

왕복식 판 추출기에서의 상체류량 및 축방향분산 특성

주 종대, 유 용호, 김 상돈

(태평양기술연구소, 한국과학기술원 화공과)

Phase Hold-up and Axial Dispersion Characteristics in Reciprocating Plate Extraction Columns

Ju Jung-Dae, Yu Yong-Ho, Kim Sang-Done

Pacific R & D Center, Dept. of Chem. Eng. KAIST

1. 서 론

추출장치는 일반적으로 액-액간의 접촉형태에 따라 direct stage contactor 와 continuous differential contactor의 두 종류로 구분할 수 있다.

전자의 경우는 mixer-settler type이 대표적인 예이며, 후자의 경우 rotary, pulsed, reciprocating extraction column 등 여러종류가 있다. 특히 연속항류추출장치는 단위부피당 처리량이 많고, 물질전달이 크며 따라서 HETS가 낮아 널리 사용되고 있으나, 반면에 flooding으로 인하여 처리량에 한계가 있으며, 축방향분산과 액적의 합체현상은 물질전달을 감소시키는 원인으로 작용하는 등의 문제점이 있다.^{1) 2)}

즉, 추출기내에서의 물질전달은 액-액간의 농도차, 물질전달계수, 두상간의 접촉면적등에 따라 결정되는데 연속식 항류추출탑에서는 두상간의 접촉면적을 증대시키고자 기계적 교반장치를 탑내에 설치하는 것이 일반적인 사항이나, 이러한 기계적 교반장치를 사용하면 축방향분산이 매우 커지게 되어 액-액간의 농도차가 감소함으로써 오히려 물질전달이 감소되는 역작용이 발생하게 된다.

따라서 이와같이 축방향분산이 증가하는 것을 방지하기 위하여 baffle, disc 등 plate geometry를 변화시키는 여러방법들이 강구되어 왔으며²⁾³⁾⁷⁾, 본 연구에서는 각각 다른 fractional opening area를 갖는 fan plate를 사용하여 이에따른 agitation rate의 변화가 분산상의 상체류량 및 축방향분산에 미치는 영향에 대하여 적당한 상관식을 제시하였다.

2. 실험장치 및 방법

가. 실험장치

실험장치는 왕복식판추출탑으로서 Fig.1 과 같다. 추출탑의 내경은 10 cm인 유리관으로 높이는 350 cm이며, plate stack은 180 cm, 분산상과 연속상이 도입되는 분배기 사이의 거리는 205 cm이다.

Plate stack의 왕복운동은 1HP D.C. gear motor를 사용하여 주파수를 맞춰주고, 진폭은 adjustable yoke를 사용하여 조절하였다.

Plate는 Fig.2와 같이 perforated plate 1종류, fan plate 4종류이며, plate arrangement는 Fig.3과 같이 perforated와 fan plate를 이용하여 6가지의 배열을 취하였다.

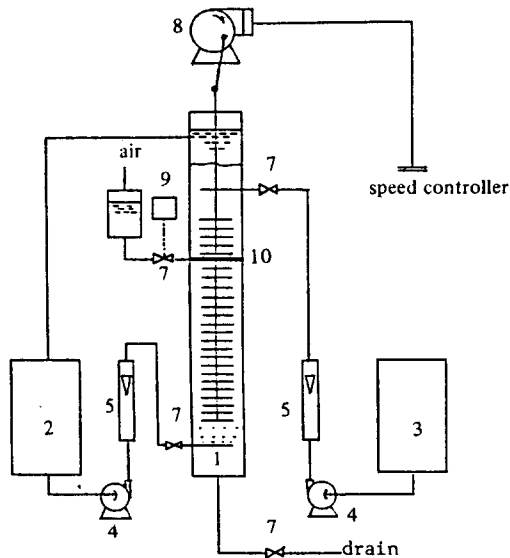


Fig. 1. Experimental equipment

- | | | |
|-------------------|------------------|---------------|
| 1. Main column | 2. Kerosene tank | 3. Water tank |
| 4. Pump | 5. Rotameter | 6. Tracer |
| 7. Solenoid valve | 8. D.C. Motor | 9. Timer |
| 10. Sparger | | |

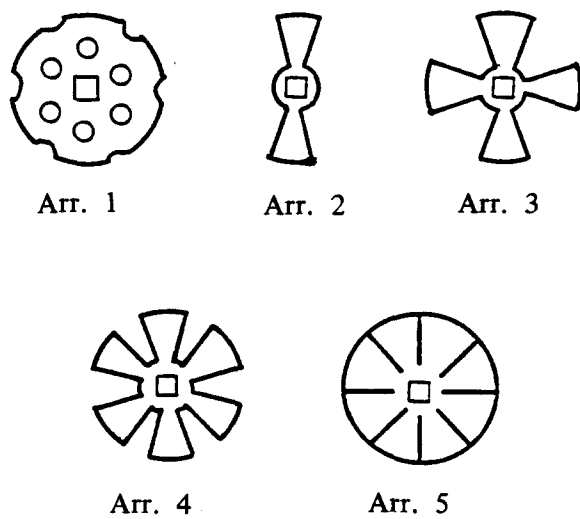


Fig. 2. Geometry of plate used

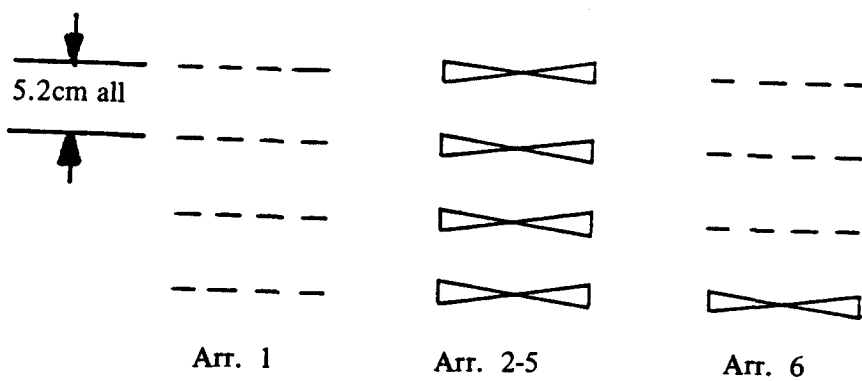


Fig. 3 Various plate arrangements in this study

Table 1. Details of Plate Geometry

Arr.	Properties	No. of holes or fans	Plate diameter dp, cm	Spacing H, cm	Projected opening area	
1	dh=22mm, pitch=27mm	9	9.2	5.2	0.602	
2	$\alpha = 45^\circ$	2			0.796	
3		4			0.626	
4		$\alpha = 30^\circ$			6	0.456
5		8			0.285	
6		3, Perforated + 1,4-Fans plate				0.608

나. 실험방법

먼저 연속상의 물 (0.005N HCl, Phenolphthalein 포함)을 유량계를 통하여 탐상부로 도입시킨 후, 탐저부에서 분산상인 kerosene을 역시 유량계를 통하여 도입한후 D.C motor를 가동하여 왕복운동을 가한다.

정상상태에 도달하게 되면 timer를 작동하여 tracer로서 NaOH 1N 용액을 약 0.5초에 걸쳐 주입한다. 이때 tracer는 impulse로 주입된다고 가정한다.

Tracer 주입으로 연속상중의 HCl과 중화반응이 일어나게 되어 지시약으로 포함된 phenolphthalein이 무색에서 적색으로 변화하게 된다. 이때 변색되는 부분의 길이 (X_r)를 10초간격으로 기록한 후 Kim & Baird (1976, a)가 제시한 식 (1)에 의하여 X_r^2/t 와 $\int n t$ 의 관계로부터 기울기를 구하여 축방향분산계수를 결정한다.⁴⁾⁶⁾ 한편 weir의 상분리면을 일정하게 유지시킨후 정상상태에 도달하게 되면 탐상 및 탐저의 액상 도입부 solenoid valve를 off한 다음 pump작동을 정지시킴으로서, 탐내에서 두액상은 비중차이에 의하여 분리되고, 이 분리된 거리를 측정하여 상체 류량을 결정하였다.

$$X_r^2 / t = -2E \ln t - 4E \ln [K\sqrt{E}] \dots\dots\dots(1)$$

where E : Axial Dispersion coefficient, cm^2 / s
 X_r : Length, cm
 t : Time, Sec.
 K : Constant

3. 결과 및 고찰

가. 축방향분산계수

왕복식, 또는 맥동추출탑에서 축방향분산에 영향을 미치는 인자로는 주파수(f), 진폭(A), 분산상 및 연속상의 속도(U_d, U_c), plate spacing, plate shape와 자유행로면적분율(σ), 그리고 추출탑의 직경, 액의 점도 및 액-액간의 밀도차등 매우 여러가지가 있다. 본 실험에서는 주파수와 진폭, 그리고 분산상 및 연속상의 속도변화가 각 배열에 있어서 축방향분산에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

(1) Agitation rate (Af)에 의한 영향

Baird(1974)는 직경 15 cm인 맥동추출탑에서 축방향분산계수와 Af와의 관계를 A²f로서 상관시켜 perforated plate의 경우에 비교적 잘 상관됨을 관찰하였으며 semi-circular baffle plate의 경우는 Af에 상관된다고 하였다.¹⁾

본 실험에서는 Fig.4,5와 같이 축방향분산계수가 A²f와 잘 상관되었다. 즉 자유행로면적분율(σ)이 큰 경우 액의 편류현상으로 인하여 축방향분산계수가 A²f 증가에 따라 감소하지만 일정 A²f 이상에서는 plate에 의한 mixing 효과가 증대되어 A²f 증가에 따라 축방향분산이 최소값을 보이고 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 σ가 아주 작은 배열 4,5의 경우에도 같은 경향성을 나타내는 것으로도 설명될 수 있다.

비슷한 σ값의 배열 1(perforated), 3(fan), 6(mixed)의 경우 Fig.5와 같이 fan plate가 가장 큰 축방향분산을 나타내었다. 이는 plate geometry에 있어서 편류현상이 가장 심하였기 때문이며 혼합배열을 취한 경우는 perforated plate의 액적파쇄효과와 fan plate에 의한 swirling flow형성으로 축방향분산이 가장 작게 나타났다고 설명할 수 있다.

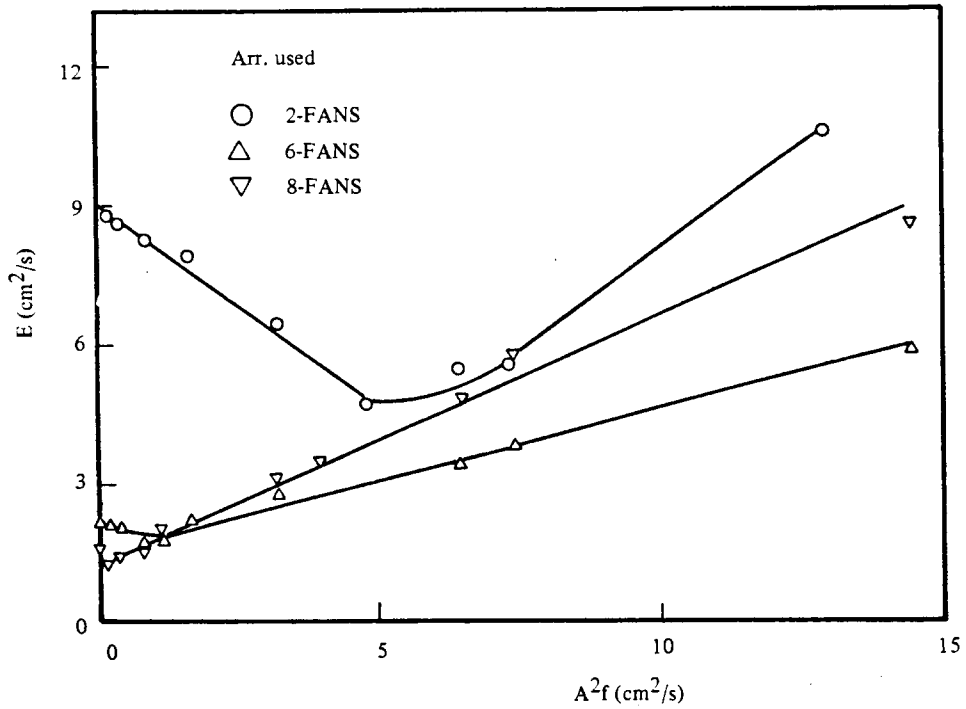


Fig. 4. Effect of A^2f on axial dispersion coefficient at $U_c = U_d = 0.25$ cm/s

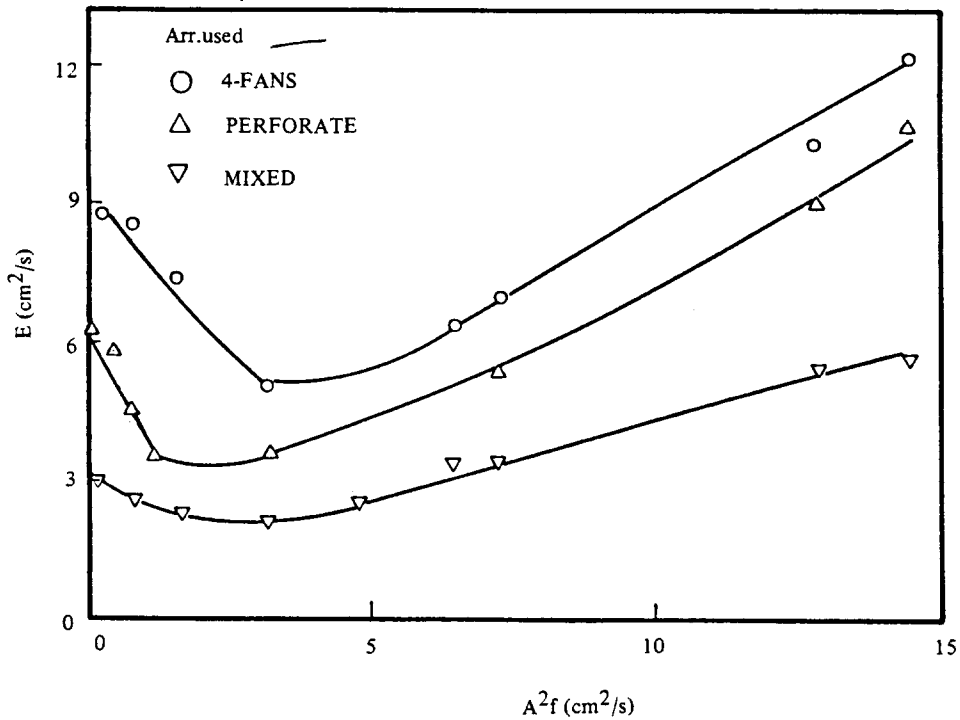


Fig. 5. Effect of A^2f on axial dispersion coefficient at $U_c = U_d = 0.25$ cm/s

(2) U_c , U_d 에 의한 영향

Kim & Baird(1976,b)에 의하면 perforated plate의 경우 U_c 증가에 따라 축방향 분산은 거의 일정하며,⁵⁾ Karpacheva(1974, b)는 KRIMZ plate의 경우 U_d 증가에 따라 축방향분산은 오히려 감소한다고 하였다.³⁾

이는 KRIMZ plate에서는 일반적으로 perforated plate에 비하여 반경방향 혼합효과가 좋고 동일 pulsation intensity(Af)에서 U_d 증가에 따라 반경방향 혼합이 증대되기 때문이라고 하였다.³⁾

본 실험에서도 Fig.6,7과 같이 perforated plate의 경우 U_c, U_d 증가에 따라 축방향 분산이 약간 증가하는 경향을 나타내었으나 fan plate의 경우는 최대값을 나타내는 경향을 보였다. 이는 fan plate에서 σ 값이 비교적 크므로 낮은 U_c, U_d 에서는 액의 편류 현상이 지배하게 되어 축방향분산이 증가하나 U_c, U_d 가 증가할 수록 fan에 의한 반경방향 혼합효과가 지배하게 되어 축방향분산이 감소한다고 할 수 있다.

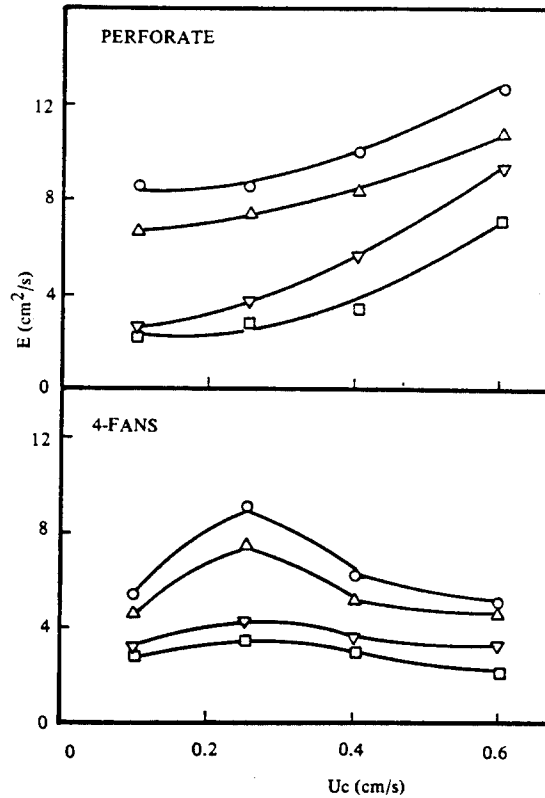


Fig. 6. Effect of continuous phase velocity on axial dispersion coefficient at $U_d = 0.25$ cm/s, $A = 1.27$ cm

symbol	○	△	□	▽
f (Hz)	0.5	1.0	2.0	3.0

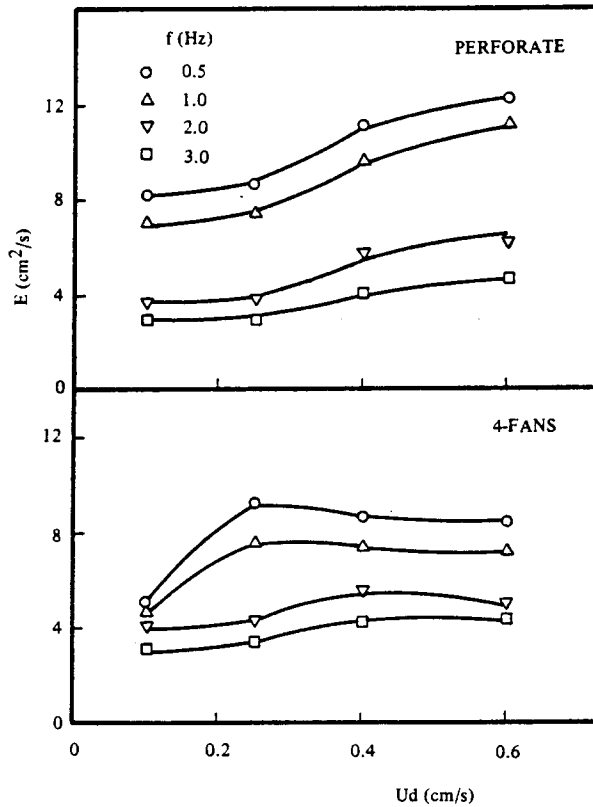


Fig. 7. Effect of dispersed phase velocity on axial dispersion coefficient at $U_c = 0.25$ cm/s, $A = 1.27$ cm

나. 상체류량

일반적으로 맥동진폭과 주파수를 변화시킬 때 같은 agitation rate (Af)에 대하여 같은 분산상의 상체류량을 나타내며, Af 가 증가함에 따라 어떠한 Af 에서 분산상의 상체류량은 최소값을 나타내고 다시 증가한다.^{8) 9)}

본 실험에서도 Fig.8 과 같이 Af 증가에 따라 분산상의 상체류량이 최소값을 나타내었으며, 동일 Af 에서 자유행로면적분율 증가에 따라 상체류량은 감소하였다.

한편 비슷한 σ 값을 갖는 배열 1,3,6의 경우 plate geometry에 관계없이 동일 Af 에서의 분산상의 상체류량은 같은 값을 나타내었다.(Fig.9)

또한 U_c 와 U_d 증가에 따라 분산상의 상체류량은 증가하였으나 그 증가폭은 U_d 에 더 큰 영향을 받는 것임을 알 수 있다.(Fig.10, 11)

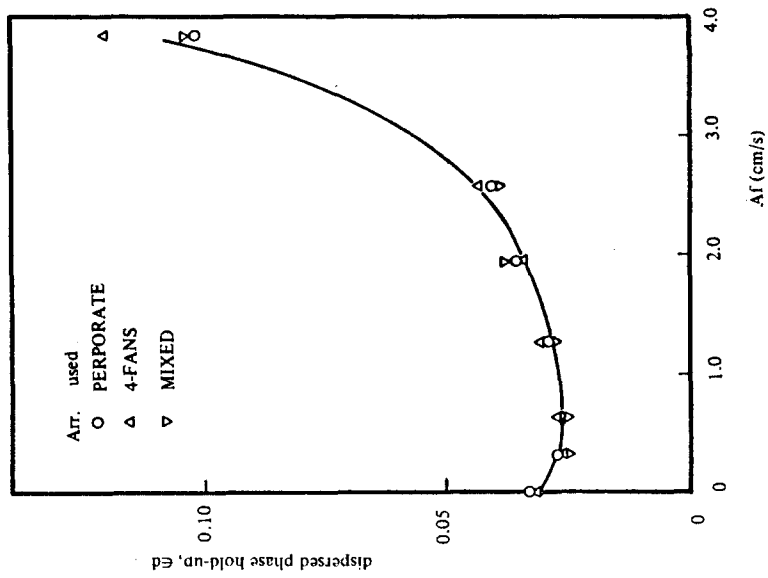


Fig. 9. Effect of agitation rate on the dispersed phase hold-up at $U_c = U_d = 0.25$ cm/s.

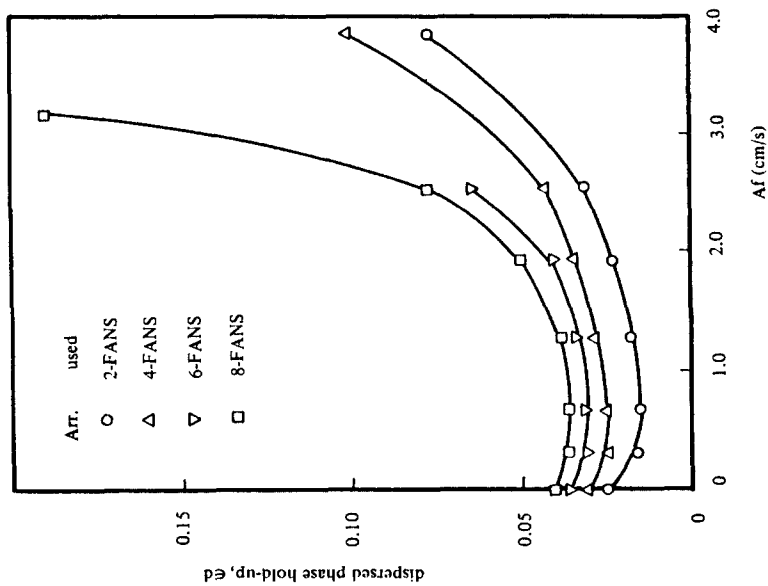


Fig. 8. Effect of agitation rate on dispersed phase hold-up at $U_c = U_d = 0.25$ cm/s.

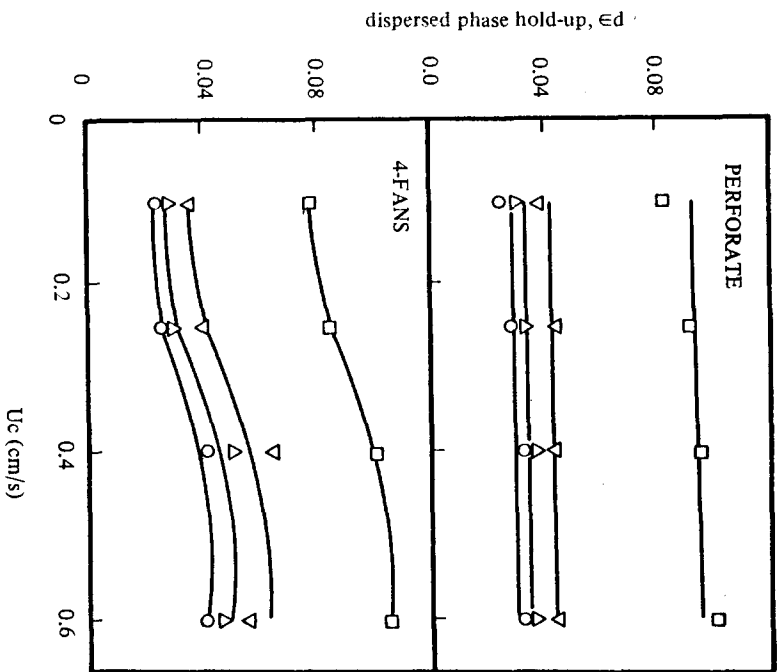


Fig. 10. Effect of continuous phase velocity on dispersed phase hold-up at $U_d = 0.25$ cm/s, $A = 1.27$ cm.

symbol \circ \triangle ∇ \square
 f (Hz) 0.5 1.0 2.0 3.0

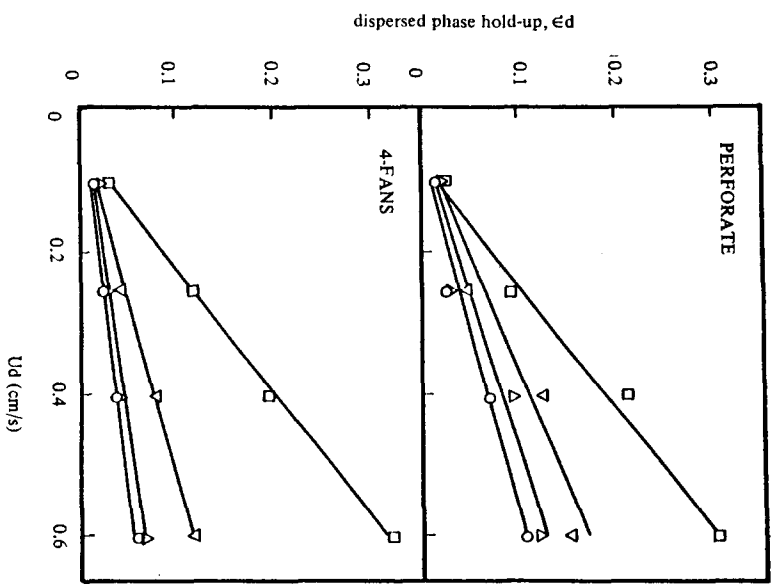


Fig. 11. Effect of dispersed phase velocity on dispersed phase hold-up at $U_c = 0.25$ cm/s, $A = 1.27$ cm.

symbol \circ \triangle ∇ \square
 f (Hz) 0.5 1.0 2.0 3.0

다. 상관식

(1) 측방향분산계수

본 실험에서는 perforated plate의 자유행로면적분율이 매우 크고, 또한 fan plate와는 다르게 반경방향 혼합을 증가시키므로서 측방향 분산계수가 A^2f 에 대하여 상관되는 경향을 나타낸다.

즉 $A \geq 2.54 \text{ cm}$ 의 경우는 hindered eddy regime에 해당되어 주파수 증가에 따라 측방향분산이 증가하나 $A < 2.54 \text{ cm}$ 에서는 free eddy regime에 해당되어 측방향분산이 최대값을 보이고 감소하는 경향으로 나타났다. 따라서 $A \geq 2.54 \text{ cm}$ 인 경우와 $A < 2.54 \text{ cm}$ 인 경우로 각각 구분하여 다음과 같은 상관식을 얻었다.

$$E = (15.08 - 1.816A^2f) U_c^{0.01} U_d^{0.16} \sigma^{0.73} : \text{for } A < 2.54 \text{ cm}$$

$$E = (10.378 + 1.292A^2f) U_c^{0.46} U_d^{0.20} \sigma^{0.39} : \text{for } A \geq 2.54 \text{ cm}$$

(2) 상체류량

본 실험에서 상체류량이 Af 에 대하여 증가하는 경향을 보였으며, 또한 상체류량에 영향을 미치는 변수로서 자유행로면적분율, 연속상 및 분산상의 속도등이 있으므로 다음과 같은 상관식을 얻었다.

$$\epsilon_d = 1.321 \times 10^{-1} (Af)^{0.67} U_c^{0.22} U_d^{0.93} \sigma^{-0.6}$$

4. 결 론

1. 측방향분산계수는 A^2f 와 잘 상관되었다.
2. Hindered eddy regime에서 측방향분산계수는 주파수와 진폭증가에 비례하였으나 free eddy regime에서는 오히려 감소하였다.
3. perforated와 fan plate를 혼합하여 배열한 경우 이들을 각각 단독으로 사용하였을 경우보다 측방향분산이 감소하였다.
4. 분산상의 상체류량은 평균자유행로 면적분율 증가에 따라 감소하였으며, 자유행로면적분율이 비슷한 경우에는 plate 형태에 따라서 차이가 없었다.
5. 분산상 및 연속상 속도증가에 대하여 상체류량은 증가하였으나 분산상의 속도변화에 비하여 연속상의 속도변화에 따른 상체류량의 증가폭은 매우 작았다.

REFERENCE

- 1) Baird M.H.I., "Axial Dispersion in a Pulsed Plate Column", Can. J. Chem. Eng., 52, 750-757 (1974)
- 2) Hafez M.M., M.H.I. Baird and I. Nirdosh, "Flooding and Axial Dispersion in Reciprocating Plate Extraction Column", Can. J. Chem. Eng., 57, 150-158 (1979).
- 3) Karpacheva S.M. and E.I. Zakharov., "Hydrodynamic Characteristics of various system in Pulsed Extraction Columns with KRIMZ Plates", Zhur. Priki. Khim. (Translation)., 47, 339-343 (1974).
- 4) Kim S.D. and M.H.I Baird, "Axial Dispersion in a Reciprocating Plate Extraction Column"; Can. J. Chem. Eng., 54, 81-89 (1976,a).
- 5) Kim S.D. and M.H.I Baird, "Effect of Hole Size on Hydrodynamic of a Reciprocating Perforated Plate Extraction Column", Can. J. Chem. Eng., 54, 235-237 (1976,b).
- 6) Levenspiel D. and W.K. Smith, "Notes on the Diffusion-type Model for the Longitudinal Mixing of Fluid in Flow", Chem. Eng. Sci., 6, 227-233 (1957).
- 7) Rosen A.M. and V.S. Krylov, "Theory of Scaling up and Hydrodynamic Modeling of Industrial Mass Transfer Equipment", Chem. Eng. J., 7, 85-97 (1974).
- 8) Sege G. and F.W. Woodfield, "Pulsed Column Variables", Chem. Eng. Prog., 50, 8, 396-402 (1954).
- 9) Yu.Y.H. and S.D. Kim, "Axial Dispersion, Hold up and Flooding Characteristics in Pulsed Extraction Columns", Can. J. Chem. Eng., 65, 752-758 (1987).

ABSTRACT

Axial dispersion and dispersed phase holdup characteristics of a reciprocating plate extraction column in which six different plate arrangement have been investigated.

The axial dispersion coefficient were correlated in terms of $A^2 f$ which has the same dimension of axial dispersion coefficient. The minimum value of $A^2 f$ increased with increase in free opening area fraction of plate.

Dispersed phase holdup increased with the continuous phase velocity but it was relatively insensitive to changes in the dispersed phase velocity. Dispersed phase holdup decreased with an increase in free opening area fraction of plate.