

## D화력 순환유동층 보일러에서의 무연탄 연소 특성

이시훈 · 이종민\* · 김재성\* · 최정후\*\* · 김삼돈†

한국과학기술원 화학공학과 & 에너지 · 환경 연구센터

\*한전 전력연구원 발전연구실 연소 신발전그룹

\*\*건국대학교 화학공학과

(2000년 1월 11일 접수, 2000년 3월 31일 채택)

## Combustion Characteristics of Anthracite Coal in the D CFB Boiler

See Hoon Lee, Jong Min Lee\*, Jae Sung Kim\*, Jeong Hoo Choi\*\* and Sang Done Kim†

Department of Chemical Engineering and Energy and Environment Research Center,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon, Korea

\*Power Generation Lab. Advanced Power Generation & Combustion Group, KEPRI, KEPSCO, Taejeon, Korea

\*\*Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

(Received 11 January 2000; accepted 31 March 2000)

### 요 약

무연탄을 연료로 사용하는 D화력 순환유동층 보일러의 운전 특성을 유연탄을 사용하는 국내 상용 순환유동층 보일러와 비교하여 고찰하였다. 무연탄의 높은 회재 함량으로 인해 충물질로 회재만을 사용하는 D화력 순환유동층 보일러는 다른 국내 상용 유연탄 순환유동층 보일러에 비해 알칼리 · 산비가 0.11로 아주 낮아 상대적으로 클링커 형성에 안정적인 것으로 나타났으며, 충물질의 입도분포는 모래를 사용하는 유연탄 순환유동층 보일러에 비해 비교적 광범위한 입도분포를 갖는 것으로 나타났다. D화력 순환매체의 입도는 대부분 100-400  $\mu\text{m}$ 로 나타났으며, 미연분의 대부분은 100  $\mu\text{m}$  이하의 비산 회재에 포함되어 있어 이의 저감을 위해서는 석탄입도의 적절한 조절이 요구되는 것으로 나타났다. 국내무연탄 순환유동층 연소로의 하부 온도는 850-870  $^{\circ}\text{C}$ 정도로 유연탄 보일러와 비슷하게 나타났으나, 국내무연탄의 낮은 연소반응성과 미연분의 후연소로 인해 연소로 상부 및 사이클론 입, 출구 등의 온도가 40-80  $^{\circ}\text{C}$ 이상 높은 특징을 띠는 것으로 나타나 국내 무연탄용 순환유동층 설계 및 적용, 운전에 있어 이의 고려가 이루어져야 하는 것으로 나타났다.

**Abstract** – The circulating fluidized bed (CFB) boiler which uses anthracite coal by fuel in the D power plant is compared with commercial CFB boiler which uses bituminous coal. According to the high ash content of anthracite coal, the ash was only used by fluidizing materials and B/A ratio of the ash was 0.11, so it was relatively difficult to form a clinker. Particle size distribution of bed materials was very wider than that of other CFB combustor. Particle size distribution of bed materials was 100-400  $\mu\text{m}$  and unburned carbon is almost contained in fly ash and especially concentrated under 100  $\mu\text{m}$  particles. So it is needed to control particles size distribution of coal. The temperature range of dense phase of the D CFB boiler is 850-870  $^{\circ}\text{C}$  and is similar to that of other CFB boilers. Because of low combustion efficiency and post combustion of unburned carbon, the temperature of lean phase, cyclone inlet and outlet temperature were higher than these of other CFB boilers. Therefore, low combustion efficiency and post combustion might be considered to design and apply CFB boiler which used anthracite coal.

Key words: Circulating Fluidized Bed, Coal, Combustion

### 1. 서 론

순환유동층(Circulating Fluidized Bed: CFB)은 기존의 기포유동층에 비하여 높은 유속에서 조업되는 반응기로, 고속의 기체와 크기가 작은 고체 입자간의 긴밀한 접촉을 통하여 비교적 대규모의 여러 가지 화학적, 물리적 작업을 수행하는 유동층기술의 한 분야이다[1]. 순환유동층은 1940년대부터 촉매를 사용한 가솔린의 제조에 이용되어 왔으며

[2], 1970년대부터 CFB 소성로를 시작으로[3] 석탄의 연소 및 가스화에도 상업적 규모로 이용되고 있다.

순환유동층 보일러는 낮은 유속으로 운전되는 기포유동층 보일러와는 수력학적, 열 전달 특성이 다르기 때문에 기포유동층 보일러에 비해 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- (1) 유동층의 단위 면적당 연료 처리량이 크다.
- (2) 기체와 고체간의 혼합이 매우 우수하다.
- (3) 기-고체의 접촉효율이 높고, 충내 전체에 걸쳐서 기-고체의 접촉

† E-mail: kimsd@kaist.ac.kr

Table 1. CFB boiler in domestic region[5]

User	Year	Steam capacity(ton/h)	Designed coal	Steam use
O.C.I.	1984	120	Bituminous coal	Cogeneration
SK(Suwon)	1988	25	Bituminous coal	Process
SK(Ulsan)	1989	200	Bituminous coal	Cogeneration
LG chemical	1989	210	Bituminous coal	Cogeneration
Hyundai Petrochemical	1989	120	Bituminous coal	Cogeneration
UPSC	1990	250	Bituminous coal	Cogeneration
Pusan dyeing complex	1991	160 (80×2)	Bituminous coal	Cogeneration
Korea Zinc	1991	175	Bituminous coal	Cogeneration
Samyang GENEX	1990	60	Bituminous coal	Cogeneration
Kepco	1998	1,300 (660×2)	Anthracite coal	Cogeneration

이 균일하므로 적은 과잉공기로 99% 이상의 석탄 연소 효율을 얻을 수 있다.

(4) 입자의 순환속도를 조절함으로써 turn-down을 빠르고도 쉽게 제어할 수 있다.

전세계에 설치되어 운전되고 있는 상용 유동층 보일러는 1999년 현재 총 606개로 형태에 따라 기포유동층 보일러, 가압 유동층 보일러, 순환유동층 보일러 등으로 구분할 수 있다. 상용 순환유동층 보일러는 전체 유동층 보일러 중 51%를 차지하며 발전량으로는 66%를 차지하고 있다[4]. Table 1에서처럼 국내에는 대략 10 여기 이상의 유동층 보일러가 보급되어 있으며 이중 대부분이 순환유동층 보일러이다. 또한, 유연탄을 원료로 사용하고 있으며 증기 생산 용량으로 250 ton/h 이하의 용량을 가지고 있다. 최근에 한국전력공사에서는 동해에 660 ton/h의 증기 생산 용량을 가지는 순환유동층 보일러 2기(200 MWe×2기)를 건설, 운전하고 있으며, 이중 1호기는 1998년 10월에 준공, 상업 운전을, 그리고 2호기는 1999년 10월에 준공하여 상업 운전을 하고 있다. D화력 순환유동층 연소로는 저질 국내 무연탄을 원료로 사용하는 세계 최대 규모의 보일러로서 연소 특성 및 운전 특성에 관해 국내외적으로 매우 큰 관심을 모으고 있다.

따라서 본 논문에서는 상용 순환유동층 보일러에서의 국내 무연탄의 연소 특성 및 운전 특성을 기존의 유연탄을 사용하는 순환유동층 연소로와 비교하여 고찰하고자 한다.

## 2. D화력 순환유동층 보일러의 형태

전세계적으로 상용 운전중인 순환유동층 보일러는 열 교환 방법에 따라 크게 2가지의 형태로 나누어진다. 하나는 Ahlstrom 형태의 보일러로써 추가적인 외부 열 교환을 설치하지 않고 필요한 열을 보일러 벽면에서 흡수하도록 설계하는 방식이며 다른 것은 Lurgi 형태의 보일러로써 보일러 벽면에서 열을 흡수하면서 추가적으로 외부 열 교환 방식이 있다. 국내에 보급되어 있는 대부분의 연소로는 Ahlstrom 형태의 연소로로서 외부 열 교환기가 설치되어 있지 않으나 D화력 순환유동층 보일러는 외부 열 교환기인 fluidized bed heat exchanger(FBHE)와 fluidized bed ash cooler(FBAC)가 연결되어 있는 Lurgi 형태의 보일러이다. Lurgi 형태의 보일러는 FBHE를 통해 추가적으로 열을 회수하고 전열 매체인 회재를 850 °C 미만으로 보일러에 주입시키기 때문에, 보일러의 용량(capacity)을 증가시킬 시에도 보일러 상부의 추가적인 높이 상승을 통한 열 전달 면적의 증가 없이도, FBHE를 이용하여 부하를 흡수할 수 있다[4].

D화력 순환유동층 보일러는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 크게 석탄 및 석회석 투입장치 및 silo, 공기 주입부, 주 연소로부(연소로, 싸이클론, loopseal, FBHE 및 FBAC) 그리고 backpass로 구성되어 있다. 연소로는 직

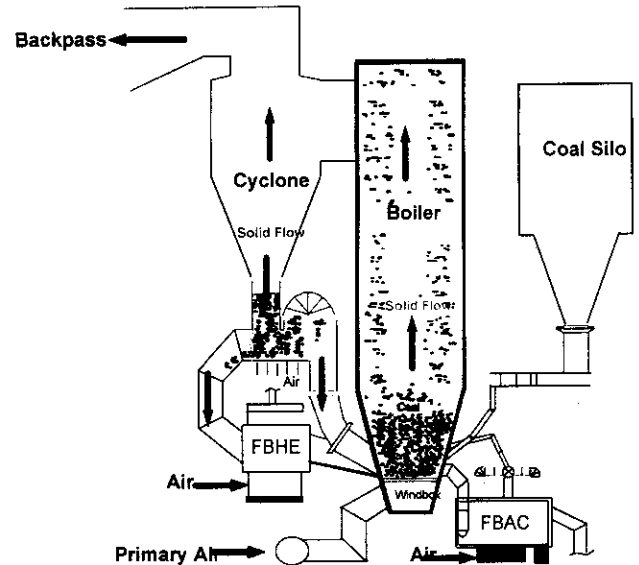


Fig. 1. Configuration of D CFB boiler.

사각형(32×19×7 m) 구조로 분산판 위로부터 7 m 지점에서 하단부로 15°의 가늘어진 형태를 취한다. 분산판은 각 열당 62개의 T-type four jet 노즐이 12열에 각각 교차되어 있는 형태를 이룬다. 순환 입자를 포집하여 재 순환시키는 싸이클론(7.6 m I.D.×15.7 m Height)은 3개가 설치되어 있으며, 각 싸이클론 당 각각의 loopseal(loopseal)과 FBHE를 구성하게 된다. Loopseal에는 ash control valve가 설치되어 있어 FBHE로 분기되는 고체량을 조절하고 있다. 연소로 하부에는 충물질을 FBAC로 배출시키는 밸브가 설치되어 그 양을 조절하게 되어 있으며, 이를 이용해 전체 로내의 압력을 조절하게 된다. 연소로로 주입되는 석탄 주입구는 총 6개로 이루어져 있고 이차공기는 총 16개의 노즐을 통해 주입된다. 분산판으로부터 4.3 m 지점에 오일 버너 2기가, 그리고 dense 층에 Lance 버너 5기가 설치되어 있으며, 이를 통해 충물질의 가열 및 저부하에서의 온도를 유지한다. 연소 및 유동화를 위해 공급되는 공기는 3 종류의 fan에 의해서 공급된다. 보일러에 직접 공급되는 일차공기 및 이차 공기는 각각 2개의 fan에 의해서 공급되며, loopseal, FBHE, FBAC에 공급되는 유동화 공기는 2개의 유동화 공기(FA) fan에 의해서 공급된다. FBHE 및 FBAC에 사용되는 유동기체는 연소로 내로 다시 순환된다.

D화력 순환유동층 보일러와 가동중인 상용 순환유동층 보일러의 형태 및 규격을 비교하기 위하여 순환유동층의 대표적인 형태를 Fig. 2에 그리고 이의 규격을 Table 2에 나타내었다[6]. 대다수의 보일러에서 공기 분산을 위하여 nozzle을 사용하고 있으며 하부회 유출구는 용량에

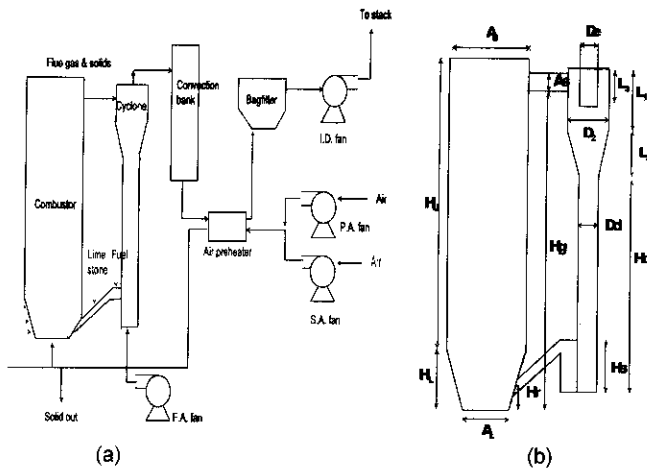


Fig. 2. (a) Flow diagram and (b) combustor configuration of the Ahlstrom CFB boiler.

상관없이 1-4개 설치되어 있다. 비산 유출되는 고체를 포집하는 방법으로는 P 보일러만이 U-beam separator를 사용하고 있으며 나머지 보일러에서는 싸이클론이 설치되어 있다. 싸이클론은 보일러 용량에 따라 1-3개가 설치되어 있다. 연소로의 단면적은 보일러의 용량에 따라 증가되며, 단면의 증가에 따른 연료의 고온 분배를 위하여 석탄 주입구를 늘려 설치하고 있다. 보통 20 m<sup>2</sup>의 연소로 단면적 기준으로 석탄 주입구가 3개 정도인 것으로 나타났다. 전체 단면적에 대한 orifice의 단면적 비인 opening ratio는 D화력의 경우 약 4% 정도이며 이는 다른 상용 보일러보다 비교적 커 분산판의 압력강하가 작게 나타나도록 설계되어 있다.

D화력 순환유동층 보일러는 증기 생산 용량이 국내 다른 순환유동층 보일러와 비교하여 3-10배 이상의 용량을 가지고 있어 단면적도 타 보

일러에 비해 3배 이상의 면적을 가진다. 그러나 연소로의 높이는 증기 생산 용량 및 단면적 증가비와는 달리 1.5배 정도인데 이는 연소 단면적 증가에 따라 증가되는 필요전열면적을 FBHE, FBAC 등의 외부 열 교환기를 통하여 제공하기 때문에 유동층 연소로에서의 열 전달 면적의 증가가 크게 필요하지 않기 때문이다.

D화력 순환유동층의 FBHE는 evaporator, reheater, superheater FBHE로 구분된다. FBHE는 loopseal에서 들어오는 고체의 양에 따라 열 교환되는 양을 조절하며 열 교환 후의 고온의 회재는 낮은 온도(500-780 °C)로 연소로 내로 재 순환됨으로써 보일러의 온도에 영향을 끼치게 된다. 따라서 FBHE는 열 교환의 목적 외에도 보일러의 온도를 조절하는 하나의 방법으로 쓰이고 있다. 하부 회 배출구에 외부 열 교환을 하여 열효율을 높이는 장치인 FBAC는 연소로에서 배출되는 하부 회 흐름 경로에 따라 steam preheater 및 ash cooler 2부분으로 나뉘어 운전되고 있으며 steam preheater에서는 223 °C의 고온 유동화 기체가, 그리고 안정적인 하부 회 배출을 위한 ash cooler에서는 회재 온도조절을 하기 위하여 76 °C의 차가운 유동화 공기가 사용되고 있다.

### 3. D화력 순환유동층 보일러의 운전 특성

#### 3-1. 연료 특성 및 배출 회재 특성

D화력 순환유동층 보일러에 사용되는 설계탄은 국내 무연탄으로 회재가 39%, 고정탄소가 53.7%, 수분이 3.3% 그리고 휘발분이 4% 함유되도록 기준되어 있으며, 건조탄 기준으로 S 및 N의 함유량이 각각 0.55 및 0.2% 함유되어 있는 비교적 연소 반응성이 나쁜 석탄이다[7]. 또한 석탄의 입도 분포는 설계치 기준으로 0.1-3.0 mm 사이의 입자가 95% 이상 되어야 하나, Fig. 3과 같이 설계치보다 작거나 혹은 큰 입도가 전체 석탄중 약 10% 이상 존재하는 것으로 나타났으며, 이러한 석탄 연료의 반응성 및 입도에 대한 영향은 초기 순환유동층 기동시 후단부(loopseal 및 cyclone)의 온도를 높이는 결과를 가져와 운전에

Table 2. Dimensions of CFB combustor in Korea

Boiler user	G	P	O	H	K	S	L	D
Steam capacity[t/h]	60	80	120	120	175	200	210	660
Grid Nozzles:								
Orifice dia.[mm]	14	28	7.5	3.5	6.5	3.5	3.0	33
Number of tuyeres	750	453	1951	954	297	1508	1492	736
Opening surface area[m <sup>2</sup> ]	0.115	0.279	0.345	0.338	0.27	0.48	0.393	2.52
Opening ratio[%]	1.84	2.07	2.3	2.14	1.80	7.48	1.61	3.94
Number of fuel feed part	1	2	3	2	2	4	4	6
Number of bottom ash part	1	2	4	2	2	3	3	2
Furnace:								
A <sub>L</sub>	1.8×3.48	4.5×3	2.18×7.2	2.1×7.5	2×7.52	2.53×2.5	2.5×9.8	3.3×19.1
A <sub>U</sub>	3.74×3.7	4.5×3	3.95×7.2	3.8×7.5	4.24×7.5	3.5×3.5	4.97×9.8	7.1×19.0
H <sub>L</sub>	3.695	2.84	2.93	3.9		3.5	3.2	5
H <sub>U</sub>	17.10		15.08	20.9	6.93	28.2	25.6	6.97
H <sub>g</sub>	17.4	24.3	14.95	19.8	26	27.3	25.0	31.9
H <sub>r</sub>	0.4	0.85	1.29	1.28	2.11	0.65	1.05	28.53
Number of gas exit	1		2	2	1	2	2	3
Cyclone: Number of cyclone								
A <sub>c</sub>	2.97×1.2		1.25×3.1	1.2×2.9	1.6×4.7	4.4×2.13	1.48×3.8	6.0×3.05
D <sub>2</sub>	3.71		3.9	3.7	3.3	5.6	4.95	6.994
L <sub>1</sub>	3.81		4.15	4.0	6.71	4.41	6.43	7.3
L <sub>2</sub>	2.54	U-beam separator	4.85	4.6	8.98	2.35	6.23	8.813
D <sub>e</sub>	1.67		1.73	1.7	3.47	2.98	2.33	3.75
L <sub>3</sub>	2.05		0.3	1.5	1.79	2.39	1.25	2.10
D <sub>d</sub>	0.71		0.75	0.71	1.1	0.9	0.9	1.31
H <sub>d</sub>	9.25		6.86	8.5	7.2	10.36	9.76	
H <sub>s</sub>	2.35		2.5	2.12	4.02	1.5	2.6	

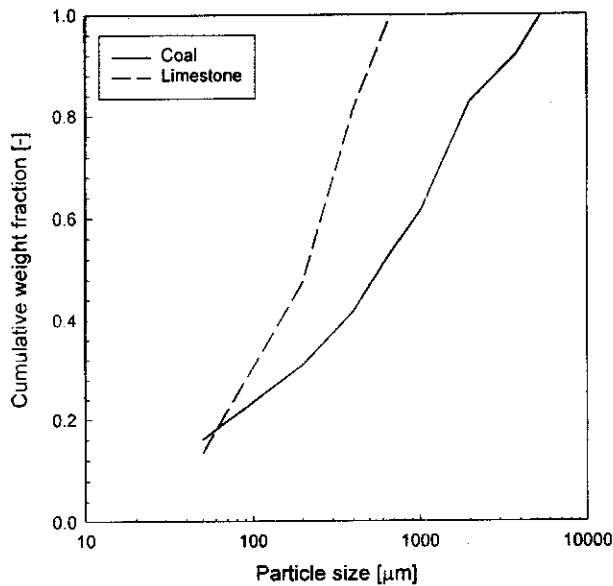


Fig. 3. Cumulative weight fraction of coal and limestone.

상당히 불안정한 요인으로 작용하는 것으로 나타났다[8]. 연소로 내의 탈황반응을 위해 투입되는 석회석은 국내(쌍용(주))에서 생산된 것으로  $\text{CaCO}_3$  함유량이 90%, 그리고  $\text{MgCO}_3$ 가 4.2% 정도 함유되어 있으며, Fig. 3과 같이 1 mm 이하 입도가 100%, 0.7 mm 이하가 95%, 그리고 0.5 mm 이하가 90% 되는 비교적 작은 입도 분포를 갖는 석회석이 사용된다.

일반적으로 국내 타 상용순환유동층 보일러에서 사용되는 유연탄의 입도 분포는 10 mm 이하를 사용하고 있으며 석회석은 D화력과 유사한 범위의 입도 분포를 갖는 입자를 사용하고 있다. D화력 무연탄과 국내 순환유동층 보일러에 사용되는 유연탄특성을 Table 3에 나타내었다. 유연탄은 발열량이 6,500 kcal/kg 이상이며 회발분이 30 wt% 이상으로 나타났다. 그러나 황 함유량은 대부분 0.3wt% 정도로 낮은 함유량을 보이고 있어 상대적으로  $\text{SO}_x$ 의 발생량이 적은 것으로 나타났다. 이에 반해 국내 무연탄의 발열량은 5,013 kcal/kg이며 다른 순환유동층 보일러에 사용되는 유연탄에 비해 1,500-3,000 kcal/kg 정도 낮으며 회재의 함량은 33 wt% 이상으로 높고 황함유량도 0.55 wt%로 유연탄에 비해 다소 높은 편으로 나타났다. 이러한 높은 회재의 함량으로 D화력의 경우는 충물질의 보충이 필요하지 않는 반면, 하부 회 및 비산회로의 배출 및 처리가 유연탄용 순환유동층 보일러에 비해 중요한 관심이 되고 있다.

D화력 보일러에서 채취된 하부회, 비산회(economizer and EP), loopseal 회재의 입도 분포 및 S사의 연소로에서 채취한 회재의 입도 분포를 Fig. 4에 비교하여 나타내었다. D화력에서는 상기에서 언급한 바와 같이 무연탄의 회재 함량이 높기 때문에 모래를 첨가하지 않고 무연탄 회재를 충물질로 사용하고 있어 로내의 입도 분포가 투입되는 석탄의 입도 분포와 마찬가지로 매우 넓게 나타났다. 이로 인해 비교적 큰 입도

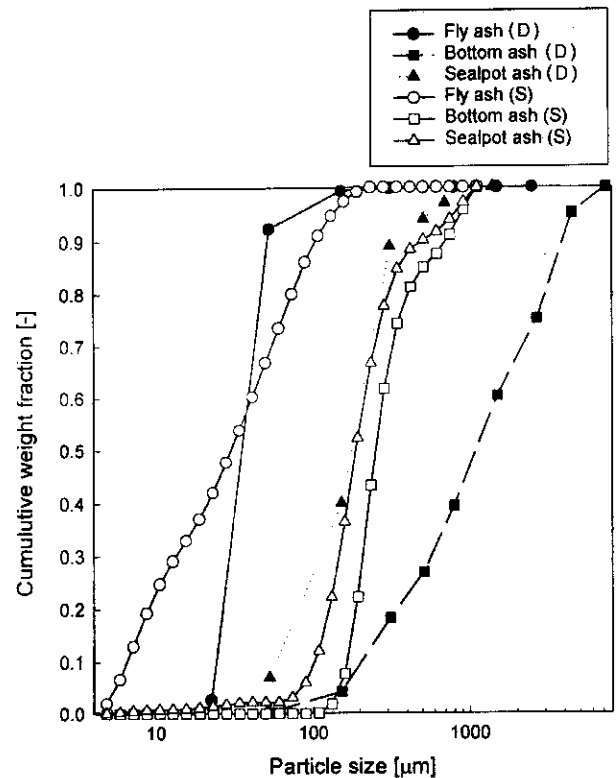


Fig. 4. Particle size distribution of discharged solids.

(760  $\mu\text{m}$  정도)만이 하부회로 배출되어 순환 가능한 loopseal 회재의 입도 분포와는 서로 다른 분포를 가지는 것을 알 수 있다. 반면 유연탄을 연료로 사용하는 S사의 연소로의 경우 loopseal 회재와 하부회의 입도가 거의 유사하였으며 이는 충물질로 비교적 균일한 입도의 모래 혹은 석회석을 계속적으로 투입하는 유연탄용 연소로에서는 연소로 내의 입도 분포가 주 충물질인 모래 혹은 석회석 입도에 맞춰져 비교적 균일하게 이루어져 운전됨을 알 수 있다.

비산회 및 loopseal 회재의 입도 분포는 D화력과 S사의 두 보일러의 경우가 비교적 유사한 입도 분포를 가지고 있는 것으로 보아 비슷한 크기의 입도를 가지는 입자들의 순환, 혹은 배출되고 있다는 것을 알 수 있으며, 이는 연소로 내의 운전조건 및 사이클론의 성능에 있어서 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

D화력의 하부회의 회재 특성 분석 결과를 타 순환유동층 보일러의 하부회와 비교하여 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 볼 수 있듯이 충물질을 석회석으로 사용하고 있는 H사의 보일러를 제외하고는 대부분의 보일러에서  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 많이 포함하고 있음을 알 수 있으며, H 보일러의 경우는 석회석 성분에서 야기되는  $\text{CaO}$ 가 50 wt% 이상 함유하고 있음을 알 수 있다. D화력 보일러의 경우 Si의 함유량이 53 wt% 이상이며  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 함유량은 33 wt% 이상으로  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 80% 이상을

Table 3. Properties of fuel

Sample	G	P	O	H	K	S	L	D
High heating value[kcal/kg]	6,580	6,840	6,710	8,343	7,228	6,770	6,592	5,013
Proximate analysis[as dry basis wt %]								
Moisture	8.22	5.83	7.15	5.50	12.8	5.06	3.92	3.88
Volatile	32.51	32.10	34.07	9.11	035.1	31.07	28.17	5.25
Ash	5.63	6.79	4.92	1.64	6.5	5.37	12.29	33.36
Fixed carbon	53.64	55.28	53.86	83.75	45.6	58.5	55.62	57.51
Sulfur[as dry basis wt%]	0.30	0.31	0.27		0.31	0.29	0.90	0.55

Table 4. Properties of bottom ash in various CFB boiler

Sample	G	P	O	H	K	S	U	D
Elemental analysis[dry basis wt%]								
SiO <sub>2</sub>	31.60	44.68	51.0	5.32		53.96	30-53	53.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				0.02			0.1-0.3	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.72	18.56	15.0	1.55		16.30	10-27	33.77
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.18	7.72	7.2	0.45	9.26	10.91	1.3-17	4.43
CaO	23.87	13.12	21.5	51.26	7.75	6.55	7-13.6	0.70
MgO	0.96	1.04	2.0	0.53		3.54	0.4-2.3	0.76
K <sub>2</sub> O	2.45	2.36	1.3	0.09	10.76	0.72	0.2-1.3	4.19
Na <sub>2</sub> O	1.11	1.19	1.1	0.02		1.11	0.1-0.4	0.22
TiO <sub>2</sub>				0.04			0.3-2	
MnO				0.04				

차지하고 있음을 알 수 있다. 이는 일반적으로 주입되는 모래 성분에 비해 경도가 높은 SiO<sub>2</sub> 성분(모래-약 70 wt%)이 비교적 적어 튜브 마모에도 큰 이점이 됨을 알 수 있다. 유연탄 연소로의 경우는 회재내 혹은 주입되는 석회석 내의 CaO 성분으로 인해 상대적으로 SiO<sub>2</sub> 양은 적은 반면 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 양이 많은 것을 알 수 있으며 이는 회재 및 층 물질(모래, 석회석 등)의 특성에서 기인한 것으로 사료된다. 하부회와 slagging 성향을 나타내는 식 (1)의 알칼리·산비는 유연탄을 사용하는 보일러의 경우 0.78, 0.38, 0.47 등으로 slagging이 일어나기 쉬운 상태이나 무연탄 회재를 층물질로 사용하는 D화력의 경우 0.11로 slagging index가 매우 낮아 상대적으로 층물질의 클링커 형성에 더 안정적인 것으로 나타났다[9].

$$\frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \quad (1)$$

하부회 및 비산화의 미연분 배출에 대해 Fig. 5에 나타내었다. 하부회의 평균 입도는 760 $\mu$ m이며 air preheater 포집회는 66 $\mu$ m, EP ash는 56 $\mu$ m를 나타내었다. 그림에서 보면 전기집진기 포집회의 경우 0-75 $\mu$ m 이하의 경우 미연분이 20 wt%가 넘는 것으로 나타나 0-75 $\mu$ m 이하의 크기를 가지는 석탄입자는 충분한 연소시간을 가지지 못하고 기체와 함께 배출되고 있음을 알 수 있다. Air preheater 포집회의 경우도 대부분의 입도에서 미연분이 3 wt% 미만으로 나타났으나, 전기집진기 포집회

와 마찬가지로 100 $\mu$ m 이하의 입도에서는 미연분이 10 wt% 정도로 비교적 높게 나타났다. 하부회 내의 미연분의 경우는 비교적 굵은 입도(>3,000 $\mu$ m)인 경우에 점차 미연분이 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 이는 연소로 하부에서 배출되는 굵은 입도는 연소에 필요한 체류시간을 가지지 못한다는 것을 의미한다. 따라서 투입 석탄의 적절한 입도 선택이 미연분 배출에 큰 영향을 줄 수 있다. 반면, 하부회 및 비산화 내의 100-400 $\mu$ m 입자는 상대적으로 매우 적은 미연분을 가지고 있는 것으로 보아 이 입자들이 상대적으로 다른 크기의 입자보다 체류시간이 길며 대부분의 순환매체에 해당하는 입도 분포라 할 수 있어 탈황제 및 층 물질 선정의 최적 입도는 100-400 $\mu$ m임을 알 수 있다.

### 3-2. 보일러 운전 특성

국내 순환유동층 보일러의 증기 용량에 따른 석탄 및 석회석 그리고 공기 공급에 관한 운전자료 및 배가스 특성을 Table 5에 나타내었다. 공기는 분산판에서 총괄 공기량의 약 50-60%가 일차공기로 주입되고 있으며, 나머지는 NO<sub>x</sub> 제어 및 후 연소를 위해 이차공기로 단계별 주입을 하고 있다. 상용 순환유동층 보일러 중 Ahlstrom 형태의 보일러에서는 외부 열 교환기가 설치되어 있지 않으므로 유동화 공기가 loopseal에만 주입되고 있으나 D화력의 경우 유동화 공기가 loopseal, FBHE, FBAC 등에 주입되고 있어 상대적으로 많은 양의 유동화 공기를 사용하고 있으며 이는 유사한 형태를 가지고 있는 K 보일러의 경우에서도 나타나고 있다.

D화력 순환유동층 보일러에서는 평균 98 ton/h의 석탄과 4.5 ton/h의 석회석을 사용하고 있으며 공기유량은 약 150 Nm<sup>3</sup>/s이다. 과잉 공기량은 약 20% 정도이며, Ca/S 몰비는 2.5 이상에서 조절이 이루어지고 있다. 비산화와 하부회는 거의 동일한 양이 배출되고 있고 비산화의 경우 미분 함량이 10 wt% 이상으로 나타나고 있으며 하부회의 경우 2-3 wt%를 나타낸다. 배가스내에 SO<sub>2</sub>는 115 ppm, NO<sub>x</sub>는 45 ppm정도 그리고 분진은 6 ppm 정도로 배출되고 있다. 일부 유연탄 순환유동층 보일러에서는 Table 5에서 보는 바와 같이 석탄중의 낮은 황 함유량으로 석회석을 첨가하지 않는 곳도 있으며, NO<sub>x</sub>는 탄 특성에 따라 차이는 있으나 비교적 낮은 온도에서의 연소로 인해 적은 양이 발생되고 있음을 알 수 있다.

D화력 순환유동층의 운전 압력분포는 크게 분산판 압력강하를 포함한 전체 압력차와 그리고 분산판으로부터 0.9 m위부터 상부 28.5 m사이의 압력차, 그리고 분산판 5.2 m 위부터 상부 28.5 m사이의 압력차를 측정 분석하고 있다. 이중 상부차압이라 일컫는 분산판 5.2 m 위부터 상부 28.5 m 사이의 압력차이는 고체 순환의 여부를 판별하는 기준으로 삼고 있으며 정상운전 중에 약 150-250 mmH<sub>2</sub>O의 압력차를 보이고 있다. 또한 중간차압인 분산판 위로 0.9-28.5 m사이의 압력차이는 약 400-550 mmH<sub>2</sub>O의 값을 나타내고 있다. 연소로 내의 전체 고체량으로 대변되는 전체 차압은 분산판 압력강하를 포함해 1,400-1,700 mmH<sub>2</sub>O

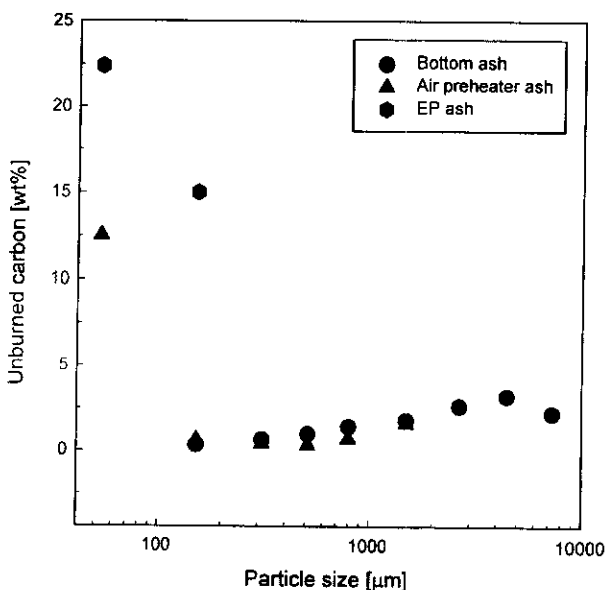


Fig. 5. Unburned carbon in various ash with particle size.

Table 5. (a) Flow rates of steam, coal, limestone and air (b) Pollutant emissions of CFB boiler

(a)								
Sample	G	P	O	K	S	L	U	Ke
Steam[t/h]	54	80	95.1	170	166.2	180	250	620
Coal[t/h]	7.3	8.55	13.13	20	21	20	30	98
Limestone[t/h]	-	-	-	0.8	0.14	0.4	0.4	4.95
Air[Nm <sup>3</sup> /s]	14.41	21.22	23.95	43.51	52.95	47.23	68.6	149.58
Primary	8.13	10.59	15.94	18.72	32.33	27.78	44.6	87.22
Secondary	4.69	10.59	6.61	17.25	7.7	18.81	23	53.22
Burner	0.57		1.40		8.0			
Others	1.02	0.04		7.54	4.61	0.64	1	9.14

(b)							
Sample	G	P	O	K	S	U	Ke
SO <sub>2</sub> [ppm]	269	106	412	75.48	107	50	115
NO <sub>x</sub> [ppm]		40	98.2	142.51	156	160	45
Dust[mg/M]	9.2	24	57.6	12.58	7.38	12	5.96
O <sub>2</sub> [%]	7.1	3.5	5.78	6.17	6.1	6	4.24

에서 운전되고 있으며, 전체 차압의 증가에 따라 상부차압 및 중간차압이 증가하는 경향을 보이고 있어 고체 순환량 조절을 가능하게 해주는 역할을 하고 있다.

D화력 순환유동층 보일러의 온도분포는 Table 6에 나타낸 바와 같다. 순환유동층의 온도 분포는 대략 840-910 °C사이이며, 횡 방향으로는 약 20 °C내외 그리고 축 방향으로는 60 °C내외의 온도차이를 나타내고 있다. 연소로 내의 횡방향 온도편차는 주로 석탄 주입구 부분과 loopseal 및 FBHE 회재 재순환부의 온도차이가 주원인이며, 대체적으로 석탄주입구 부분은 휘발분 연소로 인해 다른 곳보다 상대적으로 높은 온도를 유지하고 비교적 낮은 온도의 회재를 재순환시키는 evaporator FBHE의 고체 재순환 부분은 상대적으로 낮은 온도를 띠게 하는 것으로 나타났다. 또한 loopseal에서 FBHE로의 고체 재순환비에 따라 온도편차는 크게 변화하는 것으로 나타났다.

층내의 축방향 온도분포는 연소로 하단부의 농후상과 상부의 회박상간의 온도 편차는 크지 않은 반면, 싸이클론 입구 온도는 평균 층 온도보다 40-50 °C 이상, 그리고 싸이클론 출구 온도도 입구 온도보다 40-50 °C 이상 높은 것으로 나타남을 알 수 있다. 이는 비교적 국내 무연탄에 많이 포함되어 있는 미연분들의 후 연소가 싸이클론 입구 및 출구에서 미반응 산소와의 재혼합 및 연소반응으로 인해 나타나는 현상으로 이해할 수 있다. Loopseal의 온도는 싸이클론 입구의 온도와 큰 차이

Table 6. Temperature profile of D CFB boiler

Furnace(°C)	Lower(0.74 m)	857 861 911 890 886
	Upper(5.64 m)	840 871 912 902 867
Cyclone(°C)	1	Inlet : 915 Outlet : 946 944 943
	2	Inlet : 929 Outlet : 991 989 986
	3	Inlet : 941 Outlet : 972 972 968
loopseal(°C)	1	901
	2	948
	3	912
FBHE(°C)	1	144 249 185
	2	645 683 723
	3	468 688 749
FBAC(°C)	economizer	303 301 272 265
	cooler	262 231

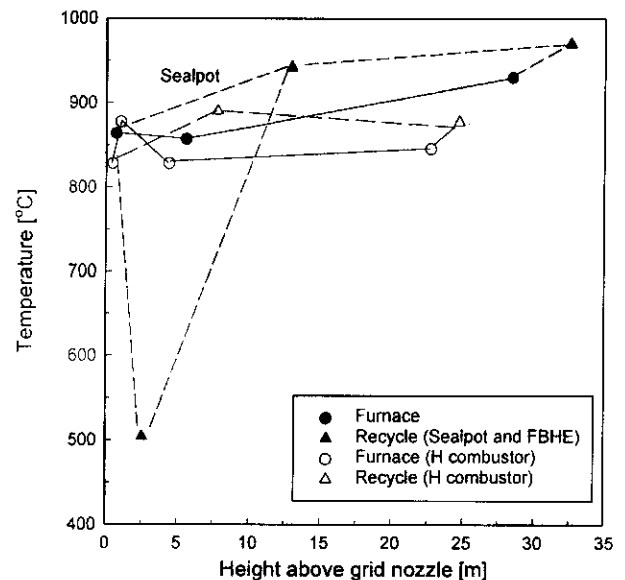


Fig. 6. Temperature profiles of D CFB boiler.

를 나타내지 않고 있으며 비교적 층 온도보다 높은 온도로 운전되고 있음을 알 수 있다. 반면 FBHE의 경우는 고온의 재순환 고체와 열교환 튜브와의 열전달에 의해 온도가 loopseal 보다 매우 낮음을 알 수 있다. 유연탄을 사용하는 다른 상용 연소로에서의 온도분포는 연소로 층 하단부가 830-870 °C에서 조업이 되고 있으며 싸이클론 출구 온도는 820-850 °C 정도를 유지하며 loopseal 온도는 싸이클론 출구 온도와 비슷하거나 낮은 것으로 보고되고 있다[6]. 이는 유연탄의 반응성이 국내 무연탄보다 좋기 때문에 대부분의 연소가 층 하부 및 연소로 내에서 모두 이루어지고 있음을 의미한다.

D화력 순환유동층 보일러의 축방향 평균 온도 분포를 H 사의 유연탄 연소와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. H사의 순환유동층 보일러의 경우 전체적으로 운전 온도가 900 °C 미만으로 조업이 이루어지고 있으며 층에서의 온도 차이가 거의 나타나지 않고 있다. 다만 1m 부근에서의 온도는 다량의 휘발분의 연소에 의하여 층의 다른 곳보다 높게 운전이 되고 있는 특징을 띠고 있다. D화력 연소로의 경우 층의 하부 온도는 평균적으로 850-870 °C 정도로 나타났으며, 연소로의 높이가 증가할수록 온도는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 loopseal의 온도가 연소로의 온도보다 높게 나타났다. H 사의 보일러와 비교하면 전체적으로 높은 온도에서 조업이 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 층 내 온도분포 그리고 재순환부의 온도분포가 다소 차이가 나는 것으로 나타났다. 즉, 무연탄을 사용하는 경우 연소반응성의 저하로 인해 비교적 높은 층 온도를 유지해야 하며 또한 이러한 낮은 연소 반응성으로 인해 후 연소가 상당량 일어나는 특성을 띠고 있음을 알 수 있다. 또한 D화력의 경우 연소로의 층 온도 조절은 공기량 및 석탄량 그리고 전체 층 물질량(total inventory)뿐만 아니라 loopseal의 고체 흐름의 양을 FBHE로 적절히 조절함으로써 연소로의 온도조절이 가능한 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

D화력 순환유동층 보일러는 난류유동영역에서 loopseal, FBHE, FBAC 등은 기포유동영역에서 조업되었으며 보일러의 효율은 92% 이상으로 나타났다. 무연탄의 높은 회재 함량으로 인하여 순환하는 층 물질로 회재만을 사용하기 때문에 다른 상용 유연탄 보일러보다 slagging index 인 알칼리·산비가 0.11로 작게 나타나 상대적으로 층물질

의 클링커 형성에 안정적인 것으로 나타났다. 층물질의 입도분포는 유연탄 보일러보다 넓게 분포하고 있고 대부분의 순환하는 층물질은 100-400  $\mu\text{m}$ 로 나타났으며 하부회의 평균입도는 760  $\mu\text{m}$ , loopseal 회재의 입도는 230  $\mu\text{m}$ 로 큰 차이를 보이고 있다. 대부분의 미연분은 비산회에 내포하고 있으며 특히 100  $\mu\text{m}$ 이하의 입도가 90% 이상을 포함하고 있기 때문에 이의 저감을 위하여 적절한 입도 조절이 필요한 것으로 나타났다. 연소로는 850-870  $^{\circ}\text{C}$ 로 운전되고 있으며 온도분포는 횡 방향으로 20  $^{\circ}\text{C}$ , 축 방향으로 60  $^{\circ}\text{C}$  정도 편차를 나타났다. 횡방향으로의 온도편차는 휘발분의 연소 및 FBHE를 통한 고체순환에 의해 나타났으며 축방향으로의 온도편차는 무연탄의 낮은 연소 반응성과 미연분의 후연소에 의해 나타났다. 따라서 국내 무연탄을 사용한 순환유동층 보일러의 설계 및 적용, 운전에 있어 이에 대한 고려가 필요할 것으로 생각된다.

### 사용기호

$A_c$	: cross-section of cyclone inlet [ $\text{m}^2$ ]
$A_L$	: bottom cross-section [ $\text{m}^2$ ]
$A_U$	: freeboard cross-section [m]
$D_d$	: dia. of exit of cyclone [m]
$D_2$	: dia. of cylinder of cyclone [m]
$H_d$	: height of dipleg [m]
$H_g$	: height between bottom of freeboard gas exit and grid nozzles [m]
$H_L$	: height of diffuser section [m]

$H_r$	: height between center of recycle inlet and grid nozzles [m]
$H_s$	: height of loopseal [m]
$H_U$	: height of freeboard [m]
$L_1$	: length of cylinder of cyclone [m]
$L_2$	: length of cone of cyclone [m]
$L_3$	: length of exit duct of cyclone [m]

### 참고문헌

1. Han, G. Y. and Choi, J. H.: *Chem. Indus. Technol.*, **13**, 20(1995).
2. Squires, A. M.: in *Circulating Fluidized Bed Technology*, 1, Pergamon Press (1986).
3. Reh, L.: *Chem. Ing. Technol.*, **42**, 447(1970).
4. Petzel, H. K.: "The Future of Fluidized Bed Combustion," VGB Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber E. V.(1997).
5. Sun, D. W., Park, Y. J. and Son J. E.: *Chem. Indus. Technol.*, **13**, 6 (1995).
6. Choi, J. H. and Son, J. E.: *Chem. Indus. Technol.*, **10**, 20(1992).
7. Lee, J. M. and Kim, J. S.: *Proceedings of the 6th Asian Conference on Fluidized-Bed and Three-Phase Reactor*, CheJu Island, Korea, 501 (1998).
8. Lee, J. M. and Kim, J. S.: *Korean J. Chem. Eng.*, **16**, in press(1999).
9. Erich, R.: "Mineral Impurities in Coal Combustion," Hemisphere publishing corporation, New York, N.Y.(1985).