

시험연소로에서의 인도네시아 로토탄의 연료특성 평가

김종원[†] · 심규성 · 손영목 · 이상호 · 박기배 · 명광식

한국에너지기술연구소 에너지환경연구단
(1994년 3월 17일 접수, 1994년 9월 16일 채택)

Fuel Evaluation of Indonesian Roto Coal in a Pilot-scale Combustor

Jong Won Kim[†], Kyu Sung Sim, Young Mok Son,
Sang Ho Lee, Kee Bae Park and Kwang Shik Myung

Energy & Environmental Research Dep., Korea Institute of Energy Research, Taejeon 305-343, Korea
(Received 17 March 1994; accepted 16 September 1994)

요 약

경제 사회적인 여건의 변화에 의해 연료구입원이 다양해지고 있는 현 상황에서, 이들 다종의 석탄의 연소시 예상되는 문제점을 예측 및 해결하고자 석탄 시험 연소로에서의 종합적인 평가를 통한 산업용 및 발전용 미분탄의 연료특성평가를 시행하기 위해 시험연소 시스템을 구성하여 실제 국내 수입 이용되고 있는 인도네시아 Roto탄을 시험 적용하였다. 연소율은 98% 이상이었으며, 선회도와 공기예열온도가 높을수록 안정한 화염을 생성하였다. 배가스 중 NO_x 농도는 선회도가 0.5-0.9 범위에 있을 때에 낮은 값을 보여 주었으며, 배가스 중 산소 및 이산화탄소의 농도는 선회도의 변화에도 불구하고 거의 일정하였다.

Abstract—Problems encountered in use of pulverized coal, in particular, have practical implications related to coal blending and up-grading of imported coals. Practically, significant problems are recognized in such aspects as control of the combustion process, fireside corrosion, ash and pollution. The methodology of predicting problems using pilot scale facility is less expensive, requires less coal and less time to execute, compared to the use of full scale facility. In this study, evaluation of Indonesian Roto coal was performed in a pilot scale coal combustion test facility. Burnout ratio of coal was higher than 98%, and increase of swirl number and preheat temperature of air made flame stabilize. NO_x concentration in flue gas was lower in the range 0.5-0.9 of swirl number. Concentrations of oxygen and carbon dioxide in flue gas were constant in spite of variation of swirl number in this work.

1. 서 론

석탄은 물성의 비균질성과 사용 및 취급의 불편함으로 인해 연료로써의 저급함을 갖고 있으나, 석탄 산지가 어떤 특정 지역에 국한됨이 없이 고르게 분포되어 있고 매장량도 석유의 몇 배에 이르는 막대한 양이어서 석유를 대체할 현실적인 에너지원으로 평가받고 있다[1].

그러나 이러한 지역적인 비편재성은 석탄 물성의 비균질성을 더욱 심화시키고 있어, 특정한 탄종 및 산지의 석탄을 기준으로 설계된 산업 및 발전용 보일러 설비에 기준탄을 사용하는 경우에는 보일러의 운전과 오염물질 배출에 대한 대책 강구에 큰 어려움이 없으나, 다른 경우에는 다종의 원료탄 혼합 등의 방법에 의한 인위적 탄질의 균일화 또는 고품질화가 필요하며[2, 3], 또한

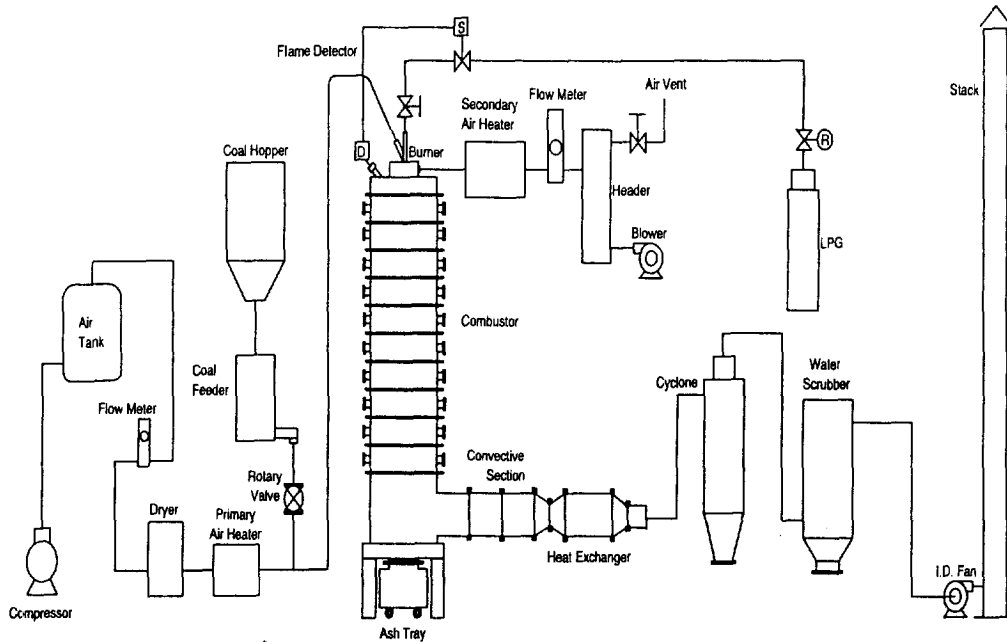


Fig. 1. Fuel evaluation facility.

혼합탄의 안정적인 연소 상태 유지, 안정 운전 및 오염 물질 저감을 위해 실증적인 연료특성 파악이 중요하다. 실보일러에서의 시험은 현실적으로 어려운 점이 많아 외국에서는 실제보일러를 모사한 여러 형태의 시험연소소에서 다양한 연료 특성을 도출하여, 이로부터 실제 보일러에서의 연소거동을 예측하는 많은 연구가 이루어지고 있다[4, 5]. 특히, 이러한 연소 설비는 석탄매장량이 많은 나라에서 자국의 석탄수출 확대를, 또는 이용을 위해 기술적 자료를 제공하기 위한 경우나, 석탄 연소설비 관련 제작 업체에서 설비 설계를 위해 가동하고 있는 예가 많다[6]. 시험연소소에서 연소효율, 화염안정성 및 온도분포, 안정운전성(slugging/fouling), 그리고 오염 물질 배출성 등의 연료특성을 파악하기 위해서는 시험조건을 실제 특정 보일러의 운전조건을 최대한 모사할 수 있도록 시험연소소의 로배치, 연소방식 등이 실보일러와 같아야 하며, 또한 공기비, 연소공기의 온도, 연소로와 배가스의 배출 및 온도분포 등이 최대한 동일하도록 실험조건을 설정하여야 한다.

본 연구에서는 효율적이고도 경제적으로 실제 석탄 보일러 시스템에 대한 중요한 사항들을 연구 예측할 수 있도록 석탄처리용량 20-40 kg/hr인 pilot-scale의 시험연소로를 설계 제작하고, 국내수입되고 있는 인도네시아 로토탄을 대상으로 미분탄의 연료 특성 평가를 실시하였다.

2. 연소 시험장치 및 시험방법

2-1. 분석항목 및 조업 변수

일반적으로 실제 석탄연소 보일러에서는 연소안정성, 스팀 온도 조정 등을 위해 특별히 요구될 때를 제외하고는 과잉 공기량을 5-20%로 하고 있다. 연소용 공기 온도를 충분히 높이는 것은 특히 석탄 중 휘발분의 양이 적거나 수분함량이 높을 때 연소안정성을 위하여 중요한데, 일반적으로 200-300°C에서 운전함이 보통이다. 따라서, 시험은 실제 특정 보일러의 운전조건을 모사할 수 있도록 석탄공급량 20 kg/hr를 기준으로 해서 석탄 공급량(firing rate), 과잉공기량, 1차공기분율, 이차공기 예열온도 및 공기선회도 등을 변수로 하여, 로 내 온도분포, 화염안정성 및 오염물 배출 특성 등을 분석하였다.

2-2. 시험장치 및 방법

석탄 시험연소로의 전체 구성은 Fig. 1과 같이 크게, 석탄의 저장 및 공급장치, 연소용 공기 공급 장치, 연소로 본체, 배가스 후처리 공정 등으로 이루어진다.

연소로는, 상업화된 규모의 연소로에서 일어나는 중요한 현상의 모사가 가능한 것으로 알려져 있는 크기[7]인 내경 600 mm로서, 각 단의 높이가 400 mm이며, 총 10단으로 이루어져 있고, 각 단에는 직경 80 mm 및 150

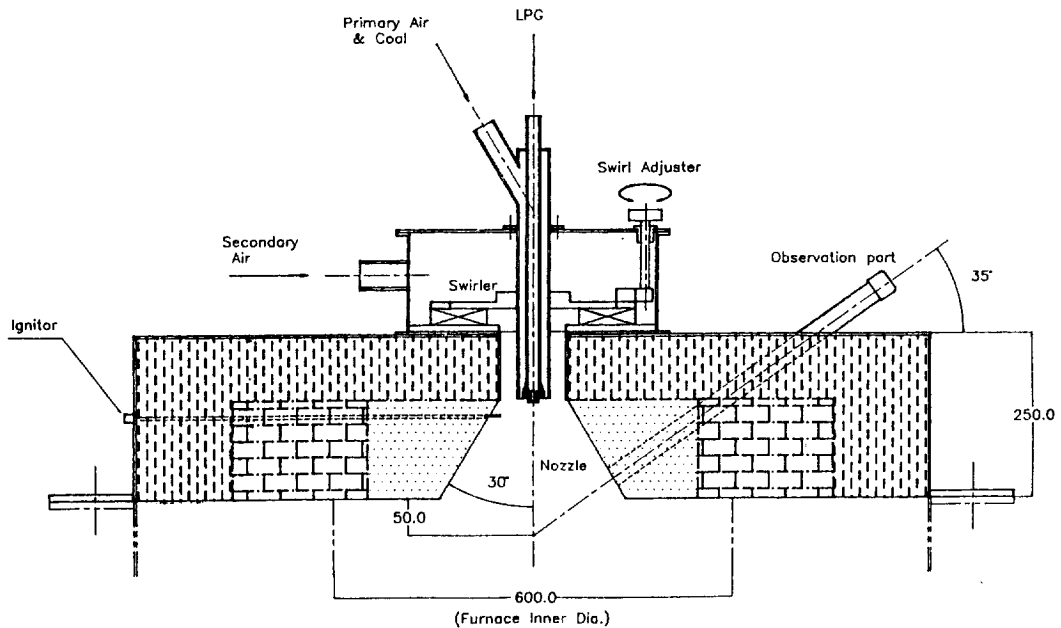


Fig. 2. Burner zone.

×150 mm의 observation port와 access port가 단중앙부에 상호 대칭으로 설치되어 있다. 사각의 access port는 slag panel 부착, 시료채취 등을 위하여 설치한 것으로 사용하지 않을 경우에는 내화물봉을 부착하여 불필요한 열손실을 방지하도록 되어 있다.

로 내 온도 분포를 파악하기 위하여 200 mm 거리마다 R 및 K type의 열전대를 마주 보이는 위치에 설치하였으며, 열전대 선단은 연소로 내벽, 연소로 내부 30 mm 지점 및 연소로 중앙부에 위치하도록 하여 벽온도와 로 내 가스온도의 분포를 알 수 있도록 하였다. 연소로 각 부위는 열손실을 조절하기 위하여 총 400 mm 두께의 내화재 및 단열재를 사용하였으며, 로 온도조절을 위하여 1단과 2단을 제외한 8개의 단에 총 75 kW 상당의 전열선을 로 내벽으로부터 100 mm되는 지점에 설치하였다. 여기서 얻을 수 있는 열량은 최대 648,000 kcal/hr로서 nominal thermal input의 약 46%정도에 이른다. 또한 연소로 출구 온도를 조절하기 위하여, 8-10단에 수냉식 냉각튜브를 로 내벽으로부터 150 mm되는 지점에 설치하였는데, 수냉관의 각 단에서의 면적은 0.9 m²이며, 19 mm(3/4인치) 스테인레스튜브를 6번 감은 형태로서 열을 제거할 수 있는 총 능력(total heat removal capacity)은 40,000 kcal/hr이다.

배가스는 연소로를 빠져나와 transition section으로 들어가는데, 이곳에서 수직하방에서 수평방향으로 바뀐다. Transition section은 길이가 1110 mm로서, 상부

로부터 470 mm 되는 지점에 convective section으로 통하는 출구와 회재를 제거하기 위한 청소구를 만들었으며, 내경 150 mm 크기의 회재처리구를 하부에 설치하였다. Convective section은 가스가 통과하는 유로의 크기가 100 mm×100 mm이고 외부는 150 mm 두께의 내화단열재로 쌓여 있는 길이 500 mm의, 두 개의 블록으로 이루어졌으며, 첫번째단에는 배가스 중의 飛灰에 의한 fouling현상 파악을 위한 공냉식 fouling probe와 soot blower를 부착할 수 있도록 하였다.

버너는 Fig. 2와 같이 IFRF type의 movable block swirl burner형식이며[8], 초기 연소로 내 착화화 가열을 위한 LPG 연소용 가스버너와 석탄 연소를 위한 coal burner, 그리고 2차공기의 공급을 위한 wind box, 선회도 조절을 위한 swirler 등으로 구성된다. 예열용 LPG의 공급은 버너 중심의 12.7mm(1/2") 파이프를 통하여 이루어지며, 노즐에 의해 로내부로 분사되어 연소가 이루어진다. 미분탄은 석탄 공급 장치에서 단위시간당 일정하게 정량적으로 공급되는데, 버너의 12.7 mm(1/2") 파이프와 그 주변 38.1 mm(1.5") 파이프 사이 공간으로 통과하여 1차공기에 의해 연소로 내로 분사된다. 이 때 2차공기는 석탄버너 주위에 설치된 swirler를 통과하며, swirl block의 조절각도에 따라 선회도가 결정되는데, 버너 출구에서 1차공기 및 미분탄들과 혼합되면서 연소가 이루어진다. 버너 화염을 관찰하기 위하여 화염관찰구에 비디오 카메라를 설치하여 제어

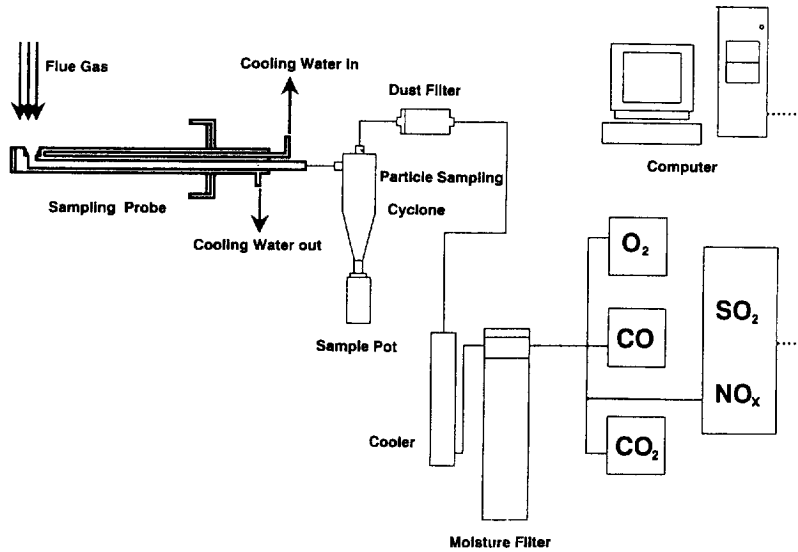


Fig. 3. Gas and ash sampling apparatus.

실에서 모니터를 통해 볼 수 있도록 하였다. 선회도 S 는 다음과 같은 식 (1), (2)에 의해 이론적으로 계산하였다 [9].

$$S = \sigma \frac{R}{2B} \left\{ 1 - \left(\frac{Rh}{R} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{Z\xi_m} \sin \alpha \frac{\cos \alpha [1 + \tan \alpha \tan(\xi/2)] (\xi/\xi_m)}{1 - [1 - \cos \alpha \{1 + \tan \alpha \tan(\xi/2)\}] (\xi/\xi_m)} \quad (2)$$

Movable block의 최대 조절각도(ξ_m)는 18° 이고, 각각의 swirl block에는 10개(Z)의 guide block이 있으며, fixed block측은 하부고정판에, 그리고 movable block측은 고정 ring에 조립, 부착하였다. S 값이 0.6보다 작은 경우 weak swirl, 0.6보다 큰 경우는 strong swirl을 형성하는 것으로 알려져 있는데[9], 본 연구에서의 선회도 조절범위는 0-1.16이다. 화염 안정성은 공기 조절 장치의 작동 범위와 원료탄의 휘발분에 의해 결정되며, 일반적으로 버너 조업 변수에 대한 함수로 하여, 불꽃이 burner quarl에서 언제 분리되는가를 판정함으로 해서 즉, flame root position을 측정함으로써 결정한다[10-14]. 이러한 lift-off height는 화염이 보이기 시작하는 온도인 가스온도 650°C 를 넘어서는 축방향 길이를 기준으로 하기도 하나[14], 본 연구에서는 flame root position을 화염온도가 공기-연료 혼합물이 버너로부터 로 내로 분사될 때, 최초로 불꽃온도가 980°C 에 도달하는 위치[10-13]로 임의로 정의하였다. Flame root position이 버너 선단으로부터의 거리에 따른 화염존재여

부를 측정하는 것이기 때문에 화염형성여부에 따라 급격한 온도상승이 생기므로, 선회도, 1차공기량의 분율, 이차공기 온도 등을 변수로 하여 화염온도가 980°C 에 도달하는 점을 노출형 k-type 열전대를 버너 중심의 LPG공급 파이프에 삽입, 10 mm 간격으로 측정하였다.

1차공기는 미분탄의 원활한 운송과 버너에서의 적절한 분사속도를 유지하기 위한 양만을 필요로 하며, 제습 후, 80°C 의 온도로 가열되어 공급된다. 완전 연소를 위해서는 추가의 공기가 필요한데, 이러한 2차공기의 선회도 조절과 1, 2차공기비율 및 예열온도 등을 바꿔서 연소상태와 화염형상을 조정하였다.

배가스는 최대 유량 $200 \text{ m}^3/\text{min}$ 인 draft fan으로 배기되는데, fan은 일정속도로 유지되지만 배가스 유량과 연소로 압력 조절을 위하여 이와 연계시켜 사용할 수 있는 damper를 fan과 열교환기 사이에 설치하였다.

미분탄의 연소시 일부는 bottom ash로서 연소로 하부에 떨어지게 되나, 나머지의 보다 미세한 비회는 배가스와 함께 연소로를 빠져나가게 되므로 비회제거를 위하여 사이클론과 습식 스크러버를 설치하여 집진과 냉각을 겸할 수 있도록 하였다.

연소로 내 배가스 또는 飛灰는 연소로 상부의 1단 및 2단에 설치된 access port 또는 convective section의 시료채취구를 통하여 Fig. 3과 같은 probe로 흡입되며, 飛灰 분리, 냉각 및 흡습과정을 거쳐 가스분석기 안으로 들어간다. 분진포집장치와 하부회재 포집장치에 포집된 飛灰 또는 회재의 미연탄소분 측정에 의해 연소율(burn-out ratio 또는 combustion efficiency)을 (3)식과 같이

Table 1. Typical analysis of Roto Coal received at KIER

Proximate analysis, %	
Moisture	13.23
Volatile matter	40.10(46.21)*
Fixed carbon	44.36(51.14)*
Ash	2.30(2.65)*
Ultimate analysis(dry basis), %	
Carbon	69.44
Hydrogen	4.78
Nitrogen	1.29
Oxygen%	21.69(difference)
Ash	2.65
Sulfur	0.15
Calorific value(dry basis)	6,430 kcal/kg
Average particle diameter(μ m) 37	
Nominal particle size, μ m	Cumulative weight, % undersize
192	100
128	99.2
96	94
64	78
48	65
32	43
24	32
12	15
6	7
2	2
1	1

*dry basis

계산하였다.

Burnout ratio(%)

$$= \frac{\text{Weight loss of total combustibles}}{\text{Total combustibles in the input coal}} \times 100 \quad (3)$$

배가스분석은 전기화학식의 Quintox flue gas analyser와 Oxygen Purity Analyser(Model OA 244 : Taylor servomex), Riken Infrared Gas Analyzer(Model RI-550 A), Riken CO/HC Infrared Emission Analyser(Model RI-503A) 등을 사용하였으며, 이밖에, O₂ 데이터 백업용으로 가스크로마토그래프를 이용하였다. 분석장비는 CO, O₂, CO₂, SO_x, NO_x의 표준가스를 이용하여 시험전에 보정 확인한 후 사용하였다.

3. 시료 석탄

당 연구에서 사용한 시료 석탄은 인도네시아산 Roto 탄으로서, 비점결탄(non-caking coal)이며, Table 1에서

보인 바와 같이 매우 적은 양의 회분을 함유하고 있으며, 원탄의 발열량은 건조중량 기준으로 6,430 kcal/kg이었다. Fuel index(=FC/VM)는 1.11로서 연소성(combustibility)은 좋을 것으로 예측된다.

4. 연소시험 결과 및 고찰

4-1. 화염안정성

보일러에서 안정한 화염을 형성시킬 수 있는 연료의 능력은 매우 중요하다. 안정성을 시험하기 위하여 1차 및 2차 공기량, 선회도를 조절함으로써 일반 연소 조건하에서 특정 석탄의 안정 조업 범위를 결정할 수 있다. 물론 연소하기 좋은 석탄이란 1차 공기량과 선회도의 넓은 변화 범위에서도 안정된 화염을 형성시킬 수 있음을 말한다. 화염안정성은 고속카메라를 이용하여 측정하기도 하나 모든 종류의 버너에 적용가능한 것도 아니어서 flame root position을 이용한 예가 많이 있다. 특히 South of Scotland Electricity Board[12]에서는 flame root position을 지표로 하여 버너들을 조정함으로써 비회 중의 탄소함량을 줄이고 platten metal temperature를 10°C 정도 낮출 수 있었음을 보고하여 flame root position 측정의 유용성을 입증한 바 있다. 석탄의 연소특성을 비교하기 위해서는 선회도를 0으로 했을 때, 화염의 탈착거리, 적정 연소 조건에서의 화염 내 온도 분포, 연소로 내 위치에 따른 고체시료의 원소분석 등의 자료가 필요하다. Payne 등[15]은 휘발분의 보유 열량과 화염안정 영역과 상관 관계가 있음을 보고하였는데, 연소 불안정 영역은 휘발분 보유 열량이 감소할수록 더 커진다고 하였다. 휘발분의 보유 열량은 휘발분 발열량과 그 양에 관계되므로 공업분석에 의한 휘발분량만으로는 상관관계를 구하기 어렵다.

석탄공급량 20 kg/hr, 과잉공기량이 10%, 20%일 때, 이차공기 온도변화(60, 100, 200, 300°C) 및 선회도(0-1.16)에 따른, 버너 노즐 선단으로부터의 거리에 따른 온도변화를 측정하여 flame root position을 측정하였다. 본 실험범위에서는 Fig. 4에 보인 바와 같이 선회도가 클수록, 예열온도가 높을수록 화염이 버너 노즐에 가까이 있음을 보여주었다.

버너영역의 quarl은 이차공기의 강한 선회에 따라 버너 출구 부위에 내부순환영역(internal circulation zone 혹은 inner zone)을 형성하는데, 이로 인해 공기와 연료의 격렬한 혼합이 일어나 짧고 안정한 화염이 만들어지게 된다.

화염이 안정된 경우에는 flame root position이 burner quarl안에 있어야 하며, 이를 벗어난다면 화염은 형성되지 않았다고 본다[10]. 또한 burner quarl안에 있

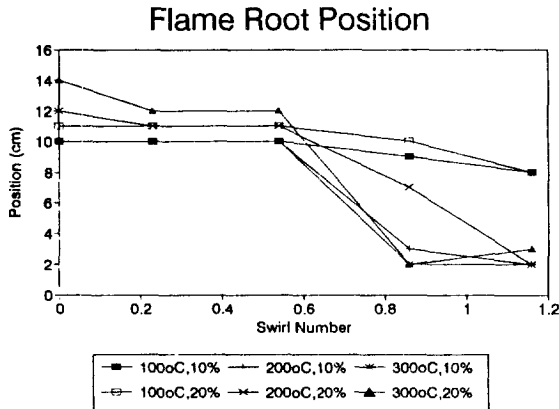


Fig. 4. Flame root position according to variation of secondary air preheat temperature, excess air and swirl number.

라도 flame root position이 버너 노즐에서 어느 정도 떨어져 있거나 pulsating 현상으로 그 값에 재현성이 없으면 불안정하다고 볼 수 있다[10]. 실제 보일러에서는 버너 출구 직경 380 mm 크기의 미분탄 버너의 경우, 버너로부터 1.2 m 떨어진 곳에 flame root가 존재한 경우가 있으며, 이차공기 조절로 20 cm까지로 줄일 수 있음이 보고되었다[12]. 화염의 안정성 여부의 기준이 되는 탈착거리는 연구자에 따라, 그리고 연소로 크기에 따라 달라지는데, 본 연소로와 비슷한 규모의 연소시스템에서 연구를 수행한 Smouse 등은 20 mm[13] 또는 100 mm[10] 정도를 기준으로 하였다. Costa 등[16]이 사용한 연소로도 본 연소로와 유사한 규모인데, 이들은 화염이 버너끝, 혹은 버너끝에 아주 가까이 붙어 있는 경우를 anchored flame이라 하여 안정하다고 보았으며, 버너에서 분리된 경우는 lifted flame으로 정의하였다. 본 연구에서는 버너 출구 끝으로부터 flame root가 30 mm 이내에 존재하는 경우는 안정, 100 mm까지는 불안정, burner quarl을 벗어난 경우(100 mm 이상)는 화염 형성이 안된 것으로 판정하였다.

과잉공기량이 10%인 조건에서 이차공기의 예열온도가 60°C 일 때, 선회도가 0.54 이하인 경우는 화염이 떨어져나가 980°C 이상이 되는 지점이 버너 선단으로부터 100 mm 이상이 되었으며, 선회도를 0.86으로 하였을 때에도 화염이 불안정함을 보여주었다. 전체적으로 볼 때, 이차공기 예열온도가 200°C 이상이면, 선회도가 0.86 이상인 경우는 버너 선단으로부터의 거리가 30 mm 이내에 화염이 형성되어 화염이 안정된 것으로 볼 수 있었다.

과잉공기량이 20%일 때는 선회도가 0.86 이상, 예열공기온도 300°C 인 경우에 비교적 안정된 화염이 형성

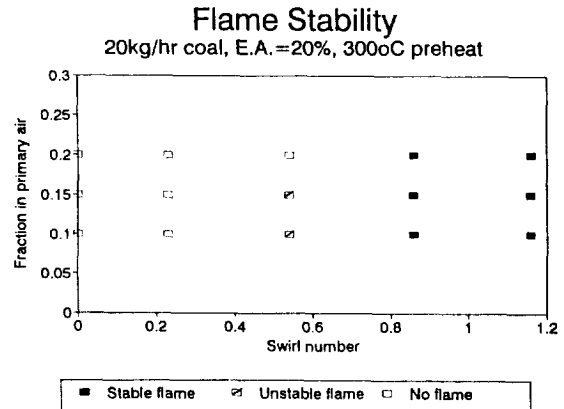


Fig. 5. Flame stability with the variation of primary to total air ratio.

(■ Stable flame □ Unstable flame □ No flame)

됨을 보여 주었다. 이는 총 공기에 대한 1차 공기 비율을 일정하게 하였을 때, 과잉공기량이 커지면 1차 공기의 선속도가 커지며, 이에 따라 화염이 탈착하기 쉬워 2차 공기의 선회도를 크게 하고 이차공기의 예열온도를 올려 2차 공기의 선속도를 증가시켜야 화염이 안정됨을 의미하고 있는 것이다.

석탄공급량 20 kg/hr, 과잉공기비 20%, 공기에열온도를 300°C로 하였을 때, 1차공기량을 총 공기 공급량의 10%, 15%, 20%로 바꾸면서 선회도에 따른 화염안정성 측정 결과를 Fig. 5에 보였다. 1차공기량을 늘리게 되면, 입자가 버너 선단의 inner recirculation zone에서의 체류시간이 적어지게 되어 penetrate하는 성향이 크게 되므로 화염은 불안정해진다. 선회도가 0.23인 때에는 1차공기량 변수 범위에서는 화염이 노즐에서 크게 분리되는 현상을 보여 주었으며, 0.54인 경우는 1차공기량이 10%, 15%일 때 불안정하게나마 화염이 형성되었다. 0.86 이상의 선회도에서는 매우 안정한 화염이 형성되었다. 일반적으로 1차공기의 비율을 크게 하면 1차 공기 속도가 커져서 화염이 불안정해지며, 이 때 2차 공기의 선회도를 크게 하면 화염이 안정되는 경향을 나타내 준다.

화염이 버너 선단에서 떨어져 나가는 길이(lift-off height)는 가스연료의 경우에는 flame extinction model을 써서 예측되기도 하였는데[17, 18], 미분탄의 경우도 화염안정성이 1차적으로는 석탄입자의 휘발과정에서 나오는 가스상의 흐름 및 열적 조건에 의존하기 때문에 위 모델의 적용이 가능하다고 보고있기는 하나[14], 화염안정성에 큰 영향을 주는 near burner region을 모델에서 정확히 재현하는 것이 어렵다는 문제점이 있다. Flame extinction model을 써서 Anagnostopoulos 등

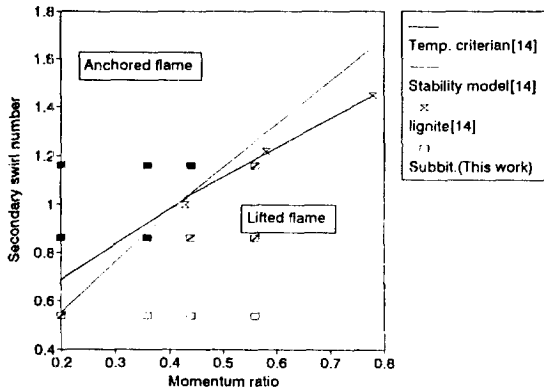


Fig. 6. Comparison of stability performance with other results[14].

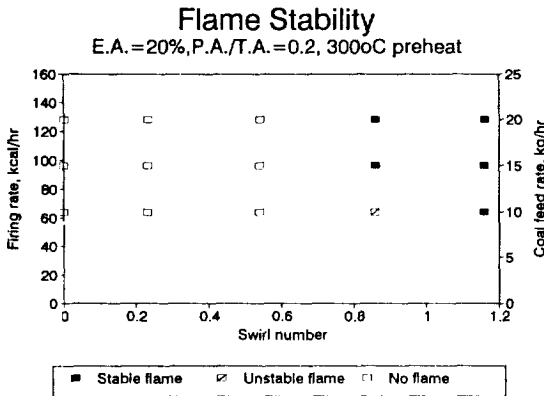


Fig. 7. Flame stability according to coal firing rate.

[14]은 화염의 분리 여부를 이차공기 선회도와, 공급되는 석탄과 1차공기와 2차공기의 momentum ratio를 변수로 하여 나타낸 바 있는데, 이들은 온도기준으로 나타내는 것이 더욱 정확하다고 제시하였다. 본 연구 범위에서의 연구결과를 이들이 제시한 모델 결과와 비교한 것을 Fig. 6에 보였는데, 온도기준에 의한 분리 기준과 잘 일치하고 있음을 보이고 있다.

특정 석탄의 조업안정성을 제시하는 또다른 지표는 부하를 감소시킬 수 있는 능력이다. 즉, 부하량을 줄여도 안정한 화염을 형성할 수 있는지의 여부가 중요하다. Fig. 7은 과잉공기량 및 1차 공기비율을 각각 20%로 하고, 300°C로 2차공기를 예열 공급하였을 때, 석탄공급량 및 선회도 변화에 따른 화염 안정성을 보인 것이다. 석탄 공급량이 75%로 줄게 되면 선회도 0.86이상이면 안정한 화염을 형성하였으며, 50%로 감소시켰을 때에는 선회도를 1.1로 높여야 안정한 화염이 형성되었다. 이와같은 경향은 Costa 등[16]이 보고한, 화염안정성이

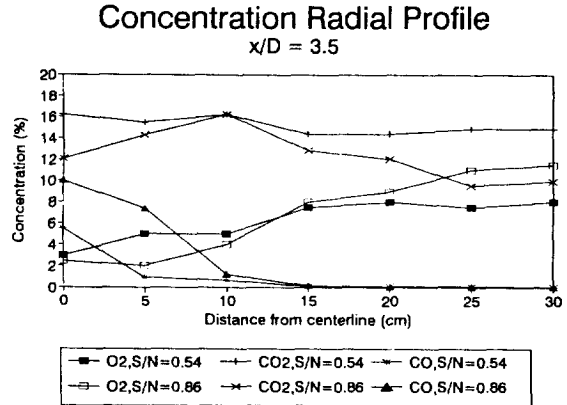


Fig. 8. Gas concentrations with radial distance at $x/D = 3.5$.

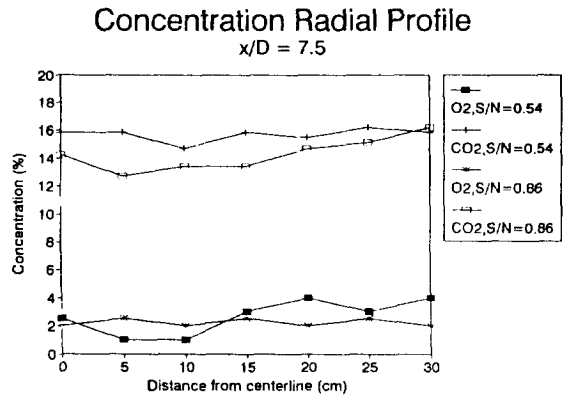


Fig. 9. Gas concentrations with radial distance at $x/D = 7.5$.

2차공기 선회도(0-1.5), 연료공급량(10.5-20 kg/hr) 및 과잉공기량(15%, 25%)을 크게 할수록 안정된다는 연구결과와 일치하는 것이다. 그러나, 1차공기와 2차공기의 momentum ratio를 감소시킴으로서 화염이 안정되기는 하지만 선회도를 너무 크게 하면 internal recirculation zone에서의 입자체류시간이 작아져 flame stability를 유지하기에 불충분할 수 있다.

4-2. 로 내 가스 분석

과잉공기비를 20%, 선회도를 0.54 및 0.86으로 하였을 때 1단($x/D = 3.5$) 및 2단($x/D = 7.5$)에서 측정한 반경 방향에 따른 산소, 이산화탄소 및 일산화탄소의 농도변화를 Fig. 8과 9에 보였다. x/D 가 3.5일 때, 중심부(central jet 부분)의 CO 농도는 Fig. 8에서 보인 바와 같이 선회도 0.86인 경우가 0.54일 때 보다 더욱 크며, 외부영역으로 갈수록 산소의 체류시간 크기가 충분해지므로

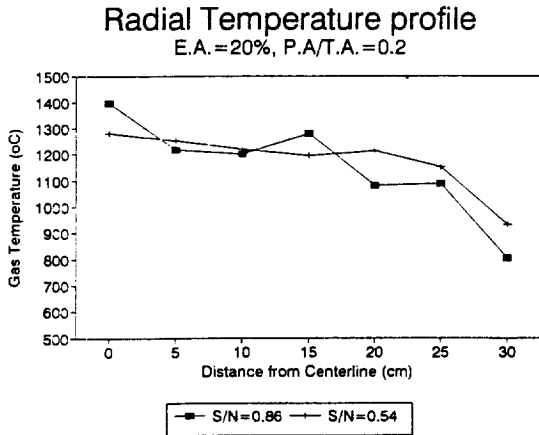


Fig. 10. The effect of swirl number on radial distribution of gas temperature at $x/D=3.5$.

CO의 농도는 작아진다. 또한 CO₂ 농도와 산소 농도 분포를 보면 선회도 0.54일 때에는 선회도 0.86과 비교하여 볼 때, 외부에서 연소반응이 더 잘 일어남을 보여 주었다. 0.54일 때는 0-150 mm까지는 inner zone으로서 대부분의 반응이 일어나는 영역이며, 150 mm 이후는 일정한 분포를 보여 반응이 일어나지 않는 external recirculation zone임을 보여 주고 있다. 하지만, 선회도가 0.86일 때에는 inner zone이 광범위하여 반경 250 mm 까지 반응이 활발히 일어나고 있음을 보여 준다. Fig. 9를 Fig. 8과 비교하여 보면, x/D 가 커질수록 즉 버너 노즐에서 멀어질수록 로 반경방향으로의 반응 영역이 central jet의 확장때문에 넓어짐을 알 수 있다.

4-3. 로 내 온도분포와 배가스분석

$x/D=3.5$ 에서 측정된 선회도에 따른 반경방향 온도 분포를 Fig. 10에서 비교하였는데, 앞서 설명한 바와 같이 inner zone은 선회도가 0.86일 때 더 큼을 보여주고 있다. 반경방향 가스 온도분포는 BT-31R 소모형 열전대(우진계기)를 이용하여 측정하였는데, 이 방식에 의해 측정된 온도는 원하는 온도측정지점에 위치한 후 일정 시간(30초) 경과된 후에 읽혀지는 값을 기준으로 하였다.

과잉공기량 20%인 조건에서, 선회도 변화에 따른 배가스 중의 NO_x 농도를 Fig. 11에 보였는데, 선회도가 0.54-0.86의 범위에 있을 때 배가스 중의 NO_x 농도가 가장 낮음을 보여 주었다. 석탄 연소의 경우 배가스 중 NO_x 농도 규제치가 500 ppm으로서 0% O₂기준으로 보면 600 ppm수준이므로 선회도 0.54-0.86에서는 규제치를 충분히 만족한다. 본 연구에서의 결과는 unstaged combus-

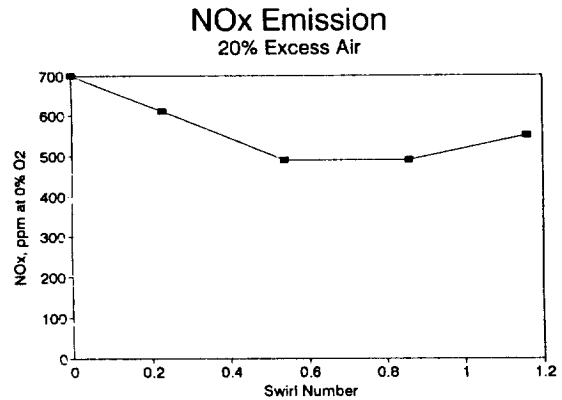


Fig. 11. The effect of swirl number on NO_x emission.

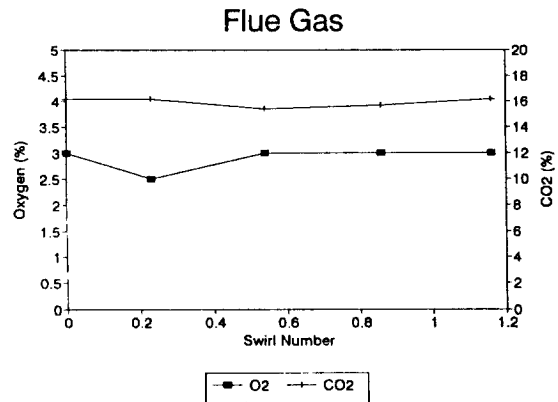


Fig. 12. Oxygen and CO₂ concentrations in the flue gas according to swirl number.

tion condition에서의 결과로서, 동일 조건에서의 타 연구자들의 결과와 유사하다. 즉, 최 등[19]은 Pasir탄, Ulan탄 연소시 20% 과잉공기 상태에서 선회도가 낮으면 (0.25) NO_x 발생량이 많고(560-660 ppm) 선회도가 2.5 까지 커지면 NO_x 발생량이 450-500 ppm 수준으로 감소하는 경향을 보인다고 발표한 바 있고, Smouse 등 [13]도 과잉공기량 20%인 조건에서 역청탄의 연소시에 배가스 중 NO_x 배출량은 선회도가 0에서 0.5로 증가할 때에는 0% O₂기준으로 850 ppm에서 800 ppm수준으로 감소하나, 선회도가 2.0까지 증가함에 따라 1000 ppm 수준으로 약간씩 증가하는 경향을 보고하였다. 한국에너지기술연구소에서 연구한 바에 의하면, 혼합탄의 경우 각 원료탄의 혼합비율에 따라라도 NO_x 발생에 미치는 선회도의 영향도 차이가 있음을 보인 바 있어[1], 성상이 매우 다를 수 있는 석탄 연소의 경우 NO_x 발생량은 동일 연소조건에서는 fuel nitrogen과 휘발분 함량에

관계가 있으며, 동일탄종이더라도 연소조건에 따라 달라진다[15]는 것이 일반적인 견해이다. 또한 저 NO_x 버너나 단계적 연소기술로 연소분위기를 조정함으로써 NO_x 저감에 상당한 효과를 볼 수 있으며, 단계적 연소 기술로는 air staging과 fuel staging의 방법이 있다. 3차공기 공급에 의한 단계적 연소 방식으로 Collinsville 탄의 경우 500 ppm에서 240 ppm으로, Alaska탄은 800 ppm에서 380 ppm으로 감소시킬 수 있음이 보고된 바 있어[20], 차후 NO_x 규제치 강화를 예상하여 볼 때 이러한 기술의 적용 필요성이 이 더욱 커지고 있다. 본 연구에서는 선회도 변화에 따른 배가스 중의 이산화탄소 농도는 Fig. 12에서 보인 바와 같이 거의 변화가 없었는데, 탄종에 따라서는 그 변화가 클 수도 있다[19].

4-4. 연소율

미연분이 약간만 있어도 소요 연료 비용이 증가하게 되는데, 0.5%의 미연분은 500 MW 용량의 발전소에서는 연간 약 20만 \$ 이상의 연료비용이 더 든다[15]. 보통 시험 연소로에서의 연소율은 실제 보일러와 거의 유사한 수준인 99% 이상인데, 보통 fuel index(=FC/VM)의 비로 연소율을 예측하기는 하나 그 관계가 그리 뚜렷한 것은 아니다. 실험이 끝난 후 각 飛灰 포집장치에서 포집된 飛灰분석 결과를 보면, 회분함량은 bottom ash 58%, cyclone ash 66%, scrubber ash 80%로서, 포집된 양과 회분 함량으로 볼 때, 본 실험 범위에서 평균 98%이상의 연소율을 보였다. 10 kg/hr 규모의 연소로에서 Ulan탄 연소의 경우 94-97%, Pasir탄의 경우 99.8-97%의 연소율을 보인 바 있고[19], 실험조건에 따라서는 이 보다 낮은 수치를 보이기도 한다[20]. 본 연소로와 비슷한 규모의 연소로에서 Smouse 등[10]도 95%를 상회하는 연소율을 모든 실험 범위에서 보여 주었는데, 탄종에 따라 연소율을 높일 수 있는 연소 조건을 만들어 주어야 할 필요성이 있다.

지금까지 많은 연구자들이 이론적 접근에 의한 수치 해석 방법으로 시험연소로에서의 온도, 가스 농도 분포 및 lift-off height 등의 실험결과를 예측 및 비교 분석하고자 하는 노력이 있어 왔으나, 국내에는 아직 미흡한 실정에 있다. 실제 상용 연소로를 모사하기 위한 접근 방법으로 본 연구에서 설계 제작된 연소로는 연소 중 처리, 배연처리, 버너 등의 연소기기 개발, 집진기 개발 등 다양한 분야에서도 이용 가능하며, 이를 이용한 다각적인 연구가 수행될 수 있게 되기를 기대한다.

5. 결 론

국내에 수입되고 있는 인도네시아 Roto탄을 선정하여

연소특성 평가를 실시한 결과 연소 효율은 본 연구범위에서 평균 98% 수준 이상이였다. 과잉공기량이 10%일 때, 이차공기 예열온도가 200℃ 이상이면서 선회도가 0.86 이상인 경우에는 화염이 안정된 것으로 볼 수 있었으며, 노즐 선단으로부터의 거리가 30 cm이내에서 화염이 형성되었다. 과잉공기량이 20%일 때는 공기에열 온도 300℃, 선회도가 0.86이상인 경우 안정된 화염을 보였다. 전체적으로 선회도가 클 때, 그리고 공기에열 온도가 높을 때 화염이 안정됨을 보여주었다. 선회도에 따른 배가스 중의 NO_x 농도는 선회도가 0.5-0.9일 때 비교적 낮은 값을 보였으며, 선회도에 따른 배가스 중 산소농도 및 이산화탄소의 농도변화는 거의 없었다.

감 사

본 연구는 미국의 DOE 산하 PETC와의 국제공동과제 결과의 일부로써, 과학기술처의 연구지원으로 이루어진 것입니다.

사용기호

- B : the thickness of guide block, 25 mm
- D : diameter of secondary air tube(burner nozzle), 95.6 mm
- R : exit radius of the burner nozzle(=D/2), 47.8 mm
- Rh : radius of inner pipe, 24.3 mm
- S : swirl number, defined by Eq. (1)
- x : axial distance from burner throat, mm
- Z : number of guide block, 10

그리스 문자

- α : vane angle, 55°
- ξ : the angle of adjustment of the swirler, 0-18°
- ξ_m : the maximum adjustable angle of the swirler, 18°
- σ : coefficient, defined as Eq. (2), which is the ratio of the average tangential and radial velocity components at the swirler exit

참고문헌

1. 손웅권, 최상일, 이시훈, 현주수, 최원길, 박주식, 박철우, 임영준, 김성완, 백남주 : "유연탄 발전소의 국내탄 혼소 특성 연구", 한국에너지기술연구소 보고서, KE-92005T, 석탄합리화사업단(1993).
2. Kwon, H. B., Sim, K. S., Son, J. E. and Son, Y. M.: in the Proceedings of 8th Korea-USA Joint Work-

- shop on Coal Utilization Technology, Oct. 29-30, Seoul, PII-23(1991).
3. Smart, J. P. and Nakamura, T.: *J. Inst. Energy*, **66**, 99(1993).
 4. 김종원, 심규성, 손영목, 박주식, 이상호, 명광식, 박기배: "석탄의 연료특성 평가방안 연구(III)", 한국에너지기술연구소 보고서, KE-920185, 과학기술처(1993).
 5. Unsworth, J. F., Barratt, D. J. and Roberts, P. T.: "Coal Quality and Combustion Performance-an International Perspective", Elsevier, Amsterdam (1991).
 6. Higgins, R. S. and Morely, W. J.: "International Register of Experimental Furnaces Associated with Combustion and Combustion Related Processes. Issue No. 3", Herman Research Laboratory, State Electricity Commission of Victoria(August, 1985).
 7. Godoy, S., Hirji, K. A. and Lockwood, F. C.: *Combust. Sci. Technol.*, **59**, 165(1988).
 8. Chedaille, J. and Braud, Y.: "International Flame Research Foundation-Industrial Flames. Vol. 1. Measurement in Flames", Edward Arnold(1972).
 9. Beer, J. M. and Chigier, N. A.: "Combustion Aerodynamics", John Wiley & Sons, Inc., New York (1972).
 10. Smouse, S. M. and McIlvried, T. S.: in Proceedings of 7th U.S.-Korea Joint Workshop on Coal Utilization Technology, pp. 123-134, Aug. 26-29, Pittsburgh, U. S. A.(1990).
 11. Scotter, J. G.: "Guidelines for Fireside Testing in Coal-Fired Power Plants", EPRI report No. CS-5552, (1988).
 12. Plant Test and Efficiency Section, "Cockenzie Power Station; Flame Root Temperature Survey", Report NO. TE/83.14, South of Scotland Electricity board, (1983).
 13. Smouse, S. M., Ekmann, J. M. and McIlvried, T. S.: in Proceedings of 6th U.S.-Korea Joint Workshop on Coal Utilization Technology, Oct. 16-18, Seoul, Korea(1989).
 14. Anagnostopoulos, J. S., Sargianos, N. P. and Berges, G.: *Combust. Flame*, **92**, 209(1993).
 15. Payne, R., Pohl, J. H., Lee, J. and Heap, H. P.: in the Proceedings of Engineering Foundation Conferences, Copper Mountain, Colorado, July 29-Aug. 3, 169(1984).
 16. Costa, M., Costen, P. and Lockwood, F. C.: *J. Inst. Energy*, **64**, 64(1991).
 17. Chakravarty, A., Lockwood, F. C. and Sinicropi, G.: *Combust. Sci. Technol.*, **42**, 67(1984).
 18. Lockwood, F. C. and Megahed, I. E. A.: *Combust. Sci. Technol.*, **19**, 77(1978).
 19. 최상일, 이시훈, 박주식, 임영준, 김성완, 백남주: "인도네시아 Pasir탄의 미분탄 연소 특성", 한국에너지기술연구소 보고서, KE-93001T, 한국중공업주식회사(1993).
 20. 김영대, 손웅권, 최상일, 김형택, 현주수, 박철우, 박주식, 김성완, 임영준, 장동순: "미분탄의 연소특성 및 공해저감 대책 연구(III)", 한국에너지기술연구소 보고서, KE-91(T)-26, 과학기술처(1991).