

## 제트 마모에 따른 입자의 크기 변화

이 시훈, 김 상돈

한국과학기술원 생명 화학공학과 및 에너지·환경연구센터

## The Change of mean particle size due to jet attrition

S. H. Lee, S. D. Kim

Dept. of Chem. and Bio. Eng. and Energy & Environment Research Center  
KAIST, TaeJön, Korea서론

유동층 반응기는 여러 산업 분야에서 고체의 빠른 혼합, 반응기 전체의 등은 운전, 쉬운 조작성, 열전달의 용이 등의 장점 때문에 널리 이용된다. 특히, 유동층 연소로의 경우, 로내 탈황, 뛰어난 열전달 효과, 높은 연소 효율, 다양한 석탄 이용이 가능하기 때문에 널리 사용된다. 그러나 유동층을 만들기 위해 사용되는 가스는 오리피스나 노즐을 통해 제트를 생성하며, 이 제트는 유동층을 형성하는 고체 입자들을 서로 충돌하게 만들어 입자가 크기를 변화시켜 유동층 내의 입자 특성과 수력학적 특성을 바꾸게 한다. 제트가 존재하는 지역에서 발생하는 입자 마모는 유동층 반응기에서 발생하는 전체 입자 마모에 상당한 양을 차지한다 (Ghadiri et al., 1994). 입자 마모의 중요한 결과는 미세 입자를 생성하는 것이며, 생성된 미세 입자들은 입자 회수 기관, 즉 사이클론 등을 거쳐 다시 유동층으로 주입되지 않고 장치를 벗어나게 되므로, 이는 결과적으로 유동층 물질의 손실로 나타난다 (Werther and Reppenhagen, 1999 and Lee et al., 2000).

유동층의 제트 지역에서 발생하는 입자 마모의 연구는 FCC 촉매의 연구로부터 시작되었다. Forsythe 과 Hertwig (1949) 는 매우 높은 유속의 제트에 견디는 촉매를 선택하기 위해서 제트에 의한 입자 마모를 연구하였다. 이후 유동층에서의 입자 마모 연구는 제트 지역, 기포 유동층, 사이클론 등 유동층 반응기의 대부분 영역에서 시작되었다. 유동층 연소로에서의 마모 현상은 Merrick and Highley (1974) 에 의해서 연구되었으며, Lin et al. (1983), Ray et al. (1987) 등은 모래와 석탄의 혼합물에서의 석탄의 마모 특성에 대해서 연구하였다. Werther 과 Xi (1993) 와 Wu et al. (1999) 등은 다공성 분산판과 한 개의 오리피스를 이용하여 제트 유속에 따른 입자 마모에 대해서 연구하였다. 그러나 국내 무연탄을 사용하는 연소로의 경우, 모래를 사용하지 않고 회재를 충물질로 이용하나 이에 대한 마모 특성의 연구가 전혀 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 국내 무연탄 순환 유동층 연소로에서 충물질로 사용되는 회재를 이용하여 제트 지역에서의 마모에 대해서 연구하였다. 또한 오리피스의 크기를 변화시켜 오리피스의 크기가 입자 마모에 미치는 영향을 연구하였다.

실험

본 연구에는 ASTM D5757-95 에 따른 입자 마모 측정 장치가 사용되었다. 입자 마모 측정 장치는 마모판과 침강조로 구성되어 있다. 마모판은 내경 0.035m, 높이 0.71m 로 되어있으며 침강조는 내경 0.11m, 높이 0.63m 로 제작되었다. 침강조의 하부는 높이 0.23m

의 확장관으로 마모관에 연결되어 있으며, 상부는 높이 0.1m 의 수축관으로 직경 0.034m 의 기체 출구와 연결되어 있다. 기체 출구를 통하여 외부로 비산된 미세 입자들은 삼각 flask 와 thimble filter(28×100mm, Advantec Co.)에서 포집된다. 기체 분산판은 0.38mm hole 이 삼각 형태 (Pitch length: 0.017m) 로 배열되어 있고, 기체 유속은 0.09-0.40m/s로 하였고 MFC (5850EM, Brooks Co.)로 조절하였다. 운전 시간은 ASTM 규정인 5시간으로 하였다. 입자는 국내 무연탄 회재를 이용하였고 Table 1 에 자세한 특성값을 나타내었다. 입자의 평균 크기는 마모 테스트 전, 후에 sieve를 사용하여 측정하였다.

Table 1

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O
Ash [wt%]	53.17	33.77	4.43	0.70	0.76	4.19
Sieve size	Mean Size [μm]		U <sub>mf</sub> * [m/s]		U <sub>i</sub> ** [m/s]	
250-300	260		0.03		1.27	
300-425	325		0.08		2.16	
425-600	513		0.19		3.38	
600-710	655		0.28		4.14	

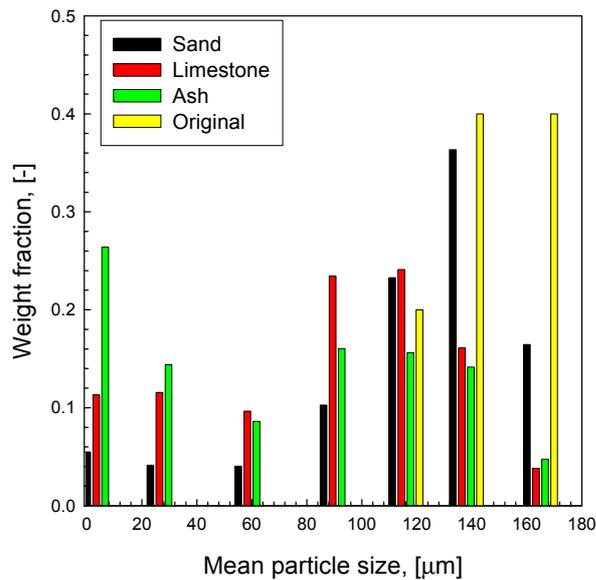
### 결과 및 고찰

ASTM D5757-95를 따른 입자 마모 측정 장치에서 일반적인 유동층 연소로에서 사용되는 층물질인 모래, 석회석과 본 실험에 사용된 국내 무연탄 회재의 제트 마모를 실험하였다. 입자의 마모 특성은 마모 지표 (AI: Attrition Index) 와 수정 마모 지표 (CAI: Corrected Attrition Index) 를 구하여 비교하였다. 마모 지표 (AI(t)) 는 정해진 시간동안의 마모 손실 백분율이며 수정 마모 지표 (CAI(t)) 는 마모 지표 (AI) 에서 초기 층 고체 중에 포함된 미세 분말 무게를 고려하여 보정된 지표이다. 초기 층 고체 중에 보유한 미분을 구분하기 위해서 실험 초기에 일정한 시간동안(1시간) 포집된 비산 고체량을 5시간 동안 비산된 고체량에서 제외하여 계산하였다.

실험에 사용한 입자의 크기는 ASTM D5757-95 에서 규정한 size (180-20μm) 를 만족하는 범위에서 동일하게 만들어 사용하였으며 Table 1 에 나타내었다. 실험 시작 초기 1시간과 그 후 4시간 동안의 비산회재를 포집하였고 총 실험 시간은 5시간으로 하였으며 실험 결과를 Table 3 에 정리하였다. Table 3 에서 보듯이 마모지수는 모래, 석회석, 회재의 순으로 증가한다. Lee et al.(2000)은 유연탄을 사용하는 순환유동층 연소로의 경우, 회재가 거의 발생하지 않으며 모래를 층물질로 사용한다고 하였고 비산회재로 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 따라서 입자 마모에 취약함을 보여준다. 따라서 상용 장치에서 회재를 층물질로 이용하는 경우, 입자의 마모의 영향을 고려해야 한다.

Table 2 Particle size distribution of sand, limestone and ash

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



ASTM 마모 테스트 전, 후의 입자의 분포를 Fig. 3 에 나타내었다. 마모테스트에는 10μm 이하의 입자만이 비산되어 배출되기 때문에 비산된 입자는 10μm이하로 규정하였다. 테스트 전의 입도는 106μm 이상으로 되어있으나, 시험 후의 입도 분포를 보면 모든 입자에서 106μm 이하의 입자가 생성됨을 알 수 있다. 회재의 경우, 10μm 이하의 입도를 가지는 입자가 매우 높게 나왔으며 150-180μm 의 입자의 경우 초기의 입도분포에서 대부분 마모되어 없어짐을 알 수 있다. 이와 반대로 모래의 경우에는 100μm 이하의 입도를 가지는 입자가 0.05 이하로 나왔고 150-180μm 의 입자의 경우 초기의 입도 분포에서 40% 이상 존재하였다.

Fig. Particle size distributions of sand, limestone and ash

Table 3 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

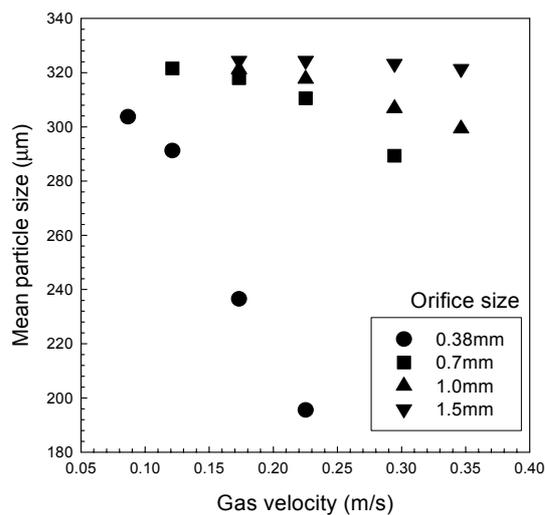


Fig. 2 Relation between gas velocity and mean particle size

유동층 반응기에서의 기체 유속과 5시간의 마모 실험 후의 평균 입자 크기를 Fig. 2 에 나타내었다. 입자로는 300-425μm 의 회재 입자를 사용하였다. 기체 유속이 증가할수록 오리피스에서의 제트 크기와 제트 유속이 증가하기 때문에 유동층을 이루는 고체 입자의 충돌이 빈번히 발생하게 된다. 이는 결국 미세입자를 생성하게 되고 생성된 미세 입자는 비산되어 장치 밖으로 배출되게 된다. 따라서 기체 유속이 증가할수록 미세 입자의 생성과 비산 유출이 증가되고 이는 결국 입도 분포의 변화를 가져오게 된다. 그림에서 보면, 입자크기는 유속이 증가할수록 감소하였으며, 평균 크기가 200μm 까지 변한 것을 볼 수 있다. 일반적으로 제트 마모의 경우 미세 입자의 생성에 따라 초기 입도 분포에서 큰 변화가 없다고 하였으나 (Werther and Reppenhagen, 1999), 제트의 영향이 큰

0.38mm 오리피스에서는 입도 분포가 크게 변한 것을 볼 수 있다.

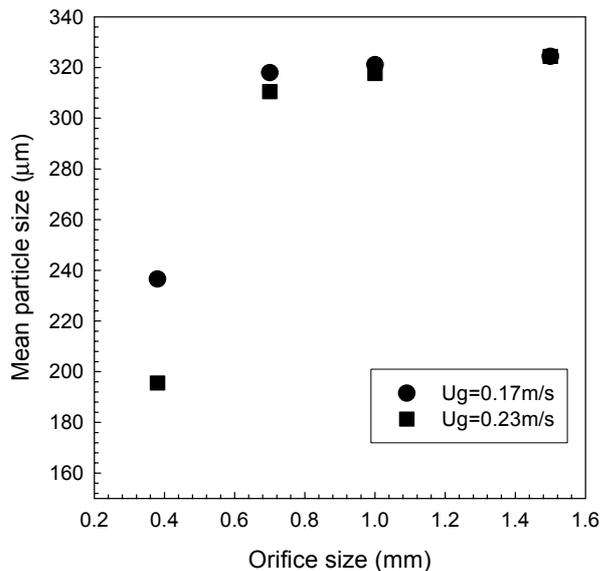


Fig. 3 Relation with orifice size and mean particle size

오리피스 크기가 변하면 동일한 기체 유속에서 제트 유속이 크게 변하게 된다. 동일한 기체 유속에서 오리피스 크기의 변화에 따른 입자 크기 변화를 구하여 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보면 오리피스 크기가 변함에 따라 평균 입자 크기가 증가하게 된다. 이는 오리피스 크기가 커짐에 따라 제트 유속이 작아져서 입자의 충돌이 감소하게 되기 때문이다. 이는 단일 오리피스를 이용한 Werther와 Xi (1993)과 Wu et al. (1999)의 결과에서 보듯이 오리피스의 유속이 증가함에 따라 입자의 마모가 더욱 활발히 발생함을 알 수 있다. 즉 오리피스의 크기가 감소함에 따라 제트 유속이 증가하게 되고 이는 제트 지역에서의 고체 입자의 충돌과 미세 입자의 생성을 증가시킨다. 따라서 유동층을 이루는 고체 입자의 평균 크기가 큰 폭으로 감소하게 된다.

## 결론

ASTM D5757-95에 따른 입자 마모 측정 장치에서 국내 무연탄 회재의 제트 마모에 따른 평균 입자 크기 변화를 측정하였다. 일반적으로 유동층 연소로에서 사용되는 충물질인 모래나 석회석보다 국내 무연탄 회재의 경우, 4배 이상의 fine 입자를 발생시켰으며 이는 국내 무연탄 회재를 이용하는 연소로에서 제트 마모에 따라 입자 크기가 변한다는 것을 나타낸다. 기체 유속이 증가함에 따라 고체 입자의 충돌이 증가하여 미세 입자의 생성이 증가하였으며 이는 평균 입자 크기의 감소를 가져왔다. 오리피스 크기가 증가함에 따라 동일 기체 유속에서는 평균 입자 크기 변화가 감소하였으며, 이는 오리피스 크기의 증가에 따라 제트 유속이 감소한 결과이다.

## 참고문헌

1. M. Ghadiri, J.A.S. Cleaver, V.G. Tuponogov and J. Werther, *Powder Technol.*, **80**, 175 (1994)
2. J. Werther and J. Reppenhagen, *Fluidization solids handling and processing*, Wen-Ching-Yang (Ed.) Siemes Westinghouse Power Corporation, Pittsburgh, Pennsylvania, 435 (1999)
3. S. H. Lee, J. M. Lee, J. S. Kim, J. H. Choi and S. D. Kim, *HwaHak Konhak*, **38**, 516, 2000.
4. W.L. Forsythe, *Indust. Eng. Chem.* **41**, 1200 (1949)
5. D. Merrick and J. Highley, *AIChE symposium series*, **70**(137), 366, 1974.
6. L. Lin and C. Y. Wen, *Powder Technol.*, **27**, 105, 1980.
7. Y. C. Ray, T. S. Jiang and C. Y. Wen, *Powder Technol.*, **49**, 193, 1987.
8. J. Werther and W. Xi, *Powder Technol.*, **76**, 39 (1993)
9. S.Y. Wu, J. Baeyens and C.Y. Chu, *Canadian J. of Chem. Eng.*, **77**, 738 (1999)