

# HANJUNG 석탄 실험연소로의 초기운전 (The First Operation of Coal Combustion Test Facility in HANJUNG)

장길홍\*, 장인갑, 정석용, 천무환, 김종석(한국중공업 기술연구원)  
G.H.Jang, I.G.Chang, S.Y.Jeong, M.H.Chon, J.S.Kim(HANJUNG, R&D Center)

**Key Words** : Coal Combustion Test Facility(석탄실험연소로), Coal Feeding System(석탄공급장치), Flue Gas Treatment System(연소가스처리장치), NOx emissions(질소산화물 배출), burnout(연소율), Swirl number(선회강도), Primary zone air ratio(1차영역 공기비)

**ABSTRACT** : In this paper we show design and operation of 1MWth pulverized coal combustion test facility. The test facility is consists of coal feeding system, furnace and flue gas treatment system. The furnace is equipped with a top-fired burner in order to avoid influence of gravity on the coal particles. There are two part of vertical(VP) and horizontal pass(HP) at furnace. We can measure temperature and species of coal flames in vertical pass. Also, there is horizontally arranged section where investigation regarding corrosion and deposit formation will be carried out. The burner of combustor was externally air staging burner(EASB) type made by IFRF. The pulverized high bituminous(Blair athol) coal from Australia was used as fuel, and the particle size less than 80  $\mu\text{m}$  was 83.4%. Overall excess air ratio was 1.2.

## 1. 서론

최근 우리 나라의 OECD가입과 발전 시장의 개방으로 국내 시장 보호 및 세계시장의 진출을 위해서는 이러한 실험연소로의 설비를 갖추고 각종 탄의 연소특성 뿐만 아니라 심각하게 대두되고 있는 환경오염의 방지를 위한 오염저감연구 및 독자적인 보일러 설계능력 확보를 위한 자료확보가 절실히 요구되고 있다. 향후 발전소 설치시 석탄 보유국은 자국 석탄을 기준으로한 보일러 등의 설계를 요구할 것이 예상되므로 이에 대비한 각종 연소특성 및 대기 환경성능 실험은 필수적이며 외국 탄의 자료화가 불가피하다.

국내의 발전분야에서도 공해 물질 배출 규제가 크게 강화되고 있다. 특히 99년 1월부터 시행되는 환경규제치의 경우 유연탄을 사용하는 화력발전소에서 배출되는 황산화물(SOx)은 현재 거의 규제가 이루어 지지 않고 있는 상황에서, 500MW미만의 설비는 150ppm(6% O<sub>2</sub>), 500MW이상의 설비는 270ppm(6% O<sub>2</sub>), 신규 발전시설의 경우 120ppm(6% O<sub>2</sub>)으로 크게 강화된다. 또한 질소 산화물(NOx)의 경우 350ppm(6% O<sub>2</sub>)이하로 규제된다. 이 중, 황산화물은 저 유황의 연료를 사용하는 방법, 연소전 황성분을 제거하는 방법, 후처리에 의한 방법 등이 있으나, 질소산화물의 경우 연소방법의 개선에 의해서만 제어가 가능하다. 그러나 현재 우리나라의 경우, SOx 및 NOx저감 기술의 대부분은 외국의 기

술에 의존하고 있는 실정이다.

이상과 같이, 배출가스의 규제를 만족시키는 새로운 Firing System의 개발을 위해서는 HANJUNG 실험연소로와 같은 Pilot Plant급에서 측정, 분석된 석탄연소 및 Emission 특성 Data의 확보가 시급하다. 아울러 실 보일러의 연소시 발생할 수 있는 전반적인 문제점을 도출하고, 이의 해결 방안들을 수립해야 한다. 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 국내 산업의 보호 측면에서, 공해물질 저감 및 효율향상을 통한 효과적인 연료의 사용을 위해서 HANJUNG의 1.0MWth 석탄 실험연소로에서는 석탄의 연소성능 실험과 공해물질 배출특성을 연구하고 있다. 본 논문에서는 HANJUNG 실험연소로의 초기 운전데이터와 공기다단연소시 NOx 배출과 연소율 측정에 대한 결과를 고찰하였다. 버너공기다단을 위해서 IFRF에서 제작된 EASB (externally air-staging burner) Type 버너를 사용하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 석탄 공급장치

Fig.1에서는 1MW<sub>th</sub> 용량의 HANJUNG의 석탄 실험연소로를 나타내었다. 석탄저장고(Coal Container)의 원료탄은 콘베이어 벨트(Convayer Belt)로 이송되며 이송도중에 금속 탐지기에서 금속물질을 제거한 후 1차 분쇄기로 이송된다. 원료탄은 1차 분

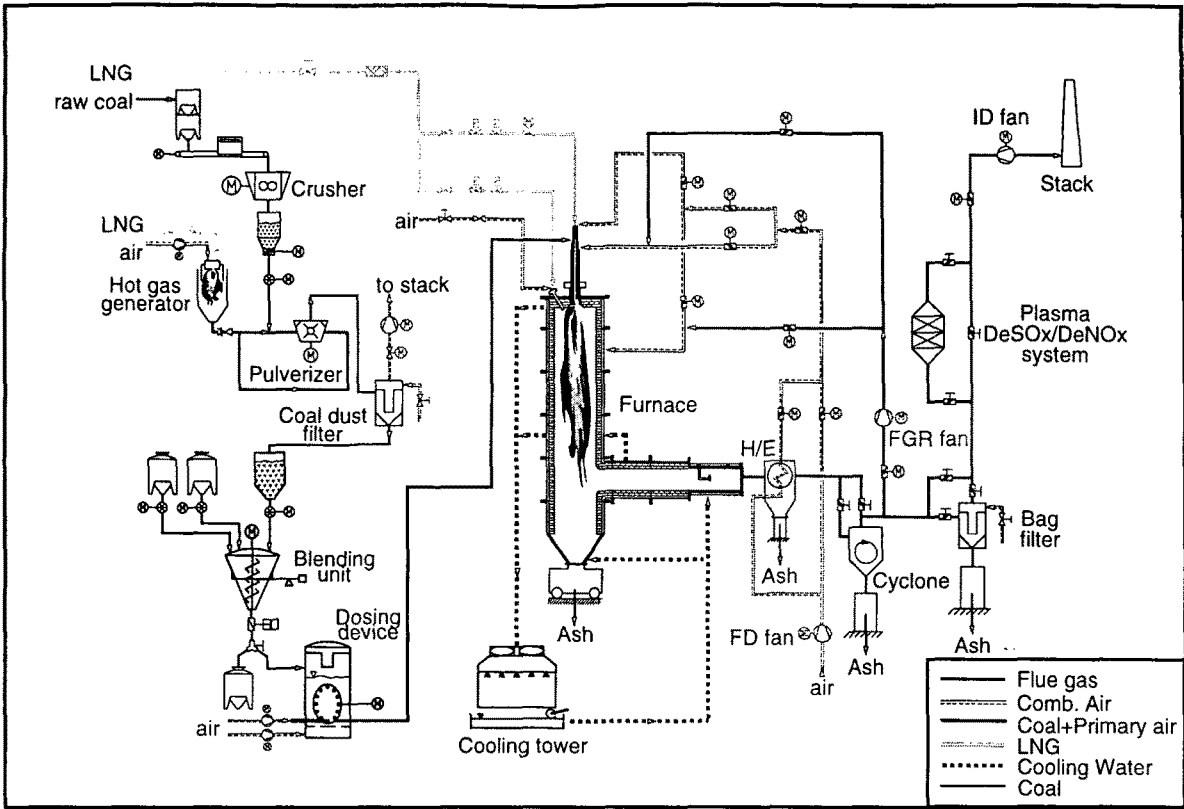


Fig. 1 1MW<sub>th</sub> Coal Combustion Test Facility in HANJUNG

쇄기(500kg/h)에 이르러 석탄을 1차적으로 거칠게 분쇄되며, 석탄 병크를 거쳐 미분기(Impact Mill, 300kg/h)로 이송되어 석탄을 미분탄으로 만든다. 이때 수분을 제거하여 미분탄의 응결을 방지하기 위해 미분기 진입 전의 이송관과 미분기에 고온 가스 발생기(Hot Gas Generator)에 의해 형성된 고온 공기를 분사하며, 여기서 발생된 수분은 필터를 통하여 굴뚝으로 빠져나간다. 수분이 제거된 미분탄은 다시 석탄 병크를 통해 혼소기(Blending Unit)로 이송되며, 일정량이 Dosing 장치를 통해 버너로 보내지게 된다. 이때 석탄은 1차공기(15%)로서 이송된다.

## 2.2. 연소공기 공급 및 배기가스 처리 장치

연소용 공기는 FD(Forced draft)팬에서 공급되고 공기에열기 통과 후, 예열되어 중심공기, 2차 공기 및 3차 공기로 나누어져 버너로 공급된다. 이때 각 공기공급은 1차 공기량은 전체 공기량의 10~30%를, 2차 공기량은 30~100%, 3차 공기량은 0~70%로 조절할 수 있게 설계했다.

배기가스는 수직관(Vertical pass ; 이하 VP)에서 연소되어 수평관(Horizontal pass ; 이하 HP)을 통과한 후, 열교환기를 거쳐 사이클론에서 1차 집진이 되고, 백필터에서 2차 집진이 된 후 굴뚝을 통해

배출된다.

## 2.3. 연소로 본체 및 버너

연소로 본체는 VP와 HP로 구성되어 있다. VP는 버너로 이송된 석탄이 상부에 설치된 하향 분사식 버너에서 단일 분사되어 연소되는 곳으로 주로 연소성능시험 및 화염의 구조를 관측할 수 있게 구성되었다. HP는 VP에서 연소된 연소가스가 지나가는 통로로서, HP의 입구를 제외하고는 복사에 의한 열전달은 거의 없으며, 주로 대류열전달이 지배되는 영역으로 부식, 슬래깅 및 파울링 실험을 목적으로 구성하였다.

연소로는 증기를 생산하지 않으므로 내부에는 내화물(WSC-10CR)을 사용하였으며, 그 주위로 냉각수를 흐르게 하여, 이 냉각수가 연소로에서 발생된 열을 흡수하게 되고, 그외 나머지 열은 배기가스로 배출된다.

Fig. 2는 버너의 개략도를 나타낸 것이다. 중심에서 Core 공기가 공급되고, 그 주위로 1차 공기와 석탄이 분사되며 바깥으로 2차 공기가 공급된다. 2차 공기에는 선회각이 부여되는데 선회각도(Swirl number)는 0~0.79 이며, 선회기(Swirl Generator)는 가변블록형(Movable block type)이 사용되었다.

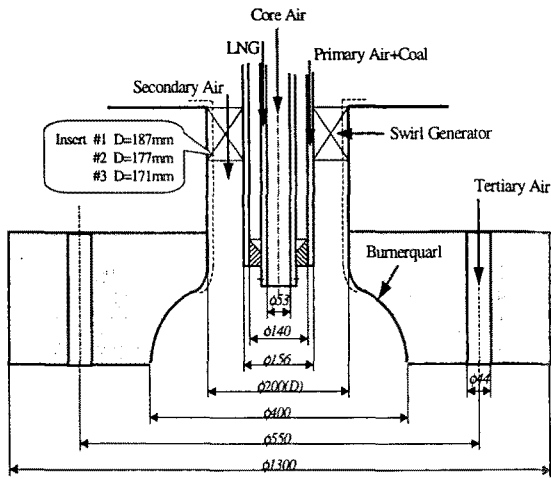


Fig. 2 EASB type burner

설치된 버너의 형식은 Core, 1차, 2차 공기 및 석탄은 quarl 내에서 공급되고, 3차 공기는 quarl 외부에서 4개의 덕트를 통해 공급되는 EASB(Externally air-staging burner)형식이다. 여기서 1차영역 공기비(Primary zone air ratio,  $\lambda_p$ )는 공급되는 석탄이 요구하는 이론 공기량(즉, 과잉공기비가 1.0일때의 공기량) 대한 quarl 내에서 공급되는 연소용 공기량의 비로 정의하고, 이것은 석탄이 1차적으로 연소되는 환원영역(Reduction zone)의 공기비를 의미하며 다음식으로 계산한다.

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

#### 2.4. 실험방법

실험탄 및 회분(ash)의 공업분석은 TGA-501(LECO사)로 분석하였고, 원소분석 중 C,H,N성분은 CHN-600(LECO사), S성분은 SC-432(LECO사)로 분석하였다. 이때 분석된 회분의 성분을 통해 연소율(burnout,  $T_x$ )은 다음과 같이 구했다.

$$T_x = \frac{\text{weight loss of total combustibles}}{\text{total combustibles in the input coal}} \quad (2)$$

$$= \left[ \frac{1 - A_0/A_1}{1 - A_0} \right] \times 100$$

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

$\text{NO}_x$ 측정은 화학발광식 분석기(chemiluminescence

analyzer, Thermo Environment사 Model 42)를 사용하였다. 내화물의 온도와 연소로 내의 온도측정에는 R-type의 열전대를 사용하였다.

#### 3. 실험연소로의 운전모드(mode)

Fig. 3은 각 위치별 온도를 나타낸 것이다. VP에서 연소되면 상부 2군데에서 온도가 측정되고 그 값은 제어실에 기록된다. 유동가스가 HP로 입되는 온도는 약 1200℃이며, 각 운전모드에 따라 HP 출구에서는 800℃/500℃로 온도가 낮아지게 된다. 각 모드 중 일부는 배기가스가 냉각영역을 지나면서 물분사 또는 냉각용 공기에 의해 냉각되며, 냉각된 배기가스는 공기에열기를 통과한다. 이때, 배기가스의 온도는 공기에열기 입구에서 안전상 반드시 500℃가 되도록 냉각영역에서 냉각되어야 한다. 연소공기(20℃)는 공기에열기에서 가열시켜 350℃의 예열 공기가 되어 Core Air, 2차 공기, 3차 공기로 사용된다. 배기가스는 사이클론(Cyclone)과 백필터(Bag Filter)에서 집진되는 과정에서 각각 약 30℃ 정도의 온도 강하가 발생된다.

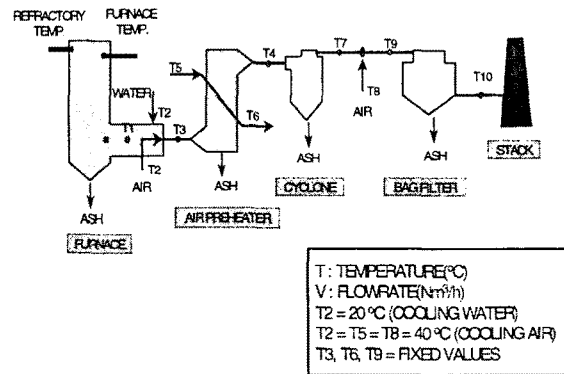


Fig. 3 Flue gas temperature

$T_1$ 은 수평관에서 냉각탑의 냉각수를 독립적으로 펌프 운전되는 냉각수에 의해 냉각되며,  $T_3$ 은 냉각영역에서 물의 분사에 의해 냉각되며 공기 주입도 가능하게 되어 있다. 여기서 물의 온도는 20℃이며 분사량은 모드에 따라 다르며 Table3에 나타내었다.  $T_3$ 은 냉각 영역에서 냉각된 후 공기 예열기 입구 온도이며 안전을 위해 500℃(모드 I, III, IV)로 고정했다. 연소공기(20℃)가 공기 예열기를 거친 후는 350℃가 되도록 공기 예열기를 설계하였다.  $T_7$ 은 사이클론을 거친 뒤의 온도인데 여기서 백필터로 들어가기 전 20℃의 공기( $T_8$ )로 분사하여 유동가스 온도( $T_9$ )를 200℃(모드 II, III)로 낮추어 백필터를 보호한다. 사이클론과 백필터에서의 온도 손실은 각각 30℃이다.

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

Table 1 Operation Mode(°C)

	Max. I	Normal II	Normal III	Normal IV	Min. V
T1	630	593	886	616	401
T3	500	350	500	500	350
T4	273	280	257	263	153
T6	350	-	350	350	200
T7	273	280	257	263	153
T9	180	180	180	180	153
T10	180	180	180	180	153

모드 I, V는 시운전시에만 운전하며 평상시에는 모드 II, III, IV만 활용한다. 부식과 Slagging 시험을 할 때는 공기를 예열하는 모드 III, IV 중에서 택일하는데 공기로 냉각하는 4개의 시험튜브(Test Tube)는 각 20 kW의 유동가스의 냉각 효과를 지닌다. 여기서는 수평관 입구온도 1200 °C와 열교환기 입구온도 500 °C만 제어한다.

#### 4. 분석 및 실험결과

##### 4.1. 실험탄의 특성

Table 2,3에는 실험에 사용된 호주산 Blair Athol 탄의 공업분석 및 원소분석 결과를 나타내었다.

Table 2 Proximate Analysis of Blair Athol Coal (wt %)

Moisture	Volatile	Fixed Carbon	Ash
8.2	28.3	55.4	8.1
Dry Base	30.8	60.4	8.8

Table 3 Ultimate Analysis of Blair Athol Coal (wt %)

C	H	N	S	O	Ash
71.41	3.90	1.89	0.29	13.71	8.8

Fig. 4는 석탄공급 장치에서 공급되는 미분탄의 입자 크기 분포를 나타낸 것으로, 80 $\mu$ m 이하의 크기를 가지는 입자가 83.4%를 나타내고 있다.

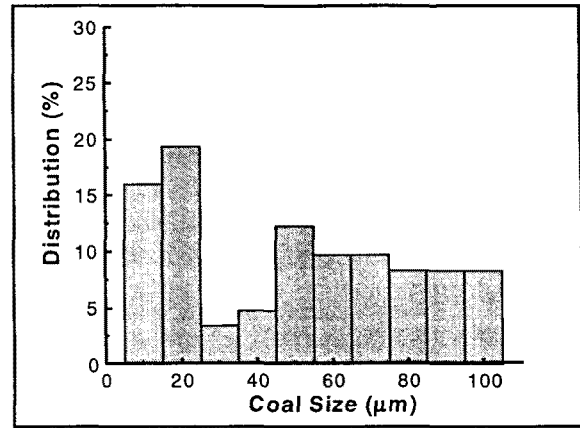


Fig. 4 Coal size distribution

##### 4.2. 승온곡선

Fig.5는 실험연소로의 승온곡선으로, start-up 후 예열, 석탄연소 및 주 실험, 야간유지 등 약 53시간 동안의 운전cycle을 나타낸 것이다. Start-up후 약 14시간이 경과하면 석탄을 투입할 수 있으며, 실험을 위한 정상상태까지 도달시간은 약 18시간 정도가 소요된다. 연소로 운전은 정상 운전 시에는 -10mmAq로 하고, 측정 시에는 상압보다 약간 높게 +10mmAq로 하는데, 이 압력은 ID(Induced draft) 팬에 의해 제어된다. 측정시 연소로 내의 O<sub>2</sub>농도는 5%이하가 되어야 하는데 대개 5%부근으로 운전된다.

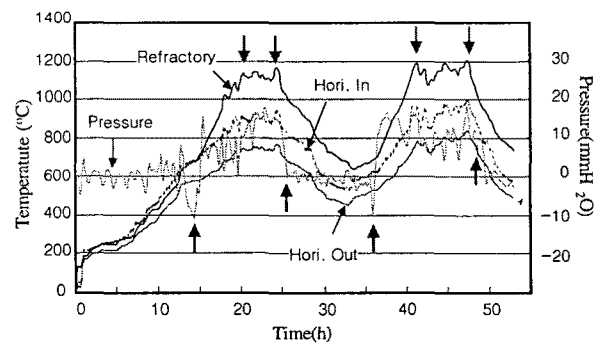


Fig. 5 Heat load-up curve

##### 4.3. NOx 배출 특성

Fig. 6은 과잉공기 변화와 선회에 따른 NOx 배출을 나타내었다. Core와 3차 공기는 공급하지 않고 단지 석탄 이송공기인 1차 공기와 2차 공기만 공급되는 연소조건에서 전체 공기비( $\lambda$ )를 조절하여 실험한 결과, NOx 배출은  $\lambda=1.1-1.3$ 에 높게 나타났

다. 따라서 본 연구에서는  $\lambda=1.2$ 로 하여 실험을 수행하였다.

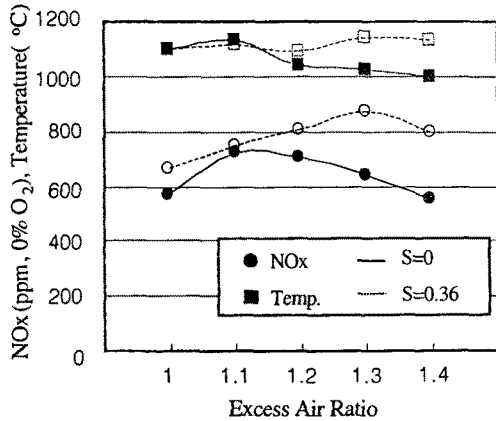


Fig. 6 Effect of excess air(without staging and coreair)

Fig. 7은 운전모드별 NOx와 연소율의 변화를 나타낸 것이다. 2차공기가 100%공급되는 조건에 core 공기가 다단공기로 공급되면 NOx가 저감되지만, 연소율 역시 감소한다. 또한 3차 공기를 다단공기로 공급하면, 다단공기량이 적을 경우에는 NOx와 연소율이 증가하였지만, 다단공기량을 점점 증가시킬수록 NOx와 연소율이 감소하는 경향을 보였다.

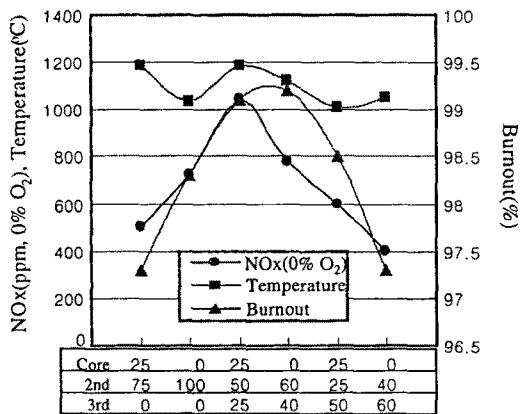


Fig 7 Effect of operating mode on NOx and burnout

Fig. 8은 1차영역 공기비(primary zone air ratio,  $\lambda_p$ )의 변화에 따른 NOx배출 특성을 나타낸 것이다.  $\lambda_p$ 가 0.6에서 0.9로 증가함에 따라 NOx 배출은 증가하였다. Fig. 9는  $\lambda_p$ 의 변화와 연소율과의 관계를 나타낸 것으로,  $\lambda_p$ 가 증가해도 연소율이 큰 변

화는 없으나, 전체적으로 조금 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 1차영역으로 유입되는 공기량이 증가되므로 난류강도가 증가되어 산화제와 석탄입자의 혼합을 촉진시키게 되고, 이러한 혼합 촉진은 석탄의 휘발분과 char 입자가 격렬한 산화작용을 일으켜 NOx 발생을 증가시키지만, 전체 공기비가 일정하므로 연소율에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 사료된다. 이상과 같이  $\lambda_p$ 가 낮을수록 즉, 1차영역에서 연료가 과농할수록 NOx는 저감되지만 연소율에는 큰 변화가 없었음을 알 수 있다.

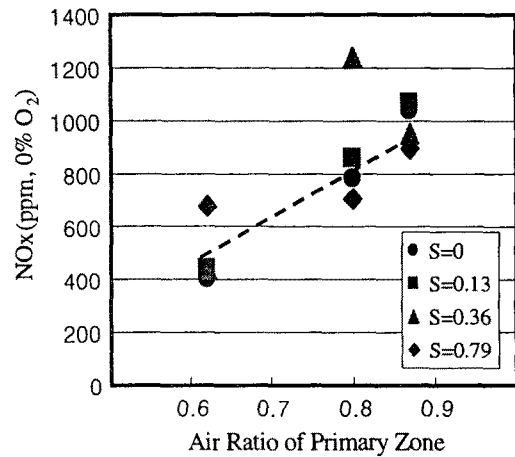


Fig. 8 Effect of primary zone air ratio( $\lambda_p$ ) on NOx emission

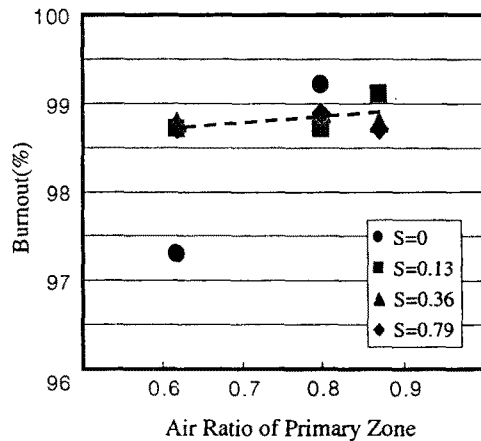


Fig. 9 Effect of primary zone air ratio( $\lambda_p$ ) on burnout

## 5. 결론

IMW<sub>in</sub> 실험연소로에 대해 초기 운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미분탄의 입자는 80 $\mu$ m가 83.4%이다.
2. 초기 start-up 후 석탄투입까지는 약 14시간, 석탄투입후 정상상태 도달까지는 약 18시간이 소요되었다.
3.  $\lambda_p$ 가 낮을수록 즉, 1차 영역에서 연료가 과농할수록 NOx는 저감되지만 연소율에는 큰 변화가 없었다.
4. 다단공기의 공급은 NOx 배출은 감소시키지만, 연소율 역시 감소시켰다.

### 참고문헌

(1) Netz, H., *Betriebstaschenbuch Wärme, Technischer Verlag, Resch KG, 1974*

(2) V. D. Milosavljevic, A.M.K.P. Taylor and J.H. Whitelaw, "Stability of Pulverized Coal Burners", *Twenty-third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, pp.957-962, 1990.

(3) J.S. Truelove and D. Holcombe, "Measurement and Modeling of Flame Stability in a Pilot-Scale Combustor", *Twenty-third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, pp.963-971, 1990.

(4) R.Weber, J.P.Smart and W.J.Phelan, "NOx Reduction with Coal Firing by Application of both Internal Air-Staging and Fuel Rich Precombustors", *IFRF Doc. No. F037/a/16, 1987.*

(5) R.Weber and J.P.Smart, "NOx Reduction and Burnout Optimisation Using Aerodynamic Air Staging and Air Staged Precombustor", *IFRF Doc. No. F037/a/16, 1987.*

(6) H.Maier, H.Brodbek, M.Käß, A.Kicherer, R. Spiegelhalter, "Investigations in Staged Coal Combustion with Regard to Mixing Properties Carried out at a Semi-Industrial Test Facility", *2<sup>nd</sup> International Symposium on Coal Combustion*

(7) H.Maier, H.Spliethoff, A.Kicherer, A.Fingerle and K.R.G.Hein, "Effect of Coal Blending and Particle Size on NOx Emission and Burnout", *Fuel, Vol. 73 No.9, pp.1447-1452, 1994*

(8) U.Schnell, M.Kaess, H.Brodbek, "Experimental and Numerical Investigation of NOx Formation and its Basic Interdependencies on Pulverized Coal Flame Characteristics", *Combust. Sci. and Tech., Vol. 93, pp 91-109, 1993*

(9) 장길홍, 장인갑, 백민수, 정석용, 김태희, "Pilot 규모 석탄 실험연소로의 설계 및 운전", *대한기계학회 98년도 춘계학술대회 논문집(B), pp.795-800, 1998*