

## 충전 기포탑에서 유속 및 점도가 축방향 혼합에 미치는 영향

韓 均 錫 · 都 東 燮

고려대학교 이공대학 화학공학과

(접수 1976. 9. 18)

## Effect of Flow Rate and Viscosity on the Axial Dispersion of Liquid in a Packed Bubble Column

Kyun Suck Han and Dong Sup Doh

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

(Received September 18, 1976)

### 요 약

기포탑에 원통형 금망을 충전시켜 액체의 점도와 기체 및 액체의 유속에 따른 축방향 분산 계수를 tracer 기법으로 측정하였다. 연구 결과에 의하면 축방향 분산 계수는 기체 및 액체의 유속이 증가함에 따라 증가하고 액체의 점도가 증가함에 따라 감소하며 그 관계는 다음과 같은 실험식으로 표시할 수 있다.

$$D = 24.4 U_l^{0.81} U_g^{0.26} \mu^{-0.30}$$

### Abstracts

Dispersion coefficients of liquid were measured in a bubble column packed with screen cylinders. Impulse response technique was applied to measure the dispersion coefficient as a function of the gas and liquid flow rates and the liquid viscosity. The axial dispersion coefficient was found to

increase with increasing gas and liquid velocities and with decreasing liquid viscosity within the range of experimental conditions. The relationship could be expressed by the following correlation:

$$D = 24.4 U_l^{0.81} U_g^{0.26} \mu^{-0.30}$$

## 1. 서 론

기포탑의 단점인 기포 합체 현상과 액체의 심한 역 혼합 현상을 개선하기 위해서 여러가지 종류의 충전 기포탑이 연구되었다<sup>1-4)</sup>. Mashelkar, Sharma<sup>5)</sup>와 Sahay, Sharma<sup>6)</sup>는 모양과 크기를 변화시킨 충전 기포탑에서 비 충전 기포탑보다 물질전달 계수의 증가를 보였다. 기포탑의 성능은 고리 모양의 충전보다 금망 충전이 더 좋음이 나타났다. 이는 금망 충전은 분산상에서의 분산을 균일하게 하고 gas hold-up을 적게<sup>7)</sup> 하는 channeling 현상을 제거시켜 주기 때문이다. 그러므로 기체-고체 유동탑<sup>8-10)</sup> 또는 기체-액체 기포탑<sup>11)</sup>의 경우에도 금망 충전은 기포의 성장을 억제해서 분산상과 연속상 사이의 접촉이 일반적인 유동탑과 기포탑보다 훨씬 좋아짐을 보였다. 기포탑에서 연속상의 축방향 분산의 특성은 기체의 흐름 형태와 기체의 호울드업(holdup)의 크기에 영향을 받으며 Kato와 Nishiwaki<sup>12)</sup>가 축방향 분산 계수와 기체의 호울드업을 서로 상관 지었다. Kunugita<sup>13)</sup> 등은 Raschig ring에서  $D \propto V_l^{0.23}$  이라고 보고했으며 Chen<sup>14)</sup>은 충전 기포탑에서  $D$ 는  $V_l$ 이  $0.1V_g$ 보다 클때  $V_l^{0.234}$ 에 비례한다고 하였다.

이밖에도, 밀도와 점도가 일정할 때 Liles와 Geankoplis<sup>15)</sup>은  $D \propto U_l^{0.93}$ 이 된다고 보고하였으며, Carberry, Brettorn<sup>16)</sup>와 Cairns, Pransnitz<sup>17)</sup>은 점도 및 유속의 영향을 충전탑에서 조사한 결과  $D \propto N_{Re}$ , 그리고 Ebach와 White<sup>18)</sup>는  $D \propto N_{Re}^{1.06}$ 이 됨을 보였다. 그러나 점도의 변화에 대한 충전 기포탑에서의 연구가 별로 없어서 본 연구에서는 금망 충전 기포탑에서 기체, 액체의 유속과 점도의 영향에 따른 연속상에서의 분산 정도를 tracer 기법으로 실험하여 해석하였다.

## 2. 이론적 고찰

충전 기포탑내의 유체의 흐름이 dispersed flow라고 간주하고, Fig. 1에 나타낸 이론 모델에서 아래와 같은 가정을 도입한다.

1. 반경 방향의 농도 구배는 없다.
2. 기포탑내에서의 유체의 속도는 일정하다.
3. 기포탑 전체를 통한 축방향 분산 계수는 상수로 취급될 수 있다.
4. 입구와 출구에서의 액체의 역혼합 현상은 없다.
5. Tracer impulse는 완전한 delta 함수이다.
6. 응답(response) 측정은 충분히 빠르다.

확산방정식

$$\left[ UAC - AD \frac{\partial c}{\partial x} \right]_x - \left[ UAC - AD \frac{\partial c}{\partial x} \right]_{x+\Delta x} = A \cdot \Delta x \frac{\partial c}{\partial t} \quad (1)$$

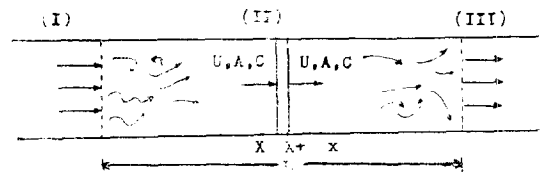
또는

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2)$$

으로부터 closed system에 대한 이론식

$$\sigma^2 = \frac{2}{P_e} - \frac{2}{P_e^2} (1 - e^{-P_e}) \quad (3)$$

을 얻을 수 있고<sup>19,20)</sup> 평균체재시간 폭선을 해석하여  $\sigma^2$ 를 구하고 이로부터 분산계수를 구할 수 있다.



Region (I) : Inlet region (plug flow).  
Region (II) : Reaction region.  
Region (III) : Outlet region (plug flow).

Fig. 1. Model system representation.

### 3. 실험장치 및 방법

점도를 변화시키기 위해서 CMC (carboxyl methyl cellulose)를 증류수에 녹였으며 CMC 용액의 농도와 점도와의 관계는 Table 1에 표시된 바와 같고 점도측정은 Oswald 점도계로 하였다. 사용한 실험장치는 Fig. 2에 표시한 바와같이 높이 165cm, 내경 5cm인 아크릴수지로된 기포탑과 부속물로 되어있다.

Table 1. Relation between concentration and viscosity of CMC solution (at 30°C)

CMC conc. (wt%)	viscosity (CP)
0.5	2.5
1.0	3.3
1.5	4.5
2.0	6.0

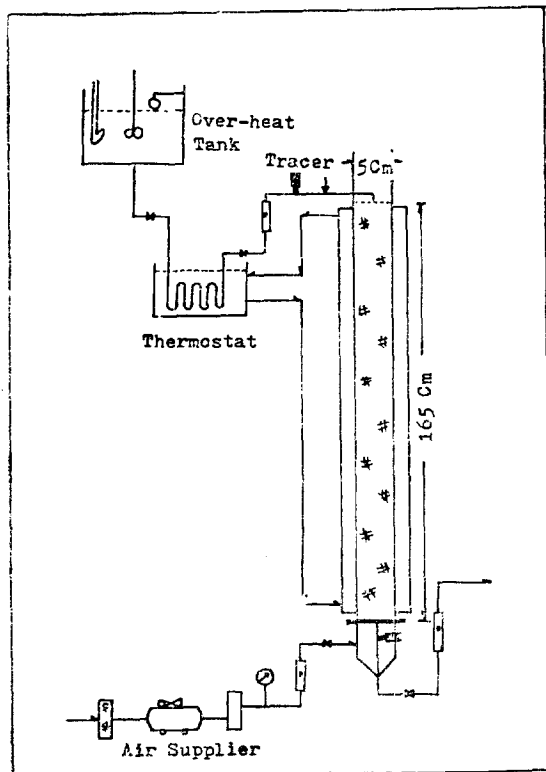


Fig. 2. Flow diagram.

충전물로는 14 mesh 짜리 금당으로 된 직경 1 cm, 높이 1.5cm의 원통형으로 충전하였다. 점도는 온도 변화에 민감하므로 온도를 일정하게 해주기 위해서 기포탑 외부에 직경 8 cm인 투명 원통관을 항온조와 연결하여 사용하였다.

CMC 용액을 자동 수위 조절기가 부착된 overhead tank에서 30°C 가까이 까지 예열을 시킨 후 항온조로 들어가 30°C로 기포탑의 상부로 보내고 공기는 먼지, CO<sub>2</sub>와 습기를 제거시킨 후 탑 내로 주입시킨다.

Tracer로는 0.1% NaCl 용액을 사용하고 입구와 출구에 부착된 conductivity cell을 Wheaston bridge 상에서 평형이 되도록 조절한 다음 tracer 0.1cc를 탑상부의 injection point에서 주사기로 순간적으로 주입하여 response 현상을 연속적으로 recorder로 기록하고 이것으로부터 평균체재시간 및  $\sigma^2$ 를 구한후 (3)식에서  $P_e$  및  $D$ 를 산출하였다(부록참조).

### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3과 Fig. 4는 축방향 분산 계수에 미치는 기체와 액체의 유속의 영향을 각각 나타낸 것이다.

이 그림에서 보는바와 같이 축방향 분산 계수는 기체와 액체 유속의 증가에 따라 각각 증가

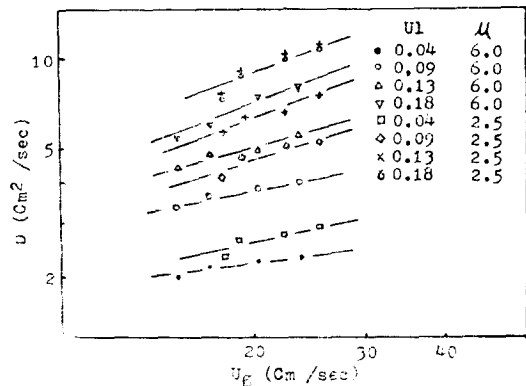


Fig. 3. Dispersion coefficient as a function of interstitial gas velocity.

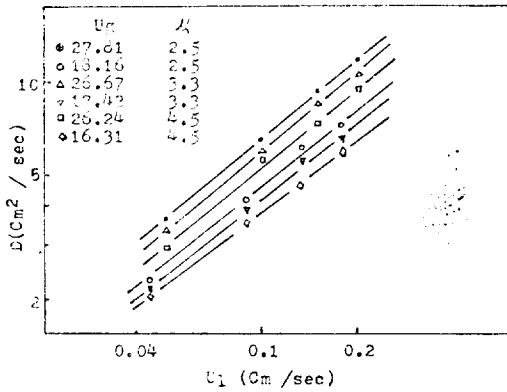


Fig. 4. Dispersion coefficient as a function of Interstitial liquid velocity.

함을 알 수 있으며 이들을 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$D \propto U_g^{0.26} \quad (4)$$

$$D \propto U_l^{0.81} \quad (5)$$

위의 관계식들은  $U_l$ 이 0.04~0.20cm/sec,  $U_g$ 가 15~27cm/sec 범위에서 행한 실험으로부터 얻은 것이다.

또한 이 범위에서 점도의 변화에 따르는 축방향 분산 계수의 변화를 관찰하면 Fig. 5와 같다.

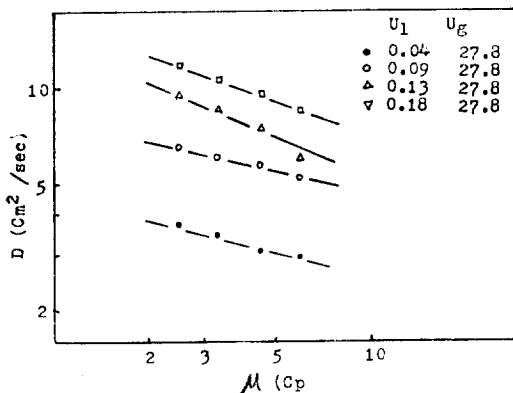


Fig. 5. Dispersion coefficient as a function of viscosity

점도가 증가할 수록 축방향 분산 계수는 감소하는 경향을 보였고 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$D \propto \mu^{-0.30} \quad (6)$$

이상 (4), (5), 및 (6)식에서 나타난 경향을 종합하여 그려보면 Fig. 6과 같다.

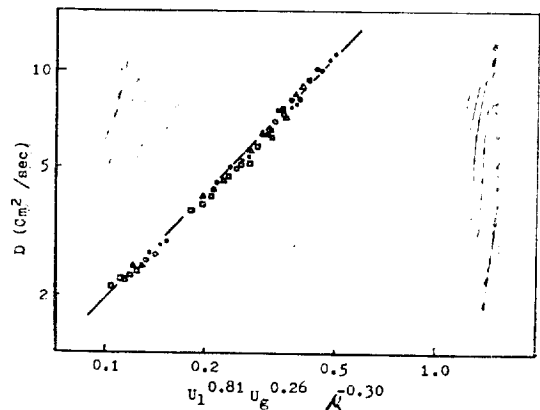


Fig. 6. Dispersion coefficient as a function of interstitial liquid velocity, interstitial gas velocity and viscosity.

이를 관계식으로 표현하면 다음과 같다.

$$D = 24.4 U_l^{0.81} U_g^{0.26} \mu^{-0.30} \quad (7)$$

## 5. 결 론

금망을 충전한 충전 기포탑에서 기체, 액체의 유속과 액체 점도의 변화에 따르는 연속상의 축방향 분산 계수를 tracer 기법으로 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

즉, 축방향 분산 계수는 액체 및 기체 유속의 증가와 더불어 증가하지만 액체의 점도가 증가할 수록 오히려 감소하며 액체의 유속이 0.04~0.2 cm/sec, 기체의 유속이 15~27 cm/sec, 액체 점도가 2.5~6.0cp의 범위에서 그 관계는 다음의 실험식으로 표시할 수 있다.

$$D = 24.4 U_l^{0.81} U_g^{0.26} \mu^{-0.30}$$

## 사 용 기 호

$A$	cross sectional area of column,	$\text{cm}^2$
$C$	tracer concentration,	$\text{g} \cdot \text{mol}/\text{cm}^3$
$D$	axial dispersion coefficient,	$\text{cm}^2/\text{sec}$
$d_p$	packing diameter,	$\text{cm}$
$L$	length of column,	$\text{cm}$
$t$	time,	$\text{sec}$
$U$	interstitial velocity,	$\text{cm}/\text{sec}$
$V$	superficial velocity,	$\text{cm}/\text{sec}$
$x$	axial distance,	$\text{cm}$
$\mu$	viscosity of liquid,	$\text{g}/\text{cm sec}$
$\rho$	density of liquid,	$\text{g}/\text{cm}^3$
$\sigma^2$	normalized variance,	
$N_{Re} = \sigma d_p u_l / \mu$	Reynolds number,	무차원
$P_e = UL/D$	Peclet number,	무차원

## Subscripts

$l$  liquid  
 $g$  gas

## 참 고 문 헌

1. H. Hofman, *Chem. Eng. Sci.*, **14**(1961), 193.
2. R. J. Carleton, et. al., *Chem. Eng. Sci.*, **22**(1967), 1839.
3. M. B. Kats and L. S. Genin, *Int. Chem. Eng.*, **7**(1967), 246.
4. R. D. Voyer and A. I. Miller, *Can. J. Chem. Eng.*, **46**(1968), 335.
5. R. A. Mashelkar and M. M. Sharma, *Trans. Int. Chem. Eng.*, **15**(1970), 162.
6. B. N. Sahay and M. M. Sharma, *Chem. Eng. Sci.*, **28**(1973), 2245.
7. C. J. Hoogen dorn and J. Lips, *Can. J. Chem. Eng.*, **43**(1965), 125.
8. B. H. Chen and G. L. Osberg, *Can. J. Chem. Eng.*, **45**(1967), 46.

9. T. Ishii and G. L. Osberg, *AIChE J.*, **11**(1965), 279.
10. J. P. Sutherland, et. al., **9**(1963), 427.
11. B. H. Chen and R. Vallabh, *Ind. Eng. Chem., Process Design and Develop.*, **9**(1970), 121.
12. Y. Kato and A. Nischiwaki, *Int. Chem. Eng.*, **12**(1972), 182.
13. E. Kunugita and T. Otake, *Chem. Eng. (Japan)*, **26**(1962), 800.
14. B. H. Chen, *Can. J. Chem. Eng.*, **50**(1972), 436.
15. A. W. Liles and C. J. Geankoplis, *AIChE J.*, **6**(1960), 591.
16. J. J. Carberry and R. H. Brettorn, *AIChE J.*, **4**(1958), 369.
17. E. J. Cairns and J. M. Pransnitz, *Chem. Eng. Sci.*, **12**(1960), 20.
18. E. A. Ebach and R. R. White, *AIChE J.*, **4**(1958), 161.
19. E. T. van der Lean, *Chem. Eng. Sci.*, **7**(1958), 187.
20. O. Levenspiel, "Chemical Reaction Engineering", 2nd ed., Wiley, N. Y., 1972.

## 부록 : 체재시간 분포 곡선 해석

Impulse에 의한 응답곡선의 후미 부분은 항상 exponential function이 되므로 아래와 같은 식에서 decay factor  $K$ 를 구하여 응답곡선의 해석에 사용하였다 (Fig A-1)

$$C = C_A e^{-k(t-t_A)} \quad (\text{A-1})$$

여기서  $C_A$  및  $C_t$ 의 값은  $C_A < \frac{1}{6} C_M$ ,  $C_t < \frac{1}{20} C_M$ 이며  $C_M$ 은 maximum concentration 값을 나타낸다.

$$\text{Area}, A_0 = \sum_{i=0}^n C_i \Delta t + \frac{C_A}{K} \quad (\text{A-2})$$

$$\text{Mean residence time}, \bar{t} = \frac{1}{A_0} \left[ \sum_{i=0}^n C_i t_i \Delta t_i + \frac{C_A}{K} \left( t_A - \frac{1}{K} \right) \right] \quad (\text{A-3})$$

$$\text{Mean variance, } \sigma^2 = \frac{1}{A_0} \left[ \sum_{i=0}^n (t_i - \bar{t})^2 C_i \Delta t_i + \frac{C_A}{K} (t_c - \bar{t})^2 + \frac{2}{K} (t_c - \bar{t}) + \frac{2}{K^2} \right] \quad (\text{A-4})$$

이들 식으로부터  $A_0$ ,  $\bar{t}$ ,  $\sigma^2$ 를 구할 수 있으며 Fig. A-1은  $\mu=4.5$ cp,  $U_l=0.190$ ,  $U_g=22.52$ 인 경우의 응답곡선이다. 이로부터 계산한  $\bar{t}$ ,  $\sigma^2$ ,  $P_e$ ,  $D$ 의 값은 각각 0.4626, 0.3963, 3.724, 8.335이고 전체적인 결과는 Table A-1에 표시하였다.

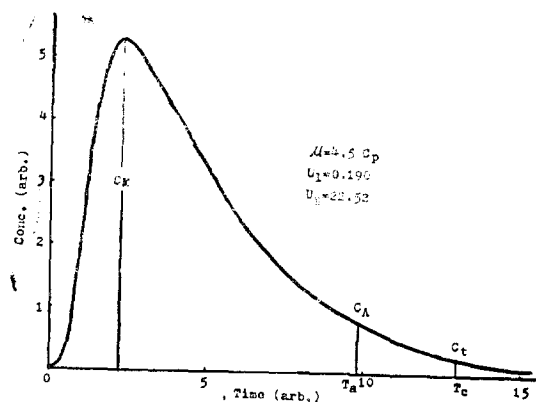


Fig. A-1 Example of a response curve

Table A-1. Experimental data.

$U_l$	$U_g$	$\sigma^2$			
		$\mu=2.5$	$\mu=3.3$	$\mu=4.5$	$\mu=6.0$
0.044	18.16	0.440	0.423	0.411	0.393
0.046	19.00	0.470	0.438	0.421	0.408
0.047	22.52	0.468	0.447	0.430	0.411
0.048	25.40	0.472	0.452	0.429	0.414
0.049	27.81	0.534	0.510	0.475	0.464
0.088	18.16	0.411	0.399	0.367	0.348
0.091	19.00	0.449	0.417	0.391	0.362
0.095	22.52	0.456	0.420	0.398	0.368
0.097	25.40	0.458	0.430	0.408	0.338
0.099	27.81	0.505	0.481	0.467	0.436
0.133	18.16	0.410	0.388	0.333	0.320
0.137	19.00	0.449	0.400	0.372	0.339
0.142	22.52	0.447	0.415	0.391	0.335
0.146	25.40	0.457	0.425	0.393	0.332
0.148	27.81	0.496	0.468	0.424	0.363
0.177	18.16	0.373	0.351	0.326	0.303
0.183	19.00	0.421	0.390	0.355	0.319
0.190	22.52	0.441	0.419	*0.396	0.363
0.194	25.40	0.459	0.433	0.403	0.373
0.198	27.81	0.472	0.446	0.418	0.328