

2 MWe 순환유동층 발전 플랜트에서 유연탄과 북한 무연탄 혼소시험 특성 연구

한근희[†] · 현주수 · 최원길 · 이종섭

한국에너지기술연구원 온실가스연구단
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
(2009년 6월 26일 접수, 2009년 7월 28일 채택)

A Study of Co-Combustion Characteristics of North Korean Anthracite and Bituminous Coal in 2 MWe CFBC Power Plant

Keun-hee Han[†], Ju-soo Hyun, Won-kil Choi and Jong-seop Lee

Greenhouse Gas Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea
(Received 26 June 2009; accepted 28 July 2009)

요 약

본 연구에서는 2 MWe 규모 순환유동층 발전소에서 중국산 유연탄과 북한산 무연탄의 혼합연소특성을 실험적으로 고찰하였다. 중국유연탄과 호주유연탄을 과잉공기량과 층온도 등을 변수로 실험한 결과, 연소효율은 석탄입자의 입도와 석탄중의 휘발분의 영향을 받으며, 이 때 미연탄소분은 Fly ash 5~7%, 바닥회 0.3% 수준으로 중국 유연탄의 연소효율은 99.5% 이상을 보였다. 북한산 무연탄과 유연탄의 혼소시 혼합비 20%에서 무연탄의 평균입도가 작아 연소실에서 비산되는 입자로 인해 연소효율은 5% 이상 저하되었다. 그러나 SO₂와 NO_x의 배출농도는 크게 변화하지 않았다. 배출되는 대기오염물질의 농도는 NO_x 200~250 ppm(O₂ 6%), SO₂ 100~320 ppm(O₂ 6%)이었다. SCR 공정에서 2~13 l/min 범위의 NH₃ 공급으로 30~65%의 NO_x가 저감되었다. Limestone을 이용한 노내탈황에서 약 Ca/S 몰비 6.5를 공급했을 때 SO₂가 75% 제거되었고, Mg(OH)₂를 흡수제로 하는 FGD를 운전했을 때 pH 5.0 이상에서 100% 탈황효과를 보였다.

Abstract – In this study, co-combustion characteristics of Chinese bituminous coal and North Korean anthracite were investigated using a 2 MWe scale circulating fluidized bed power plant. At first, the combustion efficiency of bituminous coal of China and Australia as a function of excess air ratio and temperature were observed. The results showed that the combustion efficiency was influenced by particle size and volatile content of coal, the combustion efficiency of Chinese bituminous coal was over 99.5%. The unburned carbon particles from fly ash and bottom ash were a content 5~7% and 0.3%, respectively. The combustion efficiency with the mixture ratio 20% of bituminous coal and anthracite decreased over 5% because of the increase of entrained particles by a small average particle size of anthracite in the combustor. However, the outlet concentration of SO₂ and NO_x was not changed remarkably. The concentrations of the typical air pollutants such as NO_x and SO₂ were 200~250 ppm(O₂ 6%), 100~320 ppm(O₂ 6%) respectively. The outlet concentration of NO_x was decreased to 30~65% with NH₃ supplying rate of 2~13 l/min in SCR process. The SO_x removal efficiency was up to 70% by in-furnace desulfurization using limestone with Ca/S molar of approximately 6.5. With wet scrubbing using Mg(OH)₂ as absorbent, the SO_x removal efficiency reached 100% under near pH 5.0 of scrubbing liquid.

Key words: Circulating Fluidized Bed, Coal Combustion, Flue Gas, Emission, Co-Combustion

1. 서 론

세계적인 석탄수요는 매년 2.2%씩 증가해 2030년에는 2005년에 비해 73% 늘어날 전망이다. 석탄은 각국의 온실가스 배출량 규제에도 불구하고 소비는 지속적으로 증가하고 있다. 중동지역에 편중된 석유에 비해 석탄은 세계적으로 비교적 고르게 분포되어 있으며 매장량도 풍부하다. 현재 석탄 매장량은 미국(27%), 러시아(17%),

중국(13%), 인도(11%), 호주(9%) 의순이다[1].

다양한 고체연료를 가장 간단하고 친환경적으로 에너지화 할 수 있는 고체연료의 연소방식은 순환유동층연소이다. 순환유동층연소는 석탄을 사용하는 중소규모의 산업용 열병합설비로서 널리 보급되어 있으며, 석탄을 연소하면서 폐기물, 바이오매스, wood chip과 같은 다양한 고체연료를 적정 비율로 혼합하여 연소할 수 있다. 또 연소로의 온도를 약 900 °C 정도로 유지하므로 질소산화물의 생성을 억제할 수 있고, 석회석으로 노내에서 탈황을 할 수 있는 장점이 있다[2].

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

우리나라에서 석탄은 산지가격보다 운송비가 비싼 실정이며, 수입되는 석탄의 대부분은 황함량 0.5% 미만의 저유황탄이지만, 향후 에너지 상승 및 자국 자원에 대한 보전정책이 심각해 질 경우 황함량이 높은 고유황 석탄 수입이 예상되므로 이에 대한 기술개발이 시급히 요구되고 있다.

고유황 석탄을 효과적으로 연소시키기 위해서는 연소로 내부에서 탈황이 가능한 순환유동층 보일러 시스템이 매우 유망한 기술로 대두되고 있다. 이에 고유황석탄이나 폐기물과 같은 고체연료를 사용하기 위해서는 연소기술뿐만 아니라 연소중에 발생하는 대기오염물질의 처리기술을 함께 개발하여야 할 것이다. 한편 폐기물의 효율적인 연소와 발생하는 대기오염물질의 처리기술 개발은 기후변화협약에 의한 이산화탄소의 배출량 감축에 기여할 것이고, 아울러 연소배가스 후처리설비를 복합적으로 구성하여 고유황탄과 폐기물을 혼소하여 에너지화할 수 있을 것으로 판단된다.

근래 북한지역의 무연탄이 국내로 유입되고 있고, 그 양이 점차 증가되고 있는 추세이다. 북한산 무연탄은 열량이 높고, 회분은 낮으며, 고정탄소함량이 높아 무연탄을 필요로 하는 산업분야에 사용되고 있다. 이에 본 연구에서는 국내 열병합 발전소에서 사용되고 있는 유연탄에 비하여 가격이 저렴한 북한산 무연탄의 연료특성 평가를 위해 순환 유동층 보일러에서 연소시험을 수행하였다.

2. 이론적고찰

2-1. 연소특성

유동층의 연소효율에 영향을 미치는 인자는 온도, 압력, 입자의 특성, 기체의 조성, 석탄의 비표면적 및 char의 내부에서의 기체확산, 석탄의 반응속도, 유동층에서의 기체의 체류시간, 고체의 혼합, 기체-고체의 접촉, 석탄입자의비산 등이다.

연소효율은 연소온도, 기체의 체류시간 및 과잉공기의 양이 증가함에 따라 증가하며, 압력이 증가함에 따라 반응속도가 증가하기 때문에 연소효율도 증가한다. 대부분의 유동층 연소로에서 연소효율은 95% 이상을 나타낸다.

석탄중 휘발분이 제거된 후 미반응 char의 충돌에 의한 마모에 의해 입자의 크기가 감소함으로써 인해 발생하는 비산현상에 의해 연소효율이 감소한다고 보고하고 있으며, 석탄등급이 높아지거나 휘발분이 적은 석탄일 경우에 연소효율이 감소하는 경향이 있다.

실제 연소효율의 감소는 미반응 CO의 농도에 의해서도 결정되는데 화염온도조건이라고 할지라도 완전히 건조한 공기나 산소와는 CO가 잘 반응하지 않으며, 실질적으로 산소분자와는 반응하지 않는다. 또 CO의 산화는 할로겐화합물이 존재할 경우에는 방해 mechanism이 반응은 석탄이나 Char의 입자에서 일어남에 의해서 속도가 감소한다. CO/CO₂의 열역학상수는 다음 식 (1)과 같다[3].

$$\frac{CO}{CO_2} = 2,766 \exp(-6,340/T) \quad (1)$$

여기에서 T는 절대온도이다.

예를 들어 850 °C에서 CO/CO₂의 비는 9.8 즉, CO는 탄소연소시 1차 생성물, 기포유동층의 dense phase에서 CO 산화에 대한 실험에 의한 결론은, 1,000 °C까지 도달하기 전에는 CO의 완전산화는 불가능하다. 오히려 기포 내에서 기포의 분출영역 및 상부의 freeboard 영역에서 산화가 관찰되는데, 이 영역에서는 OH, H 등의 radical 이

고체표면에서 재결합에 의해 고갈되기 때문이며 다음 식 (2)와 같은 반응기구를 갖는다.



식 (2)는 잘 알려진 water-gas shift reaction 이다. 순환유동층의 경우에는 고속으로 입자가 순환되기 때문에 유동층의 전체온도가 기포유동층보다 높고, freeboard나 출구의 온도가 거의 일정하여, load에 따른 영향이 적다. 따라서 보다 적은 CO 농도를 보이며, 이는 연소효율을 약간 높일 수 있음을 의미한다.

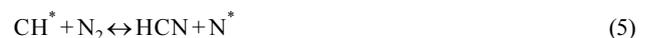
2-2. 연소배가스특성

2-2-1. 질소산화물 생성 및 탈질특성

기체상태에서 안정한 형태의 질소산화물로는 아산화질소(N₂O), 일산화질소(NO), 이산화질소(NO₂), 삼산화질소(N₂O₃) 및 아산화질소(N₂O₃) 등이 있으나, 이들중 대기에서 문제가 될만큼 존재하는 것은 NO, NO₂, N₂O이다. 그러나 유동층연소뿐만 아니라 대부분의 연소로에서 배출되는 NO는 총 질소산화물의 90% 이상을 차지하고 있으며, 대기중에서 NO는 곧 바로 NO₂로 전환되기 때문에 아직까지 질소산화물을 설명할 때는 NO_x라 표기하고 있다. 질소산화물(NO_x)의 발생경로를 3개의 다른 경로에 의해 생성[4]되며, 질소분자가 산소 radical과 직접 산화반응을 일으킨다고 하였다. 이 때 반응식은 다음 식 (3,4)와 같이 표현되며, 발생하는 thermal NO_x의 농도는 연소중 자유산소원자의 농도에 영향을 받으나 1,693 K 이하에서는 무시될 정도이다.



두 번째는 연료과잉영역에서 탄화수소 radical과 질소분자가 HCN을 생성하고, 이로부터 매우 빠른 반응에 의해 NO_x가 생성되는데 이를 prompt NO_x라 한다. 비교적 온도가 낮은 영역에서는 아래 식 (5,6)과 같은 반응이 진행된다.



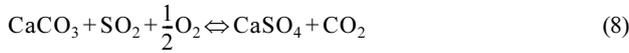
세 번째로는 연료의 휘발성 물질에 포함된 질소성분이 HCN, NH₃로 휘발하면서 HCN의 균일상 반응에서 다음 식 (7)과 같이 N₂O가 발생한다.



유동층연소에서 운전온도는 750~900 °C 정도를 유지하기 때문에 thermal NO_x의 발생이 적으나 이와 같은 낮은 온도로 인해 생성된 N₂O의 재분해가 억제되므로 N₂O의 발생량은 높다. N₂O와 NO 발생은 서로 대응적인 관계에 있다. N₂O의 발생은 온도가 상승함에 따라 감소하고, NO의 발생은 온도가 상승하면서 증가한다, 또 휘발분이 많을수록 NO의 발생량은 높고 N₂O의 발생량은 상대적으로 낮게 발생한다. 특히 NO_x의 발생은 과잉공기 증가 및 온도의 상승에 따라 증가한다.

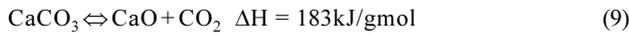
2-2-2. 탈황반응

석탄의 유동층연소에서 배출되는 SO₂를 처리하기 위한 노내탈황에서 흡수제는 석회석(CaCO₃)과 백운석(CaCO₃·MgCO₃)을 사용한다. 이 흡수제는 식 (8)과 같은 반응을 통해 석탄연소중에 발생한 SO₂를 제거할 수 있다[5].



식 (8)과 같은 반응은 2단계로 이루어지는 경우가 있고 1단계로 이루어지는 경우가 있다. 연소로의 압력이 상압조건일 때는 소성반응(calcination)과 황화반응(sulfation)의 2단계로 이루어지고, 가압조건일 때는 직접 황화반응(direct sulfation)인 식 (8)과 같이 1단계로 이루어진다.

소성반응이란 석회석이 CaO와 CO₂의 형태로 분해되는 반응으로 흡열반응이다. 연소로에서 CO₂의 분압이 석회석소성의 평형압력보다 낮을 때 즉, 상압 유동층연소조건에서 연소로내에 주입된 CaCO₃는 다음 식 (9)와 같이 CaO와 CO₂의 형태로 소성된다.



유동층 연소로의 조업온도(800~950 °C)에서 CaCO₃가 SO₂와 직접 반응하는 것은 CO₂의 분압이 식 (8)과 같은 평형압력보다 높을 때 이루어지고 상압에서는 SO₂의 흡수를 위하여 CaCO₃는 CaO와 CO₂로 분해된다[6]. 소성반응중에 생성된 CO₂는 석회석중의기공(pores)을 생성하고 확장시키는 역할을 하므로, 황화반응에 대한 표면적을 크게 하는 효과가 있다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험장치

본 연구에 사용된 순환유동층 연소시스템의 공정구성은 Fig. 1과 같이 석탄공급 및 회재 처리시스템, 순환유동층 보일러시스템, 연소

Table 1. Specification of CFBC

Section	Component	Size
Combustor	Bed Area	0.8 × 2.4 m
	Freeboard	1.2 × 2.4 m
	Refractory Height	5.2 m
	Total Height	14.0 m
	Circulating Height	1.18 m
Type	type	
	Diameter	1.75 m
Cyclone	Size	
	Gas In	1.3 × 0.48 m
	Gas Out	0.70 m
	Solid Out	0.24 m
Loop seal	Diameter	0.24 m
	Height	0.63 m

배가스 정화처리시스템, 발전 시스템으로 구성되어 있다. 순환유동층 보일러는 증기발생량 12 ton/hr로 2 MWe 전력을 생산할 수 있다. 증기 및 발전시스템에서 공급되는 증기압은 45 bar이고, Superheater에서의 증기온도는 453 °C에 이른다. 연소배가스 후처리설비로는 이미 상용규모에서 장기간운전으로 성능이 검증된 탈진설비(Bag Filter), 탈질설비(SCR), 탈황설비(FGD)와 휘발성유기화합물(VOC) 제거설비(Activated Carbon Column)가 있다.

A/C Column은 연료로 석탄과 폐기물 혹은 바이오매스를 혼소시킬 때 발생하는 휘발성 유기화합물을 제거하기 위한 것이다.

Table 1은 실험에 사용된 순환유동층 연소로의 세부 사양을 나타냈다. 연소로는 단면적이 0.8×2.4 m이며, Freeboard는 1.2×2.4 m로 확장되었다. 공기분배기로부터 배가스 출구까지의 높이는 총 14 m이다. 공기분배기의 노즐은 개구비가 약 3.5%이고, 형태는 Cap 형이다.

3-2. 실험방법

실험은 연료연소에 필요한 공기를 연소로에 공급하면서 연소로내 증물질의 유동상태를 차압계를 이용하여 확인하고, 프리보드 상부

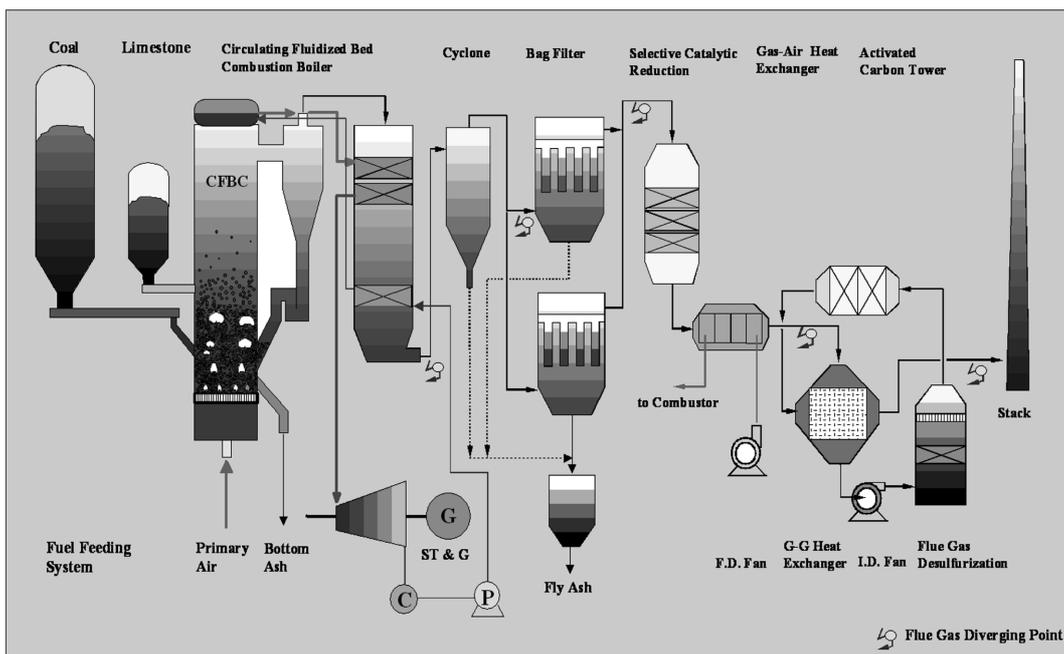


Fig. 1. Schematic Diagram of CFBC R&D Facility on the Korea Institute of Energy Research.

의 압력이 -15 mmH₂O를 유지한 상태에서 공기분배기 하부에 설치된 오일버너를 점화하여 연소로를 예열한다. 연소로의 온도가 석탄을 주입하여 점화할 수 있는 약 450 °C까지 예열시킨다. 석탄을 공급하여 층온도가 상승하면 석탄량을 증가시키면서 층온도가 750 °C에 이르면 오일버너 가동을 중단한다. 석탄량과 공기량을 증가시키면서 층온도를 계속적으로 상승시켜 실험조건을 만족시키도록 유지한다. 버너의 점화로부터 석탄만을 공급하여 연소로의 온도를 유지하고, 생산된 증기를 이용하여 발전을 하기까지 약 6시간 정도 소요되었다. 실험은 연소로의 연소상태와 연소배가스의 배출농도를 측정하고, 증기터빈과 발전시스템이 안정화되면 미리 계획된 실험을 수행하였다.

석탄의 연소효율은 주입되는 석탄중 연소되지 않은 석탄이 bed ash, fly ash 및 배가스의 CO로 배출되는 양으로부터 계산하였다.

각 조건마다 연소효율을 얻기 위해 2시간 간격으로 ash를 포집하고 중량을 측정하였다. 연소효율은 다음 식 (10)과 같이 계산할 수 있다.

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{X_b F_b + X_f F_f + X_{co} F_{co}}{X_c F_c}\right) \times 100 \quad (10)$$

Table 2에 본 실험에서 사용한 석탄과 석회석의 특성을 나타냈다.

석탄은 유연탄으로서 중국의 선화탄과 호주탄이며, 그리고 무연탄은 북한산을 사용하였다. 석탄중에 함유된 황성분은 중국(선화)산이 0.17%, 호주산이 0.35% 그리고 무연탄이 0.25%를 함유하고 있

Table 2. Coal Properties

Properties	Bituminous		Anthracite of North Korea	
	Australia	China		
Elementary Analysis (%)	Carbon	71.6	77.3	70.55
	Hydrogen	4.0	4.48	2.04
	Nitrogen	1.78	0.94	0.69
	Sulfur	0.35	0.17	0.25
	Oxygen	13.17	10.96	
Ultimate Analysis (%)	Moisture	9.82	3.36	8.0
	Volatile	24.67	35.62	16.71
	F. Carbon	54.35	54.98	58.54
	Ash	11.15	6.04	16.75
Heating value (kcal/kg)	6,730	6,970	5,760	
Limestone	CaO	55.2%		

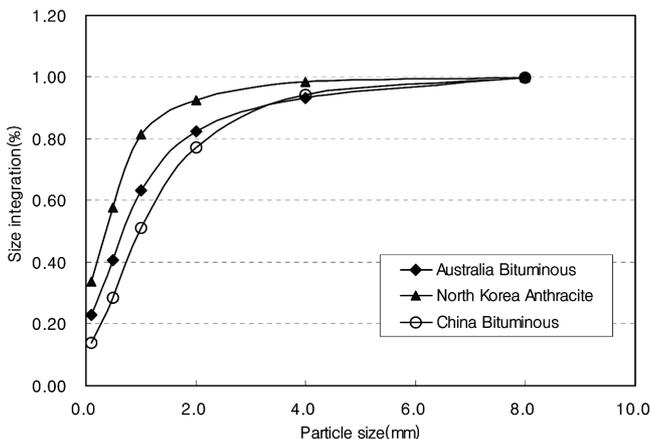


Fig. 2. Particle Size Distribution of Coal.

Table 3. Experimental Conditions

Variables	Conditions
Operation Temperature (°C)	820~920
Excess Air Ratio (%)	10~30
Ca/S Molar Ratio (-)	0~10.0
Mixing ratio of Anthracite (%)	20
Static Bed Height (mmH ₂ O)	950

다. 또 회분량은 중국(선화)산이 6%, 호주산이 11%, 북한 무연탄은 16.8% 정도를 나타내고 있다. 열량은 무연탄이 유연탄에 비하여 약 1,000 kcal/kg 정도 낮은 것으로 분석되었다. 탈황실험을 위해 사용된 석회석은 충남 금산 지역의 것으로 CaO 함량이 55.2%에 이르고 있다.

Fig. 2에 실험에 사용된 석탄의 입도분포를 나타냈다. 평균입도는 북한 무연탄, 호주탄, 중국탄 순이었다.

Table 3에 연소실험을 위한 연소로의 온도는 약 820~920 °C, 과잉공기비는 약 30% 이내로 시험하였다. 연소실험과 더불어 연소배가스의 배출특성을 고찰하였으며, 석회석(Limestone)을 노내에 투입하여 이루어진 탈황효과와, 습식 FGD에서 Mg(OH)₂ 세정에 의한 탈황효과를 분석하였다. 또 SCR에 암모니아의 분사량을 변화시키면서 당량비에 따른 탈질효과를 고찰하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 북한산 무연탄에 대한 열병합발전 연료로서의 사용가능성을 알아보기 위하여 유동층연소장치에서 연소실험을 수행하였다. 북한 무연탄만을 연소시킬 경우, 입자가 작아 연소로 내에서 연소되지 않고, 비산 유출되는 관계로 연소효율 저하를 가져올 것이다. 그러므로 국내 수입된 유연탄과 혼합연소를 통한 사용가능성을 고찰하였다.

결과적으로 무연탄 혼합율 20% 상태에서 연소온도는 약 150 °C 정도 낮게 유지되었으며, 연소효율 또한 약 4% 이상 저하되는 것으로 나타났다. 이것은 무연탄의 평균입도가 유연탄보다 작아 층내에서 연소되지 않고 비산되어 프리보드에서 연소되는 것으로 사료된다.

또 연소되지 않은 무연탄의 입자는 사이클론에서 포집되어 재순환되면서 연소로 내에 재순환되는 입자가 많기 때문인 것으로 사료된다.

4-1. 연소효율

Fig. 3에 연소배가스 R&D 실증설비에서 중국 유연탄과 호주 유

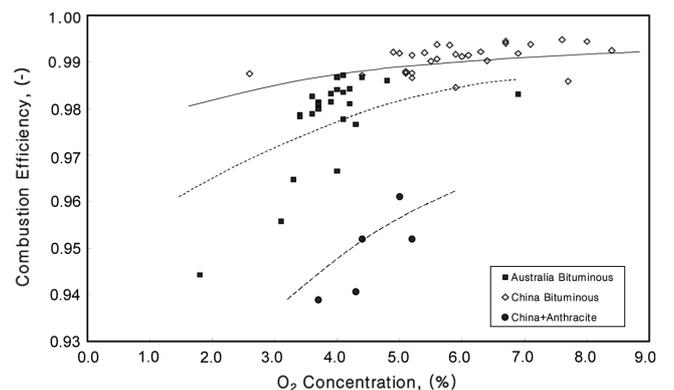


Fig. 3. Effect of Excess Air on Combustion Efficiency for 3 coals.

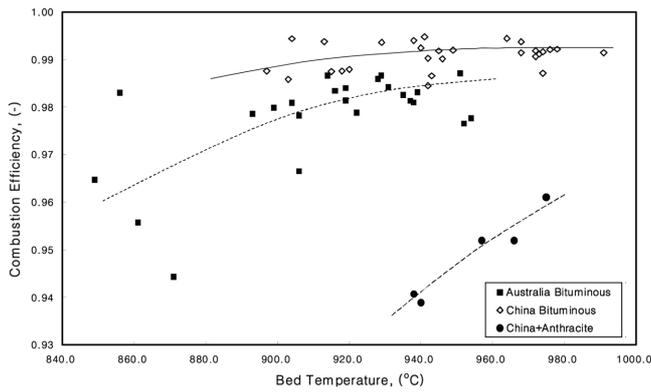


Fig. 4. Effect of Fluidized Bed Temperature on Combustion Efficiency.

연탄 그리고 중국탄+북한 무연탄에 대해 과잉공기(O₂) 변화에 따른 연소효율을 나타냈다. 측정된 산소농도는 연소배가스가 유동층 사이클론에서 벗어나 배가스 정화장치에 유입되기 전 Convection Bank 후단에서 측정된 값으로 대기로 방출되는 Stack 부분의 농도가 아니다. 본 설비에서 석탄의 연소효율은 일반적인 사실과 마찬가지로 과잉공기량이 증가하면 향상되는 것으로 나타났다[7,8]. 호주 유연탄의 경우, 연소효율은 산소농도 3% 부근에서 95% 이었으나 약 5% 부근에서 98% 이상을 보였다. 중국 유연탄의 경우, 높은 열량과 고휘발분으로 과잉공기량에 따라 증가하였지만 낮은 과잉공기임에도 불구하고, 98% 이상의 효율을 보였다. 한편 중국 유연탄과 북한 무연탄 20%를 혼소한 경우에는 산소농도 3~5% 범위에서 연소효율은 93.5~96.2%로 중국 유연탄보다 약 5% 이상 감소하였다. 무연탄의 혼소로 인하여 낮아진 연소효율은 무연탄중 미분탄의 비산과 유연탄을 설계기준으로 구축된 연소로의 높이는 무연탄을 연소시키기엔 충분하지 못한 것이라고 사료된다.

Fig. 4는 연소로 층온도에 따른 연소효율을 나타낸 것으로 과잉공기의 증가는 석탄의 연소를 충분하게 하는 것과 같이 연소로의 층온도 또한 증가시키는 역할을 한다. 그러므로 연소로 층온도가 증가함에 따라 연소효율 역시 증가하였다.

4.2. 탈황효율

Fig. 5에 본 설비에서 연소실험을 통하여 배출되는 황산화물의 농도를 나타냈다. 황산화물의 배출은 석탄중에 함유된 황(Sulfur)의 함량에 따라 비례적으로 배출되었다. 호주 유연탄의 경우 황함량이 약

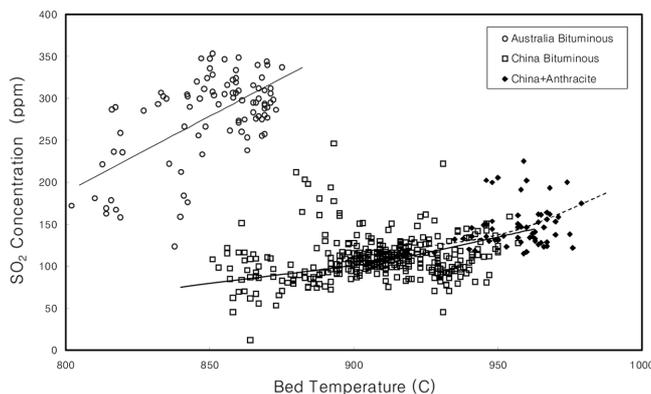


Fig. 5. Effect of Fluidized Bed Temperature on SO₂ Emission.

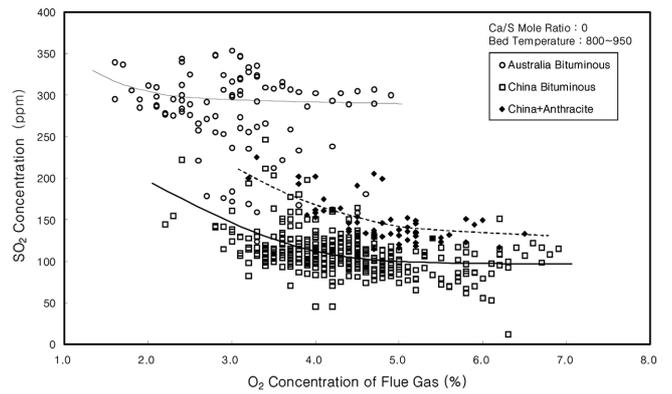


Fig. 6. Effect of O₂ Concentration on SO₂ Emission.

0.35%로 중국 유연탄의 약 0.17%보다 2배 가량 높았으며, 북한 무연탄의 경우 약 0.25% 정도 함유하고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 호주 유연탄의 경우 황산화물의 배출농도가 150에서 350 ppm에 이르고 있으며, 유동층 온도가 증가함에 따라 배출농도는 증가하는 것을 보였다. 중국 유연탄도 마찬가지로 층온도가 증가함에 따라 농도는 증가하였고, 낮게는 50에서 높게는 200 ppm까지 분포한 것을 볼 수 있다.

중국 유연탄과 북한 무연탄을 혼소한 경우 중국 유연탄 전소와 유사한 황산화물 배출농도를 보였으며, 층온도의 상승에 따라 배출농도 또한 증가하는 것을 보였다. 층온도의 상승에 따라 황산화물의 배출이 증가하는 것은 석탄의 연소가 활발해지면서 석탄중에 함유된 황과 연소용공기와의 반응이 좋아지기 때문인 것으로 사료된다[9, 10].

Fig. 6에 유동층연소로의 과잉공기 변화에 따른 황산화물의 배출 특성을 나타냈다. 연소배가스 중의 산소농도가 증가하는 것은 과잉공기량이 증가하는 것을 의미한다. 과잉공기가 증가하게 되면 황산화물의 배출농도는 산소에 의하여 희석되므로 감소하는 것으로 보인다[11]. 중국 유연탄의 경우 산소농도 4%까지는 감소하는 경향을 보였지만 더 이상의 산소농도를 증가시켜도 배출농도는 감소하지 않고 거의 유사한 배출특성을 보였다. 또 호주 유연탄이나 북한 무연탄을 혼소한 경우도 마찬가지로 어느 정도의 과잉공기 효과는 있었지만 비례적으로 감소하지는 않았다.

Fig. 7에 석탄중에 함유된 황성분으로 인하여 발생한 황산화물의 배출제어를 위하여 연소로 내에 탈황제로 사용되는 석회석을 주입하여 Ca/S 몰비에 대한 탈황효과를 고찰하였다. 중국 유연탄의 경

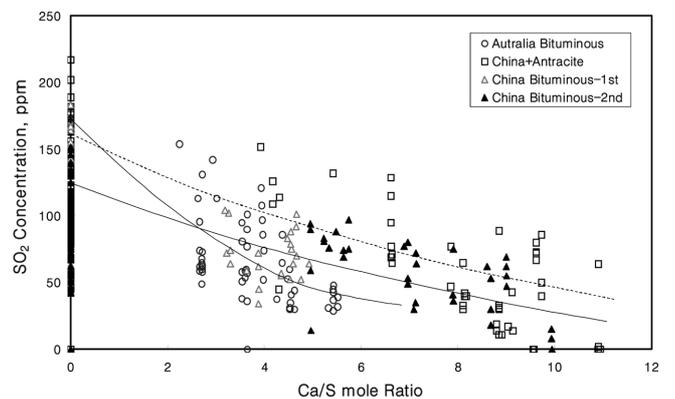


Fig. 7. Effect of Ca/S Mole Ratio on SO₂ Emission.

우, 동일한 석탄으로 1, 2 차에 걸쳐 실험하였으며, 1회 실험기간은 약 15일간 수행되었다. Fig. 7에서 나타난 바와 같이 석회석 주입량을 증가시키면 즉, Ca/S 몰비를 증가시키면 탈황율은 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 석탄으로부터 배출된 황산화물이 반응할 수 있는 CaO의 절대량이 증가하기 때문인 것이다. 호주 유연탄의 경우 Ca/S 몰비의 증가에 따라 탈황효과는 매우 급격하게 증가하는 것을 보였으나, 중국 유연탄과 북한 무연탄을 혼합한 경우는 황산화물의 배출농도가 서서히 감소하는 것을 보였다. 이것은 북한 무연탄의 연소성이 유연탄에 비하여 느리기 때문인 것으로 사료된다 [12]. 대기오염물질 배출규제에 의한 화력발전소에서 황산화물의 배출농도가 80 ppm이므로 본 실증설비에서 북한 무연탄을 사용할 수 있는 황산화물의 배출 규제치를 준수하려면 Ca/S 몰비 6~8까지 석회석을 주입하여야 할 것으로 사료된다.

4.3. 탈질효율

Fig. 8에 중국탄을 연소하는 과정에서 발생하는 질소산화물의 배출농도를 연소로의 온도변화에 따라 나타낸 것이다. 그림은 중국 유연탄에 대해 2회에 걸쳐 실험한 결과를 나타낸 것으로, 연소로의 층온도가 상승함에 따라 질소산화물의 배출농도는 높아졌으며, 이것은 층온도가 상승하게 되면 활발한 연소에 의하여 질소산화물의 생성이 촉진되었기 때문이다[13, 14].

Fig. 9은 SCR에서 탈질시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 본 설비의 SCR에는 약 230 °C에서 반응할 수 있는 저온촉매층이 설치되어 있다. 연소로에서 배출된 대기오염물질은 노내에서 황산화물을 제거하고 나서 Bag Filter를 거치면서 분진이 제거되고 SCR에서

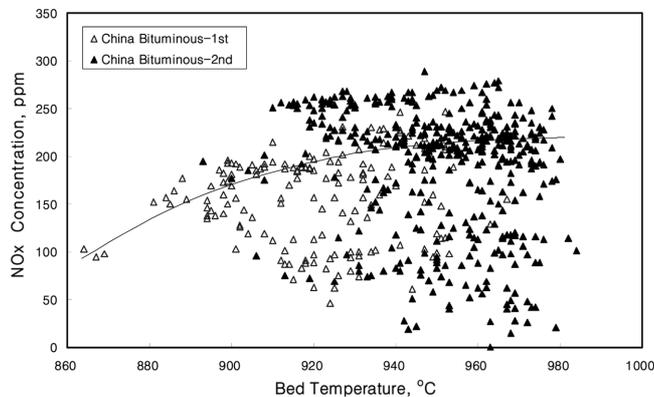


Fig. 8. Effect of Fluidized Bed Temperature on NO_x Emission.

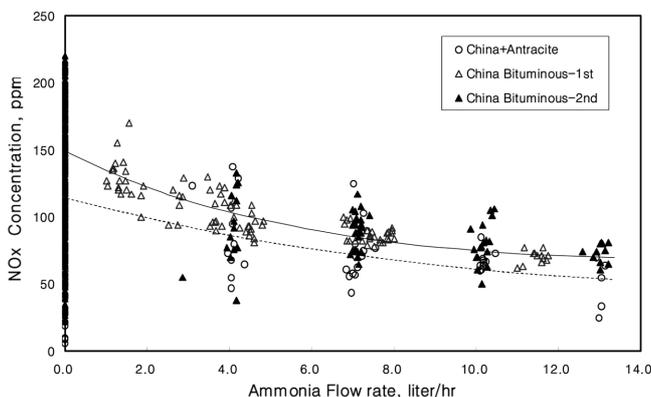


Fig. 9. Effect of Ammonia Flow rate on NO_x Emission.

질소산화물을 제거하게 된다. 본 설비에서 SCR은 Bag Filter 후단에 설치된 관계로 저온촉매를 설치하게 되었다. 3개의 촉매층을 설치할 수 있는데 2개층만을 설치한 상태에서 암모니아 주입량에 따라 질소산화물의 제거상태를 고찰하였다.

Fig. 9에서 볼수 있는 바와 같이 암모니아 주입량의 증가에 따라 질소산화물의 배출농도가 감소하였지만 그 감소는 매우 서서히 이루어졌다. 연소배가스의 SCR 주입온도 180~200 °C, 공간속도 14,000/hr인 운전조건에서, SCR 전단에 암모니아를 3시간 간격으로 각 2.0~13.0 liter/hr 공급했을 때 탈질효과를 나타내었다. 약 200 ppm의 NO_x는 약 150부터 70 ppm까지 저감되어 약 30~60%의 탈질효과를 보였다 그러므로 좀 더 빠른 탈질반응을 위하여 촉매층을 증가시켜야 할 필요가 있으며 반응온도 또한 높일 필요가 있는 것으로 사료된다.

5. 결 론

증기용량 12 ton/hr(2 MWe) 규모의 순환유동층 연소보일러에서 유연탄(중국탄, 호주탄)과 무연탄(북한탄)을 대상으로 연소실험과 연소배가스 배출특성, 그리고 석회석에 의한 노내탈황, SCR에 의한 탈질시험 수행결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 순환유동층 보일러에서 탄종이 달라도 입열량이 비슷하면 안정된 연소는 가능하지만, 연료입자의 크기와 휘발분 함량에 따라 미연탄소분 발생량의 차이가 있고, 유동층 온도에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 그러므로 순환유동층 보일러에서 유연탄을 주연료로 설계한 경우, 유연탄과 무연탄을 혼소한다면 연료의 노내 체류시간을 증대시켜야 하며, 비산 유출될 수 있는 미분탄을 줄이는 것을 고려해야 높은 연소효율을 얻을 수 있다.

(2) 모든 탄종에서 연소효율은 약 95% 이상을 보였으며, 휘발분이 많은 유연탄만을 연소한 경우, 98% 이상 높은 연소효율을 얻었고, 유연탄과 무연탄을 혼소한 경우, 고정탄소분이 많고, 연료입도가 작아 비산 유출된 관계로 95% 정도의 연소효율을 보였다.

(3) 황산화물의 배출은 유동층 온도가 높을수록 증가하였고, 과잉공기가 높을수록 감소하였으며, 석회석을 이용한 노내탈황은 Ca/S=4.0에서 탈황효율은 약 50%로 배출농도가 평균 100 ppm까지 감소하였고, Ca/S=6.0 이상에서 탈황효율 약 75%로 배출농도규제치를 만족할 수 있었다.

(4) SCR에 의한 탈질효율은 암모니아 분무량의 증가에 따라 감소하였으며, SCR에 배가스 주입온도 200 °C, 공간속도 14,000/hr에서 최대 65%까지 보였으며, 저온촉매를 사용하는 SCR에서 높은 탈질효과를 얻기 위해 촉매층을 증가시킬 필요가 있었다.

감 사

본 연구는 산업기술연구회가 지원하는 기본연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- James, K., "The Future of Coal," Massachusetts Institute of Technology, 5-15(2007).

2. Shun, D., Jin, K. T., Yi, C. K. and Han, K. H., "Development of Circulating Fluidized Bed Combustion and Emission Control Technology," Research Report, KIER-A03707, KIER, 7-12(2000).
3. Jin, K. T., Han, K. H., Shun, D. and Park, J. H., "Development of Bench Scale Pressurized Fluidized Bed Combustion Technology," Research Report, KIER-973402, KIER, 31-34(2000).
4. Koskinen, "Ultraclean Combustion of Coal in Ahlstrom Pyroflow PCFB Combustor," Proceeding of the 13th International Conference on FBC(1995).
5. Han, K. H., Ryu, J. I. and Jin, K. T., "Desulfurization Characteristics of Domestic Anthracite by Limestone at Bench Scale Pressurized Fluidized bed Combustor," Trans. of the KSME(B), **25**(10), 1373-1383(2001).
6. Sarofim, A. F., Goel, S. K. and Morihara, A., "Fluidized Bed Combustion and Emission Control Issue," International Clean Coal Technology Symposium on PFBC, 12-27(1994).
7. Han, K. H., Kang, S. H., Ryu, J. I. and Jin, K. T., "Combustion Characteristics of Domestic Anthracite Coal in a Pressurized Fluidized bed Combustor," *HWAHAK KONGHAK*, **39**(5), 557-562(2001).
8. Han, K. H., Song, Y. S., Ryu, J. I., Son, J. E. and Jin, K. T., "The Characteristics of SO₂ Emission with Korean Anthracite in a Pressurized Fluidized bed Combustor," *HWAHAK KONGHAK*, **41**(1), 86-92(2003).
9. Kang, S. H., Han, K. H., Jin, K. T. and Kang, Y., "Combustion Characteristics of Domestic Anthracite Coal in a Pressurized Fluidized bed Combustor," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **13**(1), 37-41(2002).
10. Shimizu, T., Fujita, D., Ishizu, K., Kobayashi, S. and Inagaki, M., Proc. of 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion, 611(1993).
11. Shun, D. W., Bae, D. H., Han, K. H., Son, J. E., Kang, Y., Wee, Y. H., Lee, J. S. and Ji, P. S., "Circulating Fluidized Bed Combustion of Korean Anthracite," *HWAHAK KONGHAK*, **34**(3), 321-326(1996).
12. Leckner, B., "Fluidized Bed Combustion : Mixing and Pollutant Limitation," *Prog. Energy Combustion Science*, **24**, 31-61(1998).
13. Ake, T. R., Dixit, V. B. and Mongeon, R. K., Proc. of 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion, 81(1993).
14. Han, K. H., Park, J. H., Ryu, J. I. and Jin, K. T., "Coal Combustion Characteristics in a Pressurized Fluidized Bed," *Korean J. Chem. Eng.*, **16**(6), 804-809(1999).