

밀도차가 있는 이성분 입자계 유동층에서
체류시간분포를 이용한 혼합특성 해석

조주완, 장현대, 홍성창*, 도동섭
고려대학교 화학공학과, *경기대학교 환경공학과

The Analysis of Mixing Characteristics of Different
Density Binary System Using the RTD in a Fluidized Bed

J. W. Cho, H. T. Jang, S. C. Hong*, D. S. Doh
Dept. of Chem. Eng. Korea University
* Dept. of Environ. Eng. Kyounggi University

1. 서론

유동층에서 입자들은 기포에 의한 뛰어난 운동성을 가지고 있으며 이러한 이유로 우수한 열전달, 물질전달, 및 혼합특성을 보여준다. 때문에 유동층은 비료나 플라스틱 산업, 가연성분을 함유한 폐기물소각등에 걸쳐 다양하게 이용되고 있다. 최근에는 종류가 다른 두 물질의 혼합연소에 대한 연구가 활발하게 전개되고 있다. 결국 이러한 유동층의 조업에 있어 혼합특성은 조업조건에 중요한 요인이 된다.

이성분 입자계의 혼합도는 입자의 크기, 밀도, 및 함량에 따라서 크게 변화한다. 이러한 물성차이에 기인하는 분리도(segregation)가 혼합을 저해하는 주요한 요인으로 생각된다. 일반적으로 유동층에서 층상부로 분급되려는 입자를 flotsam이라하며 층하부로 분급되려는 성질을 가진 입자를 jetsam이라 한다. 그리고 flosam의 부피비가 50% 이상인 경우를 flosam rich system이라 하며 jetsam의 부피비가 50% 이상인 경우를 jetsam rich system이라 한다. 이제까지 여러 연구자[1,2,3]에 의하여 이성분계의 혼합에 대한 연구가 이루어져왔고 혼합도에 영향을 미치는 여러인자들 영향을 수식화하기 위한 작업도 계속 연구중이다. Nienow등[4]은 이성분계에서 상대적으로 작은 flosam rich system에서 유속, 밀도, 입자분율, 층높이, 최소유동화속도에 따른 혼합도의 경험식을 제안하였고, Chiba 등[5]은 이성분계에서 pressure drop propile을 이용하여 혼합도를 측정하였다.

본 실험에서는 밀도차와 크기 및 유속에 따른 평균체류시간 특성을 이용하여 혼합에 영향을 주는 요인과 이로부터 혼합도를 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 C(θ)-curve와 E(θ)-curve

입자의 수를 채취한 시료의 양으로 나누어 그 값을 임의의 농도로 한 후 정규화하여 C-curve를 얻었다. 이를 다음과 같이 무차원화 할 수 있다.

$$\theta = \frac{t}{t_e} \quad d\theta = \frac{dt}{t_e} \quad (1)$$

$$C_{\theta} = \overline{t_e} C \quad F_{\theta} = \int C_{\theta} d\theta \quad (2)$$

2.2 세기함수, $\lambda(\theta)$

C-curve나 F-curve로 부터 쉽게 발견될 수 없는 dead-space나 우회 등의 비이상 흐름의 존재와 혼합특성을 설명하는데 세기함수, $\lambda(\theta)$ 가 자주 사용되어 왔다. $\lambda(\theta)$ 는 (3)식과 같이 정의 되는 것으로서 본 실험에서는 C-curve를 적분 하여 F-curve를 얻고 이것으로 (4)식과 같이 계산하였다.

$$\lambda(\theta) = \frac{C(\theta)}{I(\theta)} \quad (3)$$

$$\lambda(\theta) = \frac{C(\theta)}{1 - F(\theta)} \quad (4)$$

반응기가 완전 혼합인 경우 $\lambda(\theta)$ 의 값은 1에서 일정하여지며 dead space가 있을 때는 감소, 피스톤 흐름의 성질이 있는 경우 증가하게 된다.

2.3 Space time(τ)과 Mean residence time($\overline{t_e}$)

본 실험에서 이론적인 평균체류시간을 계산하는데 무게의 비로서 나타낸 것은 유동층의 부피를 측정하기 어렵고 이것을 기준으로하는 고체의 volume flow rate를 설정하기 불가능하기 때문이다[6].

$$\tau = \frac{W}{Q(t)} \quad (5)$$

W : bed material weight corresponding to bed volume [g]

Q(t) : feeding rate[g/sec]

$$\overline{t_e} = \frac{\int_0^{\infty} t C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \approx \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (6)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험에서 사용한 장치는 Fig.1과 같으며 유동층부, 시료유입부, 시료배출부로 구성되어 있으며 15마력의 공기 압축기를 이용하여 유동층에 공기를 공급하였다. 유동층에 공기가 유입되기 전에 유입공기의 damping을 막고 불순물을 제거하기 위하여 정압기와 공기 정화기를 설치하였고, 유속은 유량계(Dwyer Inc., 1-7liter/min)와 밸브를 이용하여 조절하였다. 유동층 기벽과 입자간 및 입자 상호간의 정전기현상을 줄이기 위하여 증습기를 설치하여 상대습도를 50%로 유지하여 유동층에 공급하였으며, 시료 입자들에 정전기 방지제를 미리 첨가하여 유동층에 주입하였다.

시료의 유입은 주입 속도가 균일하고 입자의 마모가 적은 spring screw feeder, 시료의 배출은 배출 속도 조절이 용이한 vibrating discharger가 사용되었다.

3.2 시료

본 실험에 사용한 시료는 jetsam으로는 시멘트 몰탈 압축강도 시험용 모래인 주문진 표준사($\rho_p=2620\text{kg/m}^3$)가 사용되었고, flotsam으로 PMMA($\rho_p=1190\text{kg/m}^3$)가 사용되었다. 사용한 추적자는 모래와 PMMA를 Dupon't red와 blue로 착색한 것이다. 시료특성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The properties of sample particales.

	$d_p(\text{mm})$	U_{mf}	ϵ_{mf}	Φ
Sand	0.715	0.36	0.48	0.67
PMMA	1.545	0.445	0.51	0.49
PMMA	0.715	0.262	0.59	0.53
PMMA	0.359	0.099	0.66	0.47

3.3 실험방법

실험은 두 입자를 일정유속으로 각각 주입하여 L/D가 1이 되도록 유지시키며 층의 부피조성이 일정하도록 유지하여 유동층이 정상상태에 도달할때 모래와 PMMA 추적자를 충격법으로 공급하고 동시에 배출되는 시료를 일정 시간 간격으로 채취하여 추적자의 농도를 측정하였다. 한편 유동층의 연속조업에서 층의 높이에 따른 조성의 변화를 보이기 때문에 정상상태의 조업조건을 유지하기 위해 Fig. 2와 같이 각 조건에 따른 단베드(slice-bed) 실험자료에 기초하여 층내부의 평균조성과 같아지는 높이에서 배출부의 위치를 정하였다.

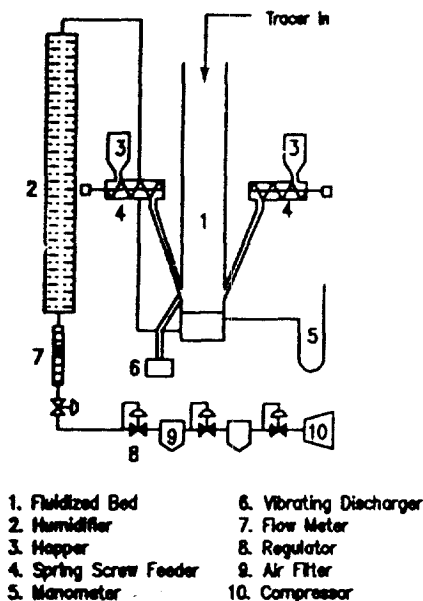


Fig. 1. Experimental Apparatus.

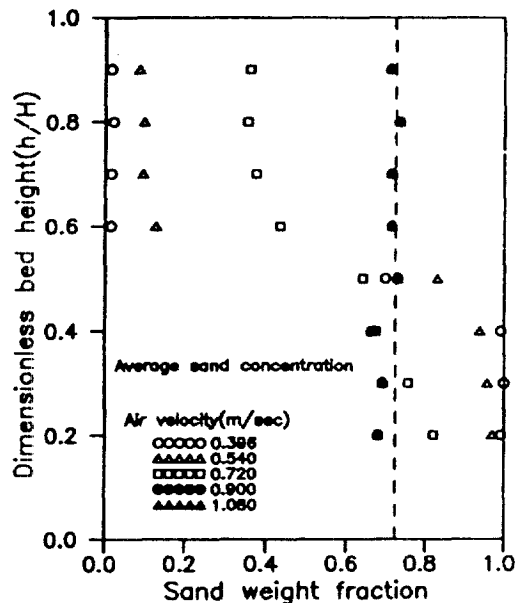


Fig. 2. Typical diagram of sand concentration with axial bed height(sand ; 715 μm , 50 Vol%, PMMA ; 715 μm , 50 Vol%).

4. 결과 및 고찰

실험으로부터 Fig. 3과 Fig. 4의 결과를 얻을 수 있었다. 세기함수로부터 본 실험에 사용한 반응기가 거의 이상적인 거동을 함을 잘 알 수 있으며 각 조성과 유속 및 입자 크기에 따른 모래와 PMMA의 평균 체류시간에 차이를 나타내고 있다. 만약 이상적 반응기에서 완전히 혼합되고 있다면 각 성분의 평균 체류시간은 동일한 값에 근접해야만 할 것이다. 그러나 실제 차이를 보이고 있다면 이는 분리현상에 의한 것으로 사려되며, 결국 각 성분의 평균 체류시간의 차이의 정도로부터 혼합특성을 예측할 수 있음을 보여준다.

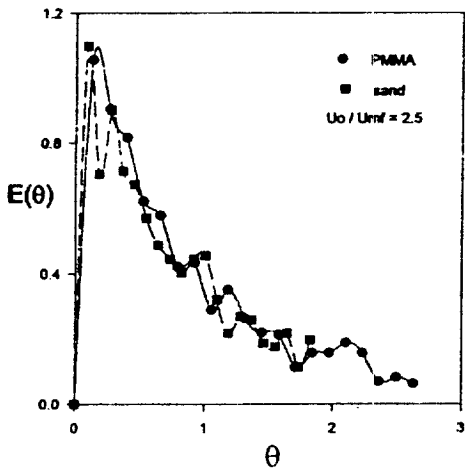


Fig. 3. Typical experimental $E(\theta)$ curves

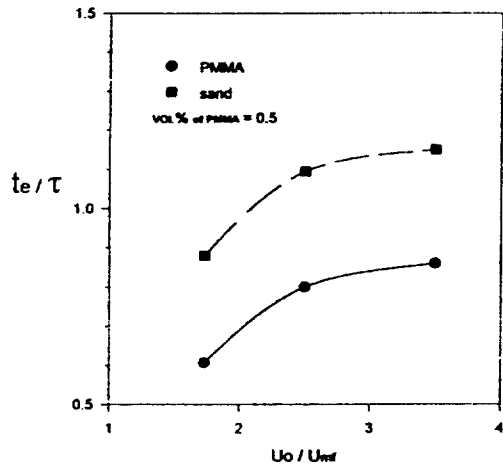


Fig. 4. Influence of the gas velocity on the value of mean residence time.

4. 참고 문헌

1. Cheung, L., Nienow, A. W. and Rowe, P. N., : *Chem. Eng. Sci.*, 29, 1301(1974).
2. Chyang, C. S., Kuo, C. C. and Chen M. Y., : *Can. J. Chem. Eng.*, 67, 344(1989).
3. Kumar, A. and Sen Gupta, P., : *Indian J. Technol.*, 12, 225(1974).
4. Nienow, A. W., Rowe, P. N. and Chiba, T., : *AIChE Symp. Ser.*, 74, 45(1978).
5. Chiba, S., Chiba, T., Ninow, A. W. and Kobayashi, H., : *Powder Technol.*, 22, 255(1979).
6. Mayrhofer, B. and Neuzil, L., : *Collection czechoslov. Chem. Commun.*, 42, 1502(1977).