

액적의 합체와 혼합조-분리조에서의 분리 (제1부 : 회분 실험)

김성석·최창균

서울대학교 공과대학 화학공학과
(1987년 6월 12일 접수, 1987년 12월 19일 채택)

Coalescence of Liquid Droplets and Separation in a Mixer-Settler (Part 1: Batch Experiments)

Sung Seok Kim and Chang Kyun Choi

Dept. of Chemical Engineering, College of Engineering, Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
(Received 12 June 1987; accepted 19 December 1987)

요 약

혼합강도의 영향을 크게 받는 혼합조-분리조에서 액-액 혼합물의 분리현상을 실험적으로 고찰하였다. 실험계로서는 이성분 물-용매 (노르말헥탄, 이소옥탄, 에틸아세테이트와 노르말헥산)이다. 회분 실험의 결과로부터 유기물 체류량이 0.30~0.50인 범위에서 평균액적크기, Weber 수와 관련된 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$\frac{d_o}{D} = 0.026 (1 + 20 \phi) We^{-0.6}$$

또한, 다중입자계의 분리특성을 나타내는 상관식이 연속상에 대한 상대속도를 근거로 다음과 같이 유도되었다.

$$Re_\phi = 1.11 \times 10^{-12} Bo_\phi^{1.25} Mo^{-1.60} \left(\frac{1-\phi}{1+\phi^{1/3}} \right)^{2.60}$$

Abstract—The study on liquid-liquid separation characteristics in a mixer-settler system which is strongly influenced by mixing intensity was conducted experimentally. The experimental systems considered here are binary distilled water-organic solvent (n-heptane, iso-octane, ethyl acetate or n-hexane) systems. By performing batch tests, the relationship between the mean drop size and the Weber number was generated by

$$\frac{d_o}{D} = 0.026 (1 + 20 \phi) We^{-0.6}$$

where $0.30 \leq \phi \leq 0.50$. Also, the separation characteristics for multiparticle systems were presented, based on the relative velocity of the continuous phase:

$$Re_\phi = 1.11 \times 10^{-12} Bo_\phi^{1.25} Mo^{-1.60} \left(\frac{1-\phi}{1+\phi^{1/3}} \right)^{2.60}$$

1. 서 론

용매추출 분야에서 혼합조-분리조의 이용은 그 적용 범위가 상당히 광범위하다. 재래적인 적용분야로는 습식야금, 석유화학 관련공정이 주종을 이루었고, 근래에는 핵 연료의 재처리, 생물공학, 제약 및 수처리 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 이와 같은 산업계에서의 다양한 적용의 증가 추세는, 비록 이 장치가 차지하는 면적이 크고 증발에 의한 시약의 필연적인 손실을 수반하고 있지만 장치가 간단하고 처리하려는 성분에 관계없이 높은 효율을 기대할 수 있다는데 기인한다. 이러한 장치의 연구개발은, 이제까지 반응속도론적인 면과 유체역학적인 면에서 진행되어 왔다[1~10]. 본 연구에서는 후자의 경우를 중심으로 혼합조-분리조의 특성을 고찰하여 보고자 한다. 이를 이해하려면 액적크기와 그 크기 분포를 알아야 한다.

이제까지 수행되어온 이 분야의 연구들은 상당히 많지만 산업계에서 적용하기에는 아주 낮은 체류량 범위에 대한 자료들이 대부분이다. 또한 높은 체류량에서의 측정 가능한 방법이 개발되어 있기는 하지만 지극히 한정되어 있다. 높은 체류량을 포함하고 있는 계의 특성은 초기 조건에 상당히 민감하기 때문에 밀도, 점도, 계면장력 등의 물성치만으로는 충분한 설명이 불가능하며 초기조건의 영향을 총괄할 수 있는 또 다른 변수를 도입하여 계를 해석하는 것이 필요하다. 여기서는 유체역학적인 특성을 조사하기 위하여 n-heptane, iso-octane, n-hexane과 ethyl acetate를 선정하여 회분계에서의 회전속도, 분산상의 분율 등의 영향에 따른 분산액적의 상승속도를 연속상에 대한 상대적인 속도로 나타내어 회분계의 분리특성을 고찰하였다.

2. 이론적 고찰

2-1. 기본계의 설정

혼합조-분리조에 대한 회분계의 특성을 고찰하는데, 대부분의 경우에는 혼합조만 분리하여 선정된 계의 교반조건에 따른 여러가지 특성을 조사하였다. 교반이 일정하게 유지되면, 비록 혼합조내의 위치에 따른(예를 들어, 임펠러에 의하여 격렬하게 부딪쳐 액적으로 파열되는 영역과 용액의 순환경로에 따라 서로 합체되는 영역) 유체의 속도가 다르다고 하더라도, 큰 Reynolds 수에서는, Kolmogorov의 국부 등방성 이론[11, 12]을 도입하면, 높은 파수로 특성지워진 와류 성분들을

통계적으로 주흐름에 독립적으로 간주할 수 있다. 이와 같은 경우에 대하여 Olney와 Carlson[3]은 교반조가 정상상태에 도달하였을 때 평균속도 혹은 파동성분의 제곱은 시간이 지남에 따라서 거의 일정함을 밝혔다. 이 때에 형성된 액적들은 거의 균일한 크기를 보이지만, 많은 사람들이 주어진 계와 동력 및 혼합조의 치수 사이의 관계를 조사하였다. 이러한 형태의 실험을 수행하는 과정에서 일반적으로 적용하는 기본적인 가정이 있으며, 이를 정리하면 다음과 같다[3~7].

- 1) 교반조가 정상상태에 도달하였을 때, 평균속도 혹은 파동성분의 제곱은 더 이상 시간의 함수가 아니다.
- 2) 액적은 구형을 유지하며 평균액적크기로 특성화할 수 있도록 작은 분산의 정규분포를 갖는다.
- 3) 액적 사이에는 유체역학적인 영향만 작용한다.

2-2. 혼합조에서의 액적생성과 액적크기

혼합조에서 서로 용해되지 않는 두 유체를 혼합할 때, 한 상은 다른 연속상으로 분산액적을 형성한다. 이러한 액적 생성에 작용하는 힘은 점성응력(viscous stress)과 동압(dynamic pressure)이다[2, 8, 9]. 이에 의하여 벌크는 어떤 크기로 깨어져 나가고 동시에 액적들이 서로 충돌하거나 점성의 영향에 의하여 합체된다[10]. 이때 액적파열의 대부분은 임펠러 날개 부분의 전단력이 큰 영역에서 발생되고 그밖의 순환유로를 따르는 영역에서는 액적의 합체과정이 지배적이다. 이와 같은 혼합조 내에서 생성된 분산액적 크기에 대하여 Kolmogorov이론[11, 12]을 적용하여 어느 정도 설명할 수 있다. 이에 근거하여 주어진 교반조건에 의하여 생성된 액적크기(d_0 ; Sauter 평균직경)는 다음과 같은 관계식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{d_0}{D} = C_1 \left(\frac{\rho_c N^2 D^3}{\sigma} \right)^{-0.6} = C_1 We^{-0.6} \quad (1)$$

여기서 D 는 임펠러의 직경, N 은 회전수, ρ_c 는 연속상의 밀도, 그리고 σ 는 계면장력, We 는 임펠러 직경을 기준으로 한 Weber수이다. 식 (1)로 나타낼 수 있는 경우는 체류량이 작은 범위에서 잘 만족하는 것으로 보고되고 있다[6, 12~15]. 체류량이 큰 경우에는 이의 영향을 고려한 다음과 같은 관계로 표시된다.

$$\frac{d_0}{D} = C_2 We^{-0.6} f(\phi) \quad (2)$$

여기서 $f(\phi)$ 는 체류량(분산상 분율)의 영향을 나타낸 것으로 다음과 같은 관계를 갖는 것으로 알려져 있다

[7, 15~19].

$$f(\phi) = 1 + C_3 \phi \quad (3)$$

따라서 식 (2)는 다음과 같은 형태가 된다.

$$\frac{d_0}{D} = C_2 (1 + C_3 \phi) We^{-0.6} \quad (4)$$

여기서 C_1 , C_2 , C_3 는 계에 따른 실험상수이다.

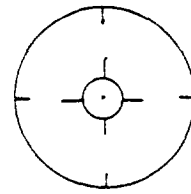
3. 실험

3-1. 시료

본 연구에서는 물과 잘 섞이지 않는 몇가지 유기용액과 약간 용해되는 계를 선정해서 실험하였다. 회분계에서는 n-heptane-물, iso-octane-물, n-hexane-물, 그리고 ethyl acetate-물 계로 실험하였다. 이들의 순수한 상태에서의 물리적 특성을 Table 1에 요약하였다. 이 값들은 본 실험실에서 측정된 값인데 Kumar 등[20], Liley 등[21]에 의해 발표된 측정치에 아주 근사하다. 이때 밀도는 항온조에서 pycrometer(Omega 회사)로 측정하였고, 점도는 Oswald점도계, 표면(계면)장력은 tensiometer (Fisher 회사, Model 20)로 측정하였다. 그리고 여기서의 계면장력은 증류수만 공기와의 계면장력이고, 나머지 시료는 증류수와의 계면장력이다.

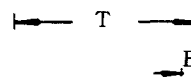
3-2. 실험장치 및 실험 과정

2성분 용액을 기계적인 혼합에 의하여 액적을 생성시키고 생성된 액적을 합체시키기 위하여 Fig. 1과 같은 형태의 교반조를 제작하였다. 투명 아크릴 원통과 초차원통으로 제작한 교반조의 직경은 10 cm이고 방해판, 임펠러 직경, 교반날개 등은 탱크 직경에 따라서 표준화시켰다. 교반날개는 stainless steel로 제작한 4개의 평판 브레이드의 원반 터빈형이다. 이에 대한 구체적인



T	D	B
10	3.4	1

cm



Dimension Ratios of Turbine

$$D:D_p:L:W = 24:16:6:5$$

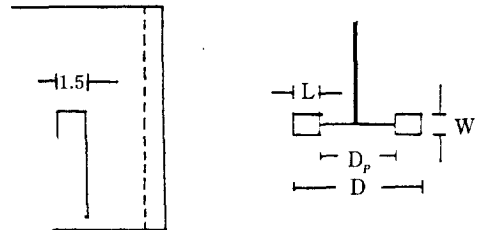


Fig. 1. The apparatus for batch experiments.

구조를 Fig. 1에 제시하였다. 그리고 교반조건에 따라서 생성된 액적을 직접 사진촬영하기 위하여 교반조 하단에서 0.5 cm 떨어진 위치에 두께 1 mm의 slide glass를 부착하였다. 교반조건에 따라서 생성된 액적들은 임펠러를 정지시키는 순간에 교반조 하부에서부터 2 cm되는 위치에 사진기 초점을 맞추어서 찍었다(Asahi Pentax : f=2.8, shutter speed=1/250 sec). 교반 속도를 일정하게 유지하기 위하여 정류기(Shimadzu Scientific Instrument : Model : YS-1100-10)를 전원과 교반기 중간에 설치하였고, 이때의 회전속도를 속도제어기로 조절하도록 하여 주어진 교반속도의 변화량 범위를 ± 10 rpm 정도로 극소화하였다. 주어진 교반조건에서, 촬영된 액적에 대한 분포는 필름판독기(Recordak)를 이용하여 임의의 1 cm²에 해당되는 면적 속에 있는 액적을 모두 고려하였다(전체 숫자가 100~200개

Table 1. Physical properties of the present systems.

	Units	Distilled Water	n-Heptane	iso-Octane	n-Hexane	Ethyl acetate
Density(25 C)	g/cc	0.997	0.685	0.690	0.670	0.900
Interfacial tension	dyne/cm	72	48-51	45-48	35-41	10-11
Refractive index		1.332	1.385	1.390	1.375	1.372
Viscosity (25 C)	c.p.	1.00	0.40	0.54	0.32	0.45
Surface Viscosity	g/sec	pure 0.0247 polluted 0.0211				

정도). 이 때의 평균액적크기(d_o)는 Sauter 평균액적 크기를 구하는 과정과 같다. 그리고 회분실험 과정은 다음과 같다.

가) 교반조는 세제를 이용하여 깨끗하게 세척한 후 건조시키고 다시 증류수와 사용하는 시약으로 내부를 씻어낸다.

나) 정류기에 전원 스위치를 넣고, 감도릴레이의 온도조절기를 작동시켜 항온조의 온도를 실험온도로 유지시키고, 실험에 필요한 양의 용액들을 항온조 속에 1~2시간 동안 방치한다.

다) 교반기의 회전수를 stroboscope로 점검하여 일정하게 유지한다.

라) 실험전 시료의 물성치를 측정한다.

마) 일정한 온도로 유지된 증류수와 유기용액을 상비에 따라서 증류수를 먼저 채운 후 유기용액을 채운다.

바) 교반기를 실험조건에 따른 시간동안 작동한 후 정지시킨다. 교반기를 정지시킨 순간, 액적사진을 찍고 교반조에 부착된 눈금을 통하여 분리되는 상태를 초시계로 측정한다.

사) 실험 후, 시료의 물성치를 측정한다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 회분분리 특성

교반조건에 따라서 연속상에 분산된 유기액적들(O/W)은, 교반기를 정지한 순간부터 연속상과 분산상의 밀도차와 중력에 의하여 하부 계면에서 액적들의 상승 또는 간섭침강이 일어나고, 상부계면에서 액적과 액적, 액적과 벌크상 사이의 합체에 의하여 전체적인 분리상태를 지배하게 된다. 즉, 교반기를 정지하면 연속상에 분산된 액적들이 이동하기 시작함에 따라서 분산층은 액적들로 밀집된 충전층을 형성한다[22]. 이러한 충전층은 간섭침강속도가 둔화될 때까지 두터워진다. 이 충전층에서는 액적들간의 합체로 인하여 액적이 성장하게 되고 벌크상을 형성한다. 액적들의 합체가 진행되는 동안 연속상은 원래의 위치로 돌아가게 되지만, 평균 액적보다 아주 작은 2차 액적들의 영향 때문에 최종적인 분리에 많은 시간을 요구하는 경우가 많다[23~25]. 여기에서 최종 분리시간은 액적합체가 거의 완료되어 최초 계면 높이에 도달하는 시간이다. Fig. 2는 전체 깊이를 10cm로 하고 이 높이의 1/3에 교반기를 위치시킨 상태에서 n-heptane($\phi=0.5$, 1600 rpm)의 분리과정을 나타낸 것이다. 주어진 교반조건에서 가장 큰 비율을 차지하고 있는, 연속상에 분산된 유기액적들이

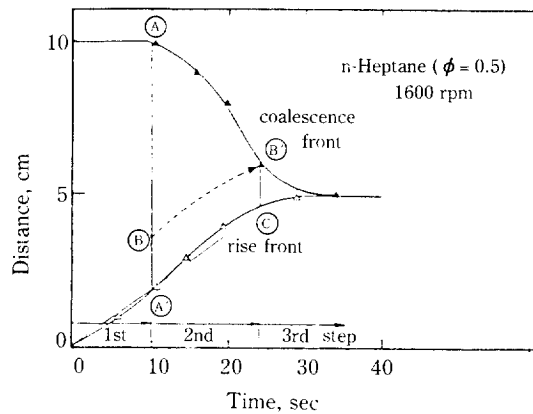


Fig. 2. Graphical interpretation of separation data.

충전층을 형성하기 위하여 이동하는데 그 기간은 원점에서 A'까지의 구간이다. 이 과정에서 상부계면은 정지상태를 유지한다. 그 다음 단계에서는 충전층 내에서의 액적과 액적 사이의 충돌과 막 배수에 의한 합체가 본격적으로 일어나는데, 이 때 분리속도는 갑자기 증가한다. 그러한 상태는 상승계면 뿐만 아니라 합체계면에 영향을 주어서 합체계면의 분리속도가 점점 증가하는데 그 기간은 그림에서 AB'에 해당된다. 이때까지 대부분의 1차 액적들은 액적들과 액적 또는 액적과 계면 사이에 의한 합체로 사라진다. 그 이후는 1차 액적들과 함께 동반되는 2차 액적들이 합체하는 것으로서 상승계면의 변곡점 C로부터 최종분리계면까지 이다. 합체계면에서도 그와 같은 현상을 관찰할 수 있는데 합체가 본격적으로 일어나다가 갑자기 둔화되는 현상이 발생하는 지점(B')으로부터 2차 액적들이 합체되는 시점이라 볼 수 있다. 본 연구에서는 haze의 영향을 배제한 일정한 크기의 액적들의 분리속도(U_{ss})를 첫번째 구간에서 얻어진 속도로서 나타내어 계의 기본적인 현상을 조사하였고, 다중 입자계를 이와 관련된 연속상에 대한 상대적인 분리속도(U_{ϕ})로 전반적인 관계를 고찰하였다.

4-2. 분산상 분율의 영향

분산상 분율의 변화에 따른 종말속도(U_{ss})의 전형적인 관계를 도시하면 Fig. 3과 같다. 전반적으로 일정한 교반속도를 유지한 상태에서 분산상 분율이 증가함에 따라서 관측된 속도는 감소하였고, 또한 혼합강도의 증가에 따른 분리속도가 감소하였다. 분산상 분율의 영향에 대한 평균 액적크기의 변화는 식 (4)에서 예측할 수 있듯이, 분산상 분율이 증가함에 따라서 액적크기는

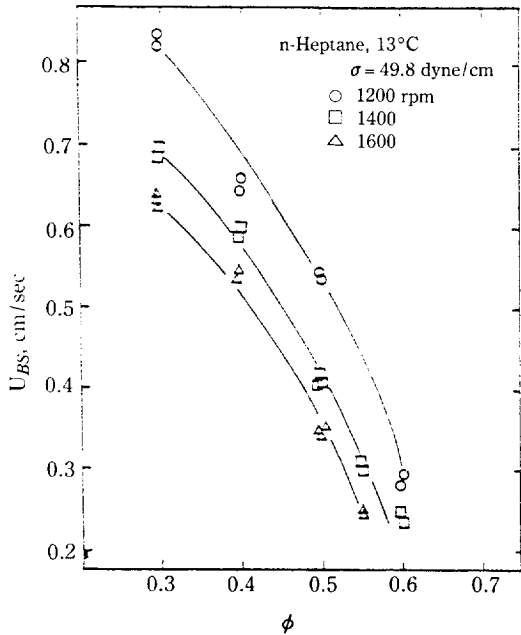


Fig. 3. Dispersed phase fraction versus batch separation velocity of n-heptane drops (interfacial tension = 49.8 dyne/cm at 13°C).

증가한다[7, 26~29]. 단일 액적의 이동을 연구한 Hu와 Kintner[30]에 의하면, 액적이 항력을 심하게 받기 전까지 (dibromobenzene의 경우, 액적이 대략 0.2 cm 이하의 범위에서) 액적크기가 증가함에 따라서 종말속도가 비례적으로 증가한다고 발표하였다. 한편, Edge와 Grant[31]가 연속상내를 끊임없이 진동하면서 하강하는 액적의 종말속도를 조사한 결과에 의하면 액적크기가 증가하면 종말속도가 감소하여 본 연구에서 얻은 결과와 유사한 경향을 보였다. 여기서는 액적크기가 증가할 때 종말속도가 감소하는 요인을 주기적인 진동의 결과라고 할 수 있다. 그러나 본 연구는 Edge와 Grant가 취급했던 이동과정이 지그재그로 진동하는 계가 아닌 다중입자계(multiparticle system)이며, 입자들에 의한 간섭현상으로 종말속도가 감소하였던 것이다. 이와 같은 다중 입자계의 이동속도를 연속상에 대한 상대적인 분리속도(U_{ϕ})로 나타낸 것이 Fig. 4이다. U_{BS} 와 U_{ϕ} 사이의 관계는 다음과 같다[40].

$$U_{BS} = (1 - \phi)U_{\phi} \quad (5)$$

4-3. 액적크기

본 연구에서는 교반조건에 따른 액적을 직접 사진촬영

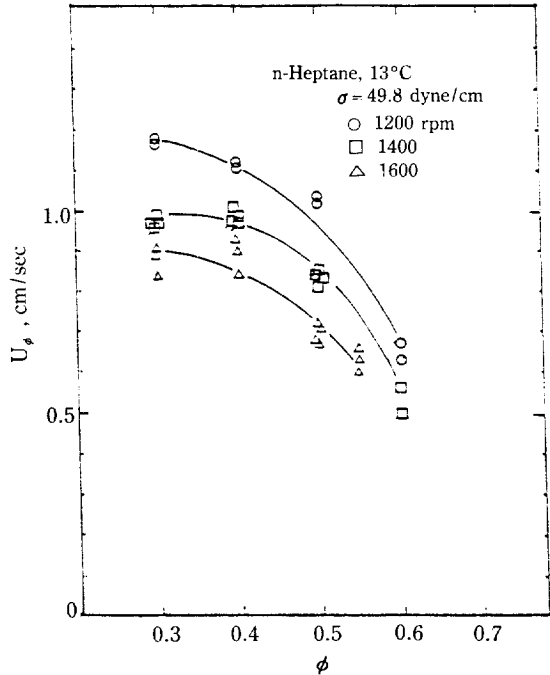


Fig. 4. Dispersed phase fraction versus relative terminal velocity of n-heptane drops (interfacial tension = 49.8 dyne/cm at 13°C).

영하였으며 액적크기와 그 분포를 조사하였다. 촬영된 유기액적들은 Miksis 등[32]이 목격한 바와 동일하게 구형이었다. 이러한 액적들의 측정을 필름관독기에서 했는데, 1 cm²(확대 배율에 따라서 면적은 달라짐) 면적내에 분포된 액적을 0.035 mm 간격으로 측정할 값의 분포상태를 확률밀도에 대한 크기의 관계로 도시하면 Fig. 5와 같다. 그림에서 보이듯이 어느 정도 정규 분포 곡선이 얻어졌고 평균오차는 5% 정도였다. 대표적으로 네가지 경우의 곡선만을 그렸는데, 체류량을 일정하게 하더라도 교반속도에 따른 분산의 폭이 다르게 나타나고 있다. 즉, 교반속도를 증가시키면 액적들은 작아진다. 이러한 현상은 액적의 파괴속도를 증가시키고 동시에 액적크기 분포의 폭을 좁게 만든다. 임펠러의 회전속도를 증가시키면 작은 액적들보다 큰 액적들의 파괴속도가 더 큰 영향을 받기 때문에 액적크기 분포의 분산은 감소된다. 이러한 결과들은 Ward와 Knudsen[33], Baird와 Lane[34]이 발표한 바 있는 두 개의 봉우리가 있는 형태가 아닌 한 개의 봉우리를 보이는 Zeitlin과 Tavlarides[35], Stamatoudis와 Tavlarides[36], Hossain 등[7]이 보고한 결과와 유

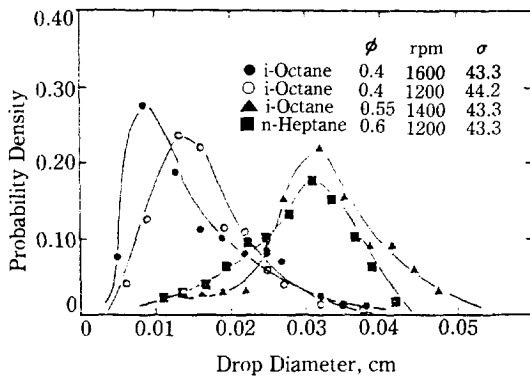


Fig. 5. Drop size distribution for the dispersion of organic drops in water at various impeller speeds.

사하였다.

한편, 체류량이 큰 경우 분산폭이 크게 나타났다. 이러한 사실은 체류량이 증가함에 따라서 합체속도가 불규칙하게 증가되었기 때문이 아닌가 사료된다. 비록 충분한 시간과 교반속도를 제공한다고 하더라도, 체류량이 작은 경우에도 평균액적크기의 수 배 정도의 큰 액적들이 목격되었다. 이들의 출현 확률은 분포곡선으로부터 미약하게 나타나고 있다. 이 곡선으로부터 주어진 조건의 Sauter 평균액적크기를 평균액적크기(d_o)로 간주하였다. Fig. 6에 측정된 n-hexane(28°C, 40.6 dyne/cm)의 액적크기를 나타냈다. 그림에서 보이는

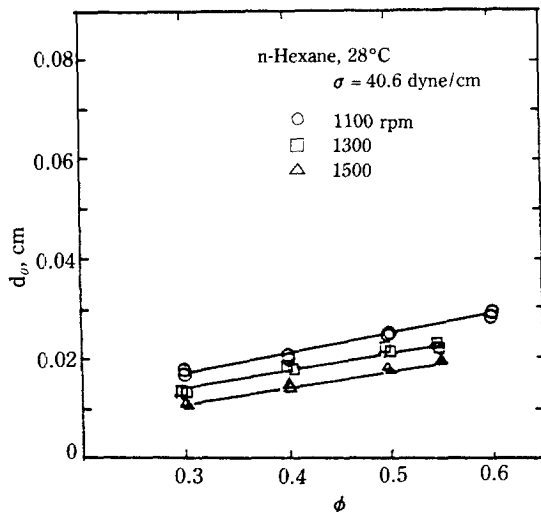


Fig. 6. Dispersed phase fraction versus photographed drop size (n-hexane at 40.6 dyne/cm).

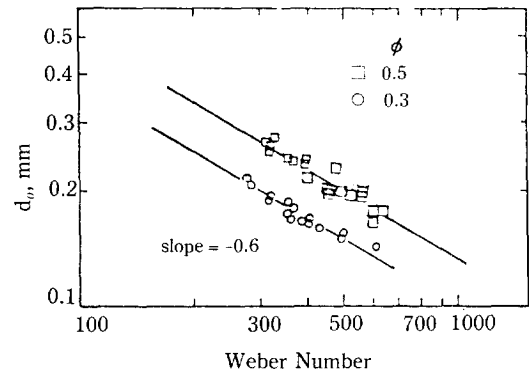


Fig. 7. Effect of Weber number at various impeller speeds.

바와 같이 일정한 교반속도를 유지한 상태에서의 분산 상 분율이 증가함에 따라서 측정된 분산 액적크기의 증가를 합체의 영향에 기인된 것이라고 할 수 있다. 왜냐 하면, 분산상 분율이 증가함에 따라서 필연적으로 액적들이 합체하는 충돌 확률이 증가한다는 사실과 일치한다고 사료되었기 때문이다. 이와 관련하여 분산상 분율을 0.3과 0.5로 일정하게 유지한 상태에서 n-heptane, iso-octane과 n-hexane에 대한 동력학적인 측면에서의 관계를 나타낸 것이 Fig. 7이다 이러한 결과는 기존의 연구자들이 발표한 결과들과 잘 일치하고 있음을 확인하여 주었다. 이를 평균액적크기(d_o)와 분산상분율(ϕ) 및 Weber수(We) 사이의 관계로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d_o}{D} = 0.026 (1 + 20\phi) We^{-0.6} \quad (6)$$

실험조건은 분산상 분율이 기존의 실험결과들과 비슷한 범위인 0.3~0.5이고, n-heptane과 iso-octane의 교반속도는 1200~1600 rpm, n-hexane은 1100~1500 rpm이다. 식 (6)의 타당성을 확인하기 위하여 n-heptane(44.2 dyne/cm, 1600 rpm, 27°C)에 대하여 비교한 것이 Fig. 8이다. 대부분의 상관식들은 측정치에서 벗어남이 컸지만, Hossain 등[7]과 Couglaglou 등[17]이 제시한 식에 의한 계산치가 실험치에 가까웠다.

4-4. 회분계에서의 분리현상에 대한 상관성

회분계에서의 혼합물의 분리과정은 복잡하다. 교반조건에 따라서 생성된 액적크기가 나타내는 분리속도를 다중입자계에 대한 유체정력학 및 벽면 등을 고려한 관계를 고려할 때, 점도의 영향이 크다. 단일 액적의 경

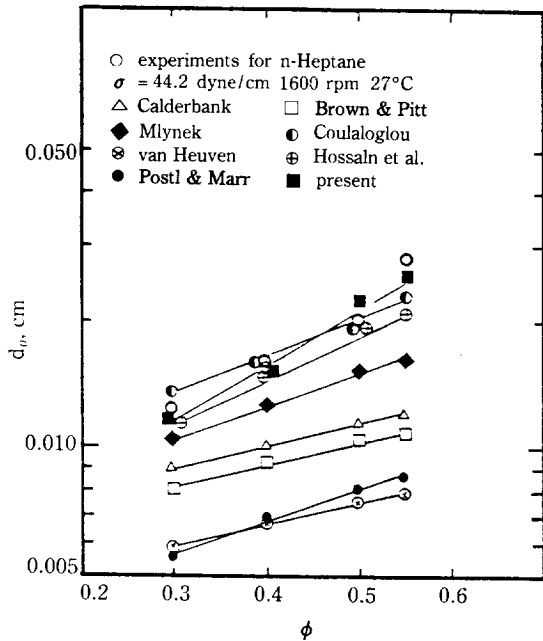


Fig. 8. Comparison of present experimental data and predictions from correlations.

우라면 본 연구에서 얻어진 액적크기 영역에서의 이동 속도는 Stokes 법칙을 만족하지만, 다중입자계이므로 이를 수정한 관계식(7)을 도입하여[37], 실험에서 얻은 결과와 비교하였다. 본 연구에서 적용할 수 있는 점도항을 Barnea와 Mizrahi[37]가 다중입자계와 고체구에 적용한 경우와 Hadamard[38], Rybezynski[39]가 액적에 내부순환이 일어나는 경우에 적용한 관계식으로부터 분리속도를 계산한 결과와 실험치를 비교 검토하고자 하는데, 이들의 관계식은 다음과 같다.

$$U_{BS} = \frac{g \Delta \rho}{18 \mu_\phi} \frac{(1-\phi)^2}{(1+\phi^{1/3})} d_o^2 \quad (7)$$

case 1

$$\mu_\phi = \mu_c \cdot B_1 \left[\frac{\frac{2}{3} B_1 + \left(\frac{\mu_d^*}{\mu_c} \right)}{B_1 + \left(\frac{\mu_d^*}{\mu_c} \right)} \right] \quad (8)$$

$$B_1 = \exp \left[\frac{5\phi}{3(1-\phi)} \right] \quad (9)$$

case 2

$$\mu_\phi = \mu_c \cdot \frac{2\mu_\phi' + 3\mu_d}{3\mu_\phi' + 3\mu_d} \quad (10)$$

$$\mu_\phi' = \mu_c \cdot \exp \left[\left(\frac{3\mu_d + 2\mu_c}{3\mu_d + 3\mu_c} \right) \cdot \left(\frac{\phi}{1-\phi} \right) \right] \quad (11)$$

case 3

$$\mu_\phi = \mu_c \cdot \exp \left[\frac{5\phi}{3(1-\phi)} \right] \quad (12)$$

여기서 case 1은 Barnea와 Mizrahi가 다중입자계에 적용한 점도항이며, case 2는 Hadamard, Rybezynski가 액적 내부에 순환이 일어나는 경우에 점도를 보정한 관계식이며, case 3은 고체구에 적용한 점도항이다. 이들의 관계를 실험치와 계산치를 비교하여 Fig. 9에 나타냈다. Case 1이 대각선을 약간 빗긴 좌측편에 분산되어 있기는 하지만 다른 경우에 비해서 실험치에 근사한 결과를 보여주고 있어서, 본 연구에서는 case 1의 점도항을 적용하였지만, 향후 연구가 계속되어야 할 부분이라고 사료된다.

한편, 본 연구에서 취급한 연속상과 분산상들은 비압축성 뉴턴유체이고, 회분계에서의 실험 범위의 물성치와 분리속도를 고려하여 무차원군으로 정리한 다음, 중회귀 분석에 의하여 다음과 같은 형태의 식이 얻어졌다 [40~42].

$$Re_\phi = 1.11 \times 10^{-12} Bo_\phi^{1.25} Mo^{-1.60} \left(\frac{1-\phi}{1+\phi^{1/3}} \right)^{2.60} (13)$$

이때의 결정계수 $R^2=0.962$ 로서 회귀방정식의 정도가 매우 크다고 할 수 있다. 실험조건은 수정된 Reynolds

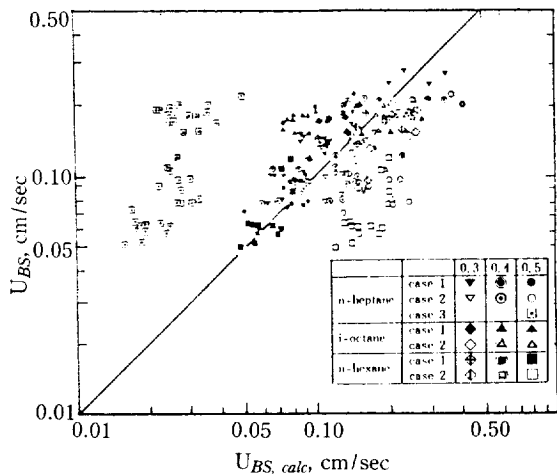


Fig. 9. The Comparison of calculated separation velocity from the Barnea and Hadamard equations with experimental results for batch separation data.

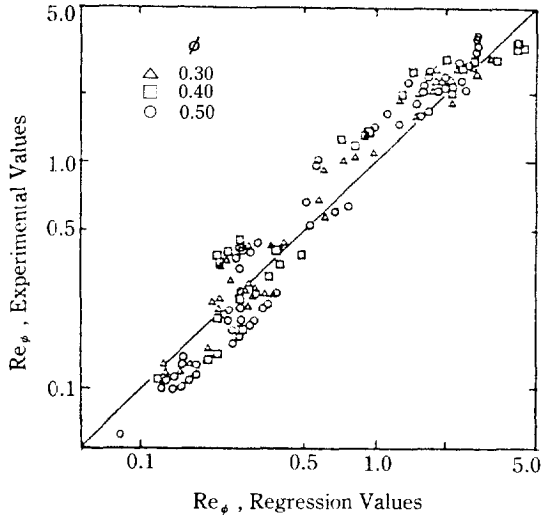


Fig. 10. Comparison of eq. (12) values with experimental results for batch separation data.

수 $Re_\phi = 0.4 \sim 5$, 수정한 Bond수 $Bo_\phi = 0.5 \times 10^{-3} \sim 9 \times 10^{-3}$, Morton수 $Mo = 7.5 \times 10^{-11} \sim 14.7 \times 10^{-11}$, 그리고 체류량 $\phi = 0.30 \sim 0.50$ 이고, 실험 범위 내에서 평균 5% 오차를 보인다. 식 (13)의 좌변 Re_ϕ 는 다중입자계에서의 Reynolds수, Bo_ϕ 는 다중입자계에서의 Weber수에 대한 Froude수의 비로서 액적의 모양을 결정하는 Bond수(혹은 Eötvös수)이고, Mo 는 중력가속도와 시료의 물성치에만 좌우되는 Morton수이다. 식 (13)의 우변의 마지막 항 $(\frac{1-\phi}{1+\phi^{1/3}})$ 은 분산상 분율이 증가함에 따라서 뚜렷해지는 간섭현상을 고려한 항이다[27]. 위와 같은 결과를 실험값과 비교해서 Fig. 10에 도시하여 놓았다. 본 연구의 실험범위에서 Re_ϕ , Bo_ϕ 및 Mo 를 고려하여 볼 때, 생성된 액적들은 구형이며[42] Morton수에 대하여 강한 함수 관계를 보여주고 있다. 특히, 식 (13)의 우변의 맨 마지막의 체류량의 관계로 표시된 항의 지수가 제일 크다는 것은 회분계의 분리과정에서 간섭현상이 지배적임을 시사하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서 얻어진 결과들을 종합하여 정리하면 다음과 같다.

1. 주어진 교반조건에 따라서, 생성된 액적들의 크기

는 Weber수의 0.6승에 반비례함을 확인하였다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d_o}{D} = 0.026 (1 + 20\phi) We^{-0.6}$$

실험조건은 Weber수 290~650, 교반속도 1100~1600 rpm, 그리고 분산상 분율이 0.30~0.50범위였다. 이와 같은 관계식은 기존의 상관식과 같은 형태이다.

2. 다중입자계에 대한 분리현상을 해석하기 위하여, 회분계에서의 분리속도(U_{BS})를 연속상과의 상대적인 분리속도(U_ϕ)로 치환한 상태에서, 다음과 같은 상관식을 얻었다.

$$Re_\phi = 1.11 \times 10^{-12} Bo_\phi^{1.25} Mo^{-1.60} \left(\frac{1-\phi}{1+\phi^{1/3}} \right)^{2.60}$$

실험조건은 수정된 Reynolds수 $Re_\phi = 0.4 \sim 5$, 수정한 Bond수 $Bo_\phi = 0.5 \times 10^{-3} \sim 9 \times 10^{-3}$, Morton수 $Mo = 7.5 \times 10^{-11} \sim 14.7 \times 10^{-11}$, 그리고 체류량 $\phi = 0.30 \sim 0.50$ 이었다.

NOMENCLATURE

- Bo : Bond number, $gd_o^2 \Delta\rho/\sigma$
- Bo_ϕ : modified Bond number
- C_1-C_3 : constant
- D : impeller diameter
- d_o : initial drop diameter or average drop diameter, cm
- Mo : Morton number, $g\mu^4/\rho_c\sigma^3$
- N : impeller rotational speed, rpm
- Re_ϕ : modified Reynolds number
- U_{BS} : batch separation velocity, cm/sec
- U_ϕ : relative velocity between the drops and continuous phase, $U_{BS} = (1-\phi)U_\phi$
- We : Weber number, $\rho_c N^2 D^3/\sigma$
- μ : viscosity, g/cm sec
- ρ : density, g/cm³
- σ : interfacial tension, dyne/cm
- ϕ : holdup or volumetric dispersed phase fraction

REFERENCES

1. Galor, B. and Klinzing, G.E.: *I&EC*, **61**, 21 (1969).
2. Glass, D. and Arnold, D.R.: *Minerals Sci. Eng.*, **8**, 23 (1976).
3. Olney, R.B. and Carlson, G.J.: *CEP*, **43**, 473 (1948).
4. Rushton, J.H. and Oldshue, J.Y.: *CEP*, **49**, 161 (1953).

5. Laity, D.S.: *AIChE J.*, **3**, 176 (1957).
6. Chen, H.T. and Middleman, S.: *AIChE J.*, **13**, 989 (1967).
7. Hossain, K.T., et al.: *I&EC(Proc. Des. Dev.)*, **22**, 553 (1983).
8. Hinze, J.O.: *AIChE J.*, **1**, 289 (1955).
9. Valentas, K.J., et al.: *I&EC(Proc. Des. Dev.)*, **5**, 271 (1966).
10. Good, P.A.: Ph. D. Thesis, Univ. of Minnesota (1974).
11. Kolmogoroff, A.N.: *C.R. Acad. Sci.(U.S.S.R.)*, **32**, 16 (1941).
12. Shinnar, R. and Church, J.M.: *I&EC.*, **52**, 253 (1960).
13. Mersman, A. and Grossman, H.: *Chem. Ing. Tech.*, **52**, 621 (1980).
14. Kim, S.S.: Ph. D. Thesis, Seoul National Univ., Seoul (1986).
15. Brown, D.E. and Pitt, K.: *CES.*, **27**, 577 (1972).
16. Mlynek, Y. and Resnick, W.: *AIChE J.*, **18**, 122 (1972).
17. Coulaglou, C.A. and Tavlarides, L.L.: *AIChE J.*, **22**, 289 (1976).
18. Postl, J. and Marr, R.: *Therm. Zerlegung von Gas und Flüssigkeitsgemischen.*, 5 (1980).
19. Hong, P.O. and Lec, J.M.: *I&EC(Proc. Des. Dev.)*, **24**, 868 (1985).
20. Kumar, A. and Hartland, S.: *Can. J. Chem. Eng.*, **63**, 368 (1985).
21. Liley, P.E., et al.: *Perry's Chem. Eng. Handbook*, Sec. 3, 6th ed., McGraw-Hill, New York (1984).
22. Godfrey, J.C. and Chang-Kakoti, D.K.: *ISEC* 77, **21**, 406 (1977).
23. Sareen, S.S. and Kintner, R.C.: *AIChE J.*, **12**, 1045 (1966).
24. Selker, A.H. and Sleicher, C.A.: *Can. J. Chem. Eng.*, **43**, 298 (1965).
25. Davies, G.A. and Jeffreys, G.V.: *Can. J. Chem. Eng.*, **48**, 328 (1970).
26. Madden, A.J. and Damerell, G.L.: *AIChE J.*, **8**, 233 (1962).
27. Barnea, E. and Mizrahi, J.: *Trans. Instn. Chem. Eng.*, **53**, 83 (1975).
28. Howarth, W.J.: *AIChE J.*, **13**, 1007 (1967).
29. Miller, R.S., et al.: *AIChE J.*, **9**, 196 (1963).
30. Hu, S. and Kintner, R.C.: *AIChE J.*, **1**, 42 (1955).
31. Edge, R.M. and Grant, C.D.: *CES.*, **26**, 1001 (1971).
32. Miksis, M.J., et al.: *J. Fluid Mech.*, **123**, 31 (1982).
33. Ward, J.P. and Knudsen, J.G.: *AIChE J.*, **13**, 356 (1967).
34. Baird, M.H.I. and Lane, S.J.: *CES.*, **28**, 947 (1973).
35. Zeitlin, M.A. and Tavlarides, L.L.: *Can. J. Chem. Eng.*, **50**, 207 (1972).
36. Stamatoudies, M. and Tavlarides, L.L.: *Chem. Eng. J.*, **21**, 77 (1981).
37. Barnea, E. and Mizrahi, J.: *I&EC(Fundam.)*, **15**, 120 (1976).
38. Hadamard, J.: *C.r. hebdom. Seanc. Acad. Sci. Paris*, **152**, 1735 (1911).
39. Rybczynski, W.: *Bull. Int. Acad. Pol. Sci. Lett. cl. Sci. Math. Nat.*, ser. A, 40 (1911).
40. Barnea, E. and Mizrahi, J.: *Can. J. Chem. Eng.*, **53**, 461 (1975).
41. Grace, J.R.: *Trans. Instn. Chem. Eng.*, **51**, 116 (1973).
42. Kumar, A. and Hartland, S.: *Can. J. Chem. Eng.*, **58**, 154 (1980).