

## 유동층 반응기에서 석탄 회재의 비산 및 마모

이시훈, 이동현, 김상돈, 이종민\*, 김재성\*  
한국과학기술원 화학공학과 및 에너지·환경연구센터  
\*한전 전력연구원 발전연구실 연소신발전그룹

### Elutriation and Attrition of Coal Ash in a Fluidized Bed

S. H. Lee, D. H. Lee, S. D. Kim, J. M. Lee and J. S. Kim  
Dept. of Chem. Eng. and Energy & Environment Research Center  
KAIST, DaeJong, Korea

\*Power Generation Lab. Advanced Power Generation & Combustion Group KEPRI,  
Taejon 305-380, Korea

#### 1. 서론

석유 및 가스 자원의 지역적 편재성과 매장량의 한계에 대한 대책으로 매장량이 풍부한 석탄 활용 기술 개발에 대한 연구가 진행 중에 있으며 특히 최근에는 환경오염을 저감하는 청정 석탄 기술의 연구가 이루어지고 있다. 이에 따라 연소로내의 탈황, 뛰어난 열전달 효과 높은 연소효율 등의 장점을 지닌 순환유동층이 점차 널리 연구 이용되고 있다. 국내에서는 10여기의 순환유동층 연소로가 건설, 운전되고 있으며, 최근에는 무연탄을 사용하는 순환유동층 연소로가 발전목적으로 건설 운전되고 있다. 국내 무연탄은 유연탄에 비해 열량이 낮고 회재의 함량이 높으나 높은 회재 함량으로 인하여 회재가 순환유동층 층 물질로 이용되어 다른 층 물질 (모래 등) 을 필요로 하지 않는 장점을 지니고 있다 (Lee et al., 2001). 무연탄이 연소로에 주입되면 건조, 탈 휘발, 연소 등의 과정을 거쳐 회재로 존재하게 되며 이 회재는 층 물질로 존재하여 열전달 매체로서 이용되게 된다.

연소로 내에서 존재하는 회재는 입자와 입자간의 마찰, 입자와 연소로 벽간의 마찰 등에 의하여 입자의 마모가 유발된다. 층 물질로 존재하는 회재는 유동층 연소로 내에 존재하여야 하나 마모 및 elutriation 현상에 의해 미세 입자들이 층 밖으로 유출되게 된다. 유동층에서의 마모 현상은 Merrick and Highley (1974) 에 의해서 연구되었으며 국내 무연탄에 대한 연구는 Park and Son (1989) 등의 연구가 있다. 국내 무연탄의 경우 마모는 과잉 기체 속도, 과잉 공기 율 등에 비례하며 열량이 낮은 무연탄일수록 석탄 공급량이 증가하여 상대적으로 높은 탄소 마모율을 보인다고 하였다. 그러나 석탄 회재가 층 물질로 사용되는 경우, 회재의 마모 및 elutriation 특성이 연구된바가 없다. 이에 본 연구에서는 동해화력 순환유동층 연소로에서 층 물질로 사용되는 회재의 elutriation 및 마모 특성을 고찰하였다.

#### 2. 실험

##### 2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 유동층 반응기를 Fig. 1 에 나타내었다. 그림에서 보면 유동층 반응기 (0.1 m-I.D. × 1.8 m-high) 는 크게 반응기, 석탄 주입부, 비산 입자 포집부 (2 cyclones) 로 구성되어 있다. 반응기는 air plenum, 분산 판, 주 층, 프리보드로 구성되어 있다. 반응기의 주탑은 0.1m I.D. × 1 m high 의 sus 316 pipe 로 제작하였고, 주 탑 부분에는 회재 배출관, 층 물질 주입구 등을 설치하였다. 축 방향 온도 분포를 측정하기 위하여 분산판 위로 6개의 thermocouple 을 설치하였으며 압력 탭 10개를 설치하여 압력 강하 및 층 높이를 측정하였다. 반응기의 외벽은 반응기의 가열을 위해 6 kW 의 전열선을 설치하였고, 열 손실을 줄이

기 위해 0.15 m 의 두께의 단열재로 단열하였다. 입자의 비산 유출을 줄이기 위하여 프리보드 (0.2 m-I.D. × 0.6 m-high)를 설치하였다. 마모에 의해 비산되는 입자를 측정하기 위하여 사이클론 2개를 연결하였으며 사이클론 하부에 포집 병을 연결하였다. 공기 유량은 입자의 비산을 방지하기 위하여 100 μm ( $u_t = 64\text{cm/s}$ )의 terminal velocity 이하인 0.3-0.5 m/s로 변화시키며 실험하였다.

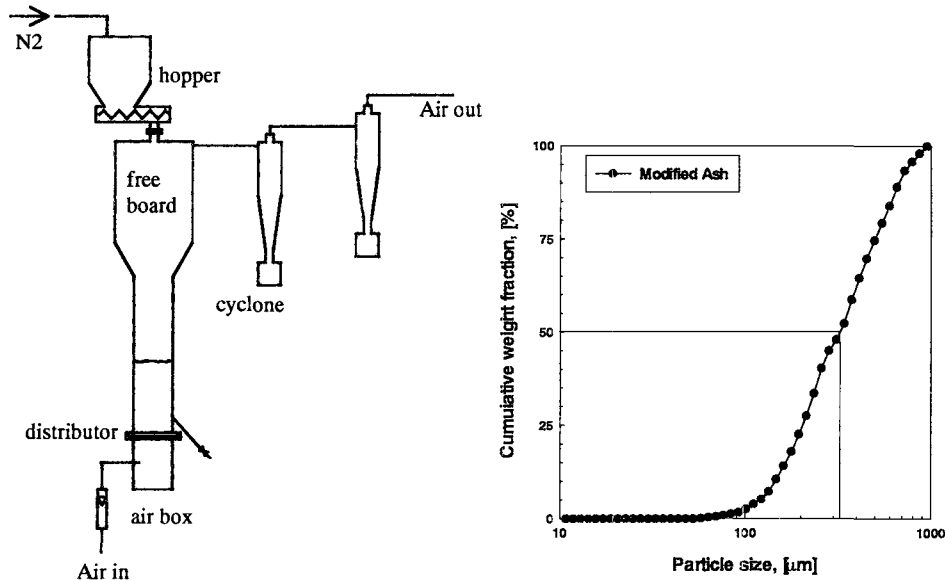


Fig. 2 Cumulative weight fraction of Tonghae CFBC Ash in FBC

Fig. 1 Schematic diagram of fluidized bed reactor.

본 실험에 사용되는 입자는 동해화력 순환유동층 연소로에서 사용되는 층 물질을 이용하였으며 Fig. 2에서 보듯이 평균 입자가 320 μm 이며 초기 입자 비산을 막기 위하여 100 μm 이하를 제거하여 사용하였다.

## 2.2 마모 및 elutriation 특성

동해화력 순환유동층 층 물질은 반응기에 주입되어 일정 시간 (4 시간) 이상 동일한 유속 (30, 35, 40, 50 cm/s) 으로 운전되었으며 비산 량은 2 개의 사이클론에서 포집되는 회재의 양을 측정하여 계산되었다. Elutriation rate 는 Lin et al. (1980) 의 식을 사용하여 계산하였다.

$$E = \frac{1}{A} \left( \frac{dw}{dt} \right)_{cyclone} \quad (1)$$

E : elutriation rate constant [ $\text{kg/m}^2\text{s}$ ]

A : cross-sectional area of fluidized bed [ $\text{m}^2$ ]

w : weight of particles in cyclone collected [kg]

마모 특성은 Merrick and Highley (1974) 와 Ray et al. (1987) 등이 사용한 식을 이용하여 계산되었다.

$$R_a = -\frac{1}{W} \left( \frac{dW}{dt} \right) \quad (2)$$

$$A_r = 100 \ln \left( \frac{W_o}{W} \right) \quad (3)$$

$R_a$  : attrition rate [1/s]  
 $W$  : weight in bed [kg]  
 $A_r$  : Extent of attrition [%]

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3 에는 측정 시간에 따른 bed 의 무게 감소를 나타내었다. 초기 bed는 4.5 kg 으로 하였으며 bed height 는 약 40 cm 정도로 하였다. 그림에서 보면 시간에 따라 bed 의 무게는 지속적으로 감소하였으나 2시간 이상이 되면 그 감소 폭이 감소하는 것을 볼 수 있으며 이는 무게 감소가 일정하게 일어남을 나타낸다. 또한 공기 유량이 증가할수록 무게 감소가 더 크게 나타났다.

Fig. 4 에는 측정 시간에 따른 비산 회재의 입도 크기를 나타내었다. 시간이 지날수록 입도 크기가 감소하는 경향을 나타냈으며 2 시간 이상이 되면 거의 일정해 지는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3에서 말한바와 같이 마모가 평형에 이루게 되는 것을 나타낸다. 마모에 생성, 비산되는 입자의 크기는 10  $\mu\text{m}$  이하로 되었으며 공기 유량에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

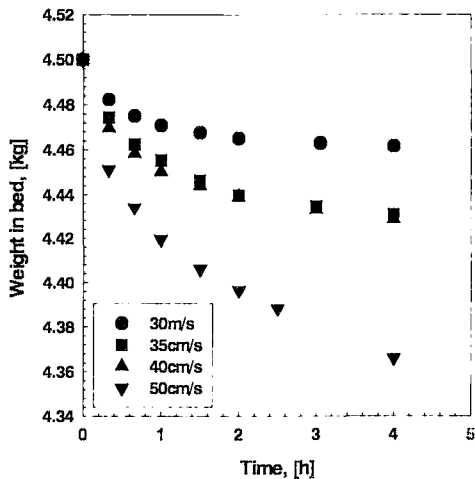


Fig. 3 Weight decrease in the fluidized bed

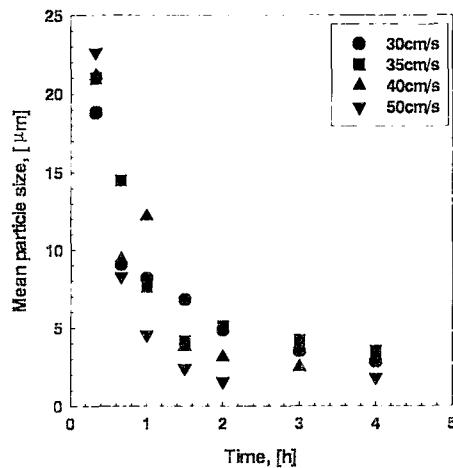


Fig. 4 Mean particle size of fly ash in cyclones

Fig. 5 에는 시간에 따른 elutriation rate 의 변화를 나타내었다. 그림에서 보듯이 시간이 지나갈수록 elutriation rate 가 감소하다가 평형을 나타낸다. 이는 Fig. 3 과 마찬가지로 시간이 지남에 따라 마모와 비산에 의한 미세입자의 배출이 평형을 이루는 것을 나타낸다. Ray et al. (1987) 은 마모가 평형에 이루는 것은 입자 표면에서 grinding 의 영향이 없어지기 때문이라고 하였다.

Fig. 6 에는 과잉 기체 공기량 ( $u-u_{mf}$ ) 에 따른 elutriation rate 에 대해서 나타내었다. 본 실험에 사용한 회재의 최소 유동화 속도는 7.1 cm/s 이며  $u/u_{mf}$  는 4-8 로 나타났다. 각각의 유속에 따른 elutriation rate 는 평형에 도달하는 2 시간 이후의 결과를 이용하여 구하였다. 그림에서 보면 과잉 공기량이 증가함에 따른 elutriation rate 가 증가하였고 타 연구자들의 결과 (Ray et al., 1987, Lin et al., 1980) 와 동일한 결과를 나타냈다. 이는 입자의 마모가 진행됨에 따라 Fig. 4 에서 보듯이 10  $\mu\text{m}$  이하의 입자 생성이 지속적으로 나타나기 때문이다. Fig. 7 에는 attrition rate 에 대한 과잉 공기량의 영향에 대해서 나타내었다. 그림에서 보면 과잉 공기량이 증가할수록 attrition rate 는 증가하였으며 마모율도 증가하였다. 식 (2) 와 (3) 에 따라 구한 동해화력 순환 유동층 회재의 마모 상수는  $3.18 \times 10^{-7}$  (1/s)

이며 마모율은 0.9에서 3 (%) 까지 나타났다.

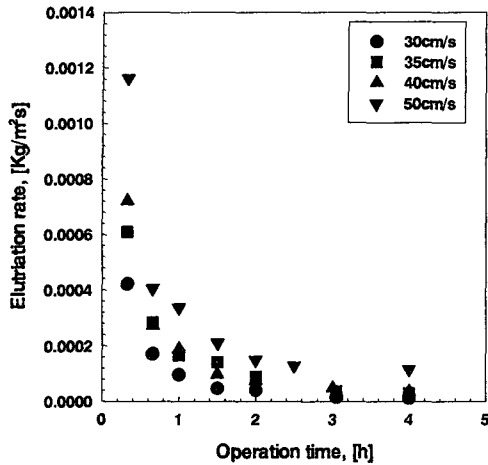


Fig. 5 Elutriation rate with operation time

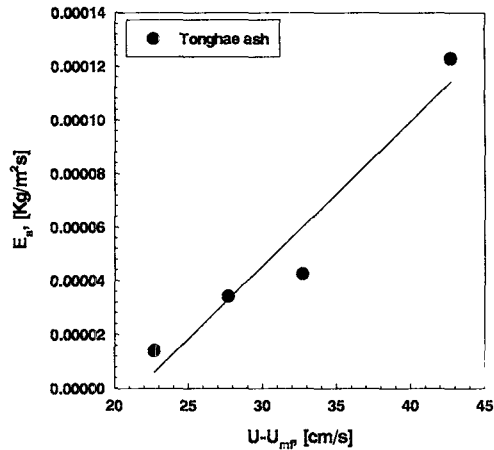


Fig. 6 Elutriation coefficient of Tonghae CFBC ash

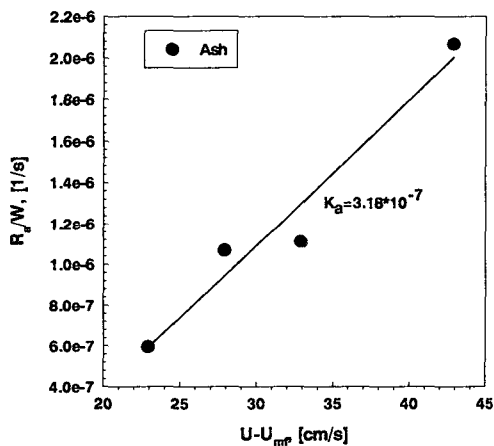


Fig. 7 The effect of excess gas velocity on attrition rate

#### 4. 결론

동해화력 순환유동층 연소로에서는 회재의 함량이 높은 국내 무연탄을 이용하기 때문에 층 물질로 다른 물질을 사용하지 않으며 회재를 직접 이용하고 있다. 따라서 국내 무연탄 회재의 elutriation 및 마모 특성은 연소로의 성능 및 조업에 큰 영향을 끼치게 된다. 유동층 에서 실험한 결과 시간에 지남에 따라 마모 및 비산에 따른 무게 감소가 지속적으로 발생하나 마모가 평형에 도달하는 것으로 나타났으며 유동층 반응기에서의 elutriation rate 는  $2 \times 10^{-5} - 1.2 \times 10^{-4}$  ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ) 로 나타났으며 마모 상수는  $3.18 \times 10^{-7}$  ( $1/\text{s}$ ) 으로 나타났다.

#### 5. 참고문헌

1. S. H. Lee, J. M. Lee, J. S. Kim, J. H. Choi and S. D. Kim, Combustion Characteristics of Anthracite coal in the D CFB Boiler, *HwaHak Konghak*, **38**, 516, 2000.
2. D. Merrick and J. Highley, Particle size reduction and elutriation in a fluidized bed process, AIChE symposium series, **70**(137), 366, 1974.
3. Y. S. Park and J. E. Son, Attrition characteristics of domestic low grade anthracite coal in a fluidized bed combustor, *HwaHak Konghak*, **28**, 320, 1990.
4. L. Lin and C. Y. Wen, Elutriation and attrition of char from a large fluidized bed, *Powder Technol.*, **27**, 105, 1980.
5. Y. C. Ray, T. S. Jiang and C. Y. Wen, Particle attrition phenomena in a fluidized bed, *Powder Technol.*, **49**, 193, 1987.