 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 총 공기비에 따른 NO 배출 특성

1차공기비가 0.6~1.0일 때 총 공기비 변화에 따른 NO 배출특성을 고찰하였으며 Fig. 3은 그 실험 결과이다. 총 공기비가 증가할 수록 NO는 감소하고 있는데 이는 동일 1차 공기비에서 총 공기비가 증가할수록 2차 공기 주입량이 증가하기 때문에 화염의 냉각 효과가 증가된 것이라 사료된다. 또 1차

공기비가 낮을수록 NO는 감소함을 알 수 있는데 이는 1차 공기비가 낮을수록 공기 희박상태로 연소되기 때문에 연소온도의 저하효과에 기인된 것이라 사료된다.

또 λ_{1st} 가 0.9와 1.0인 경우 $\lambda_t=1.3$ 일 때가 $\lambda_t=1.2$ 일 때보다 NO가 더 배출되고 있는데, 수치해석기법을 이용하여 분석하여 본 결과 이는 본 실험용 연소장치의 특성상 2차 공기가 연료 및 1차 공기의 방향과 각각으로 주입되므로 2차 공기의 일부가 1차 연소 영역에 혼입되어 연소에 영향을 미치게 되나 $\lambda_t=1.3$ 일 때가 $\lambda_t=1.2$ 일 때보다 1차 연소 영역으로 혼입되는 공기량이 많아 1차 연소 영역에 충분한 산소를 공급하게 되어 연소온도가 상승하기 때문이며, λ_t 가 1.4 이상이 되면 2차 공기의 1차 연소 영역으로의 혼입량이 증대되어 공기과잉 상태가 되므로 연소온도의 저하를 초래하기 때문에 NO 배출은 감소되는 것으로 사료된다.

그림에는 표시하지 않았으나 실험을 통하여, 전체적으로 총 공기비 1.2 보다 총 공기비 1.3일 때가 NO 및 CO 배출농도가 다소 낮아 본 실험에서는 총 공기비 1.3으로 실험을 수행하였다.

3.2 1차 공기비에 따른 NO 배출 특성

Fig 4는 1차 공기비 변화에 따른 NO 배출특성을 고찰하기 위하여 총 공기비가 1.3일 때, 2차 공기 주입높이(L)/연소로 직경(D)=1, 2 및 3의 위치에서의 실험결과를 나타낸 것이다. NO의 배출곡선은 산고 형태이며 1차 공기비를 감소시키면 NO의 배출이 최대가 되는 1차 공기비에서 CO의 배출

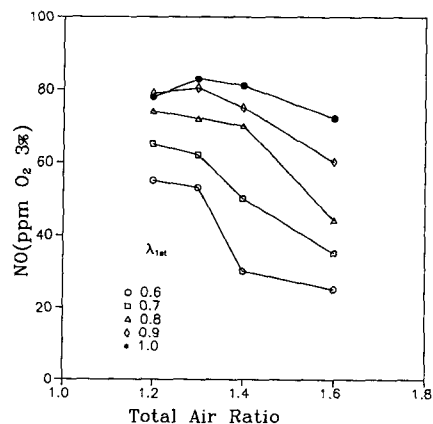


Fig. 3 NO emission characteristics with total air ratio (L/D=2)

은 최저로 감소되다가 1차 공기비가 계속 감소함에 따라서 다시 NO의 배출이 감소되면서 CO의 배출이 증가하는 경향을 보이고 있다.

NO의 최대 배출농도는 1차 공기비 1.0 부근에

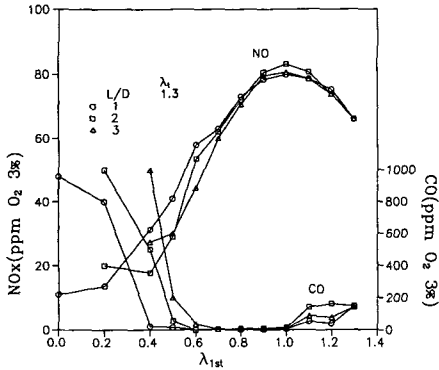


Fig. 4 NO emission characteristics with primary air ratio

서 나타나고 있는데, 이는 비다단시(1차 공기비 = 1.3)에는 연료와 공기가 배기가스 출구쪽으로 진행하면서 확산에 의하여 혼합이 이루어지나 다단연소가 시작됨에 따라 2차 공기의 유입으로 연료와 공기의 혼합이 촉진되기 때문에 이론혼합비 부근에서 연소가 일어나게 되어 NO 배출량이 최대가 된 것으로 사료된다.

3.3 2차 공기 주입위치에 따른 NO 배출 특성

Fig. 5는 2차 공기 주입위치에 따른 NO 배출특성을 나타낸 것이다. 주입위치가 1차 연소영역으로부터 멀어질수록 NO는 저감되는 경향을 나타내고 있으나 CO의 배출은 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이것은 1차 연소가스의 잔류시간이 길어짐에 따라 연소가스의 온도가 저하되어 2차 공기를 주입하여도 연소반응이 제대로 이루어지지 않기 때문에 NO는 저감되나 CO가 증가되는 것으로 사료된다.

Photo 1은 2차 공기 주입위치가 L/D=2와 L/D

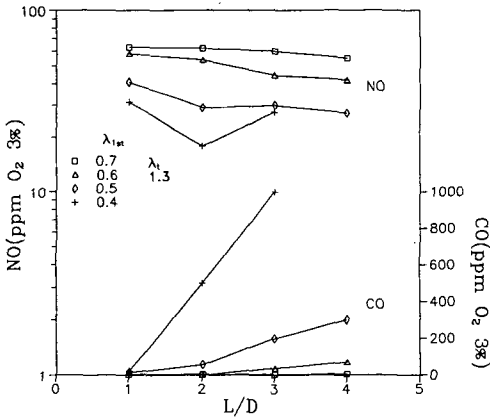
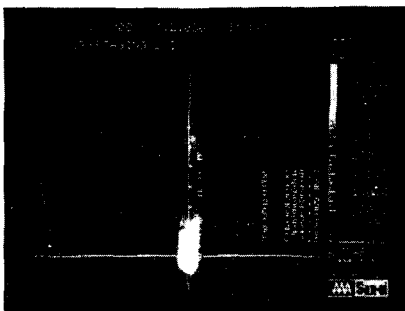


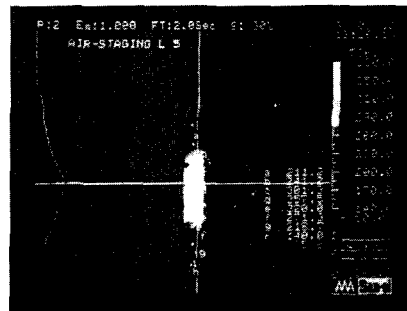
Fig. 5 NO emission characteristics with secondary air injection position



Fig. 6 NO emission vs. CO emission



(a) L/D=2



(b) L/D=5

Photo 1 Temperature distribution of combustor surface

=5일 때의 연소로의 표면온도 사진이다. 2차 공기 주입위치 근방에서 최고온도가 나타나고 있으며 L/D=5에서의 온도는 L/D=2에 비하여 낮다.

본 연구에서는 NO와 CO 배출 농도를 고려하였을 때 2차 공기 주입위치 L/D=1에 1차 공기비 0.4~0.6 사이가 최적이다.

이상의 배출특성을 NO와 CO로 나타낸 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 2차 공기 주입위치와 1차 공기비를 적절히 변화시키면 CO의 증가없이 NO를 30 ppm까지는 감소시킬 수는 있었다. 그러나 NO를 30 ppm이하로 낮추면 CO의 배출이 급격히 증가함을 알 수 있다.

3.4 2차 공기 주입속도에 따른 NO 배출 특성

2차 공기 주입속도에 따른 NO 및 CO의 배출특성을 고찰하였다. L/D가 증가할수록 연료노즐로부터 2차 공기 주입부까지의 거리가 멀어지기 때문에 실제 산업용 버너에 적용하기 위한 유용한 자료는 연료노즐과 2차공기 주입부까지의 거리가 짧아야 하며 또한 Fig. 4 및 Fig. 5로부터 L/D가 1일 때가 최적이기 때문에 L/D=1로 실험을 수행하였으며 Fig. 7은 그 실험결과를 나타낸 것이다. NO와 CO 모두 2차공기의 주입유속이 증가할수록 감소하고 있는데, NO가 증가하면 CO가 감소하는 앞의 실험결과와 상이한 결과를 보이고 있다. 이것은 앞의 실험변수들은 화학반응에 영향을 주는 인자이지만 주입유속은 화학반응보다 공기유동역학적 인자이기 때문에 유속의 증가는 연료와 공기의 혼합을 촉진시켜 CO의 배출을 감소시키며, NO의 경우 유속

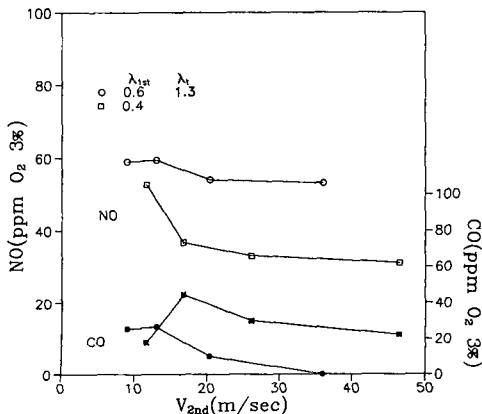


Fig. 7 NO emission characteristics with secondary air injection velocity

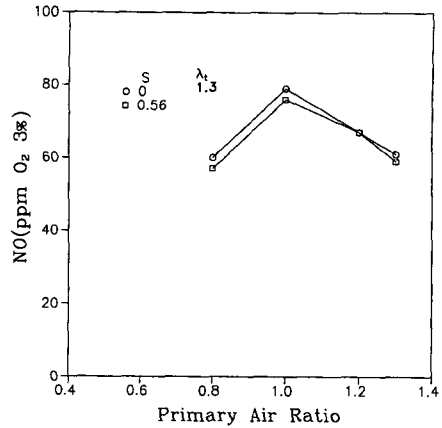


Fig. 8 NO emission characteristics with swirl ratio

의 증가가 화염의 냉각효과를 유발시켜 NO의 배출을 감소시키는 것으로 사료된다.

2차 공기 주입노즐의 제작상 어려움으로 2차 공기의 주입유속을 더 증가시키지 못하였다.

3.5 선회도에 따른 NO 배출 특성

Fig. 8은 선회에 의한 NO 배출 농도를 나타낸 것이다. 선회도 0.56에서는 비선회와 비교할때 큰 변화는 없지만 NO가 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 선회에 의해 연소로내에 약한 내부 재순환영역이 생성된 효과라고 추정할 수 있으나 두 값의 차이가 극히 작아 단정하기는 곤란하다.

선회도를 0.56 이상 증가시키지 못한 것은 공기 공급계통의 제한 때문이었으며 1차 공기비를 0.8 이하로 낮출 수 없었던 것은 1차 공기비 저하로 인한 공기유량의 감소로 선회류 생성의 효과가 저하되어 원하는 선회도를 얻을 수 없었기 때문이다.

4. 결 론

천연가스 연소시 발생되는 NO를 저감시키기 위하여 공기의 단계적 주입방법을 사용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 1차 공기비가 감소할수록, 2차 공기 주입위치가 1차 연소영역에서 멀어질수록 NO의 배출은 감소하나 CO는 증가하는 상반된 경향을 나타낸다.
- (2) 2차 공기의 주입유속의 증가는 NO 및 CO를 저감시키는 효과를 나타낸다.
- (3) 1차 공기의 약선회(선회도 0.56)는 NO에 큰 영향을 주지는 못한다.

참고문헌

- (1) Meier, J. G. and Vollerin, B. L., 1976, "The Design of an Integrated Burner-Boiler System using Flue-Gas Recirculation," *16th Symp.(Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp.63~76.
- (2) 이창학 등, 1987, "물첨가가 예혼합화염의 연소특성에 미치는 효과," *대한환경공학회지*, 제9권, 제2호, pp. 55~64.
- (3) Miyauchi, T. et al., 1981, "Effect of Steam Addition on NO Formation," *18th Symp.(Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 43~51.
- (4) Martin, F. J and Dederick, P. K., 1976, "NOx from Nitrogen in Two-Stage Combustion," *16th Symp.(Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 191~198.
- (5) Korea Electric Company, 1987, "A Study of the Technical Measure to Counter NOx," *KRC-85C-JOI*, pp. 59~145.
- (6) Farmayan, W. F., 1985, "Reduction of NOx Emission from Natural Gas Flames by Staged Fuel Injection," *Pro. of the 1985 Joint Symp. on Stationary Combustion NOx Control*, pp. 1~33.
- (7) Yamagishi, K., et al., 1976, "A Study of NOx Emission Characteristics in Two Stage Combustion," *15th Symp.(Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1157~1166.
- (8) Idoux, M., 1992, "Low NOx Burner," *Pro. Korea-EC Joint Seminar on Efficient Energy Technologies*, Seoul, Korea, pp. 11~43.
- (9) Bahr, D. W., 1971, "Control and Reduction of Aircraft Turbine Engine Exhaust Emissions," *Symp. on Emissions from Continuos Combustion System*, General Motors Research Lab., Warren, Mich., pp. 345.
- (10) Takahashi, Y., et al., 1982, "Development of MACT In-Furnace NOx Removal Process for Steam Generator," *Pro. of the 1982 Joint Symp. on Stationary Combustion NOx Control, Presented before the 44th Annual Meeting of the American Power Conference*.