

시험연소로를 이용한 인도네시아산 아역청탄 2종의 연소특성 평가

이현동·김성철·김종진·김태형·양승한·신영진·민창기

The evaluation of combustion characteristics for 2 kinds of Indonesian sub-bituminous coals by using combustion test facility at KEPRI

Hyun-dong Lee, Sung-chul Kim, Jong-jin Kim, Tae-heung Kim,
Seung-han Yang, Young-jin Shin, Chang-gi Min

key words : test furnace, sub-bituminous, slagging, fouling

Abstract

Combustion test on two kinds of Indonesian sub-bituminous coals of single and blended with bituminous coal imported for power generation was carried out by using the test furnace at KEPRI. The main items of combustion test were temperature profiles of the inside furnace, the yield of unburned carbon, environmental pollution emissions, slagging/fouling tendency, and the comparison of heat loss of furnace. The test results showed that low sulfur and ash content characterized by the Indonesian coals were advantageous to environmental aspect, but high tendency of heat loss and slagging/fouling were disadvantageous to boiler operation. From the results, the necessity of proper coal blending to compensate these weak points was recommended.

1. 서론

국내 전력생산을 위한 화력발전소의 설비용량은 총 발전설비용량 38,810MW의 약 26%에 이르는 10,700MW이며 향후 국내 전력소비량 증가에 따라 지속적으로 증가될 예정이다. 이에 따라 전량 수입에 의존하고 있는 발전용 유연탄의 양도 증가될 예정으로, 도입 시 석탄의 원가는 도입여부 결정에 주요 변수가 되고

있는 실정이다. 따라서 현재 석탄의 수입전략은 저가의 연료를 우선적으로 도입하는 방향으로 추진되고 있으며, 이에 따라 그 수입원이 매우 다양화하고 있는 실정으로, 발전용으로 수입되는 유연탄의 수입국은 호주, 중국 등을 포함 약 7개국 37종의 이르고 있는 실정이다.

이처럼 석탄 수입국의 다양화에 따라 세계 도처에서 다양한 품질의 석탄이 도

입되고 있어, 심지어 같은 품명의 석탄이라 할 지라도 그 성상이 다른 경우도 있는 실정이다. 그러나 이러한 석탄의 수입원 다양화는 발전용 보일러 설계조건과는 상이한 성상의 석탄을 연료로 사용해야 하는 결과를 낳아 연소 시 다양한 문제 발생의 소지를 다분히 내포하고 있는 실정이며, 실제 발전소 현장에서 석탄 연소시 발생하는 여러 가지 문제로 인해 설비의 안정적 운용에 어려움을 겪는 경우가 빈번하게 발생하고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 전력연구원에 설치된 시험연소로를 이용하여 대표적인 저가 도입 정책탄인 Adaro 및 Roto탄에 대한 연소특성 평가 과정 및 결과를 소개하고자 한다.

2. 설비개요 및 연소시험 조건

2.1 시험연소로 설비개요

시험연소로는 시간당 200kg(유연탄 기준)의 연소용량을 가진 유, 무연탄 등의 연소특성 평가를 위한 다목적 시험설비로서 전체적인 설비 구성은 Steam 생산 설비, 터빈 및 발전설비 부분을 제외한 거의 모든 부분이 실 발전소와 동일한 기능을 갖추고 있다(그림 1).

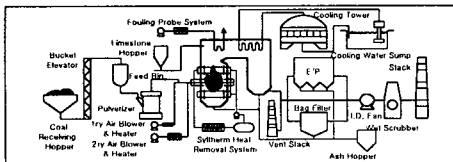


그림 1. 시험연소로 설비구성도

시험연소로 설비의 제어 시스템은 DCS (Distributed Control System)로 구성되어 있어 거의 대부분의 단위 기기별 운전 및 시험조건 변경이 중앙 제어실에서 가능하며, 시험 기간중의 기기별 운전 및 연소가스 분석자료 등은 1분 간격으로 저장되어 연소시험 전 과정에 대한 분석이 가능하다.

시험연소로에서는 실 발전소의 수냉벽을 모사하고 연소로 내부의 복사열을 추출하기 위한 설비로, Syltherm 이라는 Dimethyl-polysiloxane 성분의 합성 열매체유를 사용한 Panel을 노내 복사전열부에 6개 설치하고 있으며, 발전소 수냉벽과 유사한 온도조건을 유지하기 위해 열매체를 약 300℃에서 순환되도록 하고 있다. 또한 연소로 Nose부 이후에 수평 대류전열면에 13개, 수직 대류전열면에 9개 등 총 22개의 수냉식 열교환기를 설치하여 열을 추출하여 배가스 온도가 약 150℃를 유지하도록 했다. 이밖에 연소로 본체에 약 80여개의 Port가 있어 필요시 각종 연소측정이 가능토록 했으며, 연소로 내부의 화염상태를 관찰하기 위한 CCTV가 설치되어 있다.

연소로 후단의 설비로는 집진기 및 Bag Filter가 병렬식으로 설치되어 있어 필요에 따라 집진을 할 수 있고, 습식 Scrubber가 있어 배가스중 산성성분을 제거하도록 되어 있다. 이밖에 배가스 분석을 위한 가스 분석기가 설치되어 있다.

2.2. 연소시험 조건

석탄 공급량은 200kg/hr였으며, 연소시험의 기본적인 조건은 아래 표와 같다.

표 1. 연소시험조건

탄 종	Excess O ₂ (%)	미분도(200mesh 통과분)
Roto South	1.0, 2.0, 3.0	75%
	2.0	65%
Roto South+Total	1.0, 2.0, 3.0	75%
	2.0	65%
Adaro	1.0, 2.0, 3.0	75%
	2.0	65%
Adaro+Luscar	1.0, 2.0, 3.0	75%
	2.0	65%

2.3 연소시험 절차 및 방법

2.3.1 연소시험 절차

연소시험은 먼저 연소로 내부를 미분탄의 자발적 연소가 가능한 약 800℃ 이상으로 NG를 이용하여 예열한 후 기준점의 온도가 900℃에 이르면 NG와 미분탄을 함께 공급하여 약 30분간 연소한 후 NG버너를 소화하고 미분탄만으로 연소를 시키며 연소시험을 진행시킨다. 평균적인 연소시험은 NG버너 소화 후 약 6시간동안 진행된다.

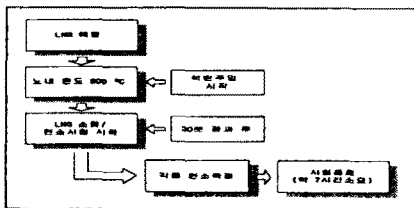


그림 2. 시험연소로 연소시험 절차

2.3.2 시험조건 설정

2.3.2.1 과잉공기

시험연소로 내 과잉공기비 조절은 미분탄을 시간당 200kg 연소시키며 연소가스

중 산소농도를 원하는 조건으로 일정하게 유지시키는 방법으로 시행한다. 일반적으로 실 발전소의 운전중 보일러 내 압력은 ID Fan에 의해 대기압 보다 약 -10mmH₂O 정도 유지되는 것이 보통이지만, 시험연소로의 경우 노내 압력을 대기압 보다 낮게 유지할 경우 외부로부터 연소실 및 연소로 후단 내부로 공기가 소량 누입되어 실제 연소에 소요된 산소 농도보다 배가스중 산소농도 분석치가 높게 나타나게 된다. 따라서 시험연소로를 이용한 연소시험 시 노내 압력을 대기압 보다 약 +5mmH₂O 정도 높게 유지하여 외부로부터의 공기 누입을 차단하고, 연소로 내부 수평 대류전열부 및 연소로 이후 배가스 Duct부에 각각 2대의 산소농도측정기를 설치하여 과잉공기 농도를 일정하게 유지한다.

2.3.2.2 미분도

시험탄의 미분도는 200mesh(75 μ m) 통과분 75% 및 65%탄을 대상으로 시험을 실시하였다. 시험탄의 미분도는 미분기의 Spinner Separator의 RPM을 조정하여 원하는 입도로 조절할 수 있으며, 수분 함량 및 HGI 값에 따라 미분에 소요되는 시간이 결정된다. 미분기 형식은 미국 Arms & Hammer사의 Bowl Mill을 사용했고, 시간당 최대 미분용량은 약 1톤 정도이다.

2.3.3 시험항목

2.3.3.1 노내 온도측정

시험연소로 내부 온도는 연소조건 및 위치에 따라 약 800~1,400℃에 이르는 고온으로 연속적인 온도측정을 위해서는 고온에 견디는 Probe의 제작이 요구되

어, 시험연소로의 경우 열전대 표면에 수냉식 보호관을 설치한 B 타입 및 S 타입의 열전대를 사용하여 연속적인 온도측정이 가능토록 했다.

열전대의 삽입위치는 버너영역 상부 약 70cm에 4개의 열전대를 설치했고, 버너 하부 및 Bottom Hopper 등에 3개의 열전대를 설치하여 1분 간격으로 온도를 측정, 기록하고 있다.

2.3.3.2 배가스 성분분석

배가스중 SO_x, NO_x, CO₂, CO, O₂, Dust 등의 농도측정을 위해 아래와 같이 각종 분석기기가 현장에 설치되어 있으며, 측정값은 1분 간격으로 기록, 저장되어 시험단의 환경오염 배출특성을 파악하기 위한 자료로 활용된다(그림 3).

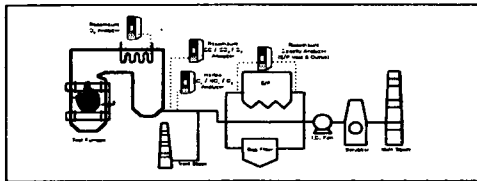


그림 3. 배가스 분석기 설치 위치

2.3.3.3 Slagging Factor 측정

회분이 보일러 내 수냉벽에 부착하는 특성을 파악하기 위해 시험연소로에는 Syltherm Panel이 설치되어 있으나, Syltherm Panel은 연소시험 종료 후 연소로가 완전 냉각된 후에 연소로 내부로 진입, 관찰이 가능한 단점 때문에 매번 탄종에 따른 연소시험 후 회분의 부착특성을 파악하기에 어려움이 있어, 소형 Slag Panel를 별도로 제작, 연소로 Port 내로 삽입하여 탄종 및 연소조건에 따른 회분의 부착 특성을 평가한다. Slag

Panel 구조는 그림 4. 와 같다.

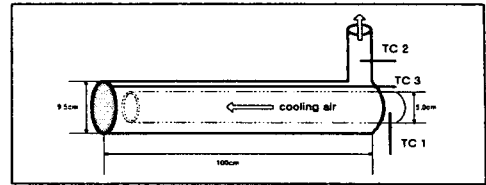


그림 4. Slag Panel 구조

Slag Panel의 표면은 노 벽면과 일치되게 하고, 실 보일러 수냉벽을 모사하기 위해 공기로 냉각하여 약 400℃를 유지한다. Slag Panel은 총 4개로, Fire Box에 대칭으로 2개, 버너상부 복사부에 대칭으로 2개가 각각 설치된다(그림 5).

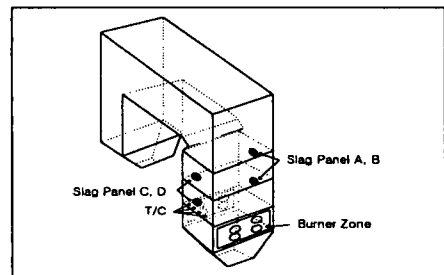


그림 5. Slag Panel 및 T/C 설치위치

Slagging Factor의 측정 원리는 Slag Panel에 공급되는 냉각공기의 입출구 온도를 지속적으로 측정하여, 시험 진행에 따라 Slag Panel 표면에 부착된 회분의 단열 작용으로 인해 발생한 열전달량 감소를 통해 회분의 부착 정도를 계수화한 것으로, 계산식은 아래와 같다.

$$S_f = \frac{A_o \cdot \Delta T_{fb}}{m \cdot C_{po}(T_{ao} - T_{at})} |_{Ash} - \frac{A_o \cdot \Delta T_{fb}}{m \cdot C_{po}(T_{ao} - T_{at})} |_{Ash\ free}$$

- S_f : Slagging Factor($m^2 K/W$)
- A_o : 전열면적
- ΔT_{fb} : 대수평균온도
- m : 질량유량
- C_{po} : 냉각공기 점입비열
- T_{ai} : 냉각공기 입구온도
- T_{ao} : 냉각공기 출구온도

윗 식에서 Slagging Factor(Sf) 값은 회분 부착시의 Slagging Factor(Sf · Ash) 값에서 초기 LNG 전소시 회분이 부착되지 않은 상태의 Slagging Factor (Sf · Ash free)값을 뺀 값이다.

2.3.3.4 Fouling Factor 측정

Fouling Factor 역시 Slagging Factor 계산과 동일한 원리이나, 단지 Probe가 설치된 위치가 시험연소로 Nose부로서 실 발전소 보일러 과열기를 모사하기 위해 Probe 표면온도를 약 540℃로 유지하며, Probe의 구조는 그림 6. 과 같다.

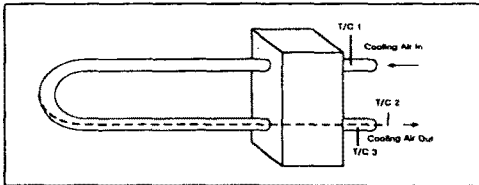


그림 6. Fouling Probe 구조

3. 시험탄 성상

Roto 및 Adaro탄은 고 수분, 고 휘발분 및 저 유황, 저 회분 함량의 아 역청탄 계열의 석탄으로 연료비가 1.0, 1.1 이며, Kideco, Total, Luscar, Ulan 등은 각각 1.0, 2.0, 1.4, 1.6 등이다(그림 7).

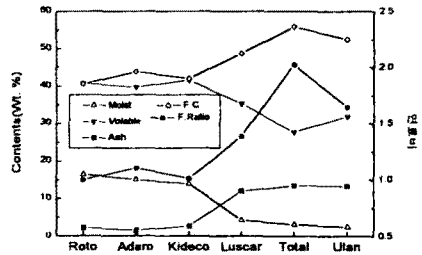


그림 7. 공업분석 및 연료비 비교

시험탄인 Roto, Adaro는 유황분 함량이 0.08, 0.09로서 황산화물의 배출이 낮고, Luscar, Total은 0.28, 0.63이며, 비교탄인 Ulan은 0.65이다. Roto, Adaro탄은 수분 함량이 높아(그림 7) 연소시 수분 증발열 소모로 인한 노내부 온도저하로 질소산화물 발생이 상대적으로 낮아 환경성 면에선 유리하며, 높은 휘발분에 따라 연소성지수가 높아 연소성 자체는 상당히 양호한 결과를 나타내고 있다(그림 8). 그러나 높은 수분 및 휘발분에 의해 열손실이 크고 저탄 및 미분시 자연발화 가능성 등의 문제점이 있으며, Alkali (Na_2O+K_2O) 성분의 함량이 높아 회분의 용점이 낮은 특성을 나타낸다.

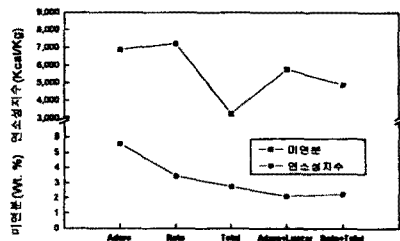


그림 8. 연소성 및 이론 미연분 발생

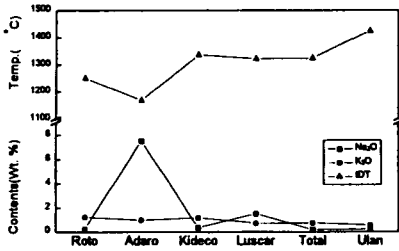


그림 9. Na₂O 및 K₂O 함량과 회용점

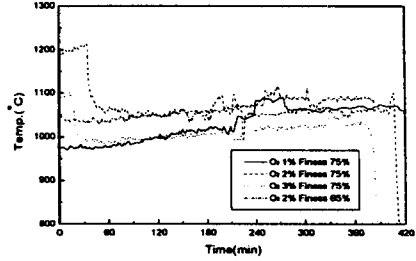


그림 10. Adaro 전소시 노내온도

4. 연소시험 결과

4.1 연소성

4.1.1 Adaro 전소 및 Adaro, Luscar 혼소시 노내 온도분포

수냉식 보호관을 장착한 열전대를 노내로 삽입하여 버너 상부 약 70cm의 노중심부의 온도를 측정된 결과, Adaro 전소 및 Adaro, Luscar 혼소시 노내 온도 분포는 약 1,000~1,100°C 정도 범위로, Adaro 전소시 과잉공기 2%에서 가장 높은 온도를 보였고, 과잉공기 3%에선 오히려 가장 낮은 온도를 나타냈으며, 동일 과잉공기량에서 미분도에 따른 온도 변화는 거의 없었다(그림 10, 11).

Adaro 전소시 과잉공기 3%에서 연소로 내부의 연소분위기 온도에 비해 상대적으로 낮은 온도(350°C)의 2차 공기 유입에 따라 온도저하가 발생한 것으로 사료된다. 그러나 Adaro, Luscar 혼소시 과잉공기 3%에서 가장 높은 온도를 나타내 Luscar탄이 Adaro탄 보다 과잉공기량 소모가 많음을 보여주고 있다(그림 10, 11).

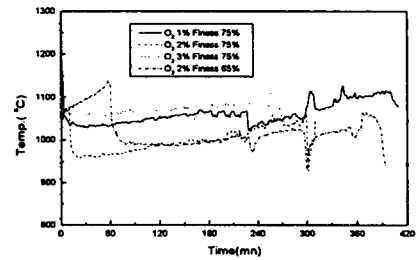


그림 11. Adaro, Luscar 혼소시 노내 온도

Adaro 전소시 연소시간 경과에 따라 Nose부 온도가 지속적으로 약간 상승하는 경향을 나타내는데, 이는 노벽이 점차 가열되어 복사열이 증가함에 따른 영향이라 생각된다(그림 12, 13).

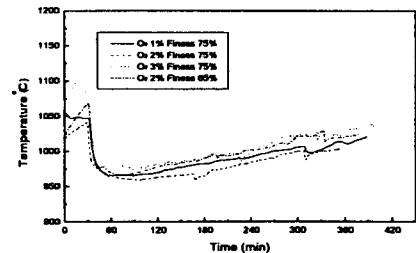


그림 12. Adaro 전소시 Nose부 온도

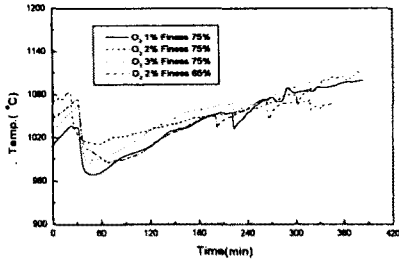


그림 13. Adaro, Luscar 혼소시 Nose부 온도

Adaro 전소 및 혼소시 연소로 출구 배가스 온도는 연소시간에 따라 증가하는 경향을 보이는데 이는 연소로 후단의 대류전열부에 설치한 열교환기 표면에 점착 회분이 부착되어 열교환 능력이 감소한 결과이다.

저회분 함량의 Adaro 전소시 보다는 Luscar탄과의 혼소시 배가스 온도상승 경향이 뚜렷이 발견되는데 이는 시험탄의 회분함량에 따른 배가스중 회분농도와 매우 개연성 있는 결과로 보여진다(그림 14, 15).

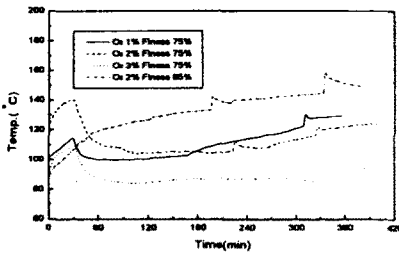


그림 14. Adaro 전소시 배가스 온도

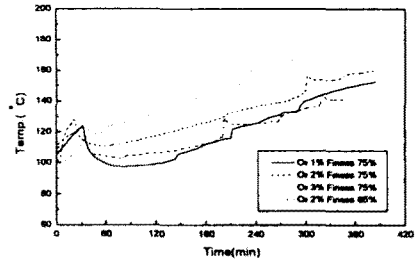


그림 15. Adaro, Luscar 혼소시 배가스 온도

4.1.2 Roto 전소 및 Roto, Total 혼소시 노내 온도분포

Roto 전소시 노내 온도분포는 약 1,150~1,200°C 범위였으며, Roto, Total 혼소시 약 1,200~1,300°C 범위를 나타냈다(그림 16, 17).

Roto 전소 및 혼소시험 결과 과잉공기 약 2%에서 가장 높은 온도를 나타냈고, 과잉공기 6%에서 가장 낮은 온도를 나타냈으며, 과잉공기 4% 조건에서 미분도에 따른 온도영향은 거의 발생하지 않았다(그림 16, 17).

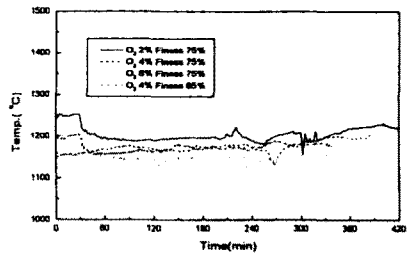


그림 16. Roto 전소시 노내온도

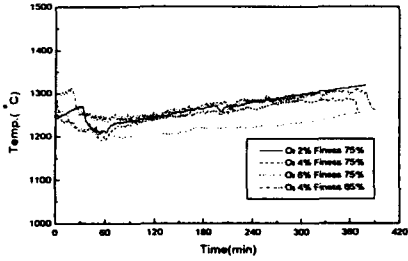


그림 17. Roto, Total 혼소시 노내 온도

Roto탄 전소시 과잉공기량 증가에 따라 노내 온도는 낮아지는데, 이는 연소성저하에 따른 결과라기 보다는 상대적으로 온도가 낮은 2차공기량 증가에 따른 영향으로 사료된다. 이는 미연분 발생량이 과잉공기량 증가에 따라 감소하는 경향을 통해 확인할 수 있다. 이러한 현상은 Adaro 연소와는 다소 다른 연소특성으로 보여지며, Adaro 보다는 다소 과잉공기량을 높게 유지하는 것이 연소율 향상에 유리할 것으로 판단된다. 그러나 미연분 발생과 질소산화물 발생을 고려한 적절한 과잉공기량 조정이 필요하며, 약 3~4%의 과잉공기 유지가 적절한 것으로 사료된다.

Roto 전소 및 혼소시 Nose부 온도는 1,000~1,150°C 범위를 나타내고 있다. Roto 전소시 보다 혼소시 약 100°C 이상 높은 온도를 나타내는데, 이는 수분함량이 낮은 Total탄 혼소에 따른 영향으로 수분 증발열 손실이 줄어들기 때문으로 사료된다(그림 18, 19).

혼소시 미분도에 따른 Nose부 온도는, 미분도가 200mesh 통과분 75%에서 65%로 감소함에 따라 Nose부 온도는 증가한 결과를 보이는데(그림 19), 이는 높

은 휘발분 함량으로 인해 입자 크기에 따른 연소시간 차이가 적을 것으로 예상되는 Roto탄 보다는 상대적으로 휘발분 함량이 적고 고정탄소 함량이 높은 Total탄의 연소 소요시간이 미분탄 입자 크기 증가에 따라 늘어나 전반적으로 연소진행 영역이 버너영역 후단까지 확장된 결과라 사료된다.

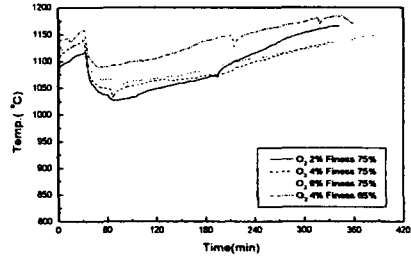


그림 18. Roto 전소시 Nose부 온도

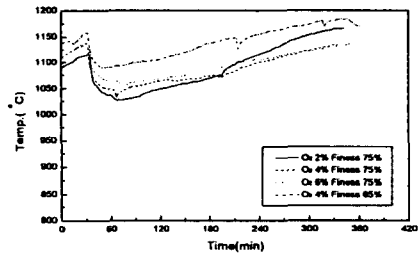


그림 19. Roto, Total 혼소시 Nose부 온도

연소로 출구 배가스 온도는, 회분함량이 약 6배 높은 Total탄과의 혼소시 매우 급격히 상승하는 결과를 보였다(그림 20, 21).

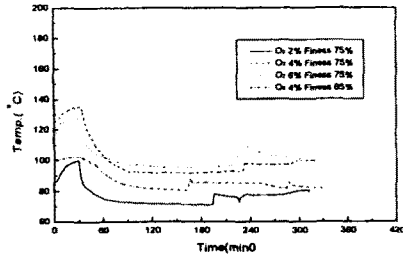


그림 20. Roto 전소시 배가스 온도

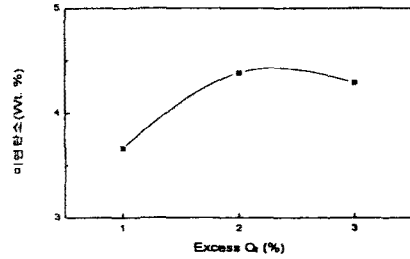


그림 22. Adaro 전소시 과잉공기에 따른 미연분 발생

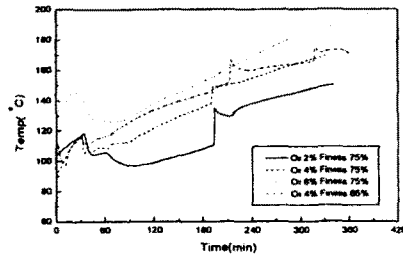


그림 21. Roto, Total 혼소시 배가스 온도

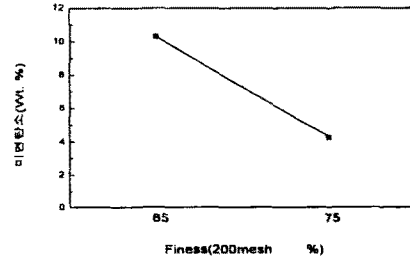


그림 23. Adaro 전소시 미분도에 따른 미연분 발생

4.2 미연분 발생

4.2.1 Adaro 전소 및 Adaro, Luscar 혼소시 미연분 발생

Adaro 전소 및 Adaro, Luscar 혼소시 미연분 발생을 비교해보면, 전소시 과잉공기가 1%에서 2%, 3%로 증가함에 따라 미연분 발생이 증가하는 경향을 보였다(그림 22).

이는 Adaro탄의 경우 원소함량중 산소 농도가 약 20%에 달해 상대적으로 낮은 과잉공기량에서도 연소가 충분히 이루어지는 것으로 사료되며, 1% 이상의 과잉공기 공급은 오히려 연소분위기에 비해 상대적으로 낮은 온도의 2차공기량 증가에 따라 연소성 저하를 가져오는 것으로 보인다. 또한 미분탄 입자크기가 증가함에 따라 미연분 증가가 뚜렷하여 200 mesh 통과 75% 이상의 미분도에서 연소시키는 것이 연소율 향상에 크게 기여함을 알 수 있다(그림 23).

혼탄의 경우 과잉공기 2%에서 가장 낮은 미연분 발생량을 나타냈으나, 이는

고산소함유 아역청탄인 Adaro와의 혼소로 인해 다른탄에 비해서 상대적으로 과잉공기 소요량이 적은 것으로 보인다(그림 24). 일반적인 고수분 함량의 아역청탄과 역청탄의 혼소시 역청탄간의 혼소보다는 다소 낮게 과잉공기를 유지하는 것이 미연탄소분 발생 저감에 유리할 것으로 사료된다.

혼소시에도 역시 미분도 감소에 따라 미연분 발생은 증가하는 것으로 나타나는데 전소시 보다는 상대적으로 낮은 미연분 발생 결과를 나타내고 있다. 이는 Luscar탄 혼탄으로 인한 노내 온도상승에 따른 영향으로 보이며, 전소보다는 적절한 혼소가 유리할 것으로 사료된다(그림 25).

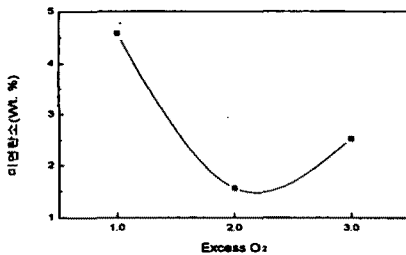


그림 24. Adaro, Luscar 혼소시 과잉공기에 따른 미연분 발생

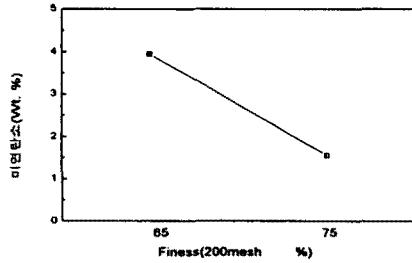


그림 25. Adaro, Luscar 혼소시 미분도에 따른 미연분 발생

4.2.2 Roto 전소 및 Roto, Total 혼소시 미연분 발생

Roto 전소 및 혼소시 과잉공기량 증가에 따라 미연분 발생은 감소하는 경향을 보였다(그림26). 이는 과잉공기량 증가에 따라 연소성이 향상되는 결과로 보여진다. 또한 Roto 전소시 미분도 증가에 따라 미연탄소는 감소했다(그림 27).

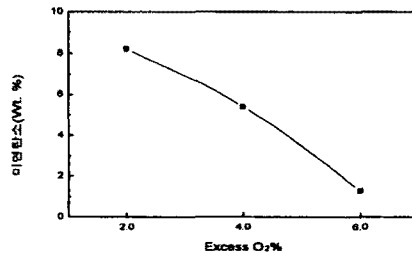


그림 26. Roto 전소시 과잉공기에 따른 미연분 발생

혼소시에도 과잉공기 증가에 따라 미연분은 감소하는 경향을 나타냈다(그림 28).

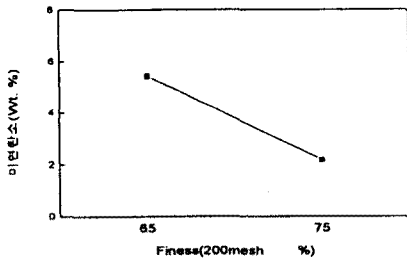


그림 27. Roto 전소시 미분도에 따른 미연분 발생

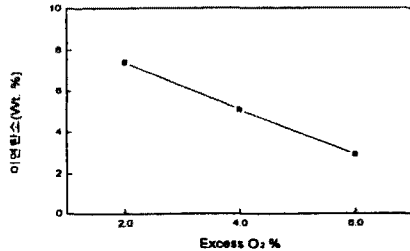


그림 28. Roto, Total 혼소시 과잉공기에 따른 미연분 발생

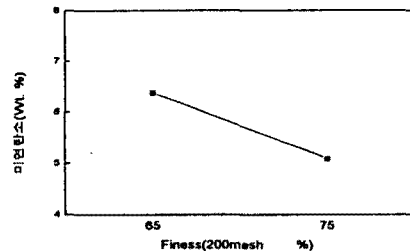


그림 29. Roto, Total 혼소시 미분도에 따른 미연분 발생

4.3 환경성

4.3.1 Adaro 전소 및 Adaro, Luscar 혼소시 SOx/NOx 발생

Adaro, Roto 전소 및 혼소시 황산화물의 발생은 연료중 유황분 함량에 따른 이론적 발생량 계산치와 매우 정확하게 일치한 결과를 나타냈으며, 미분도에 따른 SOx 발생량 변화는 거의 없었다(그림 30). 이는 이미 알려진 바와 같이 황산화물의 발생 메카니즘상 연료중 가연성 유황분이 연소온도에서 충분히 산화되어 거의 정량적으로 황산화물 형태로 배출되기 때문이다.

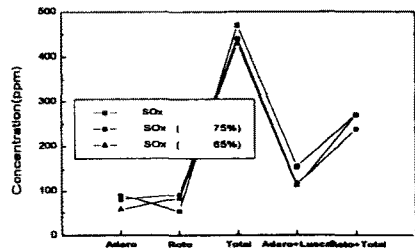


그림 30. 이론 및 실측 SOx 발생량 (O₂ 6% 기준)

그러나 질소산화물의 발생은 단순히 연료중 질소함량만을 고려한 이론적 예상치와는 많은 차이를 보이고 있다. 질소산화물의 이론적 발생량은 약 160~350ppm 정도이나 실제 발생치는 약 250~650ppm에 이르는 다양한 범위에 걸쳐있어, 그 발생량의 변화 폭이 매우 컸다(그림 31).

NOx의 발생은 연소로 내부의 연소분위기에 온도에 따른 Thermal NOx의 발생이 매우 큰 영향을 미치고 있으며, 이는 탄종별 연소조건에 따른 노내부의 온도와 이론 Thermal NOx 발생량 비교를 통해 알 수 있다(그림32).

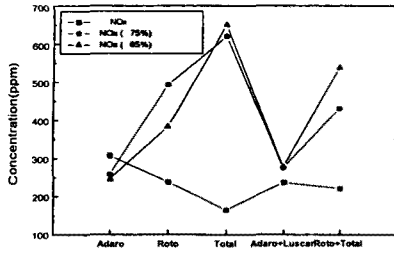


그림 31. 이론 및 실측 NOx 발생량 (O₂ 6% 기준)

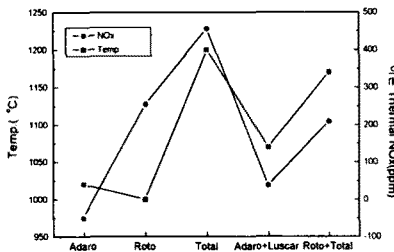


그림 32. 시험연소로 온도조건에 따른 Thermal NOx 발생량

주) 이론 Thermal NOx = 실측 NOx 발생량 - 이론 Fuel NOx 발생량

따라서, 동일 시험탄에 대한 연소시험 결과 시험연소로에서의 SOx 발생은 실 발전소에 비해 약 20~40% 높게 나타났으며, NOx의 경우는 약 3~4배정도 더 발생하였다(그림 33).

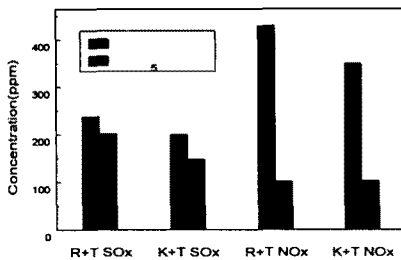


그림 33. 시험연소로 및 실 발전소 연소시험 결과 SOx/NOx 발생량

Adaro탄의 경우 전소 및 혼소시 노내 연소분위기 온도는 약 1,100°C 이하였으며, NOx 발생량은 이론적 계산치와 일치한 결과를 보였다(그림 31). 또한 과잉 공기 증가에 따라 NOx 발생량도 증가하고 있다(그림 34).

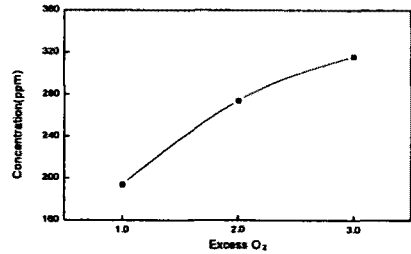


그림 34. Adaro 전소시 과잉공기에 따른 NOx 발생

4.3.2 Roto 전소 및 Roto, Total 혼소시 SOx/NOx 발생

Roto 단탄 및 혼탄의 경우, 알려진 바와 같이 Thermal NOx가 급격히 증가하는 1,300°C에 근접한 약 1,200~1,300°C에서 연소 분위기가 주로 형성되었고, 이로 인한 Thermal NOx 발생량의 급격한 증가로 이론 보다 매우 높은 NOx 발생을 볼 수 있다(그림 31).

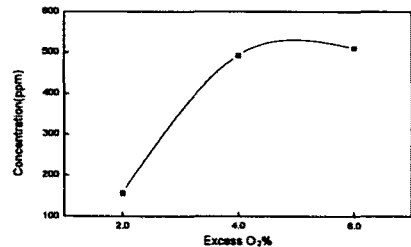


그림 35. Roto 전소시 과잉공기에 따른 NOx 발생

또한 모든 조건에서 과잉공기량 증가에 따라 NOx 발생량이 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 기존의 알려진 실험적 경향과 일치하고 있다(그림 35).

4.4. 회부착 특성

인도네시아산 아역청탄 들은 융점이 낮은 알카리 금속화합물의 함량이 높아 회성분의 융점저하를 초래하고 있다.

실리카함량(Sp; Silica %)의 경우 통상 35~90%의 범위를 나타내며, 일반적으로 이값이 클수록 회분의 융점이 높은 것으로 알려져 있는데, Adaro, Roto의 경우 역청탄 계열의 Total 및 Ulan탄 등에 비해 상대적으로 그 값이 낮아 회분의 융점이 높지 않음을 알 수 있으며(그림 36), 이는 시험탄의 회융점(IDT)으로 확인된다.

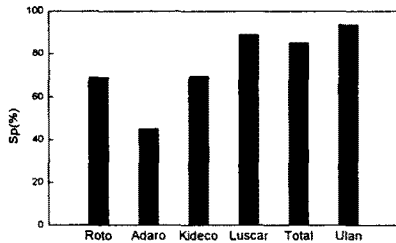


그림 36. 탄종별 Silica %(Sp)

또한 각종 Slagging Index중, 1에 가까울수록 Slagging성이 커지는 것으로 알려진 Iron/Calcium Ratio의 경우 Adaro탄이 1에 가장 근접한 양상을 나타내며, 높을수록 낮은 회융점을 나타내는 알카리 함량 역시 Adaro탄이 특히 높은 경향을 나타내 높은 Slagging 가능성을 보여주고 있다(그림 37).

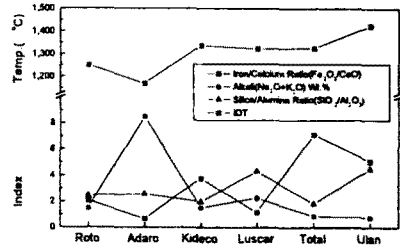


그림 37. Slagging Index 및 회융점

이밖에 알카리 화합물과 반응하여 낮은 회융점을 유발하는 Silica 화합물 함량을 보여주는 Silica/Alumina Ratio의 경우 Adaro, Roto의 경우 다소 낮은 경향을 보이고 있으나(그림 37), 융점이 약 920°C로 알려진 Na₂O 성분과 약 500°C로 알려진 K₂O 성분의 함량이 상대적으로 높은 아역청탄들의 회융점이 낮은 것으로 나타나고 있다(부록 1).

4.4.1 Slagging성

이론적 Slagging 지수 비교와 더불어 시험연소에서 수행한 Slagging 시험의 경우 Slagging 가능성이 가장 높은 Adaro의 Slagging Factor 값이 약 0.001(m² K/W)로 나타났으며, Luscar탄과의 혼소시 0.001~0.0015를 나타내 Slagging성이 다소 증가하는 결과를 보이고 있다(그림 38, 39).

Roto 전소시 Adaro보다 낮은 0.006 정도를 나타냈고, 혼탄의 경우 다소 증가한 0.0008 정도를 나타내고 있다(그림 38, 39).

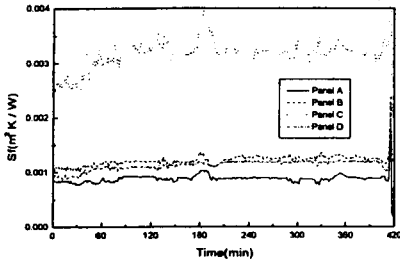


그림 38. Slagging Factor
(O₂ 2%, 미분도 75% Adaro 전소)

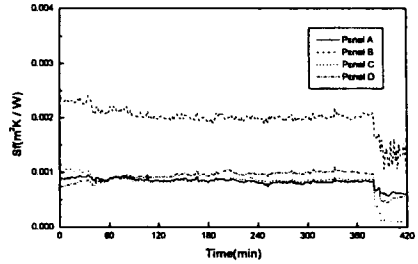


그림 41. Slagging Factor
(O₂ 2%, 미분도 75%, Roto, Total 혼탄)

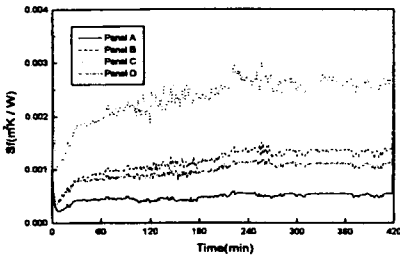


그림 39. Slagging Factor
(O₂ 2%, 미분도 75% Adaro, Luscar 혼소)

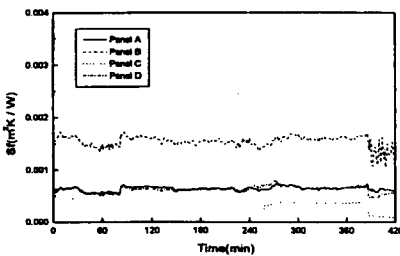


그림 40. Slagging Factor
(O₂ 4%, 미분도 75%, Roto 전소)

4.4.2 Fouling 성

탄종별 Fouling성을 보면, 회성분중 Na₂O 함량이 가장 높은 Adaro탄의 이론적 Fouling Index가 가장 높고(그림 40), 시험 결과에서도 Adaro 탄의 Fouling Factor 값이 가장 높게 나타나고 있다(그림 41).

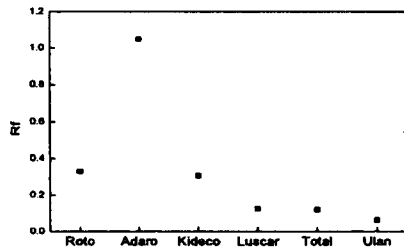


그림 42. 탄종별 이론 Fouling Index

Luscar탄의 경우 이론 Fouling Index는 Roto에 비해 낮은 편이나, 연소시 노내 버너영역 온도가 약 1,400℃ 이상으로 회분의 IDT(1,323℃)를 넘어서고 있으며, 탄의 회성분중 Na₂O의 함량이 약 1.53%로 Roto의 약 0.23%나 Kideco의 약

0.35%에 비해 높아, 시험결과에서는 오히려 Roto 보다 더 높은 Fouling Factor 값을 나타내고 있다. 따라서 Luscar탄의 경우, 높은 Na₂O 함량에 따라 아 역청탄과의 혼소는 바람직하지 않은 것으로 사료된다.

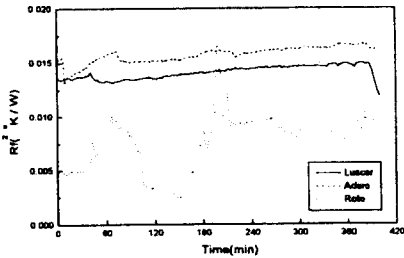


그림 43. Fouling Factor
(O₂ 2%, 200mesh Under 75%)

석탄의 회성분에 따른 Slagging, Fouling 특성 뿐만 아니라, 석탄의 열량 차이에 따른 노내 연소온도에 따라, Slagging, Fouling성이 다르게 나타나고 있다. 이론적 Slagging, Fouling 특성이 낮은 탄이라도, 열량이 높을 경우 노내 열부하가 증가하게 되고, 회분의 IDT 보다 높은 온도가 형성되어 Slagging, Fouling성이 높게 나타날 수 있다.

전체적으로 Slagging 및 Fouling 특성을 고찰해 보면 회성분중 알칼리성분 (Na₂O +K₂O)의 함량이 높은 인도네시아 산 아역청탄인 Adaro, Roto 및 Kideco탄의 회용점이 낮게 나타나고 있으며, 이론적 예측과 시험연소로의 실험적 결과에서도 Slagging, Fouling 특성이 높게 나타나고 있다. 따라서 이들 석탄과 혼탄 할 탄종의 경우 회성분중 알칼리 성분이 적고 지나치게 발열량이 높지않은 역청탄을 선정하여 회성분의 융점 저하

와 고온에 의한 물리적 융점저하를 피해야 할 것으로 사료된다.

4.5 열손실

열손실은 석탄의 연소특성과 연소조건에 따라 보일러 효율과 연관되며, 혼탄 선정에 고려해야 될 중요한 요인이다.

석탄 연소시 발생하는 각종 열손실 가운데 배가스 열손실 및 미연분 발생으로 인한 열손실을 제외한 수소 및 수분 함량에 의한 열손실 등은 주로 석탄의 성상에 따른 열손실로서, 그 손실량이 연소조건과 무관하게 거의 정량적으로 발생하고 있다. 따라서 연소조건에 따라 조절 가능한 주 열 손실원은 배가스 및 과잉공기 조정에 따른 미연탄소 발생이다.

배가스 열손실은 과잉공기량 증가에 따라 증가하고 있다(그림 44~47). 따라서 과잉공기 감소로 인한 미연분 발생을 고려하여 가장 적절한 최소의 과잉공기량을 결정하는 것이 중요하며, 과잉공기량 감소는 질소산화물 발생을 줄이는 효과도 기대할 수 있다.

4.5.1 Adaro 전소 및 Luscar와의 혼소시 열손실

Adaro 전소시 미연분 발생과 배가스 열손실량을 합한 총 열손실량은 과잉공기 증가에 따라 증가하는 결과를 보이며, 과잉공기량 1~2% 이내가 가장 적은 열손실을 나타내는 연소조건으로 사료된다. 또한 미분도가 감소함에 따라 미연탄소 손실이 크게 증가하여, 미분도는 75% 이상 유지하는 것이 바람직할 것으로 사료된다(그림 44).

Luscar와의 혼소시는 과잉공기 1.5~

2% 이내에서 가장 적은 열손실량을 나타내고 있으며, 미분도 감소에 따라 미연분 발생이 크게 증가하는 경향을 나타내고 있다(그림 45).

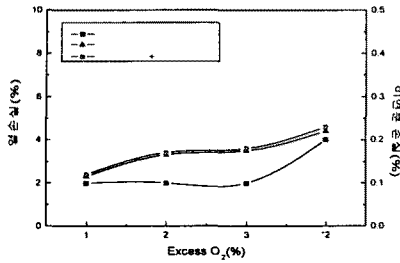


그림 44. Adaro 전소시 미연분 및 배가스 열손실(74 μ m이하 65%)

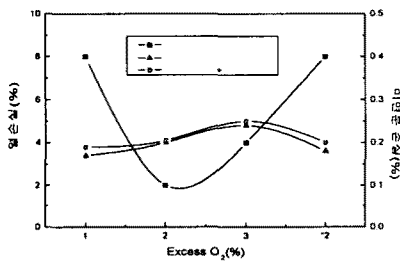


그림 45. Adaro, Luscar 혼소시 미연분 및 배가스 열손실

4.5.2 Roto 전소 및 Total과의 혼소시 열손실

Roto 전소시 과잉공기 증가에 따라 배가스 열손실은 증가하는 경향을 보이지만, 미연분 손실은 과잉공기 4% 및 6%에서 거의 동일한 발생량을 나타내고 있다(그림 46). 따라서 미연분 및 배가스 열손실을 고려할 때, 과잉공기 4% 이하에서 운전함이 적정할 것으로 사료되며, 미분도 감소에 따라 미연분 발생이 급격

하게 증가하는 경향을 보여 200mesh 통과분 75% 이상에서 연소함이 필요하다. Roto, Total 혼소시 역시, 과잉공기 2% 및 4%에서 미연분 열손실이 거의 동일한 결과를 보이고 있다(그림 47).

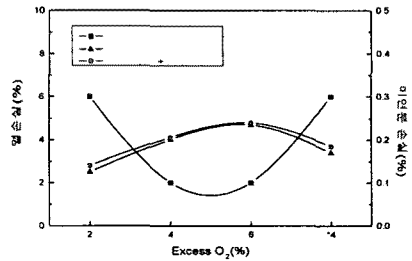


그림 46. Roto 전소시 미연분 및 배가스 열손실

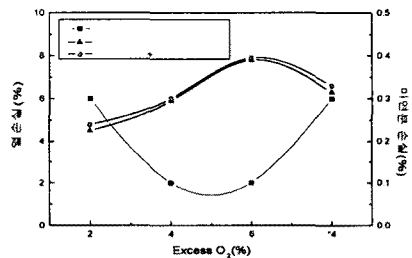


그림 47. Roto, Total 혼소시 미연분 및 배가스 열손실

5. 결론

5.1 Adaro 전소

Adaro 전소시 노내 복사전열부 온도는 약 1,000~1,100 $^{\circ}$ C 범위였다. Adaro탄은 휘발분의 함량이 40%이상으로 연소성이 우수하며, 화염은 버너 주변에서 넓고 밝은형태로 형성되었다. Adaro 전소시 과잉공기 2%에서 가장 높은 온도를 나타내, 저 과잉공기 조건에서 연소성이

양호한 것으로 나타났으며, 연소시 Nose 부 온도는 약 970~1,040℃ 범위를 보였다. 배가스 온도는 고 수분함량으로 인한 열손실로 약 90~140℃로 낮게 유지되었으며, 과잉공기 1%에서 가장 낮은 약 3.7%의 미연분이 발생하였다. 미분도(200mesh 통과분) 증가(65%→75%)에 따라 미연분 발생은 약 10.5%에서 4.1%로 약 6% 감소했고, 고 수분 함량으로 상대적으로 노내 온도가 낮게 형성되어 NOx 발생은 250~280ppm으로 양호했다. 과잉공기량 증가(1→3%)에 따라 NOx 발생은 약 190ppm(02 6% 기준)에서 310ppm으로 증가하였으며, SOx 발생은 연소성 유황분 함량에 따른 이론적 발생량과 거의 동일한 약 80ppm으로 양호한 환경성을 나타냈다. Adaro탄의 경우 회분중 Sp(Silica%) 및 Iron/Calcium 비가 낮고, 알카리 성분중 Na₂O 함량이 매우 높아(7.5%) 회분의 IDT가 1,169℃로 낮아 회융착에 의한 전열장애가 예상되었다. Slagging Factor는 약0.001m²K/W였고, Na₂O 함량이 높아 이론적 Fouling Index가 약 1.1로 시험탄중 가장 높고, 실험적 Fouling Factor도 약 0.016m²K/W로 높아 전열장애가 예상되었다. 이밖에 과잉공기 증가와 미분도 감소에 따라 열손실이 증가하며, 과잉공기 1~2% 범위에서 열손실이 가장 적을 것으로 예상되었다.

Adaro탄은 저 과잉공기에서 연소 가능하므로, 혼소시 과잉공기량을 1~2% 정도 유지하여 미연탄소분 발생과 배가스에 의한 열손실을 줄이고, 회분의 IDT가 매우 낮은 점을 감안하여, 고열량탄과의 혼소를 지양해야 할 것으로 사료된다. 또한 낮은 SOx 및 NOx 발생과, 저회분

함량의 특성을 활용하는 혼탄이 바람직할 것으로 사료된다.

5.2 Adaro와 Lusacr 혼소

Adaro와 Luscar 혼탄의 경우 노내 복사전열부 온도는 약 1,000~1,100℃ 범위였고, 과잉공기 3%에서 복사전열부 온도는 약 1,070~1,100℃로 가장 높았다.

Nose부 온도는 약 970~1,080℃ 범위를 보였으며, 배가스 온도는 고 수분함량으로 인한 열손실로 약 90~160℃로 낮았다. 혼소시에는 과잉공기 1%에서 가장 높은 약 4.6%의 미연분이 발생했고, 2%에서는 약 1.6%의 가장 적은 미연분이 발생했다. 미분도(200mesh 통과분) 증가(65%→75%)에 따라 미연분 발생은 3.9%에서 1.5%로 약 2.4% 감소했으며, 고수분 함량의 Adaro탄과 혼소시 상대적으로 노내 온도가 낮게 형성되어 NOx 발생은 약 270ppm으로 양호했다. 과잉공기량 증가(1→3%)에 따라 NOx 발생은 약 220ppm에서 350ppm으로 증가했고, SOx 발생은 이론적 발생량과 거의 동일한 약 110ppm으로 양호한 환경성을 나타냈다. Adaro 전소시 Slagging Factor는 약 0.001m²K/W 였으나, 혼소시는 0.001~0.0014m²K/W를 나타 약간 증가했다. 과잉공기 증가에 따라 열손실이 증가하였으며, 과잉공기 1~2% 범위에서 열손실이 가장 적었다. 고 수분함량의 Adaro탄과의 혼소로 SOx 및 NOx 발생이 낮아 환경성은 양호한 결과를 나타냈으나, Luscar탄의 Na₂O 함량이 1.53%로 Total 0.16% 및 Ulan 0.23% 보다 높고, 버너영역에서 온도가 Adaro 및 Luscar탄의 IDT 이상인 1,400℃ 이상까지 형성되어 Alkali 함량이 높은 아 역청탄과의

혼소시 Slagging 및 Fouling성이 증가되는 경향이 나타나, 혼탄선정에 주의가 필요할 것으로 사료된다.

5.3 Roto 전소

Roto탄 전소시 노내 복사전열부 온도는 약 1,150~1,200°C 범위였고, 과잉공기 2%에서 가장 높은 온도를 나타냈고, 미분도 변화에 따른 온도차는 발생하지 않았다. Roto탄은 휘발분의 함량이 40%이상이므로 연소성이 우수하며, 화염은 버너 주변에서 넓고 밝은형태로 형성되었다. 전소 및 혼소시 Nose부 온도는 약 1,000~1,150°C 범위를 나타냈으며, 혼소시 수분함량이 적은 Total탄으로 인한 수분 증발열 감소로 인해 전소에 비해 약 100°C 정도 온도가 높았다. 전소시 배가스 온도는 약 100°C 미만으로 유지되었으나, 혼소시 열량증가와 회분 증가로 인한 전열 장애로 배가스 온도는 170°C 이상까지 상승했고, 전소 및 혼소시 과잉공기 증가(2%→6%)에 따라 미연분 발생은 약 1/4로 감소했다. 전소 및 혼소시 미분도(200mesh 통과분)도 증가(65%→75%)에 따라 미연분 발생은 감소했다. 전소 및 혼소시 NOx는 약 390~540ppm 범위에서 발생하였으며, 전소시 과잉공기에 증가(2%→6%)에 따라 NOx 발생은 증가(150→500ppm)하였으며, 과잉공기 4%에서 발생량 증가율이 감소했다. 전소 및 혼소시 SOx는 약 80~90ppm 발생하여 이론적 예상치와 거의 일치하는 결과를 나타냈고 국내에 수입되고있는 일반적인 인도네시아산 아역청탄의 경우처럼 Roto탄은 Sp(Silica %) 및 Iron/Calcium비가 낮고, 알카리성분(Na₂O+K₂O)의 함량이 비교적 높아 역청

탄에 비해 회분의 IDT가 상대적으로 낮은 1,250°C로 전열장애가 예상된다. 전소시 Slagging Factor는 약 0.005m²K/W 였으나 혼소시 노내 온도가 IDT 이상인 약 1,250°C 이상까지 상승함에 따라 Slagging Factor값이 다소 증가한 결과를 보였다. Fouling Factor 시험결과 Adaro 보다 Fouling성이 작게 나타났고, 과잉공기량 증가에 따라 열손실 증가한 것으로 나타났다. Roto탄은 미연분 발생과 NOx 발생을 함께 고려할 때 과잉공기 약 3%에서 운전하는 가장 적절한 것으로 사료되며, 낮은 유황분 및 회분 함량에 따라 환경성은 매우 양호할 것으로 판단되나, NOx의 발생은 Adaro에 비해 매우 높게 나타나고, 회분의 IDT가 낮은 편으로 고열량탄과의 혼소는 바람직하지 못한 것으로 사료된다. 따라서 혼소시 SOx 및 Dust 발생량 조절 목적으로 활용하는 것이 유리할 것으로 사료된다.

5.4 Roto와 Total 혼소시

Total과의 혼소시 노내 복사전열부 온도는 약 1,150~1,300°C 범위였으며, 과잉공기 2%에서 가장 높은 온도를 나타냈고, 미분도(200mesh 통과분)를 65%에서 75%로 변경하여 연소한 경우 온도차는 발생하지 않았다. Roto탄은 휘발분의 함량이 40%이상이므로 연소성이 우수하여, 화염은 버너 주변에서 넓고 밝은형태로 형성되었고, 전소 및 혼소시 Nose부 온도는 약 1,000~1,150°C 범위를 나타냈으며, 혼소시 수분함량이 적은 Total탄으로 인한 수분 증발열 감소로 인해 전소에 비해 약 100°C 정도 온도가 높았다. 전소시 배가스 온도는 약 100°C 미만으로 유지되었으나, 혼소시 열량증가와 회분

증가로 인한 전열 장애로 배가스 온도는 170℃ 이상까지 상승했다. 전소 및 혼소시 과잉공기 증가(2%→6%)에 따라 미연분 발생은 약 1/4로 감소했으며, 전소 및 혼소시 미분도(200mesh 통과분)도 증가(65%→75%)에 따라 미연분 발생은 감소했다. 전소 및 혼소시 NOx는 약 390~540ppm 범위에서 발생하였으며, 전소시 과잉공기에 증가(2%→6%)에 따라 NOx 발생은 증가(150→500ppm)하였고, 과잉공기 4%에서 발생량 증가율이 감소했다. 전소 및 혼소시 SOx는 약 80~90ppm 발생하여 이론적 예상치와 거의 일치하는 결과를 나타냈으며, 국내 수입되고있는 일반적인 인도네시아산 아역청탄의 경우처럼 Roto탄은 Sp(Silica %) 및 Iron/Calcium비가 낮고, 알카리성분(Na₂O+K₂O)의 함량이 비교적 높아 역청탄에 비해 회분의 IDT가 상대적으로 낮은 1,250℃로 전열장애가 예상된다. 전소시 Slagging Factor는 약 0.005m²K/W였으나 혼소시 노내 온도가 IDT 이상인 약 1,250℃ 이상까지 상승함에 따라 Slagging Factor값이 다소 증가했다. Fouling Factor 시험결과 Adaro 보다 Fouling성이 작게 나타났으며, 과잉공기량 증가에 따라 열손실 증가했다.

Roto탄은 미연분 발생과 NOx 발생을 함께 고려할 때 과잉공기 약 3%에서 운전하는 가장 적절한 것으로 사료되며, 낮은 유황분 및 회분 함량에 따라 환경성은 매우 양호할 것으로 판단되나, NOx의 발생은 Adaro에 비해 매우 높게 나타났고, 회분의 IDT가 낮은 편으로 고열량탄과의 혼소는 바람직하지 못한 것으로 사료된다. 따라서 혼소시 SOx 및 Dust 발생량 조절 목적으로 활용하는

것이 유리할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. L. Douglas Smoot and Philip J. Smith, 'Coal combustion and gasification', Plenum Press, p18, 1985
2. Australian Combustion Technology Center, 'Coal Quality Impact Model', 1996
3. 하만영 외, '과울링 예측을 위한 가스-입자 이상유동 해석', 대한기계학회 논문집(B), 제20권, 제11호, p3695-3705, 1988
4. 한국전력공사, '연소실무', 예문사, p4.13-4.50, 1989
5. Australian Combustion Technology Center, 'Pilot scale test furnace operation procedure', chap6-10, 1996

부록 1. 시험탄 성상표

구 분	단 위	탄 중				
		Roto South	Adaro	Luscar	Total	
産 地	-	인 니	인 니	카나다	남아공	
발 열 량	기전식	Kcal/kg	5,642	6,013	6,470	6,696
	건 식		6,749	7,071	6,798	6,922
총 수 분	Wt. %	25.40	24.0	11.20	9.46	
유황분(기전)	Wt. %	0.08	0.09	0.28	0.63	
공업분석	고유수분	Wt. %	16.40	14.96	4.13	3.02
	휘 발 분		40.71	39.71	35.20	27.63
	회 분		2.27	1.52	11.97	13.47
	고정탄소		40.62	43.81	48.70	55.88
원소분석	탄 소	Wt. %	66.83	69.82	69.60	72.78
	수 소		5.33	4.87	4.55	4.25
	산 소		23.99	21.71	12.41	8.86
	질 소		0.90	1.30	0.93	1.31
	황 분		0.07	0.12	0.30	0.70
	회 분		2.88	2.18	12.21	12.10
회 성 분	SiO ₂	Wt. %	49.02	31.88	68.79	51.91
	Al ₂ O ₃		20.17	12.49	15.86	28.44
	Fe ₂ O ₃		13.55	12.81	3.93	7.42
	CaO		6.48	18.91	3.35	1.04
	MgO		1.80	6.95	1.16	0.50
	Na ₂ O		0.23	7.52	1.53	0.16
	K ₂ O		1.24	0.99	0.73	0.73
	SO ₃		6.2	6.81	3.94	7.93
	TiO ₂		1.29	0.59	0.71	1.87
	기 타		0.02	10.5	-	-
분쇄도	HGI	48	55	49	51	
회용점 (IDT)	℃	1,250	1,169	1,323	1,325	