

벤치규모 순환유동층 석탄연소 특성연구

선도원[†] · 배달희 · 한근희 · 조성호 · 이승용

한국에너지기술연구원

(2001년 10월 10일 접수, 2002년 2월 8일 채택)

Combustion of Coal in a Bench Scale Circulating Fluidized Bed Unit

Dowon Shun[†], Dal-Hee Bae, Keun-Hee Han, Seong-Ho Cho and Seung-Young Lee

Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received 10 October 2001; accepted 8 February 2002)

요 약

국내 무연탄과 수입 유연탄에 대한 벤치규모 순환유동층-내경 0.2 m×높이 1 m 농후층, 내경 0.25 m×10 m freeboard-에서의 연소특성이 비교되었다. 국내산 무연탄은 삼척산으로 발열량이 4,529 kcal/kg이었고 수입 유연탄은 호주산 Balir Athol 탄으로 발열량(as received)은 6,455 kcal/kg 이었다. 유연탄과 무연탄의 연소특성은 연소로 축방향 온도분포에서 차이가 났으며, NO_x 발생특성도 차이가 있었다. 0.061 mm 이하의 비산재 입자에 의한 미연분 손실이 연소효율에 중요한 영향을 나타내었다. 0.061 mm 이하 비산재 입자에 의한 무연탄과 유연탄 입자 가연분 손실은 각각 57, 70%를 차지하였다.

Abstract – Combustion of a Korean anthracite and an imported bituminous coal in a bench scale circulating fluidized bed, 0.20 m I.D.×1 m-high bed and 0.25 m I.D.×10 m-high freeboard, was performed and the characteristics of combustion were compared. Test coals were anthracite received from Samchuk, Korea with the heating value of 4,529 kcal/kg, an imported Australian bituminous coal with the heating value of 6,455 kcal/kg. Both coals showed different vertical combustor temperature profiles, i.e., burning characteristics. Their trends of NO_x emission levels were also different. Combustibles loss of the tested anthracite and the bituminous coal by fly ash of particle diameter smaller than 0.061mm was significantly contributable to the combustion efficiency. Combustible loss of the fly ash smaller than 0.061 mm from the anthracite and the bituminous coal was, 57 and 70%, respectively.

Key words: Domestic Anthracite, Bituminous Coal, Circulating Fluidized Bed, Combustion

1. 서 론

순환유동층 석탄 연소기술은 10 mm 미만의 석탄을 고속 유동 상태에서 연소하는 기술로 연료의 발열량 변화에 비교적 유연하다. 특히 높은 연소효율과 더불어 석회석 주입에 의한 연소로내 탈황, 공기 다단주입에 의한 NO_x 억제 등 독특한 장점을 가진 기술이다[1, 2]. 순환유동층을 이용한 보일러 기술은 1985년을 기점으로 이전까지 보급되던 기포유동층 보일러를 앞질러 산업계 열병합 발전용 보일러로 보급되기 시작하였고 같은 시기에 우리 나라에도 첫 기가 도입되었다. Table 1은 국내에 가동중인 순환유동층 보일러의 현황을 나타내었다[3]. 우리 나라에는 1985년 이래 현재까지 약 10여기의 순환유동층 보일러가 보급되었으며 강원도 동해시의 200 MWe급 발전용 보일러를 제외하고는 대부분 증기용량 100-200 ton/h(10-50 MWe)의 산업용 열병합 발전 보일러 규모이다.

순환유동층 보일러 기술의 국산화 연구는 1980년 중반부터 국내의 학계와 연구소를 중심으로 시작되었다[4-6]. 그 동안의 학계의 수력학적

기초연구, 연구소의 연소특성연구 등을 토대로 1990년대 초반부터는 설계기술과 배연 연구 등 다양한 기초적인 연구 개발을 수행해 오고 있다. 이와 대비하여 중공업체 등에서는 외국기술의 license 도입에 의한 국내 보급을 시작으로 현재는 외국 업체의 해외건설에도 참여하는 등의 성과를 나타내고 있다.

본 논문은 벤치규모 순환유동층 연소로에서 국내 무연탄 및 수입 유연탄 연소에 따른 특성을 비교하고 그 결과를 소개한 것이다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다[4, 6]. 연소로(1)는 내경 0.2 m×높이 1 m의 농후층과 내경 0.25 m×높이 10 m의 freeboard로 구성되었다. 석탄은 coal hopper(4)로부터 screw feeder를 통하여 연소로 하부 분산판 위 1 m 지점으로 공급된다. 연소로 안에서 석탄은 빠른 유속의 유동화 공기와 접촉하면서 연소하게 된다. 입자가 가는 연소재와 연소가스는 연소로 상부의 출구를 통하여 사이클론(3)으로 인입되어 분진이 다시 분리되고 연소가스는 백필터(9)로 들어가 다시 한번 미분 연소재가 제진된 후 대기로 배출된다. 사이클론에서 분리된 연소재는 loop

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: dshun@kier.re.kr

Table 1. Commercial CFB boilers in Korea

Company(location)	Category	Steam(T/H)	Fuel	Start	Supplier
Oriental chem	Chemicals	120	Bitu. coal*	1985	Hyundai/Ahlstrom
SKC	Textile	130	Bitu. coal	1989	"
Hyundai oil	Refinery	120	Pet. coke**	1989	"
LG Chem.	Chemicals	210	Bitu. coal	1990	"
Ulsan petrochem. service Co.	Chemicals	250×2	Bitu. coal	1991, 1994	"
Samyang genex	Food	60	Bitu. coal, Heavy oil	1991	"
Taegu dye complex	Dyeing	130×3	Bitu coal	1986	Samsung/Babcock
Pusan dye complex	Dyeing	80×2	Bitu coal	1992	Daewoo/Studsvik
Korea zinc	Metal	175	Bitu. coal	1991	Korea Heavy Ind./Lurgi
Tonghae	Power plant	693×2	Anthracite	1998, 1999	Korea Heavy Ind./ABB

*Bituminous coal, **Petroleum coke

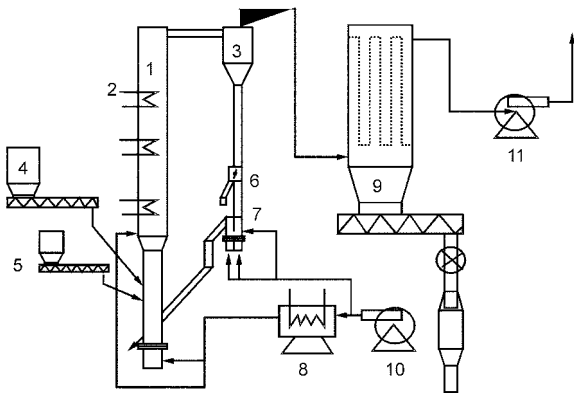


Fig. 1. Flow diagram of CFBC test facility.

- | | |
|------------------------|-------------------|
| 1. Combustor | 7. Loop seal |
| 2. Heat exchanger tube | 8. Air pre-heater |
| 3. Cyclone | 9. Bag filter |
| 4. Coal hopper | 10. F.D. fan |
| 5. Limestone hopper | 11. I.D. fan |
| 6. Valve | |

Table 2. Analysis of coals

Analysis	Bituminous coal (Australia)	Anthracite (Samchuk)
Proximate, wt% as received		
Moisture	7.28	3.53
Volatile	26.9	4.73
Ash	9.8	38.00
Fixed carbon	55.9	53.74
Ultimate, wt% dry basis		
C	66.8	54.03
H	3.5	0.19
N	1.5	0.48
S	0.5	0.68
Ash, wt% ash		
CaO	5.3	1.01
MgO	3.6	1.66
Al ₂ O ₃		33.56
SiO ₂		
Fe ₂ O ₃		4.24
Mean diameter, mm	0.4591	0.3937
Calorific value, Kcal/kg(As received)	6,455	4,529

seal(7)을 통하여 연소로로 다시 주입된다[7]. 연소로는 연소재의 재주입을 통해 연소효율과 내벽을 통한 열전달 효율을 증가시킬 수 있다[8].

Table 2는 실험에 사용된 석탄의 성분분석을 나타내었다. 유연탄은 호

주 Blair Athol산이며 무연탄은 국내 강원도 삼척지역에서 생산된 것으로 지역 탄광에서 구매하였다. 석탄은 원탄을 입경 -6 mm로 분쇄하여 연료로 사용하였다. 두 석탄은 모두 국내 산업용 순환유동층 보일러에서 사용하는 연료이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2에는 실험에 사용된 수입유연탄(호주산 Blair Athol)과 국내무연탄(삼척산)의 입경분포를 나타내었다. 순환유동층에 사용되는 석탄의 입경은 대개 -10 mm 정도로 분쇄되어 사용된다. 본 실험에서는 연소로의 특성상 분쇄한 후 -6 mm로 체분리하여 사용하였다. 국내무연탄은 분쇄 중 미분이 많이 발생하여 1 mm 이하 입자가 상대적으로 유연탄보다 많았다.

Fig. 3은 석탄 주입량으로 표현되는 공급열량의 증감에 따른 연소로

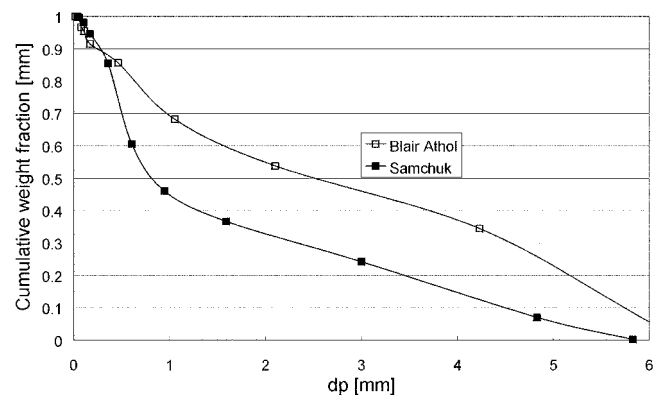


Fig. 2. Particle size distribution of the test coals.

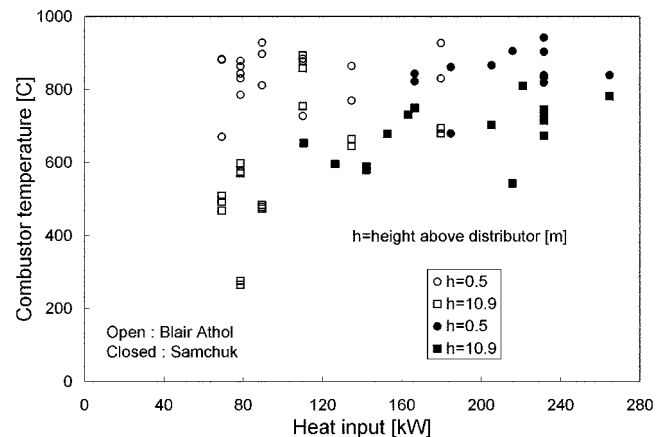


Fig. 3. The effect of heat input on combustor temperature.

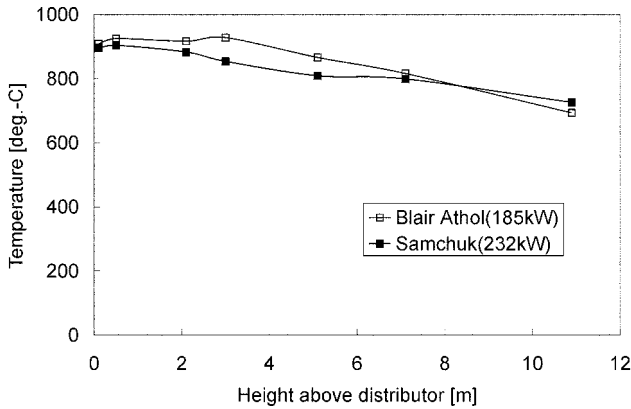


Fig. 4. Axial temperature distribution of imported bituminous coal and domestic anthracite.

온도변화를 나타낸 것이다. 연소로는 상용 보일러에 비해 연소로 부피와 표면적의 비가 매우 크며 이에 따라 열손실이 크게 발생한다. 따라서 연소로 하부와 연소로 상부인 배가스 출구간에 연소온도차가 비교적 크게 나타난다. 그러나 공급열량의 증가에 따라 연소로의 온도차는 점차 감소하여 100 °C 미만으로 수렴하였다.

유연탄과 무연탄간의 연소특성은 촉방향 온도분포에서 차이가 난다. Fig. 4는 유연탄과 무연탄의 촉방향 연소특성을 비교한 것이다. 유연탄은 상대적으로 무연탄보다 휘발성분이 많고 따라서 쉽게 착화되어 연소된다. 연소가 일어나는 부분은 주로 연소로 하부인 석탄 투입구 근처가 되며 이 부분의 연소로 온도가 상대적으로 높다. 무연탄은 반응성이 낮은 고정탄소가 주성분이고 상대적으로 착화시간이 길며 따라서 연소가 지연되어 입자가 연소로 상부까지 이동하는 동안 서서히 점화된다. 특히 연소로 상부 즉 연소로 출구는 연결되는 사이클론의 입구유속을 빠르게 하기 위하여 유로의 넓이가 갑자기 줄어들고 이 부분에서 입자의 정체가 일어난다. 이곳에서 무연탄의 미연탄소 입자가 정체되는 동안 계속 연소하게되며 연소로 상부의 온도가 상대적으로 높다.

Fig. 5는 유동화 공기 유속이 비산 연소재의 평균 입경에 미치는 영향을 나타내었다. 공기유속이 증가할수록 사이클론에서 포집되는 입자의 평균입경은 증가하게 된다. 그러나 사이클론의 효율이 실험중 공기의 유속범위에서 크게 변하지 않음으로서 사이클론을 통과하여 백필터에 포집되는 비산회(백필터회)의 평균입경은 변하지 않는다. 백필터회의 평균 입경은 탄종에 관계없이 또한 정해진 사이클론의 입구유속 범위 내에서는 연소로의 유동화 공기 유속에 무관하게 일정한 값을 나타낸다. 본 실험에서 사이클론 입구 유속범위는 10-20 m/s를 나타내었다.

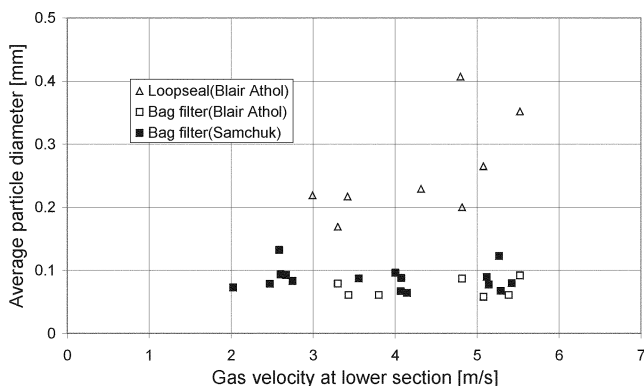


Fig. 5. The effect of gas velocity on average particle diameters in the cyclone and the bag filter collects.

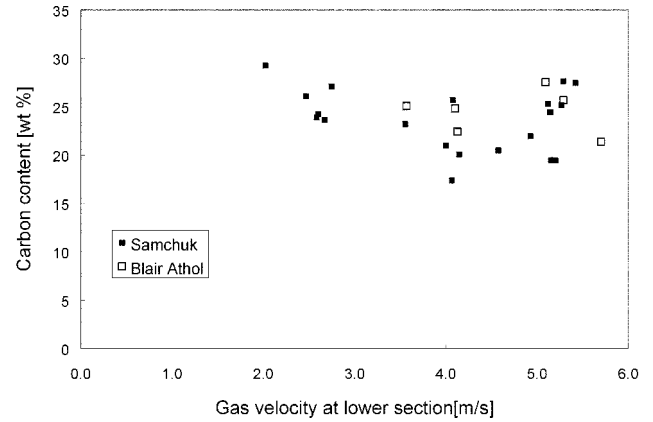


Fig. 6. The effect of dense bed gas velocity on carbon content of bag filter ash.

Fig. 6은 연소로 유속의 변화에 따른 백필터회의 미연 탄소농도를 나타낸 것이다. 유속의 차이에도 불구하고 백필터에서 수집된 연소재의 탄소농도는 25%에서 거의 변화가 나타나지 않았다. 또한 연소재 중 무연탄과 유연탄의 차이에 따른 탄소농도의 차이도 나타나지 않았다. 그러나 Table 2에서와 같이 유연탄의 경우 석탄 중 회분 1 g당 고정탄소 비는 5.7이며 무연탄의 경우 1.4이다. 유연탄과 무연탄 공히 고정탄소의 연소효율은 반응성, 연소온도, 반응시간(입자의 연소로 내 체류시간)으로 결정된다. 따라서 같은 회분기준 고정탄소 전환율은 유연탄이 훨씬 높다. Fig. 6을 토대로 회분중 탄소농도가 유무연탄 공히 회제 기준 0.25로 가정하고 같은 연소로에서는 같은 크기의 입자가 평균 체류시간이 같다고 보면 유연탄의 반응성은 (5.7-0.25):(1.4-0.25)로 나타낼 수 있으므로 유연탄이 무연탄 보다 4.7배 높다.

Fig. 7에는 유연탄과 무연탄의 고정탄소를 TGA에서 공기 분위기에서 온도를 상승시키면서 무게 변화를 나타내었다. 유연탄의 최대 연소반응 피크는 약 500 °C에서 나타나며 무연탄의 경우 700 °C에서 나타난다. 500-700 °C 온도범위는 고정탄소의 연소온도를 나타내는 것이고 국내 무연탄은 탄화정도가 높아 고정탄소 착화온도가 비교대상인 유연탄보다 200 °C정도 높게 나타난다.

Fig. 8은 유연탄과 무연탄 연소 비산회인 백필터회의 입경별 발열량 분포를 나타내었다. 석탄의 발열량은 입경에 무관하게 거의 일정한 발열량을 나타내었다. 그러나 백필터회의 발열량 즉 백필터회에 남은 미연분은 백필터회의 입경에 따라 큰 차이를 나타내었다. 그림에서 입경 0.1 mm 이상의 백필터회는 발열량이 급격하게 감소하며 입경 0.1 mm 이하의 백필터회는 발열량이 거의 일정하게 유지되는 것을 보여준다.

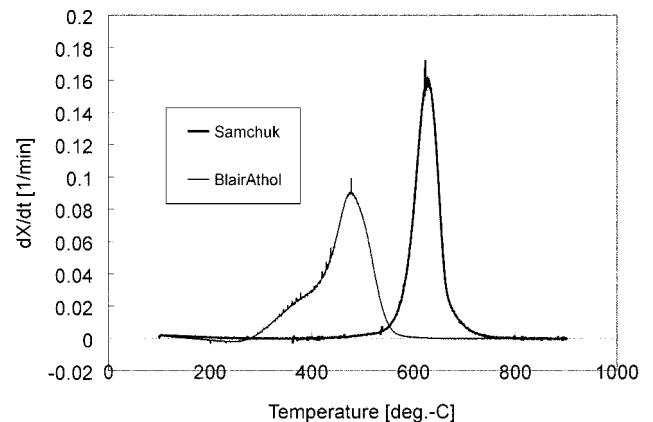


Fig. 7. Thermogram of samchuk and blair athol coal.

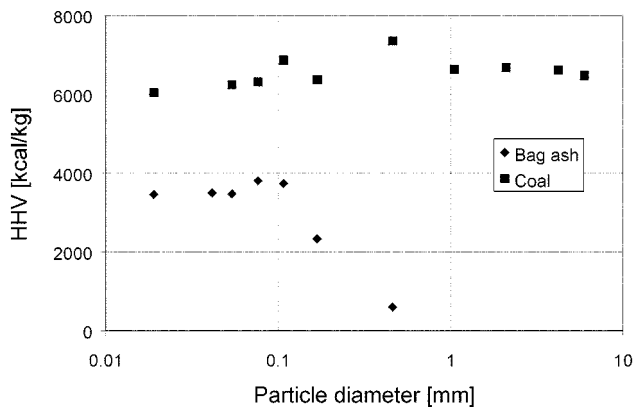


Fig. 8. The variation of heating value of particle by size(blair athol).

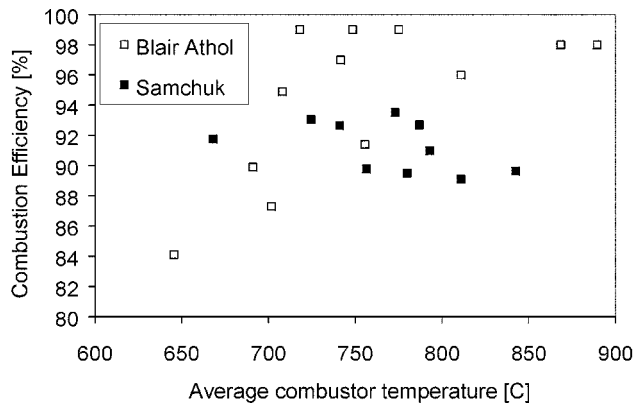


Fig. 9. Temperature effect on combustion efficiency.

따라서 입경 0.1 mm 이하의 입자는 연소로를 순환되는 횟수가 짧아 체류시간이 필요한 char 연소시간보다 매우 짧으며 따라서 고정탄소의 연소가 불완전하게 이루어짐을 나타내었다.

Fig. 9는 연소로 온도변화에 따른 유연탄과 무연탄의 연소효율을 나타내었다. 연소효율은 연소로 온도 증가에 따른 연소반응속도 증가로 온도상승을 따라 증가하였으나 연소로 평균온도 750 °C 이상에서는 일정한 값을 나타내었다. 무연탄은 유연탄보다 고정탄소의 반응성이 낮아 연소율이 낮고 발생 연소재량이 많아 전체 미연탄소량이 많다 이에 따라 연소효율이 낮게 된다. 연소효율은 연료 중 가연분과 연소재 중 남은 가연분의 비로 계산할 수 있다. 연소효율은 다음과 같이 계산되었다.

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

여기서, CE; combustion efficiency %

Ash(C, V); 연소재 중 가연분 즉 카본과 휘발분의 총량

Feed(C, V); 연료 중 가연분 즉 카본과 휘발분의 총량

순환유동층 연소재는 백필터나 전기집진기에서 회수되는 비산회와 연소로 하부로 배출되는 하부회(bottom ash)로 구분된다. 하부회는 연소로 체류시간이 길어 모든 가연분이 연소되어 거의 미연분을 포함하고

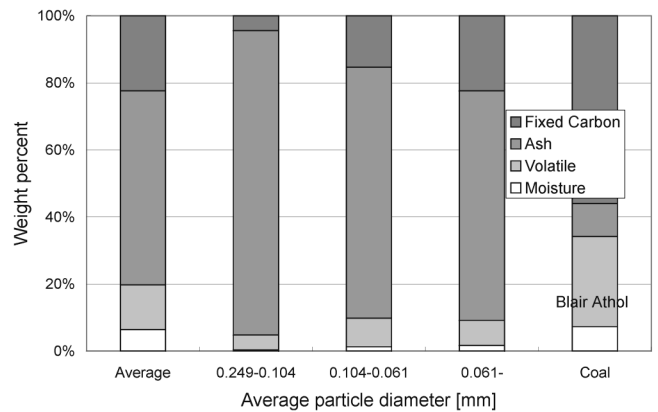


Fig. 10. Proximate analysis of fly ash by particle size cut(blair athol).

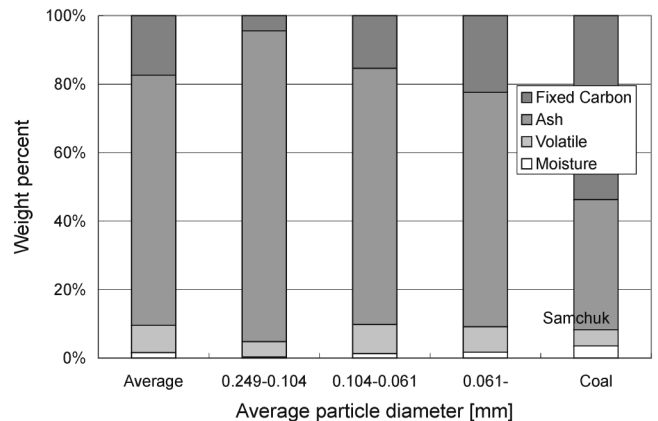


Fig. 11. Proximate analysis of fly ash by particle size cut(samchuk).

있지 않으므로 연소효율은 실제로 석탄 중 가연분의 양과 연소후 비산회에 함유된 가연분의 차로 계산된다. Fig. 10과 11에 유연탄과 무연탄 백필터회의 입경별 공업분석을 나타내었다. 백필터회의 평균입경 0.061 mm 이하의 입자는 미연탄소의 양이 백필터회의 평균치보다 높다. 0.061 mm 이하의 작은 입자는 사이클론 집진효율이 낮고 따라서 고정탄소의 연소가 마무리되기 전에 쉽게 사이클론에서 빠져나가므로 미연분 손실의 주요 부분을 맡게 된다. Table 3에 사이클론을 통해 빠져나가는 비산회의 입경별 무게분율과, 미연분을 나타내었다. 여기서 0.061 mm 이하의 입자는 유연탄의 경우 70%, 미연분 손실은 76%를 나타낸다. 무연탄은 각각 47%와 56%를 나타내므로 0.061 mm 이하 미분입자의 제거가 연소효율 향상에 얼마나 중요한가를 보여준다.

건조 석탄 중에 질소는 약 0.5-2%를 나타낸다. 질소는 석탄의 다른 연료와 함께 산화되나 그 과정은 매우 복잡하여 NO, N₂O, NO₂, NH₃, HCN 등으로 변환되며 다시 N₂로 환원되기도 한다[9]. Fig. 13은 연료중 질소성분의 NO_x의 전환율을 나타내었다[10]. 순환유동층 연소로의 연소온도가 850 °C로 낮게 조업되는 이유로 인하여 생성되는 NO_x는 모두 연료 중 질소성분의 산화로 만들어진 것으로 간주할 수 있다. NO_x의 발생은 무연탄 유연탄 모두 온도의 증가를 따라 증가하였다. 온도 증가에

Table 3. Weight fraction and combustible loss of fly ash by size cut

Dp,mm	Blair Athol		Samchuk	
	Fraction[-]	Contribution combustible loss	Fraction[-]	Contribution combustible loss
0.249-0.104	0.03	0.01	0.11	0.04
0.104-0.061	0.26	0.23	0.42	0.40
0.061-	0.70	0.76	0.47	0.56

5. 결 론

국내 삼척산 무연탄과 수입 호주 Blair Athol산 유연탄의 비교연소 시험을 내경 0.25 m 높이 11 m 벤치규모 순환유동층 시험연소에서 수행하고 그 결과를 다음과 같이 요약하였다.

(1) 유연탄은 석탄 투입구 주변에서 빠른 휘발분의 연소가 일어났으며, 주로 고정탄소인 무연탄은 비교적 연소로 상부의 연소가 높게 나타났다.

(2) 연소로내 공기유속이 증가하면서 비산입자의 입경이 굵어지고, 사이클론에서 포집되는 입자의 크기는 굵어졌다. 그러나 사이클론의 효율은 그대로 유지되었으며 입경의 크기변동이 없었다.

(3) 시험연소에서 수입 유연탄과 국내 무연탄의 고정탄소 전환율(연소율)은 회제를 기준으로 유연탄이 무연탄 보다 4.7배 높게 나타났다.

(4) 유속의 차이에 따른 연소효율의 차이가 크게 나타나지 않았다. 연소효율은 주로 연소온도와 사이클론 포집효율에 의해 결정되는 것으로 나타났다.

(5) 연소효율은 주로 백필터회에 포함된 미연분의 양으로 결정되었다. 특히 0.061 mm 이하의 입자는 유연탄의 경우 70%, 미연분 손실은 76%를 나타내었다. 무연탄은 각각 47%와 56%를 나타내었다. 따라서 0.061 mm 이하 미분의 연소가 전체 연소효율에 중요한 영향을 미침을 나타내었다.

(6) 온도변화에 따른 연료 중 질소의 전환율은 무연탄이 유연탄보다 같은 온도에서 작게 나타났다. 이는 국내무연탄의 질소성분이 적고 또한 대부분 반응성이 낮은 고정탄소와 결합되어 있기 때문으로 이해된다.

(7) CO의 발생은 연소로 온도증가를 따라 감소하였으며 유연탄과 무연탄의 차이가 나타나지 않았다.

감 사

본 연구는 에너지관리공단 기술개발본부의 청정에너지 기술개발사업 자금으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Basu, P.: *Chem. Eng. Sci.* **54**, 5547(1999).
2. Mann, M. D., Hajicek, D. R., Henderson, A. K. and Moe, T. A.: "EERC Pilot-Scale CFBC Evaluation Facility," Energy & Environmental Research Center, University of North Dakota(1992).
3. Choi, J. H., Son, J. E., Han, K. H., Bae, D. H. and Jo, S. H.: "Development of Circulating Fluidized Bed Coal Boiler Technology(I)," Korea Institute of Energy Research KE-91009G(1991).
4. Shun, D., Son, J. E., Park, Y. S., Ku, C. O., Han, K. H., Bae, D. H., Im, J. H. and Choi, J. H.: "Development of Circulating Fluidized Bed Coal Boiler Technology(II)," Korea Institute of Energy Research KE-920509G (1992).
5. Shun, D., Son, J. E., Han, K. H., Bae, D. H., Jo, S. H. and Choi, J. H.: "Development of Circulating Fluidized Bed Coal Boiler Technology(III)," Korea Institute of Energy Research KE-93040G(1993).
6. Shun, D., Bae, D. H., Han, K. H., Son, J. E., Kang, Y., Wee, Y. H., Lee, J. S. and Ji, P. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **34**, 321(1996).
7. Shun, D., Bae, D. H., Han, K. H., Son, J. E. and Cen, K.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 925(1999).
8. Park, Y. S. and Son, J. E.: *HWAHAK KONGHAK*, **31**, 287(1993).
9. Wartha, C., Winter, F. and Hofbauer, H.: "Carbon and Fuel Nitrogen Conversion under Fluidized Bed Conditions," Presented to 36th Int. Energy Agency Fluidized Bed Conversion Meeting(1998).

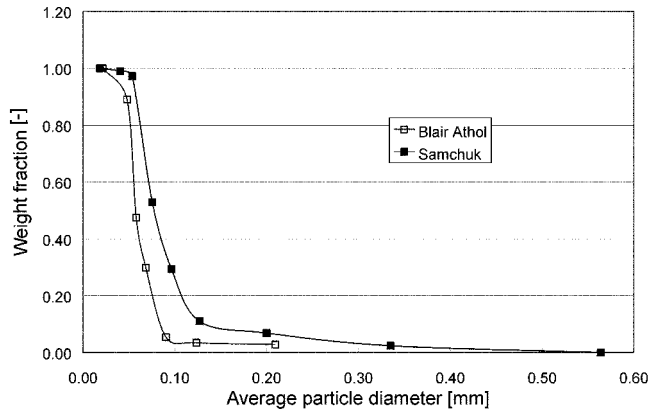


Fig. 12. Particle size distribution of fly ash.

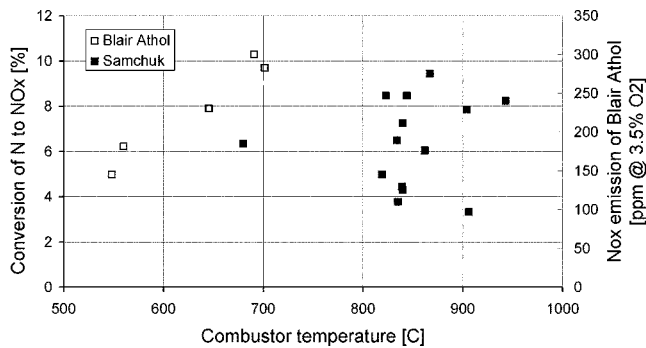


Fig. 13. The effect of temperature on fuel-N conversion.

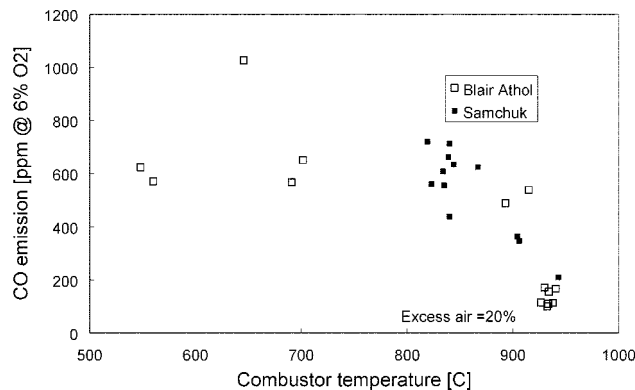


Fig. 14. Temperature effect on combustion CO emission.

다른 NO_x 의 전환율은 무연탄의 경우가 유연탄의 경우보다 낮게 증가하였다. 국내 무연탄은 일반적인 수입 유연탄보다 석탄 중 질소성분이 적다. 또한 석탄에 결합된 질소는 각각 휘발분과 char에 결합되어 있으며 무연탄의 질소는 휘발분이 적기 때문에 유연탄보다 질소가 char와 결합된 비율이 높다. 연소과정에서 char의 연소가 더딘 것과 마찬가지로 char와 결합된 질소성분의 산화도 더디게 나타나는 것으로 이해된다[10].

Fig. 14는 연소로 온도변화에 따른 일산화탄소 배출특성을 나타낸다. 실험은 과잉공기가 평균 20% 조건에서 수행하였다. 유연탄과 무연탄 모두 온도 증가에 따라 연소속도가 증가하면서 CO가 감소하는 경향을 나타낸다. CO 감소의 경향은 유연탄과 무연탄의 차이를 나타낼 만큼 충분한 자료를 확보하지 못하였으므로 본 그림에서는 탄종별 특징은 잘 나타나지 않는다. 한편 미국의 CCTI 프로젝트로 수행된 NUCLA 110MWe 순환유동층 보일러의 장기 운전 결과에서도 CO 발생에 관한 온도, 탄종, 과잉공기영향중 온도의 영향만이 두드러지게 나타났다[11].

10. Sovoboda, K. and Hartman, M.: *Fuel*, **70**, 865(1991). Fluidized Bed Demonstration Project," U.S. Department of Energy
11. Colorado-Ute Electric Association: "Nucla Circulating Atmospheric DE-FC21-89MC25137(1991).