

1MW_{th} 실험연소로를 이용한 석탄의 연소특성 연구

장길홍*, 장인갑*, 정석용*

(1999년 4월 27일 접수)

Study on Coal Combustion Characteristics with 1MW_{th} Test Facility

Gil Hong Jang, In Gab Chang and Seok Yong Jeong

Key Words : Pulverized Coal Combustion(미분탄 연소), Test Facility(실험연소로), Coal Feeding System (석탄공급장치), Flue Gas Treatment System(배기가스처리시스템), NOx Emissions(질소산화물 배출), Air Staged Combustion(공기다단연소), Primary Zone Air Ratio(1차영역공기비)

Abstract

Design and operation of 1MW_{th} pulverized coal combustion testing facility are described. Also the influence of air staging on NOx emission and burnout of coal flames was investigated in this facility. The test facility consisted of coal feeding system, firing system and flue gas treatment system. A top-fired externally air staging burner was adopted in order to avoid influence of gravity on the coal particles and for easy maintenance. Distribution of temperature and chemical species concentration of coal flames could be measured in vertical pass of furnace. Main fuel was pulverized (83.4% less than 80 μm) Australian high bituminous coal. From variety of test conditions, overall excess air ratio was selected at 1.2(20% excess air). The study showed that increasing the staged air resulted in lower NOx emission, and it was suggested to be more than 40% of the total combustion air for the substantial NOx reduction. Sufficient burnout was not achievable when NOx emission was less than 500ppm. Also, the amount of core air did not influence the NOx reduction.

기호설명

- λ : 전체공기비(overall air ratio)
- λ_p : 1차영역 공기비(primary zone air ratio)
- T_x : 연소율(burnout)
- A_0 : 연소전의 회분량
- A_1 : 연소후의 회분량

1. 서론

최근 OECD 가입과 발전 시장의 개방으로 우리나라는 기술력을 갖추어 시장 경쟁에서 유리한 입지를 확보하기 위해 노력하고 있다. 특히 석탄연소분야에서는 발전소를 축소한 대규모 연소설비를

이용하여 석탄의 연소특성 연구와 함께 환경오염 방지를 위한 대기 오염저감연구가 수행되고 있으며, 이런 대규모 설비를 통하여 독자적인 보일러 설계능력을 확보하기 위한 기술력과 연구자료를 축적하고 있다. 석탄은 전 세계에 산재되어 있어 자국탄을 연소할 연소장치의 설계를 요구할 가능성이 높을 것으로 예상되므로, 외국탄의 연소특성 및 환경성능 자료화가 불가피하다.

한편, 국내에서는 환경의식이 날로 고조되어 대기 오염 물질의 배출규제가 크게 강화될 전망이다. 대형 발전설비에서의 질소산화물(NOx)은 연료가 석탄일 경우에 350ppm(6% O₂), 유류는 250ppm 이 규제치 였으나, 향후에는 석탄은 200ppm, 유류는 150ppm 으로 강화될 전망이다. 질소산화물은 황산화물과 달리 연소방법의 개선으로 제어가 가능하므로 국내외에서는 저 NOx 보일러를 개발하고 있으며 선진국에서는 이미 150~200ppm 까지 제어할 수 있는 기술을 보유하고 있다.

* 회원, 한국중공업(주) 기술연구원

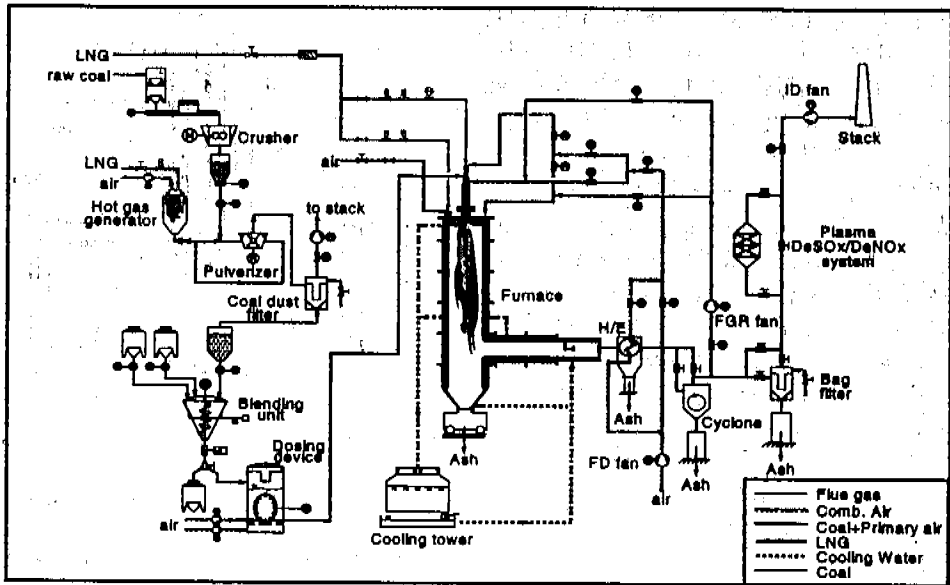


Fig. 1 1MW_{th} Coal Combustion Test Facility.

NO_x 저감 기술은 1970년대 후반부터 많은 연구들이 수행되어, 그 이론들이 확립되고 있는데, 1차 NO_x 환원기술은 석탄 연소시스템을 위해 개발되었으며, 대표적인 기술은 다음과 같다.⁽¹⁻⁵⁾

- ① 버너에서 공기 다단(air staging)
- ② 노내에서의 공기 다단(OFA)
- ③ 버너에서 연료 다단(fuel staging)
- ④ 연소실에서 연료 다단(reburning)
- ⑤ 배기가스 재순환(FGR)

①~④번까지 기술은 주로 연료과잉(fuel rich) 영역을 형성시키고, 이 영역은 휘발성 물질에 지배되므로, NO는 N₂로 환원되어 NO_x를 저감시킨다. 일반적으로 공기 다단기술을 적용한 상용플랜트에서는 약 400ppm (6% O₂), 다중 공기다단과 재연소 기술을 적용한 현대적 보일러에서는 200~250ppm (6% O₂)의 NO_x가 배출되는 것으로 알려져 있다.

상기의 방법으로 NO_x를 저감하는 기술을 개발하기 위해서는 각종 석탄의 성질과 연소 및 오염물질 배출 성능 특성을 정확하게 파악하기 위한 각종 분석장비(성분분석, 공업분석, 회분석 등), 석탄낙하-튜브로(DTFS) 및 석탄 실험연소로(0.5MW_{th} 이상 규모) 설비를 갖추어야 종합적으로 평가가 가능하다.

본 논문에서는 연소성능특성 연구를 통해 NO_x 저감기술을 규명하기 위하여 제작/설치된 1.0MW_{th} 석탄 실험연소로의 제원과 실험방법 등을 기술하고, 공기다단 연소실험을 통한 연소성능과 공해물

질 배출특성에 대한 결과를 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 구성

Fig. 1에는 1MW_{th} 석탄 실험연소로를 나타내었다.^(6,7) 석탄 저장조(coal container)의 연료탄은 이송 벨트(conveyer belt)를 통하여 1차 분쇄기(crusher, 500kg/h)로 보내게 되고, 이송 도중에 설치된 금속 탐지기에서 석탄 중에 금속물질의 존재여부를 검색하게 된다. 1차 분쇄기에서 연료탄은 1차적으로 거칠게 분쇄된 후, 석탄 병크를 거쳐 미분쇄기(impact mill, 300kg/h)로 이송되어 미분탄으로 분쇄된다. 이때 수분을 제거하여 미분탄의 용결과 이송관 내부 벽면에 부착을 방지하기 위해 미분쇄기 진입 전의 이송관과 미분쇄기 내부로 고온가스 발생기(hot gas generator)에서 형성된 고온공기를 분사한다. 이때 미분탄에서 분리된 수분은 필터(coal dust filter)를 통하여 대기로 방출된다. 수분이 제거된 미분탄은 다시 석탄 병크와 혼소기(blending unit)를 거쳐 석탄 정량공급장치(dosing device)로 이송되는데 여기서는 미분탄이 1차공기(총 연소공기의 15%)에 의해 정량적으로 버너로 공급된다.

연소용 공기는 압입송풍기(forced draft fan)에서 공급되어 공기 예열기를 거쳐 예열되고, 운전 형

식에 따라 중심공기(core air), 2차 및 3차공기로 배분되어 버너와 연소로 상부로 공급된다. 이때 공기배분은 1차공기량은 전체공기량의 10~30%를, 2차공기량은 30~100%, 3차공기량은 0~70%로 조정할 수 있도록 설계에 고려했다.

배기가스는 수직관(vertical pass)에서 연소에 의해 발생한 후 수평관(horizontal pass)을 통과하고, 공기 예열기에서 연소용 공기를 예열시킨다. 배기가스에 포함된 분진(fly ash)은 사이클론에서 1차 집진되고, 백필터에서 2차 집진되어 굴뚝을 통해 대기로 배출된다. 이때 운전압력은 -10mmAq이며, 실험시에는 +10mmAq의 압력으로 운전되는데 운전압력은 유인송풍기(induced draft fan) 전단의 뎀퍼개도로 조절된다.

연소로 본체는 수직관(연소로)과 수평관으로 구성되어 있는데, 수직관(연소로)은 상부의 하향 분사식 버너로 단일분사시켜 연소되는 연소실이다. 여기서는 주로 연소성능시험 및 화염의 구조를 관측할 수 있도록 장치가 구성되었다. 수평관은 수직관(연소실)에서 연소된 연소가스가 지나가는 일종의 열교환 장치로 대형 보일러의 수평 과열기/절탄기 부분에 해당한다. 수평관 입구는 열복사가 존재하지만 주로 대류열전달이 지배되는 영역으로 부식(corrosion)과 파울링(fouling) 실험을 수행하게 된다.

연소로(수직/수평관)는 증기를 생산하지 않는 이중관 구조로 설계하였으며, 내부에는 내화물(WSC-10CR)을 사용하고 이중관 내부로 냉각수가 흐르게 하여, 연소로에서 발생된 열을 흡수하도록 하고 냉각수는 냉각탑을 이용하여 열을 대기로 방출시키도록 하였다.

Fig. 2는 버너의 개략도를 나타낸 것이다. 중심에서 중심공기가 공급되고, 그 주위로 1차공기와 석탄이 분사되며 바깥으로 2차공기가 공급된다. 2차공기에는 선회(swirl)가 부여되는데 선회강도(swirl number)는 0~0.79이며, 선회기(swirl generator)는 가변블록형(movable block type)이 사용되었다.

설치된 버너의 형식은 중심, 1차, 2차공기 및 석탄은 켈(quarl) 내로 공급되고, 3차공기는 켈 외부에서 4개의 덕트를 통해 공급되는 EASB(externally air-staging burner)형식이다. 여기서 1차 영역 공기비(primary zone air ratio, λ_p)는 공급되는 석탄이 요구하는 이론 공기량(즉, 과잉공기비가 1.0 일때의 공기량)에 대한 켈 내에서 공급되는 연

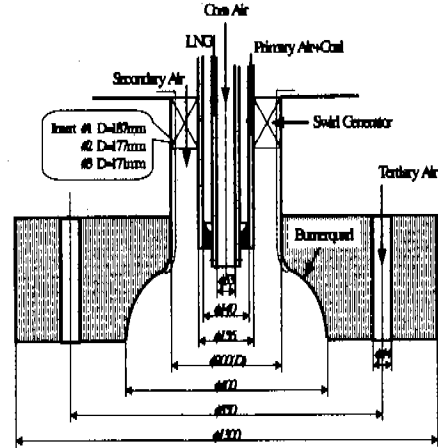


Fig. 2 EASB type burner.

소용 공기량의 비로 정의하고, 이것은 석탄이 1차적으로 연소되는 환원영역(reduction zone)의 공기비를 의미하며 식 (1)과 같이 계산한다.^(8,9)

$$\lambda_p = \frac{\text{air supply through quarl}}{\text{stoichiometric air requirement}} \quad (1)$$

2.2 기본 분석 및 측정

실험탄(Blair-athol) 및 회분(ash)의 성상을 파악하기 위해 공업 및 원소분석을 수행하였는데, 전자는 TGA-501 (LECO 사)로, 후자는 CHN-600 (LECO 사)과 SC-432(LECO 사)로 분석하였다. 또한 연소율(burnout, Tx)은 연소로의 수평관 입구에서 샘플링된 회분을 분석하여, 식 (2)와 같이 구하였다.^(8,9)

$$T_x = \frac{\text{weight loss of total combustibles}}{\text{total combustibles in the input coal}} = \left[\frac{1 - A_0/A_1}{1 - A_0} \right] \times 100 \quad (2)$$

여기서 A_0 는 연소전의 회분량(wt%)이고, A_1 은 연소후의 회분량(wt%)이다.

NOx는 유인송풍기 전단에서 측정하였으며, 화학발광식 분석기(chemiluminescence analyzer, Thermo Environment 사 Model 42)를 사용하였다. 연소로내의 온도 및 산소농도분포는 수냉식 프로브를 노내부에 직접 삽입하여 측정위치를 옮겨가며 측정하였고, 내화물 및 연소로 내외 온도는 R-type의 열전대로 측정하였으며, 동시에 흡입된 연소가스를 이용하여 산소농도를 동시에 측정하였다.

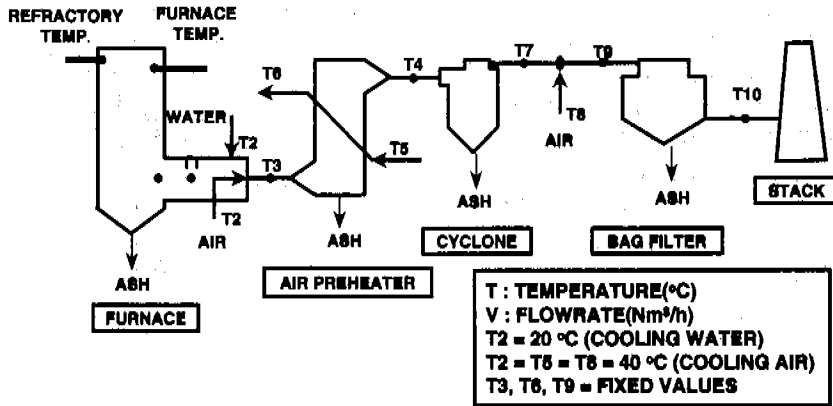


Fig. 3 Design of test facility and flue gas temperature.

Table 1 Operating Mode.

Item			Max. (I)	Normal (II)	Normal (III)	Normal (IV)	Min. (V)
Thermal capacity		MW _{th}	1.2	1.0	1.0	1.0	0.6
Cooling Zone Inlet	Inlet	V1 Nm ³ /h	1387	1156	1156	1156	693
		T1 °C	630	593	886	616	401
	Water spray	m	-	135.5	223.2	-	-
		V2 Nm ³ /h	-	168.7	277.9	-	-
Air Spray	V2 Nm ³ /h	491	-	-	366	140	
	T2 °C	40	-	-	40	40	
Cooling Zone Outlet		V3 Nm ³ /h	1844	1324	1433	1497	823
		T3 °C	500	350	500	500	350
Air Preheater	Flue gas Outlet	V4 Nm ³ /h	1844	1324	1433	1497	823
		T4 °C	273	280	257	263	153
	Air Inlet	V5 Nm ³ /h	1507	336	1168	1278	1135
		T5 °C	40	40	40	40	40
Air Outlet		T6 °C	350	-	350	350	200
Cyclone 塵子		T7 °C	273	280	257	263	153
Cooling air		V8 Nm ³ /h	1444	1149	961	1046	-
		T8 °C	40	40	40	40	-
Bag Filter	Inlet	V9 Nm ³ /h	3188	2395	2328	2471	823
		T9 °C	180	180	180	180	153
	Outlet	V10 Nm ³ /h	3188	2395	2328	2471	823
		T10 °C	180	180	180	180	153

2.3 실험연소로의 위치별 온도 분포

Fig. 3 에는 각 위치별 온도를 나타내었다. 수직관(연소실)에서 연소되면 상부 두 군데에서 측정된 내화물 온도와 연소로 내부 온도는 제어실로 전송되어 저장된다. 배기가스가 수평관으로 유입되는 온도는 약 1200°C이며, 각 운전모드에 따라 수평관 출구에서는 800°C 또는 500°C로 감온되어진다.

배기가스가 수평관의 냉각영역을 통과할 때 물

분사(운전모드 II, III) 또는 냉각 공기(운전모드 I, IV, V)에 의해 냉각되며, 냉각된 배기가스는 공기 예열기를 통과한다. 이때, 배기가스와 온도는 공기예열기 입구에서 안전상 반드시 500°C이하가 되도록 제어된다. 연소용 공기(20°C)는 공기예열기에서 350°C로 예열되어 중심공기, 2차 및, 3차공기로 사용된다. 배기가스는 사이클론(cyclone)과 백필터(bag filter)의 집진과정에서 각각 약 30°C 정도의 온도가 강해진다.

Fig. 3의 T1은 냉각탑에서 공급된 냉각수에 의해 수평관에서 냉각되며, T3은 냉각영역에서 물의 분사에 의해 냉각되거나 공기 주입에 의해 냉각된다. 여기서 물의 온도는 20℃로 가정하며 분사량은 온도에 따라 다르다. T3은 냉각영역에서 온도가 강하된 후의 공기 예열기 입구 온도이며, 시스템 안전을 위해 500℃(운전모드 I, III, IV)로 고정했다. 연소공기(20℃)는 공기 예열기를 거친 후, 350℃가 되도록 공기 예열기를 설계하였다. T7은 사이클론을 거친 뒤의 온도인데 여기서 백필터로 들어가기 전 20℃의 공기(T8)로 분사하여 유동가스 온도(T9)를 200℃(운전모드 II, III)로 낮추어 백필터를 보호한다. 사이클론과 백필터에서의 온도 손실은 각각 30℃이다.

T10은 백필터 출구온도이며 배출가스는 유인송풍기를 거쳐 굴뚝으로 나아간다. Table 1은 각각의 운전 모드에 대하여 유동가스의 온도와 유동가스량, 물분사량을 나타내었다.

한편, 운전모드 I, V는 시운전시에만 운전하며 평상시에는 운전모드 II, III, IV만 활용한다. 부식과 파울링 실험을 할 때는 공기를 예열하는 모드 III, IV 중에서 택일하는데, 공기로 냉각하는 4개의 시험류브는 각 20 kW의 배기가스와 냉각 효과를 지닌다. 이때는 수평관 입구온도 1200℃와 열교환기 입구온도 500℃만 제어한다. 본 연구에서는 운전모드 IV에 대해서만 다음의 실험들을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험탄의 특성

Table 2 Coal analysis.

Proximate Analysis (wt%)	Moisture	8.2
	Volatiles	28.3
	Fixed Carbon	55.4
Ultimate Analysis (wt%)	Ash	8.1
	C	71.0
	H	3.9
	N	1.9
	S	0.3
	O	14.1
	A	8.8
W	-	
Heating Value (kJ/kg)	HHV	27,414
	LHV	26,276

Table 2에는 실험에 사용된 호주산 Blair Athol 탄의 특성을 나타내었다. Fig. 4는 석탄공급 장치에서 공급되는 미분탄의 입자 크기 분포를 나타낸 것으로, 80 μm 이하의 크기를 가지는 입자가 83.4%를 차지하고 있다. 발전소에서는 역청탄의 경우 미분탄 입자는 75 μm이하가 75%가 되는 탄을 사용하고 있으므로, 본 연구에 사용된 것파 거의 유사하다.

3.2 승온곡선

Fig. 5는 실험연소로의 승온곡선으로, 가동 후 예열, 석탄연소 및 실험, 야간유지 등 약 53시간 동안의 운전사이클을 나타낸 것이다. 가동 후 약 14시간이 경과하면 석탄 자발화 온도가 넘게 되므로 석탄을 투입할 수 있으며, 실험을 위한 정상 상태까지 도달시간은 약 18시간 정도가 소요된다. 연소로 운전은 정상 운전 시에는 -10mmAq로 하고, 측정 시에는 상압보다 약간 높게 +10mmAq로 하는데, 이 압력은 유인송풍기에 의해 제어된다. 측정시 연소로 내의 O₂ 농도는 약 5%부근으로 운전된다.

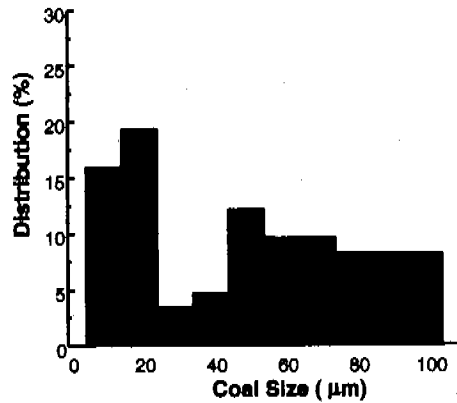


Fig. 4 Coal size distribution.

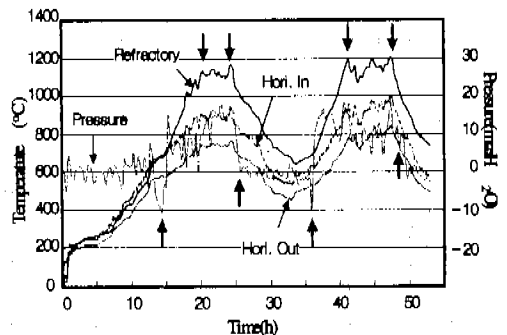


Fig. 5 Heat load-up curve.

3.3 NOx 배출 특성

Fig. 6은 과잉공기 변화와 선화에 따른 NOx 배출을 나타내었다. 중심공기와 3차공기는 공급하지 않고 단지 1차 및 2차공기만 공급되는 연소조건에서 전체 공기비(λ)를 조절하여 실험한 결과, NOx 배출은 $\lambda=1.1\sim 1.3$ 에 높게 나타났다. 따라서 이후 모든 실험은 $\lambda=1.2$ 로 고정하여 실험을 수행하였으며, 이때 석탄투입량은 118kg, 전체 공급공기량은 971Nm³이며, 선화는 부여하지 않았다.

Fig. 7에서는 실험조건별 NOx와 연소율의 변화를 나타내었다. 2차공기가 100%공급되는 조건 2를 기준으로 중심공기가 다단 공기로 공급되면 NOx가 저감되지만, 연소율도 감소한다(조건 1).

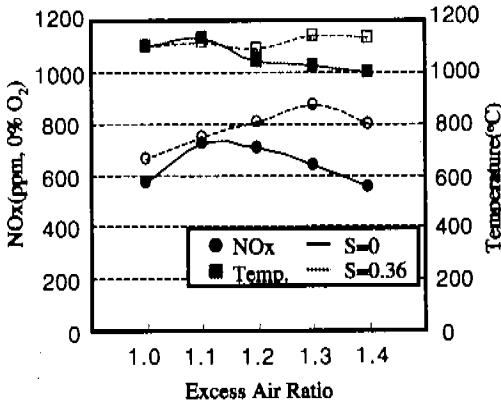
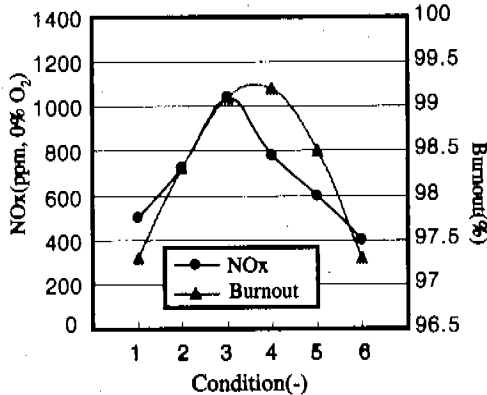


Fig. 6 Effect of excess air.(without staging and core air)



Condition	1	2	3	4	5	6
Core(%)	25	0	25	0	25	0
2nd(%)	75	100	50	60	25	40
3rd(%)	0	0	25	40	50	60

Fig. 7 Effect of experimental condition on NOx and burnout.

또한 3차공기를 다단공기로 공급하면, 다단공기량이 적을 경우에는 NOx와 연소율이 증가하였지만(조건 3,4), 다단공기량을 점점 증가시킬수록 NOx와 연소율이 감소하는 경향을 보였다(조건 5,6).

Fig. 8은 1차영역 공기비(primary zone air ratio, λ_p)의 변화에 따른 NOx 배출 특성을 나타낸 것으로, λ_p 가 0.6에서 0.9로 증가함에 따라 NOx 배출은 증가하였다. Fig. 9에서는 λ_p 의 변화와 연소율과의 관계를 나타내었는데, λ_p 가 증가하면 연소율은 전체적으로 약간 증가하는 경향을 보이지만 큰 변화는 없다.

이것은 1차영역으로 유입되는 공기량이 증가되므로 산화제와 석탄입자의 혼합을 촉진시킨다. 이러한 혼합 촉진은 석탄의 휘발분과 화(char) 입자가 격렬한 산화작용을 일으켜 NOx 발생을 증가시키지만, 전체 공기비가 일정하므로 연소율에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 사료된다.

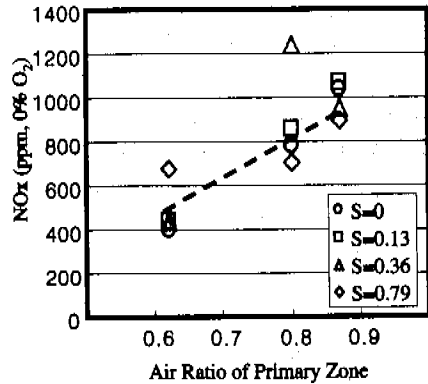


Fig. 8 Effect of primary zone air ratio(λ_p) on NOx Emission.

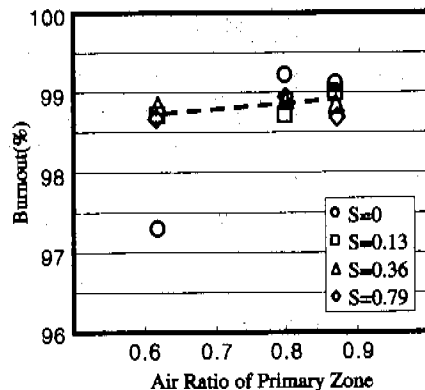


Fig. 9 Effect of primary zone air ratio(λ_p) on burnout.

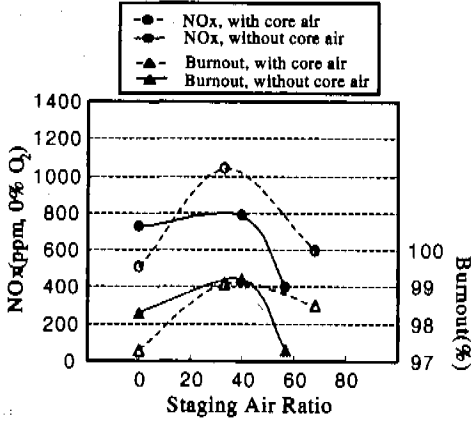


Fig. 10 Effect of primary staging air on NOx and Burnout. (S=0)

Fig. 10 은 중심공기가 NOx 배출과 연소율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 전반적으로 3차공기 즉, 다단공기의 비율이 40% 이상이 되면, NOx 가 감소하기 시작함을 알 수 있었다.

다단공기 비율이 0인 조건 즉, 다단연소를 하지 않는 경우를 제외한 나머지 조건에서는 중심공기가 공급되는 조건(점선)이 공급되지 않는 조건(실선)보다 NOx 를 많이 배출하고 있다. 중심공기가 공급되면, 연소율은 증가하지만, NOx 도 같이 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 따라서 중심공기의 투입은 NOx 의 저감에는 큰 효과가 없는 것으로 사료된다. 오히려 중심공기가 석탄 및 이송공기(1st air)와 함께 1차영역으로 유입되기 때문에 λ_p 를 증가시키게 되어 상대적으로 난류강도를 증가시키게 되므로 석탄과 공기의 혼합을 원활하게 하여 연소를 촉진시키게 된다. 이상과 같이 중심공기의 공급은 1차영역의 난류강도의 증가시켜 연소강도를 증대시키므로, 국소적인 고온영역의 발생에 따른 열적 NOx(Thermal NOx)의 발생을 증가시키게되는 것으로 사료된다.

Fig. 11 에서는 NOx 농도에 대한 연소율을 나타내었다. 그림에서 실선은 IFRF 의 EASB 형 버너를 사용하여 구해진 NOx 농도와 연소율간의 관계를 나타낸 것으로, 본 연구의 결과들을 IFRF 에서 실험한 결과(실선범위 내)와 비교하면, 거의 대부분이 실선내에 포함되고 있다. NOx 가 500ppm(0% O₂) 이상인 경우에는 연소율이 거의 일정한 값을 유지하지만, 500ppm 이하인 경우에는 NOx 를 감소시키면 연소율도 같이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 또한 전술한 결과들과 마찬가지로 중심공기를 가지는 조건들이 높은 NOx 배출을 보이고 있음을 알 수 있었다.

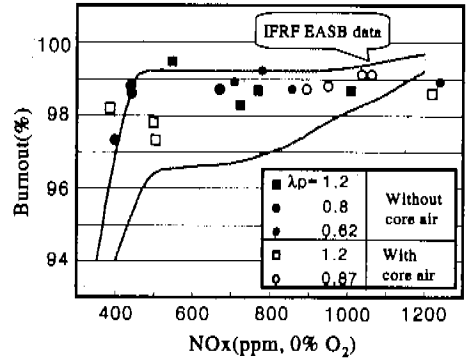


Fig. 11 Relationship between NOx and burnout.

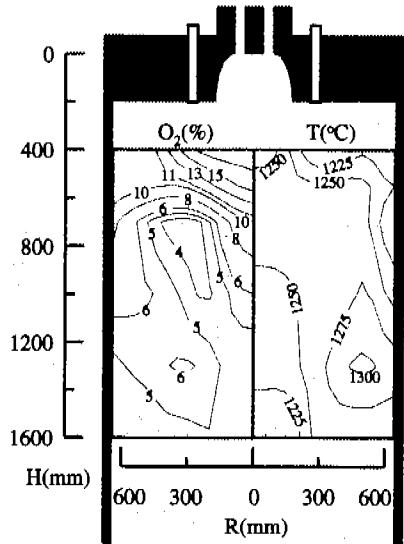


Fig. 12 Distribution of O₂ concentration and temperature. (100% 2nd air)

3.4 석탄화염의 구조

Fig. 12 는 Fig. 7 에서 2차공기만 100%공급되는 조건 2 에 대한 연소로 내부의 온도 및 산소 농도 분포이다. R=300mm, H=800mm 부근에서 산소농도가 낮게 나타나는 것은 연료 과농 또는 연소반응에 의한 것이므로 1차반응영역으로 추정할 수 있다. 최대 온도는 R=500mm, H=1300mm 에서 형성되는 것으로 보아 1차반응영역을 벗어난 영역에서 온도가 최대로 되는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 13 은 Fig. 7 의 2차공기 40%와 3차공기 60%인 조건 6 에 대한 연소로 내부의 온도 및 산소농도 분포이다. 산소농도는 3차공기가 공급되는 R=275mm 부근이 높게 분포하고 있으며, 온도는 낮게 나타난다. 또한 중심축(R=0mm)에서 H=800

mm 이하의 상류영역과 H=1200mm 이상의 하류영역 2군데에서 산소농도가 2% 이하인 분포를 나타내며, 역시 이 영역에서 최고온도 분포를 보이고 있다. 따라서 H=800mm 이하에 1차반응영역이 형성되고, 미 연소된 연소성분은 H=1200mm 이상에서 완전연소되는 것으로 보인다.

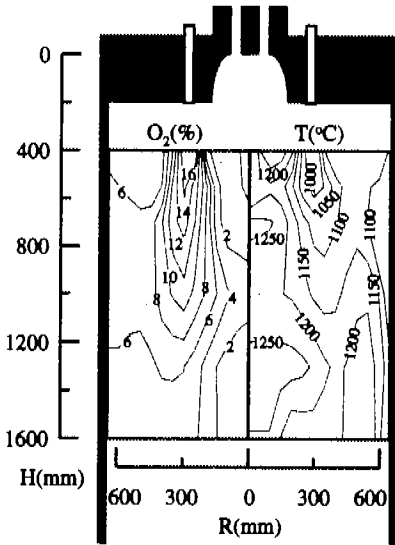
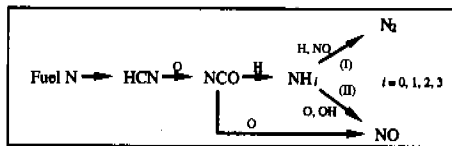
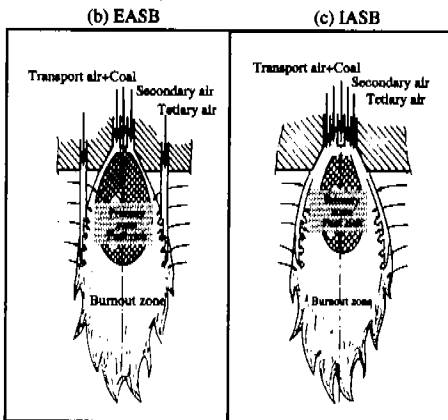


Fig. 13 Distribution of O₂ concentration and temperature. (40% 2nd and 60% 3rd)



(a) NO_x Formation



(b) EASB

(c) IASB

Fig. 14 Air staged combustion and NO_x formation.

NO_x의 생성을 제어하기 위한 여러 연구자들이 각종 모델을 연구한 결과에 의하면, ⁽¹⁰⁾ NO_x의 생성은 Fig. 14(a)와 같이 설명된다. 석탄에 포함된 연료-N은 화염속에서 HCN으로 급속하게 전환되고, O 및 H와 반응하여 상대적으로 천천히 NH₃(t=0, 1, 2, 3)로 전환된다. NH₃는 O 및 OH 라디칼과 반응하면, NO를 생성하지만 NO와 반응하면 N₂로 환원된다.

연료-N에 의해 생성된 HCN의 가스상 반응이 난류화산 석탄화염에서는 NO_x의 생성을 지배하므로, NO_x는 석탄의 휘발성 물질에 의해 생성되고, 탈휘발 과정 동안에 형성된 석탄가스분위기에 의해 제어되어 최소화 되는 것으로 사료된다. 또한 만약 석탄입자가 산소가 희박한 영역에서 탈휘발 된다면 휘발성 질소화합물(NH₃)이 Fig. 14(a)의 (I)반응과 같이 열분해에 의해 생성된 탄화수소계 중간생성물(H) 또는 NO와 반응하여 질소분자로 감소된다.

따라서 본 연구에 사용된 EASB(externally air-staging burner)형 버너는 Fig. 14(b)와 같이 버너 출구에 내부 재순환 영역(IRZ)이 형성되고, 이 재순환 영역 내부로 석탄입자가 유입되어 탈휘발 반응(devolatilization)에 따른 환원영역이 형성되므로 앞선 설명과 같이 NO_x가 저감된다. 한편, EASB 버너는 연료가 과농한 1차 반응영역을 형성시키므로 이 영역에서 미 연소된 화(char)가 잔존하게 되고, 이것은 화염의 외부 즉, 버너의 쉘 외부에서 공급되는 공기(3차공기)의 주입에 의해 완전연소된다. 이것은 Fig. 13에서 공기다단 조건외 온도 및 산소농도분포에서 잘 나타나고 있다.

중심공기의 공급이 NO_x의 저감에 기여를 하지 못하는 것은 중심공기가 석탄 이송용 공기(1st air)와 함께 1차영역으로 유입하여 1차영역공기비율을 증가시키게 되므로, Fig. 14(a)의 (II)반응과 같이 휘발성 질소화합물이 O 및 H와 반응하여 NO를 생성시키기 때문인 것으로 사료된다. 또한 중심공기의 공급은 1차영역에서 상대적으로 난류강도를 증가시키게 되므로 석탄과 공기의 혼합을 원활하게 하여 연소를 촉진시키게 되어, 국소적인 고온영역을 형성시켜 열적 NO_x의 발생 역시 증가된 것으로 사료된다.

다단공기(3차공기)가 공급되지 않고 중심공기가 공급되는 조건이 NO_x 배출이 감소한 것은 2차공기가 다단공기의 역할을 한 결과로 사료되며 이것은 Fig. 14(c)의 IASB(Internally air-staging burner)형식에 포함되고, Fig. 7에서 중심공기 25%, 2차공기 75%의 조건 1에 해당된다.

4. 결 론

1MW_{th} 실험연소소에서 호주산 Blair-Athol 탄으로 연소성능 및 공해배출 특성 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초기 가동 후 석탄투입까지는 약 14시간, 석탄투입후 정상상태 도달까지는 약 18시간이 소요되었다.

(2) 다단공기가 공급되는 경우에 중심공기의 공급은 연소율은 증가시켰지만, 1차영역의 λ_p 를 증대시켜 휘발성 질소산화물이 O 및 OH와 반응하여 NO를 생성하므로 NO_x 배출 저감에는 효과가 없었다.

(3) 다단공기가 공급되지 않는 경우에 중심공기의 공급은 2차공기가 다단공기로 되어 NO_x 배출을 저감시켰으나, 연소효율 증대면에서는 효과가 없었다.

(4) λ_p 가 낮을수록 즉, 1차 영역에서 연료가 과농할수록 NO_x가 저감되는 것은 환원영역이 형성되어 휘발성 질소산화물이 N₂로 전환되기 때문이다.

(5) 공기다단 연소에서는 NO_x 배출을 500ppm 이하로 감소시키게 되면 연소율도 감소하게 된다.

(6) 1MW_{th}의 실험연소로는 발전소의 실제 연소현상을 묘사할 수 있는 가장 경제적인 규모로써, 실험결과는 보일러 설계, 연소성능 예측 및 하자예방을 위한 자료로 활용된다.

참고문헌

- (1) Maier, H., Spliethoff, H., Kicherer, A., Fingerle, A. and Hein, K.R.G., 1994, "Effect of Coal Blending and Particle Size on NO_x Emission and Burnout," *Fuel*, Vol. 73 No. 9, pp. 1447~1452.
- (2) Schnell, U., Kaess, M. and Brodbek, H., 1993, "Experimental and Numerical Investigation of NO_x Formation and its Basic Interdependencies on Pulverized Coal Flame Characteristics," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 93, pp. 91~109.
- (3) Maier, H., Brodbek, H., Käß, M., Kicherer A. and Spiegelhalter, R., "Investigations in Staged Coal Combustion with Regard to Mixing Properties Carried out at a Semi-Industrial Test Facility," *2nd International Symposium on Coal Combustion*.
- (4) Milosavljevic, V. D., Taylor, A. M. K. P., and Whitelaw, J. H., 1990, "Stability of Pulverized Coal Burners," *Twenty-third Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 957~962.
- (5) Truelove, J.S. and Holcombe, D., 1990, "Measurement and Modeling of Flame Stability in a Pilot-Scale Combustor," *Twenty-third Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 963~971.
- (6) 장길홍, 장인갑, 백민수, 정석용, 김태희, 1998, "Pilot 규모 석탄 실험연소로의 설계 및 운전," 대한기계학회 98년도 춘계학술대회는문집(B), pp. 795~800.
- (7) 장길홍, 장인갑, 백민수, 정석용, 김태희, 1998, "1MW_{th} 실험연소로의 초기운전 및 연소특성," 대한기계학회 98년도 추계학술대회는문집(B), pp. 294~298.
- (8) Weber, R., Smart, J. P and Phelan, W. J., 1987, "NO_x Reduction with Coal Firing by Application of both Internal Air-Staging and Fuel Rich Precombustors," *IFRF Doc. No. F037/a/16*.
- (9) Weber, R. and Smart, J.P., 1987, "NO_x Reduction and Burnout Optimisation Using Aerodynamic Air Staging and Air Staged Precombustor," *IFRF Doc. No. F037/a/16*.
- (10) Kolb, T., Janson, P. and Leuckel, W., 1988, "Reduction of NO_x Emission in Turbulent Combustion by Fuel-Staging / Effects of Mixing and Stoichiometry in the Reduction zone," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The combustion Institute, pp. 1193~1203.