

## 2단 동축형 Cyclone 연소기를 이용한 저공해 미분탄 연소특성 연구

최 상 일\*, 박 주 식\*, 김 성 완\*, 김 호 영\*\*

### A Study on Low Emission Pulverized Coal Combustion in the 2 Staged Coaxial Cyclone Combustor

Sang-Il Choi\*, Chu-Sik Park\*, Sung-One Kim\*, Ho-Young Kim\*\*

**Key Words:** low emission, pulverized coal, NO<sub>x</sub>, fly ash, staged combustion, cyclone combustor, slagging combustion

#### Abstract

The objective of this study is development of low emission pulverized coal combustor for reducing pollutant emission generated from coal combustion.

Low emission combustion technology for reducing NO<sub>x</sub> and fly ash was investigated by using 2 stage coaxial cyclone combustor.

Staged combustion was employed for NO<sub>x</sub> reduction and high temperature slagging combustion was also studied for fly ash removal in the combustor.

The result of this study shows that the low emission combustion system can reduce the amount of atmospheric pollutions with improved boiler efficiency and performance.

#### 기호설명

$C_D$  : fraction coefficient

$d_p$  : coal particle diameter

$E_g$  : combustion efficiency by flue gas composition method

$E_a$  : combustion efficiency by ash trace method

$\rho$  : density of gas

$\rho_p$  : density of coal particle

#### 1. 서론

대부분의 연료가 그렇듯이 석탄의 연소시에는 심각한 공해물질이 발생하게 되며 그중 가장 문제시 되고있는 공해물질로서 배기가스 중의 분진과 질소산화물 그리고 아황산가스를 말할 수 있다. 이러한 공해물질의 제거를 위하여 연소 후의 배기가스 정화방법이 있으나 이러

\* 한국에너지기술연구소

\*\* 고려대학교 기계공학과

한 방법은 아직까지 막대한 시설 투자비와 운전비용이 소요되며 석탄에 포함된 회분의 영향으로 인한 연소 및 운전상의 문제 해결을 위한 기술을 필요로 한다.

저공해 연소기술은 연소과정에서 공해 물질을 제거하는 방법으로서 로 내에서 NOx를 저감할 수 있으므로 배기가스의 탈질을 위한 설비 설치와 운전비용을 절감할 수 있으며 또한 배기가스 중의 분진이 감소되므로 집진설비의 규모를 축소시킬 수 있으므로 집진설비의 설치비 및 운전비용이 감소된다. 연소가스 중의 공해물질이 연소과정에서 제거되므로 보일러내의 부식과 마모가 감소됨에 따라 보일러의 수명 연장이 가능하며 배기가스의 온도를 낮출 수 있으므로 열효율을 높일 수 있다는 장점을 갖는다. 한편 보일러 내로 분진의 유입이 현저히 감소하므로 slagging과 fouling 현상을 근본적으로 방지하여 보일러의 효율을 향상시킬 수 있으며 운전 trouble을 해소할 수 있다.

선진 외국에서 개발되었거나 연구중인 저공해 연소를 위한 대표적인 신기술로서 미국의 B&W(Babcock & Wilcox)사의<sup>(1)</sup> "Reburning for Cyclone Boiler NOx Control"기술과 TRW사의<sup>(2)</sup> "Entrained Coal Combustor"기술 그리고 RSC(Riley Stoker Corporation)의<sup>(3)</sup> "Low Emission Boiler System"기술을 들 수 있다. 상기한 저공해 연소기술에 공통적으로 적용된 기술은 NOx 저감방법과 분진저감 방법이다. NOx저감기술에는 fuel staging 과 air staging 기술을 복합 사용하여 석탄을 단계적으로 연소시켜 공기비와 연소온도 조절에 의해 NOx 발생을 저감시키는 방법이 적용되었으며 분진저감기술로는 석탄회분을 고온의 1차 연소에서 슬랙(slag)화하여

제거하는 방법이 적용되었다.

본 연구에서는 새로운 2단 동축형 구조의 cyclone연소기를 설계, 제작하였다. 제1단의 pre-combustor에서는 공기비를 높여서 다량의 고온공기를 발생시켜 제2단의 main combustor로 공급하며 고온의 main combustor에서는 낮은 공기비로 운전하여 환원성 분위기에서 NOx가 저감되도록 하였다. 석탄 회분은 제2단의 고온 연소영역인 main combustor에서 슬랙화하여 제거되도록 하여 회분이 제거된 청정 연소가스 만을 보일러에서 저온으로 재 연소함으로써 미분탄 연소공정의 청정화와 성능개선을 추구하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

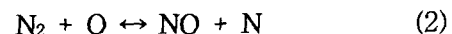
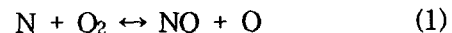
### 2.1. NOx의 생성기구

연소과정 중에 생성되는 NOx는 생성기구에 따라 thermal NOx, prompt NOx, fuel NOx로 대별된다.

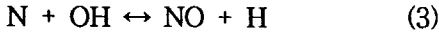
이중 가스 및 액체 연료와는 달리 연료 중에 질소성분을 함유하고 있는 석탄의 경우에는 fuel NOx의 생성 제어가 NOx저감의 핵심기술이 된다.

#### 2.1.1 Thermal NOx

1960년대 후반에 Zeldovich는 최초로 thermal NOx 생성기구를 제안하였다. thermal NOx는 고온에서 연소공기에 의한 질소와 산소의 반응이며, 연소시 질소산화물(NOx)은 N<sub>2</sub>의 고온 열적고착화에 의해 형성이 된다. 기본적으로 가정된 thermal NOx 생성기구는 다음과 같다.<sup>(4)</sup>



thermal NOx의 생성기구는 이후 다음 반응을 포함해 변형되었다.<sup>(5)</sup>



thermal NOx의 생성속도는 반응온도, 국부적인 양론비와 체류시간에 의존한다. thermal NOx의 생성에는 O<sub>2</sub>의 분해에 의한 O원자 공급과 3중 결합된 질소 분자를 파괴하는데 요구되는 높은 에너지가 필요하다. thermal NOx의 생성은 고온에서 지수적으로 증가하는데 1500°C 이상에서 주요한 증가 경향을 보여준다.

### 2.1.2 Prompt NOx

평형 산소비를 이용하여 화염영역에서 측정된 NOx가 Zeldovich 반응기구로 설명되지 못함을 지적하고 1971년 Fenimore는 Zeldovich 반응기구가 아닌 다른 반응기구에 의하여 화염영역에서 NOx가 형성된다고 제안하였다.<sup>(6)</sup> 그는 화염영역에서 NOx가 형성되기 때문에 이를 "prompt NOx"라 명명하였다. prompt NOx의 반응기구는 다음과 같다.<sup>(7~8)</sup>



CN은 O 또는 O<sub>2</sub>와 반응하여 NO를 형성한다고 가정하였다. Fenimore는 탄화수소 화염의 화염영역에 존재하는 CH 라디칼과 C<sub>2</sub>가 임계평형 농도로 존재함을 제안하였다. 그리고 국부 O<sub>2</sub>농도의 증가는 prompt NOx형성을 감소한다고 제안하였다. 후속 실험으로 prompt NOx형성이 양론비 뿐만 아니라 화염온도의 함수임을 제시하였다. 여러 탄화수소의 당량비 변화에 따른 prompt NOx생성 실험에서 prompt NOx는 연료가 풍부한 조건에서 발생하였다.

### 2.1.3 Fuel NOx

Fuel NOx의 반응기구는 thermal NOx와는 달리 체계적으로 정립되어 있지 않다. Fuel NOx의 반응기구에서 fuel NOx의 생성은 반응온도 보다는 당량비가 주

요 함수이다. 석탄 연소시 발생하는 fuel NOx는 출발물질에 의하여 volatile-N과 char-N으로 구분할 수 있다. 이 중 NOx 저감 연소기술에서 주요인자는 volatile-N으로 연소초기에 급격히 산화되어 NOx를 생성시킨다. 생성된 fuel NOx는 환원분위기하에서 생성된 활성 탄화수소에 의하여 N<sub>2</sub>로 환원되어진다.

### 2.2. 석탄회분의 용융성

석탄회의 용융은 석탄화력발전소 보일러의 water wall 및 super heater나 reheater에서 발생하는 회분 용착현상의 원인이 된다. 이 중 water wall에 석탄회분이 용착되는 현상을 slagging이라 하며 super heater 또는 reheater에 휘발된 무기물로 인하여 용착되는 현상을 fouling이라 한다. 이러한 회분 층의 형성은 열전달 효율을 감소시키고 심각한 경우 발전소의 운전 중단을 초래한다. 석탄회분의 용융에 의하여 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위한 방법의 하나로 보일러 이전의 연소기에서 석탄회분을 용융시켜 slag으로 제거하는 slagging 연소기술이 연구되었다.

석탄회를 구성하는 주요 산화물은 Lewis의 산, 염기 정의에 의하여 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 산성산화물로 분류되고 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O는 염기성 산화물로 분류된다. 석탄회분의 용융성은 이들 산화물의 공융을 위한 조성비가 주요한 함수로 알려져 있다. 일반적으로 산성산화물의 조성이 증가하는 경우 석탄회의 용융온도는 상승하며 SiO<sub>2</sub>와 비교하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 석탄회분의 용융온도 상승에 미치는 영향이 상대적으로 크다. 염기성 산화물 중에서는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 CaO가 상대적으로 용융온도를 낮추는 효과가 큰 것으로 알려져 있다.

석탄회분의 용융성을 평가하기 위해 사용되고 있는 지표들 중에서 대표적인 3가지의 방법을 기술하면 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

### 1) Silica Ratio(SR)

일반적으로 SR(silica ratio)는 다음의 식 (6)로 정의되며 통상 0.35-0.9의 값을 갖는다. SR의 값이 작을수록 slagging 성향이 크며 SR의 값이 증가할수록 용융온도는 상승하며 용융 slag의 점도도 높아진다.

$$SR = \frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO} \quad (6)$$

### 2) Silica/Alumina Ratio

Silica/Alumina ratio는 석탄회의 성분 분석결과에서 알 수 있듯이 두 성분의 조성이 석탄회분 중 70~90%의 대부분을 점유하고 있어서 큰 의미를 가지게 된다. 다음의 식 (7)로 정의되는 Silica/Alumina ratio는 값이 클수록 회분의 용융온도는 낮아지고 slagging 성향은 증가하게 된다. 이러한 현상은 비록 두 성분 모두 산성 산화물로 분류되고 용융온도가 높지만 실리카(Silica)의 경우에는 알루미늄(Alumina)보다 염기성 성분과 쉽게 결합하여 용융온도가 낮은 Silicate를 형성하기 때문이다.

$$\frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (7)$$

### 3) Base/Acid ratio(B/A)

B/A ratio의 양극단에서는 용융온도가 높으나 Na나 K등의 알칼리 금속성분이 많이 함유되어 있는 경우에는 예외적으로 용융온도가 낮아진다. 보통 0.4-0.7일 때 용융온도가 가장 낮다. 이 비는 석탄회의 주된 산화물을 모두 포함하고 있기 때문에 탄종의 변화에 따른 오차가 크지 않으므로 가장 보편적으로 사용되고 있으며 식 (8)와 같이 계산된다.

$$\frac{Base}{Acid} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \quad (8)$$

## 3. 기본 분석, 연소시험 장치 및 방법

### 3.1. 석탄 기본분석 및 용융온도 측정

석탄은 생성의 근원이 다양하고 복잡한 구조로 형성되어 있어 석탄의 물리·화학적 특성을 규정하기 위한 분석은 매우 다양한 방법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 석탄의 연소성과 관련한 연구분야에서 기본적이고 보편적으로 행하여지는 석탄의 원소분석, 공업분석, 발열량 분석을 수행하여 연소시험의 기본자료로 활용하였으며 보일러 내에서 연소 중 발생할 수 있는 slagging성을 예측하기 위하여 석탄회 성분분석, 석탄회 용융온도 분석 등을 수행하였다.

석탄은 주로 탄소와 수소로 구성된 가연 성분이 약 60~90% 함유되어 있으며 연소 후 잔존하는 회분이 약 1~40% 함유되어 있다. 석탄을 구성하는 원소 및 물질의 조성은 석탄의 생성 조건 및 탄화 정도에 따라 다른 분포를 갖는다. 또한 석탄 회분을 구성하는 원소의 경우에도 생성연대와 생성지역의 광물분포에 따라 조성이 상이하다. 본 연구에서는 대상 탄의 원소분석을 행하여 C, H, N, S, O의 조성을 알아보았으며 공업분석을 통하여 석탄을 구성하는 물질인 휘발분, 수분, 회분, 고정탄소분의 구성 비율을 확인하였다. 또한 회 성분 분석을 통하여 석탄회의 주요 구성성분인 Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na등을 분석하여 회 용융성 예측에 활용하였다.

대상탄으로는 용융온도가 낮은 미국산 Alaska탄을 선정하였다.

#### 3.1.1 원소분석

원소분석에서는 석탄을 구성하는 C, H, N, S, O가 분석된다. 대상 탄의 원소 분석을 위하여 100~105℃로 유지되는 dry oven에서 3시간 이상 건조한 후 desicator에서 보관하며 실온으로 냉각하여 사용하였다. 원소분석에 Perkin Elmer 2400 원소분석기가 사용되었다.

### 3.1.2 공업, 발열량 분석

공업분석은 휘발분, 수분, 고정탄소분, 회분 등 석탄을 구성하는 물질이 구분되어 분석된다. 공업분석에 사용된 시료는 대기에서 건조시켜 제조되었으며 공업분석에 사용된 기기는 LECO automatic proximate analyser 이며 발열량분석에는 LECO automatic calorimeter가 사용되었다.

### 3.1.3 석탄회 성분분석

화학조성분석에는 ICP(Inductively Coupled Plasma) 분광분석기(프랑스 JOBIN YVON사)가 사용되었으며 석탄회의 주된 구성 원소인 Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na를 분석하였다. 석탄회 화학조성 분석을 위한 회분시료는 석탄을 공기 중에서 750℃로 가열하고 항량이 될 때까지 유지하는 고온 회화법(ASTM D3174)으로 제조하였다.

### 3.1.4 석탄회의 용융온도 측정

회분의 용융온도 측정은 ASTM D1857의 방법에 따라 이루어졌다. 측정에 사용한 실험장치는 LECO AF 600이며 크게 산화성 분위기와 환원성 분위기의 2가지 조건에서 실험이 수행되었다. 산화성 분위기에서는 공기를 사용하고 환원성 분위기에서는 CO, CO<sub>2</sub>를 50:50으로 혼합한 가스를 사용하였다. 용융온도 측정은 시작온도 538℃, 최종온도 1650℃, 온도상승속도 8℃/min의 조건에서 수행되었다.

실험결과는 제조된 시료가 용융온도

측정장치 내에서 변화하는 높이와 두께의 비율에 따라 IDT(Initial Deformation Temperature), ST(Softening Temperature), HT(Hemispherical Temperature), FT(Fluid Temperature)의 4가지로 구분되어 결정된다. 여기서 IDT는 시료의 끝부분에 약간의 변형이 일어났을 때의 온도를 나타내고, ST는 시료의 높이(H)와 밀변길이(W)가 같아졌을 때(H=W)의 온도, HT는 시료의 높이가 밀변길이의 1/2이 되었을 때(H=1/2W)의 온도, FT는 시료가 용융되어 거의 평평하게 되었을 때(1/16inch 이하)의 온도를 나타내는데 각 온도에 있어서 실험오차는 ±20℃ 이내이다.

## 3.2. Drop tube furnace를 이용한 연소 실험

### 3.2.1 DTF실험 장치 및 방법

석탄의 연소특성 파악과 NO<sub>x</sub> 발생 현상 등을 알아보기 위하여 DTF(Drop Tube Furnace)를 이용한 기초실험을 수행하였다. 이 실험에서는 연소조건별 연소효율과 NO<sub>x</sub> 발생 현상을 고찰하였다.

DTF(Drop Tube Furnace)는 혼입류 반응기(entrained flow reactor)의 일종으로서 석탄의 열분해 및 연소실험에 보편적으로 사용되는 장치이다. DTF의 장점은 순간 가열율이 10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup>K/sec로서 보일러 내에서의 연소상태를 모사하기가 용이하다는 것이다. 또한 연소조건을 이상적으로 조절할 수 있어 연소성 규명을 위한 기본 data 확보가 용이하며 연소조건 설정 여하에 따라 체류시간을 약 100msec에서 4sec까지 조절 가능하며 반응시간에 따른 전환율 고찰이 용이하다는 장점을 가진다.<sup>(10)</sup>

DTF 연소실험 장치는 석탄 공급 장치(coal feeder), 가스 예열기(gas

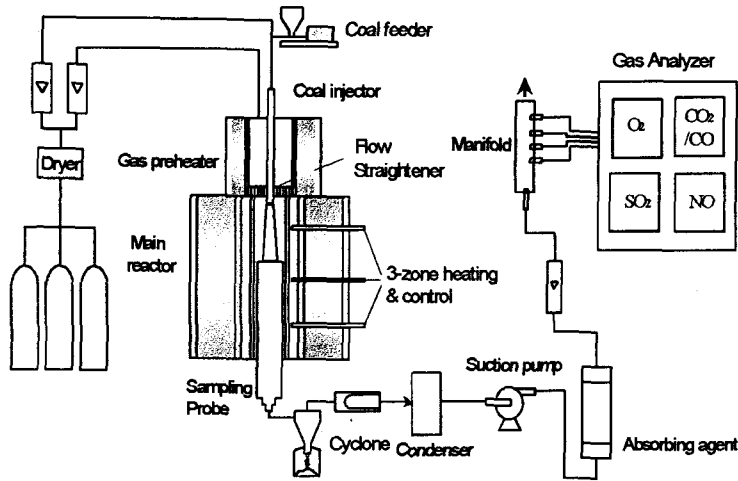


Fig. 1 Schematic diagram for Drop Tube Furnace

preheater), 주 연소로(main reactor), 입자 포집기(cyclone), 가스분석기로 구성되어 있다. Fig. 1은 DTF의 구성도를 나타낸다. DTF는 수직으로 설치된 전기로로서 석탄이 DTF에서 연소되는 과정은 먼저 coal feeder로 부터 공급된 석탄이 소량의 1차공기에 의하여 injector를 통과하여 주 연소로 내로 주입되고 연소에 필요한 공기는 2차공기로서 preheater에서 예열된 후 주 연소로로 유입되어 석탄과 혼합된다. 일정 체류 시간 동안 연소된 석탄입자와 생성 가스는 probe에 의하여 반응이 차단되고 유도되어 1차 입자 분리장치인 cyclone으로 유입되며 미세 입자는 2차 분리장치인 "U"-type 필터에서 분리된다. DTF 연소실험 결과의 해석은 포집된 char의 분석과 생성가스의 분석으로부터 얻어질 수 있다.

DTF를 이용한 연소특성 실험은 반응 온도 1100℃, 1300℃, 1500℃에서 수행되었으며 공기비는 0.6, 0.8, 1.0, 1.2로 설정하여 각 조건에 대하여 공기비 함수에 대한 석탄의 연소성을 비교하여 보았다.

석탄의 체류시간별 연소과정을 관찰하기 위하여 injector로부터 sampling probe 사이의 거리를 5, 10, 20, 30, 50cm로 각각 조절하여 각 지점에서 시료(생성가스, char)를 포집, 분석하였다.

DTF에서 사용된 시료는 입자크기에 의한 영향을 배제하기 위하여 체 분리를 통하여 200~400mesh사이의 시료를 취하여 사용하였다.

### 3.2.2 DTF에서의 체류시간 계산

DTF의 특징중의 하나는 flow straightener를 사용하여 반응기내에서의 유체흐름을 층류로 조성하여 석탄입자를 1차원 운동으로 유도한다는 것이다. 따라서 DTF내에서의 체류시간은 석탄입자가 층류흐름에 의하여 1차원 운동을 한다는 가정 하에 산출되었다.

1차원운동방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{du}{dt} = g \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} - \frac{C_D \omega^2 \rho A_p}{2m} \quad (9)$$

위 미분방정식을 Runge Kutta 4차 해법을 사용 석탄입자의 속도를 계산하였다.

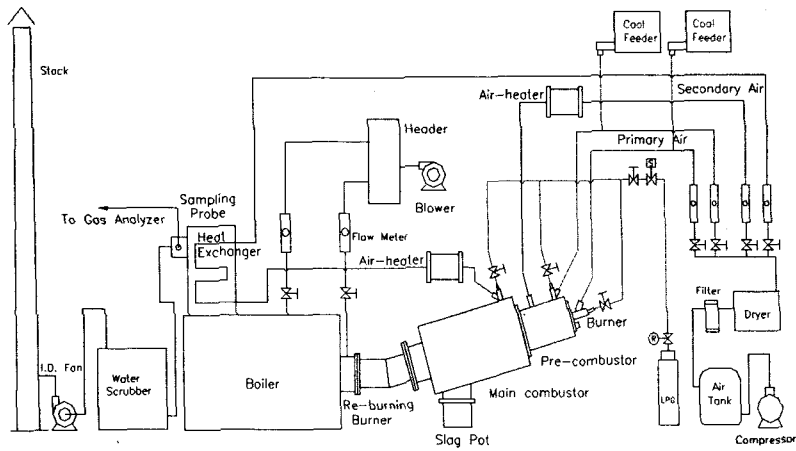


Fig. 2 Schematic diagram for the combustion test system

산출된 Alaska석탄입자의 체류시간은 연소온도 1500℃에서 가장 근접거리인 5cm인 경우 0.16sec, 최대 측정거리인 50cm에서는 1.390sec이었다.

### 3.3. 2단 cyclone 연소기를 이용한 연소시험

연소과정에서 분진과 NOx를 동시에 저감하기 위한 2단 연소시험은 연소기에서 이루어지는 1차 연소와 보일러에서 이루어지는 재 연소로 구분된다. 1차 연소를 위한 연소기는 독특한 구조의 2단 동축형 cyclone 연소기로서 pre-combustor와 main combustor의 두 부분으로 구성된다.

Pre-combustor에서의 연소는 저온의 회박연소를 이용하여 다량의 연소용 공기를 main combustor에 공급하기 위한 예열 연소이며 main combustor에서의 연소는 고온에서 저 공기비를 이용하여 환원성 분위기를 유지함으로써 질소산화물의 발생을 억제하는 동시에 slagging 연

소를 이용하여 회분을 용융시켜 제거하기 위한 연소과정이다.

재 연소는 연소기 후단에 설치된 보일러내에서 이루어지며 저 공기비의 1차 연소에서 발생하는 미연소가스와 미연탄소분의 완전 연소를 위해 필요하다. 재 연소 과정에서는 thermal NOx의 저감을 위해 저온 연소가 필요하다. 따라서 미분탄의 2단 연소시험은 1차 연소와 연소가스 재 연소과정을 수행하여 연소기와 보일러의 최적 연소조건을 설정하고 질소산화물의 최종적인 저감 효과와 연소 효율 그리고 slagging 연소를 이용한 회분 및 분진 제거 효과 등에 대하여 고찰하고자하였다.

#### 3.3.1 연소시험 장치

연소시험을 위하여 시간 당 약 30kg (1590 kg/m<sup>3</sup>h)까지의 미분탄을 연소시킬 수 있는 시험용 미분탄 연소기를 제작하였다. Fig. 2는 2단 동축 cyclone 연소기와 재연소보일러를 포함하는 시험용 저공해 미분탄 연소기의 구성도를 나타낸 것이다. 이 시험용 연소시스템에서 연

소기는 발생하는 용융 회분의 원활한 배출을 위하여 수평면에 대해  $15^\circ$  경사 형태로 설치하였다. 1차 고온연소는 2단 동축형 cyclone 연소기에서 이루어지며 발생된 연소가스는 재 연소를 위하여 보일러에 유입된다. 따라서 재 연소 보일러에서는 분진과 NOx와 같은 공해물질이 제거된 clean 가스를 이룬공기비 이상에서 완전히 재 연소시켜 연소효율을 높이고 열을 회수할 수 있도록 하였다.

### 3.3.1.1 2단 동축형 cyclone 연소기

1차 slagging 연소를 위한 연소기는 전체적으로 Fig. 3과 같은 동축형의 2단계 cyclone 연소기의 형태이며 내경 140mm, 길이 280mm의 내부 연소공간을 가지는 pre-combustor와 내경 210mm와 길이 420mm의 main combustor로서 구성하였으며 제작과 설치 그리고 연소기 내부의 보수 등이 용이하도록 pre-combustor에 설치되는 cover와 함께 3개 부분으로 분할 제작 후 조립되었다.

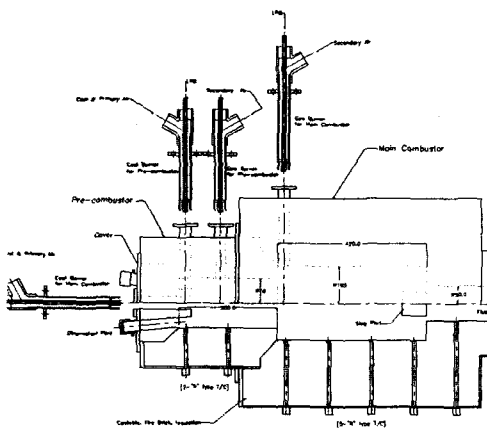


Fig. 3 Two stage cyclone combustor

연소기의 cover 중심부에는 내경 35mm의 버너 설치구가 있어서 이곳에 coal burner를 설치하여 미분탄을 1차공

기와 함께 main combustor 내로 분사시킬 수 있으며 그 옆에는 연소기 내부 관찰을 위하여 2개의 투시구를 두었다.

또한 pre-combustor의 측면에는 내경에 대하여 접선 방향으로 burner 설치구가 원점 대칭으로 2개소 마련되어 있어서 2개의 burner를 대칭으로 설치할 수 있고 그 후류 부분에도 동일한 구조의 burner 설치구가 마련되어 있어서 2차공기 공급을 위한 2개의 burner를 대칭으로 설치할 수 있도록 하였다.

Main combustor 역시 석탄 연소전 연소기의 예열과 석탄 연소시에 2차공기 공급을 위하여 2개의 burner가 원점 대칭으로 설치되었다.

연소기의 벽은 내부 단열과 밀폐를 위하여 안쪽으로 부터 50mm 두께의 고온용 high alumina castable, 60mm 두께의 내화벽돌, 50mm 두께의 고온용 단열재 그리고 5mm 두께의 stainless steel casing 순으로 구성하였다. 또한 연소기 내부의 온도 분포를 파악하기 위하여 연소기 내벽에는 축선 방향으로 110mm 거리마다 "R" type의 열전대를 7개소에 설치하였으며 그 끝 부분은 연소기 내측 벽면에 위치되도록 하였다.

연소기의 출구측 하부에는 70mm×70mm 규격의 slag port가 설치되도록 하였으며 slag pot에 떨어지는 slag는 물속으로 quenching 된후 하부의 valve를 이용하여 물과 함께 밖으로 배출되도록 하였다.

연소기 출구에는 단열된 duct를 통하여 연소가스가 배출되며 이곳에서 배기가스에 대한 1차적인 sampling이 이루어질 수 있고 duct를 통과한 배기가스는 재 연소 버너를 이용하여 보일러 내에서 재 연소 및 열 방출이 이루어진 후 scrubber를 통과한 뒤 I.D. fan에 의해



stack을 통하여 대기 중으로 방출된다. 따라서 2단 연소 이후의 저 공해 연소 성능과 연소효율을 측정하기 위한 배기가스 분석은 재 연소 보일러 후류 측에서 이루어진다.

### 3.3.1.2 재연소 보일러

석탄의 단계별 연소시에 1차 연소기에 서 미연소된 가스성분과 미연탄소분의 연소를 위하여 2단 연소시스템을 제작하고 설치하였다. 보일러의 구조는 재연소를 위한 combustion section과 연소열의 방출을 위한 convective section으로 이루어지며 combustion section 전면에 재연소 버너가 설치되며 그 후류에는 3차 공기 공급을 위한 2개의 air port가 중심 축선에 교차하여 위치한다. Combustion section은 내경 700mm, 길이 2,100mm의 원통형 연소공간을 가지며 4개의 부분으로 분할하여 제작되었는데 내부로부터 두께 60mm의 고온용 castable, 112mm의 단열 벽돌, 70mm의 단열재, 8mm의 stainless steel casing의 순으로 구성하였다. Convective section은 combustion section 후단부에 수직 상방으로 설치되며 내부는 400×400의 정방형 단면과 1,200mm 길이가 되도록 제작하였다. 또한 보일러에는 내부 관찰을 위한 투시구

가 15개소, 로 내측면과 중심부의 연소 가스 온도 측정을 위하여 "R" type 열전대가 17개소에 설치되어 있다.

### 3.3.2 연소시험 방법

Alaska탄의 2단 연소시험은 미분탄 공급량 및 이때의 공기비에 대한 조건을 Table 1과 같이 하여 수행되었다. 이때 2단 연소에 의한 완전한 연소진행과 NOx 저감을 위하여 재 연소 버너에서 최종 공기비를 1.15로 유지하였다.

연소시험에서 2차공기의 온도는 300℃로 유지시켰다. 또한 Alaska탄의 발열량을 감안하여 석탄의 공급량을 결정하였다.

연소시험을 위하여 LPG를 이용하여 연소기와 재연소 보일러를 충분히 가열시켜 main combustor 내부의 평균 온도가 1,000℃, pre-combustor 는 약 800℃ 이상으로 예열된 이후에 미분탄을 공급하였다. 이후 LPG 공급량을 점차적으로 감소시켜 미분탄 만으로 안정된 연소가 이루어질 때 연소시험을 수행하였다. 연소시험 중 연소로 내의 안정된 유동장 형성을 유도하기 위하여 연소용 공기 공급량을 고정하고 미분탄 공급량에 변화를 주어 공기비를 조절하였다.

Table 1 Test conditions for Alaska coal

Test No.	Coal feed rate (kg/hr)	Pre-combustor Air feed rate	Main combustor Air feed rate	Total air ratio
	Pre/Main	(m <sup>3</sup> /min)/Air ratio	(m <sup>3</sup> /min)/Air ratio	
1	5.0/15.0	0.8/1.8	1.23/1.13	>1.15
2	5.0/17.5	0.8/1.8	1.23/1.0	>1.15
3	5.0/20.0	0.8/1.8	1.23/0.9	1.15
4	5.0/22.5	0.8/1.8	1.23/0.82	1.15
5	5.0/25.0	0.8/1.8	1.23/0.75	1.15

### 3.4. 연소효율의 산출

연소기의 성능을 평가하는데 중요한 요소인 연소효율은 연소 생성가스 분석 결과와 포집된 화의 회분 함량에 의하여 산출된다.

#### 3.4.1 연소 생성가스 분석법

생성가스로부터 연소효율을 계산하는 방법은 석탄 중에 가연성분의 산화로 생성된 기상 생성물의 몰 농도를 이론적으로 산출하고, 완전 산화의 가정 하에 이 산화탄소의 부피농도를 계산하여 이 때의 농도를 전환율 1, 즉 100% 전환된 상태로 규정하는 것이다. 그러나 공기비 (Air ratio : AR) 1 이상인 경우에는 모든 가연성분의 산화에 요구된 충분한 산소가 공급되어 문제가 발생하지 않으나 공기비 1이하에서는 부족한 산소로 인하여 가연성분이 선택적으로 산화되어 전환율 1인 상태의 탄산가스의 농도를 이론적으로 구한다는 것은 불가능하다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 C, H, N, S의 반응성에 근거하여 부족한 산소상태에서 산화반응에 필요한 산소가 H>C>N>S의 순으로 산화에 사용된다고 가정하여 탄산가스의 농도를 산출하였다. 공기비 1이하인 경우에 불완전연소로 인하여 생성된 일산화탄소 또한 탄소의 전환으로 규정하였다. 본 연구에서 수행된 최저 공기비 0.6의 조건에서 공급된 산소는 석탄중의 수소 성분과 탄소성분의 산화에는 충분한 양이었다. 전환율 계산식을 다음에 기술하였다.

$$E_g = \frac{\text{측정 탄산가스 농도}}{\text{이론적 탄산가스 농도}(CO + CO_2)} \quad (10)$$

#### 3.4.2 회분 추적법(Ash tracer method)

연소효율을 계산하는 또 다른 방법은 생성 화의 회분 함량을 근거로 산출하는 것이다. 이러한 방법을 회분 추적법(Ash Trace Method)이라 한다. 회분 추적법에서는 석탄회분의 중량은 연소 중 불변한다는 가정에서 출발한다. 회분 추적법에 의한 연소효율(전환율) 계산식은 다음과 같다.

$$E_a = \left[ 1 - \frac{A_o \times (100 - A')}{A' \times (100 - A_o)} \right] \quad (11)$$

A<sub>o</sub> : 건조 석탄의 회분 함량(%)

A' : 건조 화의 회분 함량(%)

회분 추적법의 단점은 가정과는 달리 연소중 구성 성분의 산화에 의하여 회분의 중량이 증가한다는 것이고 회분 함량이 적은 탄종에 적용하는 경우 오차범위가 크다는 것이다. 또한 본 연구와 같이 회분을 slag port에서 제거하는 slagging 연소방식에서는 석탄 입자의 분급이 일어나므로 회분 추적법에 의한 연소성능 평가는 의미가 없다고 볼 수도 있다.

## 4. 시험 결과 및 고찰

### 4.1 석탄 기본분석 및 용융온도 측정 결과

#### 4.1.1 원소, 공업 및 발열량분석

Table 2에는 Alaska탄의 원소분석 결과를 나타내었다. 분석 결과는 석탄에 함유된 수분과 회분의 함량을 제외시켜 산출된 결과이다. 표에는 Alaska 분석결

Table 2 Ultimate analysis of coals

Sample	Ultimate analysis(wt%, Dry Ash Free Basis)				
	C	H	N	S	O
Bituminous	75~85	5~6	1.5~2.0	0.5~0.8	5~10
Alaska	68.82	6.18	1.27	0.65	23.08

**Table 3** Proximate and Calorific value analysis of coals

Sample	Proximate analysis(wt%, Air Dry Basis)				Calorific value kcal/kg
	Volatile Matter	Moisture	Fixed Carbon	Ash	
Bituminous	30	3	53	13	6900
Alaska	49.39	10.05	31.49	8.18	6050

과와 함께 국내에 수입되는 유연탄의 조성분포를 함께 나타내었다. 탄소성분은 유연탄의 조성분포 보다 적은 68.82%이었으며 수소성분은 다소 높은 6.18%를 나타내었다. 유연탄과 비교하여 두드러진 차이를 보여주는 원소는 산소성분으로서 23.08%로 분석되었다. Alaska탄의 분석된 조성결과는 준역청탄의 조성 분포에 속함을 알 수 있다. 질소성분은 1.27%로서 비교적 낮은 것으로 나타났으나 연소시 완전히 NO<sub>x</sub>로 전환되었을 경우 2000ppm이상의 높은 NO<sub>x</sub> 배출농도를 보일 것이므로 NO<sub>x</sub> 저감을 위한 대책이 필요하다. 유황성분은 1% 미만으로서 환경규제에 적응하기 위하여 저 유황 석탄을 선별하여 수입한 결과로 판단된다.

Table 3은 대상 탄의 공업분석 결과 및 발열량 분석 결과를 나타낸 것이다. 공업분석 결과에서 수분의 함량이 비교적 높게 측정되었으며 휘발분의 함량이 49.39%로서 상대적으로 높게 측정된 반면 고정탄소의 함량은 31.49%로서 유연탄과 비교하여 적음을 알 수 있었다. NO<sub>x</sub> 환원 반응기구에서 활성탄화수소가 환원제로 작용하고, 활성탄화수소는 휘발분이 농후한 영역에서 생성되기 때문에 휘발분의 함량이 높은 Alaska탄의 경

우 저공해 연소기술의 적용시 상대적으로 NO<sub>x</sub> 저감효율이 클 것으로 판단되었다.

#### 4.1.2 석탄회분의 성분 및 용융온도

석탄회분의 분석결과를 Table 4에 나타내었다. Alaska 석탄회분의 주요 구성분은 산성산화물로 분류되는 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 그리고 염기성 산화물인 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 CaO임을 알 수 있다. 석탄회 구성분중 산성산화물이 갖는 평균 조성은 70~90%로서 Alaska 석탄회의 54.34%는 상대적으로 적은 함량이며 따라서 용융온도가 낮을 것으로 판단된다. 특히 염기성 산화물중 융점강하효과가 큰 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 CaO의 함량이 높아 용융온도가 더욱 낮아질 것으로 예측되었다.

석탄회 조성 분석결과로부터 석탄회의 용융성 예측에 사용되는 대표적인 지표인 Base/Acid ratio를 산출하면 0.62로 산출된다. 이 값은 용융온도가 가장 낮은 값을 갖는 동 비의 0.4~0.7의 범위에 속하여 Base/Acid ratio 지표의 비교에서도 용융온도가 낮을 것으로 분석되었다.

산화성 분위기와 환원성 분위기에서 측정된 용융온도 실측 결과를 Table 5에 나타내었다.

실험 결과 용융온도가 낮게 측정되어

**Table 4** Chemical compositions of coal ashes

Coal	Chemical Composition(wt%)						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Alaska	43.4	10.94	7.97	27.11	3.07	0.51	1.08

**Table 5** Fusion temperatures of coal ashes in oxidizing & reducing conditions.

Coal	Fusion Temp.	Oxidizing Condition				Reducing Condition			
		IDT	ST	HT	FT	IDT	ST	HT	FT
Alaska		1199	1222	1249	1283	1154	1197	1217	1243

석탄회의 조성으로부터 예측된 결과와 일치함을 알 수 있었다. 용융온도 측정 결과로부터 연소기에서 석탄회분을 용융 슬랙으로 제거하기 위해서는 연소기내의 온도가 1200℃ 이상으로 운전되어야함을 알 수 있다. 또한 환원성 분위기에서의 용융온도가 산화성분위기에서와 비교하여 약 30~40℃ 정도 낮게 측정되어 환원 성분위기로 운전되는 주 연소로의 조건에서는 석탄회분의 용융이 촉진될 것으로 사료된다.

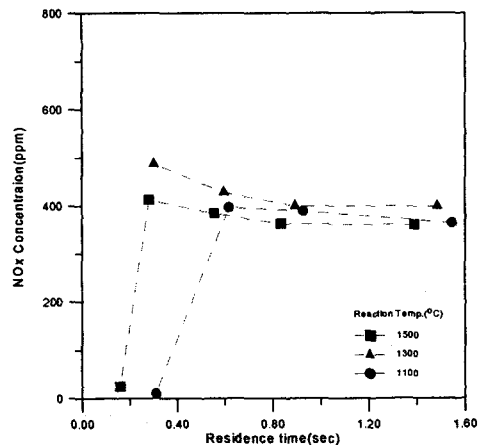
#### 4.2 DTF 연소실험 결과

DTF를 이용한 연소실험에서는 연소온도와 공기비 각각의 변화에 따른 연소실험이 수행되었다.

##### 4.2.1 NO<sub>x</sub> 생성시 연소온도의 영향

Fig. 4는 연소온도 변화에 따른 생성 NO<sub>x</sub>의 농도를 반응거리별로 도시하여 나타낸 것이다. 앞서 기술한 바와 같이 측정된 NO<sub>x</sub>농도는 thermal NO<sub>x</sub>, prompt NO<sub>x</sub>, fuel NO<sub>x</sub> 각각의 생성 결과로 볼 수 있다. 이중 prompt NO<sub>x</sub>의 생성정도를 규명한다는 것은 본 연구에서 사용된 DTF실험 장치에서는 어려움이 있고 전체 NO<sub>x</sub> 생성물중 prompt NO<sub>x</sub>가 갖는 비중이 적기 때문에 고려의 대상에서 제외하였다. thermal NO<sub>x</sub>는 미분탄을 공급하지 않고 반응공기만을 공급한 예비 실험에서 약 45ppm 정도로

검출되었다. Fig. 4는 공기비 1.2일 때의 NO<sub>x</sub> 농도 측정결과로서 체류시간 약 1.5sec에서 최종 측정된 NO<sub>x</sub> 농도는 약 400ppm 내외로 검출되었다. 1100℃의 결과에서 연소초기 NO<sub>x</sub>의 생성이 지연되고 있음을 알 수 있는데 이는 상대적으로 낮은 연소온도에서 연소의 진행이 지연되었기 때문이다. 본 실험에서 측정된 NO<sub>x</sub>를 fuel NO<sub>x</sub>로 가정하면 연소가 이루어지는 온도영역에서는 fuel NO<sub>x</sub>의 생성에 있어 연소온도의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.



**Fig. 4** NO<sub>x</sub> concentration with reaction temperature

반응거리에 따른 NO<sub>x</sub> 농도의 변화를 보면 연소초기의 NO<sub>x</sub> 농도가 최종 측정된 NO<sub>x</sub> 농도 보다 높게 나타나고 있다.

이는 연소초기에는 NO<sub>x</sub> 생성에 요구되는 산소가 상대적으로 풍부하게 존재해 있었기 때문으로 사료된다. 이 결과로부터 NO<sub>x</sub>의 저감을 위해서는 fuel NO<sub>x</sub> 중 char-N 보다는 volatile-N의 산화를 제어하여야 함을 알 수 있었다.

#### 4.2.2 NO<sub>x</sub> 생성시 공기비의 영향

Fig. 5는 반응온도 1500°C의 연소실험에서 공기비 변화에 따른 NO<sub>x</sub>의 농도 변화를 나타낸 그림이다. 반응온도의 변화시의 결과와는 달리 공기비 별 연소 실험 결과에서는 공기비와 반응거리의 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 생성농도의 변화가 큼을 보여주고 있다.

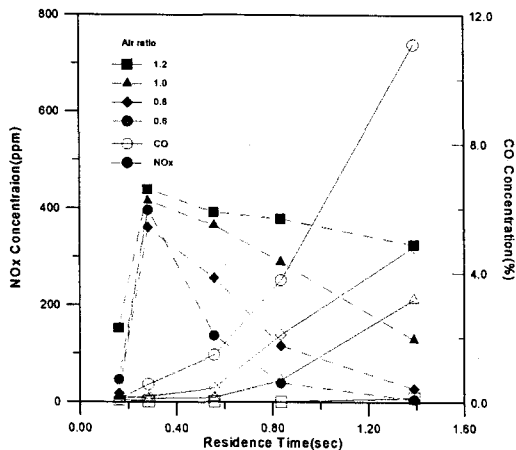


Fig. 5 Comparison of NO<sub>x</sub> and CO concentration with Air ratio

반응온도 변화실험의 결과에서 보여준 듯이 연소초기에는 공기비에 관계없이 높은 농도의 NO<sub>x</sub>가 생성됨을 확연하게 보여주고 있다. 연소초기 이후 반응거리의 증가에 따라 공기비가 낮아질수록 급격한 NO<sub>x</sub> 농도의 감소를 NO<sub>x</sub> 농도 변화 곡선으로부터 확인 할 수 있다.

그림에서 실선은 동일 조건에서 측정된 CO가스의 농도를 나타낸 것으로 CO 농도의 변화와 NO<sub>x</sub> 농도의 변화는 반비

례하고 있음을 보여준다. 따라서 반응거리 증가에 따라 보여주는 NO<sub>x</sub>의 환원율은 미연소된 최악의 부분산화반응과 이미 생성된 CO가스의 완전 산화반응에 요구되는 산소를 NO<sub>x</sub>로부터 취함에서 기인한다고 판단할 수 있다. 부분산화반응과 완전산화반응의 반응속도를 비교하여 보면 NO<sub>x</sub>의 환원된 결과는 상대적으로 반응속도가 빠른 부분산화반응에 의한 영향이 컸을 것으로 사료된다.

이상의 결과로부터 석탄 연소로에서 NO<sub>x</sub> 발생량의 감소는 공기비의 조절이 가장 효과적임을 알 수 있다. 그러나 저 공기비로 운전하는 경우 연소효율이 낮아지고 또한 반응온도와 비교 결과에서 밝혀진 바와 같이 대부분의 질소산화물은 연소초기에 발생하기 때문에 과잉 공기비와 저 공기비를 구분하여 제어할 수 있는 단계별 연소방식이 NO<sub>x</sub>제어에 가장 효과적임을 알 수 있었다.

#### 4.3 2단 cyclone 연소기를 이용한 연소 시험 결과

Alaska탄의 2단 연소시험에서 연소기와 보일러 내의 각 부위별 온도분포와 배기가스의 성분 변화 등을 측정할 수 있었다.

##### 4.3.1. 연소기 내의 온도 분포 및 석탄 회분의 용융

Fig. 6은 공기비 변화에 따른 연소기와 보일러 내부의 온도분포를 나타낸다.

그림에 표기된 공기비는 main combustor에서의 공기비를 나타낸 것이다. Pre-combustor에서의 온도분포는 700-1,000°C 정도로 낮으나 main combustor에서의 온도는 1,000-1,400°C 정도로서 전반적으로 높았으며 연소기의 출구에서도 1,300°C 이상의 높은 온도분포를 보였다. 그러나 재 연소 보일러에

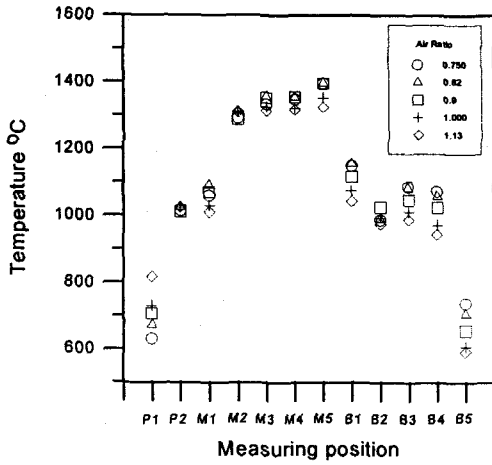


Fig. 6 Temperature profiles including boiler with air ratio variations

서는 1,100°C 이하로서 재 연소 온도가 상대적으로 낮게 측정되었다.

Fig. 7은 고온의 연소온도에서 석탄회분이 용융되어 흘러내리는 용융 슬래크를 촬영한 사진이다. Fig. 8은 용융슬래크가 slag pot에 떨어져 고형화된 상태를 보여주는 사진이다.

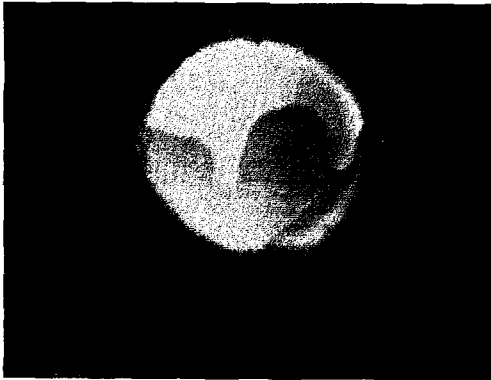


Fig. 7 Slag flow from combustor

용융온도 측정결과에서 Alaska 석탄회분의 유동온도(FT)는 산화성 및 환원성 분위기 각각에서 1250°C이하이었기 때문

에 slag pot가 설치되어 있는 main combustor부위에서의 연소로 내 온도 1300°C이상은 석탄회분이 용융되어 슬래크이 되는 충분한 온도이었다.

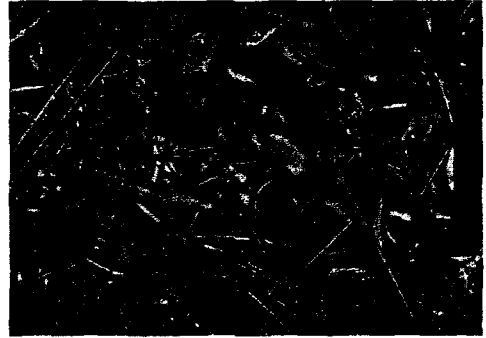


Fig. 8 Photograph of molten slag

#### 4.3.2 일산화탄소와 연소효율

Fig. 9는 2단 연소 후 배기가스 중의 일산화탄소를 측정된 결과이다.

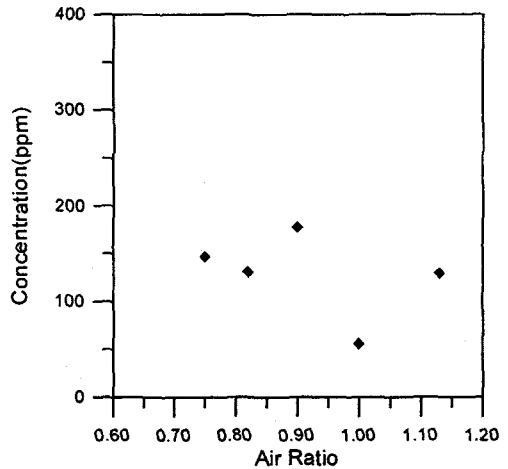


Fig. 9 CO concentration after reburning

Main combustor에서 낮은 공기비를 적용할 때 절대적인 산소량 부족으로 인하여 연소기에는 다량의 일산화탄소가

발생하게되나 보일러 내의 재 연소과정에서 추가의 공기가 공급됨에 따라 대부분의 일산화탄소가 완전 연소됨으로써 연소기 내의 공기비 0.75에서도 150ppm 이하까지 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 1차 연소에서 저공기비에서 발생된 일산화탄소는 2단 연소시 재 연소 보일러 내에서 2차 공기에 의해 쉽게 산화되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 재 연소 후 생성 가스 분석법에 의한 탄소전환률 산출 결과를 나타낸다. 공기비 1.0 미만에서는 대체로 95%이상의 연소효율을 보여주었다. 연소 시험에서 main combustor에서 공기비 1.0이상의 경우 재 연소 버너에서의 전체 공기비를 1.15로 맞추었을 때 버너가 과열되었기 때문에 공기를 추가로 공급시켜 공기비가 1.15 이상이 되었다. 따라서 생성 가스 분석법에 의해 산출된 공기비 1.0이상에서의 낮은 연소효율은 회석에 의한 탄산가스농도의 저하에 기인한 결과이다.

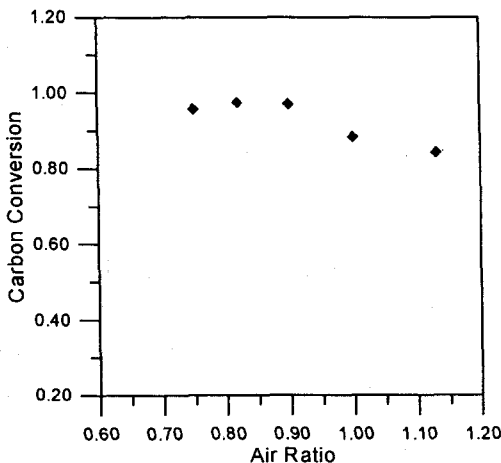


Fig. 10 Carbon conversion ratio after reburning

4.3.3 2단 연소에 의한 NOx의 저감

Fig. 11은 main combustor에서의 공

기비 변화에 따라 재 연소 이후에 측정된 NOx농도 결과를 보여준다. DTF 연소실험 결과 공기비 1.2일 때 Alaska 탄의 NOx 발생량은 약 400ppm이었다. 2단 연소시험에서도 main combustor의 공기비가 1.0 이상에서는 NOx 농도가 약 450ppm으로 높게 측정되었다. 그러나 재 연소 공기량을 증가시키고 연소기에서의 공기량을 낮춘 공기비 0.75에서는 NOx 발생량을 250ppm 까지 감소시킬 수 있었다. 즉 연소기에서 저공기비를 유지하여 NOx를 환원시켜 저감할 수 있으며 이후 재 연소과정에서 저온 연소를 이용하여 연소효율을 높일 뿐만 아니라 최종적인 NOx 저감이 가능함을 보여준다.

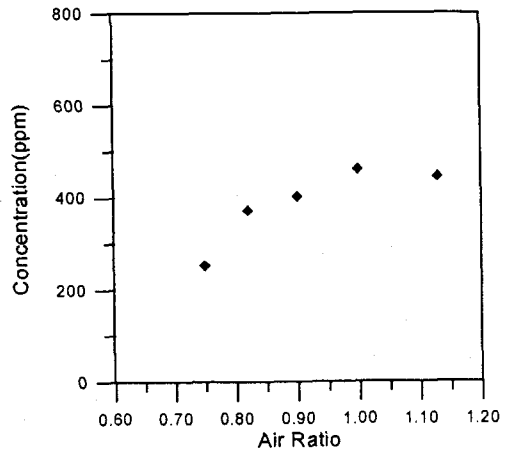


Fig. 11 NOx concentration after reburning

Main combustor의 공기비 0.75(재연소 공기비 : 1.15)에서의 NOx 발생량 저감 결과는 main combustor에서 낮은 공기비로 운전하여 fuel NOx의 생성을 효과적으로 제어할 수 있으며 이때 생성된 CO 가스를 1200℃ 이하의 재연소 보일러에서 연소시킴으로써 thermal NOx의 생성을 억제하여 얻어진 복합적인 결과로

사료된다.

## 5. 결론

연소과정에서 분진과 NOx를 동시에 저감하기 위한 기초실험과 2단 동축형 cyclone 연소기와 재 연소시스템을 이용하여 연소시험을 수행하고 해석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2단 cyclone 연소기를 이용하여 0.75의 저 공기비를 유지하며 고온에서 1차 연소를 함으로써 효과적으로 NOx 발생을 저감하였다. 따라서 고온의 slagging 연소에서도 NOx 저감이 가능함을 확인할 수 있었다.

2. 미분탄 연소시스템에서 일반적으로 회분의 용융온도가 낮은 석탄은 보일러 내에서 slagging 현상이 증가하므로 탄종 선택과 사용에 제한이 따른다. 그러나 2단 cyclone 연소기를 이용하여 slagging 연소를 함으로써 회분을 용융상태로 분리할 수 있으므로 저 회용점 석탄을 보다 효과적으로 연소할 수 있음을 확인하였다.

3. Alaska탄의 2단 연소시험 결과 저 공기비에서 고온 slagging 연소를 한 후 재연소 온도를 1,200℃ 미만으로 유지함으로써 배기가스 중 3% 산소의 저 과잉 공기 상태에서 NOx 발생을 250ppm 까지 저감할 수 있었으며 동시에 일산화탄소 발생도 150ppm 이하로 감소하였다.

4. 소형의 slagging 연소기에서는 일시적인 연소 불안정 상태에서 연소기내 부분적인 온도 저하에 의해 벽면에 다량의

slag가 응고되므로 연소가스의 유동에 장애를 유발하여 원활한 연소 진행이 곤란한 문제가 발생할 수 있었다. 이러한 문제는 시험 연소기의 scale up과 실제 규모의 연소기에서는 어느정도 해소될 수 있을 것으로 판단되나 slag 배출구의 구조 개선과 가열 방법 등 근본적인 대책이 필요하다고 판단된다.

## 후기

이 논문은 1997년 에너지자원기술개발지원센터의 지원에 의해 청정 에너지 기술개발사업으로 수행된 연구의 일부입니다.

## 참고문헌

- (1) The Babcock & Wilcox Company, "Steam/Its Power Generation and Use, Chapter 15, Fuel ash Effects on Boiler Design and Operation", 1978.
- (2) J. C. Stansel and D. J. Frey, "NOx and SOx Reduction in TRW's Entrained Coal Combustor", U. S. TRW, 1987.
- (3) L. A. Ruth and S. S. Kim, "Advanced Coal Fired Power Generation: The Combustion 2,000 Program", 10th Korea-U.S.A. Joint Workshop on Coal Utilization Technology, 1994.
- (4) Zel'dovich, Y. B., Acta Phys.-Chim. URSS, 1946, 21, 577.
- (5) Fenimore, C. P. and Jones, G. W., J. Phys. Chem., 1957, 61, 654.
- (6) Fenimore, C. P., 13th Symposium



- on combustion, The Combustion Institute, p. 373, 1971.
- (7) Glarborg, P., Kee, R. J. and Miller, J. A., Combust. Flame, 1986, 65, 177.
- (8) Miller, J. A. and Bowman, C. T., Prog. Energ. Combust., 1989, 15, 287.
- (9) P. Nicholls and W. A. Selvig, "Clinker Formation as Related to the Fusibility of Coal Ash", U. S. Bureau of mines Bulletin 364, U. S. Bureau of mines, 1932.
- (10) Tsai, C. Y. and Scarnoi, A. W., 20th Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1455-1462, 1985.
- (11) 최상일, "석탄의 슬래깅 연소와 2단 연소에 의한 분진과 NOx 저감에 관한 연구", 고려대학교 기계공학과, 박사학위 논문, 1998.
- (12) 최상일, "2단 연소기술에 의한 저공해 미분탄 연소기 개발" 한국에너지기술연구소, 청정에너지기술개발사업 최종보고서, 1997.