

## 비 뉴턴 유체 유동층에서 총팽창 이완 방법에 의한 유동 입자의 분산 거동 해석

강 용 · 나종복\* · 최상원\* · 김상돈\*\*

충남대학교 화학공학과  
\*여수수산대 화학공학과  
\*\*한국과학기술원 화학공학과  
(1992년 5월 22일 접수, 1992년 8월 8일 채택)

## Analysis of Dispersion Behavior of Fluidized Particles by Relaxation Method in Fluidized Beds with Non-Newtonian Fluid

Yong Kang, Jong Bok Nah\*, Sang Won Choi\* and Sang Done Kim\*\*

*Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea*

*\*Department of Chemical Engineering, Yosu National Fisheries College, Yosu 550-180, Korea*

*\*\*Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejon 305-701, Korea*

(Received 22 May 1992; accepted 8 August 1992)

### 요 약

비 뉴턴 유체(석탄과 CMC 용액의 슬러리)-고체 유동층에서 총팽창 이완 방법에 의해 유동입자의 빈도수와 축방향 분산계수를 구하였으며, 액체의 점도, 액체의 유속, 유동입자의 크기 및 총공극률 등이 유동입자의 분산계수에 미치는 영향을 고찰하였다. 비 뉴턴 유체-고체 유동층에 소량의 기체 주입이 유동층 내 유동입자의 분산 거동에 미치는 영향을 또한 고찰하였다. 본 연구의 결과, 유동층 내 유동입자의 분산계수는 액체의 유속과 총공극률이 증가함에 따라 최대값을 나타냈으며, 유동입자의 크기 및 액체의 점도가 증가함에 따라 증가하였다. 또한 액체-고체 유동층에 소량의 기체주입은 유동입자의 분산계수를 증가시켰다.

**Abstract**—Frequency and axial dispersion coefficient of fluidized particles in fluidized beds with non-Newtonian fluid(coal-CMC solution) were measured by means of relaxation method. Effects of fluid flow rate, liquid viscosity, fluidized particles size and bed porosity on the dispersion coefficient of fluidized particles were determined. Effects of the injection of small amount of gas into the fluidized beds with non-Newtonian fluid on the dispersion coefficient of fluidized particles were also discussed. From the results of this study, the frequency and dispersion coefficient of fluidized particles exhibited their maxima with increases in fluid flow rate and bed porosity, and those values increased with increases in particles size and liquid viscosity. The injection of small amount of gas into the liquid-solid fluidized beds could increase the frequency and dispersion coefficient of fluidized particles.

### 1. 서 론

액체-고체 및 기체-액체-고체 유동층에서 연속상인 액상에 의해 유동화되면서 분산상으로 존재하는 고체 입자의 거동은 이들 유동층의 수력학적 특성 뿐만 아니라 열전달, 물질전달 등에도 매우 중요한 영향을 미치기 때문에 이들 유동층을 다상의 접촉기나 반응기 등에 효과적으로 응용할 경우 반드시 고려해야 할 사항 중에 하나로 알려져 있다[1, 2].

다상의 접촉하는 다상 유동층에서 고체 유동입자의 거동은 무작위적(random)이며 매우 불규칙적이기 때문에, 유동입자의 분산 해석은 주로 확산(diffusion) 모델을 적용하여 실험적으로 해석하는 거시적 방법을 사용하여 왔다[3-5]. 그러나, 그동안 사용되어온 거시적 방법은 많은 양의 실험을 필요로 하며 입자 분산의 국부적 거동이나 미시적 거동을 해석할 수 없을 뿐만 아니라 실험 데이터의 재현성 등에 문제점들을 내포하고 있다. 이와 같은 점들을 개선하는 방법의 일환으로 최근 통계학적인 방법을 도입하여 액체-고체 유동층에서 고체 유동입자의 분산 거동을 해석하고자 하는 연구들이 개발되어 진행되고 있다[6-10].

지금까지 진행된 연구들은 액체-고체 유동층에서 연속액상으로는 물을 사용하여 고체 유동입자의 분산을 연구한 것이 거의 전부이며, 액상으로 글리세롤과 물의 혼합액을 사용하여 액상의 점도를 약간 변화시킨 연구가 극소수[11] 보고되고 있는 정도이다. 그러나, 연속액상으로 공업적으로 많이 사용되는 비 뉴턴 유체를 사용한 실험적 연구나 액체-고체 유동층에 소량의 기체가 주입되는 경우의 고체 유동입자의 분산 거동에 대한 연구는 국내·외를 막론하고 거의 보고되고 있지 못한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 공업적 응용이 많은 점도 범위의 비 뉴턴 유체를 연속액상으로 사용하는 액체-고체 유동층에서 고체 유동입자의 분산 특성을 압력 변동 신호의 분석방법으로 고찰하였으며, 액체-고체 유동층에 유입된 소량의 기체가 고체 유동입자의 분산특성에 미치는 영향을 검토하였다.

이와 같은 연구결과는 아직 보고되고 있지 않은 비 뉴턴 유체의 유동층에서 유동입자의 거동 해석 및 기체-액체-고체 유동층에서 유동입자의 거시적, 미시적 해석 및 실험에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

### 2. 유동입자의 빈도수 및 분산계수 결정

유동층의 시험영역(test section)에서 유동입자의 빈

도수(F)는 이 영역에서 고체 유동입자의 물질수지로부터 구할 수 있는데, 이는 식 (1)과 같이 층공극률과의 함수 관계로 나타낼 수 있다[6, 8].

$$\frac{\epsilon(t) - \epsilon_0}{\epsilon_R - \epsilon_0} = \exp(-Ft) \tag{1}$$

여기서  $\epsilon_0$ 와  $\epsilon_R$ 은 각각 새로운 정상상태와 층팽창 이완점에서의 층공극률을 나타낸다. 한편 유동입자의 축방향 분산은 유동입자의 빈도수와 층공극률로부터 식 (2)에 의해 구할 수 있는데[6, 8].

$$D_p = \frac{F}{2} L^2 \left[ \frac{(\epsilon_0 - 1)(\epsilon_R - \epsilon_0)}{(1 - \epsilon_R)^2} \right] \tag{2}$$

여기서, L은 시험영역의 위치를 나타낸다.

본 연구에서는 층공극률의 시간의 변화에 따른 단계 응답 자료와 층팽창 이완점에서의 층공극률 그리고 새로운 정상상태에서의 층공극률 자료들로부터 유동입자의 빈도수와 분산계수를 각각 식 (1)과 (2)에 의해

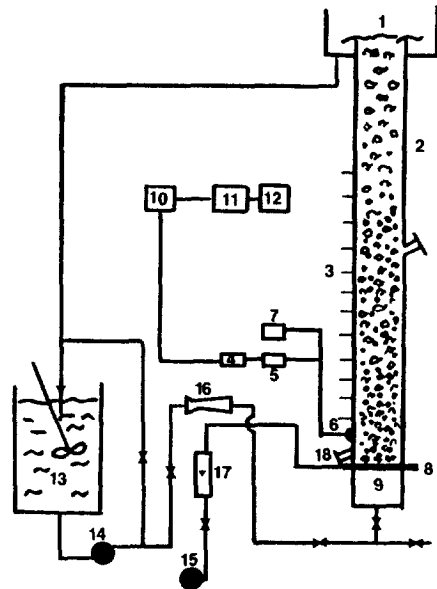


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- |                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| 1. Weir                | 10. A/D converter     |
| 2. Main column         | 11. Personal computer |
| 3. Manometer           | 12. Printer           |
| 4. Recorder            | 13. Slurry tank       |
| 5. Amplifier           | 14. Slurry pump       |
| 6. Pressure transducer | 15. Compressor        |
| 7. Power supply        | 16. Ventrimereter     |
| 8. Distributor         | 17. Rotameter         |
| 9. Calming section     | 18. Loading port      |

Table 1. Physical properties of liquids

Liquid	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu_{eff} \times 10^3$ (pa·s)	$K \times 10^3$ (pa·s <sup>n</sup> )	n
Liquid(I)	1.025	1.4	1.000	1.000
Liquid(II)	1.026	11.2	21.69	0.882
Liquid(III)	1.028	24.2	43.82	0.847

구하였다.

### 3. 실험

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 내경 0.152 m, 높이 2.5 m인 아크릴 관을 사용하였는데 실험장치의 자세한 부분은 다른 문헌[9, 10, 12, 13]에서 찾아 볼 수 있으므로, 이를 간단히 설명하면 다음과 같다. 유동층 내의 동적 압력 변화를 측정하기 위하여 기체-액체 분산판으로부터 0.1 m 떨어진 곳에 Semi-conductor 형의 압력 변환기(Copal Electronics사 제품)를 설치하였으며, 유동층 내의 일정 실험조건에서 정상상태에 도달된 후의 정압력 강하(static pressure drop)를 측정하기 위하여 분산판 위에서 0.15 m 간격으로 15개의 압력탭을 설치하여 액체 마노미터에 연결하였다.

연속상인 액체로는 점도가 다른 CMC(Sodium Carboxymethyl Cellulose)용액에 석탄입자를 혼합한 석탄슬러리를 사용하였는데, 석탄의 평균입도는  $1.32 \times 10^{-5}$  m이었고 첨가량은 5 wt%이었다. 석탄슬러리의 점도는

동심점도계(Rion Ltd. 제품)로 사용하여 측정하였는데 유효점도(effective viscosity)는  $1.4\text{-}24.2 \times 10^{-3}$  Pa.s의 범위에 있었으며, 이는 식 (3), (4)에 의해 구하였고[13-15] k와 n값은 액상의 물리적 성질과 함께 Table 1에 나타내었다.

$$\mu_{eff} = K(\dot{\gamma}_{eff})^{n-1} \quad (3)$$

$$\dot{\gamma}_{eff} = 2800(u_G - u_{SL}) \frac{\epsilon_G}{\epsilon_{SL}} \quad (4)$$

분산상인 고체 유동입자로는 밀도가  $2500 \text{ kg/m}^3$ 인 유리구슬을 사용하였는데 크기는 직경이  $1.0\text{-}6.0 \times 10^{-3}$  m이었으며 기체로는 압축공기를 사용하였다.

각 실험조건에서의 상체류량은 정압강하법(static pressure drop method)[12, 13]에 의해 결정하였다.

### 4. 결과 및 고찰

비 뉴턴 유체인 석탄입자가 포함된 CMC용액에서 액체유속의 단계변화(step change)에 대한 압력응답곡선을 시간에 따라 나타낸 것이 Fig. 2이다. Fig. 2는 초기 액체유속이 각각 0.02, 0.04, 0.06 m/s이고 최종유속이 0.08 m/s인 경우를 나타낸 것인데, 압력의 단계변화응답곡선은 최종유속의 정상상태에 도달되면서 거의 같은 값을 나타내는 지점을 통과하는 것을 알 수 있다. 이로부터 각 실험조건에서 응답 시간의 변화에 따라 유동층 내의 층공극률을 구할 수 있고, 따라서 유동층 내의

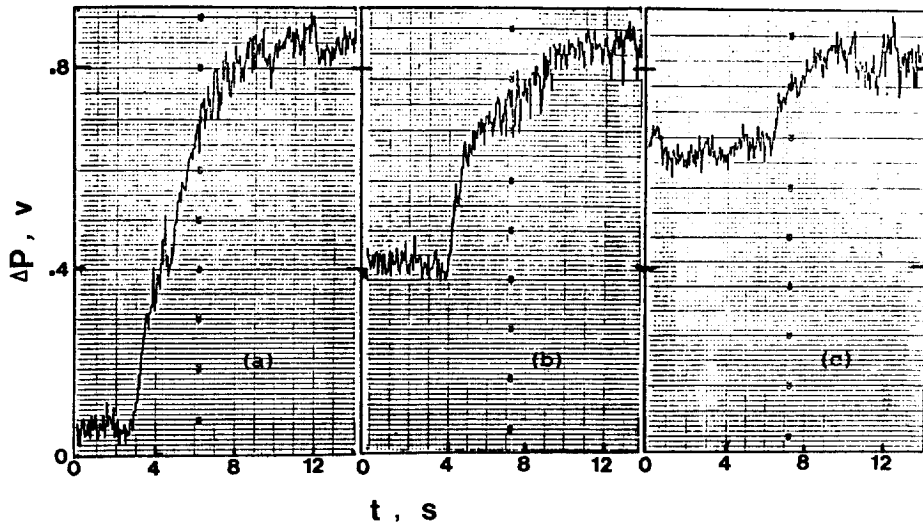


Fig. 2. Pressure fluctuation signals in fluidized beds(liquid(III),  $d_p=0.003$  m,  $U_G=0$  m/s, final  $U_{SL}=0.08$  m/s).

(a) (b) (c)  
Initial  $U_{SL}$ (m/s): 0.02 0.04 0.06

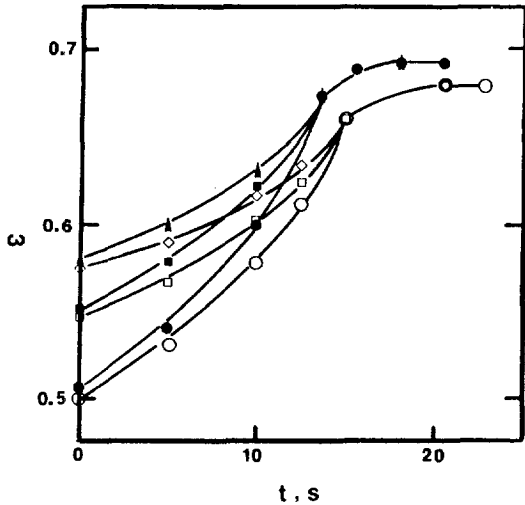


Fig. 3. Variation of bed porosity with elapsed time in fluidized beds(Liquid(I),  $d_p=0.003$  m, final  $U_{SL}=0.12$  m/s).

	○	●	□	■	◇	▲
Initial $U_{SL}$ (m/s):	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08
$U_G$ (m/s):	0	0.02	0	0.02	0	0.02

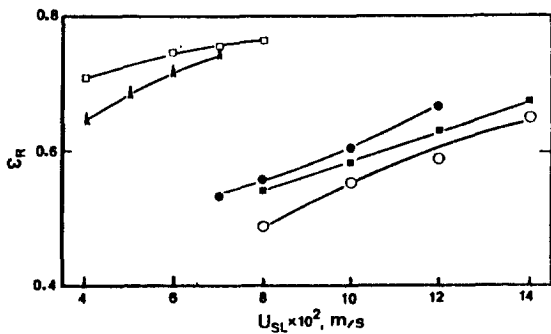


Fig. 4. Effects of  $U_{SL}$  on  $\epsilon_R$  in fluidized beds.

	●	○	▲	■	□
$d_p \times 10^3$ (m):	3.0	6.0	3.0	6.0	3.0
$U_G \times 10^2$ (m/s):	0	0	0	2.0	2.0
Liquid:	Liquid (I)	Liquid (I)	Liquid (III)	Liquid (I)	Liquid (III)

층팽창 이완점을 Fig. 3에서와 같이 구할 수 있다. Fig. 3은 비 뉴턴 유체의 액체-고체 유동층에서 뿐만 아니라 이 액체-고체 유동층에 소량의 기체를 주입한 경우에도 ( $u_G = 0.02$  m/s) 유동층의 층팽창 이완점을 구할 수 있음을 나타내고 있다. 그러나, 기체의 유속이 증가하면 기포에 의한 압력요동(pressure fluctuation)이 상당히 증가하므로, 층팽창 이완점을 찾는 데 용이하지 못하여 본 연구에서는 소량의 기체를 주입하는 경우만을 실험의

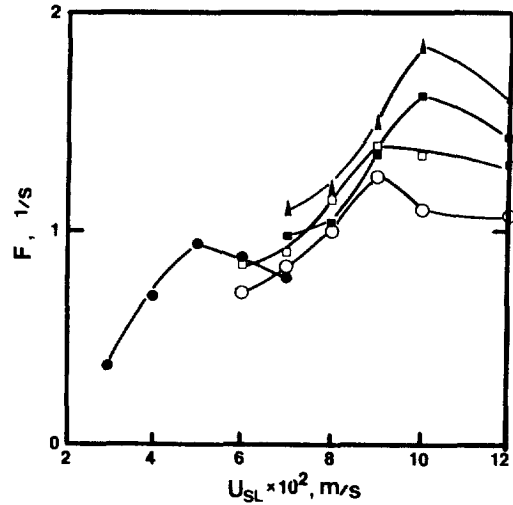


Fig. 5. Effects of  $U_{SL}$  on  $F$  in fluidized beds[Liquid(I)].

	●	○	□	■	▲
$d_p \times 10^3$ (m):	1.0	3.0	3.0	6.0	6.0
$U_G \times 10^2$ (m/s):	0	0	2.0	0	2.0

범위로 다루었다.

Fig. 3에서와 같이 결정된 층팽창 이완점에서의 층공극률을 각 실험조건에서 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 비 뉴턴 액체의 유속이 증가함에 따라 층팽창 이완점에서의 층공극률은 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

이와 같은 층팽창 이완점에서와, 최종정상상태 그리고 응답시간의 지연에 따른 층공극률의 자료들로부터, 식 (1)에 의하여 각 실험조건에서 시험영역에서의 유동입자의 빈도수를 구하였다. 이 유동입자의 빈도수는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 비 뉴턴 유체의 유속이 증가함에 따라 각 실험조건에서 최대값을 나타내었다. 이와 같은 현상을 액체가 뉴턴 유체인 물을 사용한 경우에는 문헌에서 찾아볼 수 있으나[7,8], 비 뉴턴 유체를 사용한 경우나 소량의 기체를 액체-고체 유동층에 주입한 경우에 대해서는 기존의 연구결과가 없어 비교 분석을 할 수 없었다. Fig. 5에서 유동입자의 요동 빈도수는 입자의 크기가 증가할수록 큰 값을 나타내었으며, 같은 크기의 유동입자인 경우에도 소량의 기체를 주입한 경우가 기체를 주입하지 않은 경우에 비하여 입자의 빈도수는 증가하였다. 이는 액체-고체 유동층에 소량의 기체를 주입하면 유동층 내에 난류 현상의 증가를 가져와 유동입자의 운동량이 증가되기 때문으로 해석할 수 있으며, 이와 같은 현상은 실험적으로도 쉽게 관찰될 수 있다.

유동층의 시험영역에서 결정된 유동입자의 빈도수의

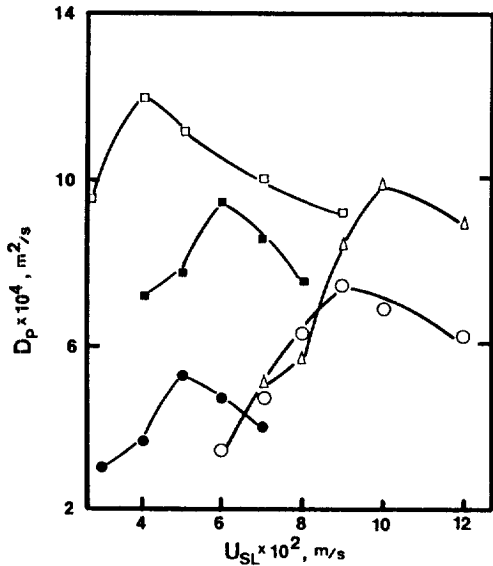


Fig. 6. Effects of  $U_{SL}$  on  $D_p$  in fluidized beds.

	●	○	■	□	△
$d_p \times 10^3$ (m):	1.0	3.0	3.0	3.0	6.0
$U_G \times 10^2$ (m/s):	0	0	0	2.0	2.0
Liquid:	Liquid (I)	Liquid (I)	Liquid (II)	Liquid (III)	Liquid (I)

값을 식 (2)에 대입하면 각 실험조건에서 유동입자의 축방향 분산계수인  $D_p$ 를 구할 수 있는데, 이를 액체유속의 변화에 따라 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 유동입자의 축방향 분산계수는 모든 실험조건에서 액체유속의 증가에 따라 최대값을 나타내는 것을 알 수 있으며, 이 축방향 분산계수는 유동입자의 크기 뿐만 아니라 액체의 점도에 따라서도 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 유동입자의 분산계수가 유동입자의 크기가 증가하면 증가하는 경향을 나타내는 것은 유동입자의 크기가 증가하면 그만큼 최소 유동화 속도도 증가하기 때문에 유동화에 필요한 유체의 유속을 증가시켜 주어야 하기 때문으로도 해석할 수 있다.

이와 같이 유동입자의 축방향 분산계수가 액체의 유속이 증가함에 따라 최대값을 나타내는 것은 유동층 내에서 유동입자의 흐름형태가 변화되기 때문으로 해석할 수 있다[8, 12]. 액체-고체 유동층에 소량의 기체를 주입한 삼상 유동층의 경우도 액체 유속의 증가에 따라 유동입자의 분산계수는 최대값을 나타내었다(Fig. 6).

유동층에서 유동입자의 거동은 연속상의 체류량에 영향을 받는 것으로 보고되고 있는데[3, 6, 8, 12], 본 연구의 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 유동입자의 분산계수는 액체-고체 및 삼상

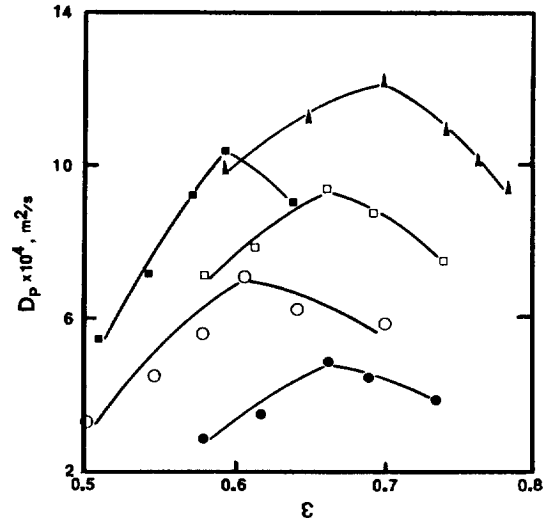


Fig. 7. Effects of  $\epsilon$  on  $D_p$  in fluidized beds.

	●	○	■	□	▲
$d_p \times 10^3$ (m):	1.0	3.0	6.0	3.0	3.0
$U_G \times 10^2$ (m/s):	2.0	0	2.0	2.0	0
Liquid:	Liquid (I)	Liquid (I)	Liquid (I)	Liquid (II)	Liquid (III)

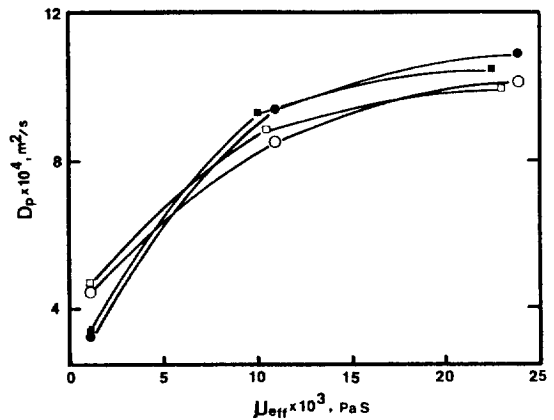


Fig. 8. Effects of  $\mu_{eff}$  on  $D_p$  in fluidized beds( $d_p=0.003$  m).

	●	○	■	□
$U_{SL} \times 10^2$ (m/s):	6.0	7.0	6.0	7.0
$U_G \times 10^2$ (m/s):	0	0	2.0	2.0

유동층의 모든 실험조건에서 증공극률의 변화에 따라 최대값을 나타내었다.

이와 같은 경향은 액체유속이 유동입자의 분산에 미치는 영향에서 언급한 바와 같이 유동층 내의 증공극률이 증가함에 따라 분산상인 고체 유동입자의 흐름형태가 변환하기 때문으로 설명할 수 있다.

액체-고체 및 삼상유동층에서 연속 액상의 점도가

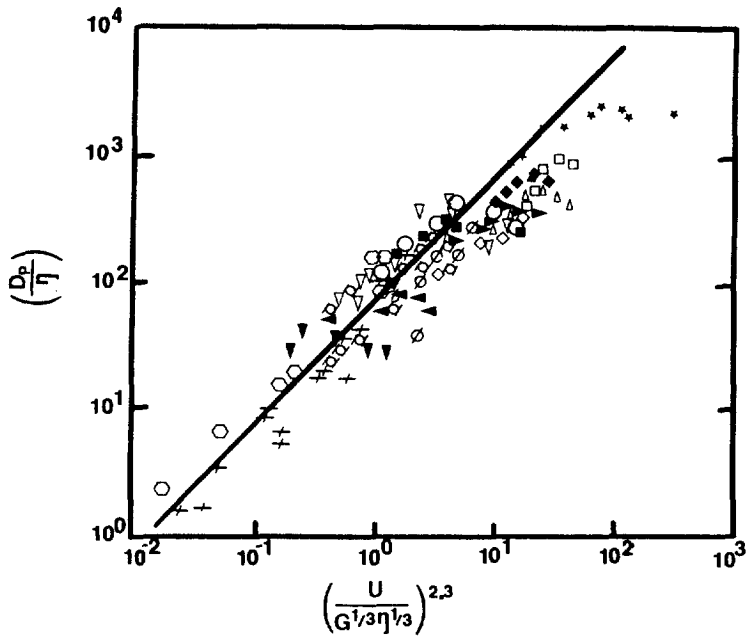


Fig. 9. Correlation of the dispersion coefficient of fluidized particles.

	○	+	◇	▽	
$\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> ):	1200 and 1400	1375	2710-2360	2500	
$d_p \times 10^3$ (m):	0.666-0.736	0.519-0.658	0.551-0.841	0.42-0.772	
	Martin et al.(4)	Van der Meer et al.(5)	Muchi et al.(16)	Yutani et al.(6)	
	★	◇	∅	○ ▽ □	
$\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> ):	2300	2490	2500	2500	
$d_p \times 10^3$ (m):	1.83-3.07	8.89	1.09-1.54	1.0 3.0 6.0	
	Al-Dibouni and Garside (3)	Carlos and Richardson (17)	Handley et al.(18)	Kang et al.(8)	
	■	◀	▼	◆ ▶	
$\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> ):	2500	2500	2500	2500	
$d_p \times 10^3$ (m):	1.0	3.0	3.0	6.0 3.0	
Liquid:	Liquid(I)	Liquid(II)	Liquid(III)	Liquid(I) Liquid(I)	
	Present study				

유동입자의 분산계수에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었는데, 유동입자의 분산계수는 액체의 유효점도가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 액체의 점도 증가에 따라 액상이 유동입자에 작용하는 drag힘의 증가를 가져와 연속액상의 흐름에 따라 유동입자의 축방향 흐름이 증가되기 때문으로 해석할 수 있다. 유동층에서 액체의 점도가 유동입자의 분산에 미치는 영향은 발표된 문헌이 거의 없는 실정이어서 기존의 연구와 비교 분석할 수는 없었다. 본 연구의 실험조건에서 구한 유동층에서 유동입자의 분산계수와 다른 연구자들의 실험결과를 무차원 해석[5]에 의하여

식 (5)와 같이 상관식으로 나타낼 수 있었으며 상관계수는 0.936이었다.

$$\frac{D_p}{\Gamma} = 70 \left[ \frac{u_{SL}}{G^{1/3} \eta^{1/3}} \right]^{2.3} \quad (5)$$

Fig. 9에서 보는 바와 같이 식 (5)는 실험결과와 잘 맞는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구의 실험결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 비 뉴턴 유체-고체 유동층에서 유동입자의 시험 영역에서의 빈도수는 액체유속이 증가함에 따라 최대값을 나타내었으며, 액체-고체 유동층에 소량의 기체주입은 유동입자빈도수의 증가를 가져왔다.

(2) 비 뉴턴 유체-고체 유동층에 소량의 기체주입은 유동입자의 축방향 분산계수의 증가를 가져왔으며, 유동입자의 분산계수는 액체-고체 및 삼상유동층에서 액체의 유속 및 총공극률의 증가에 따라 최대값을 나타내었으나, 액체의 유효점도 및 유동입자의 크기가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

(3) 비 뉴턴 유체-고체 및 소량의 기체가 주입된 삼상 유동층에서 유동입자의 분산계수는 다음식과 같이 실험변수들의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$\frac{D_p}{\eta} = 70 \left[ \frac{u_{SL}}{G^{1/3} \eta^{1/3}} \right]^{2.3}$$

### 사용기호

D	: column diameter [m]
$D_p$	: particle dispersion coefficient [ $m^2/s$ ]
F	: frequency of fluidized particles [1/s]
G	: gravitational acceleration [ $m^2/s^2$ ]
K	: fluid consistency index [ $pa \cdot s^n$ ]
L	: location of pressure sensor [m]
n	: flow behavior index [-]
t	: time [s]
U	: liquid flow rate [m/s]

### 그리스 문자

$\epsilon$	: bed porosity [-]
$\rho$	: density [ $kg/m^3$ ]
$\mu$	: viscosity [ $pa \cdot s$ ]
$\gamma$	: shear rate [1/s]
$\eta$	: kinematic viscosity [ $m^2/s$ ]

### 하첨자

eff	: effective
G	: gas phase
O	: steady state
P	: particle

R	: relaxation point
SL	: slurry phase

### 참고문헌

- Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D.: "Fluidization", 2nd ed., AP., N. Y., (1985).
- Muroyama, K. and Fan, L. S.: *AIChE J.*, **31**, 1(1985).
- Al-Dibouni, M. R. and Garside, J.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **57**, 94(1979).
- Martin, B. L. A., Kolar, Z. and Wesselingh, J. A.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **59**, 100(1981).
- Van der Meer, A. P., Blanchard, C. R. J. P. and Wesselingh, J. A.: *Chem. Eng. Res. Des.*, **62**, 214(1984).
- Yutani, N., Ototake, N., Too, J. R. and Fan, L. T.: *Chem. Eng. Sci.*, **37**, 1079(1982).
- Yutani, N. and Fan, L. T.: *Powder Technology*, **42**, 145(1985).
- Kang, Y., Nah, J. B., Min, B. T. and Kim, S. D.: *Chem. Eng. Commun.*, **97**, 197(1990).
- Fan, L. T., Kang, Y., Yashima, M. and Deogi, D.: Proc. 21st Annual Meeting of Fine Particle Society, San Diego, CA, August 21-25(1990).
- Fan, L. T., Kang, Y., Neogi, D. and Yashima, M.: *AIChE J.* in print(1992).
- Dorgelo, E. A. H., Van der Meer, A. P. and Wesselingh, J. A.: *Chem. Eng. Sci.*, **40**, 2105(1985).
- Kim, S. D., Kang, Y. and Kwon, H. K.: *AIChE J.*, **32**, 1397(1986).
- Kang, Y., Fan, L. T., Min, B. T. and Kim, S. D.: *Bio-technol. Bioeng.*, **37**, 580(1991).
- Schumpe, A., Deckwer, W. D. and Nigam, K. D. P.: *Can. J. Chem. Eng.*, **67**, 837(1987).
- Kawase, Y. and Moo-Young, M.: *Chem. Eng. Commun.*, **40**, 67(1986).
- Muchi, I., Mukaie, S., Kamo, S. and Okakamoto, M.: *Kagaku Kogaku*, **25**, 757(1961).
- Carlos, C. R. and Richardson, J. F.: *Chem. Eng. Sci.*, **23**, 825(1968).
- Handley, D., Doraisamy, A., Butcher, K. L. and Franhlin, N. L.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **44**, T260(1966).