

고-액 충전유동층에서 고체 입자의 축방향 혼합에 관한 연구

崔 益 綬* · 姜 雄 基

*한국과학기술 정보센터

고려대학교 이공대학 화학공학과

(접수 1976.3.20)

A Study of longitudinal Particle Mixing in a Screen-Packed Liquid-Solid Fluidized Bed

Ik Soo Choi* and Woong Ki Kang

*Korea Scientific & Technological-Information Center, Seoul 131, Korea
and

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

(Received March 20, 1976)

요 약

본연구에서는 고-액유동층에 원통형금당을 충전시켜 유동층의 높이에 따른 농도의 변화를 고찰함으로써 분산모델의 성립여부를 규명하였다. 연구결과에 의하면 충전물이 있을때는 분산모델이 성립하며 그때의 축방향분산계수는 유동층확장(fluidization bed expansion)과 다음과 같은 관계식이 있음을 알았다.

$$D(cm^2/sec) = 4.2 \left(\frac{V}{V_{mf}} - 1 \right)^{2.1}$$

Abstracts

In this investigation, the longitudinal mixing in a liquid-solid fluidized bed packed with screen cylinders were studied and compared with an unpacked bed. The experiments were carried out by employing a tracer method; the fluidized solids and the tracer were monazite and magnetite sands,

respectively. The result showed that the dispersion model could be applied for the packed fluidized bed, whereas the model could not be applied for the unpacked fluidized bed, and the relationship between the longitudinal dispersion coefficient in the packed bed and the expansion of the bed is given by the following equation:

$$D(\text{cm}^2/\text{sec}) = 4.2 \left(\frac{V}{V_{mf}} - 1 \right)^{2.1}$$

1. 서 론

고—액계에서 유동현상에 관한 연구는 1921년 Jean¹⁾의 속도인자의 연속성연구를 시발점으로 해서 Kennedy와 Breffon²⁾는 최소유동속도의 1.4~4배사이에서 혼합계수변화에 대하여 연구했으며 Handley³⁾등은 고체입자들의 흐름현상과 속도 성분 분포에 관하여, Carlos와 Richardson^{4,5)}은 표면유체속도가 증가함에 따라서 입자들의 평균 속도변화에 대해서, 大山과 綾木^{6,7)}는 수평회전 통형 혼합기에서 입자들의 혼합에 관해서 비교 검토했으며 殿岡과 井上⁸⁾은 평균유속, 충전고, 충전물의 대표경의 변화시 모델간의 관계에 대하여 연구했으며 이러한 연구는 많이 보고되어 있다⁹⁻¹¹⁾. 그리고 최근에는 Furzer와 Michell¹²⁾은 二相系에서 N_{Re} 와 N_{Pe} 를 비교검토하였으며 Ramamutty와 Subbrazu¹³⁾는 입자의 크기에 따라서 유동충확장변화와 혼합속도에 관하여 연구했다. 이밖에 유동층내에서 고체입자들의 혼합에 관한 연구는 상당히 많이 있다¹⁴⁻¹⁶⁾.

유동층내의 변동을 감소시키고 고체입자들의 편재유동을 막기 위하여 쓰여진 충전물로는 여러가지가 있는데¹⁷⁻²⁰⁾ 원통형 금망충전물이 부피의 5%밖에 차지하지 않아서 효과가 크다고 Sutherland²¹⁾등이 밝혔다. 이밖에 원통형 금망 충전물의 효과에 관해서는 Osberg와 Tweddle²²⁾등이 기—고체충전 유동에서 기포가 커지는 현상이 적음을 밝혔고 Capes와 McIlhinney²³⁾는 이 충전물이 다른 어떤 충전물보다 혼합현상을 거의 균일하게 한다고 했으며 이에대한 연구는 Richardson과 Zaki²⁴⁾등에 의하여 재현되었다.

본 연구에서는 고—액계 원통형금망충전유동층에서 고체입자들의 혼합을 Tracer 기법으로 실험하여 분산모델과 비교검토하였다.

2. 이론적 모델

Fig. 1은 이론적 모델을 나타낸 것이며 그방정식은 다음과 같다.

Tracer impulse

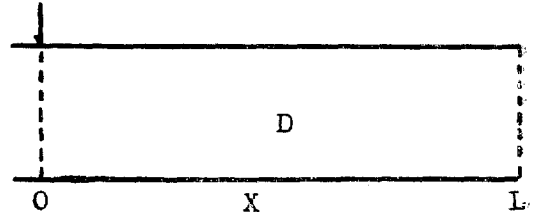


Fig. 1. Theoretical model.

$$D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial C(x, t)}{\partial t}$$

boundary conditions

$$C(x, 0) = \delta(x) \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \text{ for } t > 0 \quad (3)$$

Boundary Value Problem 을 풀면

$$C(x, t) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ (-1)^n \exp \left[-\frac{n^2 \pi^2 D t}{L^2} \right] \cos \frac{n \pi (L-x)}{L} \right\} \quad (4)$$

dimensionless variable $x' = \frac{x}{L}$ 로 바꾸어 정리하면

$$C(x', t) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[-\frac{n^2 \pi^2 D t}{L^2} \right] \cos n \pi x' \quad (5)$$

(5)식에서 exponential term 은 x' 값에 관해 독립 변수이고 $\cos n \pi x'$ 에서 x' 가 $\frac{1}{2}$ 인 경우는 그값이 1이기 때문에 x' 가 0.45~0.55사이에서 $C(x', t)$ 는 x 에 대해서 변화가 적음을 보여주고 있으며

기울기는 $\frac{Dt}{L^2}$ 의 exponential 함수이다.

(5)식에서 $\frac{tD}{L^2}=0.08$ 인 경우 infinite series는 둘째항부터 그 영향이 $4.55 \times 10^{-1} \gg 8.2 \times 10^{-4}$ 이므로 무시될수 있다. 결과식은 다음과 같다²⁵⁾.

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x'}\right)_{x'=1/2} \cong 2\pi \exp\left[-\frac{\pi^2 Dt}{L^2}\right], \text{ for } \frac{tD}{L^2} > 0.08 \quad (6)$$

3. 실험장치 및 방법

상기 실험을 위하여 사용한 장치는 Fig. 2에 표시한 바와 같다.

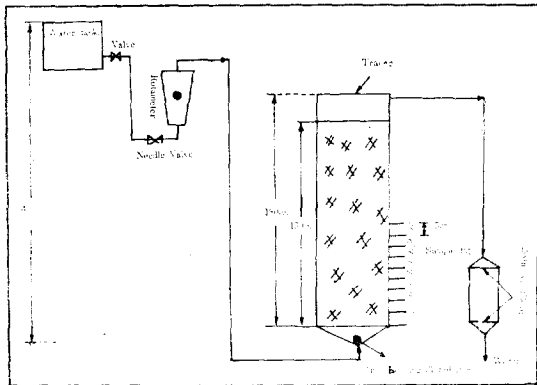


Fig. 2. Flow diagram.

사용한 원통형금망충전물과 sample의 물리적 성질은 다음과 같다.

Table 1. Packing.

Mesh size of screen	Thickness of wire	Dimension of opening	Dimension of screen cylinders
8 mesh screen packing	0.84mm	2.38mm	2cm × 2cm

Table 2. Sample.

	Formula	Molecular weight	Specific gravity	Particle diameter
Magnetite	Fe ₃ O ₄	231.55	4.8	0.104~0.147mm
Monazite	CePO ₄	235.11	5.22	" (100~150mesh)

monazite 2500g을 column에 넣은후 유속은 0.408cm/sec~1.067cm/sec의 범위에서 조절, 유동층의 높이를 실험하고자 하는 높이로 한 다음 Tracer(Magnetite) 250g을 slide plate로 일시에 주입하고 이때 가능한 disturbance를 없도록 했다.

실험유동은 bed의 높이에 따라 40~90초동안 했으면 일정시간이 경과한 다음 유속을 중단하여 bed를 고정시키고 각 tap에서 sampling하여 전조기에서 100°~110°C로 완전히 건조한 후 magnetite를 전자석으로 분리, 농도를 계산하였다. 충전물이 있을때 층의 변동은 액체가 최대 유속일때 0.2%정도였으며 그 평균치를 읽었다.

V_{mf} 의 결정은 bed expansion과 액체유속측정에 의하여 bed가 expansion되기 시작하는 액체 유속을 읽었다.

4. 실험결과 및 고찰

(1) 충전물이 없을때 농도에 미치는 영향.

Fig. 3~5에서 보는 바와같이 충전물이 없을때는 단순한 분산모델의 성립하지않고 expansion이 크면, 클수록 baffle effect가 없어서 wall에서는 fluctuation의 크며, 따라서 각 tap에서 농

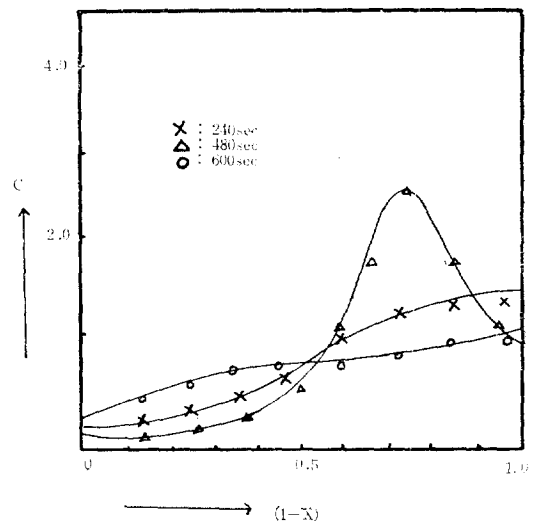


Fig. 3. Typical longitudinal particle mixing curves for an unpacked fluidized bed (Expansion: 2.0).

도가 균일하지 않음을 보여주며 시간에 따른 농도의 변화는 완전혼합에 가까워 지기는 하지만 이론적인 모델을 적용하기 어려움을 알 수 있다.

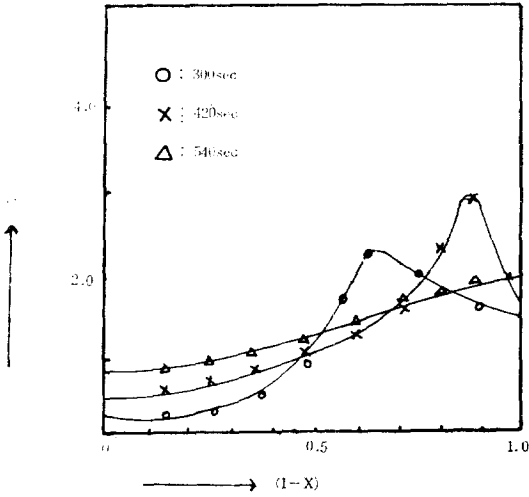


Fig. 4. Typical longitudinal particle mixing curves for an unpacked fluidized bed (Expansion: 2.5).

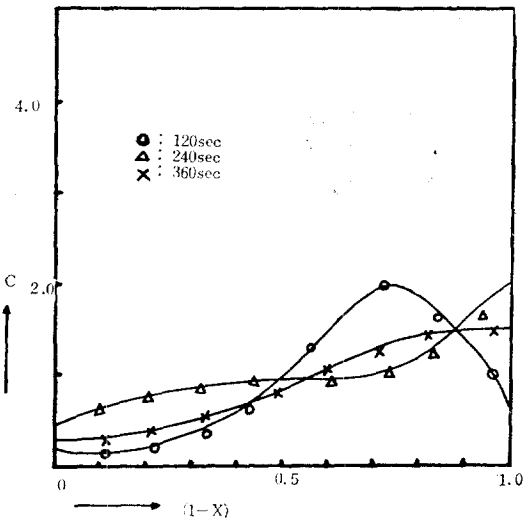


Fig. 5. Typical longitudinal particle mixing curves for an unpacked fluidized bed (Expansion: 3.0).

expansion을 2배, 2.5배, 3배함에 따라 fluctuation은 bed height의 0.5%, 1%, 2%일어났는데 이는 기—고상에서 평균 5%의 fluctuation

보다는 훨씬 적음을 보여준다.

2) 충전물이 있을때 농도에 미치는 영향.

다음 그림에서 보여주는 바와 같이 실험치로 얻은 농도 graph에서 midposition slope에 의하여 얻어진 dispersion coefficient를 대입해서 식 (6)으로부터 계산한 이론치와 실험으로 얻은 값의 농도 profile은 금당충전층에서는 훌륭하게 근접함을 알 수 있다.

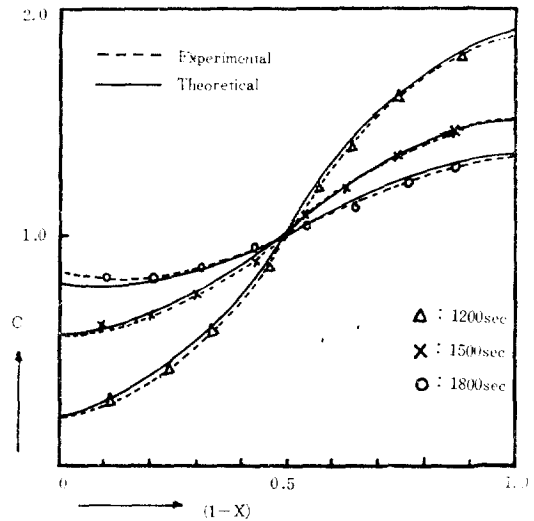


Fig. 6. Typical longitudinal particle mixing curves for a packed fluidized Bed (Expansion: 1.5).

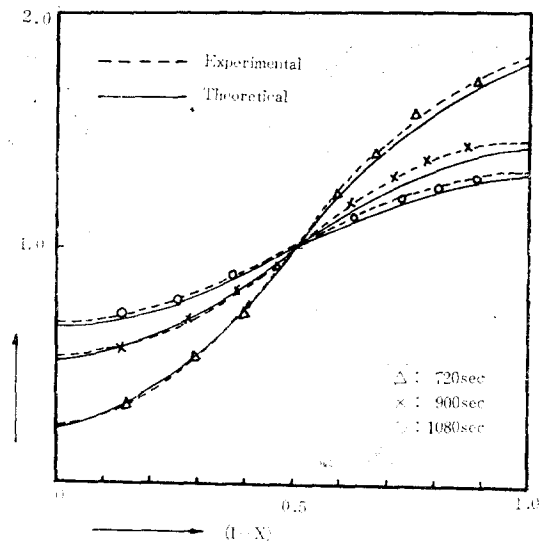


Fig. 7. Typical longitudinal particle mixing curves for a packed fluidized bed (Expansion: 2.0).

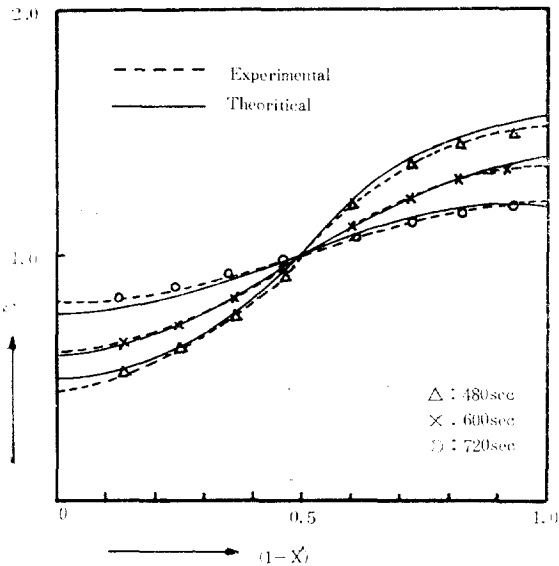


Fig. 8. Typical longitudinal particle mixing curves for a packed bed (Expansion: 2.5).

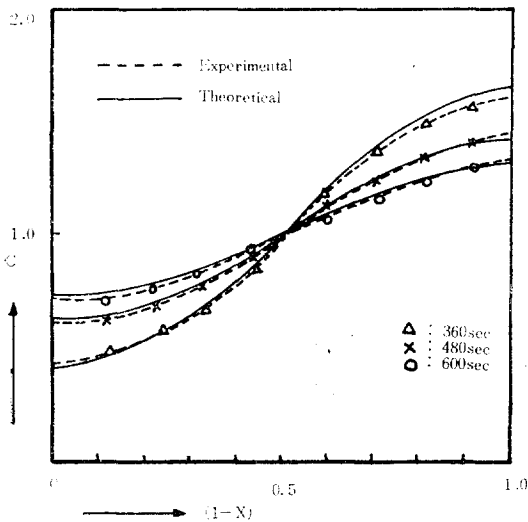


Fig. 9. Typical longitudinal particle mixing curves for a packed fluidized bed (Expansion: 3.0).

이것은 혼합속도가 packing의 없을때는 fixed packing baffling effect가 없기때문에 큰것으로 알려져 있는데 유동층 높이의 중앙에서 ($x' = \frac{1}{2}$) 농도가 1에 근접함을 보여주는데 그값은 expansion에 따라 차이가 있으나 값은 1 ± 0.116 의 범위를 벗어나지 않는다. 또한 expansion이 크

면 클수록 mixing time의 적게 걸리는데 이는 완전혼합에 이르는 시간이 짧음을 보여준다.

(3) 액체의 유속이 확산계수에 미치는 영향
Table 3에 보인 값중 D 값과 무차원속도 ($\frac{V}{V_{mf}} - 1$)에 관해서는 Fig. 10에 보였는데 이는 유속이 증가함에 따라 D 가 증가함을 보여주며 같은 유속조건에서는 D 의 값은 같아야 하는데 magn-

Table 3. Longitudinal solid mixing data from batch fluidization experiments.

No.	Packing	D cm ² /sec	L cm	t sec	V/V_{mf}
1	2cm×2cm 8 mesh screen	0.83	75	1200	1.49
2	"	0.83	76	1500	"
3	"	0.85	74	1800	"
4	"	2.45	101	780	1.72
5	"	2.64	100	900	"
6	"	2.74	100	1020	"
7	"	5.77	127	480	2.11
8	"	5.51	125	600	"
9	"	5.61	124	720	"
10	"	11.35	150	360	2.61
11	"	9.94	151	480	"
12	"	9.54	150.5	600	"

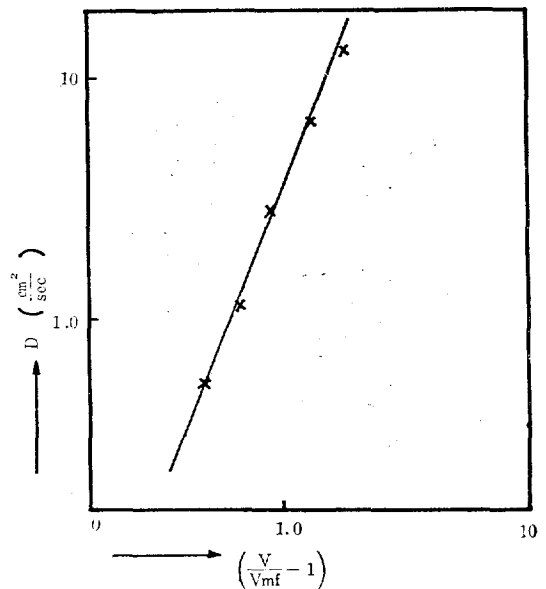


Fig. 10. Dispersion coefficient as a function of the velocity ratio.

etite와 monazite의 밀도차 때문에 segregation이 0.04~10%와 같은 적은 오차는 확산계수가 유동시간에 별영향이 없고 fluidization duration 효과도 별 영향이 없음을 보여준다.

Fig. 10에서 D 값은 대수그래프상에서 $(V/V_{mf}-1)$ 에 대하여 직선으로 증가하며 D 가 유동시간과 무관하다는 것은 이모델이 원통형금당충진물에서는 잘 맞는다는 것을 말해준다. D 와 $(V/V_{mf}-1)$ 의 점렬(點綴)은 그 기울기와 절편으로부터 다음과 같은 관계가 있음을 알았다.

$$D(\text{cm}^2/\text{sec}) = 4.2 (V/V_{mf}-1)^{2.1}$$

5. 결 론

1) 고—액 유동층에서의 고체입자들의 측방향 혼합은 원통형금당충진물이 있는 경우는 dispersion model이 성립하고 없는 경우는 단순한 dispersion model이 성립하지 않는다.

2) 원통형금당충진유동층의 측방향확산계수는 bed expansion에 대하여 대수그래프상에서 직선 관계가 있으며 그 관계식은 다음과 같다.

$$D(\text{cm}^2/\text{sec}) = 4.2 (V/V_{mf}-1)^{2.1}$$

사 용 기 호

- C Tracer concentration, gm tracer/gm total
 D Dispersion coefficient, cm^2/sec
 L Bed height, cm
 t Time from the tracer injection, sec
 V Superficial liquid velocity, cm/sec
 x Length from the top of the bed, cm
 x' Dimensionless length from the top of the bed
 ρ Apparent density, g/cm^3

Subscripts

- mf minimum fluidization
 p packing

참 고 문 헌

1. J.H. Jean, Cambridge Univ. Press, 1921
2. S.G. Kennedy and R.H. Bretton., *A.I. Ch. E.J.* **13**(1966), 24.

3. D. Handley., A. Doraisamy, K.L. Euther., and Franklin N.L. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **44**(1964), T260.
4. C.R. Carlos., and J.F. Richardson., *Chem. Eng. Sci.*, **22**(1967), 705.
5. C.R. Carlos., and J.F. Richardson., *Chem. Eng. Sci.*, **23**(1968), 813-825.
6. 大山義年, 綾木一夫, 化學工學, **20**(1956), 148.
7. 大山義年, 理研彙報第12輯 **14**(1935), 570.
8. 殿岡康彦, 井上一部 化學工學 **37** 9(1973), 67.
9. I. Inove., and Y. Tonooka, *Kagaku. Kagaku* **33**(1969), 280.
10. *Ibid.*, **37**(1973), 515.
11. D.K. Schmalzer., and H.E. Hoelscher, A. *I. Ch. E. J.* **17**(1971), 104.
12. I.A. Fruzer., and R.W. Michell, *A. I. Ch. E.* **16** 3(1970), 380.
13. K. Ramamurthy., and Subbrazuk, *Ind. Eng. Chem. Process and Develop.* **12** 3(1973), 184.
14. R. Blumberg., and J.S. Maritz., *Chem. Eng. Sci.*, **2**(1953), 240.
15. Y. Mori., and K. Nakamura., *J. Chem. Eng. Japan.* **1**(1968), 185.
16. 大野陽太郎, 化學工學 **38** 1(1974), 11.
17. E.N. Zigler., and W.T. Brazelton., *Ind. Eng. Chem. Design and Develop.* **2**(1963), 276.
18. Bracale, Sergio, Autonio, Cabella, *Chim. Ind.* **40**(1958), 621.
19. S.N. Nalpan., and J.K. Donnelly, *The Can. J. of Chem. Eng.*, **51**(1973), 8.
20. J.D. Gabor, *A. I. Ch. E. J.*, **10** 3(1964), 245.
21. J.P. Sutherland, and G.L. Osberg., *A. I. Ch. E. J.*, **9**(1963), 437.
22. G.L. Osberg., and T.A. Tweddle., *Ind. Eng. Chem. Process Design and Develop.* **5**(1966), 330.
23. C.E. Capes., and A.E. McIlhenney., *A. I. Ch. E. J.*, **14**(1968), 117.
24. J.F. Richardson., and W.N. Zaki., *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **32**(1954), 35.
25. W.K. Kang., and G.L. Osberg., *The Can. J. of Chem. Eng.*, **44**(1966), 442.