

국내 무연탄과 미분을 성형한 무연탄의 순환유동층 연소

선도원 · 배달희 · 오창섭* · 김현창**.†

한국에너지기술연구원 온실가스연구단, *한국과학기술정보연구원, **호서대학교 화학공학과
(2010년 7월 8일 접수, 2010년 8월 3일 채택)

Circulating Fluidized Bed Combustion of Korean Anthracite and Fabricated Anthracite Fines

Dowon Shun, Dal-Hee Bae, Chang Sup Oh*, and Heon Chang Kim**.*.†

Greenhouse Gas Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea
*Reseat Program, Korea Institute of Science and Technology Information, Daejeon 305-806, Korea
**Department of Chemical Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea
(Received July 8, 2010; Accepted August 3, 2010)

순환유동층에서 나타나는 국내 무연탄의 낮은 연소성을 극복하고 비산재로 배출되는 미연분의 손실을 극복하기 위하여 분탄과 비산회를 혼합하여 성형한 성형탄과 무연탄의 혼소를 0.1 MW급 순환유동층에서 수행하였다. 비교 시험에서 원탄 연소는 다량의 미분의 비산과 연소로 상부에서의 과열을 일으켰으나 조립탄 연소의 경우 미분을 제거하였으므로 일정한 온도에서 연소되었고 운전이 가장 안정적이었다. 조립탄과 원탄이 혼합된 석탄은 다소 운전이 불안하였으나 원탄만을 연소시킬 때보다는 안정적 연소가 가능하였다. 조립탄에 성형탄을 혼합한 경우 조립탄 연소의 경우와 같이 원활한 운전이 가능하였다. 본 연구는 상용 순환유동층 보일러에서 성형탄 혼소가 국내 무연탄의 연소성 개선에 도움이 될 것을 보여 주었다.

To solve the problems of the low combustion activity of Korean anthracite and the abundant loss of unburned carbon in fly ash, pellet coal was fabricated from coal fines and fly ash, and the mixed combustion of coarse coal with the pellet coal was examined in the circulating fluidized bed combustor of a 0.1 MW scale test unit. In the combustion of the raw coal only, the significant amount of coal fines was entrained, resulting in overheat at the top of the combustor. With the coarse coal that most fines were eliminated, however, the combustion temperature was maintained stable. The mixed combustion of coarse and raw coals was also feasible even though it often went unstable. The mixed combustion of the coarse coal with the pellet coal was as stable as the coarse coal combustion, showing a promise that the combustion of the Korean anthracite in commercial circulating fluidized bed boilers could be further enhanced.

Keywords: anthracite, raw coal, fine coal, pellet coal, circulating fluidized bed combustion

1. 서 론

주로 산업용 열병합 보일러 형태로 도입된 순환유동층 보일러는 유연탄 연소보일러로서 뛰어난 연료 경제성과 연소효율로 보급 전망이 밝다. 보급의 증대에 따라 국산화가 진척되면 전반적으로 기술에 대한 자립도 향상[1]으로 기존의 석탄 보일러에 대한 부정적 인식의 해소와 더불어 산업계 에너지비 저감 및 에너지 자급률의 확대를 구현하게 될 것이다[2].

그러나 국내 무연탄을 연소하는 유동층 보일러는 고열량 유연탄을 연소하는 일반적 산업용 보일러와 달리 국내 무연탄의 낮은 반응성 때문에 완전연소가 곤란하며 이것이 비산회의 불완전 연소와 이에 따른 연소효율 저하로 나타나고 있다[3]. 유연탄 보일러에 비하여 무연

탄 보일러[4,5]는 1) 고정탄소가 많아 연소온도가 높고, 반응성이 낮아 입자 체류시간, 즉 연소시간이 유연탄 연소보다 길어져야 하며, 2) 연소로에서 비산되는 미분의 착화가 늦어 순환되는 입자가 사이클론과 loop seal에서 계속 연소됨으로써 연소로의 재순환부가 과열되는 경향이 있으며, 3) 연료의 반응성이 낮아 미분입자가 많을 경우 미립자는 연소가 끝나기 전 bag filter로 빠져나가 손실이 많으며, 4) 회재의 양이 많고 Si, Al 성분이 많아 마모력이 크기 때문에 마모의 영향이 유연탄보다 클 우려가 있으며, 5) 연료의 반응성이 낮아 고온에서 착화가 되므로 고온까지 예열하여야 한다.

본 연구에서는 국내 무연탄을 연소하는 순환유동층 보일러를 모사하기 위하여 실험실 규모의 연소로에서 국내 무연탄의 연소특성을 시험하고, 상용 보일러에서 연소가 덜된 상태로 배출되는 비산회의 재연소를 위하여 비산회와 무연탄 미분을 혼합하여 제조한 조립탄 형태의 성형탄의 연소 성능과 효율가치를 분석하였다.

† 교신저자(e-mail: heonchan@hoseo.edu)

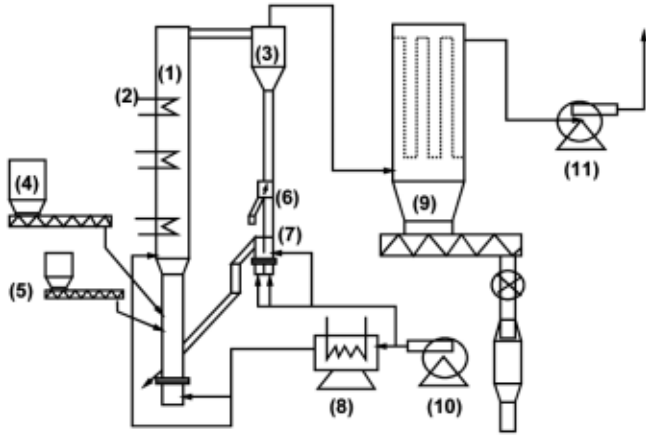


Figure 1. Diagram of a circulating fluidized bed combustor; (1) combustor, (2) heat transfer tube, (3) cyclone, (4) coal feeder, (5) limestone feeder (6) solid flow diverter, (7) loop seal, (8) air preheater, (9) bag filter, (10) F.D. fan, (11) L.D. fan.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 순환유동층 연소장치의 구조도는 Figure 1과 같이[6] 연료 공급장치, 공기주입 및 연소가스 배출장치, 온도·압력 감지설비가 설치된 연소로로 구성되어 있다. 연소로는 관형으로 내경이 200 mm이고 길이가 5000 mm인 상부와 내경이 150 mm이고 길이가 2200 mm인 하부가 수직으로 연결되어 있다. 분산판에서 위로 300 mm와 60 mm 지점에는 외부에 water jacket을 설치하여 연소로의 과열을 막고, 분산판 위 2100, 3400, 4900 mm 지점에 수평으로 이중관 열교환기를 설치하였다[7]. 연소로의 출구에는 내경 190 mm의 사이클론이 있으며, 사이클론 하부는 내경 90 mm의 dip leg, 그리고 loop seal의 return leg를 거쳐 연소로 하부로 연결된다.

석탄은 분쇄와 전처리 과정을 거친 5 mm 이하의 것을 공기 분산판 상부 1.25 m 지점에서 screw feeder를 통해 연소로로 공급한다. 공급 공기는 1차공기와 2차공기로 나누어지며[8], 1차공기는 분산판 하부로, 2차공기는 분산판 상부 2.1 m 지점에서 공급한다. 연소로 하부는 충밀도가 높고 고온이 유지되기 때문에 투입된 석탄은 충밀도와 연소 공기에 의해 농후층에서 가열되면서 발화한다. 고속유동 상태인 순환유동층 연소로에서 석탄입자는 비산하며 일부는 연소로 벽면을 따라 하강과 비상을 반복하는 내부순환을 하며 입경이 작거나 연소가 끝난 회재는 연소로를 빠져나가 사이클론으로 인입된다.

사이클론에서 굵은 입자는 포집되고 포집된 회재는 dip leg를 따라 loop seal[9,10]에 도착하면 loop seal 내부 유동화 공기에 의해 유동화되어 연소로로 재주입 된다. 연소로의 loop seal에서는 회재의 유동과 재순환을 위해 유동화 공기를 분산판을 통해 별도로 공급한다. 이때 loop seal 내부의 dip leg와 return leg 공기량은 각각의 유량계로 조절한다. 사이클론에서 포집되지 않고 통과하는 작은 입자는 비산회로서 백필터에서 포집된다. 비산회는 연소가 끝난 것으로 간주되는 작은 입자로서 무연탄처럼 고정탄소가 많아 연소가 어려운 연료는 비산회 중에 가연분이 많이 남게 된다.

본 연구에서는 동해화력에서 사용하고 있는 국내산 무연탄으로 상한 5 mm로 체분리한 원탄(raw coal, J19), 원탄을 상한 5 mm와 하한 1 mm로 체분리한 미분이 적은 조립탄(coarse coal, J6), 1 mm 이하로 분리한 분탄(fine coal)과 동해화력 비산회(fly ash)를 67 wt%와 33

Table 1. Particle Size Analysis of Coal Samples

dp (mm)	Raw coal (J19)	Coarse coal (J6)	Mixed coal (J24)
4.800	0.060	0.205	0.070
3.000	0.140	0.406	0.266
1.590	0.132	0.120	0.113
0.945	0.135	0.060	0.104
0.605	0.088	0.033	0.070
0.356	0.130	0.044	0.106
0.169	0.111	0.048	0.086
0.100	0.133	0.043	0.102
0.038	0.070	0.041	0.084
평균입경(mm)	0.215	0.434	0.224

wt%로 섞어 입경 3~5 mm의 구형으로 가공한 성형탄(pellet coal) 등 3종의 석탄을 사용하였다. 또한 순환유동층 시험연소로[11]에서 50 wt% 원탄과 50 wt% 조립탄을 섞은 혼합탄(mixed coal, J24), 90 wt% 조립탄과 10 wt% 성형탄을 섞은 혼합탄(mixed coal, J12) 등 두 경우의 혼소 특성을 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 석탄 분석

Table 1은 연소에 사용된 석탄 샘플의 입도분포를 분석하였다. 원탄(J19)은 연소로에 공급하는 그대로의 석탄을 말하며, 사이클론에서 포집하기 어려운 0.038 mm 이하의 분탄이 약 7%를 나타낸다. 조립탄(J6)은 원탄을 1 mm로 체분리하여 그 이하인 분탄을 제거한 것이다. 조립탄과 원탄을 무게비 50 : 50으로 혼합한 혼합탄(J24)은 분탄에 의한 연소 과정에서 미연입자의 영향을 보기 위하여 제조한 것이다. 원탄(J19)은 분석한 체의 모든 크기에 대해 입자의 양이 거의 비슷하게 나타난다. 즉 3~0.1 mm 사이에 입자가 고루 분포해 있다. 조립탄(J6)은 연소로 사용자가 현장에서 1 mm 이하로 체분리하여 미분을 제거하였으므로 1 mm 이하의 입경을 가진 입자가 특별히 적다. 본 실험에서는 원탄(J19), 조립탄(J6), 혼합탄(J24) 입경의 상한을 5 mm에 맞추어 이 이상 크기를 나타내는 입자는 체분리하여 제거하였다.

Figure 2에는 Table 1에서 제시된 시료의 누적 입도분포를 나타내었다. 원탄(J19)은 입도분포가 비교적 고르게 분포하고 있으며 조립탄(J6)은 1 mm 이상 입자를 주로 하여 이루어져 있다. 혼합탄(J24)은 미분의 분포양상이 원탄(J19)과 유사하며 0.3 mm 이하의 입자가 조립탄(J6)보다 많다. 3종의 석탄 모두 3 mm 입경에서 입자 무게의 합이 최대이다.

Table 2에는 원탄(J19), 조립탄(J6), 혼합탄(J24), 그리고 성형탄 시료의 성분분석을 나타내었다. 조립탄(J6)의 경우 1 mm 미만 입경이 제거되면서 가연분이 함께 제거되어 원탄(J19)보다 회분(ash)은 높고, 고정탄소는 줄었으며, 발열량도 낮게 나타났다. 발열량은 원탄(J19)이 5122 kcal/kg, 조립탄(J6)이 4831 kcal/kg, 혼합탄(J24)이 5002 kcal/kg, 그리고 성형탄은 3897 kcal/kg로 나타났다. 성형탄의 입경은 3~5 mm 정도이며 모양은 구형이다.

3.2. 연소시험

Table 3에 연소시험의 운전조건을 나타내었다. 본 실험은 초기에 연

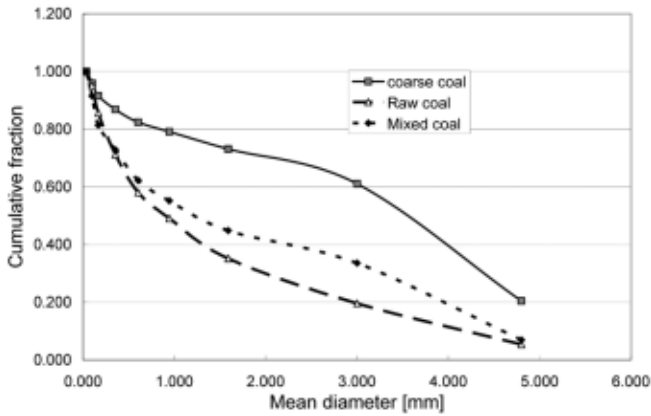


Figure 2. Cumulative particle size distribution of coal samples.

Table 2. Analysis of Test Samples

COAL TYPE	Korean anthracite			
	Raw coal (J19)	Coarse coal (J6)	Mixed coal (J24)	Pellet coal
Proximate analysis, wt% received				
Moisture	6.14	4.88	5.19	9.01
Volatiles	5.59	5.17	5.24	5.92
Ash	26.68	30.69	27.63	40.17
Fixed Carbon	61.59	59.26	61.94	44.9
Ash analysis, wt% dry				
CaO	1.13	1.13		1.13
MgO	0.58	0.58		0.58
SO ₃	0.08	0.13		
Ultimate analysis, wt% dry				
C	67.35	64.00	66.50	51.95
H	1.60	1.43	1.39	1.16
N	1.63	1.62	1.63	1.54
S	0.32	0.4		
발열량(kcal/kg)	5,122	4,831	5,002	3,897

소로의 온도를 외부 전기히터로 예열한 후 500 °C 이상의 온도에서 무연탄을 투입하여 착화시킨 후 800 °C 이상에서 무연탄을 투입하였다. 연소로의 온도가 900 °C에서 일정하게 안정화될 때까지 무연탄 연소를 하다가 연소로 하부온도의 변화가 일정해지는 시점에서 모든 계기를 초기화하고 실험 상태를 기록하며 실험을 시작하였다. 한 실험의 경과시간은 5 h를 지속하였다. 유동물질에 의한 연소반응의 영향을 없애기 위하여 연소로의 초기 충물질(모래)은 매 실험마다 새로 교체하였다.

Figure 3에 원탄(J19)과 조립탄(J6)의 연소시험 결과를 나타내었다. 원탄(J19)은 열 추출을 연소로 상부에서 냉각수로 하였고, 조립탄(J6)은 열 추출 없이 연소하였다. 국내 무연탄에 포함된 분탄은 순환유동층 연소로에서 연소 중 쉽게 비산하여 연소로 상부나 사이클론에 부유하며 또한 높은 착화온도로 인하여 연료가 투입된 지 일정시간 후, 즉 분탄이 연소로 상부에 부유된 상태에서 타기 시작한다. 원탄(J19)은 연료 중 분탄의 비산이 많아 연소로 상부 7.2 m의 연소로 출구온도

Table 3. Experimental Conditions

Runs	Feed rate (kg/h)	Air (Nm ³ /h)			Air/Fuel ratio	Heat extraction (kW)
		Primary	Secondary	Loop seal		
Raw coal (J19)	18.0	64	9	7.2	2.4	2.2
Coarse coal (J6)	20.6	78	29	4.5	1.1	No
Mixed coal (J24)	21.1	60	9	6.4	1.5	2.2
Mixed coal (J12)	18.4	66	9	7.2	1.5	No

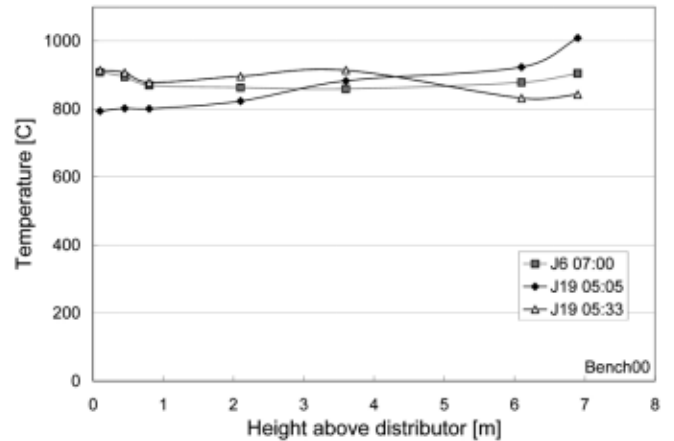


Figure 3. Vertical temperature distribution of raw coal (J19) and coarse coal (J6) combustion.

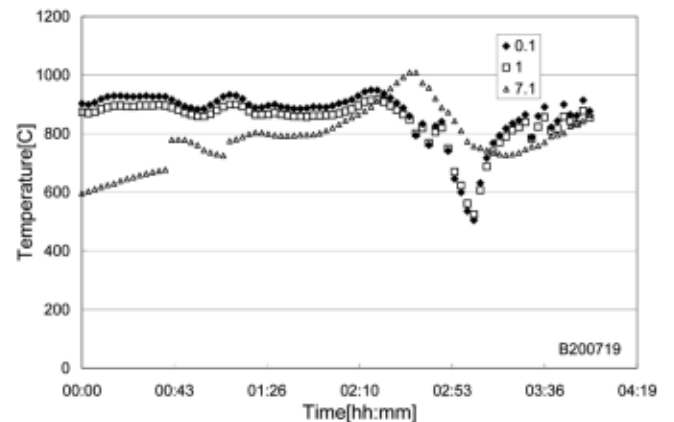


Figure 4. Combustor temperature variation during raw coal (J19) combustion.

가 1000 °C 이상으로 과열되었다. 이 때문에 출구온도를 낮추고 연소로의 금속재질의 손상을 막기 위하여 연소로 상부의 전열관을 통해 냉각수로 냉각시켰다. 냉각수로 제거된 열량은 약 2.2 kW이다. 냉각수에 의해 상부 온도는 다시 850 °C까지 낮아졌으나 온도 조절은 매우 불안정하였다. Figure 4에 시간 변화에 따라 분산관 높이 0.1 m, 1 m, 7.1 m 구간의 온도변화를 나타내었다. 약 4 h 후부터는 입자의 순환방법을 변화시키는 방법으로 온도조절을 시도하였으나 매우 불안정하였고 연소로의 급격한 온도 변화가 일어났으며 결국 온도 조절이 제대로 되지 않았다. 실험 후 연소로가 과열되는 동안 사이클론의 열에 의한 손상이 일어났음을 확인하였다. 반면 조립탄(J6)은 원탄(J19)에 비해 미분이 적어 비산 미분에 의한 연소로 상부과열이 일어나지

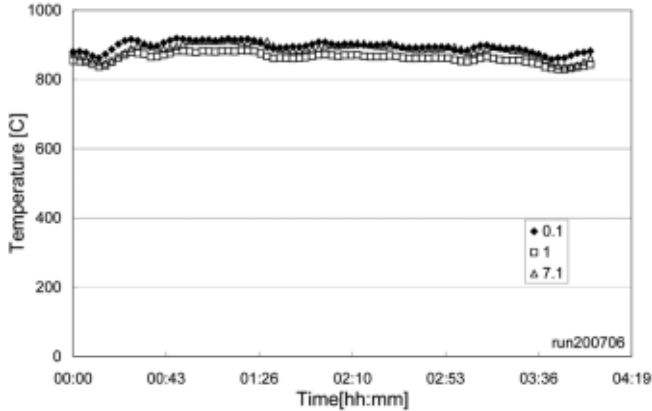


Figure 5. Combustor temperature variation during coarse coal (J6) combustion.

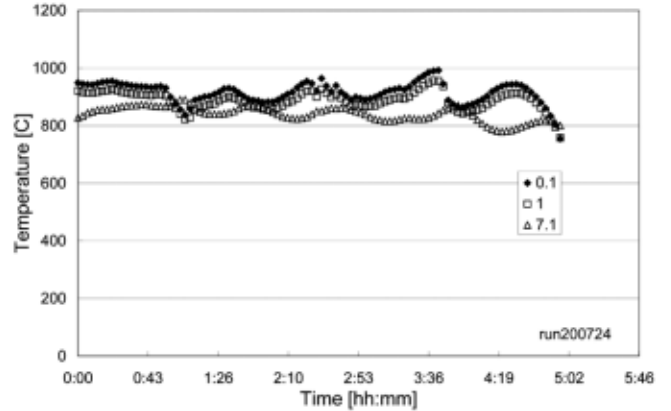


Figure 7. Combustor temperature variation during combustion of mixed coal (J24).

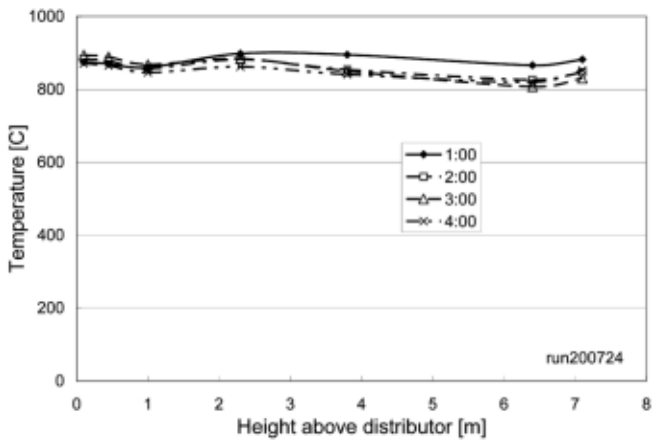


Figure 6. Vertical temperature distribution of mixed coal (J24) combustion.

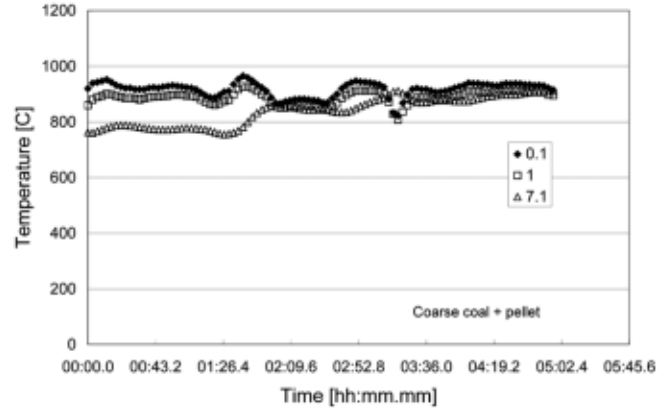


Figure 8. Combustor temperature variation during combustion of mixed coal (J12).

않았고 따라서 상부 냉각 없이도 연소가 가능하였으며 Figure 5에 나타난 바와 같이 운전시간동안 변화 없이 매우 안정적인 온도를 나타내었다.

Figure 6은 원탄과 조립탄이 무게비 50 : 50으로 혼합된 혼합탄(J24) 연소시 연소로 높이별 온도 변화를 나타내었다. 연소로 상부에서는 과열을 피하기 위하여 수관으로 냉각하면서 수행하였다. 냉각수로 제거된 열량은 원탄(J19) 연소 때와 같이 약 2.2 kW이다. 혼합탄(J24) 연소에서는 연소로 상부에 해당하는 7.2 m 지점의 출구온도는 900 °C 이하로 안정적이었다. 원탄(J19)을 연소할 때와는 달리 연소로 상부 온도 조절이 가능하였다. 혼합탄(J24)은 원탄(J19)보다 미연분의 양이 절반정도 줄었으며 따라서 비산 입자의 양을 줄이는 것이 연소성 개선에 도움이 됨을 보여주었다.

Figure 7은 혼합탄(J24) 연소에 대하여 시간에 따른 연소로 높이별 온도변화를 비교한 것이다. 연소로 상부온도는 매우 안정적이었고 하부 온도는 일부 과열이 있었으나 비교적 안정적으로 운전할 수 있었다. 연소로 상부 온도는 800 °C 부근에서 운전이 가능하였으며 원탄(J19)때 보다 매우 용이한 운전이 되었다. 그러나 조립탄(J6)에 비해서는 현저하게 안정성이 떨어졌으며 온도의 상승 하강이 반복되었다. 온도 변화 폭이 큰 이유는 비산 분탄에 의한 상부온도 과열과 이를 낮추려고 입자순환을 조절할 때 급격히 하부온도가 변화하는 것과 사

이클론에서 포집된 다량의 입자가 한꺼번에 연소로 하부로 순환되는 특성에 의해 연소로 하부에서의 온도의 변화폭이 커지는 현상이 나타났다. 그럼에도 불구하고 연소로의 운전은 원탄(J19)에 비해서는 안정적이었다.

Figure 8에는 조립탄과 성형탄이 무게비 90 : 10으로 혼합된 혼합탄(J12)의 연소에 대하여 시간의 변화에 따라 분산관 높이 0.1 m, 1 m, 7.1 m 구간의 온도변화를 나타낸 것이다. 조립탄(J6) 연소시와 동일하게 전열관 열 추출은 없었다. 연소로 하부 0.1 m 구간의 온도의 간헐적인 온도 상승을 제외하고는 연소로 온도는 비교적 안정적이었으며 특히 연소 시간이 길어짐에 따라 연소로 상하부의 온도차가 줄어드는 매우 양호한 결과를 얻었다.

연소의 안정성을 위해서는 혼합탄(J12) 연소에서 나타나듯이 조금이라도 미분을 줄이는 것이 도움이 되었다. 순환유동층 보일러의 국내 무연탄 연소에서 나타나는 문제점인 비산 미분의 지연된 착화에 의한 연소로 상부와 출구인 사이클론이 과열되는 점과 미분의 반응시간이 길어 연소가 끝나지 않은 상태에서 전기 집진기를 통과하여 비산회로 배출되는 현상을 억제하려면 연료 중 미분의 절대량이 줄어들어야 함을 보여주었다. 한편 원탄(J19)의 미연분을 재활용하는 방법으로는 본 실험의 결과와 같이 원탄(J19)에서 1 mm 이하의 미분을 분리하고, 미분과 비산회를 섞어 성형탄을 만들어 연소로에서 조립탄(J6)과 성형탄을 일정비율로 연소하는 것이 바람직하다고 판단된다.

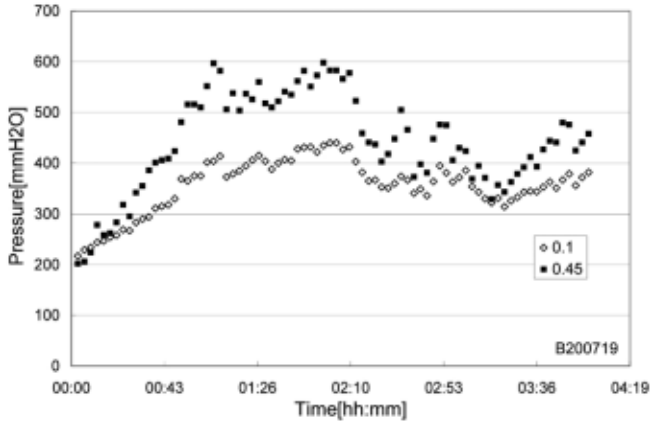


Figure 9. Bed pressure variation during raw coal (J19) combustion.

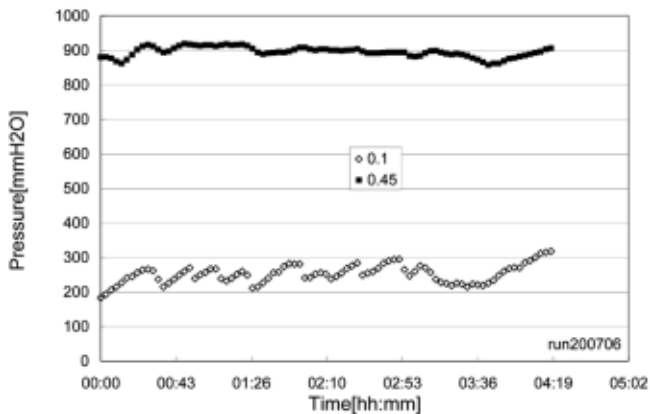


Figure 10. Bed pressure variation during coarse coal (J6) combustion.

Figure 9에 원탄(J19) 연소 시 시간변화에 따른 연소로 압력변화를 나타내었다. 연소로 하부의 압력이 점차 증가하는 경향을 나타내며 이는 주로 다량의 미분이 사이클론에 포집되면서 재순환부가 과도한 회분의 유입으로 적체되고 또한 재순환되는 입자에 의해 연소로의 하부 층압이 증가하는 현상으로 보여진다. 본 실험 장치인 0.1 MW급 CFBC 연소로는 연료 중 회분의 양이 10% 정도인 유연탄을 기준으로 설계되었기 때문에 회분이 양이 많고 더욱이 비산회가 많은 무연탄 연소의 경우에는 사이클론으로 유입되는 입자와 포집되는 입자의 양이 많아 운전이 어려움이 있었다. 또한 이들 포집 입자가 재순환부인 loop seal로 이동시에서 하강관인 dip leg의 넘침이 일어나고 다시 loop seal로부터 연소로로 간헐적으로 한 번에 과잉으로 유입되면서 flooding과 같은 현상이 일어나는 것이며 이것이 연소로 층압의 요동을 일으키는 것으로 판단되었다.

Figure 10에 조립탄(J6) 연소에 대하여 시간 경과에 따른 연소로의 압력변화를 나타내었다. 조립탄(J6) 연소 때는 비산 미분의 순환이 상대적으로 적었기 때문에 사이클론과 loop seal의 운전이 정상적이었고 연소로의 압력 변화를 적게 일으켰으며 연소로 하부층의 유지와 하부 회분의 배출이 일정하였다. 따라서 운전시간 동안 연소로 층압이 일정하게 나타났다. 연소로의 층압이 일정하다는 것은 운전의 안정성을 나타내는 것으로 실험시간동안 온도와 압력의 변동이 일정하게 유지되었다.

Table 4에 각각 운전 중 1 h 간격으로 회수한 백필터회와 연소 후 연소로하부회의 공업분석(proximate analysis) 결과를 나타내었다. 하

Table 4. Proximate Analysis of Test Coal Samples

	Moisture	Volatiles	Ash	Fixed Carbon	Combustion Efficiency
Raw coal (J19)					
Fly ash	0.9	3.28	4.039	55.43	0.65
Fly ash	1.02	4.08	36.86	58.04	0.63
Fly ash	1.0	3.22	39.16	56.62	0.64
Fly ash	1.4	3.75	43.65	51.46	0.67
Bottom ash	0.28	0.91	98.8	0.06	
Coarse coal (J6)					
Fly ash	0.73	2.91	51.19	45.17	0.73
Fly ash	0.65	2.86	52.75	43.74	0.74
Fly ash	0.7	2.89	52.07	44.34	0.74
Fly ash	0.77	2.63	47.04	49.56	0.71
Bottom ash	0.47	0.88	98.4	0.25	
Mixed Coal (J24)					
Fly ash	0.99	3.74	38.93	56.34	0.44
Fly ash	0.9	3.36	38.97	56.77	0.44
Fly ash	0.82	3.14	37.14	58.9	0.43
Fly ash	0.93	3.33	36.01	59.73	0.42
Bottom ash	0.24	0.92	98.55	0.29	
Mixed coal (J12)					
Fly ash	1.14	3.3	49.09	46.47	0.67
Fly ash	0.95	2.79	50.05	46.21	0.68
Fly ash	0.75	2.51	48.38	48.36	0.66
Fly ash	0.81	2.99	53.49	42.71	0.70
Bottom ash	0.27	0.87	97.33	1.53	

부회의 가연분의 총량, 즉 휘발분과 고정탄소의 합은 2% 미만으로 연소로 하부에서는 충분한 연소가 이루어지고 있다고 보여진다. 본 실험에서 연소효율(Combustion Efficiency)은 연료와 비산회에 포함된 가연분(카본과 휘발분의 총량)으로부터 다음과 같이 결정되었다.

$$Combustion\ Efficiency = \left[1 - \frac{Ash(C, V)}{Feed(C, V)} \right] \times 100$$

여기서 Ash(C,V)는 비산회의 가연분이며 Feed(C,V)는 연료의 가연분을 나타낸다. 순환유동층 보일러에서 비산회의 가연분 결정에는 연소로의 길이, 사이클론의 집진 효율과 재순환 장치의 기능 등이 중요한 영향을 미치며 본 장치는 원탄(J19) 연소 중 여러 번에 걸쳐 사이클론과 재순환부의 입자 flooding이 발생하여 미연입자가 재순환되지 못하고 백필터로 배출되는 현상이 일어났다. 따라서 조립탄(J6) 또는 조립탄과 성형탄의 혼합탄(J12) 경우에도 상용장치보다 연소로 길이가 짧고 사이클론 효율이 낮아 미연분의 과다 유출이 발생하였으며, 각각 최대 74, 70% 정도의 연소효율만을 나타내었다. 이는 거의 98%의 연소효율을 나타내던 벤치규모[6] 및 상용[12] 순환유동층 유연탄 연소특성 연구 결과와 대조적이다. 특히 원탄(J19) 연소의 경우 미연분의 유출이 심하였으며 연소효율이 최대 67% 정도로 매우 낮게 나타났다. 원탄과 조립탄이 혼합된 혼합탄(J24) 연소의 경우 비교적 안정적이었던 연소상태와 달리 44%만의 연소효율을 나타내었으며, 이는 연료 투입량과 비산회의 계량착오로 나타나는 계산착오일 수도 있으

나 우선 Table 4에서와 같이 비산회의 가연분이 많게 나타나 역시 미연 비산회의 유실이 크다는 점을 보여준다. 원천적으로는 본 시험장치가 미립자의 함량이 적고 노 하부 연소가 주로 발생하는 유연탄을 연소하도록 설계하였기 때문이며 이에 따라 미립자가 쉽게 포집되지 않았다.

4. 결 론

원탄(J19), 조립탄(J6), 원탄(J19)과 조립탄(J6)의 혼합탄(J20), 조립탄(J6)과 성형탄의 혼합탄(J12)을 시료로 사용하여 국내무연탄의 연소 특성을 0.1 MW 규모 순환유동층 연소로에서 시험하였다. 본 연소시험에서는 각 시료의 미분 함량이 연소 안정성과 연소효율에 미치는 영향을 고찰하였다. 원탄(J19) 연소의 경우에 미분이 연소로 상부에 체류하면서 사이클론과 연소로를 과열시키기 때문에 연소로 온도 유지를 위하여 연소로 상부의 냉각이 필요하였고 연소 상태는 매우 불안정하였다. 또한 미분 함량이 높아 사이클론이 쉽게 flooding 됨에 따라 사이클론 포집효율이 낮아져 미분 또는 가연분의 유실이 심하였다. 조립탄(J6) 연소의 경우에 연소로의 상부과열이 일어나지 않아 별도의 냉각 없이도 안정적으로 장시간 운전이 가능하였다. 특히 원탄(J19)에 비하여 상대적으로 미분 또는 가연분의 유실이 낮았다. 조립탄(J6)과 원탄(J19)을 무게비 50 : 50으로 섞은 혼합탄(J20)은 연소 상태가 다소 불안정하였으나 원탄(J19)보다는 안정적 연소가 가능하였다. 조립탄(J6)과 성형탄을 무게비 90 : 10으로 섞은 혼합탄(J12)은 조립탄(J6)의 경우와 같이 안정적인 연소가 가능하였다. 연소효율은 조립탄(J6), 조립탄(J6)과 성형탄의 혼합탄(J12), 원탄(J19), 원탄(J19)과 조립탄(J6)의 혼합탄(J20) 순으로 나타났다. 따라서 국내 무연탄의 순환유동층 연소에서 석탄 미분을 분리하여 성형탄을 만들어 다시 조립탄(J6)과 섞어서 연소하는 방법은 연소로의 연소성 개선과 운전관리에 효과적인 방법으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. D. W. Shun, D. H. Bae, G. T. Jin, C. K. Yi, J. H. Park, H. J. Ryu, K. H. Han, S. H. Jo, and S. Y. Lee, Development of Circulating Fluidized Bed Cogeneration System for RDF, KIER Report KIER-A64308 (2003-N-WA02-P-01-0-000), Korea Institute of Energy Research, Daejeon (2007).
2. D. W. Shun, J. E. Son, K. H. Han, D. H. Bae, S. H. Cho, and J. H. Choi, Development of Circulating Fluidized Bed Coal Boiler Technology (III), Report KE-93040G, Korea Institute of Energy Research, Daejeon (1993).
3. D. W. Shun, D. H. Bae, K. H. Han, J. E. Son, Y. Kang, Y. H. Wee, J. S. Lee, and P. S. Ji, *Hwahak Konghak*, **34**, 321 (1996).
4. J. M. Lee, D. W. Kim, J. S. Kim, J. J. Kim, and H. S. Kim, *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**, 489 (2006).
5. H. T. Jang, T. S. Park, and S. C. Hong, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **10**, 586 (1999).
6. D. W. Shun, D. H. Bae, K. H. Han, S. H. Cho, and S. Y. Lee, *Hwahak Konghak*, **40**, 345 (2002).
7. A. K. Kolar and R. Sundaresan, *Int. J. Therm. Sci.*, **41**, 674 (2002).
8. Y. J. Cho, R. W. Namkung, and S. D. Kim, *J. Chem. Eng. Japan*, **27**, 158 (1994).
9. J. K. Yun, D. W. Shun, D. H. Bae, H. S. Lee, D. K. Lee, Y. J. Choi, and K. H. Moon, *Korean Chem. Eng. Res.*, **42**, 458 (2004).
10. D. W. Shun, D. H. Bae, K. H. Han, J. E. Son, and K. Cen, *Hwahak Konghak*, **37**, 925 (1999).
11. D. W. Shun, D. H. Bae, K. H. Han, S. Y. Lee, and D. H. Park, *J. Korea Society of Waste Management*, **20**, 509 (2003).
12. J. H. Choi, J. E. Son, K. H. Han, D. H. Bae, and S. H. Jo, Development of Circulating Fluidized Bed Coal Boiler Technology (I), KIER Report KE-91009G, Korea Institute of Energy Research, Daejeon (1991).