

〈論 文〉

단계적 연소의 NO_x 저감에 대한 연구

채재우* · 전영남** · 이운영***

(1992년 6월 23일 접수)

A Study of NO_x Reduction in Stage Combustion

Jae-Ou Chae, Young-Nam Chun and Un-Young Yi

Key Words : Stage Combustion(단계적 연소), Stoichiometric Ratio(화학양론비), Injection Level(주입위치), Fuel Fraction(연료분할비), Fuel-N(연료 중 질소성분)

Abstract

Nitrogen oxides(NO_x) are air pollutants which are generated from the combustion of fossil fuels. Stage combustion is an effective method to reduce NO_x emissions. The effects of NO_x reduction by stage combustion in a pilot scale combustor(6.6kW) have been investigated using propane gas flames laden with NH₃ as Fuel-N. The results in this study are follows; (1) NO_x emissions are dependent on the reducing environment of fuel-rich zone regardless of total air ratio. The maximum NO_x reduction is at the stoichiometric ratio of 0.8 to 0.9 in the reducing zone. (2) NO_x reduction is maximum when burnout air is injected at the point where the oxygen in reducing zone is almost consumed. (3) NO_x reduction is dependent upon the temperature of reducing zone with best effect above 950°C in the reducing zone. (4) The fuel stage combustion is more effective to reduce NO_x formation in the wide range of stoichiometric ratio than two stage combustion. (5) The results of this study could be utilized mainly in a design strategy for low NO_x emission from the combustion of high fuel-nitrogen in energy sources ratio than as an indication of the absolute levels of NO_x which can be achieved by stage combustion techniques in large scale facilities.

1. 서 론

현재 널리 사용되고 있는 화석연료는 연소시 질소산화물(NO_x), 일산화탄소(CO), 미연탄화수소(THC), 매연입자(soot) 등의 오염물질이 배출된다. 질소산화물은 NO, NO₂, NO₃, N₂O, N₂O₃, N₂O₅를 가리키며, 인체에 해로운 NO(nitric oxide), NO₂(nitrogen dioxide)의 질소산화물을 소위 NO_x

라고 하는데 이는 호흡기질환, 식물의 성장둔화, 광화학적 스모그, 산성비의 원인이 되어 인류의 건강과 생활환경에 막대한 악영향을 끼친다.

질소산화물은 화석연료 연소시 배출되기 때문에 인구밀도와 밀접한 관계가 있으므로 구미 선진국에서는 화석연료를 사용하는 시설별, 연료별로 질소산화물 배출에 대한 규제치를 정하여 합리적인 규제를 하고 있다. 우리나라에서는 선진국에 비해 세분화된 규제치가 설정되어 있지 않지만 환경오염에 대한 인식이 증대되는 장래에는 우리나라의 규제치도 선진국과 비슷한 수준이 될 것으로 전망된다.

NO_x의 배출저감을 위한 방법으로는 연소기술을

*정회원, 인하대학교 기계공학과

**정회원, 인하대학교 기계공학과 대학원

***인하대학교 기계공학과 대학원

개선함으로써 질소산화물의 생성을 억제하는 방법, 배기가스에서 질소산화물을 제거하는 방법, 질소성분이 작은 연료를 사용하는 방법이 있다. 이 중 연소기술 개선을 위한 방법중의 하나인 단계적 연소(staged combustion)법은 화석연료 연소시 배출되는 NO_x 저감을 위해 가장 효과적인 방법으로 알려져 왔다.^(1~14)

연소 분위기(combustion atmosphere)를 연료과잉(fuel rich)의 상태로 만들어 연료와 공기의 혼합을 지연시켜 산소 농도 감소에 따른 질소산화물의 생성을 억제시키고 N₂로의 환원을 촉진시킨 후, 충분한 공기를 공급하여 완전연소를 이루어 연소효율의 저하없이 질소산화물 배출을 억제시키는 가장 대표적인 연소개선법으로 2단연소법(two staged combustion)과 연료의 단계적연소법(fuel staged combustion)이 있다.

2단연소에 대한 연구로는 Breen, B. P.⁽¹⁾와 Sarofin, A. F.⁽²⁾가 증기보일러에 사용된 비단열 연소시스템(nonadiabatic combustion system)에 이용하여 NO 배출을 제어하기 위해 연료과농-희박의 2단연소(rich-lean two-stage combustion)를 하여 연구를 수행하였으며, 열적 NO(thermal NO) 및 연료중에 함유된 질소(fuel bound nitrogen; Fuel-N)로부터 발생하는 연료 NO(fuel NO)를 2단연소가 모두 효율적으로 저감할 수 있음을 보였다.

Fenimore, C. P.⁽³⁾연료과농으로부터의 열손실은 국부 화학양론적 2차 공기의 혼합영역(local stoichiometric secondary air mixing zone)의 최대온도를 낮춤에 따라 Thermal NO의 생성을 감소시키고 동시에 연료과농 화염을 형성시켜 Fuel-N으로 부터의 NO 생성을 억제시켰다.

연료과농 1차측에서 가스 예혼합 화염을 형성후 2차측에서 연료희박의 상태로 유지시켜, 2단연소가 화염온도를 제어함에 따라 Thermal NO를 저감시킬 수 있음을 보였다.^(4,5)

Martin, F. J. 과 Dederick, P. K.⁽⁴⁾은 저위발열량의 합성가스를 이용하여 난류분류화염(turbulent jet flames)을 형성시켜, 단열되지 않은 상태(non-insulated)로 실험을 수행하였다. 이때 사용된 연료의 단열화염온도는 Thermal NO의 생성온도보다 훨씬 낮기 때문에 이때 생성되어진 NO는 모두 Fuel NO이었다.

Yamagishi, K.⁽⁶⁾등은 1차측 연료과농의 연소반응을 촉진시키기 위해 촉매를 사용하고 연료희박의 2

차측에서 Thermal NO의 생성을 억제시키기 위해 수냉한 저 NO_x 천연가스 보일러를 개발했다.

Gerhold, B. W.⁽⁶⁾등은 단열 2단연소 실험장치를 이용하여 단열화염의 상태에서 연료과농-희박연소의 경우 Fuel-N의 NO_x 생성에 대한 제어에 가장 효율적인 방법임을 입증하였다.

Beer, J. P.^(7,8)등은 1 MW의 MIT 2단 연소실험장치(MIT combustion research facility)를 이용하여 많은 Fuel-N의 NO_x로의 전환 및 저감에 대해 이론 및 실험적으로 연구를 수행하여, 두 경우에 있어 정량적인 좋은 일치율을 보였다. 특히 이론적 연구를 통해 연료과농측의 온도를 1900~2100°K로 유지하고 당량비(equivalence ratio)를 1.6~1.8로 유지하였을 때 가장 적은 NO_x 배출을 보였고, 가스상의 Chemical kinetics는 연료 중의 Fuel-N이 N₂나 NO_x로 전환에 중요한 역할을 한다는 것을 보였다. 그 후 같은 실험장치에서 석탄-액체연료(coal liquid fuels)의 경우도 2단연소가 NO_x 저감에 효율적이라는 것을 보였다.

Duxbury, J. 와 Welford, G. B.⁽⁹⁾는 석탄공급량이 230~325 Kg/h인 미분탄 연소장치의 실험을 통해 2단연소에서 총공기량이 같을 때 staging intensity(2차공기량/총공기량)가 증가할 수록, 미분탄의 입자가 미세할 수록 2단연소의 효과는 크다는 것을 밝혔다.

Sadakata, M.⁽¹⁰⁾ 등은 NO_x 저감 및 에너지 절약의 측면에서 2단연소시 연소용 공기의 예열효과에 대해 연구가 수행되어 졌는데, 연소용 공기를 300°C로 예열하였을 때 연료과농의 영역인 1차연소 영역에서의 중간생성물(HCN, NH₃)이 감소하며, 특히 연소용 공기의 예열에 의한 Thermal-NO 및 Fuel-NO의 생성이 거의 영향 없이 1차공기비가 0.8인 경우 최소 값을 가짐을 보였다.

연료의 단계적 연소의 경우 Wendt, J. O. L. 등⁽¹¹⁾은 연료 내의 질소성분으로부터 배출되는 NO_x는 2차 연료로서 메탄(methane), 암모니아(ammonia)를 재연소시킴으로서 저감될 수 있다는 실험적인 연구가 행해졌다.

Takahasi, Y. 등^(12,13)은 연료의 단계적 연소법을 실제 보일러에 적용한 예가 MHI(mitsubishi heavy industries)에 의해 보고 되었는데 주연료와 재연소 연료로서 프로판(propane), 중질유, 석탄을 사용하여 유해가스의 배출없이 50% 이상의 높은 NO_x 저감율을 얻었다. 또한 위와 같이 높은

NO_x 저감율을 얻기 위해서는 900°C 이상의 온도가 필요하고 재연소영역의 유지시간이 0.1초 이상이어야 하며 NO_x 저감율은 초기 NO_x의 농도와는 무관하다는 조건을 제시하였다.

또한 Chen등은⁽¹⁴⁾ NO_x 환원을 위한 재연소 연료(탄화수소)로서 프로판, 석탄을 사용하여 50% 이상의 NO_x 저감율을 보이고 있으며 2차 공기비 0.9에서 최대의 NO_x저감이 발생함을 보고하였다.

본 연구에서는 소규모 실험장치(6.6 kW)를 이용하여 NO_x 저감방법 중에 가장 효율적인 방법이라 알려진 공기 및 연료의 단계적 연소법(air and fuel staged combustion)을 이용하여, Fuel-N을 함유하고 있는 연료의 NO_x의 배출특성을 규명함은 물론 최적 저 NO_x 연소기술 향상 방안을 제시하고자 한다.

2. 연구변수 정의 및 화염의 형태

2.1 연구변수의 정의

(1) 총화학양론비(total stoichiometric ratio; SR_t)
총공기비는 연소시 공급되는 총연료를 기준으로 하여 공급되는 총공기량과 이론 공기량과의 비이다.

(2) 주연소영역 화학양론비(main combustion stoichiometric ratio; SR_m)
주버너에 공급되는 연료량을 기준으로 하여 버너에 공급되는 공기량과 이론 공기량과의 비이다.

(3) 재연소영역 화학양론비(reburning stoichiometric ratio; SR_r)
주버너의 연료량과 재연소연료를 합한 총연료를 기준으로 버너에 공급되는 공기량과 이론 공기량과의 비이다.

(4) 2차공기 주입위치(injection level of the secondary air; L_a)
버너로부터 2차공기가 주입될 때 까지의 거리를 표시하는 무차원수로서, 버너로부터 2차공기 주입 위치까지의 거리와 연소로 직경비이다.

(5) 재연소연료 주입위치(injection level of the reburning fuel; L_r)
버너로부터 재연소연료가 주입될 때 까지의 거리를 표시하는 무차원수로서, 버너로부터 재연소연료 주입 위치까지의 거리와 연소로 직경비이다.

(6) 완전연소 공기주입위치(Injection level of the burnout air; L_{aa})

재연소연료의 주입위치로부터 완전연소 공기가 주입될 때 까지의 거리를 표시하는 무차원수로서, 재연소연료의 주입 위치까지의 거리와 연소로 직경비이다.

(7) 재연소연료분할비(Reburning fuel fraction; F_r)

재연소연료 공급되는 연료량과 전체 공급연료량의 백분율이다.

(8) 연료 중 질소함유량(Fuel-N concentration)
연료 중에 포함된 질소성분의 중량 백분율이다.

재연소연료의 주입위치로부터 완전연소 공기가 주입될 때 까지의 거리를 표시하는 무차원수로서, 재연소연료의 주입위치로부터 완전연소 공기의 주입 위치까지의 거리와 연소로 직경비이다.

(7) 재연소연료분할비(Reburning fuel fraction; F_r)

재연소연료 공급되는 연료량과 전체 공급연료량의 백분율이다.

(8) 연료 중 질소함유량(Fuel-N concentration)
연료 중에 포함된 질소성분의 중량 백분율이다.

2.2 화염형태(Fig. 1참조)

(1) 2단연소법(Two stage combustion)

연소에 필요한 총공기를 2차로 나누어 주연소영역(main combustion zone)에 연료과농의 환원성 분위기를 형성시키고, 주연소영역의 상부에 나머지 공기를 공급하여 완전연소영역(burnout zone)을 형성하는 연소법이다.

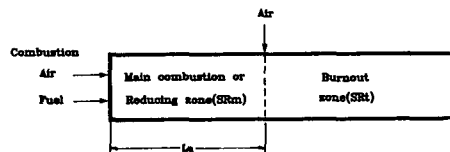
(2) 연료의 단계적 연소법(Fuel stage combustion)

주연소영역에서 연료의 대부분을 산화성 분위기에서 연소시키고, 재연소영역에 여분의 연료를 공급하여 연료과농인 환원반응 영역을 형성하고, 재연소영역 하부에 여분의 공기를 공급하여 완전연소하는 것이 연료의 단계적 연소법이다.

2.3 실험변수 및 특성

본 연구의 실험변수 및 실험특성은 각각 Table 1과 Table 2와 같다.

Flame type 1 - Two stage combustion



Flame type 2 - Fuel stage combustion

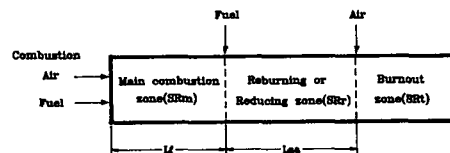


Fig. 1 Schematic of fuel and combustion air staging

Table 1 Experimental parameters

	Parameters	Reference parameter
Total stoichiometric ratio(SR _t)	1.1, 1.2, 1.3, 1.4	1.1
Injection lwvel of the secondary air(L _a)	1.0, 2.0, 3.0, 4.0	2.0
Injection lwvel of the reburning fuel(L _r)	1.0, 2.0, 3.0	1.0
Injection level of the burnout air(L _{aa})	1.0, 2.0, 3.0	1.0
Reburning fuel fraction(F _r)	14%, 25%,	25%
Ruel-N concentration (wt%)	1.0, 1.5, 2.0%	1.5%

Table 2 Experimental characteristics

Combustor dimension	Diameter 100 mm × Length 1,200 mm
Air(primary and stage) flow rate	105~134 l/min
Inst flow velocity range	2.5~7 m/sec
Stage flow velocity range	0~50 m/sec
Residence time range	5 sec
Fuel flow rate	0.6~4 l/min
Fuel velocity	2~6 m/s
Swirl number	0.3
Power level	6.6 kW
Combustor temperature range	26~1300℃

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

단계적 연소법을 이용한 NO_x저감을 규명하고자 Fig. 2와 같이 실험장치를 연소로(chimney), 버너(burner), 2차공기 및 재연소연료 공급장치로 구성하였다.

연소용 공기는 공기압축기(air compressor)로부터 2 kgf/cm²의 압으로 공급되어 에어 필터(air filter)에서 수분과 잔유물을 제거하고, 유동의 맥

동을 방지하기 위해 저장탱크를 거친 후 감압변(reducing valve)을 거쳐 2,500 mmH₂O로 감압되어 보정된 면적식 유량계를 지나 일정 유량의 공기가 버너 및 2차공기 주입위치로 공급된다.

연료 중 질소성분(fuel-N, NH₃)은 봄베(bomb)로부터 압력조절기를 통해 2 kgf/cm²으로 유출되고 감압변을 통과하면서 2,500 mmH₂O의 압력으로 혼합기에서 연소용 연료와 혼합된 후 면적식 유량계를 거쳐 일정 유량이 버너로 공급된다.

연료인 사용 프로판(prepane)은 봄베(bomb)로부터 압력조절기를 통해 1.5 kgf/cm²으로 유출되고

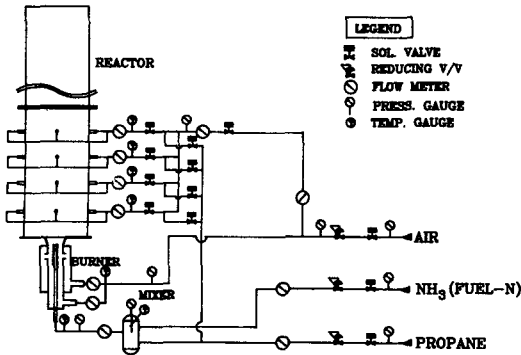


Fig. 2 Schematic Diagram of Stage Combustion System

감압변을 통과하면서 2,500 mmH₂O의 압력으로 버너와 2차 연료주입구로 공급된다.

연소로는 내경이 10 cm, 길이 120 cm인 Stainless steel로 제작하였으며 2차공기 주입위치와 재연소연료 주입위치는 버너로부터 수직 상단부에 10, 20, 30, 40 cm 되는 곳에 위치되도록 하였다. 2차공기 및 연료의 주입이 가능한 빠르고 균일하게 주입되도록 하기 위해 90도 간격으로 4개소(직경 3 mm)에 설치하였다. 축방향의 온도측정 및 농도측정을 위해 수직 상방향으로 5 cm 등간격으로 10개소 설치하고 배기가스의 농도측정을 위해 100 cm 되는 곳에 1개소 설치하였다.

버너는 3개의 Stainless steel 관이 동심원을 형성하는 동축분류 확산화염이 유지되도록 하였으며 화염을 안정화시키기 위해 연료공급관을 외경이 11 mm이고 두께 3.5 mm인 Stainless steel 관을 이용하여 림형(rim type)으로 설계제작하였다. 또한 내경이 23 mm, 50mm인 Stainless steel 관을 이용하여 연료인 프로판과 연소용 공기의 혼합추진을 위해 축방향과 축과 수직한 방향으로 공기가 나누어 공급되도록 하였다.

3.2 실험방법

(1) 유량측정

공기의 유량은 공기용 면적식 유량계(Dwyer RMA NO. 151 Air 5~50 L/min, NO. 150 Air 5~100 L/min at 20°C, 1atm)를 사용하였으며 Bubble meter로 유량을 보정하였다. 연료(프로판)의 유량은 공기용 면적식 유량계(KOFLOC NO. 860226-4 Air 1~10 L/min at 20°C, 1atm)를 사용하였는데 프로

판($\rho=2.019 \text{ kg/m}^3$)과 공기($\rho=1.2928 \text{ kg/m}^3$)간의 밀도차가 존재하므로 Bubble meter로 보정하였다. 또한 연료 중 첨가되는 암모니아(NH₃)의 유량도 면적식 유량계(KOFLOC NO. 4 Air 50~500 ML/min at 20°C, 1atm)를 사용하였으며 암모니아($\rho=0.7714 \text{ kg/m}^3$)의 밀도를 고려하여 Bubble meter로 보정하였다.

(2) 온도측정

연소기 내의 온도는 PR 열전대(Pt/Pt-Rh13% 소선직경 0.1 mm)를 이용하여 측정하였는데, 백금의 촉매작용을 방지하기 위해 물유리(sodium silicate solution, Na₂O · SiO₂)를 이용하여 코팅(coating)을 하였으며 전도 및 복사전열에 의해 발생할 수 있는 오차방지와 열전대의 지지를 위해 열전대용 절연관(thermocouple insulator)으로 지지시켰다. PR 열전대로부터 발생하는 기전력은 Digital thermometer (FLUKE 2190A/Resolution 0.1)에 입력되어 RS232C를 통해 컴퓨터로 전송시켜 온도를 측정하였다.

(3) 농도측정

배기가스의 농도측정은 배기가스 채취기(sampling probe)의 공간분해능(local resolution)을 높이기 위하여 측정 선단 내경이 1 mm인 수냉식 Probe를 사용하였다. 배기가스 채취기로 가스를 흡입할 경우, 채취기(probe) 내의 가스조성이 변하지 않도록 흡입가스를 급냉하여 반응을 동결시키고자 Probe 선단을 확대시킨 형상을 갖도록 하고 또한 80°C로 수냉하며, 촉매작용을 방지하고자 표면활성이 좋은 Stainless steel tube를 사용하였다.

배기가스 채취기(sampling probe)로 흡입된 연소가스는 Soot filter를 통과하면서 불순물을 제거하고, Water trap을 거치면서 배기가스 중에 포함된 수분을 응축시켜 제거시킨 후 NO_x analyzer 및 Gas chromatograph로 각각 유입된다. CO, CO₂, O₂, N₂의 농도측정은 Gas chromatograph(GC-7A PTF, Simadzu Co., Japan)를 사용했으며, NO_x의 농도는 화학발광식 NO_x Analyzer(Columbia Scientific Industries Corp., Model NA 510-2, 0~2000 ppm sensitivity 0.1 ppm)를 사용하였고, NH₃ 및 HCN는 Orion 960 적정기(wrion 960 autotitrant device)를 이용하여 측정하였다.

3.3 실험방법

선회수(swirl number) 0.3, 부하(load) 4 1/min

으로 일정하게 유지한 상태에서 확인 언급된 변수에 따라 연구를 수행하였으며, 각각의 경우에 기준 변수(reference parameter)를 설정하여 일정하게 유지한 상태에 기준변수 중 하나를 실험변수(experimental parameter)로 택하여 다른 변수에 대한 영향을 배제하였다. 실험(Fig. 1 참조)은 2단 연소의 경우 초공기비율 일정하게 유지한 상태에서 주연소영역의 공기비를 변화시키고 여분의 공기를 2차공기 주입구에 분사하며, 연료의 단계적 연소법의 경우 주연소영역인 1차측 공기비를 변화시키고 2차측에 각각 재연소연료와 여분의 공기를 공급하여 가면서 이미 언급되었던 측정방법(3.2 참조)에 의해 온도 및 배기가스의 농도를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 1 단연소의 연소특성

Fig. 3은 화학양론비 변화에 따른 연소 배기가스의 농도를 나타낸 것으로 Fuel-N을 함유한 연료의 경우 화학양론비가 1.1일 때 NO_x의 농도는 348 ppm으로 최대치를 나타내며 이중 약 90%는 Fuel NO_x이다. 화학양론비가 증가하면 과잉공기로 인한 온도의 저하에 의해 Thermal NO_x는 다소 감소하고 또한 Fuel NO_x도 감소한다. 하지만 T. Hirai 등의⁽¹⁵⁾ 연구에서 알 수 있듯이 NO_x의 변환율(이론 Fuel NO_x의 농도와 실제 Fuel-N로 부터의 NO_x 농도의 비)이 역으로 화학양론비가 증가함에 따라 서서히 증가하기 때문에 연료 중 대부분의 질소성분은 NO_x로 변환되어지는 것을 알 수 있다.

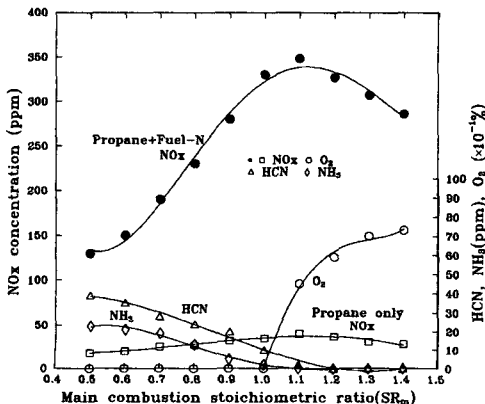


Fig. 3 Exhaust gas concentration with no-stage combustion (Fuel-N=1.0 wt%)

화학양론비가 1.0 이하인 경우에는 불완전 연소에 의한 산소농도의 저하, 연소가스의 온도저하가 원인이 되어 NO_x의 농도는 화학양론비 저하와 함께 급격히 감소하며 중간생성물(HCN, NH₃)의 양이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 이상에서 알 수 있는 바와 같이 연료 중의 질소성분의 대부분이 공기과잉에서는 NO_x로 전환되어지고 Thermal NO_x도 본 실험장치의 특성상 생성량은 작지만 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 연료과잉의 상태에서의 NO_x 농도는 화학양론비가 저하함에 따라 급격히 감소하므로 본 연소방식인 단계적 연소법의 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다.

4.2 2단연소의 NO_x 비출특성

Fig. 4는 주연소영역의 화학양론비가 0.8이고 총 화학양론비가 1.1인 경우 축방향에 대한 NO_x, N₂, 중간생성물(HCN, NH₃)의 양을 나타낸 것으로서, NO_x의 생성량은 서서히 증가하여 2차공기가 주입될 때 최대 값 약 276 ppm을 가지며 그 후 서서히 감소된 후 일정한 값을 갖는다. NH₃는 시간이 경과함에 따라 급격히 감소하며 HCN은 초기에 다소 증가 후 2차공기가 주입됨과 동시에 거의 측정되지 않았다. N₂는 버너 선단에서 69%가 검출된 후 감소하다 2차공기 주입과 함께 84%로 급격히 증가하여 점차 감소한 후 NO_x의 감소와 함께 증가하는 경향을 보였다.

일반적으로 NO_x의 경우 버너 선단에서 급격히 증가하는 것으로 알려져 있지만,⁽¹⁶⁾ 2단연소의 경우 Fuel-N NH₃가 감소함에 따라 NO_x의 농도가

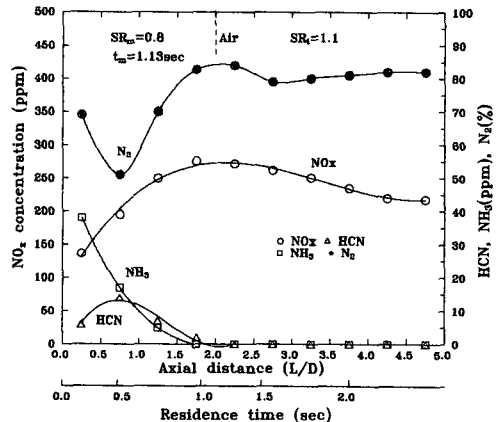


Fig. 4 Axial distribution of NO_x, HCN and NH₃ with SR_m=0.8 (SR₁=1.1, L_a=2.0, Fuel-N=1.0 wt%)

서서히 증가하는 것은 주연소영역이 연료과농 (fuel-rich)의 환원영역(reducing zone)으로서 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 중간생성물(HCN, NH₃)로 존재하거나 N₂로 환원되어 증가되는 것을 알 수 있다.

Fuel NO 생성에 대한 종래의 기초 연구⁽¹⁷⁾에서도 연료 중 질소성분의 분해에 의해 생성된 NH₃, HCN 등의 중간생성물은 분위기 조건에 따라 N₂로 환원되는 경우와, 산화하여 NO_x로 된다고 보고되었다.

그후 2차공기의 주입과 함께 증가하여 최대값을 갖는것은 산소농도와 증가와 함께 중간생성물의 NO_x로 전환되기 때문이며, 그후 NO_x의 농도가 서서히 감소하는 것은 이미 밝혀진 바와 같이 기체의 온도가 내려가면 NO는 산소와 반응해서 서서히 N₂와 O₂로 반응되어 점차 감소하여⁽¹⁸⁾ 2차 연소기의 종료인 배기구의 NO_x농도가 저감됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 총화학양론비가 1.1일 때 주연소영역의 화학양론비 변화에 대한 CO, CO₂의 농도를 나타낸 것으로서 CO₂의 농도는 크게 변화가 없지만, CO의 경우 주연소영역의 화학양론비가 0.8부근에서 최소값 13 ppm을 갖는다. 이상에서 알 수 있는 바와 같이 2단연소시 최소값을 갖는 조건에서 역시 최적의 연소가 수행됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 총화학양론비 변화에 대한 배출 NO_x 농도에 미치는 영향을 조사한 것이다. NO_x의 농도는 과잉공기에 의한 희석효과를 없애기 위해 4%

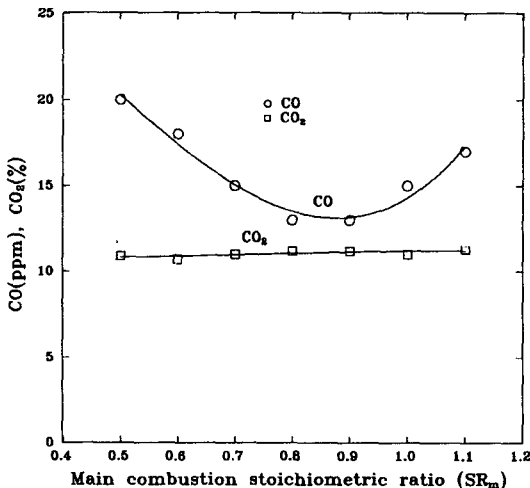


Fig. 5 CO and CO₂ concentration at exit (SR_t=1.1 L_a=2.0, Fuel-N=1.0 wt%)

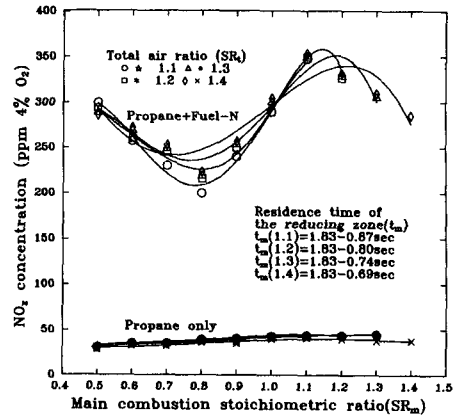


Fig. 6 Effect of total air ration on NO_x at exit(L_a=2.0, Fuel-N=1.0 wt%)

O₂ 환산치로 표시하였다. NO_x농도는 총화학양론비 보다는 주연소영역의 화학양론비에 따라 거의 결정되어 지는데, 이는 2차 공기량에는 거의 무관하고 주연소영역의 연소 조건에 의존한다는 것을 알 수 있다. 즉 주연소영역의 화학양론비가 연료과농인 환원영역의 조건이 형성될 때 이미 Fig. 3에서 언급된 바와 같은 Mechanism으로 NO_x가 저감되어진다. 하지만 주연소영역의 공기비가 너무 과농하게 되면 다시 증가하는 현상을 보이는데 이는 1차 측에서의 N₂로의 환원보다는 중간생성물(HCN, NH₃)의 증가로 인해 2차공기의 공급과 동시에 모두 NO_x로 전환되어 지기 때문이다. 따라서 J. T. Kelly등에⁽¹⁹⁾ 의해서 알려진 바에 의하면 주연소영역에서 생성된 중간생성물이 2차공기의 주입에 의해 증가하는 현상은 2차공기를 단계적으로 주입함에 따라 과잉공기의 조건이 아닌 환원의 분위기로 더 유지시키면서 저감시킬 수 있다고 보고되어졌다. 따라서 이 경우 더 넓은 범위의 주연소영역의 화학양론비에서 NO_x 저감을 할 수 있다.

Fig. 7은 2차공기 주입위치 변화에 따른 배출 NO_x 농도의 저감효과에 대해 연구한 결과이다. 주연소영역의 화학양론비를 1.1로 부터 서서히 낮추면 Fuel-N을 함유한 연료를 연소할 경우 배출 NO_x농도는 2차공기를 버너에 인접한 상류부(L_a=1.0)에 주입한 경우에는 서서히 감소하고 특히 L_a=4.0일 때 그 현상은 두드러진다. 이것은 주연소영역이 환원성분위기(SR_m=0.8)의 연소가스 중에 이미 생성되어 NO나 질소함유 중간생성물이 N₂로 서서히 환원되어지는데 이 영역의 체류시간이 0.57

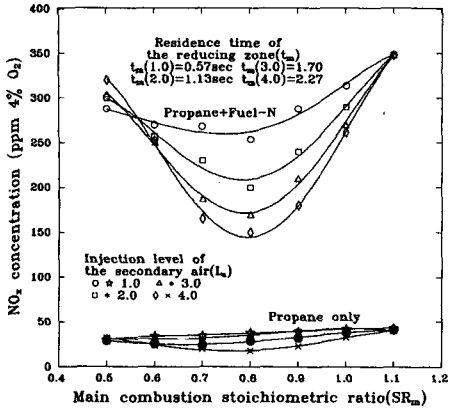


Fig. 7 Effect of air stage level on NO_x at exit (SR_t=1.1, Fuel-N=1.0 wt%)

초에서 2.27초로 증가되기 때문이고, 2차공기를 하류부로 주입하여도 2차연소로 인한 NO_x로 변환되어지는 중간생성물의 양이 감소하기 때문이다.

주연소영역의 화학양론비를 저하시켜 착화한계 (SR_m=0.5)에 가까와지면 연료과농의 상태로서 Fig. 3에서도 알 수 있듯이 연소가스 중에 질소 함유 중간생성물이 많이 존재하여 2차공기의 증가와 함께 NO_x의 농도는 다시 증가하며, 2차공기의 주입위치가 증가할 수록 이 영역의 체류시간이 증가하므로 그 현상은 두드러진다. 이러한 현상은 본 저자의 미분탄을 이용한 소규모 실험에서도 이미 밝혀진 사실이다.⁽²⁰⁾

Fig. 8은 2차공기 주입위치에 대한 산소 농도의 변화를 나타낸 것이다. 일반적으로 연소의 진행 상태는 연소성분 중의 산소의 양으로도 예측되어지는데 Fig. 8에서 알 수 있듯이 L_a=1.0일 때는 주연소영역의 산소가 완전히 소비되지 못한 상태에서 2차공기가 주입되지만, L_a=2.0 이상 일 때는 거의 소비된 상태에서 2차공기가 주입된다. Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 주연소영역의 산소가 완전히 소비되어 졌을 때 2차공기를 주입하는 것이 NO_x 저감에 효율적이라는 것을 알 수 있다. Takahashi, Y.^(12,13) 등에 의해 밝혀진 바와 같이 연료과농의 환원영역에서 탄화수소는 산소와 반응하여 Radical을 형성하여 이들은 이미 생성되어진 NO의 저감에 관여하므로, 주연소영역 산소의 소비는 Radical의 증가로 인한 NO_x의 저감임을 알 수 있다.

Fig. 9는 총화학양론비가 1.1이고 주연소영역의

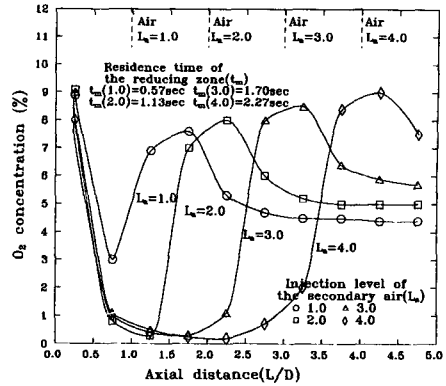


Fig. 8 Axial distribution of O₂ concentration according to air stage levels (SR_m=0.8 (SR_t=1.1, Fuel-N=1.0 wt%)

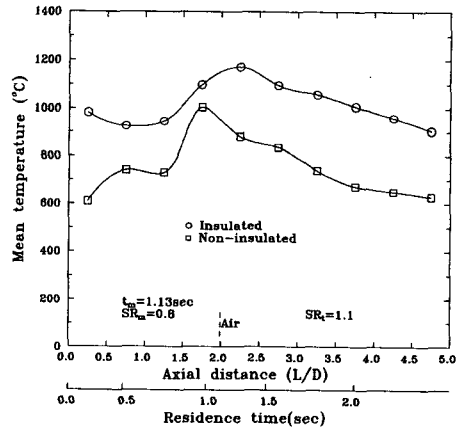


Fig. 9 Axial distribution of insulated and non-insulated combustion temperature (SR_t=1.1, L_a=2.0 Fuel-N=1.0 wt%)

화학양론비가 0.8인 최적의 NO_x 저감조건인 온도 분포를 나타낸 것으로서, 본 실험에서는 이미 언급된 바와 같이 모두 단열된 상태로 실험을 수행하였으며, 주연소영역의 온도영향을 알아보고자 단열이 되지 않은 상태의 조건에서도 연구를 수행하였다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 단열시는 축방향에 대한 온도의 변화는 그다지 크지 않으며 주연소영역의 온도는 925~983°C이며 2차공기 주입과 함께 1098~1171°C로 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 단열을 시키지 않은 경우는 주연소영역의 온도는 610~741°C로 단열시 보다 낮고 2차공기 주입과 함께 880~1005°C로 증가한 후 감소한다.

Fig. 10은 주연소영역 온도변화에 대한 NO_x의

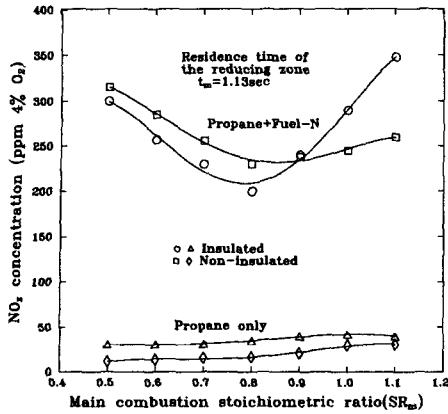


Fig. 10 Effect of reducing zone temperature on NO_x at exit (SR_t=1.1, L_a=2.0, Fuel-N=1.0 wt%)

농도분포를 나타낸 것으로서 주연소영역의 화학양론비가 연료과농의 영역에서 단열을 시켰을 때 NO_x의 농도가 작은 값을 갖는데 이는 주연소영역의 온도가 단열을 시키지 않은 610~730°C 보다 947~983°C일 때 환원영역에서의 Radical 형성이 용이하여 NO_x가 저감되는 것이라 사료된다.

또한 주연소영역의 화학양론비가 산화성 분위기일 때 단열시에 급격히 NO_x가 증가하는 현상을 볼 수 있는데 이는 온도증가로 인한 산화반응 즉 NO_x의 증가반응이 환원반응보다 훨씬 우세하기 때문이다.

4.3 연료의 단계적 연소에서 NO_x 배출특성

연료를 단계적 연소시킬 때 NO_x의 형성 및 변환 과정을 규명하고자 Fig. 11과 같이 본 연구에서 가장 NO_x 저감이 두드러진 조건에 대해 축방향에 대한 NO_x, N₂, HCN, NH₃의 농도를 나타내었다.

NO_x의 농도는 주연소영역에서 산화성 분위기로 인해 급격히 증가하여 재연소영역에서 환원성 분위기로 인해 급격히 저감되어 2차공기의 주입에 큰 변화 없이 서서히 감소 후 일정한 값을 갖는다.

주연소영역에서는 공기과잉 (SR_m=1.2)의 산화성 분위기로 인해 연료 중 질소성분 (fuel-N)이 산소와 반응하여 대부분 NO_x로 전환되어 NH₃ 및 N₂의 농도는 감소하고 NO_x 농도는 급격히 증가하는 것으로 사료된다.

재연소영역에서 급격한 NO_x 저감은 연료과농의 환원성 분위기 (SR_r=0.9)에서 주연소영역에서 이미 생성되어진 NO_x가 N₂로 환원되어져 N₂가 증가

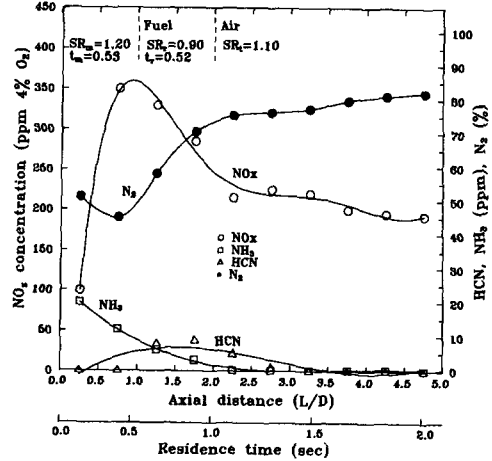


Fig. 11 Axial distribution of NO_x, HCN and NH₃ with SR_r=0.90 (SR_t=1.1, F_r=25%, L_r=1.0 L_{aa}=1.0, Fuel-N=1.0 wt%)

하는 것을 알 수 있었으며 약간의 중간생성물로의 환원이 있음을 알 수 있다.

완전연소영역에서 산소농도가 증가되면 재연소영역에서의 중간생성물이 산소와 반응하여 N₂와 NO로 전환된다. 이 영역에서도 NO_x가 형성되기는 하나 2차공기가 주입되는 양이 적으므로 NO_x 생성에 미치는 효과는 크지 않은 것을 알 수 있다. 시간이 경과함에 따라 이미 생성되어진 NO_x는 서서히 산소가 거의 존재하지 않는 환원성 분위기로 인해 N₂로의 환원반응으로 약간 저감된 후 반응이 안정될 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 총화학양론비가 1.1이고 재연소영역의

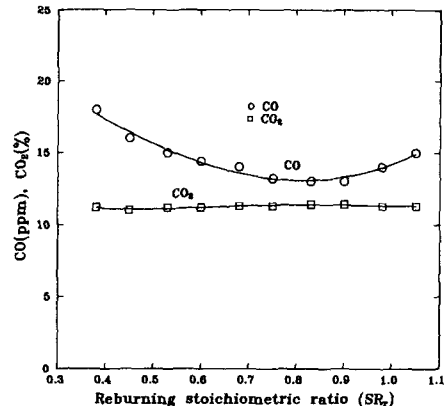


Fig. 12 CO and CO₂ concentration at exit (SR_t=1.1, F_r=25%, L_r=1.0, L_{aa}=1.0, Fuel-N=1.0 wt%)

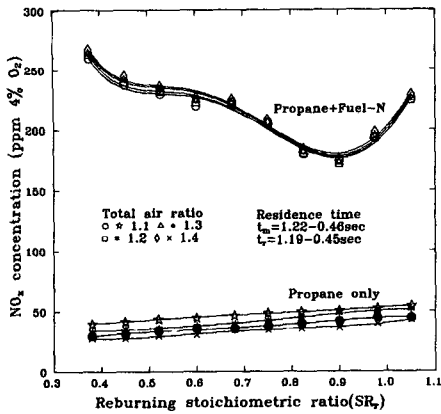


Fig. 13 Effect of total air ratio on NO_x at exit ($F_r = 25\%$, $L_r = 1.0$, $L_{aa} = 1.0$, Fuel-N = 1.0 wt%)

화학양론비를 변화시켰을 때 연소상태를 알아 보고자 CO₂의 농도는 재연소영역의 화학양론비 변화에 따라 크게 차이가 없으며, CO의 농도는 Fig. 13에서 볼 수 있는 바와 같이 본 연구에서 NO_x저감의 최적 조건인 재연소영역의 화학양론비 0.9부근에서 가장 적은 값을 나타내므로, 연소상태의 큰 변화 없이 NO_x저감을 할 수 있다.

Fig. 13은 화학양론비 변화에 대한 NO_x의 배출 농도를 나타낸 것으로서 연료 중 질소성분이 없는 경우 NO_x 농도는 재연소영역의 화학양론비가 증가함에 따라 연소실 내의 최고온도가 화학양론비가 1.1일 때 1152°C에서 총공기비 1.4일 때 1174°C로 증가하여 NO_x농도는 다소 증가하며 총화학양론비가 증가함에 따라 약간 감소한다. 또한 본 연구의 경우 연소실 내의 온도가 Zel'dovich Mechanism⁽²¹⁾에 의해 생성되어지는 Thermal NO_x의 생성 온도인 1800°K보다 낮은 온도를 유지하므로 생성되어진 NO_x는 거의 Fuel-N에 의한 Fuel NO_x이다.

연료 중 질소성분이 포함된 경우는 총화학양론비가 증가함에 따라 NO_x의 농도는 거의 비슷한 농도 수준을 나타낼 수 있다. 본 연구에서 총화학양론비가 증가한다는 것은 주연소영역 및 재연소영역의 화학양론비는 일정한 상태에서 완전연소영역의 공기량이 증가한다는 것이다. 따라서 배기구에서 NO_x농도는 재연소영역에서의 중간생성물이 완전연소 공기주입으로 산소와 반응하여 약간 증가하나 재연소영역에서 생성되어진 중간생성물이 소량(Fig. 11참조)이므로 총화학양론비가 1.1일 때도 산화하기에 충분한 공기량이므로, 총공기비의 증가

에 따라 크게 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 NO_x의 농도는 총화학양론비와는 무관하게 재연소영역의 공기비가 0.9일 때 최소값을 가지며 재연소영역의 화학양론비가 감소함에 따라 점차 증가한다.

총화학양론비가 1.1이고 재연소영역의 화학양론비가 0.9일 때를 배기 NO_x의 농도를 보면 175 ppm으로서 1단연소의 348 ppm과 비교할 때 50%로 저감됨을 알 수 있다. 이는 이미 Fig. 11에서 언급된 바와 같이 주연소영역의 화학양론비가 1.2인 산화성 분위기로 연료 중에 함유된 질소성분은 급격하게 NO_x로 형성된 후 재연소영역에서는 화학양론비가 0.9인 환원성 분위기로 유지되어 주연소영역에서 형성된 NO가 재연소연료의 탄화수소기(hydrocarbon radicals)와 반응을 하여 대부분 효율적으로 N₂와 중간생성물로 환원되어 이 영역에서 최저값을 나타내는 것을 볼 수 있다.

한편 재연소영역의 화학양론비 0.9보다 더 감소하여 연료과농의 여역을 형성시키면 Fig. 3에서 알 수 있듯이 중간생성물이 다량 생성되어 완전연소 영역에서 2차 공기가 주입될과 동시가 모두 NO_x로 전환되어 지기 때문에 재연소영역의 화학양론비가 감소함에 따라 NO_x의 농도가 증가되는 것을 알 수 있다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 연료의 단계적 연소법의 경우 재연소영역의 화학양론비를 0.9의 범위에서 연소시키는 것이 NO_x 저감에 가장 효율적이라는 것을 알 수 있으며 NO_x의 배출농도는 총화학양론비보다 재연소영역 화학양론비에 따라 결정되며 총화학양론비에는 거의 무관하다는 것을 알 수 있다.

본 연구의 경우 연료 중 질소성분이 포함된 경우 생성되어진 NO_x는 Fuel NO_x 및 Thermal NO_x이며 연료 중 질소성분이 없는 경우의 Thermal NO_x를 빼면 Fuel NO_x이다.

Fig. 14는 재연소연료 주입위치 변화에 대한 NO_x의 형성을 규명한 결과로서 주연소영역의 체류시간의 변화를 의미한다.

연료 중 질소성분이 없는 경우에는 재연소연료 주입위치가 증가함에 따라 최고 온도가 화염의 후류에서 형성되고 온도도 약간 낮아지기 때문에 온도감소로 Fig. 14와 같이 Thermal NO_x가 감소하고 재연소영역의 화학양론비가 감소함에 따라 다소 감소한다.

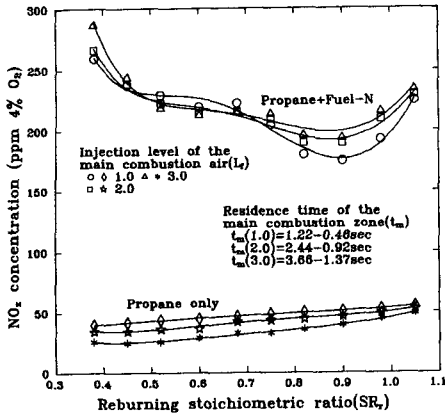


Fig. 14 Effect of residence level of the main combustion zone on NO_x at exit (SR_r=1.1, F_r=25%, L_{aa}=1.0, Fuel-N=1.0 wt%)

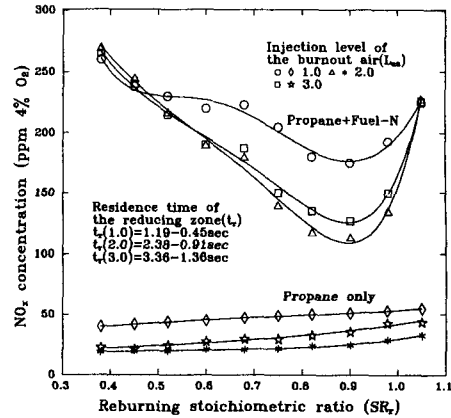


Fig. 15 Effect of residence level of the reducing zone on NO_x at exit (SR_r=1.1, F_r=25%, L_r=1.0, Fuel-N=1.0 wt%)

연료 중 질소성분이 포함된 경우는 재연소영역의 화학양론비가 0.75~1.05(주연소영역의 화학양론비 1.0~1.4)인 경우는 재연소연료 주입위치가 증가함에 따라 NO_x 농도가 증가하는데, 재연소연료 주입위치가 증가한다는 것은 주연소영역에서 산화성 분위기의 체류시간의 증가를 의미하므로 Fuel-N의 산화반응으로 인한 NO_x의 농도는 증가한다.

하지만 재연소영역의 화학양론비가 0.38~0.68(주연소영역의 화학양론비 0.5~0.9)인 경우는 주연소 영역에서 NO가 분해되는 환원성 분위기가 유지되므로 재연소연료 주입위치가 증가함에 따라 NO_x의 농도가 감소하지만 연료과농의 상태에서 생성되어진 중간생성물의 증가로 완전연소용 공기의 주입과 함께 중간생성물의 산화로 인한 NO_x가 다시 증가되므로 배출 NO_x의 농도는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 완전연소 공기주입위치의 영향에 대해 NO_x 형성을 규명하고자 재연소 영역의 화학양론비 변화에 대한 NO_x의 농도를 나타냈다.

연료 중 질소성분이 없는 경우에는 재연소영역의 증가에 따라 최고온도의 감소로 인해 Thermal NO_x는 감소하며, 재연소영역의 화학양론비가 증가함에 따라 다소 증가한다.

연료 중 질소성분이 포함된 경우는 완전연소 공기주입위치가 증가함에 따라 NO_x 저감효과가 현저하게 나타나며 특히 재연소영역의 화학양론비가 0.9인 부근에서 그 효과는 두드러진다. 이는 완전연소 공기주입위치가 증가한다는 것은 연료과농의

환원영역인 재연소영역의 체류시간이 증가하는 것이므로 주연소영역에서 형성된 NO가 N₂로 전환(Fig. 11참조)되는 환원반응의 기회가 많으므로 최종적으로 배기구에서 NO_x 농도는 완전연소 공기주입위치 증가에 따라 현저히 감소한다.

재연소영역의 화학양론비가 아주 농후한 0.5이하인 영역에서는 주연소영역의 화학양론비 역시 0.6 이하로 농후하여 이미 생성되어진 NO가 N₂로 환원되는 반응보다 상대적으로 질소함유 중간생성물의 생성이 많은 영역으로 존재하므로 완전연소용 공기를 주입함에 따라 모두 NO_x로 전환되므로 완전연소 공기주입위치 증가에 따라 NO_x 농도가 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 16은 완전연소 공기주입위치의 변화에 대한 산소의 농도를 나타낸 것으로서 주연소영역에서는 급격히 감소하고 완전연소용 공기의 주입과 동시에 급격히 증가된 후 완전연소영역에서는 다시 감소함을 보이며, 특히 완전연소 공기주입위치가 2.0이상일 때 재연소영역의 산소농도는 체류시간의 증가로 인해 거의 소모된 상태에서 완전연소용 공기가 주입되어 짐을 알 수 있다.

이는 Fig. 14에서 알 수 있듯이 재연소영역의 증가는 환원영역이 유지된 상태에서 탄화수소가 산소와 반응하여 Radical을 형성할 수 있는 기회를 많이 갖는다는 것을 의미하므로 Radical의 증가는 NO_x의 저감을 의미한다.

탄화수소와 산소의 반응은 Yasuro Takahashi⁽¹³⁾에 의해 다음과 같은 가설이 발표되어 졌다.

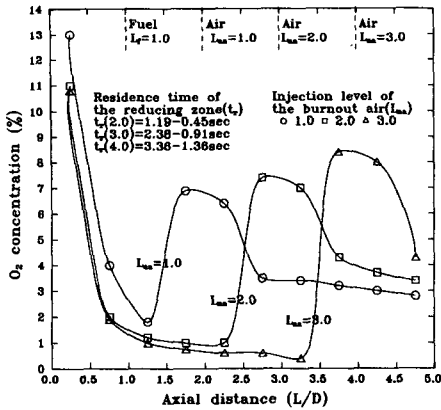
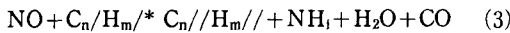
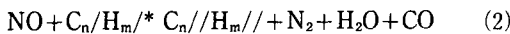
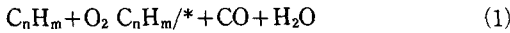


Fig. 16 Axial distribution of O₂ concentration according to residence level of the reducing zone with SR=0.9. (SR_r=1.1, F_r=25%, Fuel-N=1.0 wt%)



여기서 (*)는 연료과농의 영역에서 생성되어진 Radical을 의미하며 NH₃는 중간생성물을 의미한다. (1)은 Radical 생성반응이고 (2)와 (3)은 NO가 Radical에 의한 N₂로의 환원 및 중간생성물의 생성반응이다.

이상에서 알 수 있듯이 효율적인 NO_x 저감을 위해서는 완전연소용 공기를 환원영역에서 반응 (1)과 같은 다량의 Radical형성을 위해 산소가 거의 소비되어진 위치에서 주입하는 것이 가장 유리하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 17은 연료분할비 변화가 NO_x저감에 미치는 영향을 규명하고자 재연소영역의 화학양론비에 대한 NO_x의 농도를 나타낸 것이다.

연료 중 질소성분이 없는 경우에는 재연소연료분할비 증가에 따라 최고 연소온도가 감소하여 NO_x가 약간 감소하며, 1차공기비가 증가함에 따라 NO_x가 다소 증가하지만 그 영향은 아주 미비하다.

연료 중 질소성분이 포함된 경우는 재연소영역의 화학양론비가 1.0이상에서는 재연소영역의 산화성분위기가므로 재연소연료의 증가는 탄화수소기의 증가 보다는 재연소연료 중에 함유된 질소성분의 증가로 인한 NO_x의 증가를 볼 수 있다.

재연소영역의 화학양론비가 감소하여 환원성의 분위기가 유지되면 재연소연료의 증가에 따라 탄화

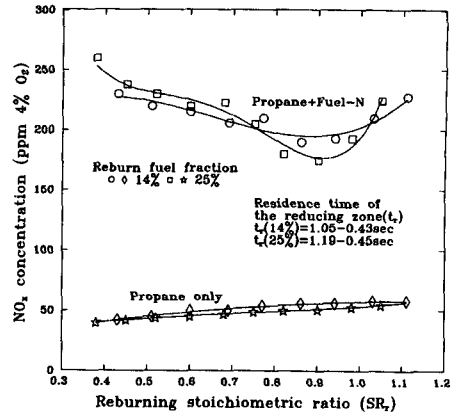


Fig. 17 Effect of reburning fuel fraction on NO_x at exit. (SR_r=1.1, L_r=1.0, L_{aa}=1.0, Fuel-N=1.0 wt%)

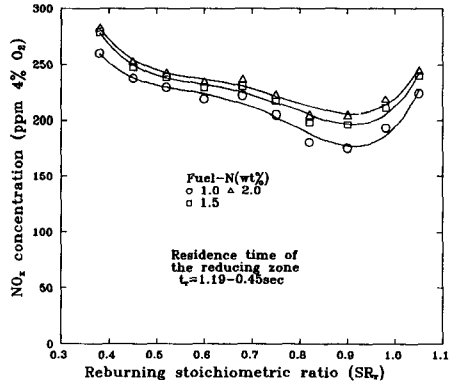


Fig. 18 Effect of Fuel-N concentration on NO_x at exit (SR_r=1.1, F_r=25%, L_r=1.0, L_{aa}=1.0)

수소기의 양의 증가하므로 주연소영역에서 생성되어진 NO_x가 N₂로 환원되어지는 환원반응의 우세로 인해 NO_x의 저감이 이루어진다.

하지만 재연소영역의 화학양론비가 아주 농후한 연료과농의 상태로 되면 재연소 연료량의 증가로 인해 중간생성물의 생성량이 증가하여 2차공기의 주입과 함께 전부 NO_x로 전환되어지므로 NO_x의 생성량이 증가한다.

따라서 연료의 단계적 연소법의 경우 재연소영역의 공기를 0.9로 유지한 상태에서 연료분할비를 증가시키에 따라 NO_x 저감을 도모할 수 있다. 하지만 25% 이상이 되면 그 효과는 미미한 것으로 사료되며 W. Bartok 등⁽²²⁾이 재연소연료를 천연가스로 이용한 연구에서도 30% 이상이 되면 거의 저감

효과가 없다는 것을 밝혔다.

Fig. 18은 연료 중 질소성분의 농도 변화에 따른 재연소영역의 화학양론비에 대한 NO_x의 농도 변화를 나타낸 것이다.

연료 중 질소성분 농도의 증가에 따라 연소분위기가 산화성분위기 일 때는 연소용 산소와 반응하는 질소성분이 증가하므로 NO_x의 농도가 증가하며, 연료과농일 경우는 연료 중 질소성분이 중간생성물로 다량 생성되어 완전 연소용 공기의 주입과 함께 다량 NO_x로 변환된다. 이상에서 알 수 있듯이 Fuel-N의 증가와 함께 NO_x가 증가하며, 재연소영역의 화학양론비가 0.9일 때 최소값을 갖는다.

Fig. 19는 총화학양론비가 1.1이고 재연소영역의 공기비가 0.9인 최적의 NO_x 저감조건에 온도분포를 나타낸 것으로서, 본 실험에서는 이미 언급된 바와 같이 모두 단열된 상태로 실험을 수행하였으며, 재연소영역의 온도영향을 알아보하고자 단열이 되지 않은 상태의 조건에서도 연구를 수행하였다.

Fig. 19에서 알 수 있듯이 단열시는 재연소연료 주입위치에서의 온도는 1028~1016°C이고 완전연소 공기주입위치의 온도는 1079~1040°C로 다소 증가 후 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 단열을 시키지 않은 경우는 재연소연료 주입위치에서의 온도는 822~803°C이며 완전연소 공기주입위치에서의 온도는 824~792°C로 다소 증가 후 감소한다.

Fig. 20는 재연소영역 온도변화에 대한 NO_x의 농도 분포를 나타낸 것으로서 재연소영역의 공기비가 환원분위기인 0.9이며 단열을 시켰을 때 NO_x의 농도가 작은 값을 갖는데 이는 Fig. 19에서 알 수 있듯이 Takahashi 등⁽¹²⁾이 제안한 탄화수소기(Hydrocarbon Radicals)가 발생되기 좋은 조건인 온도(900°C 이상) 및 연료과농의 연소 분위기이므로, 재연소연료가 주입되어 주연소영역에서 생성된 NO가 재연소연료의 탄화수소기와 반응하여 N₂와 소량의 중간생성물(HCN)로 전환되기 때문이다.

하지만 재연소영역의 공기비가 상당히 연료과농한 분위기일 때 온도의 영향을 거의 받지 않으며 중간생성물의 과다로 NO_x의 농도는 다시 증가된다.

Fig. 21은 완전연소용 공기주입위치까지의 주입위치(체류시간)를 같이한 상태에서 연료의 단계적 연소법과 2단연소법의 배출 NO_x의 농도를 총화학양론비가 1.1일때 주연소영역의 화학양론비 변화에 대해 나타낸 것이다. Fig. 21에서 알 수 있듯이 2

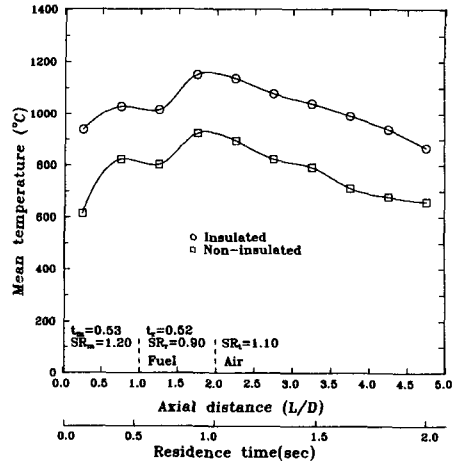


Fig. 19 Axial distribution of insulated and non-insulated combustion temperature (SR_t=1.1, L_r=1.0, L_{aa}=1.0, Fuel-N=1.0 wt%)

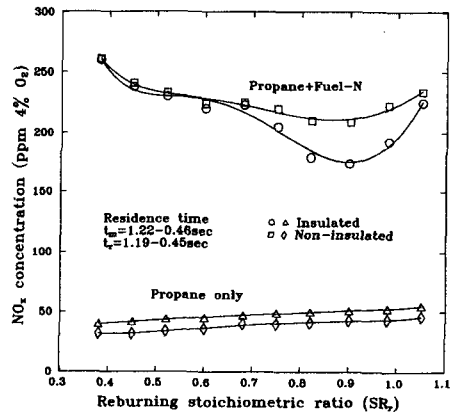


Fig. 20 Effect of reducing zone temperature on NO_x at exit (SR_t=1.1, F_r=25%, L_r=1.0, L_{aa}=1.0, Fuel-N=1.0 wt%)

단연소의 경우 주연소영역의 화학양론비가 0.8일 때 최소값 200 ppm을 가지며 이보다 연료과농 및 회박의 경우 급격히 NO_x가 증가하여 NO_x저감가능한 화학양론비의 영역이 넓지 않다. 하지만 연료의 단계적 연소의 경우 주연소영역의 화학양론비가 넓은 영역에서 작은 배출 NO_x의 농도값을 가지며 특히 주연소영역의 화학양론비가 1.2이고 재연소영역의 화학양론비가 0.9일 때 최소값 172 ppm을 갖는다. 이상에서 알 수 있듯이 2단연소에 비해 연료의 단계적 연소법의 경우 NO_x 저감에 더 효율적이며 저감 가능한 화학양론비 영역이 더 넓다.

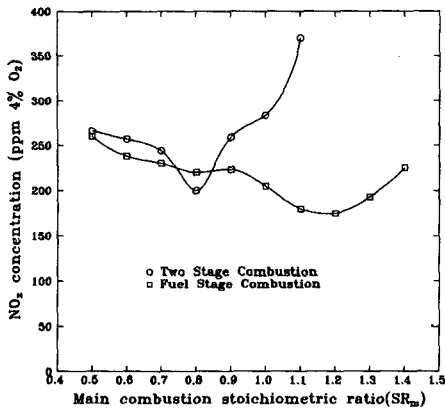


Fig. 21 Comparison of result of two staging and fuel staging combustion (SR₁=1.1, L_a=2.0, F_r=25%, L₁=1.0, L_{aa}=1.0. (SR₁=1.1, Fuel-N=1.0 wt%))

2단연소의 경우 연료과농의 환원영역의 조건에 따라 연료 중 함유되어진 Fuel-N이 NO로의 환원이 억제되어 Fuel-N의 존재 및 중간생성물로의 환원 후 다량의 2차공기 주입과 함께 잔유 Fuel-N 및 이미 생성되어진 중간생성물이 NO로 급격히 증가하고 N₂로의 환원의 여지가 없기 때문이다. 따라서 단지 주연소영역에서 NO와 중간생성물이 소량 생성되는 경우인 0.8의 영역인 좁은 영역에서 최소값을 갖는다.

하지만 연료의 단계적 연소법의 경우 NO_x 저감을 위해 주연소영역은 연료회박, 재연소영역은 연료과농의 상태를 유지시키고 최종 완전연소용 공기를 주입한다. 따라서 이 경우 주연소영역 보다는 재연소영역에서의 NO_x저감을 위한 Radical 형성의 조건이 중요한데 이는 넓은 연료과농의 영역에서 가능하고, 또한 2단연소에 비해 소량 완전연소용 공기가 공급되므로 시간경과에 따라 N₂로의 환원의 여지가 크므로 넓은 영역에서 NO_x 저감이 가능하다.

5. 검토 및 토의

소규모 실험장치를 이용한 연구의 경우 광범위한 실험변수에 대한 연구가 용이한 장점이 있으나, 가장 중요한 문제는 실제 대규모로 Scale-up했을 때의 결과와 얼마나 잘 일치하는냐 하는 것이다.

Scale-up의 표준(criterion)을 선정(23)하기 위한

주요 문제는 연소에 관계되는 주로 NO_x 배출과 연소효율에 영향을 미치는 변수(parameters)를 최소화 하는 것이다. 그 중요한 요소(factors)로서 연료, 연소실 및 버너가 있다. 연료에 의한 영향은 동질의 연료를 사용함으로써 가능하고, 연소로에 의한 영향은 연소온도 및 체류시간을 같게 함으로서 그에 대한 영향을 배제시킬 수 있다. 버너에 대한 영향은 화학양론비 및 주연소영역의 체류시간을 같게 함으로써 가능하다.

위에 언급된 이러한 변수들은 실제 규모시설에 적용시 버너의 형상을 그대로 사용하는 것이 불가능하기 때문에 Scale-up시 서로 밀접한 관계가 있다. 따라서 버너의 Scale-up기준은 주연소영역의 체류시간을 일정하게 유지하던가 아니면 버너의 속도를 일정하게 유지하는 방법이 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 Scale-up을 했을 때의 문제를 해결하기 위해 상기에 언급된 조건을 거의 충족시키는 소규모(6.6 kW)실험장치를 제작하여 2.5 MW 규모 장치(독일 Stuttgart 대학부설 IVD연구소)의 연구결과를 비교함과 아울러 이미 발표되어진 연구결과를 비교하고자 Fig. 22에 그 결과를 나타냈다.

Fig. 22는 연료의 단계적 연소법의 경우로서 (a)는 6.6 kW의 본 연구결과이고 (b)는 2.5 MW의 IVD(Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkes-selwesen) 연구소의 실험결과로서 증 연료는 석탄을 이용하고 재연소연료로서 천연가스를 이용한 결과이다. (c)는 W. F. Farmayan⁽²⁴⁾ 등에 의해 3 MW의 MIT 연구장치(MIT combustion research

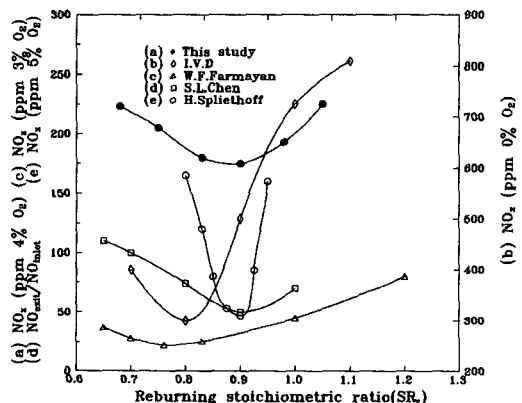


Fig. 22 Comparison of result of this study with results of IVD and others

facility)에서 천연가스를 이용한 결과이다. (d)는 S. L. Chen⁽¹⁴⁾ 등에 의해 20.5 kW의 실험장치에서 Propane을 이용하여 연구를 수행하였다. (e)는 H. Spliethoff⁽²⁵⁾ 등에 의해 Karlsruhe 대학의 160MW 가스연소 실험장치에서 재연소연료를 합성가스(H₂ 60%, CH₄ 30%)를 연료로 이용하여 연구를 수행하였다.

Fig. 22에서 알 수 있듯이 모든 연구에서 같은 경향을 보이며 재연소영역의 공간비가 0.8~0.9의 범위에서 최소값을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서도 밝혀진 바와 같이 연료과농의 재연소영역에서 Radical 형성에 주요 영향인자인 온도, 산소농도, 체류시간, 연료의 종류 등에 따라 다소의 차이는 있지만 Scale-up시 연구결과에 대해 그 경향이 잘 일치됨을 볼 수 있으므로, 본 연구의 경우 단계적 연소방식을 이용한 상용 대규모 장치를 개발하는데 있어 NO_x의 절대량을 제시하기 보다는 질소함유연료로 부터 발생하는 NO_x를 저감하기 위한 설계전략(design strategy)에 기초적 방향 제시를 위한 기초연구로서 타당한 연구결과임을 알 수 있다.

6. 결 론

단계적 연소법을 이용하여 Fuel-N으로 인한 NO_x의 배출특성을 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 배출 NO_x의 농도는 총화확양론비 보다는 연료과농의 환원영역의 조건에 의존되고 0.8~0.9일 때 가장 양호하며 연소성도 좋았다.
- (2) 완전연소 공기는 연료과농의 조건에서 산소농도가 완전히 소비되어진 조건에서 주입할 경우 가장 효율적인 NO_x 저감이 기대된다.
- (3) NO_x저감은 환원영역의 온도에 의존하며, 본 연구의 경우 환원영역의 온도가 950°C 이상에서 그 효과가 가장 크다.
- (4) 연료 중의 질소성분의 증가함에 따라 Fuel NO_x는 증가한다.
- (5) 연료의 단계적 연소법의 경우 공기 2단연소에 비해 NO_x 저감효과가 크며 화확양론비가 넓은 영역에서 적용이 가능하여 NO_x 저감에 유리하다.
- (6) 본 연구의 경우 연료의 단계적 연소방식을 이용한 상용 대규모 장치를 개발하는데 있어 NO_x의 절대량을 제시하기 보다는 질소함유 연료로 부

터 발생하는 NO_x를 저감하기 위한 설계전략(design strategy)에 기초적 방향제시를 위한 기초로 제시되어야 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 한·독 국제 공동연구과제의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이와같은 연구가 가능하도록 지원해 주신 재단에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Breen, B. P., 1977, Sixteenth Sym posium (International) on Combustion, The Combustion Institute, p. 19.
- (2) Sarofin, A. F. and Flagen, R. C., 1976, Prog. in Energy and Combustion Science. p. 21.
- (3) Fenimore, C. P., 1976, Comb. and Flame, 26, p. 249.
- (4) Martin, F. J. and Dederick, P. K., 1977, "NO_x from Fuel Nitrogen in Two-Stage Combustion," Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 191~198.
- (5) Yamagishi, K., Nozawa, M., Yoshie, T., Tokumoto, T., Kosegawa, 1975, "A Study of NO_x Emission Characteristics in Two Staged Combustion," Fifteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1157~1165.
- (6) Gerhold, B. W., Fenimore, C. P. and Dederick, P. K., 1978, "Two-Stage Combustion of Plain and N Doped Oil," Seventeenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 703~713.
- (7) Beer, J. F., Jacques, M. T., Farmryan, W. F. and Tayer, B. R., 1981, "Fuel-Nitrogen Conversion in Staged Combustion of a High Nitrogen Petroleum Fuel," Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 101~110.
- (8) Beer, J. F., Jacques, M. T., Farmryan, W. F. and Tayer, B. R., 1982, "Reduction of NO_x and

- Solids Emissions by Staged Combustion of Coal Liquid Fuels," Nineteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1301~1309.
- (9) Duxbury, J. and Welford, G. B., 1989, "The Effect of Particle Size on NO_x Emissions during the Firing of Pulverized Coal in a Shell Boiler," Journal of the Institute of Energy, pp. 147~151.
- (10) Sadakata, M., Fujioka, Y. Kunii, D., 1981, "Effect of Air Preheating on Emission of NO, HCN and NH₃ from a Two-Stage Combustion," Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 65~72.
- (11) Wendt, J. O. L., Sternling, C. V. and Matovich, M. A., 1973, "Reduction of Sulfur Trioxide and Nitrogen Oxides by Secondary Fuel Injection," Fourteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 897~904.
- (12) Takahashi, Y., Sakai, M., Kunimoto, T. and Haneda, H., 1981, "Development of Mitsubishi 'MACT' In-furnace NO_x Removal Process," Published in Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 18, NO. 2.
- (13) Takahashi, Y., Sakai, M., Kunimoto, T. and Haneda, H., 1983, "Development of 'MACT' In-furnace NO_x Removal Process for Steam Generators," Proceeding of the 1982 Joint Symposium on Stationary Combustion NO_x Control, pp. 15-1~15-20.
- (14) Chen, S. L., Clark, W. C. and Heap, M. P., et al., 1983, "NO_x Reduction by Reburning with Gas and Coal-Bench Scale Studies," Proceedings of the 1982 Joint Symp. on Stationary combustion NO_x Control EPRI CS-3182.
- (15) Hirai, T., Nagai, N. and Takado, J., "Study on the Spray Combustion Characteristics of a High Intensity Swirl Combustor," 日本機械學會 論文集(B編), pp. 3388~3395.
- (16) 日本機械學會, 1988, 燃燒に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法, pp. 74~104.
- (17) Fenimore, C. P., 1972, Combust. Flame, pp. 19~289.
- (18) Korea Electronics Company, 1987, A Study of the Technical Measure to Counter NO_x, DRC-85C-J01, p. 3
- (19) Kelly, J. T., Pam, R. L. and Suttman, S. T., 1982, "Pulverized Coal Combustion NO_x Control through Fuel Staging," U. S. Department of Energy Pittsburgh Energy Technology Center, DOE/PE/30296-6, pp. 3-27~3-39.
- (20) Jae O. Chae and Young N. Chun, 1991, "Effect of Two-Stage Combustion on NO_x Emissions in Pulverized Coal Combustion," Journal of the Fuel, Vol. 70, pp. 703~707.
- (21) 水谷幸夫, 1977, 燃燒工學(2版), 森北出版株式會社, p. 214.
- (22) Bartok, W., Folsom, B. A. and Elbl, M., et al., 1988, "Gas Reburning-Sorbent Injection for Controlling SO_x and NO_x in Utility Boilers," AICHE 1988 Annual Meeting, Nov. 27-Dec. 2.
- (23) Maier, H., Brodbek, H., Kass, M., Kicherer, A. and Spiegelhalder, R., 1991, "Investigation in Staged Coal Combustion with Regard to Mixing Properties Carried out at a Semi-Industrial Test Facility," 2nd International Symposium on Coal Combustion (2nd ISCC), Beijing, China.
- (24) Farmayan, W. F., Toqan, M., Tae-U Yu, Teare, J. D. and Beer, J. M., 1985, "Reduction of NO_x Emission from Natural Gas Flames by Staged Fuel Injection," 1985 Joint Symp. on Stationary Comb. NO_x Control, pp. 1~33.
- (25) Spliethoff, H., 1991, "Large Scale Trials and Development of Fuel Staging in a 160 MW Coal Fired Boiler," 1991 Joint Symposium on Stationary Combustion NO_x Control.