

교반조에서 MIBK-물계에 대한 최저교반속도와 액적크기에 관한 연구

도갑수 · 박영태* · 최호상*

송전대학교 공과대학 화학공학과

* 경북 개방대학 공업화학과

(1984년 4월 2일 접수, 1984년 11월 13일 채택)

A Study on the Minimum Agitating Speed and Drop Size of MIBK-Water System in Agitating Vessel

Kap Soo Doh · Young Tae Park* · Hosang Choi*

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Soong Jun Univ., Seoul, 150, Korea

** Dept. of Ind. Chem., Kyung Buk Open Univ., Taegu, 635, Korea*

(Received 2 April 1984; accepted 13 November 1984)

요 약

교반조에서 MIBK-물 2성분계를 이용하여 임펠러 종류에 따른 최저교반속도와 액적크기를 측정하였다. 실험에서 얻은 최저교반속도와 계의 특성치 상관 관계식으로 부터 예측된 최저교반속도를 비교 검토하였다. 실측치 N' 와 예측치 N 사이의 관계는 $N' = N(1+x)$ 이었으며, 본 장치에서는 임펠러의 종류에 따라 x 의 값이 0.016~0.048 범위에 있었다. 또한 임펠러 형태에 따른 액적크기의 빈도수분포를 측정하여 Sauter 평균액적 크기를 구하였으며, 평균액적크기와 교반속도 및 임펠러의 크기사이에서 다음과 같은 실험식을 얻었다.

$$D_{32}/L = k N_{we}^{-0.565}$$

Abstract — By using of Methyl-isobutyl-ketone (MIBK) - Water system in agitating vessel, the minimum rotational speed and drop size of dispersed phase were measured for several types of impeller. The experimental minimum rotational speed was compared with the predicted minimum rotational speed by an existing correlationship. The relationship of experimental N' and predicted N was $N' = N(1+x)$, where x was in the range from 0.016 to 0.048 for each impeller type used. With frequency distribution, Sauter mean drop size was calculated for the impeller types used. For the Sauter mean diameter, the following correlation has been developed;

$$D_{32}/L = k N_{we}^{-0.565}$$

1. 서 론

액-액 추출은 화학공업의 여러분야에서 혼합물의 분리에 널리 이용되고 있다. 특히 최근에는 해수나 산업폐수 혹은 광산물에서의 미량금속 추출에 까지 광범위하게 이용되고 있다 [1, 2, 3].

지금까지 개발되어온 추출장치는 충전탑, 맥동탑, 분무탑, 회전원판탑 및 혼합침강기 등이 있는데, 특히 혼합침강기는 중금속의 분리공정에 많이 이용되어 왔다 [4, 5, 6, 9, 10].

혼합침강기를 설계하기 위해서는 액-액 간의 접촉효율을 높여 물질전달 효과를 극대화시키는 것이 중요한 요소이다. 이를 위한 기초자료로 임펠러의 종류와 최저교반속도 및 상간의 계면을 결정짓는 액적크기와 그 분포특성 등이 규명되어야 한다. Skelland 등 [7]은 방해판이 있는 교반조에서 최저교반속도를 측정하고 교반조와 임펠러의 형태 등에 따른 동역학적 특성을 규명하였다.

본 연구는 방해판이 있는 교반조에서 MIBK-물 계에 대한 임펠러의 종류와 교반속도에 따른 mixing index (Im), 및 분산상의 균일도에 관계없이 상간의 분리층이 없어지게 되는 최저교반속도를 측정하고, 액적의 분포 및 그 평균크기를 측정하여 교반에 따른 액적크기의 영향인자를 고찰하여 교반조 설계에 필요한 기초자료를 얻고자 한다.

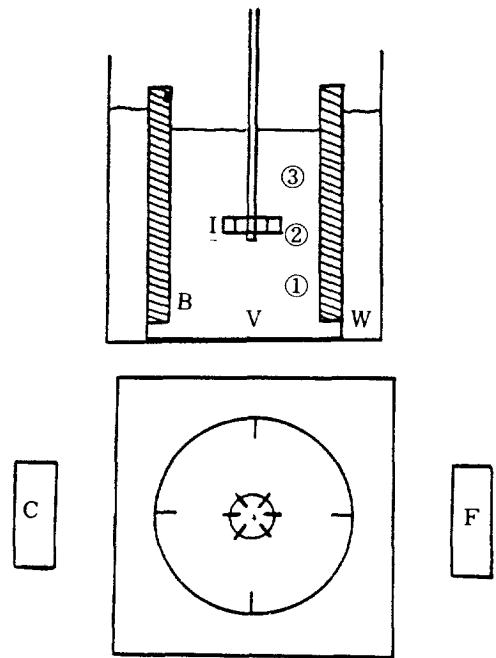
2. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

본 연구에 사용된 장치는 Fig. 1과 같이 유리제 원

Table 1. Apparatus dimension.

internal diameter of vessel	0.2m
liquid height in vessel	0.2m
height of vessel	0.25m
diameter of shaft	0.08m
baffle length	0.23m
baffle width	0.02m
baffle thickness	0.002m
length of baffle immersed in the liquid	
from air-liquid interface	0.18m
volume fraction of organic liquid, ϕ	0.5m



B: Baffle I: Impeller
C: Camera V: Agitated vessel
F: Flash light W: water pocket tank
1, 2, 3, : Sampling point

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

통형 반응기에 4개의 stainless steel 방해판을 설치하였다. 교반을 위하여 수직축에 임펠러를 부착하고, 감속기어가 장착된 1/4 HP 모터에 연결하여 회전속도를 조절할 수 있도록 하였다. 임펠러는 turbine 형으로 3종류 즉, 6-flat blade turbine, 6-blade disk turbine 및 6-curved blade turbine형이며, 각 형태별로 임펠러의 직경은 10cm, 8cm, 6cm로 제작하였다.

액적의 크기는 사진촬영에 의하여 측정하였는데, 사진촬영시 교반조의 곡면에 의한 액적의 뒤틀림을 방지하기 위하여 교반기 외부에 별도의 증류수 탱크를 설치하였다. 사진은 NiKon FM-2 카메라로 55 mm, f/1.4 표준렌즈로 초점거리를 짧게 하기 위하여 접사필터를 부착하였으며, 광원은 500W 할로겐 램프를 사용하였고, 카메라의 위치는 교반조 저면에서 10cm 높이에 고정시켰다. 액적크기는 정확한 규격 (0.5cm)의 강구 (steel ball)를 이용하여 그 배율을 보정하였다.

본 연구에 사용된 계는 methyl-isobutyl-ketone (MI

Table 2. Fluid properties at 25°C.

Fluid	Density (kg/m ³)	Dynamic viscosity (Ns/m ²)	Interfacial tension* (N / m)
MIBK	816	8.3×10^{-4}	8.7×10^{-3}
Water	997	9.1×10^{-4}	

*Interfacial tension was measured by drop weight method [12].

BK)-물로서 25°C에서 완전포화시켜 실험하였다. MIBK-물계에 대한 물성치는 Table2에 나타내었다.

2. 실험방법

교반조에 연속상인 증류수와 분산상인 MIBK를 각각 동일 양씩 넣고 임펠러를 저면에서 H/2되는 지점 즉, H₂O와 MIBK의 초기 계면에 고정시킨 후에 임펠러의 회전수를 일정하게하여 교반시킨다. 두 상의 혼합이 거의 평형에 도달할 때 Fig. 1에 표시된 3개 지점에서 시료를 정밀 피펫으로 10ml씩 채취하여 혼합물 (percentage mixed)을 측정하고, shutter speed 1/250~1/500초, f/2~f/5.6으로 액적 사진을 촬영하였다. 교반속도를 증가시켜 가면서 혼합물 측정과 액적사진 촬영을 반복한다.

액적의 분포 및 크기는 사진 판독기를 사용하여 2cm × 2cm 범위 내에 있는 100~200개의 액적을 크기에 따라 분포도를 측정하고, 그 평균크기를 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

1. 최저교반속도

교반속도에 따른 혼합물은 채취한 시료의 전체 부피 (S) 가운데 부피가 작은상의 부피(R)를 측정하여 식 (1)에 의하여 계산하였으며, 그 평균치를 mixing index (Im)로 정하고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

$$\text{혼합율}(\%) = \frac{R}{S/2} \times 100$$

Fig. 2에서 보는 바와 같이 Im은 임펠러의 직경이 클수록 높고, 형태별로는 6-flat blade, 6-blade disk, 6-curved blade turbine의 순서로 뒤를 알 수 있었다.

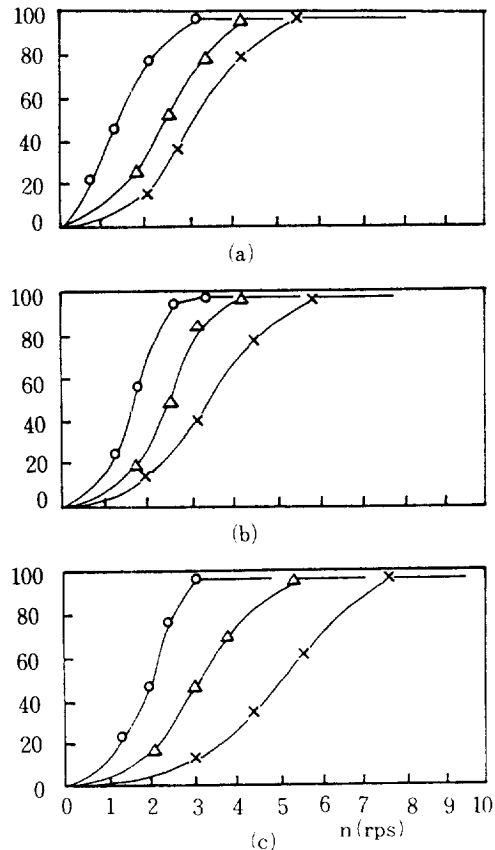


Fig. 2. Mixing index vs. impeller speed.

(a) 6-flat blade turbine

(b) 6-blade disk turbine

(c) 6-curved blade turbine

(○ : L=0.10, △ : L=0.08, × : L=0.06)

Skelland와 Seksaria [8]는 방해판이 있는 교반조의 액액 분산계에서 임펠러의 최저교반속도에 관하여 다음식과 같은 실험식을 제시하였다.

$$\frac{L'^{1/2}N}{g^{1/2}} = C_1 \left(\frac{T}{L} \right)^{a_1} \left(\frac{\mu_c}{\mu_d} \right)^{1/2} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{0.25} \left(\frac{\sigma}{L^2 \rho_c g} \right)^{0.1} \quad (2)$$

본 연구에서는 식 (2)에 의하여 실험장치계의 물성치를 사용하여, C_1 , a_1 값을 계산하였으며, mixing index가 98%에 도달하였을 때의 교반속도를 N' 라 할때, 실측치 N' 와 식 (2)에서 구한 예측치 N 의 관계를 Fig. 3에 나타내었다.

Skelland와 Seksaria [8]는 N 과 N' 사이에 식 (3)과 같은 관계가 성립한다고 보고 하였는데, 본 장치계 액적도 Fig. 3에 의하여 식 (3)의 관계가 성립함을

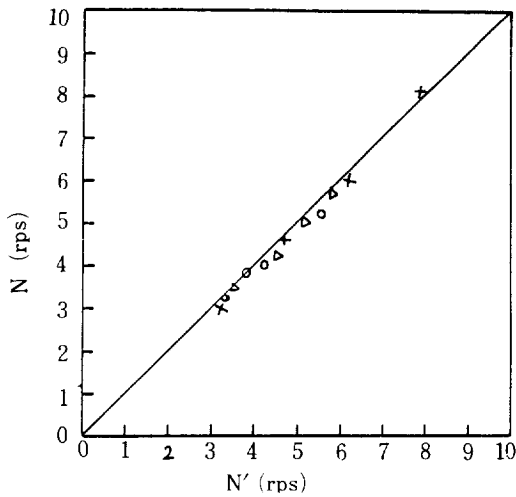


Fig. 3. Comparison between N' values for nearly uniform mixing ($I_m=0.98$) and N calculated from eq. (3) for complete dispersion.

(○: $L=0.10$, △: $L=0.08$, ×: $L=0.06$)

확인할 수 있었다.

$$N' = N(1+x) \quad (3)$$

Fig. 3에서 N' 값이 N 값보다 약간 큰것임을 알 수 있고 식 (3)에 의하여 x 의 값은 0.016~0.048 사이에 있었다. Table 3에 임펠러 종류에 따라 x 의 값을 나타내었다.

Table 3. Correlation and average deviation between N and N' .

	6-flat blade turbine	6-blade disk turbine	6-curved blade turbine
c_1	9	9.5	4.5
a_1	-0.15	-0.13	0.78
x	0.048	0.023	0.016

$$x = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{N' - N}{N}$$

2. 액적분포 및 크기

액적크기에 따른 액적의 빈도수분포를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에 의하면 교반속도가 증가함에 따라 액적크기가 현저히 감소함을 알 수 있는데, 이것은 교반속

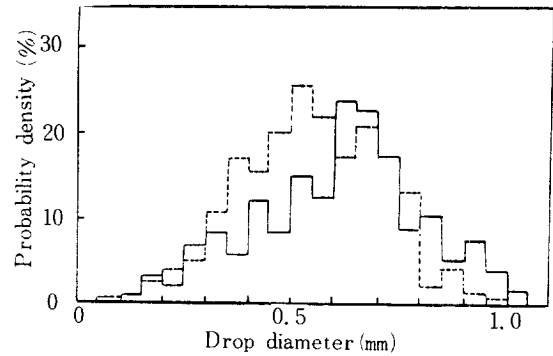


Fig. 4. Histogram of drop size distribution.

(6-blade disk turbine, $L=0.10m$)

(— $n=1.83$ rps, $n=2.67$ rps)

도의 증가에 따라 액의 난류현상이 증가하고, 이에 따라 입자가 파괴되므로 분산상 액적의 크기에 영향이 미친것으로 사료된다.

액적의 평균크기는 식 (4)에 의하여 Sauter mean diameter로 계산하였다.

$$D_{32} = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2} \quad (4)$$

Fig. 5에는 교반속도에 따른 평균액적크기를 나타낸 것이다. 그림에 의하면 임펠러의 종류에 관계없이 교반속도가 증가할수록 평균크기는 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 임펠러의 크기와 평균액적크기를 보정하여 교반속도의 영향을 분석한 것이다. 그림에서 평균액적크기, 임펠러직경 및 교반속도 등의 상관관계를 구하면 식 (5)와 같고, 이때 상수 k 값을 Table 4에 나타내었다. 이 경우에 실험상수 k 값이 서로 다른 것은 각 임펠러의 구조적 특성에 의하여 액적의 분산효과가 각기 다르기 때문으로 사료된다.

$$D_{32}/L = k N_{we}^{-0.565} \quad (5)$$

식 (5)와 Vermeulen 등 [11] 및 Chen과 Middleman

Table 4. Empirical constant k in equation (5).

impeller types	impeller diameter [m]	k [-]
6-blade disk turbine	0.10	0.0195
6-blade disk turbine	0.08	0.0235
6-flat blade turbine	0.08	0.0294

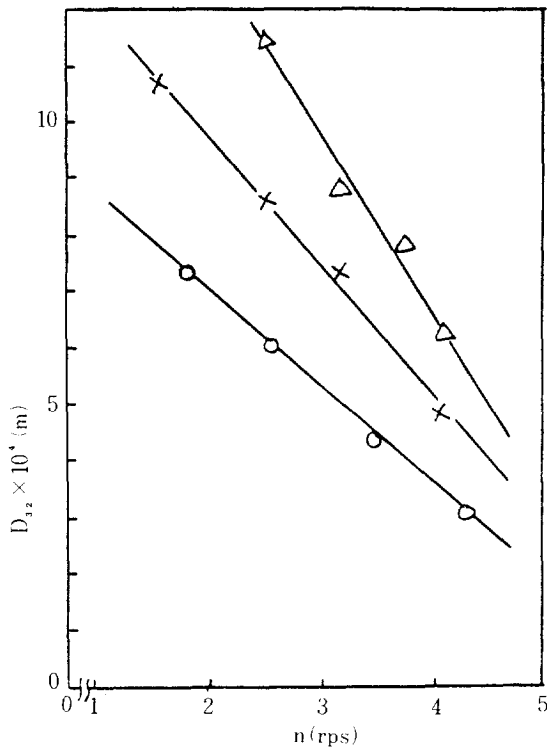


Fig. 5. Sauter mean drop diameter (D_{32}) vs an impeller speed.

- (Δ) : 6-flat blade turbine, $L=0.08\text{m}$;
 (\times) : 6-blade disk turbine, $L=0.08\text{m}$;
 (\circ) : 6-blade disk turbine, $L=0.01\text{m}$

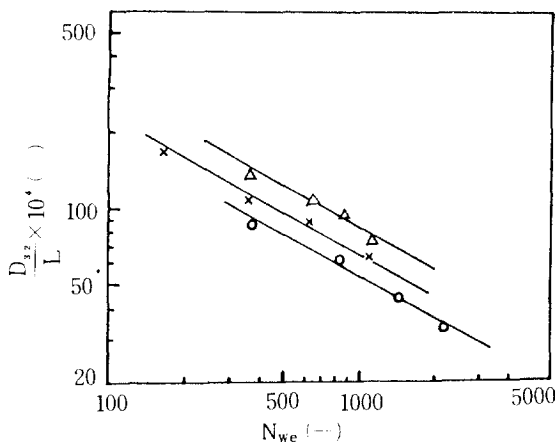


Fig. 6. Mean drop size correlation.

- (Δ) : 6-flat blade turbine, $L=0.08\text{m}$;
 (\times) : 6-blade disk turbine, $L=0.08\text{m}$;
 (\circ) : 6-blade disk turbine, $L=0.10\text{m}$

[1]의 연구 결과를 비교하면 거의 유사한 형태의 결과를 얻을 수 있었다. 특히 Vermeulen 등은 기-액계에 있어서 D_{32}/L 이 N_{we} 의 -0.6 승에 비례한다고 하였다.

4. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. MIBK-물 계에 대한 교반실험에서는 임펠러의 직경이 클수록 혼합률이 높고, 형태별로는 6-flat blade, 6-blade disk, 6-curved blade turbine의 순으로 나타났다.

2. 무차원 상관관계식에서 c_1 과 a_1 을 구하였고, 예측치 N 와 실측치 N' 사이에는 본 장치계에서도 $N' = N(1+x)$ 의 관계가 성립하였으며, 실험에서 얻은 x 의 평균값은 임펠러의 종류에 따라 $0.016 \sim 0.048$ 의 범위에 있었다.

3. 액적크기는 교반속도가 증가할수록 감소함을 알 수 있었으며, 임펠러 직경의 변화에 대한 평균액적크기와 임펠러의 교반속도에 따른 상관관계는 다음과 같은 무차원 식으로 나타낼 수 있었다.

$$D_{32}/L = k N_{we}^{-0.565}$$

NOMENCLATURE

- a_1 : Empirical constant in equation (2),
 [—]
 C : Empirical constant in equation (2),
 [—]
 D_{32} : Sauter mean drop diameter, [m]
 D : Drop diameter, [m]
 g : Acceleration due to gravity, [m/s^2]
 H : Liquid height in vessel, [m]
 I_m : Mixing index, [%]
 k : Empirical constant in equation (5), [—]
 L : Impeller diameter, [—]
 n : Rotational speed in agitating vessel, [rps]
 n_1 : Number of drops with drop diameter D ,
 [—]
 N : Minimum rotational speed calculated from equation (2), [rps]

- N' : Minimum rotational speed for impeller for grossly uniform liquid-liquid dispersion in agitating vessel (corresponding to an I_m of 98%), [rps]
 N_{we} : Impeller Weber number ($=n^2 L_3^3$)
 R : Volume of the small amount phase in S, [m^3]
 S : Total volume of sample, [m^3]
 T : Impeller thickness, [m]
 x : Average deviation between N' and N , given in Table 3, [—]
 μ : Dynamic viscosity, [Ns/m^2]
 ρ : Density, [kg/m^3]
 $\Delta \rho$: Positive density difference between continuous and dispersed phase, [kg/m^3]
 σ : Interfacial tension, [N/m]

Subscripts

- c : Continuous phase
 d : Dispersed phase

REFERENCES

1. Chen, H.T. and Middleman, S.: *AIChE. J.*, **13**, 989 (1967).
2. Mersmann, A. and Grossman, H.: *Int. Chem. Eng.*, **22**, 581 (1982).
3. Kojima, T. and Miyauchi, T. : *IEC Fundl.*, **20**, 14 (1981).
4. Kondo, K., Takahashi, S. and Nakashio, F.: *J. of Chem. Eng., Japan*, **11**, 193 (1978).
5. Inoue, K., Okubo, H. and Nakashio, F. : *J. of Chem. Eng., Japan*, **12**, 443 (1979).
6. Laddha, G.S. and Degaleesan, T.E. : "Transport phenomena in liquid extraction," Tata McGraw-Hill, New Delhi (1976).
7. Skelland, A.H.P. and Jai Moon Lee: *IEC Process Des. & Dev.*, **17**, 473 (1978).
8. Skelland, A.H.P. and Seksaria, R. : *IEC Process Des. & Dev.*, **17**, 56 (1978).
9. Sherwood, T.K. and Pigford, R.L.: "Absorption and extraction," McGraw-Hill, New York, (1952).
10. Rushton, J.H., Costich, E.W. and Everett, H.J. : *Chem. Eng. Progress*, **46**, 467 (1950).
11. Vermeulen, T., Williams, G.M. and Langlois, G.E. : *Chem. Eng. Progress*, **51**, 85F (1955).
12. Davies, J.T. and Rideal, E.K. : "Interfacial phenomena," Academic Press, New York (1963).