

## 가스화 연료 연소시 단계적 연료주입 기술에 의한 질소산화물 저감

### Reduction of Nitrogen Oxide by Fuel Staged Technology on the Combustion of Gasification Fuel

채 종 성 · 조 선 희 · 전 영 남

조선대학교 공과대학 환경공학과

(1997년 11월 10일 접수, 1998년 3월 18일 채택)

Jong Seong Chae, Sun Hee Cho, Young Nam Chun

*Department of Environmental Engineering Chosun University*

(Received 10 November 1997; accepted 18 March 1998)

#### Abstract

Coal gasification fuel has generally a lower calorific values than natural gas and also contains ammonia which is a main source of fuel NO<sub>x</sub>. Such a fuel is in need of the advanced technologies for the NO<sub>x</sub> reduction with higher combustion efficiency.

Therefore fuel staged combustion was investigated for the fuel NO<sub>x</sub> control using a bench scale gas combustor for the fuel NO<sub>x</sub> control. Parametric screening studies were performed with the variation of air ratio, retention length and reburning fuel. The NO<sub>x</sub> reduction efficiency was increased with an increase of total air ratio having optimum reburning air ratio differently. The Increased retention length of the reburning zone was preferable for NO<sub>x</sub> reduction. Hydrocarbonic reburning fuels like propane and butane were more effective for the NO<sub>x</sub> reduction efficiency than hydrogen fuel. The NO<sub>x</sub> concentration at exit was linearly increased according to the fuel-N increases in the fuel.

**Key words** : fuel staged combustion, reburning, gasification fuel

#### 1. 서 론

질소산화물은 인류의 건강과 생활환경에 막대한 해를 끼친다고 알려져 왔는데, 질소산화물에 노출이 되면 호흡기 질환에 걸릴 위험이 높아지며, 특히 만성 호흡기 질환에 걸리기 쉽다. 또한 식물에도 유독하여, 식물이 성장속도가 둔화되고 고사되기도 한

다. 질소산화물의 가장 큰 피해는 광화학적 스모그 생성에 관여하는 것으로, 햇빛의 존재하에 탄화수소와 반응하여 광화학적 산화물과 오존을 생성한다.

질소산화물은 천연가스와 같이 연료 중 질소성분이 포함되지 않은 연료의 연소시에는 대부분이 thermal NO<sub>x</sub>이지만, 유기질소 화합물을 다량으로 함유하고 있는 중유나 석탄 연소시에는 fuel NO<sub>x</sub>가 대부분을 차지한다. 특히 비교적 낮은 온도조건에서

연소되는 석탄연소의 경우에는 대부분이 fuel NOx에 의해 생성되며, fuel-N이 될 수 있는 암모니아를 포함하고 있는 석탄가스화 연료의 연소시에도 fuel NOx가 중요하다.

석탄가스화 복합발전 시스템에서 사용되는 가스화 연료는 일산화탄소와 수소 등으로 연소가능한 가연성분이며 발열량이 천연가스의 1/10로 낮다. 또한 fuel NOx를 발생시키는 암모니아를 포함하고 있는 특성 때문에 연소기를 개발할 경우 가스화 연료의 연소시 제반특성을 파악하는 것이 필요하다. 이러한 가스화 복합발전 시스템의 개발 중 중요한 과제 중의 하나는 암모니아에서 발생하는 fuel NOx를 저감시키는 기술의 개발이다.

이러한 연구는 배연탈질 기술과 연소방법의 변경으로 구분된다. 질소산화물의 제어는 황산화물의 제어와는 달리 연소방법의 변경기술이 효율적이며 이에 대한 연구로는 배출가스 재순환법(exhaust gas recirculation, EGR; Martin, 1971, 1974), 2단 연소(two staged combustion; Palmer, 1974) 등의 방법이 있다. Fuel staging에 대한 연구로는, NOx와 탄화수소라디칼의 반응에 의하여 NOx를 저감시키는 기초 실험이 수행되었고(Myerson, 1974) 그 후 연료를 화염내에 공급하여 국부적으로 연료 과농인 상태를 유지하여 연료와 NO를 반응시켜 N<sub>2</sub>로 환원시키는 방법이 Wendt(1972)와 Takahashi(1982) 등에 의해 연구되었다.

본 연구에서는 NH<sub>3</sub>를 함유한 가스화 연료(gasification fuel)의 연소시 생성되는 질소산화물을 저감시키기 위해 fuel staging에 대한 연구를 수행하였으며, 주연소 영역 및 재연소 영역의 공기비, 재연소 영역의 체류거리, 재연소 연료의 종류 및 fuel-N의 농도변화 등에 대한 NOx 배출특성을 규명하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 그림 1에 나타나 있는데 크게 연료와 공기를 연소기에 주입하는 유로계(flow system), 유로계에서 유입된 혼합기를 연소시키는 연소기(combustor), 연소기내 온도 및 배출가스의 농도를 분석하는 측정시스템 등 세부분으로 구성되어있다.

연소기 본체(main board)는 원형 stainless steel관 내부에 예혼합 화염이 형성되는 수력반경이 1.2mm인 honeycomb 세라믹(표 1 참조)버너가 장착되어 있다. 또한 재연소 연료 및 완전연소 공기의 공급을 위해 동축 이중관의 staging probe를 만들어 연소기 상단에 삽입하여 가변이 가능하도록 하였다.

유로계는 연료 공급과 연소용 공기의 공급으로 구분되는데 연료 공급은 연료탱크 및 암모니아탱크로 부터 각각 유량계를 거쳐 혼합기에서 혼합된 후 압축기로부터 공급된 공기와 혼합되어 세라믹 주연소버너로 공급된다. 또한 일부는 공기와 혼합되지 않은 상태로 staging probe의 reburning fuel(그림 1 참조)로 공급된다. 연소용 공기는 공기압축기로부터 surge tank를 거쳐 일정압으로 혼합기에서 연료와 혼합되어 주버너로 공급된다. 또한 일부공기는 연료와 혼합되지 않고 공기만 staging probe의 reburning air(그림 1 참조)를 통해 각각 공급된다.

측정시스템은 연소기내 온도와 배기구에서의 농도측정으로 구분된다. 연소기내 온도측정은 PR열전대(Pt/Rh 13%)가 세라믹버너 내부에 수직방향으로 1cm 간격으로 4개소에, 버너 상단에 K-type 열전대가 6개소, 총 10개소에 장착되어 있다. 배기가스의 농도측정은 연소기 후류에 sampling probe를 삽입하여 배기가스를 측정라인으로 공급되도록 하였으며 cooler에서 응축점 이하로 온도를 낮추어 수분을 제거하고 silica-gel에서 soot 등의 불순물을 제거한 후 분석기로 유입되도록 구성하였다.

Table 1. Physical properties of the honeycomb ceramic.

Items	Physical Properties	
Crystalline	Cordierite	80%
	Mulite	20%
Chemical Composition (Major Oxide)	SiO <sub>2</sub>	43%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46%
	MgO	11%
Max Use Temp.	1,470°C	
Wall Thickness	0.433 mm	
Opening Size	1.1 mm	
Open Porosity	40.53%	
Density	a. per total vol	0.60
	b. per solid	2.58
Compressive Strength	117.36 kg/cm	

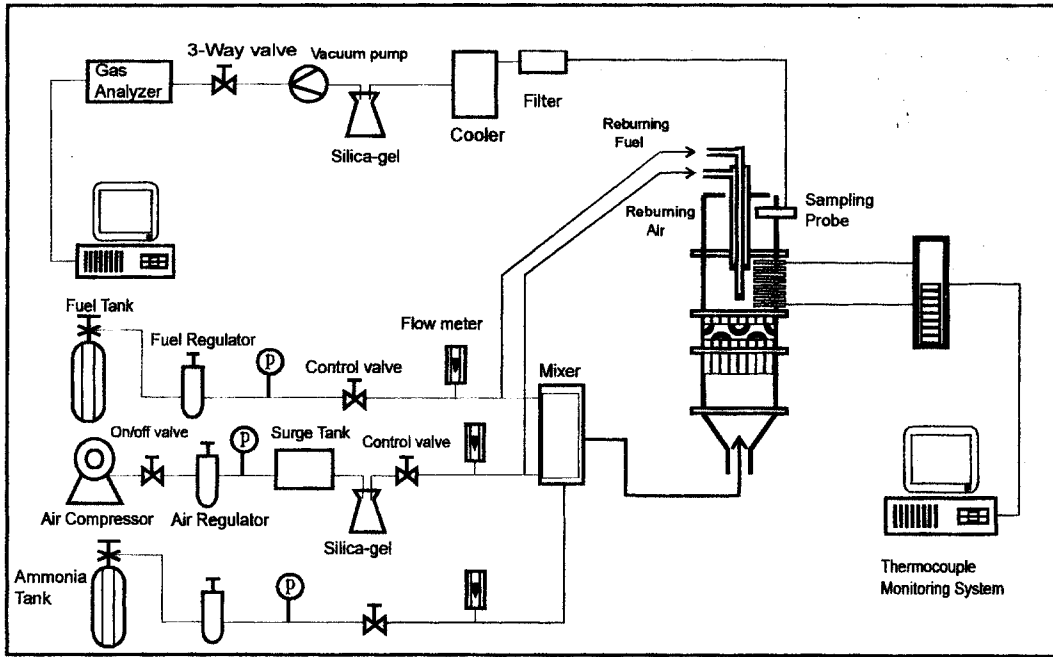


Fig. 1. Schematic diagram of the combustor and flow system.

2.2 실험방법

본 연구에서는 동일한 실험장치에서 기존의 일반 연소법 (ordinary combustion method)과 fuel staging 연소법 2가지로 나누어 실험을 수행하였다.

일반연소 실험은 fuel staging과 동일한 열부하 (thermal load)의 연소조건에서 fuel staging의 NOx 저감효과를 상대비교하기 위한 기준값을 얻기 위해 수행되었다. 주버너에 연료와 공기를 동시에 공급시켜 공기비를 1.1, 1.2, 1.3으로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

Fuel staging 실험은 그림 2와 같이 주연소 영역, 재연소 영역, 완전연소 영역의 세영역으로 구분된다. 재연소 영역의 공기비 변화에 대한 NOx 저감효과를 규명하기 위해 완전연소 공기비(이하  $\lambda_t$ )를 1.2로 고정하고 주연소 영역의 공기비(이하  $\lambda_1$ )를 1.1, 1.2, 1.3으로 하여 각각 재연소 영역 공기비(이하  $\lambda_2$ )를 0.5 ~ 1.1로 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 재연소 영역의 체류거리 변화에 대한 NOx 배출 특성을 규명하고자 주연소 영역의 체류거리(이하 L1)를 2cm로 고정한 상태에서 재연소 영역의 체류거리(이하 L2)를 각각 5cm 및 10cm로 변

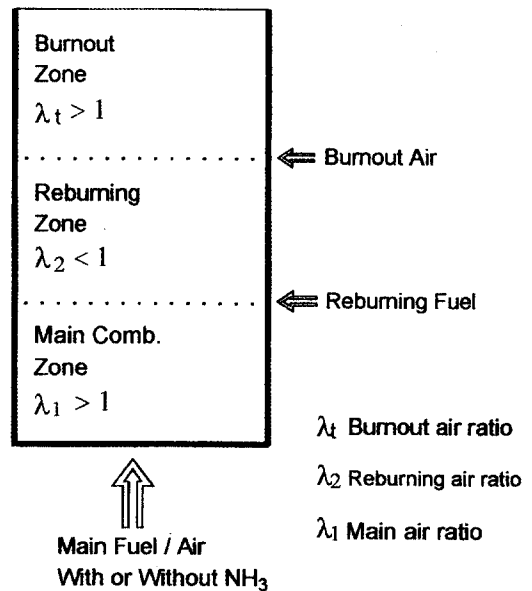


Fig. 2. Principle of the fuel staging concept.

화시켰다. 재연소 연료의 종류에 대한 특성을 알아보고자 재연소 연료를 순수 프로판 ( $C_3H_8$ )에 부

탄(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), 수소(H<sub>2</sub>)를 부피비로 각각 25%, 50%, 75%, 100%로 양을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 재연소 연료 중 fuel-N의 농도변화에 따른 배출특성 연구를 위해서는 재연소 연료 중 NH<sub>3</sub>의 농도를 부피비로 2%~7%로 변화시켜 실험을 수행하였다.

배기가스의 농도측정은 건농도기준으로 NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub> 가스를 gas analyzer (ENERAC 2000)에 의해 연속측정하였으며, 배기가스의 온도는 thermocouple monitoring system (SR 630)을 이용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 일반 연소기에서 NO<sub>x</sub> 배출특성

본 연구에서 NO<sub>x</sub> 저감을 위해 적용되어진 fuel staging의 저감효과를 규명하기 위해, 우선 NO<sub>x</sub> 저감 연소기술이 적용되어지지 않은 일반 연소기의 배기구에서 배출되는 NO<sub>x</sub> 및 축방향의 온도분포를 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

그림 3은 공기비를 각각 1.1, 1.2 및 1.3으로 하였을 때 배기구에서의 NO<sub>x</sub> 농도로서 프로판만 연소시키는 경우 약 14~20 ppm으로 NO<sub>x</sub> 배출량이 작은 값이지만 암모니아 첨가시는 약 831~834 ppm으로 상대적으로 다량 배출된다. 그러나 두 경우 모두 공기비 변화에 따른 배기구에서의 NO<sub>x</sub>의 농도는 거의 변화가 없었다.

프로판만 연소시 NO<sub>x</sub>의 농도가 낮은 것은 fuel-N에 의한 fuel NO<sub>x</sub>의 생성이 거의 없고 일부 thermal NO<sub>x</sub> 및 prompt NO<sub>x</sub>이기 때문이다. 또한 그림 4의 온도분포에서도 알 수 있듯이 가스화 연료 중의 NH<sub>3</sub>만의 영향을 규명하고자 연소기를 단열시키지 않아 최대온도가 1,500 K 이하로 유지되어 Zeldovich mechanism (Zeldovich, 1947)에 의한 thermal NO<sub>x</sub>의 생성이 적기 때문이다. 반면에 fuel-N인 NH<sub>3</sub>를 2% 첨가시 NO<sub>x</sub>의 농도가 급격히 증가하는 것은 일반적으로 예혼합화염에서 fuel-N의 NO<sub>x</sub>로의 전환율이 온도가 증가됨에 따라 증가되는 것으로 알려져 있기 때문이다(高城, 1978; Fenimore, 1965). 그러나 NH<sub>3</sub> 농도를 2%로 첨가한 본 연구에서 발생하는 질소산화물은 공기 중의 질소의 산화라기 보다는 주로 과잉공기비 조건에서 산소에 의

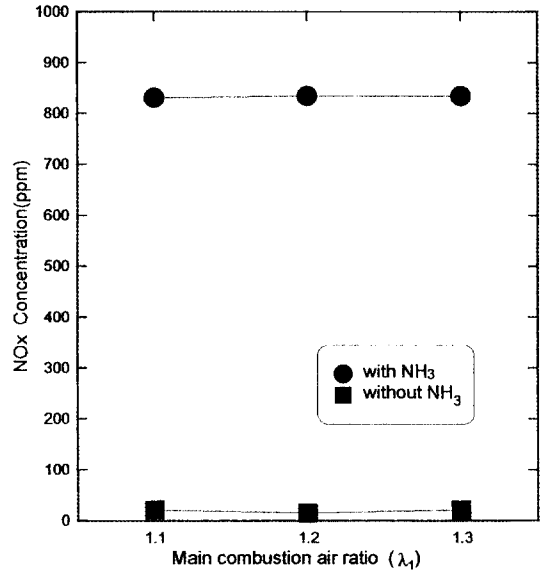


Fig. 3. NO<sub>x</sub> Concentration at ordinary combustion.

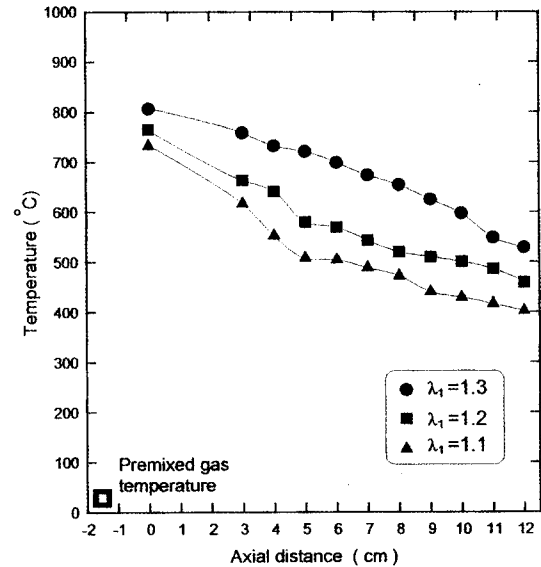


Fig. 4. Temperature profiles at ordinary combustion.

한 fuel-N의 산화에 의한 것이다.

그림 5는 공기비 변화에 대한 CO, CO<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub>의 농도를 나타낸 것으로 CO 및 CO<sub>2</sub>의 농도는 공기비 증가에 따라 다소 감소하지만 O<sub>2</sub>의 농도는 증가한다. 공기비 증가에 대한 CO 농도의 감소는 산소량

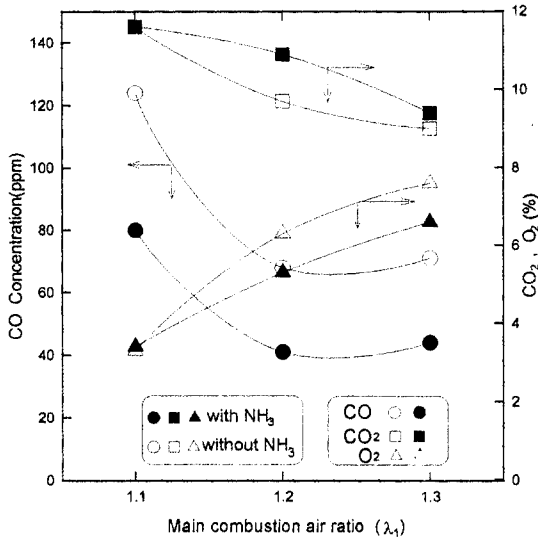
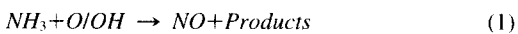


Fig. 5. CO, CO<sub>2</sub>, and O<sub>2</sub> concentrations with a variation of air ratio.

증가에 의한 CO의 산화를 의미하며, CO<sub>2</sub> 농도의 감소는 CO<sub>2</sub> 양의 감소라기 보다는 O<sub>2</sub> 농도에서도 알 수 있듯이 과잉공기에 의한 희석효과이다. 또한 fuel-N의 첨가시 CO 및 O<sub>2</sub> 농도가 감소하고 CO<sub>2</sub> 농도가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 연료인 프로판의 절대량은 일정한 상태에서 fuel-N인 NH<sub>3</sub>의 첨가로 가연성분인 수소가 증가하여 연소성을 증가시키기 때문이다.

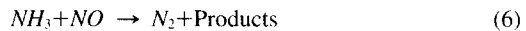
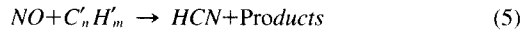
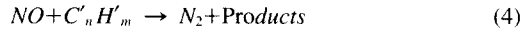
### 3.2 Fuel Staging 기술을 이용한 연소기의 NOx 저감 메카니즘

Fuel staging은 연소영역을 그림 2에 나타난 바와 같이 주연소 영역, 재연소 영역, 완전연소 영역으로 구분된다. 주연소 영역에서는 과잉공기비로 공급되어 산화성 분위기에서 fuel-N인 NH<sub>3</sub>는 산소 라디칼과 반응하여 식 (1) 및 (2)와 같이 NOx로 전환된다(Spliethoff, 1991).



재연소 영역에서는 재연소 연료가 공급되면서 연료과농의 환원성 분위기가 유지된다. 탄화수소계 연료(C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>)가 주연소 영역에서 산소와 반응하여 식

(3)과 같이 탄화수소 라디칼(C'<sub>n</sub>H'<sub>m</sub>)을 생성하며 이 탄화수소 라디칼은 식 (4) 및 (5)와 같이 주연소 영역에서 생성된 NO와 반응하여 N<sub>2</sub>로 환원되던가 중간생성물(intermediates) HCN을 생성하여 NO를 저감한다.



완전연소 영역은 재연소 연료의 완전연소를 위해 재연소 영역 후류에 완전연소 공기가 공급된다. 이때 TFN(total fixed nitrogen)인 NH<sub>3</sub>, HCN, NO가 N<sub>2</sub>로 전환되던가 또는 NO가 일부 생성된다.

### 3.3 Fuel Staging에 의한 변수별 연구

#### 3.3.1 재연소 영역의 공기비 변화에 따른 배출특성 및 온도특성

그림 6은 체류거리(L1, L2) 및 공기비( $\lambda$ )가 각각 L1=2cm, L2=10cm, 5cm,  $\lambda_1=1.2$  이고  $\lambda_1$ 이 각각 1.1, 1.2, 1.3일 때  $\lambda_2$  변화에 대한 NOx 배출특성을 나타낸 것이다.  $\lambda_1$ 이 1.1일때  $\lambda_2$ 가 감소됨에 따라 NOx의 농도가 감소되어  $\lambda_2=0.9$ 에서 최소값을 가진 후 다시 증가된다.  $\lambda_2$ 가 0.9이고  $\lambda_1$ 이 1.1일 때 NOx의 농도가 감소되는 것은 재연소 영역의 공기비가 작아짐에 따라 재연소 연료량의 증가로 인해 환원성 분위기가 형성되며, 또한 탄화수소 연료인 프로판이 공기 중 산소와 반응하여 탄화수소 라디칼을 형성하여 이미 주연소 영역에서 식 (1)에 의해 생성된 NO와 반응하여 N<sub>2</sub>로 환원되기 때문이다. 이는 연료과농의 조건에서 탄화수소 연료의 반응식 (3) 및 (4)에서도 알 수 있다.  $\lambda_2$ 가 0.9 이하에서 다시 증가하는 것은  $\lambda_2$ 가 감소함에 따라 연료과농의 상태에서 중간생성물의 양이 증가되어(Martin, 1975) 완전연소 영역에서 완전연소 공기의 주입과 함께 대부분 NO로 전환되기 때문에 배기구에서 NOx의 농도가 증가된다.  $\lambda_1$ 이 1.2, 1.3일 때는  $\lambda_2$ 의 감소와 함께 두 경우 모두 감소한다. 특히  $\lambda_2$ 가 0.9 이하에서  $\lambda_1$ 이 1.1일 때와 달리 지속적으로 감소하는데 이는  $\lambda_1$ 이 증가되므로서 재연소 연료량이 증가되어  $\lambda_1$ 이 1.1

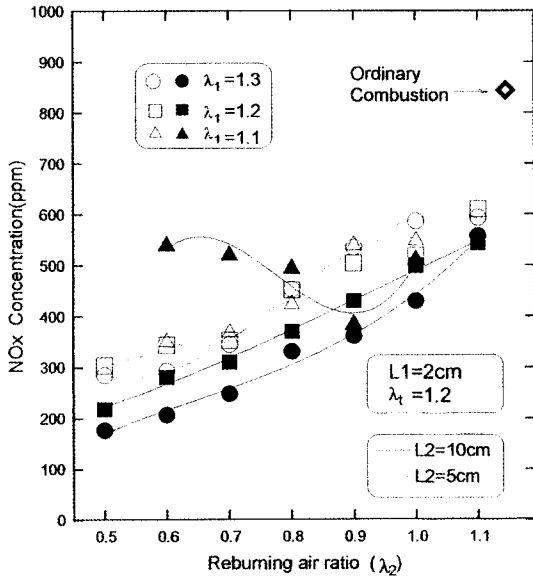


Fig. 6. NOx concentration with a variation of  $\lambda_2$ . (L1=2 cm,  $\lambda_1=1.2$ )

일 때와 동일한 공기비라 하더라도 재연소 연료로부터 식 (3)에 의해 생성되는 탄화수소의 양이 많이 생성되어 식 (4)에 의한  $N_2$ 로의 환원이 지속적으로 이루어지기 때문이다. 또한 체류거리가 짧아지면서 (L2=5 cm) L2가 10cm와 비교하여 NOx의 농도가 주연소 공기비 변화에 관계없이 전체적으로 증가됨을 알 수 있다. 이는 위에서 언급하였듯이 탄화수소 연료인 프로판이 공기 중 산소와 반응하여 탄화수소 라디칼을 형성하여 이미 주연소 영역에서 식 (1)에 의해 형성된 NO와 반응하여  $N_2$ 로 환원되는 시간이 짧아져서 증가되는 것이다.

그림 7은 L1=2cm, L2=10cm,  $\lambda_1=1.2$ 이고,  $\lambda_1$ 이 1.2 일때  $\lambda_2$ 변화에 따른 CO와  $O_2$  배출특성을 나타낸 것이다.  $\lambda_2$ 가 감소됨에 따라 CO의 농도는 감소되어 거의 일정한 값을 보이며  $O_2$  농도는 거의 일정한 값을 보인다.  $\lambda_2$ 가 감소됨에 따라 CO의 농도가 감소하는 것은 그림 8의 온도변화에서도 알 수 있듯이  $\lambda_2$ 가 감소하면서 재연소 연료량이 증가되어 재연소 영역 선단에서 연소되지 못한 다량의 미연성분이 재연소 영역 후류에서 연소되어 연소 온도 및 연소성이 증가되기 때문이다. 이는 또한 전체적인 부하량이 증가되어 연소성이 증가되기 때문이기도

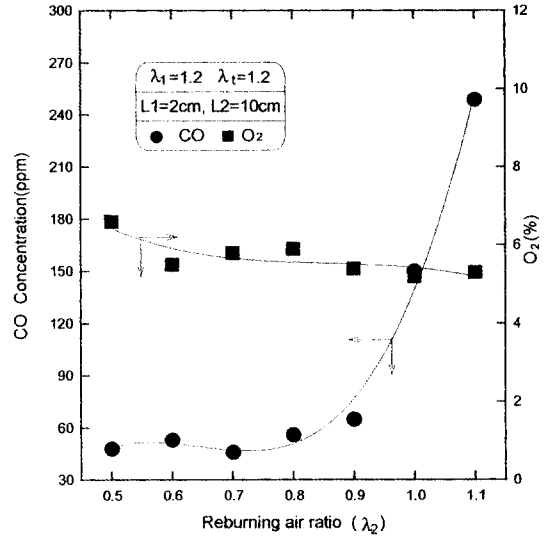


Fig. 7. CO,  $O_2$  concentration with a variation of  $\lambda_2$ .

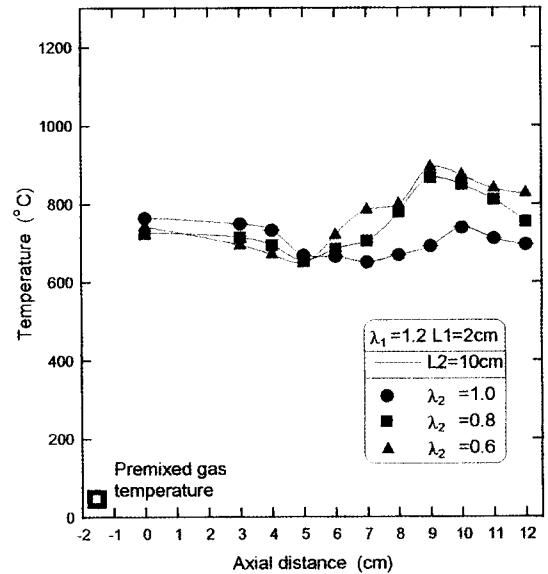


Fig. 8. Temperature profiles with axial distance.

하다.  $\lambda_2$ 가 감소되어도  $O_2$  농도가 감소됨이 없이 거의 농도변화가 없는 것은  $\lambda_1$ 이 1.2로 일정한 상태에서 재연소 연료가 증가되더라도 주연소 연료에 비해 절대량이 크지 않아 연소에 의한 산소 소모량이 크지 않은 상태에서 총공기비  $\lambda_2$ 가 일정하기 때문이다.

3. 3. 2 재연소 영역 체류거리 변화에 따른 배출특성 및 온도특성

그림 9는 공기비가 각각  $\lambda_1=1.2$ ,  $\lambda_2=1.2$ 일 때, 체류거리  $L_2$  변화에 대한  $\text{NO}_x$  배출특성을 나타내었다.  $L_2$ 를 5 cm에서 10 cm로 증가시키에 따라  $\text{NO}_x$ 의 농도가 감소하는데, 이는 공급되는 탄화수소 연료와 공기 중 산소가 반응하여 탄화수소 라디칼이 생성되는 반응시간이 증가되어 탄화수소 라디칼의 생성량이 증가되며, 주연소 영역 후류에서 재연소 영역으로 유입되는  $\text{NO}$ 와 탄화수소 라디칼 반응에 의한  $\text{N}_2$ 로의 환원기회가 증가되기 때문이다. 또한 재연소 영역에서 공급되는 재연소 연료와 완전연소 영역에서 공급되는 공기의 속도가 중요하다. 체류거리가 짧으면 같은 속도로 공급되는 재연소 연료의 혼합물이 상대적으로 감소하기 때문에 그만큼 환원 기회도 감소된다.

그림 10은  $L_2$  변화에 대한 온도분포를 나타낸 것이다.  $L_2$ 가 5 cm일 때는  $\lambda_2$ 가 0.6일 때 1.0에 비해 재연소 연료의 증가로 재연소 영역의 온도가 다소 큰 값을 나타낸 상태에서 완전연소 공기의 주입과 함께 지속적으로 연소가 이루어지는 것을 알 수 있다.  $L_2$ 가 10 cm일 때는 재연소 영역 상류에서는  $\lambda_2$

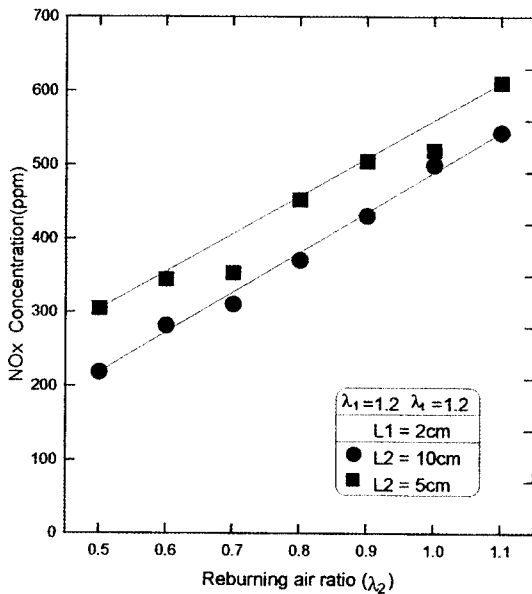


Fig. 9.  $\text{NO}_x$  concentration with variation of retention time at reburning zone.

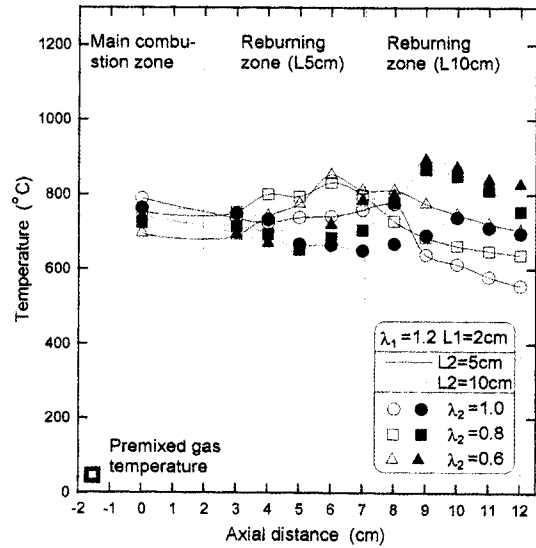


Fig. 10. Temperature profiles with variation of retention length.

의 변화에 따라 큰 변화를 보이지 않지만 재연소 영역 후류에서는  $\lambda_2$ 가 0.6 및 0.8일 때 증가를 보이는 것을 알 수 있다. 또한  $L_2$ 가 5 cm일 때는 재연소 영역이 작아 재연소 영역의 온도가 전체적으로  $L_2$ 가 10 cm일 때의 재연소 영역 상류의 온도보다 높지만 재연소 영역 후류의 온도보다는 다소 낮은 것을 알 수 있다. 재연소 영역내의 최대온도는 1100 K로 저발열량의 가스화 연료와 같이 thermal  $\text{NO}_x$ 의 생성온도인 1500 K보다 높지 않으며 이는 본 연구에서 생성된  $\text{NO}_x$ 의 대부분이 fuel  $\text{NO}_x$ 임을 알 수 있다.

3. 3. 3 재연소 연료의 종류 변화에 따른 배출특성

그림 11은  $L_1=2\text{ cm}$ ,  $L_2=10\text{ cm}$ ,  $\lambda_1=1.2$ ,  $\lambda_2=1.2$ 이고  $\lambda_2$ 가 각각 1.0, 0.8 및 0.6일 때 재연소 연료의 종류 변화에 대한  $\text{NO}_x$  배출특성을 나타낸 것이다. 재연소 연료는 초기 프로판을 100%로 해서 부피비로 부탄 및 수소를 각각 25~100%로 변화시키면서 첨가시킨 것이다.

재연소 영역의 연료 중 수소를 첨가할 경우 첨가량의 증가함에 따라 배기구에서  $\text{NO}_x$ 의 농도가 증가하고 부탄을 첨가할 경우는 수소첨가시보다 그 영향은 크지 않지만 다소 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 재연소 영역의 공기비 변화에 대한 영향은

수소의 경우 NO<sub>x</sub>저감 λ<sub>2</sub>가 증가될수록 크지만 부탄의 경우는 변화가 크지 않다.

재연소 연료 중 수소의 농도가 증가될 경우 NO<sub>x</sub>의 농도가 증가되는 것은 이미 실험방법에서 언급된 바와 같이 재연소 연료인 프로판과 수소의 첨가량을 부피비로 공급하였기 때문에 각각 동일 유량이 공급될 경우 프로판 중 수소의 첨가량이 증가될수록 재연소 연료의 밀도가 감소하여 질량유량(mass flow rate)이 감소되고 발열량 또한 낮아진다. 동일한 공기비의 상태에서 재연소 연료로 공급되는 연료의 낮은 발열량은 연소성의 감소를 초래하기 때문에 연소기내의 온도가 낮아지게 된다. 또한 이때 낮은 연소성으로 인해 연소에 관여되지 못한 산소의 농도가 상대적으로 증가된다. 연소로내의 온도가 낮아지면 환원성 분위기에서 식 (3)에 의해 탄화수소 라디칼의 생성이 어려워 그 절대량이 감소되기 때문에 식 (4), (5)에 의한 NO 저감량이 감소되기 때문에 NO의 농도가 증가된다. 또한 산소농도의 증가는 재연소 영역의 분위기를 산화성 분위기에 가깝게 하여 비록 식 (3)에 산소가 일부 소모되지만 그 절대량이 많아 NO의 생성에 관여하게 되므로 NO가 증가된다.

그리고 부탄의 경우는 수소의 경우와 반대로 해

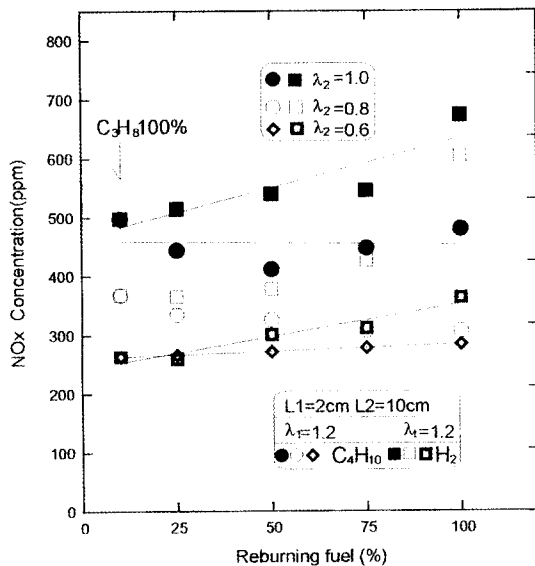


Fig. 11. NO<sub>x</sub> concentration with a variation of the reburning fuel. (λ<sub>2</sub>=1.0)

석되어질 수 있고, 본 실험에서 수소에 비해 그 영향이 적은 것은 프로판과 상대적으로 밀도차가 적기 때문이다. 결과적으로 fuel staging의 NO<sub>x</sub> 저감을 위해서는 재연소 영역의 공기비를 환원성 분위기로 유지시킨 상태에서 연소기내의 온도를 높게 유지시키고, 발열량이 높은 탄화수소계 연료가 NO<sub>x</sub> 저감에 유리한 것을 알 수 있다. 하지만 액체연료의 경우 발열량이 높은 중질유이지만 재연소 영역에서 이상연소(two phase combustion)과정으로 인해 혼합이 분리하므로 최대한 연소기 및 노즐을 잘 설계하고 혼합성을 높이는 것도 고려되어야 할 것이다.

3.3.4 재연소 연료 중 NH<sub>3</sub> 농도변화

그림 12는 체류거리 L1=2 cm, L2=10 cm, 공기비 λ<sub>1</sub>=1.2, λ<sub>2</sub>=0.8, λ<sub>3</sub>=1.2일 때, 재연소 연료 중 NH<sub>3</sub> 농도(%) 변화에 대한 NO<sub>x</sub> 농도 변화를 나타낸 것이다. 재연소 연료에 포함된 NH<sub>3</sub>의 농도가 증가됨에 따라 NO<sub>x</sub>의 농도가 증가되는데, 이는 연료과농의 환원성 분위기이기는 하나 재연소 연료 중 질소성분의 증가로 인해 주연소 영역에서 연소에 관여되지 않은 과잉 잔류 산소에 의해 산화되어 NO<sub>x</sub>의 농도가 증가되기 때문이다.

그림 13은 L1=2 cm, L2=10 cm, 공기비 λ<sub>1</sub>=1.2, λ<sub>2</sub>=0.8, λ<sub>3</sub>=1.2일 때, 재연소 연료 중 NH<sub>3</sub> 농도(%) 변

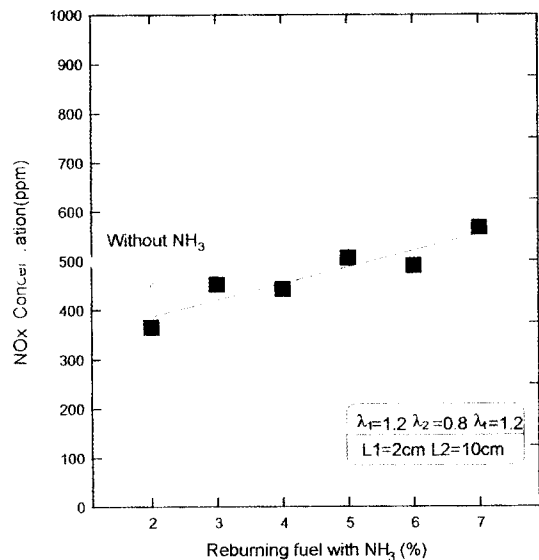


Fig. 12. NO<sub>x</sub> concentration with a variation of the NH<sub>3</sub> in the reburning fuel.



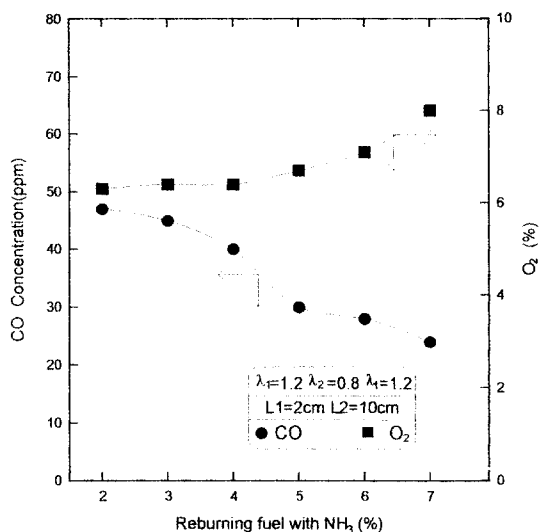


Fig. 13. CO and O<sub>2</sub> concentration with a variation of the NH<sub>3</sub> in the reburning fuel.

화에 대한 CO 및 O<sub>2</sub> 농도 변화를 나타낸 것이다. CO 농도가 암모니아를 첨가하지 않았을 때보다 첨가하였을 때 감소하는 이유는 암모니아가 공급되어 전체적인 부하량의 증가로 인하여 연소성이 좋아지기 때문이다. 이러한 이유로 산소농도 또한 증가가 되는데 이는 재연소 영역에서 연소성이 좋아지고 미연탄화수소 배출이 적어서 완전연소 영역에서 공급되는 공기 중의 산소가 배출되기 때문이다. 그러나 그 증가율은 크지 않다.

#### 4. 결 론

석탄가스화 복합발전 시스템에서 fuel-N으로 NH<sub>3</sub>를 함유한 저칼로리 가스화 연료의 연소시 고효율 저 NOx 연소기 개발을 위해 fuel staging에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) NOx 저감은 주연소 공기비가 1.1일 때는 재연소 영역의 공기비가 0.9일 때 384 ppm으로 최소값을 가지나 저감효율은 55%이었고 주연소 영역의 공기비가 1.2 및 1.3으로 증가될 때는 재연소 영역의 공기비가 감소될수록 NOx의 저감효과가 큰 것으로 나타났다. 재연소 공기비가 0.5일 때 저감효율은 각각 75% 및 79%이었다.

2) 재연소 영역의 체류거리가 증가됨에 따라

NOx 저감효과도 11% 증가하였다.

3) 재연소 연료의 경우 탄화수소계 연료인 부탄을 첨가할 경우가 상대적으로 수소를 첨가하였을 때보다 NOx 저감효과가 큰 것으로 나타났다.

4) 재연소 연료 중 fuel-N의 양이 증가됨에 따라 NOx의 농도가 360 ppm에서 562 ppm으로 증가되었다. 또한 연소성이 좋아지면서 CO 농도가 감소하였다. Fuel staging의 경우 재연소 연료량의 증가와 함께 연소효율의 증가를 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 96년도 조선대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

Martin, G.B. (1971) *AICHE National meeting*.  
 Martin, G.B. (1974) 固定 發生源 における NOx 対策, 日本.  
 Palmer, H.B. and J.M. Beer (1974) *Combustion technology-some modern developments*, Academic Press, Inc., New York U.S.A.  
 Myerson, A.L. (1974) The reduction of nitric oxide in simulated combustion effluent by Hydrocarbon-Oxygen mixture, 15th Symp. (Int.) on Combust., U.S.A., 1085-1089.  
 Wendt, J.O.L., C.V. Sternling, and M.A. Matovich (1972) Reduction of sulfur trioxides and nitrogen oxide by secondary fuel injection, 14th Symp. (Int.) on Combust., U.S.A., 897-900.  
 Takahashi, Y. (1982) Development of MACT in-furnace NOx removal process for utility stream generators, Presented at the 44th Annual meeting of the American power conference.  
 Zeldovich, Y.B., P.V. Sadovnikov, and D.A. Frank Kamenetskii (1947) Oxidation of nitrogen in combustion, Academy of sciences, U.S.S.R.  
 Fenimore, C.P. (1965) 16th Symposium (Int.) on Comb., 1978-1980.  
 高 城 外 3名 (1978) 機論, 44(388), 4282-4285.  
 Spliethoff, H. (1991) Large scale trials and development of fuel staging in a 169 MW coal fired boiler, 1991 Joint Symposium on Stationary Combustion NOx Control, Washington DC, March, 25-28.  
 Takahashi, Y., M. Sakai, T. Kunimoto, and H. Haneda (1981)

Development of Mitsubishi 'MACT' in-furnace NOx Removal Process, Published in Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 18(2), 174-179.

Martin, F.J. and P.K. Dederick (1975) NOx from fuel nitrogen in two-stage combustion, Sixteenth symposium (International) on combustion, 1157-1165.