

발전용 역청탄 및 아역청탄의 파일롯 연소특성 평가

김현희 · 박호영[†] · 임현수 · 백세현 · 김태형 · 김영주 · 공지선 · 이정은
한전 전력연구원 연료연소그룹

(2014년 7월 15일 접수, 2014년 12월 10일 수정, 2014년 12월 12일 채택)

Combustion Characteristics of Imported Bituminous & Subbituminous Coal in a Pilot Scale Test Facility

Hyunhee Kim · Hoyoung Park[†] · Hyunsoo Lim · Sehyun Baek
Taehyung Kim · Youngju Kim · Jiseon Gong · Jeongeun Lee

Fuel & Combustion Group, Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

(Received 15 July 2014, Revised 10 December 2014, Accepted 12 December 2014)

요약

고급탄의 고갈에 따라 석탄화력발전소에서의 저급탄 혼소가 필수불가결하게 되었다. 본 연구에서는 국내에서 수입되는 석탄 중에서 대표적으로 사용되는 역청탄과 아역청탄에 대한 연소특성을 0.7MWth 파일롯 연소실험장치를 사용하여 측정, 분석하였다. 과잉공기비가 1.2인 상태에서 축방향 및 반경방향의 노내 가스온도 및 주요 가스농도를 측정하였으며, 역청탄 연소시 반응로 내의 입자 샘플링을 수행하였다. 두 탄종의 주반응영역은 노 상부의 스월버너로부터 약 1m 근방에서 형성되었으며, 노 하류에서는 완전 확립된 온도와 농도분포를 나타내었다. 포집된 역청탄의 고체입자 분석으로부터 주반응영역 이후에 완전한 탄소전환이 이루어진 것을 확인하였다.

주요어 : 석탄연소, 역청탄, 혼합, 연소, 잔류탄소, 파일롯 실험설비, 탄소전환율

Abstract - With the depletion of high grade coal, it is indispensable to be used co-combustion of low rank coal with bituminous coal in pulverized coal-fired power plants. This study describes the detailed measurements of combustion characteristics of bituminous and subbituminous coal in a 0.7MWth pilot-scale test facility. This experimental works include the measurement of gas temperature, gas concentrations along with the reactor axial and radial distance at the condition of excess air ratio of 1.2. The solid sampling was carried out and analyzed with the combustion of bituminous coal. The main reaction zone of coal flame in a reactor was formed about 1 m from the swirl burner, and at downstream, the fully developed temperature and species distribution was observed. The sampled particles of bituminous coal in a reactor revealed the complete carbon burn-out was achieved just after a main combustion zone.

Key words : Coal combustion, Bituminous coal, Pilot scale test facility, Carbon burn-out

1. 서 론

에너지 위기로 인하여 발생한 연료비 급등과 고품질 석탄에 대한 수급 불안정으로 발전소의 연료수급

상황에 해마다 어려움이 발생하면서, 비교적 가채매장량이 풍부한 저급탄에 대한 관심이 커지고 있다. 이에 따라 국내발전소들은 발전원가를 절감하기 위하여 다양한 석탄을 전략적으로 도입함으로써 비용을 절감하고, 안정적인 전력생산을 위하여 설비별 특성에 맞추어 저급탄의 혼소발전을 실시하고 있다.

국내에 수입되고 있는 저급탄은 주로 아역청탄

[†]To whom corresponding should be addressed.
Korea Electric Power Research Institute, KEPCO
Tel : 042-865-5602 E-mail : bakhohi@kepco.co.kr

계열의 탄종으로 매장량이 풍부하고 가격이 저렴하지만, 수분과 휘발분이 높고 발열량과 회분은 적은 경향을 나타내고 대체로 회의 용점이 낮아 슬래깅 문제가 대두되고 있다. 이러한 저급탄이 공급됨에 따라 발전효율 및 성능을 유지하기 위하여 운전 및 연소최적화 연구가 필수적이고, 설비의 안정적인 운전과 계통 보호를 위하여 탄종별 연소특성을 이해하고 혼탄시 나타나는 선형적인 특성과 비선형적인 특성에 대한 연구가 필요하다. 탄종별 연소특성에 대한 이상적인 방법은 실제 운영되는 발전소별로 탄종 변화, 운전변수 변화실험을 시행하는 것이지만, 이 경우 많은 비용과 시간이 소모되는 물론이고 설비측면의 리스크가 수반되어 넓은 범위의 실험조건 구현이 어려운 문제점이 있다. 또한 실제 설비에서는 주반응영역 등 고온부 단면의 각 위치에서의 온도, 가스 조성, 회 조성 등은 계측기 설치하는 물론이고 신뢰도 있는 계측방법 또한 불가능하기 때문에 실질적인 접근 방법이 되지 못한다.

파일럿 규모의 연소특성 실험은 적은 비용과 시간을 투입하여 다양한 극한 상황까지의 실험조건을 구현하고, 실험 중 화로내부의 단면위치별 정밀 계측을 통하여 단탄 특성에 대한 폭넓은 연구를 시행할 수 있어 전 세계적으로 비교적 많은 시도가 있어왔다.^[1~6] 파일럿 실험설비를 활용한 연소특성 실험을 통하여 설비의 안정적 운영을 위한 적절한 혼탄 기준을 제시하기 위한 단탄의 연소특성 평가 및 설비영향성을 파악할 수 있다.

본 연소실험은 저급탄 혼소를 위한 최적 연소기술 개발을 위하여, 국내 수입 탄종 중 대표적인 고급탄과 저급탄을 대상으로 단탄 연소시 발생하는 연소특성 분석을 위하여 0.7MWth 파일럿 연소실험모에

서의 연소특성 데이터 취득에 목적을 두었다. 본 연구를 통하여 단탄 연소시 미연분 및 환경오염 물질의 발생과 연소특성 등을 측정하였다. 다양한 탄종 및 운전조건에 대한 연소실험을 통하여 석탄 연소특성을 분석하고, 취득한 실험데이터를 활용하여 시험연소와 동일한 전산유체해석 프로그램의 연소시뮬레이션과 비교, 검증하여 연소 해석의 정밀도를 제고하는데 활용될 것이다.

2. 실험

2-1. 실험 연료

본 연구에서 사용한 탄종은 역청탄인 Suek탄(러시아)과 아역청탄인 Adaro탄(인도네시아)으로 공업분석(Proximate Analysis)과 원소분석(Ultimate Analysis)에 대한 기초물성 분석 결과를 Table 1에 나타내었다.

2-2. 파일럿 연소설비

본 연구에서 사용한 시험설비의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 0.7MWth 파일럿 시험연소로 설비는 연소와 관련된 발전시스템의 주요 공정에 관한 모사가 가능하도록 구성되어있고, 미분탄을 최대 100kg/hr로 연소할 수 있도록 설계/제작되었다. 석탄 취급 및 분쇄, 연소로, 연소가스 냉각, 연소가스 처리 시스템으로 구성되어있으며, 연소생성물의 조성을 측정하기 위한 분석기들과 실험설비를 감시하고 통제할 수 있는 제어시스템을 갖추고 있다.^[7]

시험연소로 설비는 크게 반응로 본체, 연료공급계통, 연소용 공기공급계통, 배가스 처리부(열교환기 및 스크러버), 샘플링 계통, 제어계측 시스템 등으로 구성된다. 설비의 개요도를 보면 크게 석탄취급 및 분

Table 1. Properties of Suek and Adaro coals

Coal	Suek	Adaro
Proximate Analysis (as received, wt.%)		
Fixed Carbon(FC)	45.70	43.08
Volatile Matter(VM)	36.40	39.99
Ash	14.30	2.61
Moisture	3.60	14.32
HHV(kcal/kg)	6397	5814
Ultimate Analysis (as dry, wt.%)		
C	67.23	71.00
H	4.64	4.90
O	11.24	19.48
N	1.62	1.41
S	0.45	0.16
Ash	14.82	3.05



Fig. 1. Schematic Diagram of 0.7MWth Coal-fired Pilot

쇄, 연소로, 연소가스 냉각, 연소배가스 처리시스템으로 나눌 수 있고, 이외에 가스분석기와 연소로 운전 제어시스템이 구축되어있다. 미분탄 공급시스템은 석탄 분쇄설비 및 버너로 공급하기 위한 스크류 Feeder 형식의 이송 시스템을 갖추고 있다. 배가스 냉각시스템은 가스냉각기, 냉각탑, 냉각수 펌프로 구성된다. 냉각수 공급용량은 시간당 400ton이고, 가스냉각기는 다수의 수냉식 열교환기로 구성된다. 열교환으로 승온된 냉각수는 냉각탑을 통하여 일정한 온도로 냉각된 후 저수조로 보내진다. 연소가스 처리시스템은 전기집진기, I.D Fan, 탈황설비 등으로 구성되며, 연소가스의 대기오염물질을 제거한 후 연돌을 통하여 대기로 배출된다.

연소로 본체는 원통형으로 최상부에 미분탄 버너가 부착되고, 버너의 중심부에는 승온시 사용되는 파일롯 가스버너가 장착되어 있다. 연소로 내부는 지름이 1,500mm이고 3단의 몸통부는 내부를 기준으로 120mm 두께의 내화물과 수냉식 자켓이 있어, 연소열을 추출함으로써 연소로 내부온도를 일정하게 유지할 수 있다. 연소로 출구부 아래에는 Bottom Ash Hopper가 설치되어 있고, 버너 끝에서부터 연소로 출구부까지 거리는 4,750mm이다.

2-3. 실험방법 및 조건

역청탄인 Suek탄(러시아)과 아역청탄인 Adaro탄(인도네시아)에 대하여 각 탄종마다 공기비(Stoichiometry) 1.2 조건에서 실험을 진행하였다. 실험 전후 가스분석기의 표준가스 분석을 통하여 실험 결과의 오차를 최소화하였으며, 실험운전 조건은 650kW 출력을 기준으로 탄의 발열량과 기초 물성분석 자료를 근거로 Total heat duty를 구하고, 이 값을 기준으로 석탄공급량을 결정하였다. 또한 실험조건에 따른 이론공기량을 기준으로 송풍기별 부하-유량 곡선을 활용하여 연소용 공기공급량을 결정하였으며, 1차 공기는 250℃, 2차 공기는 300℃로 예열하여 연소로에 공급하였다.

Table 2. Experimental Conditions

Coal	Coal Flow (kg/hr)	Primary Air Flow (m ³ /hr)	Secondary Air Flow (m ³ /hr)	Primary Velocity (m/s)	Tangential Velocity (m/s)	Axial Velocity (m/s)	Excess Air Ratio
Suek	73.08	49.06	540.25	9.71	12.51	17.93	1.2
Adaro	80.41	54.20	586.71	10.73	13.27	19.02	1.2

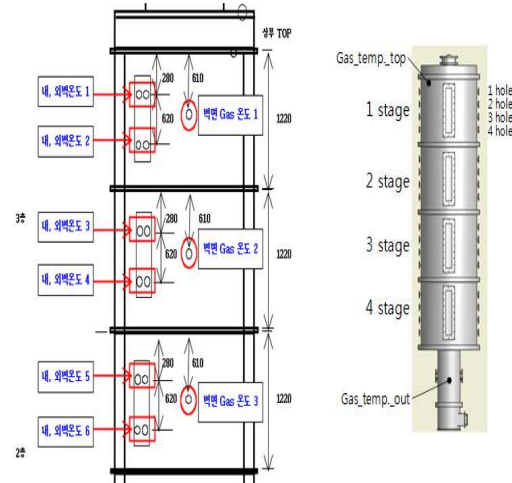


Fig. 2. Schematic Diagram of 0.7MWth Coal-fired Pilot

Fig. 2는 본 연소로의 외부 구조와 각종 상태량의 측정 위치를 나타낸다. 본 연구에 사용된 버너는 접선방향 스윙버너(Tangential Swirl Burner)로써 베인 각을 45°로 고정하여, 이 때의 2차 공기량을 기준으로 접선 측방향 속도를 Table 2에 나타내었다.^[8] 연소로의 각 단(Stage)은 1,220mm 간격으로 구분되어 있으며, 네 개의 단과 네 개의 홀(Hole)로 구성되어있다. 본 연구에서는 반응로의 길이별로 반경방향에 대하여 가스농도를 측정하고, 입자를 포집하기 위한 샘플링 포트는 온도측정 포트와 동일한 높이에 위치하였다.

가스온도 및 농도측정 실험은 1단 2홀(x=0.48m from top), 1단 4홀(x=1.08m), 2단 3홀(x=2m), 3단 2홀(x=2.92m)에서 실시되었다. 고체입자 샘플링 프로브는 연소 중 가스농도를 측정하고 입자를 포집하기 위한 것으로 노내 중심으로부터 반경방향으로 r=0m, 0.15m, 0.3m, 0.45m, 0.6m로 이동시키면서 Suction Pyrometer를 사용하여 가스온도 및 농도 측정을 실시하였다. 고체입자의 연소특성을 파악하기 위하여 실험 후 원소분석을 실시하여 샘플링 된 고체입자의 탄소전환율을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 노내 가스온도 분포

실험결과 과잉공기비가 1.2일 때 위치별로 최대 가스온도의 분포를 비교하면, 대체로 Suek탄을 연소하였을 때 가스온도가 높게 나타났다. 이는 Adaro탄에 비하여 Suek탄이 수분을 적게 포함하고 있기 때문에 증발에 의한 잠열로 인한 온도강하 효과가 작게 나타난 것으로 판단된다. 또한 두 탄종 모두 1단에서 높은 온도를 나타냈으나, 노의 하단으로 갈수록 낮은 온도를 나타냈다. 따라서 주반응영역은 버너 팁으로부터 45cm (1단 2홀)의 버너와 인접한 노의 중앙에서 형성된 것으로 볼 수 있으며, 노의 하단으로 갈수록 반경방향으로 가스온도가 고르게 분포되어 있는 결과를 나타내었다.^[8] Adaro탄 연소시 노의 상부 중심에서 급격히 낮은 가스온도를 나타내다가 버너 팁으로부터 108cm(1단 4홀)에서 가장 높은 가스온도를 나타내는 것으로 볼 때 Adaro탄의 주반응은 1단의 하단에서 이루어졌음을 알 수 있다.

3-2. CO, O₂, & CO₂ 가스농도 분포

탄종별 화로의 위치별로 CO, O₂, CO₂의 가스농도 분포를 비교하였다. 실험은 노내 중심에서 반경방향으로 Suction Pyrometer를 이용하여 가스농도를 측정하였다. 공기비가 1.2일 때 충분한 연소용 공기로 인하여 CO농도는 거의 0%에 가까운 값을 보였다. 이는 완전연소가 이루어져 잔류 CO가 점차 CO₂로 전환되어 CO농도가 감소된 것으로 볼 수 있다. 전체적으로 주반응영역인 버너 주변의 화로 중심부에서 일시적으로 높은 CO농도를 나타내지만, 노 하부나 주변부로 갈수록 점차 농도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 일반적인 경우에는 최종적인 CO농도는 역청탄 계열이 높은 경향이 있으며, 국부적으로 주반응영역에서는 휘발분이 높은 아역청탄 계열에서 일시적으로 높게 나타나는 경향이 있을 수 있다. 대체로 Adaro탄이 Suek탄에 비하여 높은 CO농도를 나타내어 불완전연소가 이루어지는 것을 알 수 있으며, 이는 Adaro탄이 상대적으로 많은 수분을 포함하고 있어 연소성을 저하시키기 때문인 것으로 보인다.

O₂농도 분포는 대체로 버너 상부로부터 2m(2단 3홀)까지는 주반응영역인 화로 중심부에서 빠른 연소가 발생되어 농도가 가장 낮았으며, 반경방향으로 노

의 중심부에서 멀어질수록 농도가 높아지는 경향을 보였다. Suek탄의 O₂농도는 약 2% 이하로 나타났고 Adaro탄은 6% 전후의 값을 나타냈다. 이는 Adaro탄의 연소시 계산된 이론연소량을 기반으로 연소용 공기를 투입하였으나, 연료 중의 O성분과 수분 함량으로 인하여 연소용 공기를 더 많이 투입한 효과가 나타났다기 때문에 볼 수 있다.

CO₂농도 분포는 주반응영역인 화로 중심부에서 높게 나타나고, 대체로 반경방향에 대하여 고르게 분포된 결과를 나타냈다. CO₂농도 분포는 CO농도 분포와 대체로 상반되는 결과를 나타내고 있어, 잔류 CO가 점차 CO₂로 전환된 것임을 알 수 있다.

3-3. NO & SO₂ 가스농도 분포

탄종별 화로의 위치별로 NO와 SO₂의 가스농도 분포를 비교하였다. 대체로 배기가스 중의 질소산화물은 석탄연료 중의 질소함량과 노내 온도에 따라 생성량이 달라진다. 연소과정에서 NO_x의 생성은 연소 중 발생된 고온의 열에 질소 성분이 체류 산화되어 발생하는 Thermal NO_x와 연료 중의 유기질소 성분으로부터 생성되는 Fuel NO_x로 분류할 수 있다. 고온영역에서 발생하는 Thermal NO_x의 생성은 화로 내의 온도가 주로 영향을 미치게 된다. NO가 가장 많이 발생하는 부근은 화염 영역과 일치하며, 공기비가 1.2인 조건에서 가스온도가 높게 나타난 것과 같은 경향으로 NO농도가 현저히 높게 나타나는 것으로 관찰되었다. 상대적으로 수분을 적게 포함하고 있는 Suek탄이 화로 내에서 가스온도가 높게 나타므로, 이때의 NO농도 또한 높은 것을 확인할 수 있으며, Adaro탄에서 NO농도가 낮게 나타났다. 보편적으로는 연료 중 휘발분 및 화에서 방출된 HCN, NH₃는 주변 조건에 따라 NO로 되거나 N₂로 환원되는데 Fuel rich 조건이 될수록 N₂로의 환원이 증가되는 경향이 있다.

황산화물은 대체적으로 운전조건의 변화에 큰 영향을 받지 않고 연료 내에 함유된 황성분의 함량에 따라 선형적으로 변화한다. 역청탄인 Suek탄의 황 함유량은 0.45%이고, 아역청탄인 Adaro탄의 황 함유량은 0.16%이므로 Adaro탄에 비하여 Suek탄이 비교적 황 성분을 많이 포함하고 있다. 따라서 연료성상자체의 차이에 따라 SO_x 배출농도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이에 비하여 황 함유량이 적은 Adaro탄은 연소로 하부로 갈수록 전체적으로 낮은 값을 나타냈다.

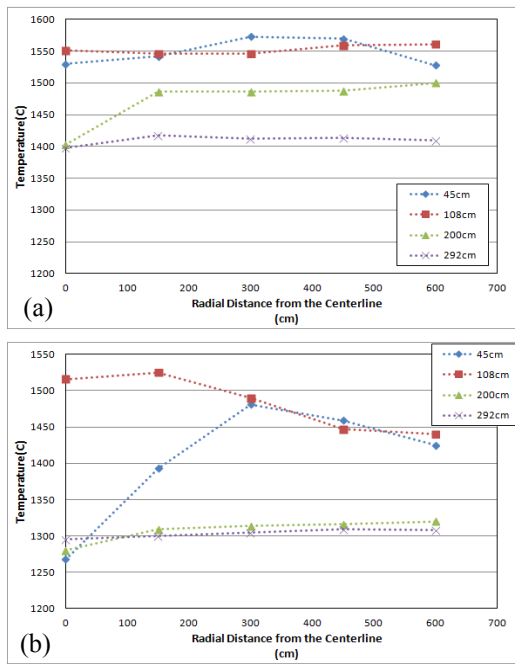


Fig. 3. Gas Temperature at Excess Air Ratio of 1.2
(a) Suek coal (b) Adaro coal

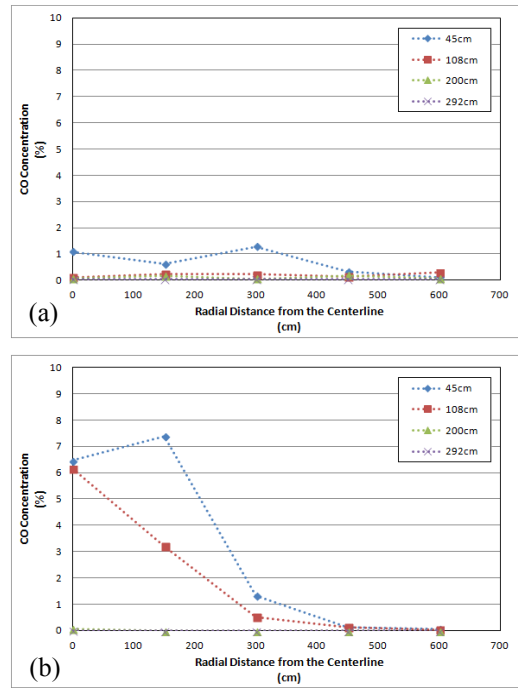


Fig. 4. CO Concentration at Excess Air Ratio of 1.2
(a) Suek coal (b) Adaro coal

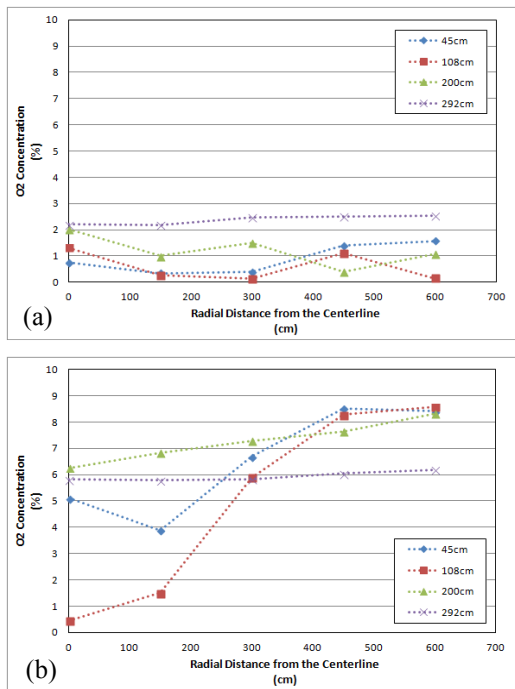


Fig. 5. O₂ Concentration at Excess Air Ratio of 1.2
(a) Suek coal (b) Adaro coal

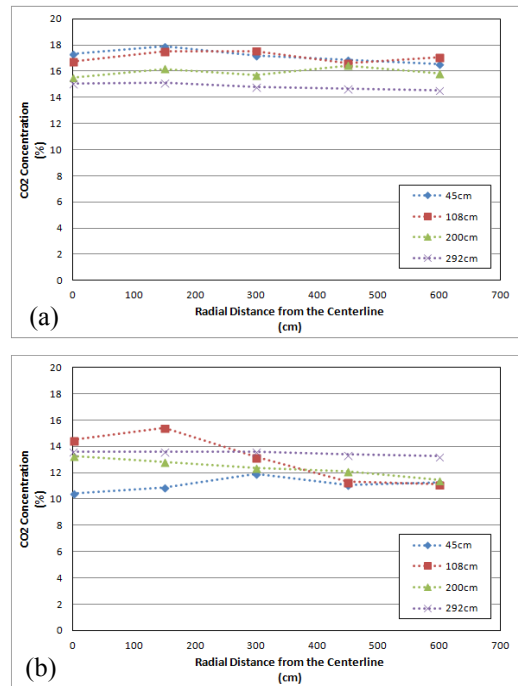


Fig. 6. CO₂ Concentration at Excess Air Ratio of 1.2
(a) Suek coal (b) Adaro coal

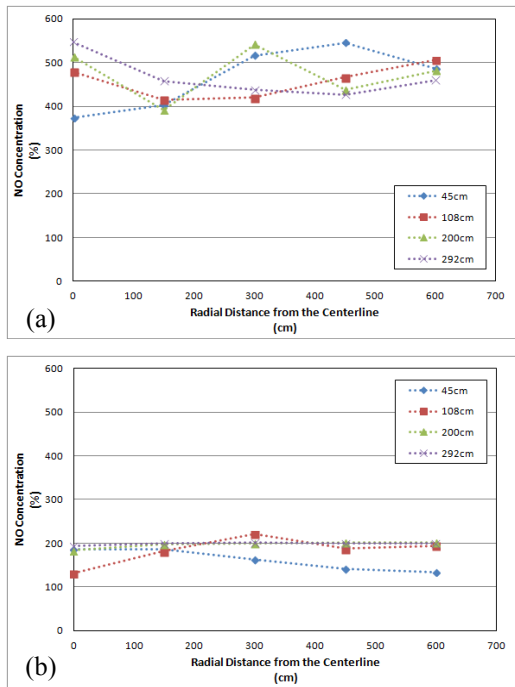


Fig. 7. NO Concentration at Excess Air Ratio of 1.2
 (a) Suek coal (b) Adaro coal

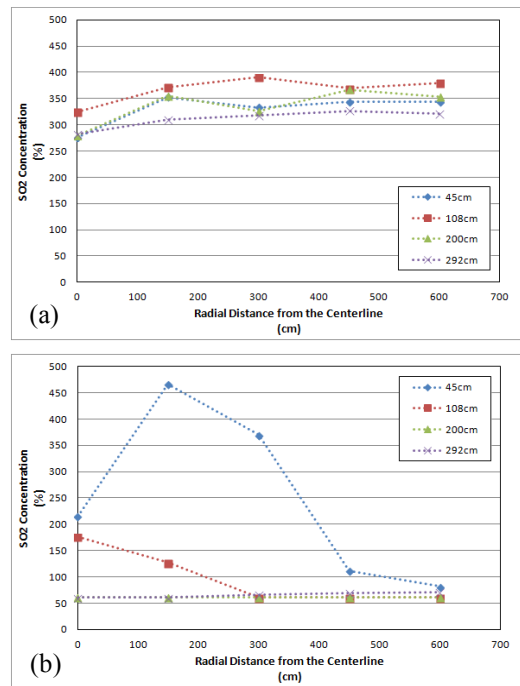


Fig. 8. SO₂ Concentration at Excess Air Ratio of 1.2
 (a) Suek coal (b) Adaro coal

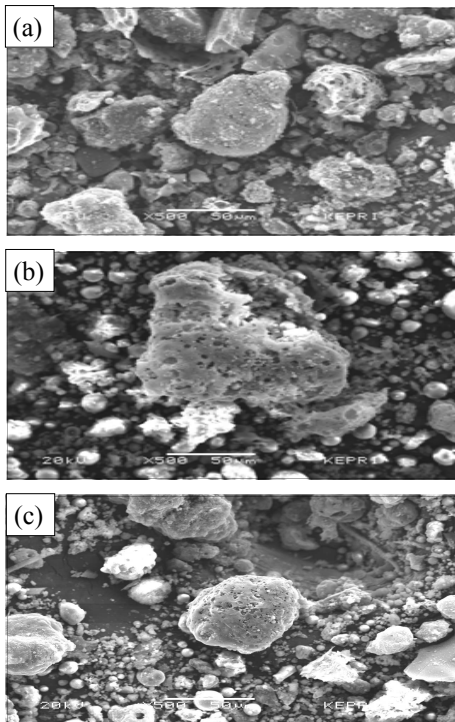


Fig. 9. Photograph of Particles Collected at Suek Coal
 (a) x=48cm (b) x=108cm (c) x=200cm

3-4. 샘플 입자 특성분석

연소로의 축방향 및 반경방향별로 포집된 Suek탄의 고체입자에 대하여 SEM분석 및 원소분석 결과를 바탕으로 탄소전환율을 계산하였다. Adaro탄의 경우 Ash의 함량 자체가 적고, 화로 내의 수분으로 인하여 샘플링이 어려워 고체입자 샘플링을 실시하지 못하였다. 고체입자는 노내 중심의 버너 팁으로부터 0.48m(1단 2홀), 1.08m(1단 4홀), 2m(2단 3홀), 2.92m(3단 2홀) 떨어진 지점에서 각 반경방향으로 r=0m, 0.15m, 0.3m, 0.45m, 0.6m에서 포집되었다. SEM 분석에는 JEOL사의 JSM 6360 전자주사현미경을 사용하여 고체입자의 표면을 분석하였다. 샘플링된 입자는 미분탄과 같이 크기가 작은 것부터 덩어리로 존재하는 경우까지 다양한 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9에 Suek탄 연소시 중심축(r=0m)에서 샘플링된 고체입자들 중 버너 팁으로부터 48cm, 108cm, 200cm 떨어진 지점의 입자들의 SEM 분석 결과를 나타내었다. 결과를 비교해보면 반응이 진행됨에 따라 기공이 발달하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3에 공기비가 1.2일 때 노내 중심에서 샘플링된 입자의 특성을 나타내었다.

Table 3. Ultimate Analysis of Sampled Suck Coal Particle

축방향	N%	C%	H%	S%
48cm	1.70	64.23	1.00	0.38
200cm	0.15	7.47	0.07	0.43
292cm	0.45	3.27	0.11	0.47

플링 된 Suck탄 입자의 원소분석 결과를 나타내었으며, 축방향 및 반경방향에 대한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

버너에서 가까운 주반응영역에서의 고체입자의 반응이 진행 중이어서 C, H, O, N, S 성분이 노의 하부에 비하여 높게 나타나고 있다. 버너로부터 292cm 인 지점에서 C, H, O, N, S 성분은 대략 0.1% 이하로 나타나는 것으로 보아 반응이 거의 끝난 것임을 알 수 있다.

원소분석 데이터를 이용하여 회분추적법(Ash-tracer Method)을 바탕으로 축방향 및 반경방향에서의 탄소 성분변화와 전환율(conversion)을 비교하였다. 회분추적법은 연소 전후의 Ash의 양이 일정하게 유지된다는 가정 하에 다음과 같은 식을 이용하여 계산한다.^[9]

$$W_0 \times A_0 = W_1 \times A_1 \quad (1)$$

$$\frac{W_0}{W_1} = \frac{A_0}{A_1} \quad (2)$$

$$C_{actual} = W_1 C_1 = W_0 C_1 \frac{A_0}{A_1} \quad (3)$$

$$Conversion(X) = 100 \times \frac{(100 - A_0) - C_{actual}}{100 - A_0} \quad (4)$$

Fig. 11은 공기비가 1.2인 조건에 대하여 Suck탄의 각 단계에서의 탄소전환율을 나타낸 것이다. 탄소의 전환율을 보면, 버너로부터 48cm(1단 2홀)에서 108cm(1단 4홀) 사이에 탄소가 급격히 감소하는 것을 보아 1단에서 연소가 주로 진행되는 것을 볼 수 있고, 1단 2홀에서 반응이 시작되어 1단 4홀 이후에서는 탄소전환율이 거의 100%에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 실험을 통하여 국내 대표 수입 역청탄과 아역청탄인 Suck탄과 Adaro탄의 파일럿 연소특성을 파악

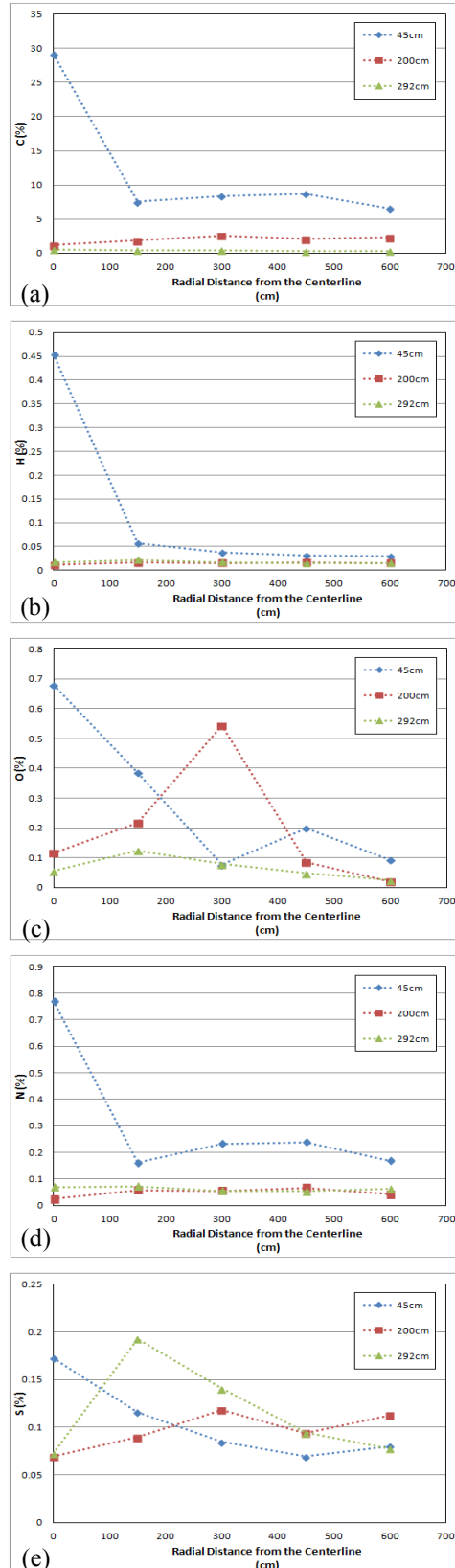


Fig. 10. C, H, O, N, S(wt.%) of Sampled Particle

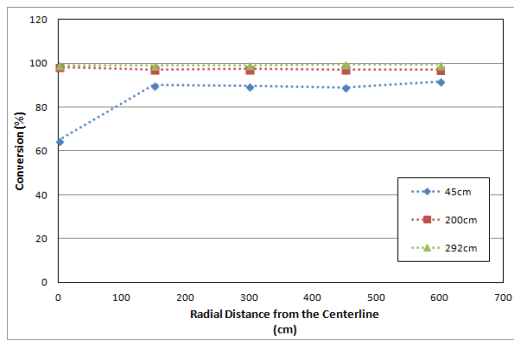


Fig. 11. Carbon Conversion of Suek coal

하였다. 두 탄종의 주 반응영역은 노 상부의 스월 버너로부터 약 1m 근방에서 형성되었으며, 노 하류에서는 완전 확립된 온도와 농도분포를 나타내었다. 노내 가스온도는 Adaro탄에 비하여 Suek탄이 높게 나타났으며, 실험결과를 통하여 잔류 CO가 점차 CO₂로 전환되는 것을 확인하였다. NO가 가장 많이 발생하는 부근은 화염 영역과 일치하여, Suek탄 연소시에 높은 NO값을 나타냈다. 또한 포집된 역청탄의 고체입자 분석으로부터 주반응영역 이후에 완전한 탄소전환이 이루어진 것을 확인하였다. 파일럿 연소실험을 통하여 취득한 데이터를 활용하여 향후 파일럿 연소로와 동일한 연소시물레이션의 타당성을 비교 검증할 계획이다.

향후 다양한 탄종에 대한 단탄 및 혼소실험을 실시하여 연소특성 평가 및 설비 영향성을 파악하고, 설비의 안정적 운영을 위한 적절한 혼탄 기준을 제시할 수 있는 데이터를 보유할 예정이다. 또한 향후 보일러 연소 거동 시물레이션, 연소 및 열운전 성능예측 등의 검증을 지원함으로써 발전소의 연소상태를 최적화하고, 나아가 발전소 운전을 최적화하는데 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

References

1. Dale R. Tree; David Lee Black; James R. Rigby; Mardson Queiroz McQuay; Brent W. Webb, "Experimental Measurements in the BYU Controlled Profile Reactor", Energy Combust. Sci., 1998, Vol. 24, pp. 355-383
2. Central Research Institute of Electric Power Industry, "Improvement of Pulverized Coal Combustion Technology for Power

Generation", 2001

3. Hong-Shig Shim; James R. Valentine; Kevin Davis; Sang-Il Seo; Tae-Hyung Kim, "Development of Fireside Waterwall Corrosion Correlations Using Pilot-scale Test Furnace", Fuel, 2008
4. Peter Molcan; Gang Lu; Thomas Le Bris; Yong Yan; Benoit Taupin; Sebastien Caillat, "Characterisation of Biomass and Coal Co-firing on a 3MWth Combustion Test Facility Using Flame Imaging and Gas/Ash Sampling Techniques", Fuel, 2009
5. Sen Li; Tongmo Xu; Peng Sun; Qulan Zhou; Houzhang Tan; Shien Hui, "NO_x and SO_x Emissions of a High Sulfur Self-retention Coal During Air-staged Combustion", Fuel, 2008
6. Shi Su; John H. Prohl; Don Holcombe, "Fouling Propensities of Blended Coals in Pulverized Coal-fired Power Station Boilers", Fuel, 2003
7. Hyunhee Kim; Hoyoung Park; Hyunsoo Lim; Sehyun Baek; Taehyung Kim; Youngju Kim; Jiseon Gong; Jeongeun Lee, "Study on Coal Combustion Characteristics of 0.7MW Pilot-scale Co-firing Test with Low Rank Coals", KOSCO Symposium, 2014
8. Jiseon Gong; Hoyoung Park; Taehyung Kim; Sehyun Baek; Youngju Kim; Heechun Lim, "Experimental Investigation on the Combustion Characteristics of Suek Coal in 0.7MW Pilot Furnace", The Korea Hydrogen & New Energy Society, 2013
9. Badzioch S.; Hawksley P.G.W, "Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles", Ind. Eng. Chem. Proc Design Dev, 9, 521