

## 금망충진 유동층에서의 고체입자의 축방향 혼합

박 성 원 · 이 원 국

한국과학원 화학 및 화학공학과

(접수 1977. 12. 20)

## Axial Particle Mixing in a Screen-packed Gas Fluidized Bed

Seong Won Park and Won Kook Lee

*Department of Chemical Science*

*Korea Advanced Institute of Science, Seoul 131, Korea*

(Received December 20, 1977)

### 요 약

활성탄 재생의 기초 연구로서 입자의 크기, 유속, Screen-packing의 mesh size에 따른 axial dispersion coefficient의 영향을 비교 연구하였다. 유동입자는 평균직경이 0.302, 0.151, 0.097mm인 활성탄을 사용하였으며, 충전물로는 8, 10, 12 mesh/in.로 된 1cm×1cm의 원통형 금망충진물을 사용하였다. 금망충진 유동층에서의 축방향 고체혼합은 dispersion model이 잘 적용되었으며, axial dispersion coefficient는 평균 입자직경( $\bar{d}_p$ ), screenpacking의 mesh opening(M), 유속들과 다음과 같은 상한 관계의 실험식이 얻어졌다.

$$De = 2.5(M)^{0.9}(\bar{d}_p)^{-0.1}(U/U_{mf}-1)^{0.9}$$

금망충진 유동층에서의 맥류의 영향도 아울러 고찰하였으며 그 때의 결과는 보통의 충전유동층에서 보다 더 높은 dispersion coefficient를 얻을 수 있었다.

### Abstract

Behavior of the axial particle mixing in a screen-packed fluidized bed was studied for a basic research on the regeneration of activated carbon. Main factors chosen for the effect on the process were gas velocity, particle size and mesh opening of screen packing. The mean diameters of the fluid particle were 0.302, 0.151, and 0.097mm. and the packings were 1cm×1cm. open-end cylinders made of 8, 10, and 12 mesh/in. stainless steel screen. A dispersion model was well fitted to the experimental data of the longitudinal particle mixing in a screen-packed fluidized

bed. The axial dispersion coefficient was successfully correlated with mean particle diameter( $\bar{d}_p$ ), mesh opening( $M$ ), and gas velocity ( $U/U_{mf}-1$ ), and the following empirical equation was obtained.

$$De = 2.5(M)^{0.9}(\bar{d}_p)^{-0.1}(U/U_{mf}-1)^{0.9}$$

The effects of pulse on the screen-packed fluidized bed was also studied. The results showed that the axial dispersion coefficients with pulse were higher than the normal screen-packed fluidized bed.

## 1. 서 론

기-고체 유동층은 많은 장점을 가지고 있는 반면 높은 유속에서는 slugging 현상때문에 층의 높이와 직경의 비에 제한이 있으며 pressure fluctuation이 심하고 entrainment loss가 많다는 점 등의 많은 문제점을 가지고 있다. 이와같은 결과로 기-고체 유동층의 적용 범위와 질을 향상시킬 수 있는 여러가지의 방법들이 고안 발표되었다.

Sutherland<sup>1)</sup> 등은 기-고체 유동층에 Rasching ring, Berl saddle, screen-packing을 했을 경우 축방향의 고체 혼합에 대하여 연구 발표하였으며 층 부피의 약 5% 정도를 차지하는 금망충진을 하였을 때 slugging이 없는 가장 좋은 결과를 얻을 수 있다는 것을 발표하였다. 그후로 Osberg<sup>2)</sup> 등은 cyclopropane의 catalytic isomerization 반응에서 충전 효과에 대하여 발표하였으며 Kang<sup>3)</sup> 등은 금망충진 기-고체 유동층에서 diffusion model과 cell model을 유도하여 비교하였으며 batch system과 continuous system 모두 diffusion model이 잘 적용된다는 것을 발표하였다. 그후로 Jain<sup>4)</sup> 등과 Tamarin<sup>5)</sup> 등은 금망충진 유동층의 열전도도에 대하여 발표하였으며 Capes<sup>6)</sup>는 층 팽창에 대하여, Pillai<sup>7)</sup> 등은 압력 강하와 유동의 특성에 대하여 연구 발표하였다.

이들의 결과에서 보면 금망 충전물은 bubble 크기를 층 전체에 일정하게 유지시켜 주어 pressure fluctuation이 적고 slugging 현상을 없애주며 entrainment loss를 감소시키는 등의 많은 장점을 가지고 있는 것을 알 수 있으며, 이들 장점들은 분말 활성탄의 재생에 잘 이용될 수 있

을 것으로 생각된다.

분말 활성탄의 재생법에 대해서는 많은 진전을 보이고 있으나 분말 활성탄의 입자 직경이 보통의 유동층 조각에서 사용하는 것 보다 더 작아서 유동도가 나쁘고 entrainment loss가 많고 온도와 체재시간의 조절이 어렵다는 점 등의 많은 문제점을 가지고 있다. 앞에서 말한바와 같이 금망충진은 바로 이러한 문제점을 해결하는데 가장 좋은 결과를 내어 줄 것이 기대된다.

그래서 본 실험에서는 분말 활성탄 재생의 기초 연구로서 유속, 입자의 크기, 그리고 충전물의 mesh opening에 따른 axial dispersion coefficient의 영향을 비교 연구하였다. 또한 금망충진 유동층에서의 맥류의 영향도 아울러 고찰하였다.

## 2. 이론적 고찰

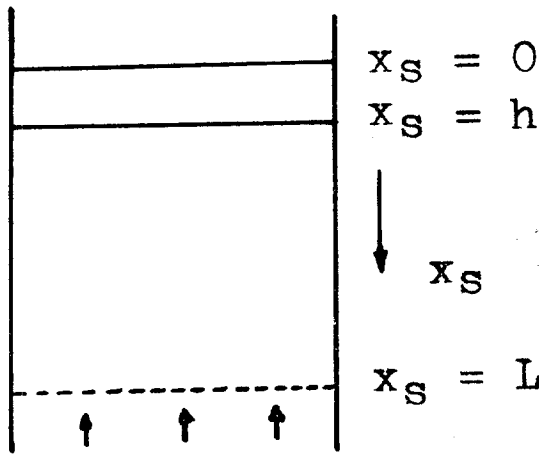
기-고체 금망충진 유동층의 고체 혼합이 일차원의 축방향 혼합이라고 가정하고 dispersion model을 적용하면, 축방향의 고체 혼합속도는 dispersion coefficient에 의해서 결정되며, 그때의 dispersion coefficient는 유동층의 일정한 위치에서 시간에 따른 추적입자의 농도변화를 측정해서 구할 수 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 전기적으로 inert한 고체입자를 높이  $h$ 로 놓고 농도변화가 시작되는 면에서 경계치를 주면 다음과 같은 dispersion equation을 세울 수가 있다.

$$De \frac{\partial^2 c_s(x_s, t_s)}{\partial x_s^2} = \frac{\partial c_s(x_s, t_s)}{\partial t_s} \quad (1)$$

이때의 경계조건은 다음과 같다.

$$c_s(x_s, 0) = c_o(x_s, 0) \text{ for } 0 \leq x_s < h \quad (2)$$



Air

Fig. 1. Theoretical Model

$$c_s(x_s, 0) = 0 \quad \text{for } h \leq x_s \leq L \quad (3)$$

$$c_s(x_s, 0) = \text{constant} \quad \text{for } 0 < x_s \leq h \quad (4)$$

$$\frac{\partial c_s(0, t_s)}{\partial x_s} = \frac{\partial c_s(L, t_s)}{\partial x_s} = 0$$

$$\text{for } t_s \geq 0 \quad (5)$$

(1) 식을 무차원 형태로 바꾸면 변수분리 방법에 의해서 쉽게 그 해를 구할 수 있으며 해는 다음과 같다.

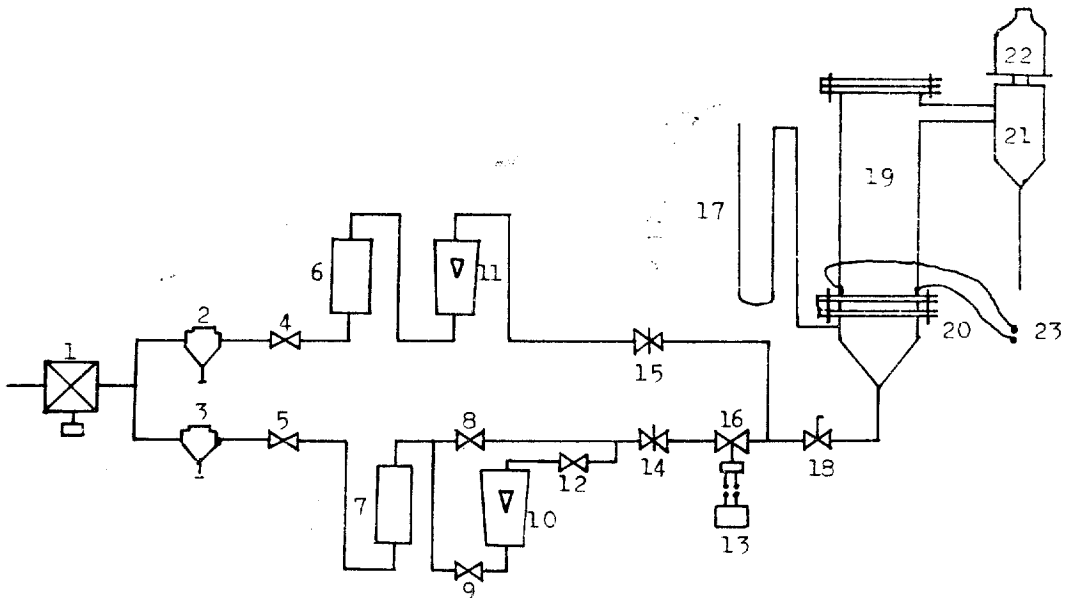
$$c(x, t) = c(x, \infty) + \frac{2}{h} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi h}{L}\right) \cos(n\pi x) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_e t_s}{L^2}\right) \quad (6)$$

시간에 따른 농도변화를 실험에 의해서 구하면 (6)식에서 dispersion coefficient,  $D_e$  값을 구할 수 있다.

### 3. 실험

#### (1) 실험장치 및 재료

Fig. 2에서 보는 바와 같이 유동층으로서는 길이 80cm 내경이 7cm 인 acryl column을 사용하였으며, air distributor로는 ceramic으로 만들어



- 1. Air Compressor
- 2, 3. Pressure Regulator
- 4, 5. Gate Valve
- 6, 7. Dehumidifier
- 8, 9, 12. Gate Valve

- 10, 11. Rotameter
- 14, 15. Needle Valve
- 16. Solenoid Valve
- 13. Squire Wave Generating Device
- 17. Manometer

- 18. Plug Cock
- 19. Fluidized Bed
- 20. Air Distributor
- 21. Cyclone
- 22. Bag Filter
- 23. Resistance Probe

Fig. 2. Schematic Diagram of Experimental Apparatus

진 sintered plate 를 사용하였고, 유동기체는 regulator 로  $2\text{kg}/\text{cm}^2$  의 일정한 압력을 유지하였으며, 유속은 rotameter 로 측정하였다. 유동에 정전기적인 효과를 줄이기 위해 유동기체는 calcium chloride 층을 통해 상대습도 30% 정도의 습도를 유지하였다. 층내의 압력강하를 측정하기 위해서 distributor 바로 밑에 manometer를 연결하였으며, 미세입자의 entrainment를 막기 위해 cyclone 과 bag filter 를 설치하였다.

유동입자로는 97, 151, 그리고 302 micron 의 활성탄을 사용하였으며 추적입자로는 같은 크기의 쌀가루를 사용하였다. 충전물로는 8, 10, 12 mesh/in. 의 stainless steel 망으로 만들어진  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  의 원통형 금망을 사용하였으며 전기적으로 절연하기 위해서 표면에 spray lacquer 를 도포하였다.

시간에 따른 농도변화를 측정하기 위해서 distributor 에서 2cm 의 높이에  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ , 1mm 두께의 동판으로 된 resistance probe 를 층의 양단면에 층벽과 밀착시켜서 설치하였다. Constant D.C power supply 로 probe 에 10volts 의 일정한 전압을 걸어 주었으며, 여기에서 나온 signal 을 filtering 하기 위해 electrical filter 를 설치하였다. Fig. 3 에 electroresistance probe 와 측정회로가 그려져 있다.

금망충진 맥동층에서는 공기의 흐름이 두 방향으로 나누어진다. 하나는 최소유동화속도보다 약간 높은 유속을 유지하고, 다른 하나는 square-wave generating device 에 의해서 작동되는 solenoid valve 에 연결되어 있다. 이 실험에서 wave

의 frequency 는  $0.5\text{sec}^{-1}$  이었으며 On-period 와 off-period 의 비는 1 이었고 pulse 의 amplitude 는 3.64, 5.46, 그리고 7.28cm 이었다.

## (2) 실험 방법

최소유동화속도는 공기의 유속에 따른 유동층 내에서의 압력강하를 측정해서 결정하였다. 유동층에는 50cm 높이의 금망충진을 하였으며, 유동입자로는 21cm 높이의 활성탄을 채웠다. 공기의 유속은 needle valve (15)에 의해서 조정되고, 정상상태에서 plug cock (18)을 닫은 후 활성탄 입자위에 2cm 높이의 쌀가루를 넣는다. 유동은 plug cock (18)을 열으면서 시작되고, 양쪽 probe 사이의 전압강하는 Honeywell 196 recorder(23)에 의해서 기록된다.

금망충진 맥동층에서는 needle valve (15)에 의해서 최소유동화속도보다 약간 높은 유속을 일정하게 유지시켜 주었으며 square wave 는 valve (8)을 닫고 valve (9), (12)와 solenoid valve(16)을 열린 상태에서 needle valve (14)에 의해서 유속이 조정되며 그때의 유속은 rotameter (10)에 의해서 알 수 있다. 그런 다음 valve (8)을 열고 valve (9), (12)를 닫고 solenoid valve (16)을 square-wave generating device (13)에 연결한다. 그 다음 실험과정은 위에서 말한 충전유동층과 같다.

## (3) Dispersion Coefficient

Dispersion coefficient 를 구하기 위해서는 실험에서 얻은 시간에 따른 전압강하곡선을 시간에 따른 농도곡선으로 바꾸어야 한다. Fig. 3 의 probe 와 그의 부수회로에서 볼 수 있는 바와 같이 농도와 전압강하와의 관계는 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다.

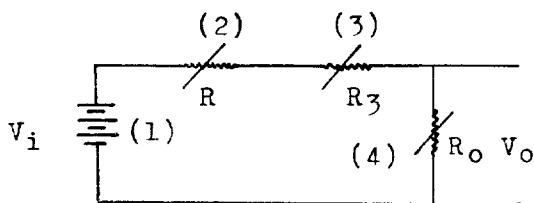
$$V_i = (R_o + R + R_3)I \quad (7)$$

$$R_o I = V_o \quad (8)$$

여기에서 probe 의 저항  $R$  이 추적입자의 무차원 농도  $C$  에 비례한다고 가정하고 위 식을 정리하면

$$V_o = \frac{R_o}{CR_1 + R_2 + R_3 + R_o} V_i \quad (9)$$

(9)식에 의해서 실험 결과에서 시간에 따른



- (1) Constant D.C. Power Supply
- (2) Resistance Probe
- (3) Electrical Filter
- (4) Recorder

Fig. 3. Resistance Probe and Its Assembly Circuit

농도곡선을 얻을 수 있으며 따라서 dispersion coefficient 도 구할 수 있다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### (1) 최소유동화속도

최소유동화속도는 공기의 유속을 점점 감소시켰을 때 얻어지는 압력강하—유속곡선의 두 부분이 교차하는 점으로 정하였으며, 실험결과는 Fig. 4에 나타나 있다. 본 실험에서는 충전물의 mesh size에 따른  $U_{mf}$  값의 변화는 무시하였다.

금강충진을 하였을 경우 하지않은 것과 비교해서  $U_{mf}$  값이 약 100%가량 증가하였다. 이러한 이유는  $U_{mf}$  보다 약간 높은 유속에서는 충전물이 부분적으로 충을 지지하고 있고, 이 때문에 유속을 감소시킬 때 유동입자가 원래의 compact configuration으로 돌아가지 않기 때문인 것으로 생각된다.

##### (2) Axial Dispersion Coefficient and Correlation

Fig. 5는 전형적인 시간에 따른 probe에서의 압력강하 곡선을 보여주고 있다. a-b 사이에서는 probe 주위에 활성탄만이 존재함을 보여주고

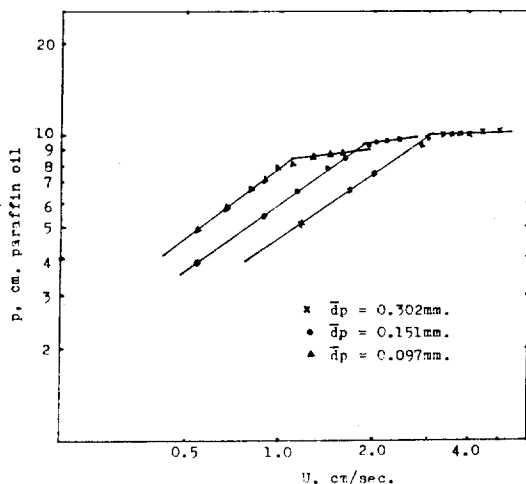


Fig. 4. Relation Between The Bed Pressure Drop and Superficial Air Velocity

있고, b에서부터 전도도가 없는 추적입자가 probe 주위에 분산되어 내려옴에 따라 급격한 저압강하 곡선을 보여주고 있다.

식 (9)을 사용하여 전압을 농도로 바꾸었으며 Fig. 6는 Fig. 5를 시간에 따른 농도변화로 바꾼 graph이다. Axial dispersion coefficient,  $De$ 는 실험치에서 가장 오차가 적다고 생각되는 무차원농도 0.5에 도달하는 시간을 dispersion equation (6)에 대입해서 구했다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 실험결과와 이론식이 잘 일치함을 알 수 있으며 이러한 결과는 Kang<sup>3)</sup> 등의 결과에서

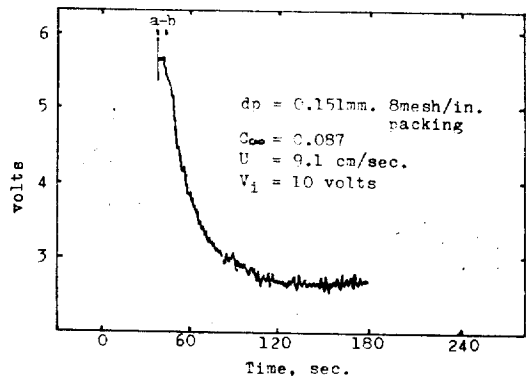


Fig. 5. Typical Voltage Response Curve with Time for Tracer Mixing in the Bed

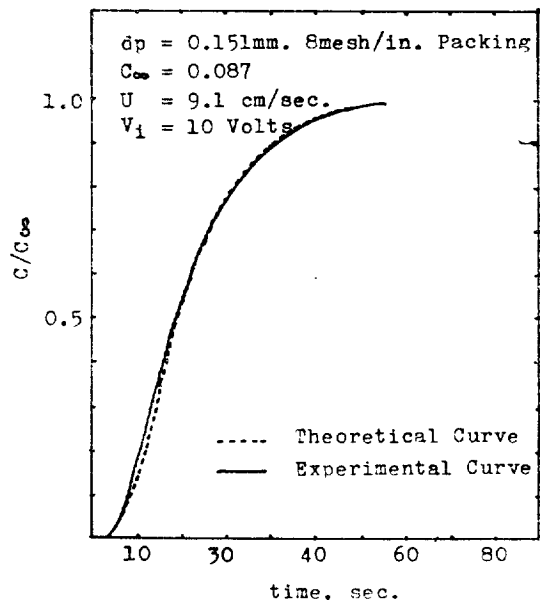


Fig. 6. Concentration-Time Curve Converted from Voltage Response Curve

도 지적된 바 있다.

유속에 따른 axial dispersion coefficient,  $De$ 의 영향은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 유속이 증가함에 따라  $De$  값도 증가하며 대수 그래프에서  $(U/U_{mf})$ 에 대해서  $De$  값을 plot 했을 때 직선으로 나타나며 각 직선의 기울기의 평균값으로부터 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$De \propto (U/U_{mf} - 1)^{0.9} \quad (10)$$

Fig. 8은 금망충진물의 screen opening에 따른  $De$ 의 변화를 plot 한 것이다. 여기에서 보는 바와 같이 같은 유속에서는 입자크기에 관계없이 screen opening이 커질수록  $De$  값이 커지는 것을 알 수 있고, screen opening에 따라  $De$ 를 plot 했을 때 대수 그래프에서 직선의 관계가 있음을 보여주고 있으며 이때의 각 직선의 기울기의 평균값으로부터 다음의 관계식을 얻을 수가 있다.

$$De \propto (M)^{0.9} \quad (11)$$

위의 결과는 충전물의 크기가 작아지고 opening size가 작아질수록 금망충진물의 특성이 Raschig ring이나 구형의 ball과 같은 효과를 나

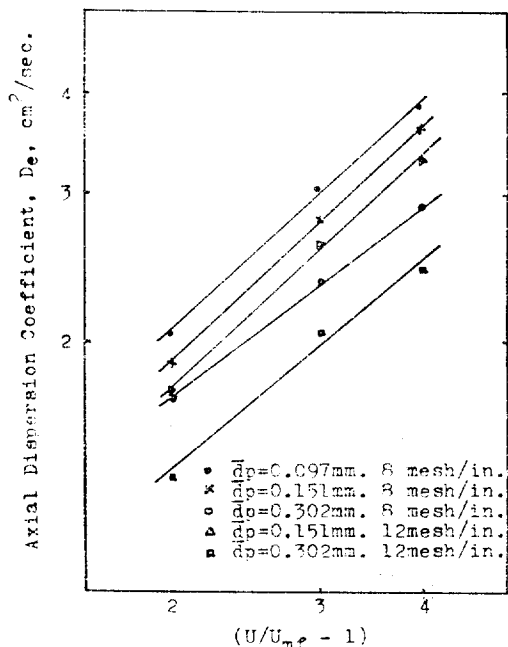


Fig. 7. Relationship Between Axial Dispersion Coefficient and Gas Velocity

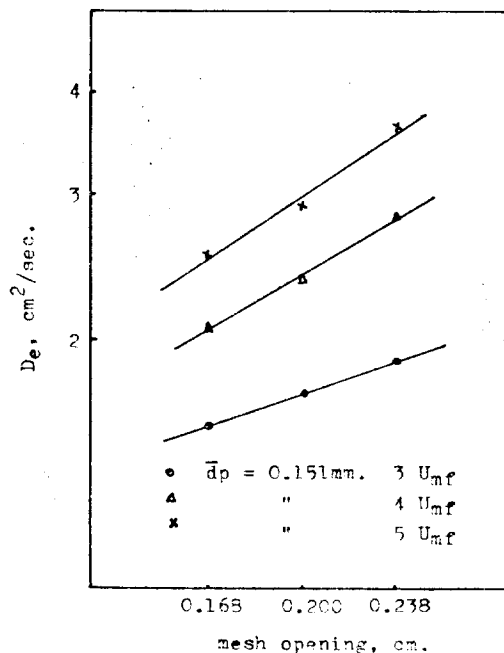


Fig. 8. Relationship Between Axial Dispersion Coefficient and Mesh Opening

타내기 때문에  $De$  값이 감소한다고 설명할 수 있을 것이다. 본 실험에서는 충전물의 크기의 영향은 고찰하지 않고 단지 같은 크기의 금망충진에서 mesh size를 변화시킬 때 dispersion coefficient에 미치는 영향만을 고찰했다.

유동입자의 크기에 따른  $De$ 의 변화는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 유동입자의 크기가 커질수록  $De$  값은 대수 그래프에서 일차원적으로 감소하는 것을 보여주고 있으며, 각 직선의 기울기의 평균값으로부터 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$De \propto (\bar{d}_p)^{-0.1} \quad (12)$$

이러한 현상은 Gabor<sup>8)</sup>의 실험결과와 같은 경향을 보여 주고 있다.

위에서 말한 세가지의 변수 즉 유속, mesh opening 그리고 유동입자의 크기등과  $De$ 와의 일반적인 관계식을 구하기 위해서  $(M)^{0.9}(\bar{d}_p)^{-0.1}(U/U_{mf} - 1)^{0.9}$ 에 대해서  $De$ 를 plot 하였다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 이들 사이에는 좋은 직선관계식을 얻을 수 있었으며, least square me-

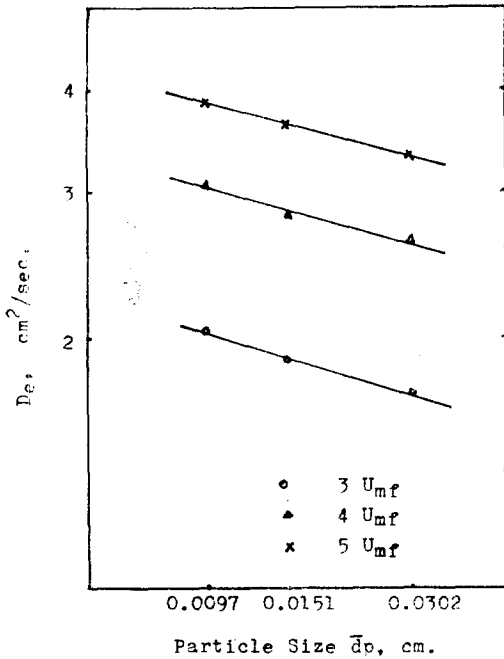


Fig. 9. Relationship Between Axial Dispersion Coefficient and Particle Size.

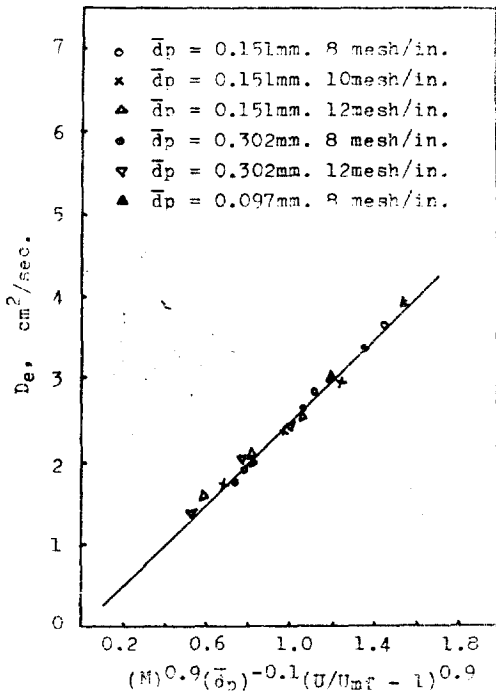


Fig. 10. Correlation of Axial Dispersion Coefficient with Particle Size, Mesh Size and Gas Velocity

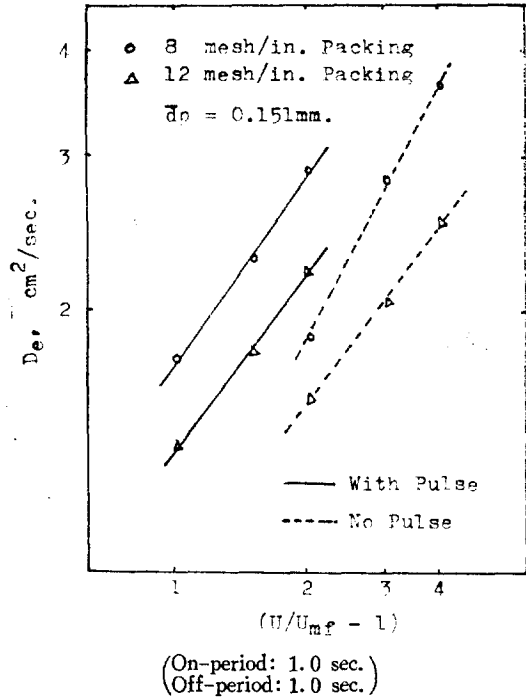


Fig. 11. Effect of Pulse on Axial Dispersion Coefficient

thod 로 구한 실험식은 다음과 같다.

$$De = 2.5(M)^{0.9}(\bar{d}_p)^{-0.1}(U/U_{mf}-1)^{0.9} \quad (13)$$

금망충진 유동층에서의 맥류의 효과에 대한 고찰에서는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 frequency  $0.5\text{sec}^{-1}$ 의 상태에서 충전물의 mesh size의 영향은 보통의 금망충진 유동층의 결과와 마찬가지로 mesh opening에 클수록 더 높은 De 값을 보이고 있으며, 적분유속(integral air velocity)에 따른 De 값의 비교에서는 금망충진 맥동층이 보통의 충전 유동층보다 훨씬 유리한 것으로 나타나고 있다. 많은 사람들의 연구결과 (9), (10)에서 보는 바와 같이 맥동층에서의 De 값은 amplitude와 frequency에 따라 증가한다는 사실을 감안하면 본 실험에서도 frequency를 증가시키면 훨씬 더 높은 De 값을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

## 결 론

본 실험에서 행한 실험범위 내에서 다음과 같

은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기-고체 금방충진 유동층에서의 고체입자의 측방향 혼합은 dispersion model 이 잘 적용된다.

2. 금방충진 유동층에서의 axial dispersion coefficient 는 유동입자의 크기 충전물의 mesh size, 그리고 유속에 따라 결정되며 그들 사이에는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$De = 2.5(M)^{0.9}(\bar{d}_p)^{-0.1}(U/U_{mf}-1)^{0.9}$$

3. 맥류의 영향은 pulse frequency 가  $0.5\text{sec}^{-1}$  일 때 같은 유속 같은 충전물에서 보통의 금방충진 유동층에서 보다 더 높은 dispersion coefficient 가 얻어졌다.

### 기 호 설 명

- $C$  Dimensionless Concentration of Tracer Particles,  $C_s/C_o$   
 $C_o$  Initial Concentration of Tracer Particles,  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .  
 $C_s$  Concentration of Tracer Particles,  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .  
 $D_e$  Axial Dispersion Coefficient,  $\text{cm}^2/\text{sec}$ .  
 $I$  Current, ampere.  
 $h$  Height of Tracer Particle Placed at the Top of the Bed, cm.  
 $L$  Height of Fluidized Bed, cm.  
 $M$  Mesh Opening of Screen-Packing, cm.  
 $\bar{d}_p$  Mean Particle Diameter, cm.  
 $\Delta P$  Pressure Drop, cm. paraffin oil.  
 $R$  Resistance,  $\Omega$ .  
 $t$  Dimensionless Operation Time,  $t_s/t_o$ .  
 $t_o$  Unit Time, sec.  
 $t_s$  Operation Time, sec.

$U$  Superficial Gas Velocity,  $\text{cm}/\text{sec}$ .

$U_{mf}$  Minimum Fluidization Velocity,  $\text{cm}/\text{sec}$ .

$V_i$  Input Voltage of Probe, volts.

$V_o$  Output Voltage of Recorder, volts.

$x$  Dimensionless Distance from the Top of the Fluidized Bed,  $x_s/L$ .

$x_s$  Distance from the Top of the Fluidized Bed, cm.

### 참 고 문 헌

1. J.P. Sutherland George Vassilatos and Hiroshi Kubota, *A.I.Ch.E.J.*, **9**, (1963), 437.
2. G.L. Osberg, T. Hayagawa W. Graham, *Can. J. of Chem. Eng.*, **42**, (1964), 99.
3. W.K. Kang, G.L. Osberg, *Can. J. of Chem. Eng.*, **44**, (1966), 142.
4. S.C. Jain, B.H. Chen, *A.I.Ch.E. Symposium Ser.* No. 116, (1971), 97.
5. A.I. Tamarin, R.R. Khasanov, *Intern. Chem. Eng.*, **15**, (1975), 327.
6. C.E. Capes, A.E. McIlhinney, *A.I. Ch. E.J.*, **14**, (1968), 917.
7. B.C. Pillai, M. Raja Rao, *Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev.*, **15**, (1976), 250.
8. J.D. Gabor, W.J. Mecham, A.A. Jonke, *Chem. Eng. Progr. Symposium Ser.*, No. 47, (1964), 60.
9. A.K. Reed, T.L. Tewksbury and G.R. Smithson, *Environmental Sci. & Tech.* **4**, (1970), 432.
10. K.J. Yoon, M.S. Thesis, KAIS (1975).