

유동층 연소로에서 국내탄 회재의 마모 특성

이시훈 · 김상돈* · 김재성** · 이종민**†

한국에너지기술연구원 석탄전환연구센터, *한국과학기술원 생명화학공학과, **한전 전력연구원 수화력발전연구소
(2006년 8월 7일 접수, 2006년 8월 29일 채택)

Attrition Characteristics of Korean Anthracite Ash in Fluidized Bed Combustors

See Hoon Lee, Sang Done Kim*, Jae Sung Kim**, and Jong Min Lee**†

Korea Institute of Energy Research, Coal Conversion Research Center, Daejeon, Korea

*Department of Biomolecular-chemical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea

**Power Generation Lab., KEPRI, KEPCO, Daejeon, Korea

(Received August 7, 2006; accepted August 29, 2006)

ASTM D5757-95에 따른 입자 마모 측정기와 lab-scale 유동층 연소로에서 국내 무연탄 회재와 모래의 입자 마모 특성을 실험하였다. 기체유속에 따른 마모 특성으로 비산 회재의 입도 분포, 마모 속도, 마모율 등을 측정하였다. 일반적으로 유동층 충물질로 사용되는 모래보다 회재가 마모에 취약해 비산 회재의 발생이 높았으며 마모지수의 경우 5배 정도 높게 나타났다. 기체 유속 변화에 따라 입자의 마모에 의해 미세 입자의 생성이 지속적으로 발생하였으며 다음과 같은 식을 따른다.

$$\frac{dW}{dt} = -3.18 \times 10^{-7} (U - U_{mf}) W$$

In the reactor following the American standard test method (ASTM) D5757-95 and lab-scale fluidized bed combustor, the attrition characteristics of sand and ash of Korean anthracite were investigated. The attrition characteristics, such as particle size distribution of fly ash, attrition rate, and attrition ratio etc, were studied with variation of gas velocities. The particle attrition of ash was more active than sand which was generally used as a fluidized material and also the attrition index of ash taken by ASTM D5757-95 was 5 times higher than that of sand. The formation of fine particles continuously occurred due to particle attrition with increasing gas velocities. The following equation has been suggested for attrition rate of ash.

$$\frac{dW}{dt} = -3.18 \times 10^{-7} (U - U_{mf}) W$$

Keywords: attrition, ash, fluidized bed, combustor

1. 서 론

석유 및 가스 자원의 지역적 편재성과 매장량의 한계에 대한 대책으로 매장량이 풍부한 석탄 활용 기술 개발에 대한 연구가 진행 중에 있다. 특히 최근에는 환경에 친화적인 청정 석탄 이용 기술에 대한 요구가 증가하고 있다. 이에 로내 탈황, 뛰어난 열전달 효과, 높은 연소 효율 등의 장점을 지닌 순환유동층이 점차 널리 연구 및 이용되고 있다. 국내에서는 10여기의 순환유동층 연소로가 건설, 운전되고 있으며, 최근에는 무연탄을 사용하는 순환유동층 연소로도 건설, 운전되고 있다. 국내 무연탄은 유연탄에 비해 열량이 낮고 회재의 함량이 높으나 높은 회재 함량으로 인하여 회재가 순환유동층 충물질로 이용되어 다른 충물질(모래, 석회석 등)을 필요로 하지 않는 장점을 지니고 있다[1]. 무연탄이 연소로에 주입되면 건조, 탈휘발, 연소 등의 과정을

거쳐 회재로 존재하게 되며 이 회재는 충물질로 존재하여 열전달 매체로서 이용되게 된다.

연소로 내에서 존재하는 회재는 입자와 입자간의 마찰, 입자와 벽간의 마찰 등에 의하여 마모 현상을 겪게 된다. 충물질로 존재하는 회재는 유동층 연소로 내에 존재하여야 하나 마모 및 비산(Elutriation) 현상에 의해 미세 입자들이 층 밖으로 유출되게 된다. 유동층에서의 마모 현상은 Merrick와 Highley[2]에 의해서 연구되었으며 국내 무연탄에 대한 연구는 Park과 Son[3] 등의 연구가 있으며 Jang 등[4]은 유동층 연소로에서 저발열량 무연탄을 연소할 때 발생하는 비산재 및 입자의 마모 특성을 연구하였다. 유동층 연소로에서 이루어진 대부분의 마모 연구는 모래를 충물질로 하고 그에 따른 석탄의 마모 특성에 대해서 연구하였다. 그러나 무연탄 회재가 충물질로 사용되는 경우, 회재의 마모 특성이 연구되지 못했다. 이에 본 연구에서는 유동층 연소로와 표준화된 입자 마모 측정 장치를 사용하여 충물질로 사용되는

† 주 저자 (e-mail: jmlee@kepri.re.kr)

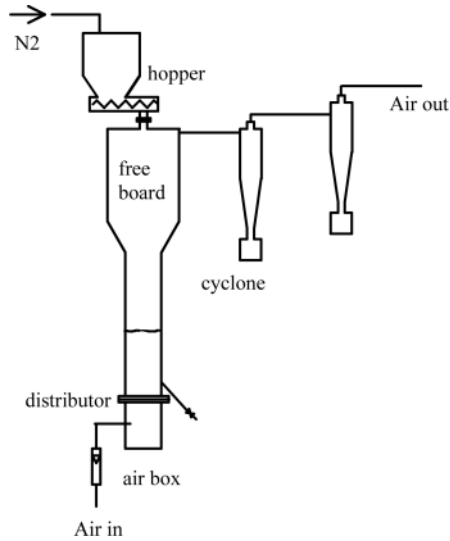


Figure 1. Schematic diagram of a fluidized bed reactor.

모래 및 회재의 입자 마모 특성을 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 범위

2.1. 실험 장치

본 연구에는 ASTM D5757-95에 따른 입자 마모 측정 장치와 유동층 반응기가 사용되었다. 입자 마모 측정 장치는 마모관과 침강조로 구성되어 있다. 마모관은 내경 0.035 m, 높이 0.71 m로 되어있으며 침강조는 내경 0.11 m, 높이 0.63 m로 제작되었다. 침강조의 하부는 높이 0.23 m의 확장관으로 마모관에 연결되어 있으며, 상부는 높이 0.1 m의 수축관으로 직경 0.034 m의 기체 출구와 연결되어 있다. 기체 출구를 통하여 외부로 비산된 삼각 플라스크와 thimble 필터에서 포집된다. 기체 분산판은 0.381 mm hole이 정삼각형(Triangular pitch length: 0.017 m)으로 배열되어 있으며 기체 유량은 10 L/min으로 고정하여 시험하였다.

회재와 모래의 마모 실험에 사용된 유동층 반응기를 Figure 1에 나타내었다. 그림에서 보면 유동층 반응기(0.1 m I.D. × 1.8 m high)는 크게 반응기, 석탄 주입부, 비산 입자 포집부(2 cyclones)으로 구성되어 있다. 반응기는 air plenum, 분산판, 주층, 프리보드로 구성되어 있다. 반응기의 주탑은 0.1 m I.D. × 1 m high의 sus 316 pipe로 제작하였고, 주탑 부분에는 회재 배출관, 층물질 주입구 등을 설치하였다. 측방향 온도 분포를 측정하기 위하여 분산판 위로 6개의 thermocouple를 설치하였으며 압력탭 10개를 설치하여 압력 강하 및 층 높이를 측정하였다. 반응기의 외벽은 반응기의 가열을 위해 6 kW의 전열선을 설치하였고, 열 손실을 줄이기 위해 0.15 m의 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 포집병을 연결하였다. 공기 유량은 입자의 비산을 방지하기 위하여 100 μm (u_r=64 cm/s)의 종말속도 이하인 0.3~0.5 m/s로 변화시키며 실험하였다.

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

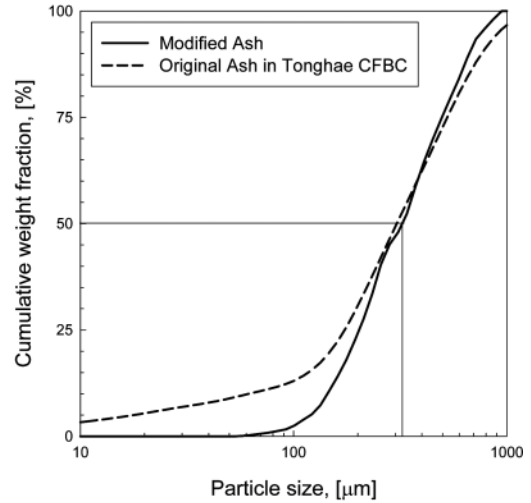


Figure 2. Cumulative weight fraction of commercial CFBC ash.

2.2. 마모 특성

동해화력 순환유동층 층물질은 반응기에 주입되어 일정 시간(4 h) 이상 동일한 유속(30, 35, 40, 50 cm/s)으로 운전되었으며 비산량은 2개의 사이클론에서 포집되는 회재의 양을 측정하여 계산되었다. 비산 속도(Elutriation rate)는 Lin 등[5]의 식을 사용하여 계산하였다.

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

E : elutriation rate constant [kg/m²s]

A : cross-sectional area of fluidized bed [m²]

w : weight of particles in cyclone collected [kg]

마모 특성은 Merrick과 Highley[2]와 Ray 등[6] 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. 실험 결과 및 토의

3.1. ASTM D5757-95를 이용한 회재의 마모 측정

일반적인 유동층에 사용되는 모래와 동해화력 순환유동층에서 사용되는 회재, 그리고 탈화제로 사용되는 석회석의 마모 특성을 비교하기 위하여 ASTM (American Standard Testing Material) D5757-95에 따라 제작된 반응기에서 실험하였다. 입자의 마모 특성은 마모 지표(AI: Attrition Index)와 수정 마모 지표(CAI: Corrected Attrition Index)를 구하여 비교하였다. 마모 지표는 정해진 시간동안의 마모

Table 1. Particle Properties and Size Distribution of Sand, Limestone and Ash

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Sand	92.70	2.15	0.32	0.12	0.12		
Limestone	2.3	0.3	0.3	89.5*	5.7*		
Ash	53.17	33.77	4.43	0.70	0.76	4.19	0.22

*: CaCO₃, MgCO₃

Particle diameter (Seive size)	Sand	Limestone	Ash
106~125 μm	10 g	10 g	10 g
125~150 μm	20 g	20 g	20 g
150~180 μm	20 g	20 g	20 g

Table 2. AI and CAI of Sand, Limestone and Ash

	AI	CAI
Sand	5.2	3.2
Limestone	11.6	6.4
Ash	26.0	13.2

손실 백분율이며 수정 마모 지표는 마모 지표에서 초기 층 고체 중에 포함된 미세 분말 무게를 고려하여 보정된 지표이다. 초기 층 고체 중에 보유한 미분을 구분하기 위해서 실험 초기에 일정한 실험 초기에 일정한 시간동안(1 h) 포집된 비산 손실 고체를 아래 식에서 나타내는 바와 같이 마모에 의해서 생성된 미분에서 제외하였다.

실험에 사용한 입자의 크기는 ASTM D5757-95에서 규정한 입도 (180~200 μm) 를 만족하는 범위에서 동일하게 만들어 사용하였으며 Table 1에 나타내었다. 실험 시작 초기 1 h과 그 후 4 h 동안의 비산화재를 포집하였으며 총 실험 시간은 5 h으로 하였으며 실험 결과를 Table 2에 나타냈다. Table 2에서 보듯이 마모지수는 모래, 석회석, 회재의 순으로 증가한다. Lee 등[1]은 유연탄을 사용하는 순환유동층 연소로의 경우, 회재가 거의 발생하지 않으며 모래를 층물질로 사용한다고 하였고 비산화재로 층물질의 손실이 발생한다고 하였다. 회재와 모래의 마모지수와 수정마모지수를 비교하면 모두 회재가 4~5배 높게 나왔으며 석회석의 경우, 2배정도 높게 나타났다. 이는 국내 무연탄 회재가 다른 물질과는 다르게 많은 화합물들로 구성되어 있으며 입자 마모에 취약함을 보여준다. 따라서 비산화재의 발생이 모래나 석회석보다 높은 회재를 상용 장치에서 층물질로 이용하는 경우, 입자의 마모의 영향을 고려해야 함을 의미한다.

ASTM 마모 테스트 전, 후의 입자의 분포를 Figure 3에 나타내었다. 마모테스트에는 10 μm 이하의 입자만이 비산되어 배출되기 때문에 비산된 입자는 10 μm 이하로 규정하였다. 테스트 전의 입도는 106 μm 이상으로 되어있으나 시험후의 입도 분포를 보면 모든 입자에서 106 μm 이하의 입자가 생성됨을 알 수 있다. 회재의 경우, 10 μm 이하의 입도를 가지는 입자가 매우 높게 나왔으며 150~180 μm의 입자의 경우 초기의 입도분포에서 대부분 마모되어 없어짐을 알 수 있다. 이와 반대로 모래의 경우에는 100 μm 이하의 입도를 가지는 입자가 5% 이하로 나왔으며 150~180 μm의 입자의 경우 초기의 입도분포에서 40% 이상 존재하였다.

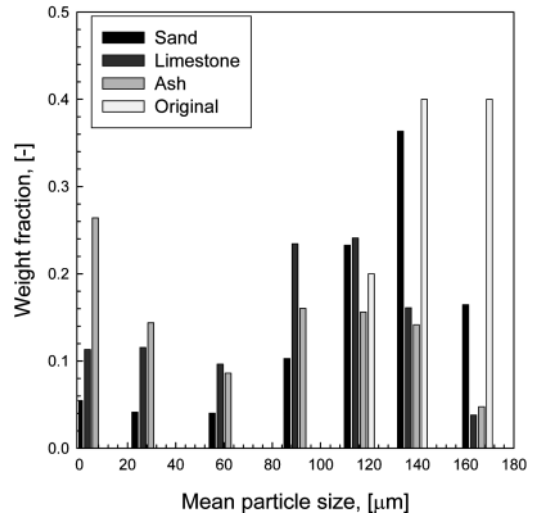


Figure 3. Particle size distributions of sand, limestone and ash.

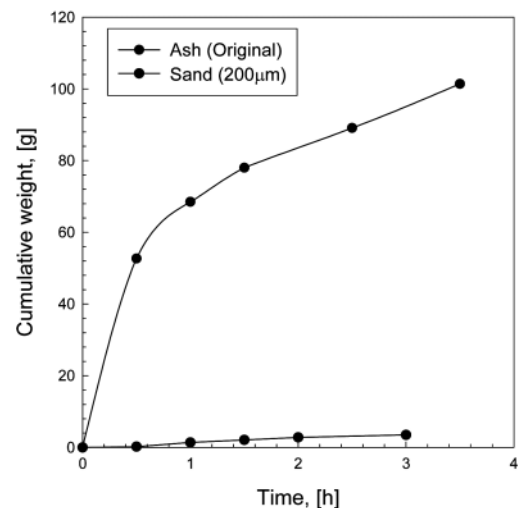


Figure 4. Cumulative weight in cyclone with operation time.

3.2. 유동층 연소로에서의 입자 마모 특성

Lee 등[1]은 국내 유동층 연소로에서 대부분 모래를 층물질로 사용하나 동해화력 순환유동층 연소로에서는 회재가 층물질로 사용된다고 하였다. 이에 유동층 연소로에서 층물질로 사용되는 회재와 모래의 입자 마모 특성을 측정하여 Figure 4에 나타내었다. 모래는 회재의 평균 크기와 유사하게 평균 크기가 246 μm인 것을 사용하였으며 동일하게 5 kg을 주입하였으며 입자의 마모에 의해 발생되어 유동층 연소로 밖으로 배출되는 미세 입자를 사이클론에서 포집하여 무게를 측정하였다. 그림에서 보면 시간이 지남에 따라 사이클론에서 포집되는 무게가 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 입자의 마모에 의해 미세 입자가 지속적으로 발생함을 나타낸다. 그러나 회재가 모래보다 매우 높게 나타났으며 이는 ASTM 입자 마모 실험에서 보듯이 모래가 회재보다 입자의 마모에 대한 저항이 크기 때문이다. 또한 모래의 입도를 측정된 결과 마모 시험 전후의 평균 입자의 크기가 246 μm, 241 μm로 거의 변화가 없었다.

Figure 5에는 기체 유속을 일정하게 하고 측정 시간(4 h) 동안에 유동층의 무게 감소를 나타내었다. 초기 고체층은 4.5 kg으로 균일하게

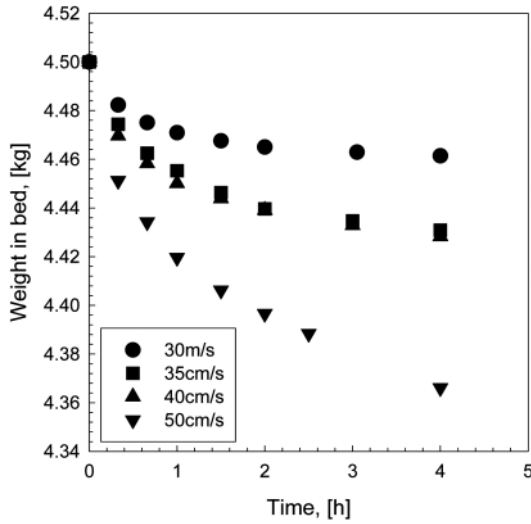


Figure 5. Weight decrease in the fluidized bed with operation time.

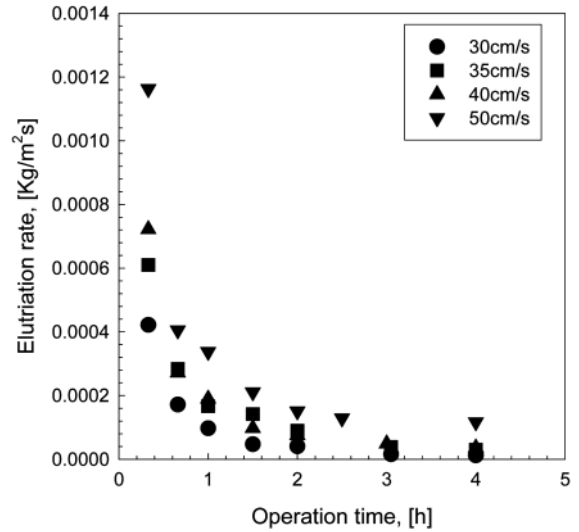


Figure 7. Elutriation rate of ash with different gas velocities.

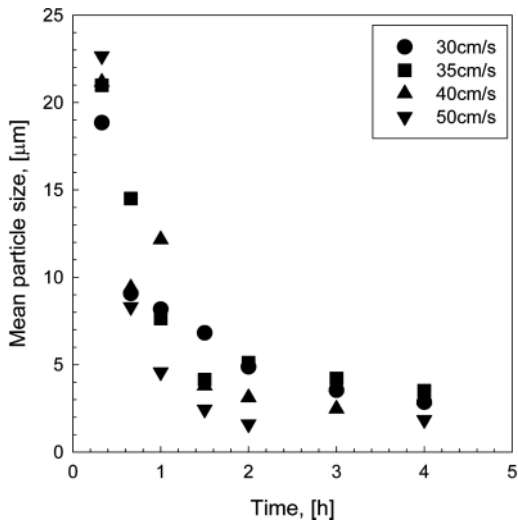


Figure 6. Mean particle size of fly ash in cyclone.

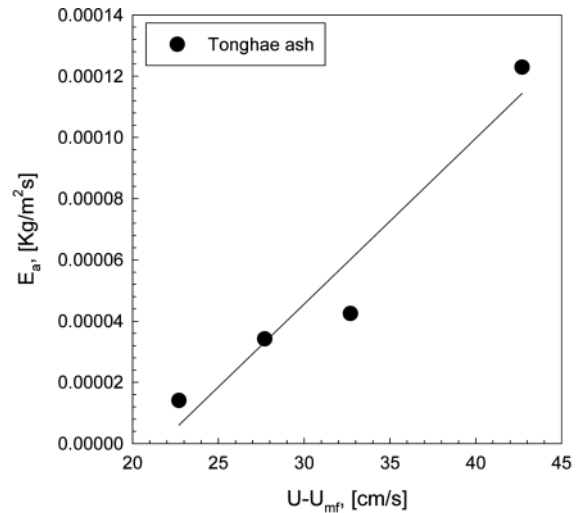


Figure 8. Elutriation coefficient of ash.

하였으며 이때 초기 유동층 높이는 약 40 cm로 하였다. 그림에서 보면 시간에 따라 유동층 무게는 지속적으로 감소하였으나 2 h 이상이 되면 그 감소폭이 작아져 평형에 도달하였다. 이는 Figure 3~4에 나타났듯이 마모 및 비산이 평형에 도달하였기 때문이다. 이에 따라 유동층 반응기에서는 기체 유량이 증가할수록 유동층 무게의 감소폭이 더 커지게 된다. 이는 Merrick과 Highley[2]가 말했듯이, 마모 및 비산의 가장 큰 인자가 기체 유속이기 때문에 유속이 높아져 마모 및 비산이 증가하기 때문이다. Park과 Son[3]은 마모에 의한 탄소 입자의 비산이 과잉 기체 유속($U-U_{mf}$)에 비례한다고 하였으며 Donsi 등[7]은 과잉 기체 유속이 증가할수록 유동층 내에서 좀 더 격렬한 입자의 움직임이 야기된다고 하였다. Vax와 Fellers[8]은 기체 유속이 증가할수록 입도 감소가 증가한다고 하였다.

Figure 6에는 측정 시간에 따른 비산 회재의 입도 크기를 나타내었다. 시간이 지날수록 입도가 감소하는 경향을 나타냈으며 2 h 이상이 되면 거의 일정해 지는 것을 볼 수 있다. 그림에서 보면 마모에 의하여 생성, 비산되는 입자의 크기는 10 μm 이하로 되었으며 공기 유량

에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 입자가 2 혹은 그 이상으로 깨지는 것이 아니며 작은 조각들이 떨어져나가 비산되기 때문이다. 이는 기존의 연구자들 [2,8,9]의 결과와 유사하였다. 2 h 이상의 결과를 보면 입자의 크기가 거의 변화가 없으며 이는 마모가 평형에 이루어지기 때문으로 여겨진다.

입자의 마모에 의한 층물질의 감소는 결국 입자의 비산과 영향이 있다. 따라서 유동층 연소로에서 회재의 비산 속도를 Lin 등[5]의 식으로 시간에 따라 구하여 Figure 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 비산 속도는 시간이 지남에 따라 큰 폭으로 감소하다가 평형에 도달하는 것을 알 수 있다. 이는 Figure 6과 마찬가지로 시간이 지남에 따라 마모에 의한 미세입자의 배출이 평형을 이루는 것을 나타낸다. Donsi 등[7]은 기체의 유속이 증가할수록 입자와 입자, 입자와 벽간의 마모 강도가 늘어나고 미분 입자의 비산 유속이 가능한 입도 범위가 넓어지기 때문에 입자의 비산이 증가한다고 하였다. Ray 등[6]은 마모가 평형에 이루는 것은 입자 표면에서 마멸(Grinding)의 영향이 없어지기 때문이라고 하였다.

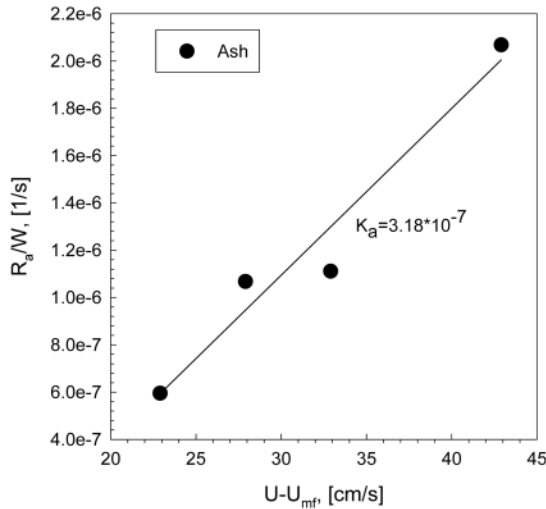


Figure 9. Effect of excess gas velocity on attrition rate.

Figure 8에는 과잉 기체 공기량($U-U_{mf}$)에 따른 평균 비산 속도에 대해 나타내었다. 본 실험에 사용한 회재의 최소 유동화 속도는 7.1 cm/s이며 U/U_{mf} 는 4~8로 나타났다. 각각의 유속에 따른 평균 비산속도는 평형에 도달하는 2 h 이후의 결과를 이용하여 구하였다. 그림에서 보면 평균 비산 속도는 과잉 기체 유속에 비례하는 것으로 나타났으며 타 연구자들의 결과[5,6]와 동일하다. 이는 Merrick과 Highley[2]의 상관식에서도 나타나듯이 비산에 의해 변하는 입도는 기체 유속에 비례하기 때문이다. 또한 Figure 7에서 보듯이 10 μm 이하의 입자 생성이 지속적으로 나타나고 Figure 5에서 보듯이 층물질의 감소가 지속적으로 이루어지기 때문이다.

동해화력 회재의 마모에 의한 층물질의 감소를 나타내기 위해 Merrick과 Highley[2]의 식을 이용하여 기체 유속에 대한 마모 상수를 구하였다. 과잉 기체 유속에 대한 마모 속도를 Figure 9에 나타내었다. 그림에서 보면 과잉 공기량이 증가할수록 마모 속도(R_a/W)는 증가하였다. 식 (2)와 (3)에 따라 구한 동해화력 순환 유동층 회재의 마모 상수는 3.18×10^{-7} (1/s)이다. Donsi 등[7]은 유연탄의 경우 마모 상수가 3.5×10^{-9} 이라고 하였으며 이는 입자의 특성이 다르기 때문이다.

Figure 10에는 유동층 연소로에서 동일한 유속을 유지하면서 온도를 다르게 한 경우의 비산 회재의 양을 측정하였다. 그림에서 보면 시간이 지남에 따라 비산회재의 양이 증가하였으며 이는 마모에 의한 입자의 배출이 지속적으로 일어남을 의미한다. 그러나 동일한 유속일 경우에도 온도에 따라 비산 회재가 다르게 나타났다. 상온에서의 결과가 고온(820 $^{\circ}\text{C}$)보다 높게 나왔으며 이는 온도가 증가할수록 비말 동반이 적어지기 때문이다. Choi 등[10]의 결과에서 볼 수 있듯이 동일한 유속일 경우 온도가 증가하면 향력이 작아져 비산이 적어진다. 따라서 온도가 증가할수록 마모 및 비산이 작게 나타나 유동층 층물질의 유출이 작아진다. Arena 등[11]은 반응 온도의 증가는 미세 입자를 만드는 2번째라고 하였으며 입자의 크기가 더 큰 효과를 준다고 하였다.

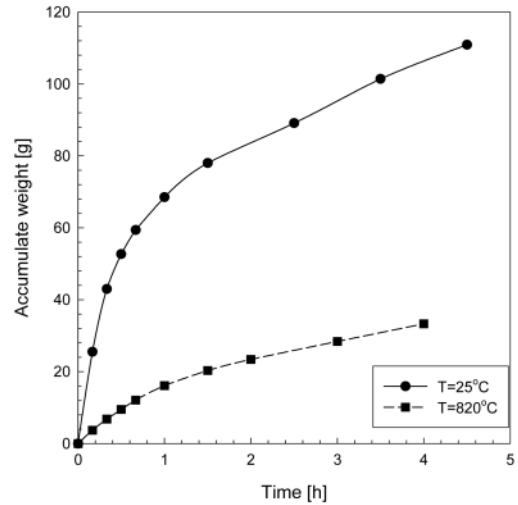


Figure 10. Cumulative weight of fly ash in the fluidized bed reactor.

4. 결 론

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

참 고 문 헌

1. S. H. Lee, J. M. Lee, J. S. Kim, J. H. Choi, and S. D. Kim, *HwaHak Konhak*, **38**, 516 (2000)
2. D. Merrick and J. Highley, *AIChE Symp. series*, **70**, 366 (1974)
3. Y. S. Park and J. E. Son, *HwaHak Konghak*, **28**, 320 (1990)
4. H. T. Jang, W. S. Cha, K. J. Oh, and D. S. Doh, *JKSEE*, **16**, 525 (1994)
5. L. Lin and C. Y. Wen, *Powder Technol.*, **27**, 105 (1980)
6. Y. C. Ray, T. S. Jiang, and C. Y. Wen, *Powder Technol.*, **49**, 193 (1987)
7. G. Donsi, L. Massimilla, and M. Miccio, *Combustion and Flame*, **41**, 57 (1981)
8. W. G. Vaux and A. W. Fellers, *AIChE Symp. Series*, **205**, 1113 (1981)
9. B. Waldie and T. Robinson, *Powder Technol.*, **27**, 163 (1980)
10. Y. S. Choi, B. S. Moon, S. Y. No, and G. H. Lee, Proc. 3rd Inter. Symp. Coal Combustion, Beijing, China, 107 (1995)
11. U. Arena, M. D'amore, and L. Massimilla, *AIChE*, **29**, 40 (1983)