

저질탄 활용을 위한 유동층 기술(I)

- 유동층으로 부터의 미세입자 유출 -

최청송* · 김익수 · 조영민 · 도동섭

*시강대학교 화학공학과

고려대학교 화학공학과

(1985년 7월 23일 접수, 1985년 8월 16일 채택)

Fluidized-Bed Technology for Utilization of Low Grade Coal(I)

- Elutriation of Fines from a Fluidized-Bed -

Cheong-Song Choi,* Ik-Soo Kim, Young-Min Cho and Dong-Sup Doh

*Department of Chemical Engineering, Sogang University, Seoul 121, Korea

Department of Chemical Engineering, Korea University, Seoul 132, Korea

(Received 23 July 1985; accepted 16 August 1985)

요 약

유동층 연소로 (6.8cm ID×135cm Height)에서 연소시 입자마멸을 무시할 수 있는 저질탄을 사용하여 유동층으로 부터의 미세입자 유출에 관한 실험을 수행하였다. 분쇄된 저질탄은 분산계수 85%인 Rosin-Rammler 분포를 가지며, 발열량은 약 2,000 Kcal/Kg이다.

유동층으로 부터 미세입자 유출을 예견하기 위하여 지금까지 보고된 여러 상관관계들을 유동층 연소로에서 얻은 실험결과와를 비교하면 많은 차이를 보여주었다. 따라서 본 연구에서는 모래를 유동층으로 하여 실제 유동 연소로와 유사한 조건에서 유출에 관한 실험을 수행하여 보다 응용성 있는 새로운 상관관계식을 제시하였으며 이는 실제 연소계에서 얻은 실험 결과와 잘 일치한다.

Abstract - Elutriation Characteristics of coal fines from a fluidized bed is experimentally investigated in a 6.8cm ID x 135cm height fluidized bed combustor, using a low grade anthracite, which has heating value around 2,000Kcal/Kg and negligible amount of attrition of particles during combustion. The particle size distribution resulting from grinding coal showed Rosin-Rammler distribution with a coefficient of variation 85%.

It was also found that various existing correlations for predicting elutriation of fines from fluidized beds do not properly fit the real data which are obtained from the present study.

Finally, a correlation more applicable to actual systems is presented for the elutriation from fluidized bed by employing sand sample which is similar to real coal in particle size distribution of Rosin-Rammler.

Comparisons between the correlation and experimental data are in good agreement.

1. 서 론

기체-고체 유동층에서 유출현상은 유동층을 이용한 반응기 설계분야 및 실제 응용분야에서 매우 중요한 문제이다. 유동층 반응기에서 미세입자의 유출은 곧 반응기내의 반응물 및 촉매등의 손실이 되며, 이것들은 심각한 대기오염문제를 야기시키기도 한다. 또한 유출로 인한 층내 입자들의 크기분포의 변화는 반응속도를 저하시키는 요인이 되기도 한다 [1]. 특히 유동층 연소로의 경우, free-board로 부터 미세한 탄소입자의 유출은 연소효율을 낮추는 주 원인이 되고 있다 [2]. 이러한 문제점들을 해결 하고자 오래전 부터 유출현상에 대한 연구가 여러 사람에게 의해 계속되어 왔으며, 유출에 관한 많은 관계식들이 제시되었지만 유동층 반응기설계에 직접 응용하기에는 제한성이 따르게 된다. 그 이유로는 첫째, 유동층계의 실험조건에 따라 이들 연구결과로 부터 예견된 값들이 서로 다르며, 둘째, 많은 연구자들 [3, 4, 5, 6]이 실제계에 사용되는 입자크기 분포가 아닌 단일크기 입자 또는 두가지 크기의 입자를 실험에 사용했다는 것, 그리고 셋째로는 대부분의 결과들이 연속적으로 조업되는 것이 아닌 회분계 유동층 [7-10]을 사용했다는 점이며, 드문 예로 연속계에서 이루어졌다 하더라도 제한된 조업조건에서 연구가 수행되었다는 점이다 [2, 11].

따라서 본 연구에서는 연속계 유동층에서 여러크기로 구성된 입자들을 가지고 유동화기체의 속도, 고체입자의 공급속도, 공급되는 고체입자의 크기분포등이 유출에 미치는 영향에 대해 고찰하였으며, 저질무연탄 분쇄시에 일반적으로 표현되는 Rosin-Rammler 분포를 이루는 모래(주분진 표준사) 입자들을 시료로 하여 TDH (transport disengaging height) 이상인 높이의 연속계 유동층에서 유출에 관한 연구를 하여 이 결과를 실제 유동층 연소로에서 얻은 결과와 비교하여 이의 응용가능성을 검토하였다. 그리고, 입자크기분포에 따른 유출관계를 비교·분석하기 위하여 고체입자 크기분포가 정규분포를 이루는 계에 대해서도 연구를 수행하였다.

2. 이론적 고찰

유동층 반응기의 높이가 TDH보다 작지 않은 유

동층에서 종발속도가 유동화기체의 유속보다 작은 미세입자 (d_p)들에 대한 유출속도는 회분계에서

$$-\frac{dW(d_p)}{dt} = E' W(d_p) \quad (1)$$

$$\text{또는 } E = \frac{E' W}{A} \quad (2)$$

와 같이 표현되며, 다중입자(multi-sized particle) 계 연속유동층에서는 다음과 같이 정의된다.

$$E(d_p) = \left[\frac{F_0(d_p)}{F_1(d_p)} - 1 \right] \frac{F_1}{A} \quad (3)$$

그리고, 운전조업변수 및 유동층의 물리적 특성에 따른 미세입자 유출을 예견하기 위한 차원해석은 다음과 같다.

단일입자에대한 momentum balance :

$$-\rho_s \frac{\pi d_p^3}{6} \frac{\partial u_s}{\partial t} = \frac{\pi d_p^3 (\rho_s - \rho_g) g}{6} - C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \frac{(u_s - u_f)^2 \rho_g}{2} \quad (4)$$

관을 흐르는 유체에 대한 momentum balance :

$$\rho_g \frac{\partial u_f}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_f}{\partial r} \right) + \rho_g g \quad (5)$$

유출에 대한 식 :

$$-\frac{dW}{dt} = E A x / (1-x) \quad (6)$$

식 (4)~(6)으로 부터 다음의 관계를 얻을수 있다.

$$\frac{E}{\rho_g (u_g - u_t)} = f \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}, \frac{(u_g - u_t)^2}{g d_p}, \frac{\rho_g (u_g - u_t) d_p}{\mu}, \frac{D}{d_p} \right) \quad (7)$$

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1 과 같다. 압축기에서 나온 공기는 정압기(regulator)를 거쳐서 유량계와 증습기(humidifier)를 지나 유동층으로 공급된다. 증습기는 유동층 내부에서 고체입자와 아

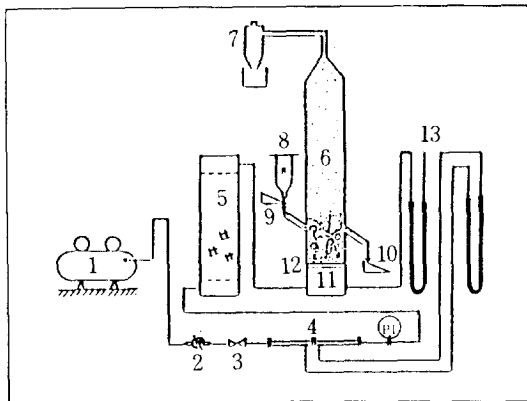


Fig. 1. Schematic diagram of experimental equipment.

- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| 1. Compressor | 7. Cyclone |
| 2. Pressure regulator | 8. Feed hopper |
| 3. Valve | 9. Vibrating feeder |
| 4. Orifice | 10. Vibrating discharger |
| 5. Humidifier | 11. Air box |
| 6. Fluidized bed | 12. Air distributor |
| | 13. Manometer |

크릴관 기벽사이에 생기는 정전기적 인력을 제거하기 위하여 설치하였으며, 내경이 10 cm 이고 높이가 90 cm인 아크릴관에 충전물로써 1.5 cm×1 cm의 원통형 stainless steel망과 물을 넣어서 기포가 발생하도록 하였다. 유동층은 층내의 현상을 거시적으로 관찰하기 위하여 내경이 7 cm인 투명한 아크릴관을 사용했으며, 높이는 미세입자의 유출속도가 일정해지는 높이(TDH) 이상인 140 cm로 하였다. 유동층의 기체분산관(gas distributor)은 유동층내의 고체입자들의 유동현상이 양호한 sintered glass filter를 사용하였다. 고체입자는 hopper에서 내려오는 입자를 진동공급기(vibrating feeder)에 의하여 임의의 양을 연속적으로 층의 내부에 공급할 수 있도록 하였으며, 이때 공급되는 고체의 양은 진동공급기에 공급되는 전압을 변압기로 변화시킴으로써 조절하였다. 고체입자의 배출 역시 진동배출기를 사용하여 변압기에 의해 임의의 양을 조절할 수 있도록 하였다. 그리고 국내 저질탄을 대상으로 최등[12]이 설계제작한 내경 6.7 cm, 높이 135 cm인 연속식 유동층 연소로를 사용하여 실제 연소계에서의 미세입자 유출에 관한 연구를 수행하여 cold run에서 얻은 연구결과와를 비교검토하여 이의 응용성을 확인하였다.

3-2. 시료

실험에 사용된 시료는 진밀도가 2.67 g/cm³, 최소 유동화상태에서의 공극율이 0.495, 구형도 0.658인 시멘트물탈 압축강도 시험용모래인 주문진 표준사이다. 이 표준사를 표준체로 16 mesh부터 140 mesh까지 10 가지 크기로 구분하여 다음과 같은 정규분포와 Rosin-Rammler분포를 만족하도록 혼합하여 시료를 준비하였다.

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(d_p - \bar{d}_p)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

: Gaussian distribution (8)

$$f(r) = na d_p^{n-1} \exp(-a d_p^n)$$

: Rosin-Rammler distribution (9)

$$\text{여기서 } a = \left(\frac{1}{d_{pm}} \right)^n$$

Rosin-Rammler 분포에서는 흔히 표준편차대신 다음과 같은 분산계수(coefficient of variation)를 사용한다.

$$C.V. = 100 \frac{d_{p16} - d_{p84}}{2d_{p50}} = 100 \frac{\sigma}{d_{p50}} \quad (10)$$

여기서 d_{pi} : Gr이 i%에 해당되는 입자의 크기.
혼합된 시료가 각각 정규분포와 Rosin-Rammler 분포를 이루도록 하기 위하여 정규분포는 식(8)에서

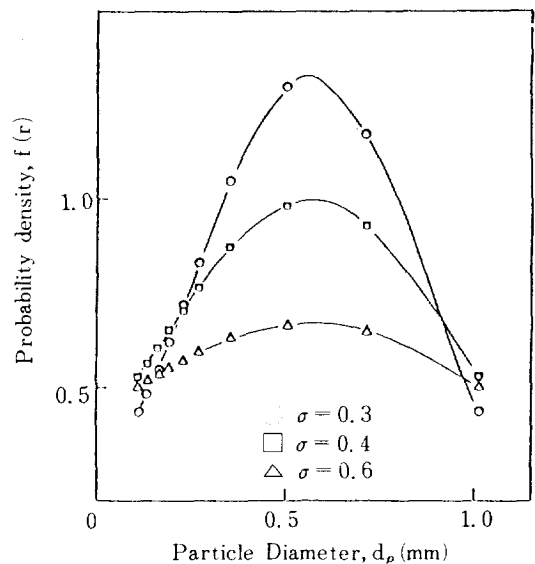


Fig. 2. Particle size distribution(Gaussian).

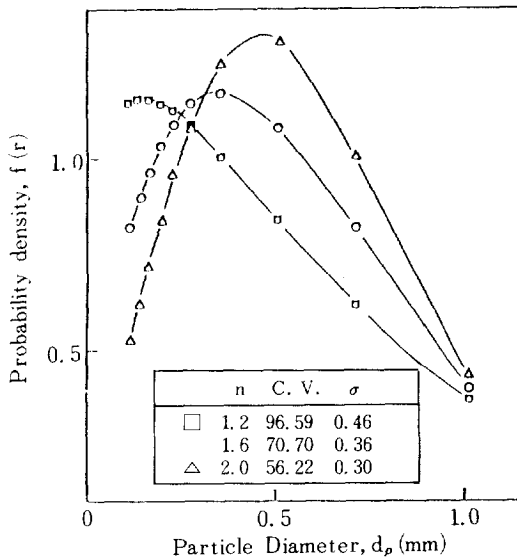


Fig. 3. Particle size distribution (Rosin-Rammler).

$\bar{d}_p = 0.565\text{mm}$ 로 일정하게 놓고 표준편차만 0.3, 0.4, 0.6으로 변화시키며, Rosin-Rammler 분포는 식(9)에서 $d_{pm} = 0.65\text{mm}$ 로 일정하게 하여 n 값만 1.2 (C. V. = 96.59, $\sigma = 0.46$), 1.6 (C. V. = 70.70, $\sigma = 0.36$), 2.0 (C. V. = 56.22, $\sigma = 0.30$)으로 변화시켜 입자들을 준비하였으며, 이들의 분포곡선을 Fig. 2, 3에 나타내었다.

한편, 준비된 각 크기의 입자들이 균일하게 혼합되어 유동층내로 공급될 수 있도록 전체용량이 10L, 회전속도는 최고 60 rpm 까지 조절할 수 있는 twin-shell mixer (V-mixer)를 제작하여 사용했다. 이 혼합기에서의 최적운전조건은 회전속도 30 rpm에서 혼합시간이 30분일때로 나타났는데 그 실험은 다음과 같이 하였다. 앞에서 준비한 각 크기의 입자들을 임의의 분포에 대하여 계산된 무게만큼 크기가 작은 입자부터 혼합기에 차례로 주입한 후 회전시켜, 일정한 시간이 지난 후, 혼합된 입자들을 여러곳에서 약 150g씩 sample을 취하였다. 최초에 혼합기에 넣은 시료의 전체량은 혼합기용량의 40%인 약 6,400g으로 했으며, 회전속도는 30 rpm으로 일정하게 놓았다. 취한 sample들은 다시 각각의 크기별로 sieving하여 다음과 같이 정의된 혼합도(M)에 따라 계산했다.

$$M = \sum_i \sum_j \left(\frac{f_{ij} - f_i}{f_i} \right)^2 \quad (11)$$

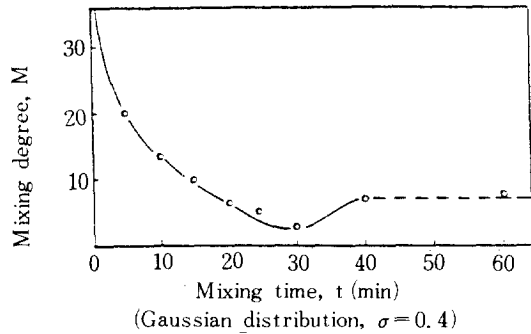


Fig. 4. Mixing degree vs. mixing time in twin-shell mixer.

위와 같은 방법으로 혼합시간을 5분 간격으로 실험을 반복하여 M 을 측정하였다. Fig. 4에 정규분포 $\sigma = 0.4$ 인 경우의 M 값을 표시했는데, 이 그림에서 보듯이 혼합시간이 30분일때 가장 혼합이 잘 된 것으로 나타났다. Rosin-Rammler 분포인 경우에도 정규분포와 M 값의 차이는 약간 있었으나 30분에서 가장 양호한 혼합상태를 보여주었다.

3-3. 실험방법

혼합기에서 각 분포에 따라 혼합된 입자들을 aspect ratio (L/D)가 1.0이 되도록 유동층내에 넣은 다음, 정상상태를 유지하기 위하여 유동화 기체의 유속을 원하는 속도로 맞춘 후, 유동층의 압력요동의 변화를 항상 관찰해서 일정한 범위를 유지할 수 있도록 시료의 공급속도와 배출속도를 조절한다. 정상상태의 운전조건하에서 정해진 시간동안 유출되는 미세입자들을 집진기로부터 분리·회수하고, 배출구로부터 배출되는 입자들도 동시에 회수한다. 유출된 미세입자와 배출된 입자들을 각각 크기별로 체 분석(sieve analysis)하여 식(3)에 따라 유출속도 상수를 계산하였다.

Table 1. Experimental conditions.

Operation variables	Conditions
aspect ratio (L/D)	1.0
gas velocity	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 (m/sec)
solid flow rate	9.5, 19, 38 (g/sec)
particle size	115~1015 (μm)

Table 2. Longitudinal distribution of fines concentration.

	d_p (cm)				
	0.023	0.0194	0.0163	0.0137	0.0115
I (x)	0.045	0.040	0.024	0.009	0.002
II (x)	0.049	0.040	0.029	0.010	0.003

본 실험에서 수행한 실험조건은 Table 1 과 같다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 층 높이에 따른 미세입자 농도의 변화

유동화상태에서 층내의 높이에 따른 미세입자들의 농도변화를 알아보기 위하여 배출구의 높이를 기체분산관으로부터 각각 5 cm와 9 cm 위의 높이에 두 곳을 설치하여 배출되는 입자들의 농도를 분석한 결과는 Table 2에서 보는 바와 같다. 이 때 배출구의 높이 5 cm (Table 2의 I)와 9 cm (Table 2의 II)는 팽창된 층높이 (expanded bed height), H_o 의 각각 0.5와 0.9의 비율이 되는 곳의 높이이며, 여기에서 보는 바와 같이 미세입자들의 농도는 층 높이에 따라 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서 유동층내에서는 완전 혼합이 일어난다고 가정할 수가

있으며, 본 실험에서는 배출구의 높이가 5 cm인 곳에서 입자들을 배출시키며 실험을 하였다.

4-2. 유출속도상수에 대한 입자 크기 분포의 영향

주어진 각 입자분포의 표준편차는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 유출속도상수에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 그러나 회분계 유동층에서는 표준편차에 따라 유출속도상수값이 정규분포에서 $E \propto \sigma^{0.45}$, Rosin-Rammler 분포에서 $E \propto \sigma^{1.65}$ 와 같은 관계를 보여 주었다[13]. 이러한 이유는 연속계 유동층에서는 배출구의 미세입자의 농도가 유출속도상수와 관련이 있기 때문이다. 따라서 회분계 유동층에서 얻은 결과를 연속계 유동층에 직접 응용할 수 없음을 알 수 있다.

4-3. 유출속도상수에 관한 상관관계

유출속도상수, E 에 대하여 영향을 미치는 여러 변수들을 식(7)과 같은 무차원군으로 정리하였다. 본 실험에서는 모래입자들만 사용하였고, 유동층의 내경도 7 cm로 고정하였기 때문에 식(7)에서 $(\rho_s - \rho_g)/\rho_g$ 와 d_p/D 항은 제거될 수 있다. 따라서 상관관계에 나타나는 무차원군들은 유출속도상수가 포함된 무차원군, $E/\rho_g(u_g - u_t)$ 와 $Fr((u_g - u_t)^2/gd_p)$, $Re(\rho_g(u_g - u_t)d_p/\mu)$ 이며, 고체입자의 공급속도에 따른 영향을 고려하기 위하여 이들 외에 고체입자의 평균체류 시간인 \bar{t} 를 첨가하였다.

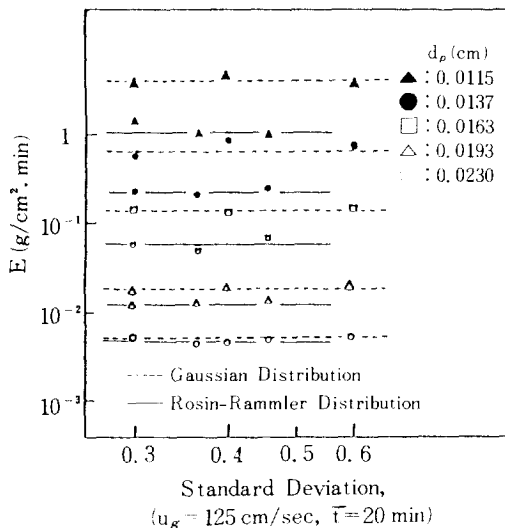


Fig. 5. Effect of standard deviation, σ , on elutriation rate constant.

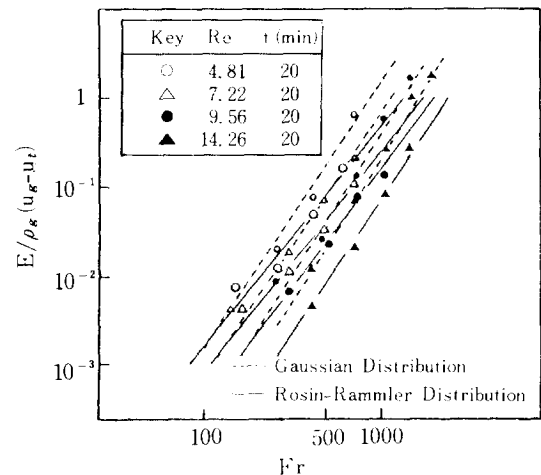
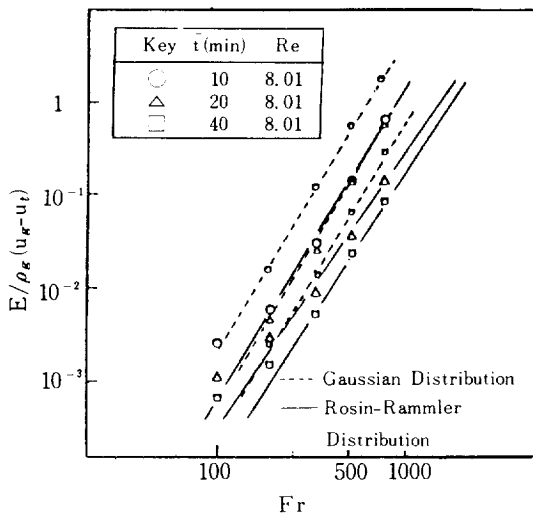


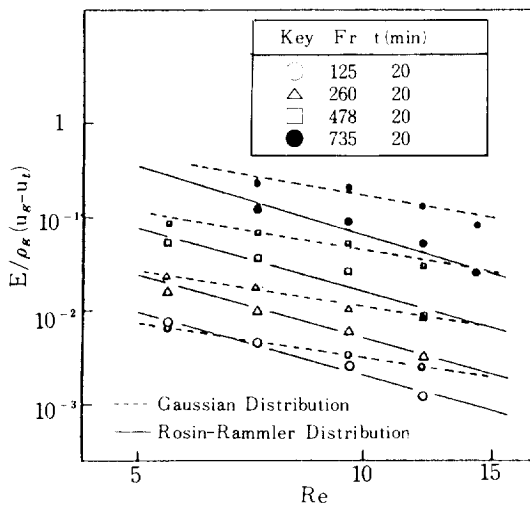
Fig. 6. $E/\rho_g(u_g - u_t)$ vs. Fr .

Fig. 7. $E/\rho_g(u_g - u_t)$ vs. Fr .

4-3-1. Froude No.의 영향

유출속도상수 무차원군, $E/\rho_g(u_g - u_t)$ 의 값을 Fr 의 변화에 따라 도시하면 Fig. 6, 7과 같다. Fig. 6은 평균체류시간, \bar{t} 를 20분으로 고정하고 Re 를 매개변수로 하여 유출속도상수 무차원군을 Fr 의 변화에 따라서 도시한 그림이고, Fig. 7은 Re 를 8.01로 고정하고 \bar{t} 를 매개변수로 하여 도시한 그림이다. 두 경우에 있어서 평균기울기는 Fr 의 약 3승에 비례하며, 정규분포가 Rosin-Rammler 분포보다 조금 크다는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 7에서 보면 평균체류시간, \bar{t} 가 유출

Fig. 8. $E/\rho_g(u_g - u_t)$ vs. Re .

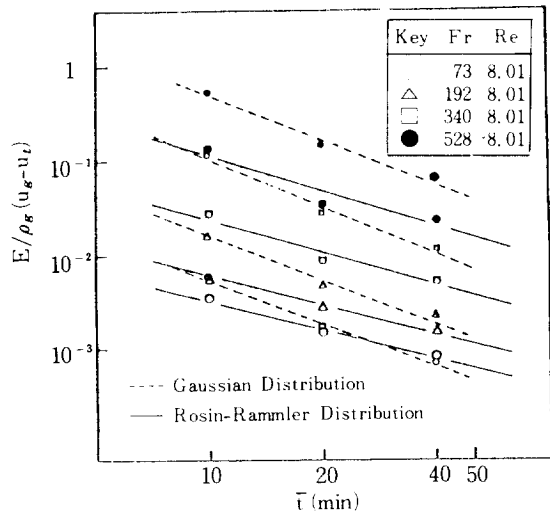
속도상수에 영향을 미친다. 따라서 차원해석에 의해 나온 무차원군, Fr , Re 외에 평균체류시간, \bar{t} 를 상관관계에 첨가해야 한다는 것이 매우 중요한 결과이다.

4-3-2. Reynolds No.의 영향

유출속도상수 무차원군에 대한 Re 의 영향은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 정규분포에서는 -1.41, Rosin-Rammler 분포에서는 -2.02승에 비례하는 것으로 나타났다. 이는 회분계에서의 Wen과 Hashinger[7], Yagi와 Aochi[14] 등이 보고한 결과와는 상반된다. 이러한 이유는 첫째로, 회분계와 연속계에서의 고체입자들의 흐름특성이 다르고 둘째로는, 두가지 크기 입자계와 여러 크기 입자계에서 유출되는 미세입자들의 수력학적 특성이 다르기 때문이다. 특히 여러 크기 입자계라 하더라도 유동층내의 고체입자 크기분포에 따라 미세입자들의 유출특성이 다르므로 이에 대한 전반적인 사항이 정확히 기술되어야 한다.

4-3-3. 평균체류시간, \bar{t} 의 영향

유출속도상수 무차원군에 대한 \bar{t} 의 영향은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 정규분포에서는 -1.47, Rosin-Rammler 분포에서는 -1.12승에 비례하는 것으로 나타났다. 이로부터 평균체류시간, \bar{t} 는 정규분포에 더 많은 영향을 미치며, 평균체류시간이 증가할수록, 즉 고체입자의 공급속도가 작아질수록 유출속도상수값은 감소한다는 것을 알 수 있다. 연

Fig. 9. $E/\rho_g(u_g - u_t)$ vs. t .

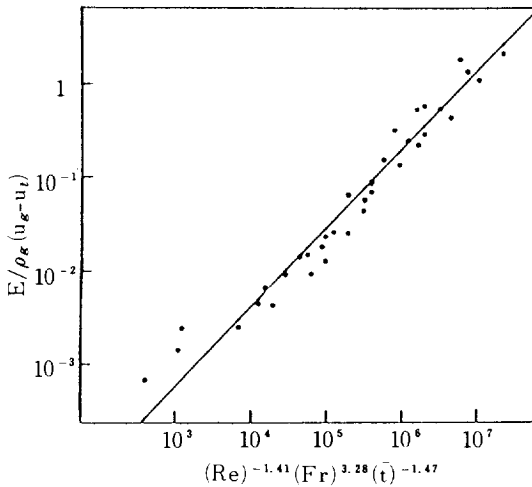


Fig. 10. Correlation of $E/\rho_g(u_g - u_t)$ vs. $(Re)^{-1.41} (Fr)^{3.28} (t)^{-1.47}$ in Gaussian distribution.

속계 유동층에서 유출속도상수가 고체입자의 평균 체류시간에 반비례하는 경향을 나타내는 이유는 평균 체류시간이 짧을 때, 즉 고체입자의 공급속도가 클 경우에는 미세입자의 공급이 보다 더 활발히 일어나므로 freeboard에 존재하는 미세입자의 양이 증가하는 반면에, 평균체류시간이 긴 경우에는 이와 반대현상이 일어나기 때문이다. 이같은 현상은 회분계 유동층에서 뚜렷이 나타난다. 일반적으로 회분계 유동층에서 미세입자유출에 관한 실험결과

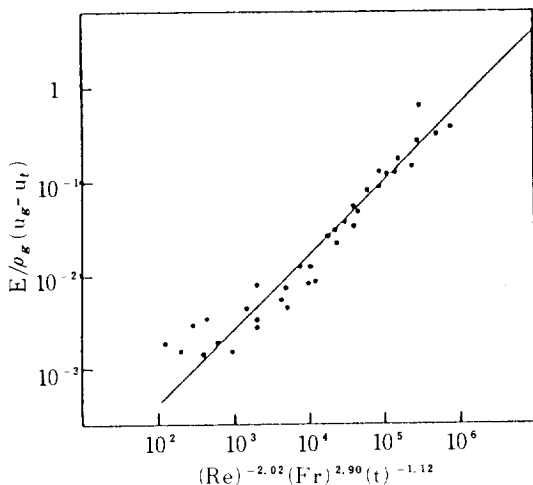


Fig. 11. Correlation of $E/\rho_g(u_g - u_t)$ vs. $(Re)^{-2.02} (Fr)^{2.90} (t)^{-1.12}$ in Rosin-Rammler distribution.

는 Hanesian과 Rankell[8], 장[15] 등이 보고한 바와 같이 미세입자의 농도가 작을수록 유출속도상수가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 최등[10]은 유출속도상수가 유동층내의 미세입자의 초기농도에 비례한다는 사실을 보고한 바 있다. 이러한 결과는 연속계 유동층조작에서의 고체입자의 공급속도에 따른 유출속도상수값의 크기변화와 같은 경향으로 해석할 수 있다.

4-3-4. 총괄 상관 관계식

이상의 결과들로부터 연속계 유동층에서 미세입자의 유출시, 상관 관계분석을 하여 다음과 같은 두개의 관련식을 얻었으며, Fig. 10, 11에 그 결과를 나타냈다.

정규분포에서

$$\frac{E(d_p)}{\rho_g(u_g - u_t)} = 2.41 \times 10^{-7} \left(\frac{\rho_g(u_g - u_t)d_p}{\mu} \right)^{-1.41} \left(\frac{(u_g - u_t)^2}{g d_p} \right)^{3.28} (t)^{-1.47}, (r=0.93) \quad (12)$$

Rosin-Rammler 분포에서

$$\frac{E(d_p)}{\rho_g(u_g - u_t)} = 2.65 \times 10^{-6} \left(\frac{\rho_g(u_g - u_t)d_p}{\mu} \right)^{-2.02} \left(\frac{(u_g - u_t)^2}{g d_p} \right)^{2.90} (t)^{-1.12}, (r=0.94) \quad (13)$$

4-3-5. 유동층 연소로(Fluidized Bed Combustor)에서의 미세입자유출

국내 저질탄의 발열량이 약 2,300kcal/kg 까지는 탄질분의 연소에서부터 집진기에서 회수할때까지 고체입자의 마멸(attrition)을 무시할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 반면에 3,000 kcal/kg 발열량을 갖는 저질탄만 하더라도 입자마멸이 일어나는

Table 3. Operating conditions of coal combustion.

Operation variables	Conditions
air velocity	95cm/sec at 850°C
coal size	44~774 μ m
particle size distribution	Rosin-Rammler, C. V. = 85%
mean residence time	25 min
aspect ratio	1.3
bed temperature	850°C
heating value	2,300 kcal/kg

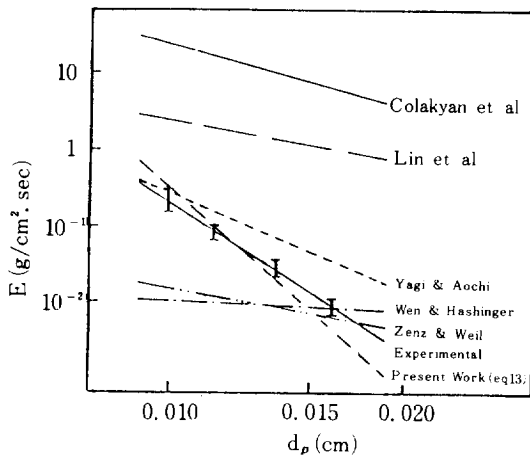


Fig. 12. Experimental result compared with literature correlations.

것이 뚜렷이 감지된다. 이같이 유동층 연소로에서의 입자마멸은 미세입자의 분율을 증가시키는 요인이 되어 주입되는 시료와 배출되는 회분(ash)의 고체입자 크기분포가 틀려지므로 본 연구에서는 연소전·후의 입자크기분포가 거의 일정한 저질탄(약 2,300 kcal/kg)을 사용하여 Table 3과 같은 조건으로 운전되는 유동층 연소로에서 미세입자 유출에 관한 연구를 수행하여 얻은 결과를 이미 발표된 여러 연구자[1, 7, 13, 16, 17]들의 결과와 본 연구에서 얻은 상관관계와를 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 여기에서 보는 바와 같이 식(13)으로 예견된 유출속도상수값들이 실제 유동층 연소로에서 얻은 결과와 매우 근접함을 알 수 있다.

5. 결 론

1. 회분계 유동층으로부터 얻은 결과는 연속계 유동층에는 적용할 수 없다.
2. 연속계 유동층에서 같은 입자크기 분포형태를 갖는 계에서는 표준편차가 유출속도상수에 거의 영향을 미치지 않으나, 입자크기 분포형태가 다르면 유출속도상수에 영향을 미친다.
3. 다입자계 연속식 유동층으로부터의 유출속도상수는

정규분포에서

$$\frac{E(d_p)}{\rho_g(u_g - u_t)} = 2.41 \times 10^{-7} \left(\frac{\rho_g(u_g - u_t)d_p}{\mu} \right)^{-1.41}$$

$$\left(\frac{(u_g - u_t)^2}{g d_p} \right)^{3.28} (\bar{t})^{-1.47}$$

Rosin-Rammler 분포에서

$$\frac{E(d_p)}{\rho_g(u_g - u_t)} = 2.65 \times 10^{-6} \left(\frac{\rho_g(u_g - u_t)d_p}{\mu} \right)^{-2.02}$$

$$\left(\frac{(u_g - u_t)^2}{g d_p} \right)^{2.90} (\bar{t})^{-1.12}$$

와 같이 표현되며, 이들로부터 실제 유동층 연소로에서 미세입자들의 유출관계를 만족스럽게 예견할 수 있다.

감 사

본 연구의 수행을 위하여 연구비를 지원해 준 한국학술진흥재단에 감사를 드립니다.

NOMENCLATURE

- A : cross section area of the fluidized bed, cm²
- C_D : drag coefficient
- dp : particle diameter, cm
- \bar{d}_p : average particle diameter, cm
- dp_m : statistical mean particle diameter, cm
- E : elutriation rate constant, g/cm²·sec
- E(dp): elutriation rate constant for particles of size dp, g/cm²·sec
- f_i : initial fraction of particles of size i
- f_{ij} : fraction of particles of size i from jth sample
- f(r) : probability density function
- F_o(dp): feed rate of particles of size dp to the bed, g/sec
- F_t : total out flow rate of particles, g/sec
- F_t(dp): outflow rate of particles of size dp, g/sec
- G_r(r): Weight percent of oversize in Rosin-Rammler distribution
- r : correlation coefficient
- t : time, sec
- \bar{t} : mean residence time, min
- u_f : fluid velocity, cm/sec
- u_g : superficial gas velocity, cm/sec

u_s : particle velocity, cm/sec
 u_t : terminal velocity of solid particle, cm/sec
 w : weight of all solids in the bed, g
 $w(dp)$: weight of solid of size dp , g
 x : fines concentration in fluidized bed

Greek letters

ρ_g : gas density, g/cm³
 ρ_s : solid density, g/cm³
 μ : viscosity of gas, g/cm. sec
 σ : standard deviation

REFERENCES

1. Zenz, F.A. and Smith, R.: Hydrocarbon Processing, **2**, 103 (1972).
2. Bachovin, D.M., Beer, J.M. and Sarofim, A.F.: *AIChE Symposium Series*, **77**, 76 (1981).
3. Leva, M.: *Chem. Eng. Prog.* **47**, 39 (1951).
4. Osberg, G.L. and Charlesworth, D.H.: *Chem. Eng. Prog.*, **47**, 566 (1951).
5. Lewis, W.K., Gilland, E.G. and Lang, P.M.: CEP Symposium Series, **58**, 65 (1962).
6. Thomas, W.J., Grey, P.J. and Watkins, S.B.: *British Chem. Eng.*, **6**, 176 (1961).
7. Wen, C.Y. and Hashinger, R.F.: *AIChE J.* **6**, 220 (1960).
8. Hanesian, D. and Rankell, A.: *I&EC Funds.*, **7**, 452 (1980).
9. Guha, S.K., Kumar, A. and Sen Gupta, P.: *Can. J. Chem. Eng.*, **50**, 67 (1972).
10. Choi, C.S., You, K.P. and Chang, H.D.: *KJChE.*, **2**, 197 (1985).
11. Tanaka, I., Shinohara, H. Hirose, H. and Tanaka, Y.: *J. of Chem. Eng. of Japan*, **5**, 51 (1972).
12. Choi, C.S., Park, J.H. and So, C.S.: *HWA HAK KONGHAK*, **24**(1) (1986).
13. Choi, C.S.: Unpublished data.
14. Yagi, S. and Aochi, T.: Paper presented at the society of Chemical Engineer (Japan) Spring Meeting (1955).
15. 장희동, 석사학위논문, 석강대학교 (1983).
16. Colakyan, M., Catipovic, N., Jonenovic, G. and Fitzgerald, T.: AIChE 72nd. Meeting, San Fransisco (1979).
17. Lin, L., Sears, J. T. and Wen, C.Y.: *Powder Tech.*, **27**, 105 (1980).