

## 액-액 교반조에서 동력소모량과 액적크기

박영태\* · 최호상\* · 이성희\*\* · 도갑수

\* 경북개방대학 공업화학과

\*\* 경북지방공업시험소

승실대학교 공과대학 화학공학과

(1986년 8월 1일 접수, 1986년 12월 15일 채택)

## A Study on Power Consumption and Drop Size in Liquid-Liquid Agitating Vessel

Young-Tae Park\*, Hosang Choi\*, Sung-Hee Lee\*\* and Kap-Soo Doh

\* Dept. of Ind. Chem., Kyungbuk Open Univ., Taegu 635

\*\* Kyungbuk Provincial Ind. Testing Center, Taegu 630

Dept. of Chem. Eng., Soong Sil Univ., Seoul 151

(Received 1 August 1986; accepted 15 December 1986)

### 요 약

방해판이 설치된 교반조에서 MIBK-water, i-amylalcohol-water, n-hexane-water, toluene-water 계를 사용하여 체류량이 큰 상태에서 동력소모량과 액적크기를 측정하였다.

각 계의 동력소모량에 대한 체류량 및 계의 특성에 따른 무차원 상관관계식을 다음과 같이 제시하고 이 식에서 계산한 값과 실측치를 비교검토 하였다.

$$P_L/P_o = 3.38 (1 - 0.53 \rho_c / \rho_d) N_{we}^{0.38} \phi^{-0.9}$$

액적크기는 사진촬영법으로 측정하였다. 액적크기에 대한 체류량의 영향은 직선적인 관계를 보였고, Weber 수와의 관계는 다음식으로 표시할 수 있었다.

$$D_{32}/L = C (1 + B\phi) N_{we}^{-0.51}$$

**Abstract**—An experimental study was carried out to investigate the dynamic characteristics of a power consumption and drop size in the liquid-agitating vessel with 4-baffle plates for the MIBK-water, iso-amylalcohol-water, n-hexane-water, and toluene-water system.

The power consumption for each system was measured for each experimental variables. A dimensionless correlation for the power consumption was determined in relationship to the physical properties of the system, the hold-up, and the Weber number as follows:

$$P_L/P_o = 3.38 (1 - 0.53 \frac{\rho_c}{\rho_d}) N_{we}^{0.38} \phi^{-0.9} \quad \text{for } \phi = 0.2 - 0.5, N_{we} = 40 - 1300$$

The drop size was measured by the photographing method. The effect of hold-up on drop size was linear, and the relationship of the drop size to the hold-up and the Weber number was as follows:

$$D_{32}/L = C (1 + B\phi) N_{we}^{-0.51}$$

For the MIBK-water, iso-amylalcohol-water, and n-hexane-water system, the constant C was 0.03 and B was 9.3. For toluene-water system, these were 0.073 and 4.8, respectively.

## 1. 서 론

혼합-분리조는 화학공업분야에서 용매추출, 흡수 등의 분리조작장치로 많이 이용되고 있다.

혼합-분리조 설계를 위해서는 액-액 혹은 기-액간의 접촉효율을 높여 물질전달효과를 극대화시키는 것이 중요하므로 물질전달계수와 계면면적, 그리고 분산상이 연속상에 완전혼합될 수 있는 최저 교반속도와 동력소모량 등에 대한 자료가 필요하다. 이 설계자료들은 사용된 연속상과 분산상의 물리적, 화학적 특성과 혼합-분리조내의 유체역학적 특성에 따라 달라진다. 또한 이들은 상호연관성을 가지고 있으며 장치를 공업적인 규모로 대형화 하기 위해서는 이들 사이를 무차원 상관관계식으로 표시할 필요가 있다.

혼합-분리조설계에 대한 연구로서 Hassan과 Robinson[1], Michel과 Miller[2], Gray와 Barnett[3] 등은 기-액계의 분산에서, 그리고 Miller와 Mann[4], Bates와 Fondy[5] 등은 액-액간의 분산시의 동력소모량을 측정하여 장치특성과 액의 물성치 사이의 관계를 규명한 바 있다.

또한 Coulaloglou와 Tavlarides[6], Chen과 Middleman[7], Mlyněk와 Resnick[8] 등은 분산상의 액적크기를 측정해서 난류 동방성이론[9]으로 고찰하였고, Gnanasundaram[10], Sankholkar와 Sharma[11] 등은 화학적인 방법으로 계면면적을 측정하였다. 기 발표된 자료[6, 7, 8, 10, 11] 중에서 액-액계의 동력소모량과 액적크기는 대부분이 체류량이 10% 이하의 적은 범위이고, 분산상이 연속상에 상당량 분산됨에 따라 체류량이 상당히 크게 변하는 경우에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 특히 동력소모량에 대한 연구는 몇몇 기-액계에 편중되어 있으며 액-액계에 대하여는 고찰된 바가 극히 적다. 그러나 미량금속의 추출과 같은 추출조작에서는 액-액계에서의 체류량이 크게 변화하므로 이에 대한 자료가 반드시 필요하다고 사료된다.

본 연구에서는 비교적 공업적으로 많이 사용되는 계를 사용해서 방해판이 있는 교반조에서 분산상의 체류량이 큰 경우 교반에 소요되는 동력을 측정하여 계의 물성, 체류량 및 교반속도와 상관관계를 고찰하여 그 상관관계식을 제시하고 실측치와 비교검토하였다.

또 액적크기를 측정하여 액적크기와 동력소모량 및 분산상의 체류량과의 관계를 고찰하고, 액적크기에 미치는 영향을 규명하여 이에 따른 상관관계식을 얻어 혼합-분리조의 설계 자료로 이용하고자 한다.

Table 1. Apparatus dimension.

internal diameter of vessel	0.2 m
liquid height in vessel	0.2 m
height of vessel	0.25 m
diameter of shaft	0.008 m
baffle length	0.23 m
baffle width	0.02 m
baffle thickness	0.002 m
length of baffle immersed in the liquid from air-liquid interface	0.18 m

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 장치는 전보[12]와 같은 유리로 된 평저원통형 교반조에 4 개의 스텐레스강의 방해판을 직각방향으로 부착하여 만들었다. 장치의 크기는 교반조의 설계기준에 따라 Table 1과 같이 정하였다. 임펠러는 6-blade disk turbine으로 크기는 Table 2와 같이 하였다. 임펠러의 회전속도는 Optical digital tachometer(Ono Sokki HT-431)로 측정하였으며, 동력은 교반축에 천평식 torque meter(Kydeji Denshi Sokki Co. LTD)를 부착해서 torque를 측정하였다.

액적의 크기는 전보[12]와 같은 방법으로 사진촬영에 의해 측정하였다.

사용한 유기용매의 선정은 공업적으로 많이 쓰여지고 있는 유기용매 중에서 계면장력과 밀도 및 점도의 차가 비교적 큰 것으로서, 연속상은 증류수, 분산상은 MIBK, i-amylalcohol, n-hexane, toluene을 채택하였다. 계의 계면장력은 Du Nouy surface and interfacial tension meter (Shimadzu, LTD)로 측정하였고, 점도는 Ostwald Viscometer를, 밀도는 Pycnometer를 사용해서 측정하였으며, 문헌치와 비교하여 Table 3에 나타내었다.

실험방법은 교반조 내에 연속상과 분산상을 임의의 비율로 넣고, 임펠러를 교반조의 중앙에 고정하였다. 전체액에 대한 분산상의 비율은  $\phi=0.2\sim0.5$  사이로 하였다. 액의 전체높이는 탱크의 직경과 동일한 0.2m로 하였고, 임펠러의 회전속도는 1.5~5 rps로 하였다.

Table 2. Impeller types and dimension.

Types	dimension		
	L[m]	W <sub>f</sub> [m]	T <sub>f</sub> [m]
6-blade disk turbine	0.10	0.012	0.0020
	0.08	0.010	0.0015
	0.06	0.010	0.0015

Table 3. Properties of liquid used at 20°C.

material	density [Kg/m <sup>3</sup> ]		viscosity [Ns/m <sup>2</sup> ]		interfacial tension with water [N/m]	
	measured	literature	measured	literature	measured	literature
water	998	998.2[21]	0.00100	0.00100[21]	—	—
MIBK	795	795 [17]	0.00059	0.00059[18]	0.0102	0.0105[17]
iso-Amyl alcohol	810	813 [21]	0.00380	0.00348[7]	0.0060	0.0062[18]
Toluene	867	866 [21]	0.00058	0.00055[21]	0.0323	0.0340[10]
n-Hexane	660	659 [21]	0.00032	0.00031[19]	0.0491	0.0450[10]

교반속도가 일정하게 유지되고 유기상의 분산상태가 평형상태에 도달하였을 때 액적을 촬영하여 액적크기를 Sauter 평균액경으로 구하고, torque meter로 임펠러의 torque를 측정하여 식(1)에서 소요되는 동력을 계산하였다.

$$P = 2\pi NT_q \quad (1)$$

여기서  $T_q$ 는 torque meter에서 측정한 torque의 값이다. 체류량이 0 일 때 즉 연속상만 교반할 때의 동력을  $P_0$ 로 하고 분산상이 연속상에 분산될 때의 동력을  $P_L$ 로 하였다.

실험은 20°C에서 하였으며, 연속상과 분산상은 실험 전에 미리 포화시켜 사용하였다. 이상의 실험을 임펠러의 회전속도와 분산상의 체류량 및 계의 종류를 바꾸어가면서 반복하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 동력소모량

Fig. 1에 증류수만을 사용했을 때의 회전수에 따라 변하는 임펠러의 소요동력을 임펠러 크기별로 나타내었다. 임펠러의 크기와 회전수가 증가할수록 동력이 직선적으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 2, 3에 MIBK-water, i-amylalcohol-water계의 임펠러 회전속도에 대한 단위체적당의 소요동력을 각 체류량별로 나타내었다. n-hexane-water, toluene-water계는 앞의 두 계와 비슷한 양상이므로 도표 표시를 생략하였다. 동력에 미치는 체류량의 영향은 체류량이 증가할수록 감소하였다. 동일한 체류량에서 각 계별로는 MIBK-water, i-amylalcohol-water, n-hexane-water, toluene-water계의 순으로 동력이 증가하였다.

기-액 혹은 액-액분산에서 원하는 난류상태를 얻는데 필요한 동력을 예측하는 것은 교반장치 설계에서 대단히 중요한 일로서 교반조의 차원과 완벽한 유체역학

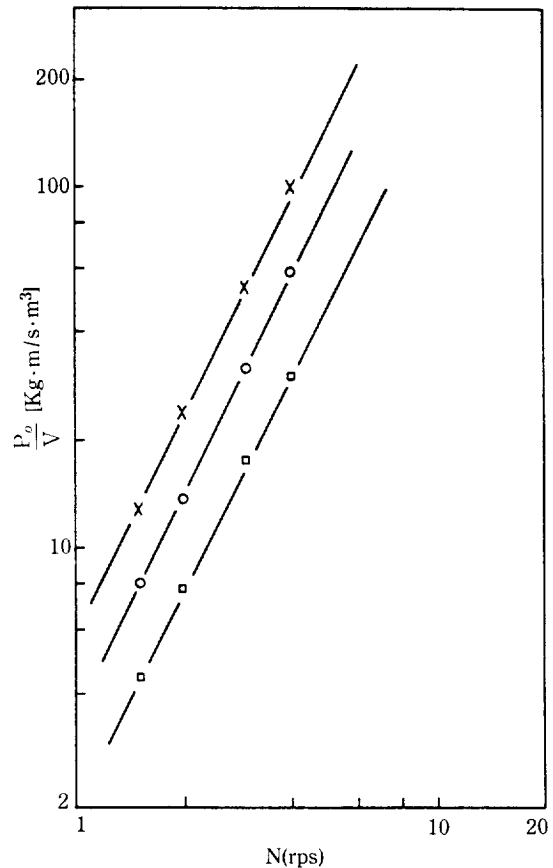


Fig. 1. Variation of mechanical power with impeller speed in water ( $h = H/2$ ).

$\times L = 0.10$  m,  $\circ L = 0.08$  m,  $\square L = 0.06$  m

적 모델이 필요하다. 교반동력의 예측에 대하여 많은 연구자들이 차원해석에 의해서 여러가지의 무차원군으로 표시하였다.

교반조에서 액체를 교반할 때 필요한 기계적 에너지를 Rushton 등[13]은 교반조의 기하학적, 물리화학적, 역학적 변수에 의존한다고 생각하고 이 관계를 차

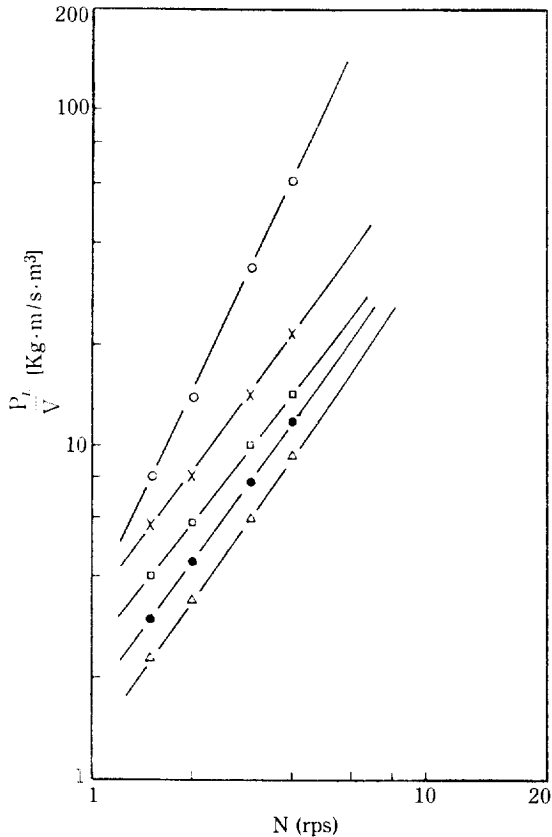


Fig. 2. Variation of mechanical power with impeller speed in MIBK-water system ( $L = 0.08$  m,  $h = H/2$ ).

$\circ \sigma = 0, \times \sigma = 0.2, \square \sigma = 0.3, \bullet \sigma = 0.4, \triangle \sigma = 0.5$

원해석에 의해서 식(2)와 같은 일반형으로 표시하였다.

$$N_p = \frac{P_o}{\rho_c N^3 L^5} = C_1 N_{re}^x N_{fr}^y \quad (2)$$

여기서

$$N_{re} = NL^2 \rho_c / \mu_c$$

$$N_{fr} = N^2 L / g$$

식(2)에서 방해판이 있는 교반조에서는 소용돌이 현상이 방해판으로 인하여 생기지 않으므로  $N_{fr}$ 의 영향을 무시할 수 있으며, 또  $N_{re} \geq 10^4$ 인 경우에는 식(3)과 같이 된다.

$$N_p = C_2 \quad (3)$$

액-액분산에서 필요한 동력  $P_L$ 은 임펠러와 교반조의 기하학적 형상, 임펠러의 회전속도, 액상의 물리화학적 특성과 분산상의 체류량 등에 따라 달라진다.

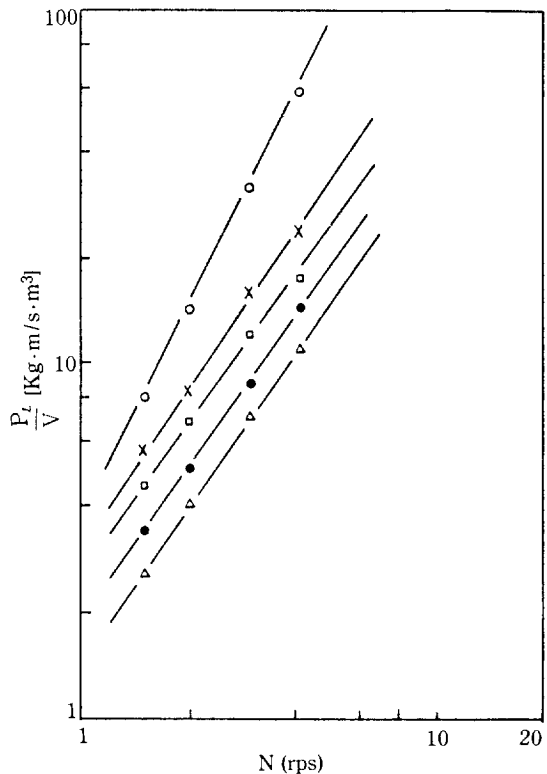


Fig. 3. Variation of mechanical power with impeller speed in iso-amylalcohol-water system ( $L = 0.08$  m,  $h = H/2$ ).

$\circ \sigma = 0, \times \sigma = 0.2, \square \sigma = 0.3, \bullet \sigma = 0.4, \triangle \sigma = 0.5$

방해판의 두께와 폭, 교반조의 내경 등의 기하학적인 변수를 일정하게 두면 식(4)와 (5)가 된다.

$$P_L = f(N, L, \rho_a, \rho_c, \mu_a, \mu_c, W_b, h, \sigma, \phi, g) \quad (4)$$

$$P_L = C_3 N^a L^b \rho_c^c \rho_a^d \mu_c^e \sigma^m \phi^n \quad (5)$$

차원해석에 의해 식(5)를 다시 쓰면 식(6)

$$\frac{P_L}{N^3 L^5 \rho_c} = C_4 N_{re}^e N_{we}^m \left(\frac{\rho_c}{\rho_a}\right)^d \phi^{-n} \quad (6)$$

이 되고 식(3)에서  $N_{re} \geq 10^4$ 이면  $e=0$ 이기 때문에 식(6)은

$$N_p = C_5 N_{we}^m \left(\frac{\rho_c}{\rho_a}\right)^d \phi^{-n} \quad (7)$$

이 된다.

연속상만 교반할 때와 분산상이 연속상에 분산되었을 때의 동력비  $P_L/P_o$ 는 식(3)과 식(7)에서 식(8)과 같이 된다.

$$P_L/P_o = C_6 N_{we}^m \left(\frac{\rho_c}{\rho_a}\right)^d \phi^{-n} \quad (8)$$

식(8)은  $P_L/P_o$ 에 대하여 계의 물리화학적 특성(계면

장력, 밀도, 점도 등), 임펄러의 직경과 회전속도, 분산상의 체류량을 기준으로 표시한 식이다.

또한  $P_L/P_0$ 와  $\rho_a/\rho_c$ 의 관계는 직선관계가 성립하고,  $P_L/P_0$ 는  $\rho_a/\rho_c$ 의 1승에 비례한다[1]. 그래서 식(8)은

$$P_L/P_0 = C_7 (1 - F \rho_c/\rho_a) N_{we}^m \phi^{-n} \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다.

본 실험에서 측정된  $P_L/P_0$ 에 대한 Weber 수의 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서  $P_L/P_0$ 는  $N_{we}^m$ 에 비례하였으며 m의 값은  $0.38 \pm 0.02$ 였다. 또한  $P_L/P_0$ 에 대한 체류량의 영향을 Fig. 5에 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이  $P_L/P_0$ 는  $\phi^{-n}$ 에 비례하였으며 n의 값은  $0.9 \pm 0.05$ 이었다. 이를  $N_{we}^m$ 과  $\phi^{-n}$ 을 이용하여 식(9)의 상수  $C_7$ 과 F는 최소자승법으로 구했으며, 계산의 결과  $C_7$ 은 3.38, F는 0.53이었다. 여기서 실험의 범위는  $\phi=0.2 \sim 0.5$ ,  $N_{we}=40 \sim 1300$  사이로 하였다. 그래서 식(10)과 같이 나타낼 수 있었다.

$$P_L/P_0 = 3.38 (1 - 0.53 \rho_c/\rho_a) N_{we}^{-0.38} \phi^{-0.9} \quad (10)$$

식(10)에서 계산한 값과 실험치를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 57개의 점으로부터 계산한 편차는 13% 정도가 되었다.

### 3-2. 액적크기

액-액분산에서 분산상의 액적은 연속적으로 파괴되고 합체된다. 그 속도는 세의 물리적 성질과 유동의 부

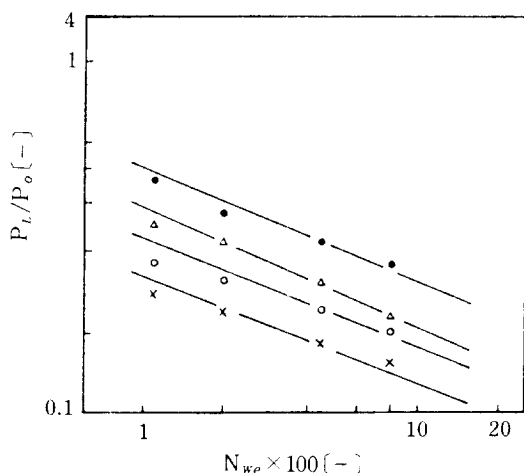


Fig. 4. The relation of  $P_L/P_0$  vs.  $N_{we}$  for MIBK-water system.

●  $\phi = 0.2$ , △  $\phi = 0.3$ , ○  $\phi = 0.4$ , ×  $\phi = 0.5$

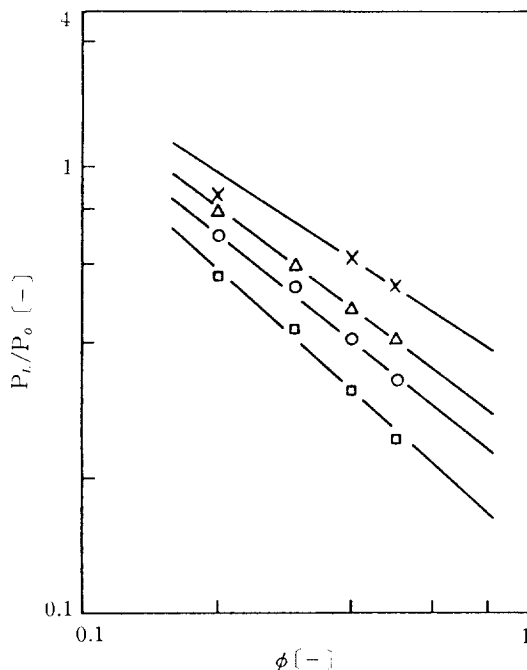


Fig. 5. The relation of  $P_L/P_0$  vs. dispersed phase hold-up.

□ MIBK-water system  $N_{we} = 200$   
○ iso-amylalcohol-water system  $N_{we} = 185$   
△ n-hexane-water system  $N_{we} = 42$   
× toluene-water system  $N_{we} = 142$

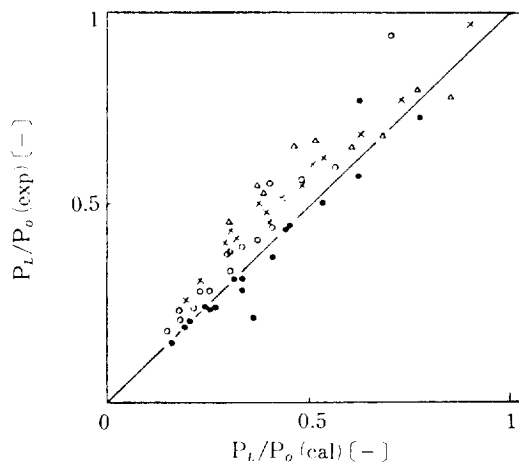


Fig. 6. Comparison between experimental data and calculated data ( $\phi=0.2 \sim 0.5$ ,  $L=0.08$  m,  $h=H/2$ ).

● MIBK-water system  
○ iso-amylalcohol-water system  
× n-hexane-water system  
△ toluene-water system

본적인 수력학적 특성에 의존한다. 일반적으로 탱크 내의 Reynolds 수가 10,000 이상일 때는 국부등방성난류 상태라 할 수 있다[6]. 국부등방성난류이론은 액적의 파괴가 액적의 직경이 난류의 micro scale 보다 클 때, 즉 임계 Weber 수 일 때 일어난다고 가정해서 많은 연구자들에 의해서 연구되었다[14]. 그 결과 체류량이 아주 적은 범위에서는

$$D_{32}/L = C_8 N_w^{-k} \quad (11)$$

로 표시할 수 있고[6~8, 15], 체류량이 큰 경우에는  $D_{32}$ 에 대한 체류량의 영향이 직선적이라고 가정하면

$$D_{32}/L = C_9 f_H N_w^{-k} \quad (12)$$

가 된다. 여기서  $f_H = 1 + B\phi$ 이다.

Fig. 7에  $D_{32}$ 에 대한 체류량의 영향을 나타내었다. 그림에서 직선관계가 잘 성립함을 알 수 있으며, 체류량이 증가할수록  $D_{32}$ 가 증가함을 보여준다. 이것은 연

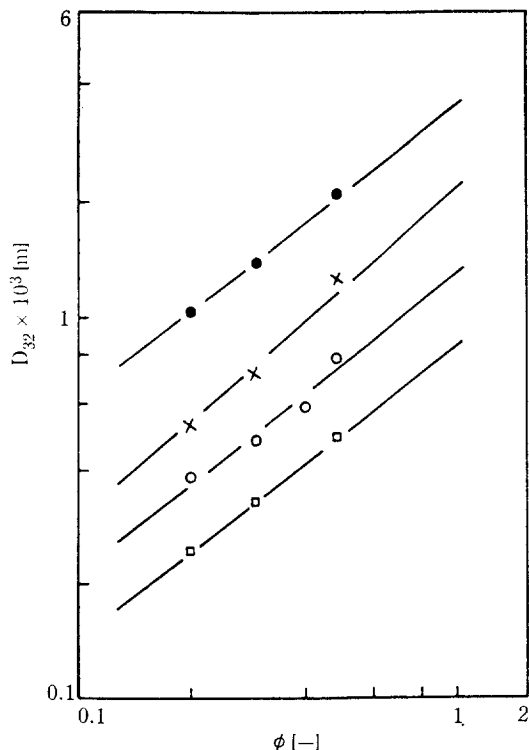


Fig. 7. Effect of the dispersed phase hold-up on Sauter mean drop diameter ( $L=0.08$ ,  $h=H/2$ ,  $N=3$  rps).

- MIBK-water system
- iso-amylalcohol-water system
- × n-hexane-water system
- toluene-water system

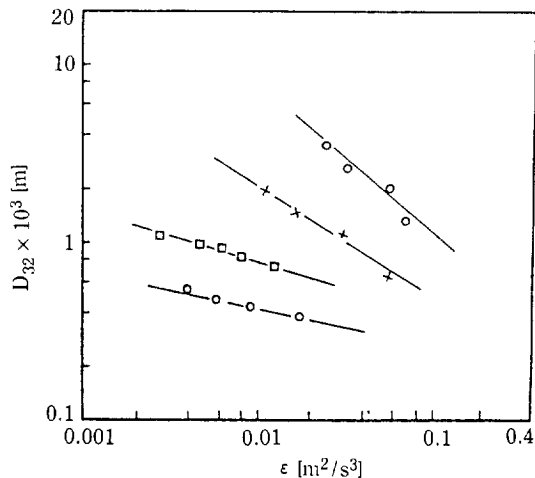


Fig. 8. Relation between Sauter mean drop diameter and energy dissipation per unit mass ( $L=0.08$  m,  $\phi=0.5$ ,  $h=H/2$ ).

- MIBK-water system
- iso-amylalcohol-water system
- × n-hexane-water system
- toluene-water system

속상에 분산된 분산상의 양이 많을수록 합체속도가 빨라진 결과라고 생각된다.

에너지 소모량과 Sauter 평균액경의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 교반조 내의 액체 단위질량당의 에너지 소모량  $\epsilon$ 은 식 (13)으로 계산하였다[20].

$$\epsilon = 2\pi NT_0 / \rho_c v \quad (13)$$

Fig. 8에서  $D_{32}$ 의  $\epsilon$ 에 대한 의존성은 MIBK-water계는  $D_{32}$ 가  $\epsilon^{-0.2}$ 에 비례하였으며, i-amylalcohol-water계는  $\epsilon^{-0.19}$ , n-hexane-water계는  $\epsilon^{-0.16}$ , toluene-water계는  $\epsilon^{-0.7}$ 에 비례하였다. 이 지수의 값은 Rodriguez 등[16]의 2-ethylhexanol-water계의  $\epsilon^{-0.4}$  또는 Shinnar와 Church[14]의 iso-butane-water계의  $\epsilon^{-0.25}$ 에 비례하는 결과와는 toluene-water계를 제외한 3계는 비교적 일치함을 보여 준다.

교반조건에 대한 무차원 평균액적크기와 Weber 수 사이의 관계는 직선적인 관계에 있는 것으로 식 (12)로 표시하였다. 식 (12)에서  $k$ 의 값은본 실험계에서는 0.51이었다. Fig. 7에서  $D_{32}$ 에 대한 체류량의 영향이 직선으로 표시되므로 식 (12)의 상수  $C_9$ 와  $B$ 는 최소자승법으로 구하였다. 그 결과 MIBK-water, i-amylalcohol-water, n-hexane-water계에서는  $C_9$ 와  $B$ 는 각각 0.03, 9.3이었으며 toluene-water계에서는

0.074, 4.8이었다. 여기서 toluene-water 계에 대한 상수만이 다르게 나타난 것은 4가지 계에서 toluene 만 방향족화합물로서 분자구조의 상이성 때문인 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

액-액교반조에서 체류량이 큰 상태의 교반시 소요동력과 액적크기를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 교반동력에 영향을 미치는 체류량과 연속상 및 분산상의 물리화학적 성질 사이에 다음과 같은 무차원 상관관계식을 얻었다.

$$P_L/P_o = 3.38 (1 - 0.53 \rho_c/\rho_d) N_{we}^{-0.38} \phi^{-0.9}$$

2. 분산상의 액적크기를 측정하여 액적크기와 분산상의 체류량은 직선적인 관계에 있음을 확인하고, 임펠러의 크기, 체류량 및 Weber 수 사이에 다음과 같은 무차원 상관식을 얻었다.

$$D_{32}/L = C (1 + B\phi) N_{we}^{-0.51}$$

여기서 C와 B는 MIBK-water, i-amylalcohol-water, n-hexane-water계에서는 0.03, 9.3이었고, toluene-water계에서는 0.074, 4.8이었다.

#### NOMENCLATURE

a,b,c,d,e	: exponents in eq. (5,6)
B	: constant
$C_{1-3}$	: constants in eq. (2-12)
$D_{32}$	: Sauter mean drop diameter [m]
F	: constant in eq. (9) [-]
g	: gravitational acceleration [m/s <sup>2</sup> ]
H	: height of liquid in the vessel [m]
h	: height of impeller above tank bottom [m]
k	: exponent of Weber in eq. (11)
L	: impeller diameter [m]
m	: exponent of eq. (5-9)
n	: exponent of eq. (5-9)
N	: impeller rotational speed [1/s]
$N_{Fr}$	: Froude number, [-]
$N_{Re}$	: Reynolds number, [-]
$N_P$	: power number, [-]
$P_L$	: mechanical agitation power in liquid-liquid dispersion [Kg-m/s]
$P_w$	: mechanical agitation power in only water [Kg-m/s]
$T_q$	: torque of rotating impeller [Kg-m]
$W_b$	: width of baffle [m]
x	: exponent of $N_{Re}$ in eq. (2)
y	: exponent of $N_{Fr}$ in eq. (2)

#### Greek Letters

$\epsilon$	: energy dissipation per unit mass [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$\mu$	: viscosity [Ns/m <sup>2</sup> ]
$\rho$	: density [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	: interfacial tension [N/m]
$\phi$	: hold-up fraction of dispersed phase [-]

#### Subscripts

c	: continuous phase
d	: dispersed phase

#### REFERENCES

- Hassan, T.M. and Robinson, C.W.: *AIChE J.*, **23**, 48 (1977).
- Michel, B.J. and Miller, S.A.: *AIChE J.*, **8**, 262 (1962).
- Gray, D.J., Treybal, R.E. and Barnett, S.M.: *AIChE J.*, **28**, 195 (1982).
- Miller, S.A. and Mann, C.A.: *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, **40**, 709 (1944).
- Bates, R.L., Fondy, P.L. and Corpstein, R.P.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **2**, 310 (1963).
- Coulaloglou, C.A. and Tavlarids, L.L.: *AIChE J.*, **22**, 289 (1976).
- Chen, H.T. and Middleman, S.M.: *AIChE J.*, **13**, 995 (1967).
- Mlynek, Y. and Resnick, W.: *AIChE J.*, **18**, 122 (1972).
- Hinze, J.O.: "Turbulence", McGraw-Hill, New York (1959).
- Gnanasundaram, S., Degaleesan, T.E. and Laddha, G.S.: *Chem. J. Chem. Eng.*, **57**, 141 (1979).
- Sankholkar, D.S. and Sharma, M.M.: *Chem. Eng. Sci.*, **28**, 2089 (1973).
- Doh, K.S., Park, Y.T. and Choi, H.S.: *Hwahak Konghak*, **23**, 66 (1985).
- Rushton, J.H., Nagata, S. and Rooney, T.B.: *AIChE J.*, **10**, 229 (1964).
- Shinnar, R. and Church, J.M.: *Ind. Eng. Chem.*, **52**, 253 (1960).
- Sprow, F.B.: *AIChE J.*, **13**, 995 (1967).
- Rodriguez, F., Grotz, L.C. and Engle, D.L.: *AIChE J.*, **7**, 663 (1961).
- Konno, M., Arai, K. and Saito, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **10**, 474 (1977).
- Asai, S., Hatanaka, T. and Uekawa, Y.: *J. Chem. Eng. Japan*, **16**, 463 (1983).
- Shindler, H.D. and Treybal, R.E.: *AIChE J.*, **14**, 790 (1968).
- Imai, M. and Furusaki, S.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **10**, 707 (1984).
- Perry J.H.: "Chemical Engineers' Handbook", 5th ed., McGraw-hill, N.Y., (1973)