

## Disk-Doughnut형 맥동탑내에서의 액적입경 분포와 체유량

김 홍 · 박방삼 · 박헌휘\* · 이보성

충남대학교 화학공학과 \*한국에너지연구소

(1982년 11월 12일 접수, 1983년 10월 14일 채택)

## Drop-size Distribution and Holdup in a Pulsed Disk-Doughnut Extraction Column

Hong KIM, Bang-Sam PARK, Hun-Hwee PARK, Bo-Sung RHEE

*Department of Chemical Engineering, Chungnam National University*

*\*Korea Advanced Energy Research Institute*

(Received 12 November 1982 ; Accepted 14 October 1983)

### 요 약

Disk-doughnut판을 충전한 맥동추출탑내에서의 분산상의 체유량과 액경분포를 고찰하였다. 맥동탑의 내부직경은 46.6mm, 판간거리는 25mm, 1mm두께의 304스테인레스 스틸로 제작된 disk판과 doughnut 판은 각각 23%의 자유면적을 갖고 총 48개의 판으로 충전되어 있으며 130cm 유효높이의 기하학적 제원을 갖는 장치를 사용하였다.

연속상으로는 일차증류수를, 분산상으로는 methyl-isobutyl-ketone(이하MIBK로 칭함)의 단일계를 사용하였으며 맥동진폭, 진동수 및 각 상의 유량의 변화에 따른 체유량 및 액경분포를 고찰하였다. 낮은 진동에너지에서는 위치에 따른 국부 체유량값이 거의 일정하였으나 진동에너지가 증가할수록 탑의 중간위치에서 국부체유량값이 최대가 되었고 Flooding이 일어나기 직전의 진동에너지에서는 하단부에서 최대의 국부체유량값을 나타내었으며, 실험조건의 범위내에서는 평균체유량이 연속상의 유속에 무관함을 알 수 있었다. 한편 분산상의 평균액경(Sauter mean dia.)은 Upper-limit law에 의하여 비교적 근사하게 나타낼 수 있었다.

**Abstract**—Two important hydrodynamic parameters, hold up and drop size were studied in a disk-doughnut plate extraction column. The column was 46.6mm in diameter (I.D) and contained 48 plates with 25mm plate spacing. Stainless steel made plate (1mm thickness) has a 23% free area. Methyl-isobutyl-ketone was used as the dispersed phase with water as the continuous phase.

According to the intensity of pulse energy, three different patterns of local holdup were shown. Within the operating conditions. The effect of the continuous superficial velocity on mean hold up can safely be ignored.

Upper-limit law can fairly well describe the experimentally obtained drop size distribution.

## 1. 서론

맥동추출탑에서 널리 사용되는 형태로 다공판 탭이 주종을 이루고 있으나 슬러지가 함유된 유체를 처리하는 공정에서는 다공판의 Clogging현상으로 보수 유지에 심각한 문제를 야기시킴에따라 여러가지 변형된 형태의 방해판을(1~4)사용한 장치에서 액상간의 접촉효율에 관한 연구가 지속되어왔다.

따라서 특정형태의 방해판을 사용한 맥동탑의 설계에있어서는 우선 hydrodynamic Parameters인 분산상의 체유량과 액경분포를 구함으로써 축방향 혼합에 관한 실험자료를 해석할 수 있으며 물질전달 면적을 결정하여 상간의 물질전달 속도를 구할수 있다.

본 연구에서는 공히 23%의 자유면적을 갖는 disk, doughnut형태의 방해판을 번갈아 충전한 맥동탑을 사용하여 국부체유량을 측정하였고 액적을 촬영하여 측정된 액경분포를 기준하는 함수관계로 나타내었다.

## 2. 실험

### 2 - 1. 실험장치

실험장치의 구성을 Fig1.에 나타내었다. 탑은 46.6mm의 내경을 갖는 중간두께 borsilicate glass t-

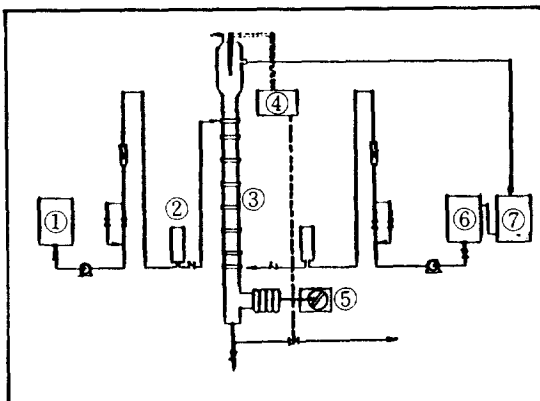


Fig. 1. Schematic diagram of pulsed column apparatus. 1: Aqueous inlet tank. 2: Accumulator. 3: Column. 4: Liquid level controller. 5: Pulse generator. 6: Organic inlet tank. 7: Organic outlet tank.

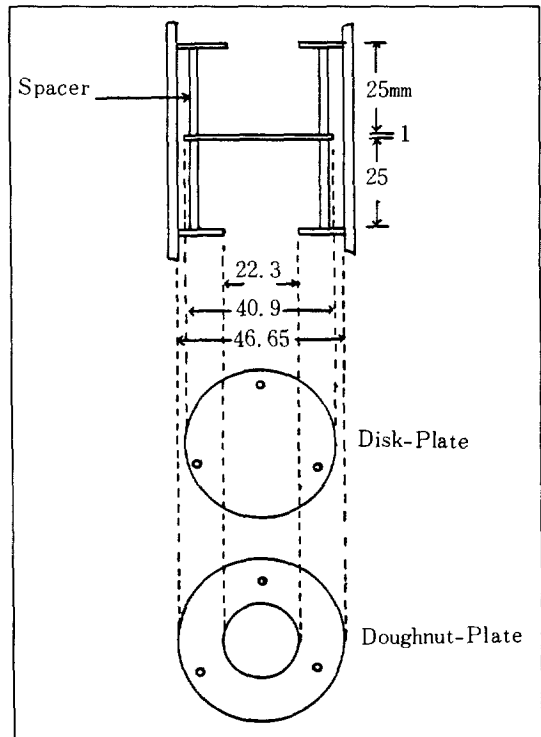


Fig. 2. Geometry of disk-doughnut plates.

ubing을 사용하였고 disk doughnut판에 각각 120° 간격으로 3 개의 구멍을 위치시켜 탑내에서 2mmφ tie rod와 spacer를 사용하여 (Fig 2) 판들을 고정시킬수 있도록 하였으며 각 tubing section은 시료채취구가 부착된 스테인레스 스틸 연결구에 맞도록 가공하여 상, 중, 하단부 3 개소에서 외부의 tie rod로 고정시켜 분해조립이 용이하게 하였다. 탑의 상단부에서는 관경을 늘려서 유기상이 쉽게 분리되도록 하였으며 맥동은 탑의 하단부에 sanitary joint로 부착시킨 T자형의 유리관에 채워진 유체를 통하여 전달되도록 하였다. 분산상 인입노즐은 40mm 두께의 스테인레스 스틸 실린더 형태에 내경이 같도록 가공된 30° 간격의 1mm직경의 구멍을 갖는 테프론 실린더를(안쪽으로 10mm직경의 홈이 파여져 있음) 삽입하여 분산상이 균일하게 인입되도록 하였다.

맥동은 1HP 변속모터축에 연결된 variable cam에 의하여 구동되는 100mmφ Teflon Bellows에 의하여 전달된다. disk, doughnut판의 세부제원은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Dimension of column

Inside diameter, mm	46.6±0.1
Plate Spacing, mm	25.0
Thickness of Plate, mm	1
Free area of Plate %	23

## 2-2. 실험방법

본 실험에서는 연속상으로는 일차증류수를, 분산상으로는 MIBK의 단일계를 사용하였다. 독립조업 변수는 진동수, 진폭, 두상의 유속비로써 Table 2에 조업조건의 범위를 표시하였다.

일단 조업이 정상상태에 도달하면(60~80min소요) 탑의 상부로부터 시작하여 6개소의 시료채취구로부터 각 50cc의 시료를 채취한다. 이때 채취된 시료에 의한 영향을 관찰하기 위하여 acetic acid(3Wt%)를 연속상에 투입하여 전기전도도를 측정할 결과 각 시료채취구로부터의 시료채취는 최소 15min이상의 간격을 필요로 함을 알수 있었다.

Table 2. Variables of Operation

Variables	Nomenclature	Units	Range of operation
Frequency	f	RPM	25~200
Amplitude	A	mm	6.25~25
Flow rate ratio	$R_o/a$ ( $=Q_d/Q_c$ )		0.5~4

이와같이 채취한 시료를 정제 분리시킨후 전체부에 대한 분산상의 부피의 비로 국부체유량을 결정하였다.

분산상의 액경분포는 탑의 중간부위에서 측정하였는데(분산상 인입노즐 상단 20cm 및 탑 상단부 3개소에서 예비 촬영한 결과 10%범위내에서 평균 액경의 차이를 나타내었으나 측정오차 범위로 간주하여 한 위치에서 촬영 하였다. (결과 고찰 참조) 촬영 부위에는 perspex box를 부착, 연속상을 채워서 곡면에 의한 영상의 찌그러짐을 방지할 수 있도록 하였고 조명은 액적의 밀도에 따라 측면 및 반대편에서 slit를 통하여 초점면을 맞추도록 하였고 노출계를 사용하여 적정 노출시간을 결정하였는데 500W

tungsten halogen lamp를 사용 수행한 실험조건내에서는 1/1000~1/1500sec로 충분하였다. 촬영은 Nikon F-II motor driven Camera에 f/2.8 55mm micro lens 및 short focusing extension tube를 부착하여 수행하였다.

필름은 Kodak Plus-Xpan을 사용하였으며 contrast를 증가시키기 위해서 Y-2 yellow filter를 아울러 사용하였다.

현상된 36mm필름은 NAC-Sportias Gp-1000 Film Analyzer로 250~400개의 액경을 세었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 체유량

1). 국부 체유량에 미치는 진동수의 영향

Fig 3에서 보는바와 같이 같은 판간거리, 진폭의 조업조건하에서는 진동수의 증가에 따라 체유량은 증가하는 현상을 나타내었다. 그러나 탑의 위치에 따른 6개소의 시료채취부에서 얻은 국부체유량의 분

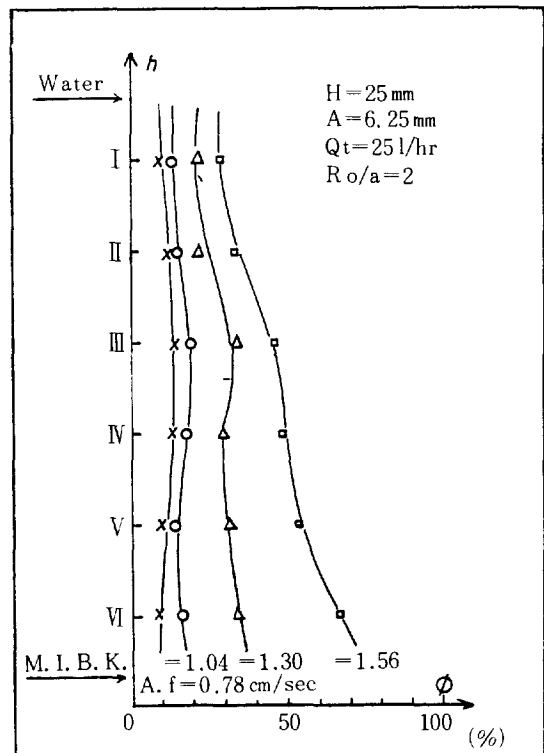


Fig. 3. Effect of frequency on local holdup.

포는 동일한 유형을 나타내지 않았다. 즉, 낮은 진동수에서는 탑의 위치에 무관하게 거의 일정한 값을 나타내었으나 진동수가 증가할수록 탑의 중간 부위에서 높은 국부체유량 값을 나타낸 반면 flooding이 일어나기 직전의 진동수 ( $A \cdot f = 1.56$ )에서는 하단부에서의 체유량값이 증가하는 현상을 나타내었는데 이와같은 현상은 유속비에 무관하게 같은 경향을 나타내었다.

2) 평균체유량에 미치는 연속상의 유속의 영향.

6 개소 국부체유량의 산술 평균치를 평균체유량으로 하고 판간거리, 진폭을 일정하게 유지시키고 분산상의 유속을 16.63 l/hr 하에 연속상의 유속을 0 ~ 25 l/hr로 변화시켰을때 연속상의 유속은 평균체유량에 큰 영향을 미치지 않음을 알수있다. (Fig. 4) 이와같은 현상은 맥동의 전이속도 (Transition Velocity)가 연속상의 겉보기 속도보다 크기때문인것으로 판단되며 Schmel [16] 등의 실험결과와 일치한다.

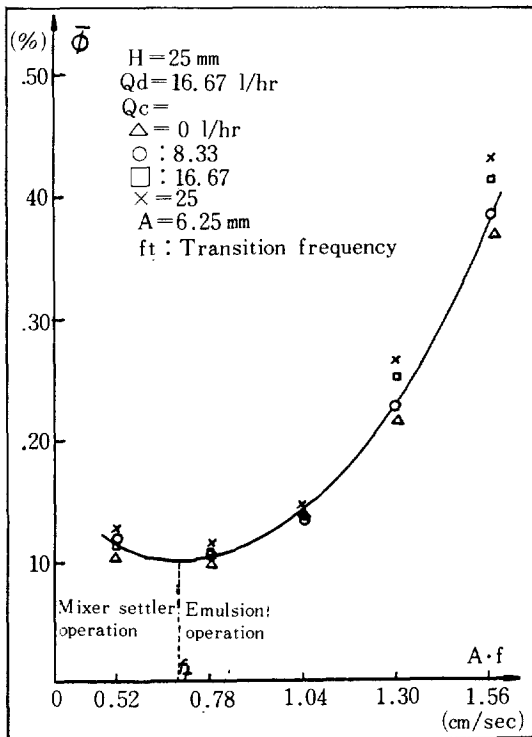


Fig. 4. Effect of continuous phase flow rate on mean holdup.

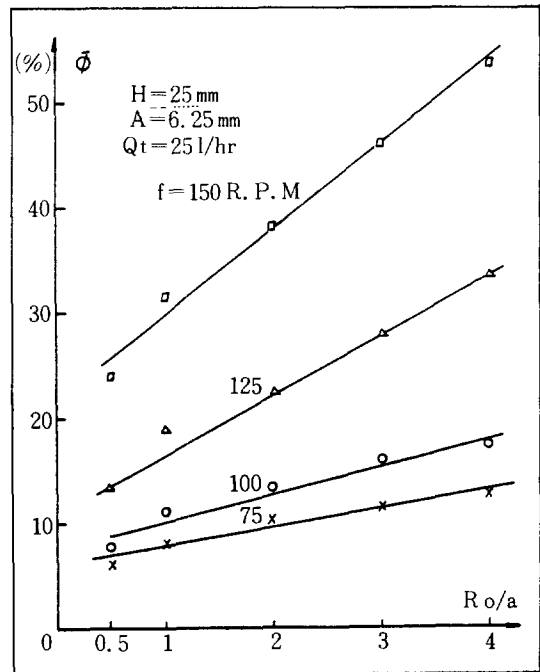


Fig. 5. Effect of flow rate ratio on mean holdup.

3) 평균체유량에 미치는 유속비의 영향

판간거리가 25mm이고 진폭이 0.625cm로 일정할때 각 진동수에서 분산상의 유속에 대한 연속상의 유속의 비를 0.5에서 4까지 변화시켰을때의 평균 체유량을 Fig 5에 나타내었다. 연속상의 평균 체유량은 유속비가 증가함에 따라서 모든 진동수에서 직선적으로 증가했으며 낮은 진동수에서 보다 높은 진동수에서 체유량의 증가속도가 큰을 알수있다.

4) 평균 체유량에 미치는 맥동속도의 영향

Fig 6에 전체유량이 일정한 조건하에서 평균 체유량에 미치는 맥동속도의 영향을 나타내었다. 그림에서 보는 바와같이 모든 유속비에서  $A \cdot f$ 값이 증가함에 따라 평균 체유량의 값이 증가함을 알수있으며 같은  $A \cdot f$ 값에서는 유속비가 증가할수록 체유량이 증가한다.

5) 평균 체유량이 상관관계식

수행한 장치의 기하학적 제한하에서 검토한 실험 결과로부터 평균 체유량은 연속상의 유속에 무관하다는 사실로부터 다음과 같은 형태의 상관관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi = a F_a^b (A \cdot f)^r$$

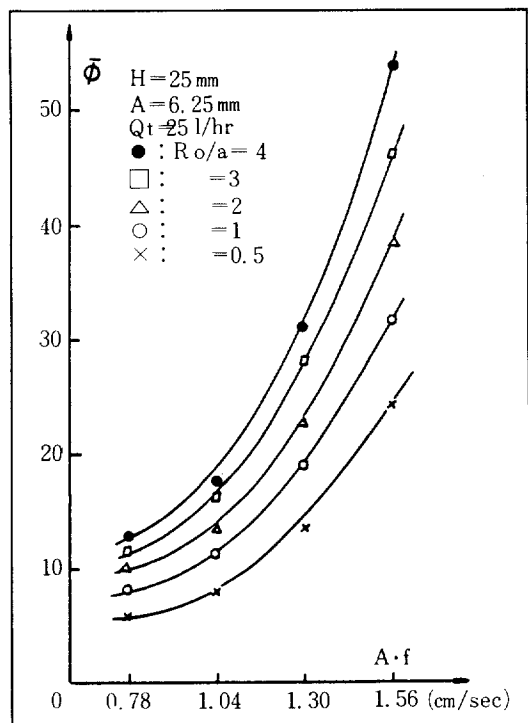


Fig. 6. Effect of pulse intensity ( $A \cdot f$ ) on  $\phi$  (혹은 Mean Hold up)

여기서  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 구하고자 하는 상수이며 상기식의 형태로 실험결과를 중회귀분석 처리한 결과는 (1)식과 같다.

$$\phi = 0.53 F a^{0.93} (A \cdot f)^{2.44} \quad (1)$$

(1)식을 사용하여 실험결과를 5% 범위내에서 나타낼수 있었으며 (1)식을 사용한 예측치와 실험치를 Fig. 7에 나타내었다.

### 3-2. 액경 분포

관찰에 의하면  $A \cdot f$ 값이 비교적 낮은 경우 최대빈도의 액경보다 매우 큰 액적이 꽤 많이 존재하였다. 맥동에 의한 액적의 분산 형태를 살펴보면 Fig. 8과 같이 원판을 지날때와 동심원판을 통과할때 와류의 방향은 서로 반대이며 원판을 통과할때 액적의 분산이 일어나 최대빈도에 해당하는 액적을 형성하고 동심원판을 지날때 합체 현상을 나타내었다. 그러나 맥동 에너지가 증가함에 따라 액적의 평균 액경은 작아지고 합체에 의하여 형성되는 큰 액적

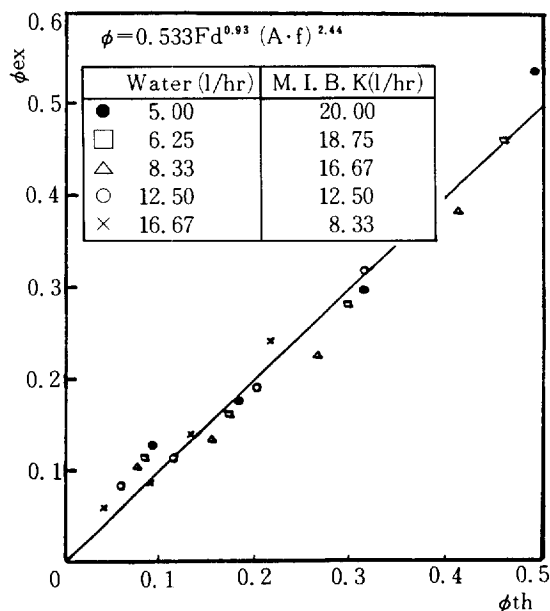


Fig. 7. Predicted Vs. Experimental holdup values

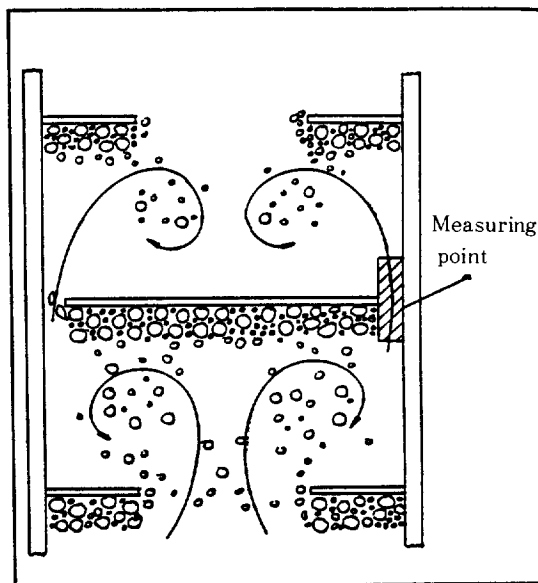


Fig. 8. Flow of two immiscible fluids between disk plate and doughnut plate.

의 수는 현저히 감소하여 비교적 균일한 액경 분포를 나타냄을 알수 있었다.

따라서 낮은  $A \cdot f$ 값에서는 촬영부위의 선정이 중요하게 된다 (Fig. 8)

그러나 액적의 형성밀도가(Population Density) 낮은 경우는 (낮은  $A \cdot f$  값) 환경에, 상당하는 와류에 의하여 큰 액적의 액적이 촬영면을 통과하는 경우는 무작위적이라고 판단하기 어렵기 때문에 사진 촬영에 의한 액적 분포의 측정에 피할 수 없는 오차를 초래한다고 판단된다.

한편, 판독에 따르는 어려움을 줄이기 위하여 탐의 위치에 따른 평균 액적의 변화를 관찰한 결과 분산상의 인입노즐 상단 20cm 이상에서는 측정된 세 위치에서 약 10%의 평균액적 차이를 나타내었다. 이는 상의 중첩현상(Coincidence effect) 및 위에서 설명한 바와 같이 큰 액적이 초점면에 위치하는 경우가 무작위적이 아닌 이유등으로 실험오차 범위내로 간주하여 탐의 중간부위 한 위치에서 액적을 촬영하였다.

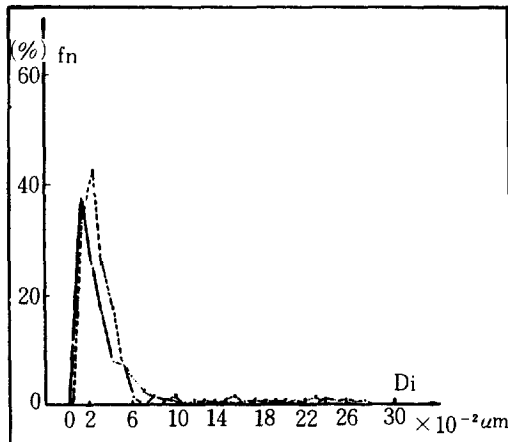


Fig. 9. Typical frequency curves for drop size

#### 1) 액적분포 함수

측정 액적 분포를 기존하는 확률분포 함수 및 실험식들로 나타내고자 시도 하였다. 대표적인 측정 액적 분포를 Fig. 9에 표시 하였다.

그림에서 보는 바와같이 액적이 큰 액적의 분포가 넓게 퍼져있고 낮은 빈도수를 갖고 있으므로 단일 분포 함수로 나타내기는 힘들다는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 Mugele-Evans식(14)에 의하여 종축은 cumulative volume percent, 횡축은 reduced diameter,  $U_i$ 로 나타낸 결과로써 비교적 근사하게 실험 측정 결과를 나타낼 수 있었으나 낮은  $A \cdot f$  값에서는 작은 액적에서의 편차가 비교적 크다. 이와같은

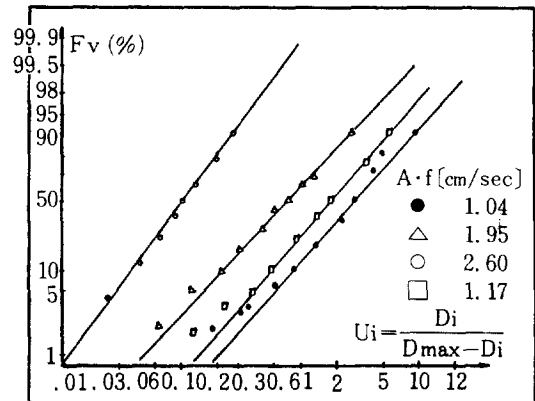


Fig. 10. Upper Limit analysis of drop size data.

결과는 육안으로 관찰한 바와같이 액적 분포가 unimodal로 보기에 는 어려울 정도로 작은 액적과 큰 액적이 함께 형성되기 때문이라고 판단된다.

Fig. 11은 Rosin-Rammler 식으로 측정분포를 나타낸 것으로 모든  $A \cdot f$  값에 대하여 잘 일치하였으나  $d_{32}$  (Sauter-mean diameter) 값이 측정치보다 작게 나타난다.

기타 Square root normal law, gamma law, Weibull law, Gal-Or law 등을 적용시켰으나 모든 실험 조건에 적용시킬 수 있는 만족할만한 결과를 얻지 못하였다.

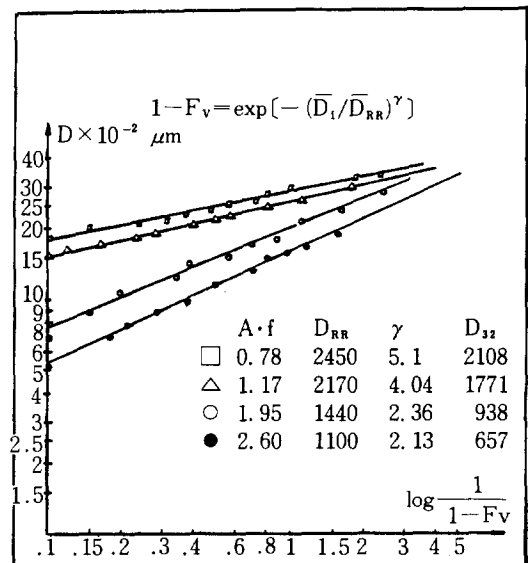


Fig. 11. Rosin-Rammler Analysis of drop size data

## 2) 평균 액경의 상관관계식

기계적 에너지에 의한 액적의 분산기구를 설명하기 위하여 Kolomogoroff의 국부등방성 난류 이론이 널리 받아들여지고 있다. [3, 10-12]

즉, 난류내에 있는 아주 작은 체적의 유체가 국부적 등방성을 갖는다고 가정하면 이들 작은 액적들은 변이속도에 의한 관성력과 점성에 의한 전단 응력장에 노출되며 Kolomogoroff의 와류척도보다 액경이 훨씬크고 장치계의 기하학적 체원보다는 아주 작다면 점성력은 무시할 수 있다. (Kolomogoroff's inerfia Sub-range)

두 액상의 밀도와 점도가 크게 다르지 않다는 추가 가정하에 액적은 구형을 유지 하면서 주위의 유체내에서 끊임없이 진동한다. 액적의 변형이 커지면 액적은 불안정하게 되어 마침내는 진동에 의한 운동 에너지가 변형 억제력인 계면장력보다 커져서 액적은 더 작게 깨어진다. 이 두 상이한 에너지의 비를

$$We = \frac{\overline{U^2(d)}}{\sigma} \quad (2)$$

한편 관성 영역에서

$$\overline{U^2(d)} = C_1 \epsilon^{2/3} d^{2/3} \quad (3)$$

(3)식과 함께  $\epsilon$ 를 평균에너지  $\bar{\epsilon}$ 로 나타낼 수 있다는 가정하에 [11, 12] (2)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$We = C_1 \frac{\rho}{\sigma} \bar{\epsilon}^{2/3} d^{5/3} \quad (4)$$

Hinze[11], Shinnar와 Church[12]등은 액적이 깨어지지 않고 전달 수 있는 최대 액경을  $d_{max}$ 로 정의하고 이때  $We$ 는 난류정수라고 하였다.

$$\text{따라서 } d_{max} \propto \left(\frac{\rho}{\sigma}\right)^{0.6} \bar{\epsilon}^{-0.4} \quad (5)$$

교반조내에서의 액적형성 기구와 맥동탑에서의 형성기구를 상사성으로 해석하여 유체에 전달된 동력을 측정 가능한 변수로 나타내면

$$Po = P/N^3 L^5 \rho \quad (6)$$

$$Po = F(\pi L) N \quad (7)$$

$$V_{per} = (\pi L) N \quad (8)$$

한편  $Po$ 는 임계  $Re$ 값 이상에서는 일정한 값을 갖는다. 따라서 (6)(7)(8)식으로 부터 단위 질량의 유체

에 전달된 에너지 ( $P_M$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_M &\propto N^3 L^3 / h \\ &\propto V^3 \text{ per } h \end{aligned} \quad (9)$$

회전날개의 주변속도,  $V_{per}$  (cm/sec)에 의하여 전달되는 에너지  $P_M$ 를 맥동속도 평균에너지  $\bar{\epsilon}$ 로 나타낼 수 있고 교반날개 높이 ( $h$ )를 판간거리 ( $H$ )로 대체할 수 있다면

$$\bar{\epsilon} \propto (A \cdot f)^3 / H \quad (10)$$

(10)식을 (5)식에 대입하고  $d_{32} = C_2 d_{max}$ 라는 결과 [7, 17]를 이용하면 다음식과 같은 일반 형태의 액경 상관관계식을 얻을 수 있다.

$$d_{32} = C_3 (\sigma/\rho)^{0.4} H^{0.8} (A \cdot f)^{0.6} \quad (11)$$

계의 물리적 성질과 판간거리가 일정한 경우 (11)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{32} = C_7 (A \cdot f)^{0.6}$$

최소자승법에 의하여 상수값을 구하면

$$d_{32} = 2.398 (A \cdot f)^{-0.862} \quad (12)$$

측정 결과로 부터 구한  $d_{32}$ 값과 Upper limit, Gamma, Weibull식을 이용하여 구한  $d_{32}$ 값을 Fig. 12에 나타내었다. 측정치, Upper-limit, Gamma식에 의하여 구한값은  $\pm 20\%$  범위의 오차로 나타나고 Weibull, Rosin-Rammler식으로 구한 평균액경은 대체로 상관관계식으로 나타낼 수 있는 값보다 낮게 나타난다.

## 4. 결론

## 1) 분산상의 체유량은

—맥동속도 ( $A \cdot f$ )에 큰 영향을 받는다.

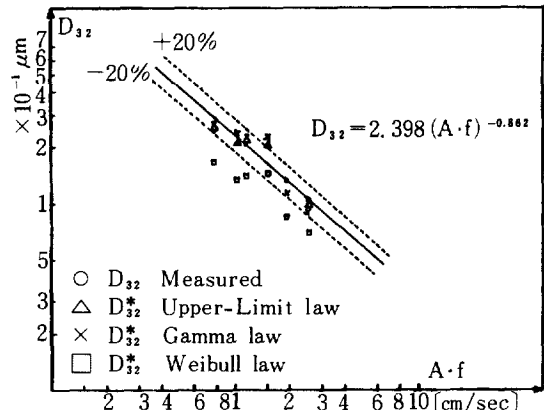


Fig. 12. Functional Relationship of Sauter-Mean Diameter

—실험범위내에서는 연속상의 유속에 따른 영향은 무시할 수 있으며 분산상의 유속에 영향을 받는다.

2) 실험결과로부터 다음 형태의 체유량의 상관관계식을 얻을수 있었다.

$$\phi = 0.533 F_a^{0.93} (A \cdot f)^{2.44}$$

3) 측정액경 분포는 Upper-limit 분포함수 및 Rosin-Rammler식으로 잘 나타낼 수 있었고 판간거리와 계의 물리적 특성치가 일정한 경우 평균액경( $d_{32}$ )는 다음의 함수관계로 나타낼 수 있다.

$$d_{32} = 2.398 (A \cdot f)^{-0.882}$$

이 식을 사용하여 측정분포로부터 구한  $d_{32}$  및 Upper-limit식과 Gamma식으로 부터 구한  $d_{32}$  값을  $\pm 20\%$  범위내에서 나타낼 수 있었다.

### \* Nomenclature \*

A	: Amplitude (cm)
Ci	: Const. (i=1, 2, 3) in each equation
d	: Droplet diameter (cm)
$d_{32}$	: Sauter mean diameter (cm)
f	: Frequency (Cycle/sec)
h	: Impeller height (cm)
H	: Plate Spacing (cm)
L	: Stirrer length (cm)
N	: Stirrer speed (r/sec)
Po	: Power Number ( $=P/N^3 L^5 \rho$ )
Fd	: Superficial Velocity of the dispersed phase (cm/sec)
Vper	: Peripheral speed of the stirrer blade (cm/sec)
Ro/a	: Flow rate ratio ( $=Q_d/Q_c$ )
Qc	: Continuous phase flow rate (l/hr)
Qd	: Dispersed phase flow rate (l/hr)
$\phi$	: Holdup
$\epsilon$	: Dissipation energy per Unit mass (erg)
$\rho$	: Density (g/cm <sup>3</sup> )
$\sigma$	: Interfacial tension (dyne/cm)

$\phi$  : Arithmetic mean holdup

### \* Reference \*

1. Geier, R. G.: U. S. At. Energy Comm. Rept. HW 49542 A, April (1957).
2. Sege, G. and Woodfield, R. W.: Chem. Eng. Progr. 50, 396 (1954).
3. Burandet, J. and Talmont, X.: Nuclear Engineering and science Conference Reprint (1960).
4. Burkhan, L. E. and Fahien, R. W.: U. S. At. Energy Comm. Rept. Isc-1095, (1958).
5. Park, H. H.: Ph. D. Thesis National Polytechnic of Toluse, (1980).
6. Chem, M. T. and Middleman, S.: AIChE. J., 13, 989 (1967).
7. Sprow, F. B.: Chem. Eng. Sci., 22, 435 (1967).
8. Maden, A. J. et al.: Chem. Eng. Sci., 19, 506 (1964).
9. Keey, R. B.: Brit. Ch. Eng., 12, 1081 (1967).
10. Batchelor, C.: Proc. Roy. Soc., A193, 539 (1948).
11. Hinze, J. O.: AIChE. J., 1, 289 (1955).
12. Shinnar, R. and Church, J. M.: I & EC., 52, 345 (1960).
13. Kim, H.: M. S. Thesis, Chungnam. National University (1982).
14. Mugele, R. A. and Evans, H. D.: Ind. Eng. Chem., 43, 1317 (1951).
15. Rosin, P. and Rammler, E.: Ver. Deut. Ing., 71, 1 (1927).
16. Schmel, G. A. and Babb, A. L.: I & EC, 2, 38 (1963).
17. Brown, D. E. and Pit, K.: Chem. Eng. Sci., 29, 345 (1974).
18. Horvath, M., Steiner, L. and Hartland, S.: Can. J. Chem. Eng., 59, 9 (1978).
19. Davies, J. T.: "Turbulence Phenomena" Academic Press (1972).