

순환유동층 보일러에서 무연탄-유연탄의 혼합연소 특성

정의대, 문승재*†

한국동서발전, *한양대학교 기계공학부

Co-combustion Characteristics of Mixed Coal with Anthracite and Bituminous in a Circulating Fluidized Bed Boiler

Eui-Dae Jeong, Seung-Jae Moon*†

Korea East-West Power Co.,Ltd. Seoul 135-791, Korea

*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received April 25, 2010; accepted June 17, 2010)

ABSTRACT : This study investigated the characteristics of co-combustion of mixed anthracite (domestic and Vietnam) and bituminous coal (Sonoma, Australia) at circulating fluidized bed boiler in Donghae thermal power plant when mixing ratio of bituminous coal is variable. Co-combustion of bituminous coal contributes to improvement in general combustion characteristics such as moderately retaining temperature of furnace and recycle loop, reducing unburned carbon powder, and reducing discharge concentration of NO_x and limestone supply owing to improvement in anthracite combustibility as the mixing ratio was increased. However, bed materials were needed to be added externally when the mixing ratio exceeded 40% because of reduction in generating bed materials based on reduction in ash production. When co-combustion was conducted in the section of 40 to 60% in the mixing ratio while the supplied particles of bituminous coal was increased from 6 mm to 10 mm, continuous operation was shown to be possible with upper differential pressure of 100 mmH₂O (0.98 kPa) and more without addition of bed materials for the co-combustion of mixed anthracite and bituminous coal (to 50% or less of the ratio) and that of domestic coal and bituminous coal (to 60% of the ratio).

Key words : circulating fluidized bed, co-combustion, bed materials, upper differential pressure.

1. 서론

세계적으로 석탄수요는 매년 2.2%씩 증가해 2030년에는 2005년에 비해 73%늘어날 전망이라고 한다^[1]. 석탄은 세계적으로 비교적 고르게 분포되어 있고 매장량도 풍부하여 석유에 비해 가격경쟁력이 있어 각국의 온실가스 배출량 규제에도 불구하고 소비는 지속적으로 증가하고 있다.

유동층 연소기술은 석탄을 비롯하여 다양한 고체

연료를 가장 간단하고 친환경적으로 에너지화 할 수 있는 고체연료 연소방식으로, 연소로 온도를 약 900℃ 정도로 유지하여 질소산화물 생성을 억제할 수 있고, 석회석으로 노 내에서 직접 탈황을 할 수 있다. 또한 석탄을 연소하면서 바이오매스, 우드 칩과 같은 다양한 고체연료를 적정 비율로 혼합하여 연소할 수도 있다. 이러한 장점을 이용하여 다탄종 석탄 혼합연소, 석탄과 기타 화석연료 혼합연소 등을 통한 연료 다변화와 경제적이고 친환경적인 연료를 연소할 수 있는 기술력 확보에 노력을 지속해 오고 있다.

Fig. 1은 2002년 이후 동해화력의 국내 무연탄 (anthracite) 및 수입 무연탄 사용 경향과 이에 따

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0450

E-mail address: smoon@hanyang.ac.kr

른 설비이용률을 나타내었다. 근래 국내 무연탄의 민수용 난방연료 수요가 급증되면서 발전용 무연탄 배정량이 점진적으로 축소되었고, 이에 따라 연료탄 부족에 의한 설비이용률 저하로 2007년 이후 국내 무연탄과 성상이 비슷한 베트남탄을 수입하여 국내탄과 혼합연소 함으로써 설비이용률을 증가시키고 있다.

그러나, 국내 탄광 고갈에 따른 무연탄 총생산량 감소로 발전용 탄배정량이 축소되고 수입 무연탄 사용량이 증가될 것으로 예상됨에 따라 석탄가격 변동 등 수입 무연탄 수급 비상시를 대비하고 경제성 있는 연료탄 선택의 폭을 넓히기 위해 혼합 무연탄과 유연탄(bituminous coal)의 혼합연소 실험을 실시하였다.

본 연구는 동해화력 순환유동층발전소를 대상으로 하여 국내 무연탄과 베트남탄을 혼합한 무연탄에 호주산 유연탄을 0 ~ 60% 까지 혼합율을 변화시키면서 연소하였을 때 연소특성 변화를 고찰하였고, 혼합율 40% 이상에서는 층물질 생성량 감소의 문제점이 발생함에 따라 유연탄 공급입도를 6 mm 에서 10 mm 로 증대하여 혼합무연탄과 유연탄, 국내탄과 유연탄의 혼합연소시 층물질 보충 없이 연속운전 가능한 유연탄 혼합율에 대해 고찰하였다.

2. 연료탄 혼합연소의 필요성

2.1 연소방식 측면

석탄 연소방식에는 미분탄 연소방식과 유동층 연소방식이 있다. 미분탄 연소방식은 석탄을 75 μm 이하의 입도까지 미분화 시킨 석탄을 공기와 함께 버너에서 연소실내로 분사시켜 연소하는 방식으로, 다

량의 석탄 연소와 신속한 자동제어의 필요성 때문에 발전용 대형 보일러에서는 미분탄 연소방식을 가장 많이 채용하고 있다.

이에 비해 유동층 연소방식은 연소되는 연료가 불활성의 층물질에 둘러싸여 있어 연료의 종류, 회분, 수분 함유량 등이 변하여도 연소에 미치는 영향이 적고, 미분탄 연소 등 기존 연소로에는 적합하지 않는 고유황탄, 저품위탄, 폐기물 등 모든 가연성 물질에 대하여 광범위한 연료 사용이 가능하다.

2.2 설비이용률 측면

Table 1은 국내 무연탄을 배정받아 사용하는 발전소의 석탄사용량 및 이용률을 나타내었다. 표에서와 같이 탄배정량에 따른 연료계약발전의 영향으로 발전설비 이용률은 발전소 3곳 모두 70% 미만임을 알 수 있다. 이는 국내탄 배정량이 축소될 경우 전력생산량 감소로 나타나 발전수익의 감소뿐만 아니라 탄재고량에 따른 부분부하 운전으로 발전효율은 저하되고 연료비용은 상승하게 된다. 이를 해결하기 위한 방안으로는 국내탄 배정량을 증가시키거나 저가의 수입 대체탄을 국내탄과 혼합 연소하여 설비이용률을 증대시키는 방법이 있다. 그러나 국내 탄광의 고갈과 무연탄 총생산량의 감소 추세에서 국내탄 배정량을 증가시키는 방법은 현실적 대안이 될 수 없다. 따라서 저가의 수입 대체탄과의 혼합연소를 통해 당면 문제점을 해결할 수 있다.

2.3 연료비용 측면

Table 2는 2009년 4월 기준 호주산 유연탄과 베트남 산 무연탄의 도입단가를 유연탄 발열량으로 환산하여 나타내었다. 표에서 유연탄의 발열량이 베트

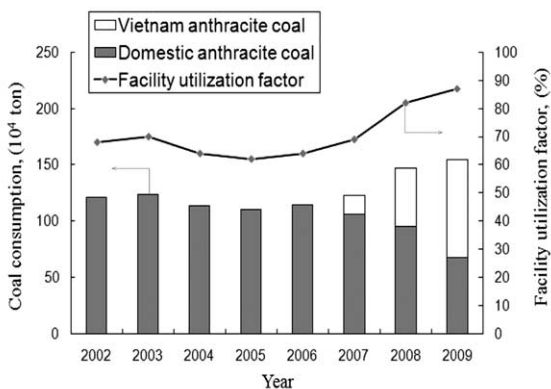


Fig. 1 Trend of coal consumption and facility utilization factor.

Table 1. Coal consumption and utilization factor for domestic anthracite coal fired power plants.

(Unit : 10⁴ton, %)

Year	Donghae T/P		Yeongdong T/P		Seochon T/P	
	Coal consumption	Utilization factor	Coal consumption	Utilization factor	Coal consumption	Utilization factor
2002	121	68.8	56	59.8	88	65.5
2003	123	70.3	65	63.8	88	64.2
2004	113	64.0	50	55.3	73	55.7
2005	110	62.5	53	58.6	73	55.7

* T/P : Thermal power plant

Table 2. Comparison of imported unit price for Vietnam and bituminous coal. (Unit : US\$/ton)

Coal	Heating value (kcal/kg)	Cost and Freight	Fare	Conversion of heating value (6,158kcal/kg)	Total
Vietnam Coal(A)	5,100	70	10.95	14.52	95.47
Bituminous Coal(B)	6,158	80.94	3.85	-	84.79
Difference (A-B)	△1,058	△ 10.94	+7.1	+14.52	+10.68

남 탄에 비해 약 1000 kcal/kg 정도 높아 열량으로 환산하여 도입단가를 산정할 경우 베트남 탄보다 10.68 US\$/톤의 낮은 가격으로 구매할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 유연탄을 혼합연소 할 경우 설비 이용률 유지는 물론 연료비 원가가 낮아져 연료비용 절감 측면에서 유리하다.

3. 순환유동층 보일러

3.1 유동층 원리

Fig. 2에 기체속도에 따른 압력강하별 유동층의 분류를 나타내었다. 공기분산관 위에 놓인 고체층에 공기를 주입하여 공기량에 따라 고체층에서의 압력강하를 측정하면 압력강하는 고체층의 무게와 같아질 때 까지 증가한다. 이 구간에서 운전되는 유동층을 고정층(fixed bed)이라 한다. 압력강하가 고체층의 무게와 같아지면 이 조건에서는 기체에 의해서 고체에 가해지는 견인력이 중력과 같아지며, 고체들이 흔들리고 상호 움직임을 갖기 시작한다. 이를 최소유동화 상태라고 부르며, 이때 기체의 공압속도(supercritical velocity)를 최소유동화속도라고 하며, 기체의 압력손실은 최대가 된다. 이후 계속적으로 유속이 증가하면 압력강하는 일정하게 유지되지만 고체층이 팽창되며 고체들은 서로 분리되어 거동하고 층은 전체적으로 액체와 같은 특성을 보이기 시작한다. 고체층을 최소유동화시키고 남은 과잉의 기체는 층을 큰 공극의 형태로 통과하며 이를 기-액계에서와 유사하게 기포라고 부른다. 이 기포의 거동은 층을 매우 격렬하게 끓는 액체와 같은 형상을 만든다. 기포는 상승하면서 후류에 고체를 안고 상승하며 층 표면에서 기포는 파괴되고 고체와 분리된다. 이와 같은 현상은 기포에 의한 입자들의 상승과 이 공간을 채우는 입자들의 하향 거동을 층 내에

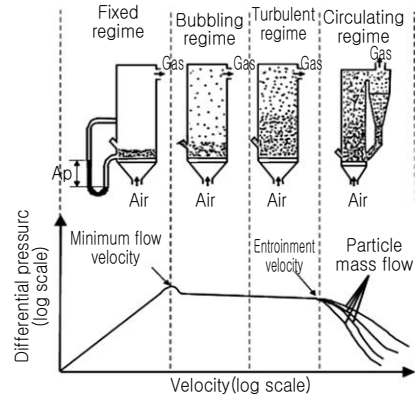


Fig. 2 Fluidization regime

형성하며 기포흐름이 클수록 점차 격렬해지고 고체 혼합도가 좋아진다. 한편 유체의 흐름은 고체입자의 마모 및 비산·유출을 발생시키며 유속이 증가함에 따라 급격히 가속시킨다. 이러한 현상을 기포유동층이라 한다.

3.2 보일러 구성

전 세계적으로 상용 운전 중인 순환유동층 보일러는 열 교환 방식에 따라 크게 2가지 형태로 나뉘어진다. Ahlstrom 방식과 Lurgi 방식이 있다. Ahlstrom 방식의 순환유동층 연소로는 외부열교환기가 설치되어 있지 않으나, Lurgi 방식의 순환유동층 보일러는 외부열교환기와 저회냉각기(FBAC ; fluidized bed ash cooler)가 연결되어 있는 보일러이다^[2]. Fig. 3은 Lurgi 방식의 순환유동층 보일러의 개략도이다. 보일러의 구성은 크게 석탄 및 석회석 투입장치, 공기 주입부, 연소로 및 재순환부인 사이클론, 루프 쉘, 외부열교환기 그리고 후부통로로 되어 있다.

3.3 압력분포 및 고체 순환

순환유동층 보일러에 있어 층물질 순환은 연소, 열 전달, 탈황에 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자이다. 입자 재순환 시스템은 사이클론, 스텐드 파이프, 루프 쉘 순으로 직렬배열 되어 있어 연소로에서 비산된 층물질 입자들은 대부분 사이클론에서 포집되고 다시 연소로로 재순환되는 과정을 반복한다. 루프 쉘을 포함하는 반응기 전체의 압력 수지식은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[3].

$$\Delta P_{sp} = \Delta P_{ls} + \Delta P_r + \Delta P_c \quad (1)$$

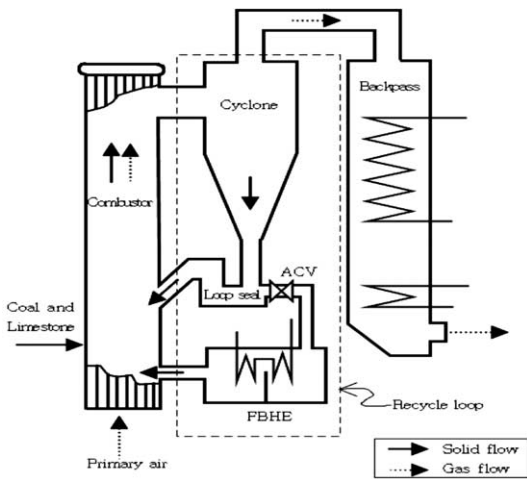


Fig. 3 Configuration of Lurgi's circulating fluidized bed combustor.

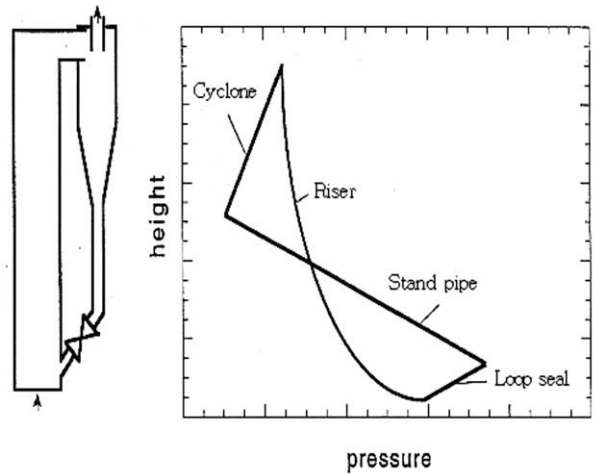


Fig. 4 Typical pressure distribution in a circulating fluidized bed boiler^[6].

여기서, ΔP_{sp} , ΔP_{ls} , ΔP_r , ΔP_c 는 각각 스텐드 파이프, 루프 씰, 상승관, 사이클론의 압력강하를 나타낸다.

Fig. 4는 순환유동층 내 전형적인 압력분포 형태를 보여준다. 그림에서 스텐드 파이프에 걸리는 압력강하는 사이클론과 상승관 및 루프 씰의 압력강하의 합이며 이는 식(1)에서 잘 나타내 주고 있다. 고체 입자의 순환은 루프 씰과 상승관의 압력차에 의해 높이가 낮은 연소로의 하부로 재순환 되며, 고체 순환량은 다음 식에 의하여 나타낼 수 있다^[3].

$$G_s = \rho_s U_s \epsilon_s \quad (2)$$

여기서, ρ_s 는 고체의 밀도, U_s 는 상승관 내 고체 입자의 속도, ϵ_s 는 상승관 내 고체 체류량(분율)을 나타낸다. 따라서 상승관 내 압력차를 알면 고체 체류량은 다음 식에 의해 구할 수 있다^[3].

$$\epsilon_s = \frac{(\Delta P_r/L)}{(\rho_s - \rho_g)g} \quad (3)$$

4. 무-유연탄 혼합연소

4.1 실험조건

본 연구는 동해화력 순환유동층연소 보일러 1호기

를 대상으로 하여 '09. 04.20 ~ 05.31까지 42일간 출력 200 MW를 유지한 상태에서 무-유연탄의 혼합연소 실험을 실시하였다. 연구에 사용된 실험값은 결과분석의 간편성과 유의성을 위하여 유연탄 혼합율을 독립변수로 하여 혼합율별 평균값과 상부차압의 경우 일일 평균값을 사용하였고, 출력변동 200 ± 2 MW범위를 벗어나는 값은 분석에서 제외하였다.

Table 3은 국내탄과 베트남탄을 혼합연소 중에 유연탄(호주산, Sonoma)을 0 ~ 60% 까지 혼합율을 변화시키면서 연소시켰을 때의 실험조건을 나타내었고, Table 4는 유연탄의 공급 입도를 6 mm에서 10 mm로 증대시켰을 때 혼합율 40 ~ 60% 구간에서 상부차압 변화를 통해 증물질 생성량 변화에 대한 실험조건을 나타내었다.

4.2 연소특성

4.2.1 연소로 및 재순환부 온도

Fig. 5는 유연탄 혼합율 증가에 따른 연소로 및 재순환부 평균 온도변화를 나타내었다. 연소로 하부와 상부의 평균온도 변화는 유연탄 혼합율 증가에 따라 다소 감소(약 16°C)하는 경향을 보이고 있으며, 탈황효율 좋은 $860^\circ\text{C} \sim 870^\circ\text{C}$ 사이에서^[7] 운전되고 있음을 관찰할 수 있다. 사이클론 출구 부분의 온도 또한 점차 감소(약 20°C)하고, 이러한 경향은 루프

Table 3. Test condition for co-combustion of anthracite-bituminous.

Case No.	Mixed anthracite(%)		Mixing ratio of bituminous (%)	Injection of bed materials (ton)
	Domestic coal	Vietnam coal		
1	100	-	0	-
2	23	70	7	-
3	41	44	15	-
4	37	38	25	-
5	27	43	30	-
6	23	42	35	80
7	13	47	40	
8	12	43	45	100
9	17	33	50	
10	16	29	55	50
11	35	5	60	

셀 온도(약 19℃)에서도 관찰할 수 있다. 유연탄 혼합율 30 ~ 40% 구간에서 재순환부 온도가 상승하는 경향을 보인다. 이것은 유연탄 회 발생량이 감소되면서 층물질 순환량이 감소되었기 때문으로 이해할 수 있다.

4.2.2 미연탄소 배출 분율

Fig. 6은 유연탄 혼합율 증가에 따른 회 발생량과 미연탄소 배출 분율의 관계를 나타내었다. 미연탄소

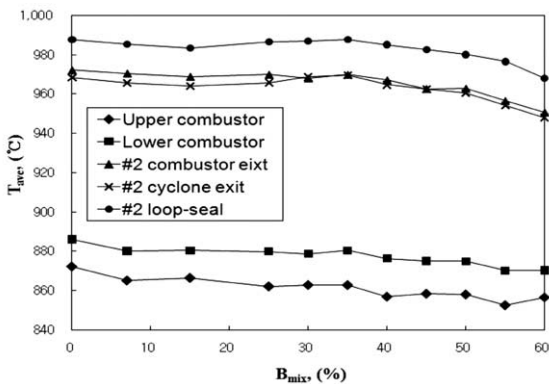


Fig. 5 Trend of average temperatures in the recycle loop.

Table 4. Test condition for increasing bituminous particle size.

Case No.	Mixed Anthracite(%)		Mixing ratio of bituminous (%)	Injection of bed materials (ton)
	Domestic coal	Vietnam coal		
1	37	18	45	80
2	16	29	55	
3	50	-	50	-
4	45	-	55	-
5	40	-	60	-

배출 분율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$UCF = \frac{M_u}{M_a} \times 100 \quad (4)$$

여기서, UCF는 미연탄소 배출 분율(unburned carbon fraction), M_a 는 석탄회 중량, M_u 는 석탄회 중 미연탄소 중량을 나타낸다.

대부분의 미연탄소는 비회(fly ash)에 함유되어^[8] 있으므로 비회 중 미연탄소 값을 사용하였으며, 유연탄 혼합율 증가에 따라 회 발생량이 감소하였고 미연탄소 배출 분율은 약간 증가하여 이은모 등(2005)^[9]의 연구결과와 같은 경향을 나타내었다. Fig. 6에서 회 발생율은 5.6% 감소한 반면에 미연탄소 배출 분율은 0.3% 증가하는데 그쳐 미연탄소 절대발생량은 감소되었음을 알 수 있다.

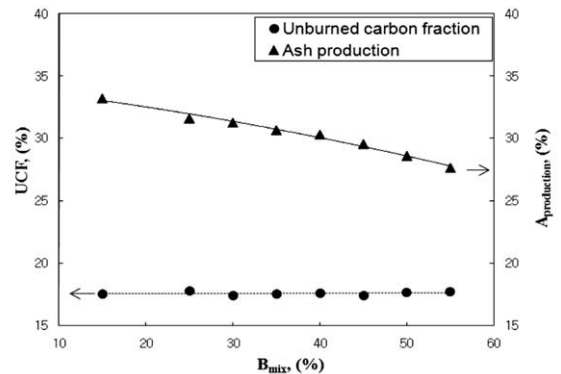


Fig. 6 Change of upper differential pressure and ash production.

순환유동층 보일러에서 무연탄-유연탄의 혼합연소 특성

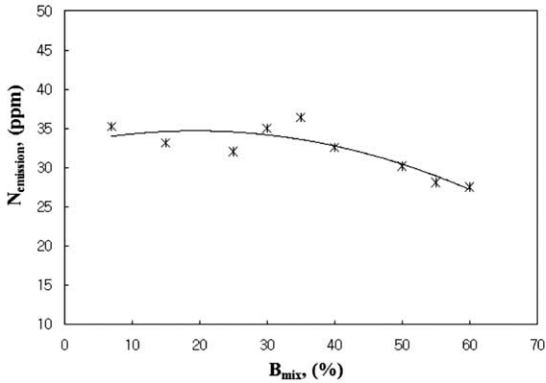


Fig. 7 Change of NO_x emission concentration.

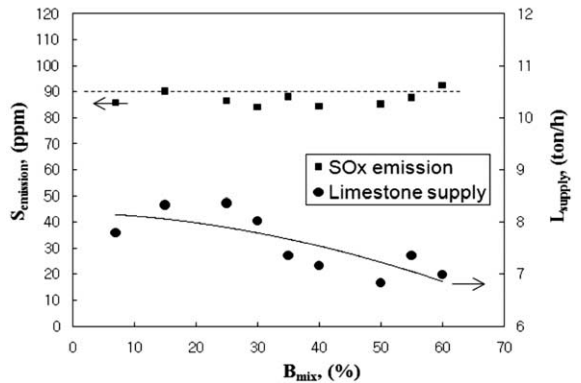


Fig. 8 Change of limestone supply.

4.2.3 유해 배가스 배출량

Fig. 7은 배기가스 중 산소 농도 4%를 기준으로 유연탄 혼합을 증가에 따른 NO_x 배출농도 변화를 나타내었다. 무연탄의 질소성분이 국내탄은 0.2%, 베트남 탄이 0.7%인 것에 비해 유연탄은 1.9%로 다소 많음에도 불구하고 NO_x 배출 농도는 유연탄 혼합율을 증가시킬수록 7.5 ppm 감소되었다. 이는 유연탄 발열량 증가의 영향으로 석탄사용량이 감소되어 질소성분 함량이 감소되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8에는 황산화물(SO_x) 배출농도를 자체 환경 기준치인 90 ppm을 일정하게 유지한 상태에서 이 때 소비되는 석회석 사용량을 나타내었다. 유연탄 혼합율이 증가할수록 발열량 증가에 의한 석탄사용량

감소와 연소로 하부 온도 감소로 탈황효율이 좋은 860 ~ 870°C 범위에서 운전됨에 따라 석회석 소비량도 0.8 ton/h 감소되어 황산화물 배출 농도가 낮아짐을 알 수 있다.

4.2.4 증물질 생성량

순환유동층 보일러에서 증물질은 연소로에서의 열전달 및 연소 특성을 결정짓는 중요한 영향 인자로, 상부차압을 통해 증물질 유동상태를 예측할 수 있다.

Fig. 9는 유연탄 혼합율을 0 ~ 40% 까지 변화시켰을 때 회 발생량과 상부차압의 변화를 나타내었다. 유연탄의 혼합율이 증가할수록 회 발생량은 약 5% 감소하고, 이에 따라 순환에 기여하는 증물질

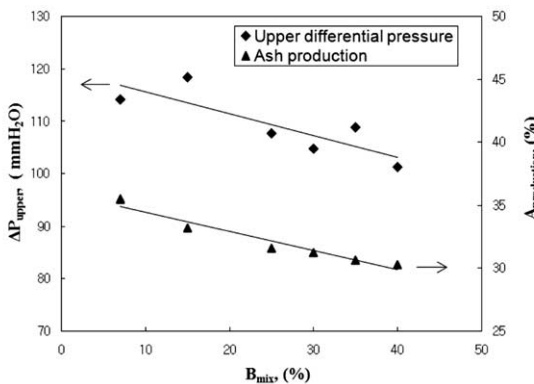


Fig. 9 Change of unburned carbon fraction and ash production.

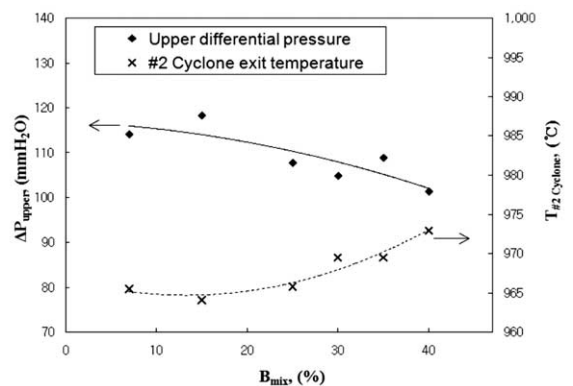


Fig. 10 Change of upper differential pressure versus #2 cyclone exit temperature.

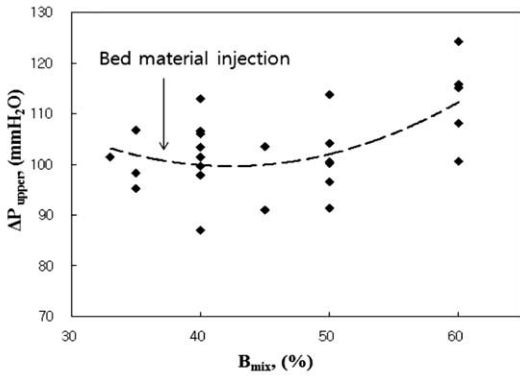


Fig. 11 Change of upper differential pressure by injection of bed materials.

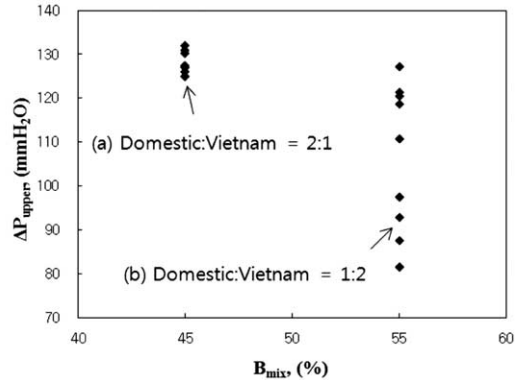


Fig. 12 Distribution of upper differential pressure for co-combustion of mixed anthracite and bituminous coal.

생성량이 감소됨을 알 수 있다. 이는 유연탄의 낮은 회분함량에 기인하는 것으로, 유연탄 혼합율을 증가시킬 경우 석탄발열량 증가로 인한 석탄소비량이 감소하고 이에 따라 회 발생량이 감소하여 상부차압은 강하됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 유연탄 혼합율에 따른 상부차압의 변화와 #2 사이클론 출구의 온도변화를 나타냈다. Fig. 10에서 상부차압과 사이클론 출구온도 변화는 음의 상관관계가 있음을 관찰할 수 있다. 유연탄 혼합율이 35% 이하의 구간에서는 평균 상부차압이 110 mmH₂O(1.078 kPa) 이상, 사이클론 출구 온도는 970℃ 이하에서 운전되었고, 40%를 넘으면서 상부차압은 100 mmH₂O(0.98 kPa) 근처로 강하 추세에 있고, 사이클론 출구온도는 975℃ 부근으로 상승 추세에 있다. 이것은 순환하는 충물질량이 감소함에 따라 연소로에서 충분한 열전달이 이루어 지지 않음을 의미하고 혼합율을 높일 경우 상부차압은 더욱 강하하고 충물질 감소에 따라 재순환부 온도가 증가될 것임을 예측할 수 있다. Fig. 11은 유연탄 혼합율 40% 이상에서 충물질 보충에 의한 상부차압의 변화를 나타내었다. 그림과 같이 혼합율 40% 이상에서는 외부에서 약 230 톤의 충물질을 보충하여 상부차압을 100 mmH₂O(0.98 kPa) 이상으로 유지할 수 있었다.

Fig. 12에 (a) 국내탄과 베트남탄 혼합비율 2:1 에서 유연탄 45% 혼합연소한 경우와 (b) 국내탄과 베트남탄 혼합비율 1:2 에서 유연탄 55% 혼합연소 한 경우의 상부차압 변화를 나타내었다. 연소로에 공급되는 석탄 입도 중 투입 즉시 충물질로 작용하는

0.075 ~ 2.8 mm 범위의 분율이 베트남탄 56% 에 비해 국내탄은 66% 로 높아 연소로 상부차압이 평균 130 mmH₂O(1.27 kPa)로 유지되었으며 양호한 연소 및 유동상태를 보였다. 반면에 베트남탄의 혼합비율을 2배로 하였을 때는 상부차압의 변동폭이 크고 특히, 재순환부의 온도가 불안정한 특성을 보이는 상부차압 100 mmH₂O (0.98 kPa) 이하의 값을 가지는 경우도 있어 유연탄 혼합율 50% 이상에서 충물질의 보충이 필요한 것으로 고찰되어 입도 증대 전과 비교할 때 충물질 보충 없이 운전이 가능한 혼합율이 약 10% 증가 되었다.

Fig. 13은 국내탄에 유연탄을 50 ~ 60%로 혼합하였을 때 상부차압의 변화를 나타내었다. 혼합율 60%에서도 상부차압 값은 평균 110 mmH₂O (1.07kPa) 이상을 유지하였다. 이는 국내탄 사용량 증가로 충물질로 작용하는 입도 분포 내의 석탄공급량이 증가되었고, 유연탄 입도 증대로 인한 연소 완료시간 연장으로 순환에 참여하는 충물질량이 증가되었기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

동해화력 1호기 순환유동층보일러에서 출력 200 MW로 고정하여 국내 무연탄과 베트남탄을 혼합연소 하는 중에 호주산 유연탄을 혼합율 60%까지 변화 시켜 연소하였을 때 연소특성 변화에 대한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유연탄 혼합율을 증가시킬수록 발열량 증가에 의한 무연탄 연소성 개선의 영향으로 연소로 및 재

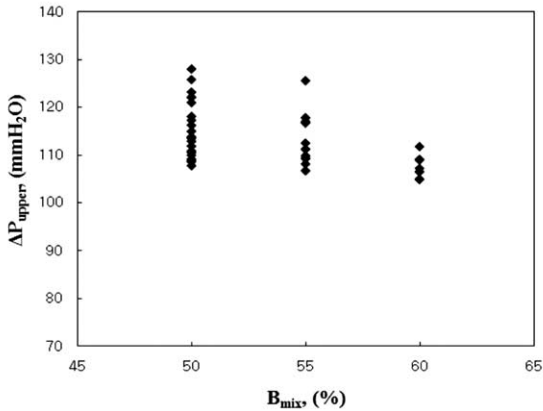


Fig. 13 Distribution of upper differential pressure for co-combustion of domestic anthracite and bituminous coal.

순환부 적정온도 유지, 미연탄소 배출량 감소, NO_x 배출 농도 및 석회석 사용량 감소 등 전반적인 연소 특성이 향상되었다.

(2) 층물질로 사용되는 석탄회가 석탄사용량 감소에 따른 회발생량 감소로 상부차압이 강하여 연소로와 재 순환부 온도가 상승하는 등 불안정한 특성을 보였고, 유연탄 혼합율 40% 이상에서는 외부에서 층물질 보충이 필요하였다.

(3) 유연탄 공급입도를 6 mm 에서 10 mm로 증대하여 유연탄 혼합율 40~60% 구간에서 혼합연소 한 결과, 혼합 무연탄과 유연탄, 국내탄과 유연탄의 혼합연소는 각각 유연탄 혼합율 50% 이하와 60%까지는 층물질의 보충 없이 상부차압을 100 mm H₂O(0.98 kPa) 이상을 유지하면서 연속운전이 가능하였다.

참고 문헌

1. 한근희, 현주수, 최원길, 이종섭, 2009, 2 MWe 순환유동층 발전 플랜트 에서 유연탄과 북한 무연탄 혼소 시험 특성 연구, 화학공학학회 Vol. 47, No. 5 pp. 580-586.
2. 김상돈, 이시훈, 이종민, 김재성, 최정후, 2000, D화력 순환유동층 보일러에서 의 무연탄 연소 특성, 화학공학학회 Vol. 38, No. 4 pp. 516-522.
3. 김성원, 남궁원, 김상돈, 1996, 순환유동층내 loop-seal을 갖는 고체 재순환 부의 특성, Theories and Applications of Chem. Eng., Vol. 2, No. 2(2339).
4. 하준호, 정진도, 김장우, 2004, 국내 무연탄의 순환유동층 보일러에서 탈황 특성 연구, J. KOSAE Vol. 20, No.4 pp.429-436.
5. 이은모, 이종민, 김재성, 2005, 순환유동층에서 유·무연탄 혼소 특성, 한국연소학회지 Vol.10, No. 3, pp. 1-9.
6. Jens Paulus Hannes, 1996, Mathematical modelling of circulating fluidized bed combustion, pp.38.
7. Geldart, D., 1973, Types of Gas Fluidization, Powder Technology, 7, pp.285-292.
8. 동해화력발전처, 2009, 제4차 혼합연소시험 결과보고서.
9. Daizo Kunii and Octave Levenspiel, 1997, Circulating fluidized-bed reactors, Chemical Engineering Science, vol. 52, pp 2471-2485.