

유동층에서 유기성 오니의 마모 특성

서원태, 장준호, 장윤영, 장현태*
한서대학교 화학공학전공

Characteristics of Organic sludge Attrition in a Fluidized bed

Won-Tae Seo, Jun-Ho Jang, Yoon-Young Jang, Hyun-Tae Jang*
Department of Chemical Engineering Hanseo University

요약 화석연료 사용 감소에 따른 이산화탄소 발생 저감을 위한 가연성 폐기물의 처리 방법으로 혼합연소가 가장 효율적 방법이다. 유동층연소로는 열 및 물질전달 효율이 높으므로 다양한 연료 사용이 가능하고 높은 전열 강도를 지니고 있다. 유동층연소로는 투입된 연료의 회분 성분이 바닥재와 비산재로 배출된다. 본 연구에서는 유동층에 공급된 유기성 오니 회분의 배출 특성을 규명하고자 연구를 수행하였다. 따라서 유기성 오니 회분의 마모 및 비산유출 특성을 ASTM D5757-95 방법과 1½, 4인치 유동층에서 각각 수행하였다. ASTM D5757-95는 200 μ m 이하 입자의 마모를 연구하였으며, 200 μ m 이상의 입자는 1½인치 유동층에서는 유기성 오니만을 충전한 상태에서의 마모 특성, 4인치 유동층에서는 층물질 모래와 유기성 오니를 충전하여 마모 특성을 측정하였다. 또한 내경 4인치 유동층에서는 유동층 분산판으로부터 0.03m 간격으로 4개의 압력센서를 설치하여 유동층의 압력요동 특성을 측정하였다. 측정된 압력값으로부터 압력요동 특성치인 평균압력과 압력요동의 표준편차를 계산하였다. 압력요동특성치로써 유동층에서 유기성 오니의 마모 유출특성을 관측할 수 있는 방법을 제시할 수 있었다. 유동층에 공급된 유기성 오니는 입자간 및 기벽과의 마찰과 공급공기의 jet에 의하여 마모 비산되어 연소가스에 동반되어 유출되는 것을 알 수 있었다.

Abstract Combustion of a mixture of fossil fuel and organic sludge is the most efficient method for the treatment of combustible wastes in order to reduce carbon dioxide generation due to the reduction of fossil fuel use. The high heat and mass transfer efficiency from fluidized bed combustion allows utilization of various fuels, in which the ash of solid fuel is discharged as bottom ash and fly ash. This study analyzes the discharge characteristics of organic sludge ash in a fluidized bed. Therefore, attrition and elutriation characteristics of organic sludge ash were examined by using the ASTM D5757-95 method and 1½-inch and four-inch fluidized beds, respectively. The ASTM D5757-95 method measures particle attrition via air jet. The particle size range was 200 μ m and under. For particle sizes of 200 μ m and over, attrition characteristics were measured in a 1½-inch fluidized bed with only organic sludge and in a four-inch fluidized bed with bed material sand and organic sludge. The pressure fluctuation properties were measured in a four-inch fluidized bed by four pressure sensors installed at intervals of 0.03m above the distributor plate. Pressure fluctuation properties, such as mean pressure and standard deviation of the pressure fluctuations were calculated. From the pressure fluctuation properties, it was possible to predict particle attrition and elutriation of organic sludge in the fluidized beds. The organic sludge was fed into the fluidized bed for attrition and elutriation from friction and collision between particles and the wall and the jet of the supply air. It was found that suspended particles carried the combustion gas.

Keywords : Attrition, Fluidized Bed, Bio-mass, Pressure Fluctuation, Minimum Fluidization Velocity

본 논문은 2022년도 한서대학교 교내연구과제 지원사업에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Hyun-Tae Jang(Hanseu Univ.)

email: htjang@hanseo.ac.kr

Received June 28, 2022

Accepted September 2, 2022

Revised August 17, 2022

Published September 30, 2022

1. 서론

2012년 슬러지의 해양 투기가 중단된 이후 매립으로 슬러지를 처리하면서 토양오염과 비용 등 다양한 문제점이 발생되어, 석탄화력발전소 연소로에 화석연료와 혼합 연소시키는 방법을 사용하고 있으며, 최근에는 민간 소형 연소로에서도 연소처리를 수행하고 있으나[1] 전량 처리되지 못하고 있다. 유기성 오니는 하수슬러지, 가축분뇨처리 슬러지, 식품가공 폐수 및 염색폐수 슬러지 등이 있다. 수처리 공정 등에서 발생하는 슬러지를 입상화하기 위하여 바인더를 사용하여 입상화 건조 처리한다. 이러한 유기성 슬러지에 함유된 가연 성분은 하수슬러지의 경우 48% 이상이며, 버섯 배지 슬러지의 경우 80% 이상이다. 최근 신재생에너지에 대한 연구와 상용화가 활발히 이루어지고 있다. 전 세계적으로 지구온난화를 지연시키고 원상 회복하기 위한 방안으로 이산화탄소 발생을 저감하기 위한 다양한 방안을 고려하고 있다. 유기성오니를 매립 방법으로 처리할 경우 미생물에 의한 분해로 이산화탄소를 배출하게 된다. 따라서 석탄연소로에서 혼합연소하여 이산화탄소로 전환시키고 이때 발생하는 열 에너지를 사용하는 방법은 석탄 대체 효과가 나타난다. 국내 석탄화력발전소의 경우 미분탄 연소방식을 채택하고 있다. 미분탄 연소는 연소로 투입 이전 미분화 단계가 필요하므로 유기성 오니의 사용은 연료의 제약이 적은 유동층연소로가 적절하다[2,3]. 미분 연소의 경우 발생하는 연료 회분 및 미연소분은 연소가스와 함께 배출되어 집진설비에서 분리 배출된다. 유동층의 경우 유동층 형성을 위하여 유동화 물질로 모래를 주입하고 있으며, 일부 석회석을 사용하여 층을 형성한다[4]. 대부분의 유동층연소로는 연소효율 상승을 위하여 순환유동층을 사용하고 있으며, 미연소분은 순환과정에서 연소되고 사이클론에서 분리되지 않는 미립자로 분쇄되어 유동층에서 배출된다. 생성된 회분 중 입경이 큰 입자는 층하부로 배출되고, 미립자는 연소가스와 함께 배출된다. 따라서 본 연구에서는 유기성 오니의 유동층 연소로 혼합연소시 생성되는 유기성오니 회분의 배출 경로를 제시하기 위하여 유기성 오니 회분의 마모 특성을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1, 2와 같다. Fig.

1은 유기성 오니 마모를 측정한 1½ inch 유동층과 모래를 층 물질로 사용하여 마모를 측정한 직경 4 inch 유동층을 각각 나타내고 있다. 유동층 재질은 sus-316으로 4 inch의 경우 분산판 상부 축 방향으로 0.03m 간격으로 압력전달기와 열전대를 설치하여 온도, 압력을 측정하였다.

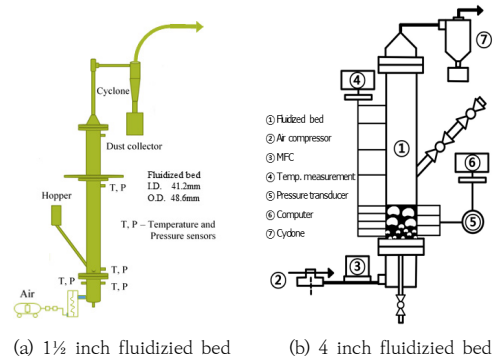


Fig. 1. Schematic diagram of measuring of sub-bituminous coal spontaneous combustion.

Fig. 2는 ASTM D5757-95[5]의 마모시험장치로서 기체 jet에 의한 입자의 마모 정도를 측정하는 장치로써 일반적으로 촉매, 흡착제 등의 강도를 시험하는 기준으로 사용되며, 노즐의 기체 jet에 의하여 발생하는 마모를 200 μ m 이하 입자에 대하여 비교 평가하는 방법으로 사용된다.

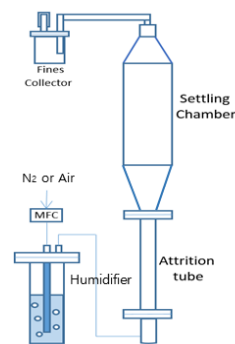


Fig. 2. Schematic diagram of fluidized bed.

2.2 실험방법

Fig. 1 (a)의 유동층에서 실험방법은 50 g의 유기성 오니 회분을 충전한 후 유동화 개시 후 매시간 간격으로 층내 입도분포와 비산유출량을 측정하였다. Fig. 1 (b)의 유동층은 입경 0.715 mm 모래를 L/D=1로 충전한 후 유기성 오니 225g을 충전하고 매시간 간격 동일하게 층내 물질 입도와 비산유출량을 측정하였으며, 층내 압력

요동을 측정하였다. Fig. 2의 마모실험장치는 ASTM D5757-95 방법에 의거하여 실험을 수행하였다.

2.3 시료

본 연구에 사용된 유기성 오니의 분석표는 다음 Table 1, 2와 같다. 연소전 유기성 오니와 연소 후 생성된 회분의 겉보기밀도와 진밀도를 Table 3에 나타내었다. 회분의 진밀도는 유기물 연소에 의하여 증가되나, 겉보기 밀도는 유기물 연소에 의하여 감소되는 것을 알 수 있으며, 이러한 특성으로 마모에 대한 저항성이 낮을 것으로 예상할 수 있다.

Table 1. Proximate analysis of organic sludge.

Comp. (Wt.%)	Moisture	Ash	Volatile	Fixed Carbon	Net Heating Value(kcal/kg)
Organic sludge	6.5	43.0	4.3	46.2	3202

Table 2. Ultimate analysis of organic sludge.

Comp.(Wt.%)	C	H	N	O	S
Organic sludge	29.2	5.4	22.4	4.3	0.6

Table 3. Density of organic sludge and ash.

Density(g/cm ³)	Organic sludge	Organic sludge ash
Bulk	0.78	0.68
Real	1.68	2.90

3. 결과 및 고찰

3.1 ASTM D5757-95 시험 기준에 의한 마모 특성 고찰

Fig. 3은 ASTM D5757-95 마모실험장치에서 유기성 오니 회분의 마모 특성을 나타낸 그림이다. ASTM D5757-95 마모실험장치는 기체공급을 위한 노즐 개수는 3개이며, 직경이 0.381 mm 이므로 노즐의 선속도는 음속 이상에 해당되며, 노즐에서 분사되는 기체와 입자간 마찰에 의한 마모가 발생되며, 입자간의 마찰에 의한 마모는 상대적으로 작게 나타난다. Fig. 2에서 입자경 1.638 mm(10/16 mesh), 1.016 mm(16/20 mesh), 0.682 mm(16/50 mesh), 0.243 mm(50/80 mesh)에 대한 마모실험 결과는 10/16 mesh 입자를 제외한 입자군은 유사한 결과를 나타내며, 5시간에 최대 65%가 마

모되어 유출되는 것을 알 수 있다. 이러한 ASTM D5757-95 장치의 결과는 유동층 노즐에서 기체 jet에 의하여 발생하는 마모율을 측정하는 것으로 1.638 mm의 경우 입자 사이로 생성된 공극으로만 기체가 통과되어 jet에 의한 마모가 발생되지 않는 것을 알 수 있다. 그림에서 일반적으로 유기성 오니가 혼합연소되는 유동층 연소로의 층내 물질의 최소 체류시간이 3시간이므로 1.0 mm 이하 입자의 경우 유동층 분산판 jet에 의한 마모[6]가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 즉 공극과 동시에 착화 연소되고 생성되는 큰 입경 회분은 분산판 노즐에서 마모되어 상부로 이동할 것으로 판단된다.

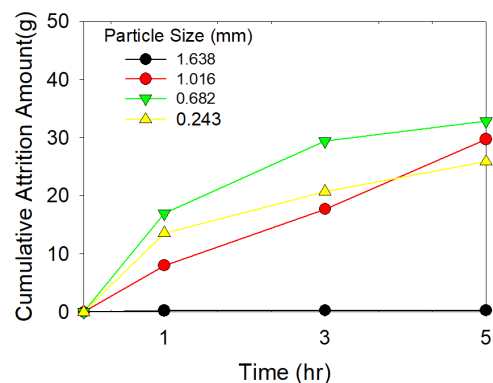


Fig. 3. Attrition rate of organic sludge ash according to particle size in an attrition bed(ASM D9595-57).

Jet 마모 영향을 최소화시키고 유동층 입자간 마찰에 의한 마모 현상[7]을 연구하기 위하여 Fig. 3에 내경 1½ 인치 유동층에서 마모 정도를 측정하여 나타내었다. 1½ 인치 유동층은 기체 분산판 jet에 의한 영향을 감소시키기 위하여 sus-310s 재질 다공성(sintered metal filter) 분산판을 설치하여 실험을 수행하였다. 실험은 50g의 유기성오니 회분을 충전하고 Uo/Umf는 동일한 상태 공탐속도에서 유동화시킨 후 1, 3, 5시간 후 유동화를 중지하고 층내 입자를 표준체로 체분석하고 질량을 측정하여 층내 입자 분포와 마모유출된 양을 구하였다. 유기성오니 회분 입자군 2.87 mm(6/8 mesh), 2.19 mm(8/10 mesh), 1.73 mm(8/16 mesh)의 3 종류를 대상으로 수행하였다. 동일한 유동화 상태에서 마모도를 비교하기 위하여 공탐속도는 다르나 Uo/Umf = 1.1인 동일한 유동화 강도(intensity)로 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 입자군의 상온에서 최소유동화속도는 1.36, 1.09, 0.98 m/sec 이다. 유동화속도의 1.1배에서 실험

을 수행하므로써 낮은 유동화 강도에서 발생하는 입자간 마찰에 의한 마모 영향을 측정하였다.

일반적으로 기포유동층 운전은 최소유동화속도 2배 이상 7배 이하 구간에서 운전되며, 순환유동층에서는 유동화물질의 순환과정에서 유동화 기벽 및 입자간의 충격과 마찰[8]이 매우 크므로 $U_o/U_{mf} = 1.1$ 인 조건은 단지 입자간의 마찰만을 측정한 것으로 해석할 수 있다. Fig. 4에서 3시간까지는 유사한 마모율을 나타내고 있으나 5시간 경과시 초기 충전 입자 크기가 작을수록 마모율이 높은 것을 알 수 있다. 또한 5시간 경과 후 유동층 입자의 분포를 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

입도는 U.S. 표준체로 입도를 분리하여 구하였으며, 매시간 공기 공급을 중단하고 시료 전량을 체분석하여 구하였다. 그림에서 각 입도별로 유사한 입도를 나타내며, 입도분포 경향성으로 입자간 마찰에 의하여 이루어짐을 알 수 있다[9].

공기 Jet와 입자간 마찰에 의한 마모를 구분하여 나타내 보았으며[10], 실제 유동화 조건에서 마모를 연구하기 위하여 충물질로 0.715 mm(20/30 mesh) 크기 주문진 표준사를 충전하고 유기성 오니 회분을 충전하고 모래의 최소유동화속도 2배 조건에서 시간에 따른 마모 특성을 실험하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 3시간 후 약 80%의 입자가 마모된 것으로 나타나고 있다. 사용된 유기성 오니 회분 입자보다 작은 충물질을 사용하여 충물질 모래보다 큰 입자만을 측정한 것으로 0.715 mm 이하 입도에서는 유기성 오니 회분이 거의 없으므로 전형적인 마모에 의한 입자 크기 감소와 마모 입자의 비산유출로 해석될 수 있다.

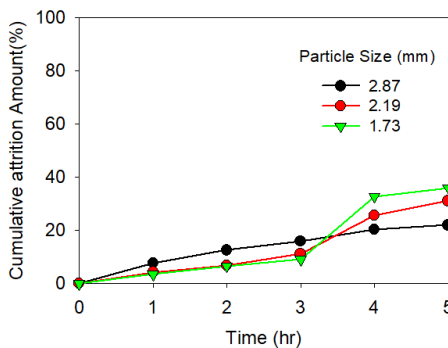


Fig. 4. Attrition rate of organic sludge ash according to particle size in a fluidized bed(I.D. 1½ inch).

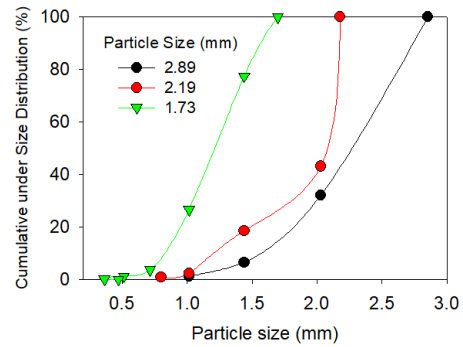


Fig. 5. Cumulative particle size distribution of in-bed organic sludge ash after 5 hr fluidization(I.D. 1½ inch).

러한 특성은 그림의 평균입도에서도 나타난다. Fig. 6의 평균 입경은 충물질인 모래를 제외한 2.87 mm 입경의 초기 유기성 오니 충전물의 평균입경을 측정한 결과이다. 시간에 따라 평균입도는 1시간 이후 거의 일정한 상태를 나타내고 있으며, 마모에 의하여 양은 감소하고 있으나 입도는 유사한 것을 알 수 있다.

이러한 입도의 변화는 Fig. 7의 누적분포로 알 수 있다. 1시간 이후 입도분포는 일정하게 나타나고 있으며, 이는 발생한 마모(attrition)가 파쇄(fragmentation)가 아닌 입자간의 마찰(abrasion)에 의하여 전체적으로 감소되는 것을 알 수 있다.

마모에 의하여 충내 물질이 감소하고 입도가 감소되는 경향은 Eq. (1)과 같이 충내의 압력강하는 축방향 밀도에 비례하며 일정한 축방향 간격에 존재하는 입자와 유동화 기체의 밀도차와 공극율에 의하여 나타난다. 따라서 압력요동 신호로부터 유동층을 해석하고자 평균압력과 압력요동의 표준편차를 측정된 압력신호로 계산하였다[11].

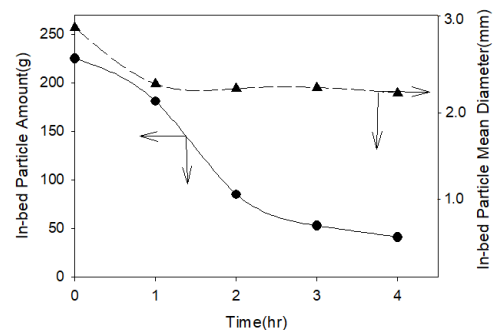


Fig. 6. The residual amount of particles in the fluidized bed and the average particle size of the residual particles(I.D. 4inch)

$$\Delta P = (1 - \epsilon_f) \Delta H(\rho_s - \rho_g) \quad (1)$$

여기서, ΔP : 압력강하, ϵ_f : 유동화상태 공극율, ΔH : 축방향 높이 차이, ρ_s : 유동화입자 밀도, ρ_g : 유동화기체 밀도

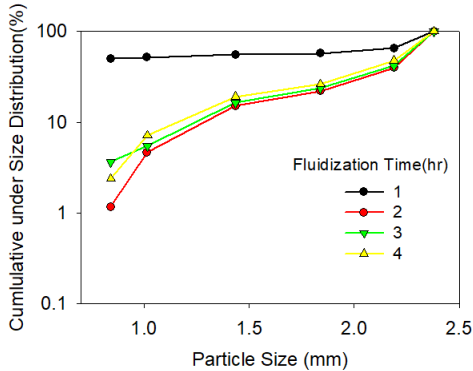


Fig. 7. The particle size distribution of residual particles in a fluidized bed(I.D. 4inch).

Fig. 8에 시간에 따른 유동층의 분산판으로부터 축방향 높이에 따른 평균압력을 측정하여 나타내었다. Fig. 8에서 유동층 운전 개시 후 시간에 따라 압력이 감소하는 값을 나타내고 있다. Eq. (1)과 같이 층내 물질 양이 압력강하를 나타내고 있다. 유동층 축방향 압력은 분산판에서 축방향 높이에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 동일 축방향 위치에 따른 압력강하 감소는 층물질의 감소를 나타내며, 증가는 층물질 증가 또는 치밀도 증가를 의미한다[12]. 그림의 감소는 입자 마모에 의하여 유출되어 층내 물질이 감소되어 나타나는 현상이다. 또한 감소값

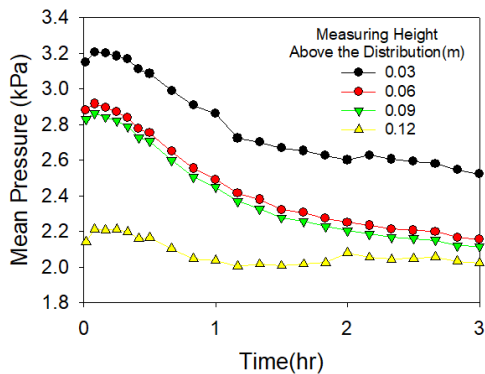


Fig. 8. The mean pressure profile according to operation time in a fluidized bed(I.D. 4inch).

의 경우 분산판으로부터 0.03 m 위치가 가장 크게 나타나고 있으며 0.12 m의 경우는 미비한 값을 나타내고 있다. 이는 마모에 의하여 입경이 작아진 입자가 층상부에 체류하여 치밀도 증가로 나타나는 현상이다. Eq. (1)과 같이 축방향 두 지점간의 압력차를 이용하여 층내를 해석하기 위하여 축방향으로 구간에 따른 압력 강하를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9에서 구간에 압력값이 상승과 감소를 나타내고 있다. 층전체에 해당되는 0.03~0.12 m 구간은 감소를 나타내며, 층하부인 0.03~0.06 m, 0.03~0.09 m는 증가를 하고 있으며, 0.06~0.09 m, 0.06~0.12 m 구간은 감소를 나타낸다. 이는 0.03 m 이하의 영역에 존재하던 2.28 mm 입경 유기성오니 회분이 마모되면서 상부로 이동하여 나타나는 현상으로 이러한 이동은 층내 공극율을 변화시키고 공극율은 기포 분율을 변화시켜 일어나는 현상이다. Eq. (2)에 압력강하에 영향을 미치는 공극율은 기포 분율과 최소유동화 상태 공극율로 나타낼 수 있으며, 균일입자경 모래와 유기성 오니 회분으로 이루어진 계의 밀도는 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다. 모래와 유기성오니 회분의 밀도 차이는 0.3 g/cm^3 으로 나타내므로 입도에 따른 기포 분율이 압력강하에 더욱 큰 영향을 미치게 된다. Eq. (4)의 기포분율은 Eq. (5)의 무차원 항력에 영향을 받게 된다. 따라서 마모에 의하여 층내 평균 입경이 감소되고 공극율이 감소하며, 입자치밀도가 증가하여 압력강하가 감소되는 현상을 나타내게 된다 [12,13].

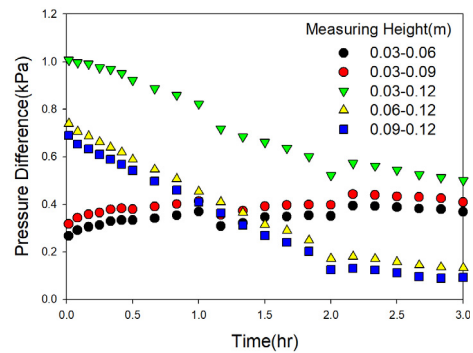


Fig. 9. The Pressure difference according to axial bed height in a fluidized bed(I.D. 4inch).

$$(1 - \epsilon_f) = (1 - \delta) (1 - \epsilon_{mf}) \quad (2)$$

$$\rho_s = \rho_{sand} X_{sand} + \rho_{sludge\ ash} X_{sludge\ ash} \quad (3)$$

$$\delta = 0.11 (F^* - 1)^{0.34} \quad (4)$$

$$F^* = \frac{Re}{\epsilon_{mf}\phi Ar} \left[150 \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\epsilon_{mf}} + 1.75\phi Re \right] \quad (5)$$

여기서, δ : 기포분율, ϵ_{mf} : 최소유동화상태 공극율, F^* : 무차원항력계수, ϕ : 입자 구형도, Ar : Archimedes number, Re : particle Reynolds number

기포 분율과 크기 및 빈도의 변화는 압력요동의 표준편차로 알 수 있으며, 이러한 변화를 Fig. 10의 압력요동의 표준편차가 조업과 동시에 급격히 감소되며, 이러한 현상이 Fig. 6의 평균 입경 변화와 시간대별로 일치함을 알 수 있다.

따라서 유동층에서 유기성오니는 유동층에서 주입과 동시에 급격한 마모가 발생되어 유동층연소소에서 전량이 배출가스에 동반하여 유출될 수 있는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 측정되지 않은 순환유동층의 사이클론에서의 마모율과 높은 유동화속도를 고려하면 입자평균 체류시간 이내에 회분 전량은 전기집진기에서 포집될 것으로 예측할 수 있다.

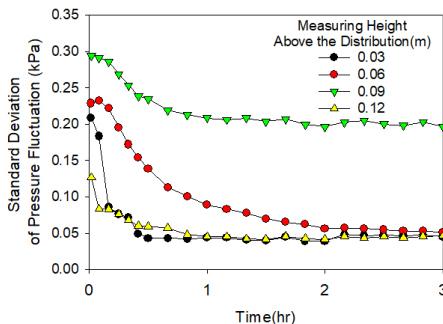


Fig. 10. The standard deviation of pressure fluctuation according to operation time in a fluidized bed.

4. 결론

본 연구에서 유기성 오니의 유동층연소시 회분 배출과 정 해석을 위하여 유동층에서 유동화 현상에 의한 유기성 오니 회분 입자 크기 감소 현상을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

유동화 매질인 주문진 표준사를 사용한 경우 유동화 매질의 마모는 매우 미미하였다

바인더에 의하여 응집 성형된 유기성 오니의 연소 생

성되는 회분의 유동층에서 파쇄는 마모가 주기작으로 작용하며, 유동층 분산판 노즐에서 생성되는 기체 Jet와 입자간 마찰에 의하여 마모가 발생하는 것을 알 수 있다.

본 연구의 낮은 유동화 강도인 $U_o/U_{mf}=2$ 에서 3시간 이내에 80%가 미세입자로 마모 비산유출되었다. 이러한 마모율은 순환유동층에서는 유동화 입자 평균체류시간 이내에 전량 마모되어 연소가스와 동반되어 배출될 것으로 해석할 수 있다.

순환유동층연소소에서 유기성 오니 연소시 주입되는 유기성오니에서 발생하는 회분의 전량이 비산유출되므로 연소가스 오염제어 설비는 유기성오니 회분량을 고려하여 설계 및 조업변수를 설정하여야 한다.

References

- [1] W. Chen, F. Wang and A. H. Kanhar, "Sludge Acts as a Catalyst for Coal during the Co-Combustion Process Investigated by Thermogravimetric Analysis", *Energies*, **10**, pp.1993-200, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en10121993>
- [2] D. Vamvuka, S. Alexandrakakis, M. Galetakis, "Combustion Performance of Sludge From a Wastewater Treatment Plant in Fluidized Bed. Factorial Modeling and Optimization of Emissions", *Front. Energy Res.*, **07**, May 2019.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00043>
- [3] H. T. Jang, S. B. Kim, W. S. Cha, S. C. Hong, D. S. Doh, "Pressure fluctuation properties in combustion of mixture of anthracite and bituminous coal in a fluidized bed", *Korean J. Chem. Eng.* **20**, pp. 138-144, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02697199>
- [4] D. Geldart, "Types of gas fluidization", *Powder Technology*, **7(5)**, pp.285-292, May 1973.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(73\)80037-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(73)80037-3)
- [5] ASTM D5757-95, "Standard Test Method for Determination of Attrition of FCC Catalysts by Air Jets", 2017.
- [6] F. Fulchini, W. Nan1, M. Ghadiri, M. Yazdan Panah, S. Bertholin, B. Amblard, A. Cloupet, T. Gauthier, "CFD-DEM Analysis of Particle Attrition in a Jet in a Fluids", *EPJ Web of Conferences* **140**, pp. 07017, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714007017>
- [7] C. Xiouras, A. A. Fytopoulos, J. H. T. Horst, A. G. Boudouvis, T. V. Gerven, G. D. Stefanidis, "Particle Breakage Kinetics and Mechanisms in Attrition-Enhanced Deracemization", *Cryst. Growth Des.*, **18(5)**, pp.3051-3061, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.8b00201>

- [8] Y. C. Ray, T. S. Jiang, C. Y. Wen, "Particle attrition phenomena in a fluidized bed" *Powder Technology*, **49(3)**, pp.193-206, February 1987.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(87\)80128-6](https://doi.org/10.1016/0032-5910(87)80128-6)
- [9] A. A. K. Farizhandi, H. Zhao, R. Lau, "Modeling the change in particle size distribution in a gas-solid fluidized bed due to particle attrition using a hybrid artificial neural network-genetic algorithm approach", *Chemical Engineering Science*, **155(22)**, pp.210-220, November 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.08.015>
- [10] O. M. Flisyuk, N. A. Martsulevich, "Attrition of Particles in Fluidized Bed Apparatuses", *Russ. J. Appl. Chem.*, **93**, pp.1538-1543, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070427220100080>
- [11] J. S. Bendat, A. G. Pierso, "Random data : analysis and measurement procedures", wiley, 2011.
- [12] J. D. Hazlett, M. A. Bergougnou, "Influence of bubble size distribution at the bed surface on entrainment profile", *Powder Technology*, **70(2)**, pp.99-107, May 1992.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)85038-W](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)85038-W)
- [13] M. Sciażko, J. Bandrowski, J. Raczek, "On the entrainment of solid particles from a fluidized bed", *Powder Technology*, **66(1)**, pp.33-39, April 1991.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(91\)80078-W](https://doi.org/10.1016/0032-5910(91)80078-W)

서 원 태(Won-Tae Seo)

[준회원]



• 2017년 3월 ~ 현재 : 한서대학교
화학공학 전공

〈관심분야〉

환경촉매, 고분자합성, 분리공정

장 준 호(Jun-Ho Jang)

[준회원]



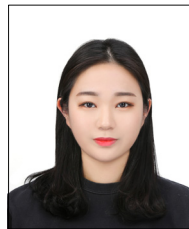
• 2019년 3월 ~ 현재 : 한서대학교
화학공학 전공

〈관심분야〉

분리공정, 에너지전환공정, 환경오염제어

장 윤 영(Yoon-Young Jang)

[준회원]



• 2019년 3월 ~ 현재 : 한서대학교
화학공학 전공

〈관심분야〉

의생명공학, 촉매반응공학, 약물전달체

장 현 태(Hyun Tae Jang)

[종신회원]



• 1989년 8월 : 고려대학교 화학공
학과 (공학석사)
• 1996년 2월 : 고려대학교 화학공
학과 (공학박사)
• 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교
화학공과 교수

〈관심분야〉

분리공정, 유동층반응