J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 16, No. 5, October 2005, 653-659

마이크로파 조사 방식에 의한 Oil-Water 에멀젼 분리

홍주희† · 김병식* · 김덕찬

서울시립대학교 화학공학과. *동국대학교 생명 · 화학공학과
(2005년 3월 31일 접수, 2005년 7월 28일 채택)

Demulsification of Oil-Water Emulsions Using Different Microwave Irradiation Mode

Joo-Hee Hong†, Byoung-Sik Kim*, and Dok-Chan Kim

Department of Chemical Engineering, The University of Seoul, Seoul 136-743, Korea
**Department of Chemical & Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea*
(Received March 31, 2005; accepted July 28, 2005)

동일한 마이크로파 조사 방식과 전계 강도에 의하여 마이크로파가 에멀젼에 조사될 경우 조사 시간이 길수록 많은 에너지가 에멀젼에 흡수된다. 그 결과로 에멀젼의 온도가 상승하고 점도는 낮아져 분리가 일어난다. 본 연구에서는 에멀젼 분리 효율의 향상을 위하여 마이크로파 조사 방식(연속식(continuous mode), 펄스식(pulsative mode), 주기식(periodical mode))에 의한 분리 효율의 비교 검토와 Sauter 평균 지름(Sauter mean diameter: D_{32})을 이용한 에멀젼의 안정성에 관한 연구를 수행하였다. 각각의 조사 방식에 의하여 600 sec 동안 마이크로파가 조사된 30% W/O형 에멀젼(sample #1)을 24 h 침강시켰을 경우 연속식, 펄스식, 그리고 주기식에서 각각 60.0%, 62.3%, 그리고 96.2%의 오일 회수가 이루어졌고, 물 분리율은 26.5%, 35.0%, 그리고 93.9%를 나타내었다. Sauter 평균 지름(D_{32})은 연속식 47.183 μm, 펄스식 111.547 μm 그리고 주기식에서 220.476 μm로 주기식에서 가장 큰 값을 얻었다.

When emulsion is irradiated by a microwave, the energy absorbed by the emulsion is proportional to irradiation time. In case of a long exposure, the temperature of emulsion rises, its viscosity decrease, and subsequently increase the rate of demulsification. In this work, in order to improve demulsification rate, the studies on demusification and the Sauter mean diameter (D_{32}) for each microwaved emulsion with different irradiation mode(continuous, pulsative, and periodical irradiation) have been carried out. When the 30% W/O emulsion (sample #1) was irradiated for 600 sec and settled for 24 h, oil recovery rates from continuous, pulsative, and periodical microwave irradiation were 60.0%, 62.3%, and 96.2 %, and the amounts of separated water were 26.5%, 35.0%, and 93.9%, respectively. Also, the Sauter mean diameters (D_{32}) were 47.183 μm, 111.547 μm, and 220.476 μm, respectively.

Keywords: *demulsification, separation, emulsion, microwave, irradiation mode*

1. 서　　론

분산계는 어떤 상의 입자(고체, 액체 또는 기체)가 성분이 다르거나 상태가 다른 제 2의 연속상에 분산된 계이다. 에멀젼은 분산계의 일종으로 액상 입자나 액정이 다른 액상에 분산된 계를 말한다[1]. 용매 추출, 수질 오염, 고분자 중합, 정밀화학, 식품, 화장품, 의약품, 에너지 등 여러 산업 분야에서 발생되는[2] 폐액에 존재하는 Oil-Water 에멀젼 입자의 크기는 대부분 0.1 μm에서 100 μm 정도로 침전하기 어려운 부유 상태로 존재한다[3]. 이와 같은 형태의 폐액 분리는 일반적으로 알루미나(alumina)와 폴리아민(polyamine) 등의 화학 약품 첨가에 의한 방법[4]과 gas-heater 또는 oil-heater 등에 의한 가열 방법이 이용되었다[5]. 특히, 대류 또는 전도 가열과 같은 기존의 가열 방법에 의한 에멀젼 분리 방법은 불안정한 에멀젼 입자(droplet)나 점도(viscosity)가 높은 에멀젼에서는 적용이 어렵거나 비효율적이었다[6]. 그러므로, 최근에는 선택적 가열에 의해 분리 효율을 향상시킬 뿐 아니라 에너지 효율도 향상시킬 수 있는 마이크로파 조사에 의한 가열 분리 방법의 연구가 진행되고 있다.

기존 방법에 의하여 가열된 에멀젼의 분리는 일반적으로 분산 입자들이 엉김(flocculation)을 거쳐 응집(coagulation)을 일으키는 합체(coalescence)과정으로 진행된다고 알려져 있다[7]. 그러나, 마이크로파 조사 가열에 의한 Oil-Water 에멀젼의 분리는 마이크로파가 나타내는 가열 특성으로 인하여 기존 가열 방법에서 나타나는 메커니즘 이외에도 극성의 물 분자들이 회전에 의한 열을 발생시킬 뿐 아니라 물분자 주위의 전기적 전하의 규칙적 배열을 저해하여 제타 전위를 중화시켜 에멀젼의 분리를 촉진하는 것으로 알려져 있다[8].

지금까지의 마이크로파 조사 가열에 의한 에멀젼 분리 방법은 일정한 전계 강도(electric intensity)를 연속적으로 조사하여 온도를 상승시

† 주 저자(e-mail: h0516@hanmail.net)

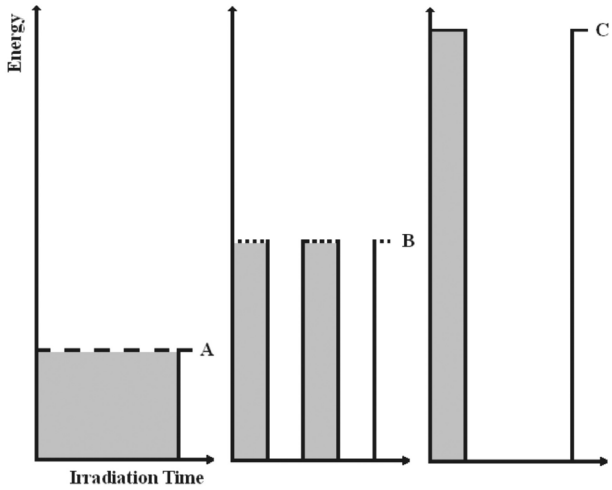


Figure 1. Microwave irradiation mode. A: Continuous, B: Pulsative, C: Periodical.

켜 분리하는 방법이었다. 그러나, 펄스식과 주기식 조사 방식에 의하여 에멀젼 분리 방법은 조사되는 마이크로파 에너지량은 동일하여도 조사 순간의 전계 강도가 높기 때문에 에멀젼 입자의 전하 표면(charged surface)을 넓게 하거나 입자 주위의 전기적 전하의 규칙적 배열을 저해하여 에멀젼의 분리 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 기존의 연속식 조사 방식과 마이크로프로세서(microprocessor)를 장착하여 듀티 사이클(duty cycle)을 조절할 수 있는 주기적 조사 방식 및 펄스 조사 방식의 마이크로파 오븐을 이용하여 에멀젼의 분리 효율을 비교 검토하였으며, Amsterdam Distribution Equation (ADE)에 의해 얻어진 Sauter 평균 지름(Sauter mean diameter: D_{32})을 이용하여 에멀젼의 마이크로파에 대한 안정성 연구를 수행하였다.

2. 실 험

2.1. 에멀젼의 제조

에멀젼은 1000 mL의 blender에 모터 오일(5W/30 API SJ ; SK Co.)을 넣고 3500 rpm으로 교반을 하며 5% (w/w)-NaOH가 용해된 수용액을 첨가 후 30 min간 교반하여 30, 50% (v/v)W/O형 에멀젼을 제조하였다. 실험을 위한 에멀젼의 제조 조건들은 Table 1과 같다.

에멀젼의 형태는 제조된 미량(5 mL)의 에멀젼이 담긴 테스트 튜브(test tube)에 푸른색의 수용성 잉크(aqueous ink)를 1~2 방울 투입 후 혼합하고 Image Analyzer를 이용하여 판단하였다. 이때 에멀젼의 연속상이 물인 경우 색상이 전체 에멀젼에 분산되지만, 오일이 연속상일 때는 색상이 점의 형태로 분산된다.

2.2. 에멀젼 가열

제조된 에멀젼은 눈금이 있는 지름(diameter) 15.6 mm의 실린더에 20 mL씩 나누어 담고, 에멀젼의 측면에서만 균일하게 마이크로파가 조사되도록 실린더의 위와 바닥 부분은 알루미늄 호일로 덮어 마이크로파를 차단하였다.

각각의 에멀젼 시료는 주파수(frequency) 2450 MHz의 연속식, 펄스식과 주기식 조사방식의 마이크로파 오븐에 넣은 후 조사 시간(0~600 sec)을 조절하며 가열하였다. 이때 총 조사 시간에 대하여 에멀젼에 조사된 마이크로파 에너지 총량은 동일하며(Figure 1), 에멀젼 가열을 위한 마이크로파 조사 장치의 사양들은 Table 2와 같다.

Table 1. Conditions for Preparation of W/O Emulsions

Sample No.	Water/Oil Concentration (v/v)		Water Add. Rate (mL/min)	Agitation Time (min)
	Nominal	Actual		
#1	30/70	26.9/73.1	15.8	30
#2	30/70	24.8/75.2	15.0	30
#3	50/50	49.0/51.0	9.4	30
#4	50/50	49.0/51.0	9.5	30

Table 2. Experimental Apparatus

Microwave Irradiation Mode	Time Base (sec)	Max. Power (W)	Applied Power (Volt, %, On/Off time)	Manufacter, Model.
Continuous			7V (0.01 W/g)	Korea Microwave Instrument Co.
Pulsative	1	525	5% (0.01 W/g)	CEM Co. LabWave 9000
Periodical	15	574	3/12 (On/Off sec) (0.01 W/g)	LG electronic Co. MR-S471

가열된 에멀젼은 장치로부터 제거된 후 초기에는 10 min, 30 min, 60 min 동안 침강시켰을 때, 침강 높이(h_s) 와 물층 높이(h_w)를 측정하였다. 그러나 60 min 이후에는 물과 오일의 분리 속도가 느려져 보다 긴 시간 간격을 두고 침강 높이와 물층의 높이를 측정하였다. 분리된 물의 부피(V_w)는 분리된 물층의 높이를 측정하여 다음 식 (1)에 의하여 구하였다.

$$V_w = 1.96 \cdot h_w \tag{1}$$

마이크로파 조사 가열에 의하여 분리된 에멀젼의 오일층과 물층에 잔존하는 물과 오일의 함량은 Standard method 5520.B에 의해 분석되었다[7].

또한, 에멀젼으로부터 분리된 물 분리율과 잔류 에멀젼내 물 함량은 다음의 두 식에 의하여 얻어졌다.

$$\text{Water Separation\%} = \frac{V_w}{20 \cdot W_0} \times 100\% \tag{2}$$

$$W(\%) = \frac{(20 \cdot W_0 - V_w)}{(20 - V_w)} \times 100\% \tag{3}$$

여기서, W_o는 제조된 에멀젼에 포함된 물의 양, W는 잔류 에멀젼에 포함된 물의 양을 나타낸다.

오일 회수율 또한 측정된 침강 높이를 이용하여 물 분리율과 동일한 방법으로 얻어졌다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 에멀젼 분리

일반적으로 수중(지표수와 폐수)에 분산되어 있는 입자의 크기는 대부분 0.1 μm에서 100 μm 정도로 침전하기 어려운 부유 상태로 존재한다[3]. 부유 상태로 존재하는 Oil-Water 에멀젼의 분리 방법 중 대

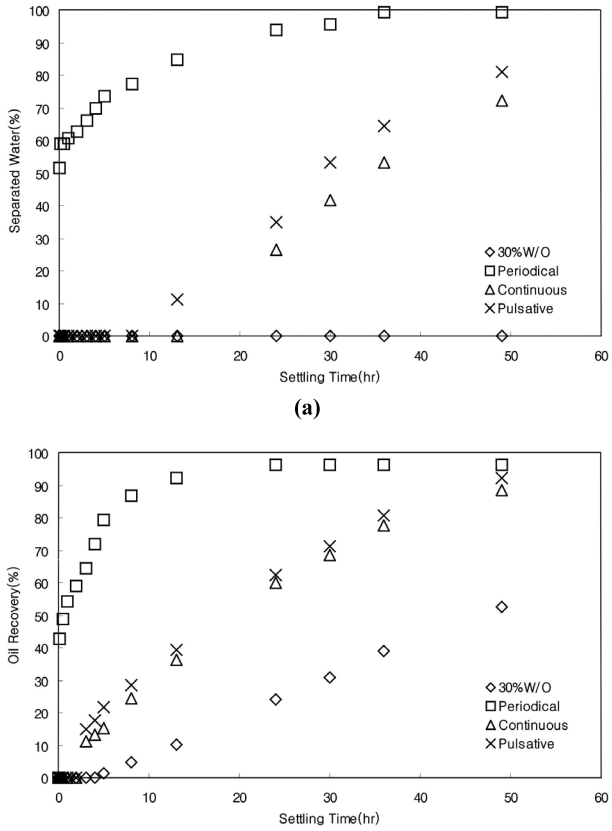


Figure 2. Separated water (a) and oil recovery (b) of microwaved 30% W/O emulsion for 600 sec (sample#1).

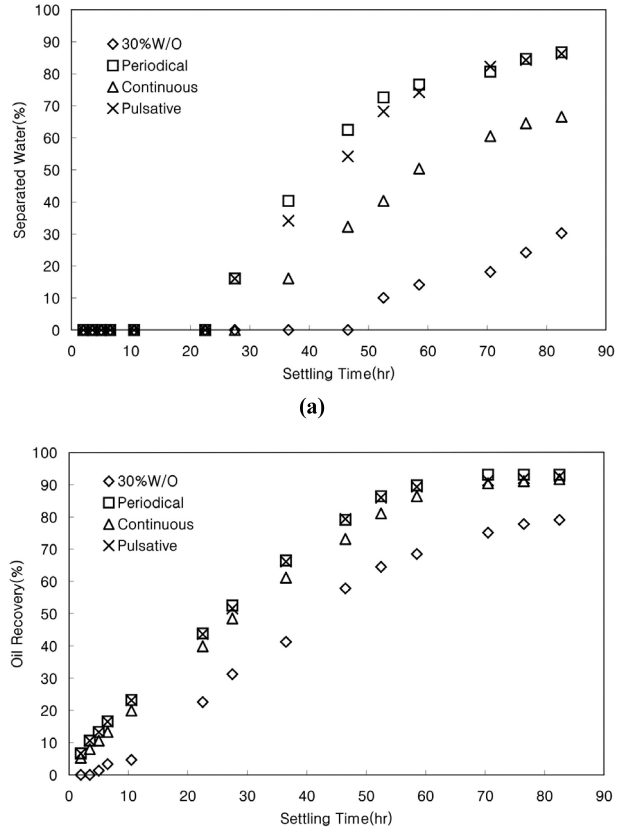


Figure 3. Separated water (a) and oil recovery (b) of microwaved 30% W/O emulsion for 300 sec (sample #2).

류 또는 전도 가열에 의한 분리는 일반적으로 분산 입자들이 엉김(flocculation)을 거쳐 응집(coagulation)을 일으키는 합체(coalescence) 과정으로 진행된다고 알려져 있다[8]. 마이크로파 조사 가열에 의한 Oil-Water 에멀젼의 분리는 마이크로파가 나타내는 가열 특성으로 인하여 대류나 전도에 의한 가열 방법에서 나타나는 메커니즘 이외에도 극성의 물 분자들이 회전에 의한 열을 발생시킬 뿐 아니라 물분자 주위의 전기적 전하의 규칙적 배열을 저해하여 제타 전위를 중화시켜 에멀젼의 분리를 촉진하는 것으로 알려져 있다[9].

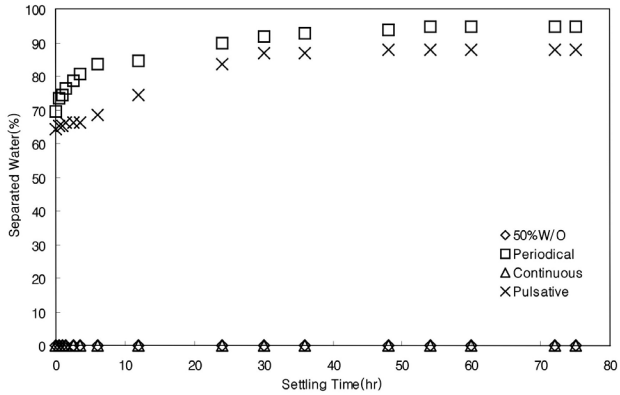
30% W/O형 에멀젼(sample #1)을 세 가지 마이크로파 조사 방식(연속식, 펄스식, 주기식)에 의하여 600 sec 동안 조사한 후, 침강 시간에 대한 물 분리율과 오일 회수율을 Figure 2에 나타내었다. 마이크로파가 조사되지 않은 에멀젼은 24 h 침강 후에 물 분리가 이루어지지 않았으나, 연속식에서는 26.6%, 펄스식에서는 35.0%, 그리고 주기식 조사에서는 93.9%의 물 분리가 이루어졌다(Figure 2-(a)). 또한, 오일은 마이크로파가 조사되지 않은 에멀젼에서는 23.9%가 회수되었고, 연속식, 펄스식 그리고 주기식으로 조사된 에멀젼들에서는 각각 60.0%, 62.3% 그리고 96.2%의 오일 회수가 이루어졌다(Figure 2-(b)).

Figure 3에 마이크로파가 연속식, 펄스식, 그리고 주기식 조사 방식에 의하여 300 sec 동안 조사된 30% W/O형 에멀젼(sample #2)의 물 분리율과 오일 회수율을 나타내었다. 연속식 조사 40.3%, 펄스식 68.2%, 그리고 주기식에서는 72.6%의 물 분리가 이루어졌으며(Figure 3-(a)), 오일 회수율은 마이크로파가 조사되지 않은 에멀젼에서 64.5%, 연속식, 펄스식, 그리고 주기식에서는 각각 81.1%, 86.0%, 그리고 86.4%의 오일 회수율을 나타내었다(Figure 3-(b)).

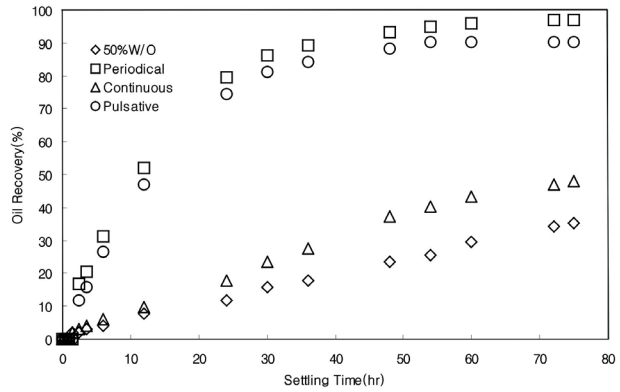
조사 방식이 다른 세 방식에 의하여 30% W/O형 에멀젼에 마이크로파가 조사되었을 때, 주기식 조사에 의하여 조사된 에멀젼에서 물 분리율과 오일 회수율이 가장 높았다. 이러한 결과는 주기식 조사 방식에 의하여 순간적으로 에멀젼에 입사되는 마이크로파의 전계 강도가 다른 두 방식보다 강하여 극성을 갖는 분산 입자들의 움직임이 커져 분산 입자의 부피에 대한 전하 표면(charged surface)이 더욱 커지고 관성(inertia)은 작아져서 물 입자가 주위의 오일 입자들로부터 자유롭게 되고[9], 물 분자 주위의 규칙적인 전하 배열이 저해되어 에멀젼의 안정성이 감소되기 때문이다[3,10]. 그러므로, 분리된 입자들은 밀도차에 의하여 부상 또는 침강하며 합체가 촉진되어 분리 효율이 높게 나타났다.

연속식, 펄스식과 주기식 조사 방식에 의하여 50% W/O형 에멀젼(sample #3)에 마이크로파가 600 sec 동안 조사된 에멀젼의 분리 효율을 Figure 4에 나타내었다. 마이크로파에 의하여 조사된 각각의 에멀젼이 24 h 침강되었을 때, 마이크로파가 조사되지 않은 에멀젼과 연속식에 의하여 조사된 에멀젼에서는 물의 분리가 이루어지지 않았으나 펄스식과 주기식에 의하여 조사된 에멀젼은 각각 83.7%, 89.8%의 물 분리가 이루어졌다(Figure 4-(a)). 오일 회수율은 물 분리가 없는 두 에멀젼(마이크로파가 조사가 되지 않은 에멀젼과 연속식에 의하여 조사된 에멀젼)에서는 11.8%, 17.6%를 나타내었으며, 펄스식과 주기식에 의하여 조사된 에멀젼에서는 각각 74.5%, 79.4%의 오일 회수가 이루어졌다(Figure 4-(b)).

Figure 5에 연속식, 펄스식 그리고 주기식 조사 방식에 의하여 마이크로파가 300 sec 동안 조사된 50% W/O형 에멀젼(sample #4)의 침강



(a)



(b)

Figure 4. Separated water (a) and oil recovery (b) of microwaved 50% W/O emulsion for 600 sec (sample #3).

시간에 따른 오일 회수율을 나타내었다. 91 h 침강 후 마이크로파가 조사되지 않은 에멀젼에서는 16.7%의 오일이 회수되었으며 연속식 23.0%, 펄스식 24.5%, 그리고 주기식 조사에서는 25.5%의 오일 회수율을 나타내었다.

마이크로파가 각각의 조사 방식에 의하여 50% W/O형 에멀젼에 조사되었을 때 30% W/O형 에멀젼과는 다르게 300 sec 이하의 조사 시간에서는 물의 분리가 없었다. 이러한 현상은 연속상인 물의 양이 증가하여 단위 부피에 흡수되는 마이크로파 에너지가 적어 분산 입자들의 합체가 용이하지 못하기 때문이다. 그러나, 에멀젼에 600 sec 동안 마이크로파 조사 후 24 h 침강시켰을 때 오일 회수율은 주기식 조사에서 펄스식 보다는 24.9%, 연속식 보다는 61.8%의 더 높은 오일 회수율이 얻어졌다. 이 결과들은 에멀젼에 마이크로파가 입사될 때 다른 두 조사 방식보다 주기식에서 전계 강도가 강하기 때문에 분산 입자들의 움직임이 순간적으로 커져 분산 입자들에 대한 전하 표면을 증가시킬 뿐 아니라 물 분자 주위의 전하의 규칙적 배열을 저해하기 때문에 분산 입자간 합체가 촉진되어[3,10] 상대적으로 큰 직경의 분산 입자들이 형성되기 때문이다.

3.2. 에멀젼의 안정성

W/O형 에멀젼에서 마이크로파에 대한 에멀젼의 안정성 평가는 에멀젼의 침강성 분석(sedimentation analysis)을 위하여 Bezemer[11]와 Schwarz[12] 등에 의하여 유도된 Amsterdam Distribution Equation (ADE)과 Sauter 평균 지름(Sauter mean diameter: D_{32})에 의하여 이루어졌다[10]. ADE식은 최대 입자 크기(maximum droplet size: D_{max})와

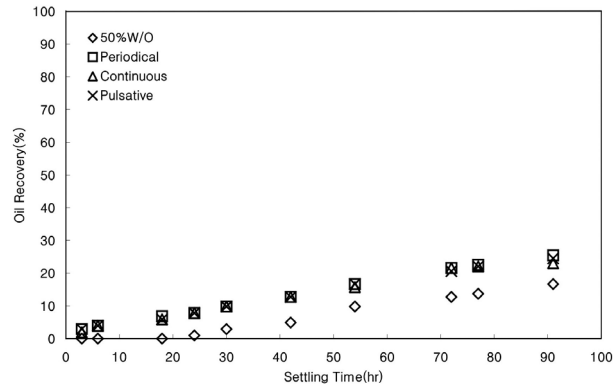


Figure 5. Oil recovery of microwaved 50% W/O emulsion for 300 sec (sample #4).

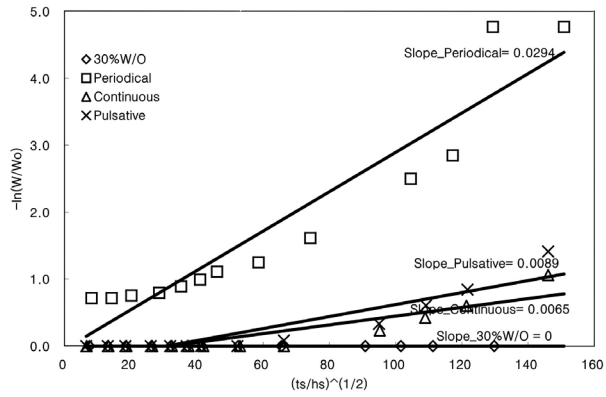


Figure 6. Sedimentation curve of microwaved 30% W/O emulsion for 600 sec (sample #1).

ADE 매개변수(ADE parameter: α)를 함수로 하는 다음의 식 (4)로 표현된다.

$$\ln(W / W_0) = \alpha / D_{max} - \alpha \cdot (A)^{1/2} \cdot (t_s / h_s)^{1/2} \quad (4)$$

여기서, W는 일정한 침강 시간(settling time; t_s) 후 에멀젼에 남아있는 물의 함량을 나타내며, W_0는 제조된 에멀젼에 함유된 물의 함량을 나타낸다. 또한, A는 침강 상수(sedimentation constant), h_s는 침강 높이(settling height)를 나타낸다.

식 (4)의 $(t_s / h_s)^{1/2}$에 대한 함수로써 $-\ln(W / W_0)$를 plot하여 얻어진 기울기(slope)로부터 $\alpha(A)^{1/2}$의 값을 구하였으며, 얻어진 기울기 값들은 에멀젼의 상대적 분리 속도(sedimentation rate)를 나타낸다. 또한, 측정된 에멀젼 온도에서의 ADE 매개변수(α)는 stoke's식에 의하여 구한 침강 상수 A를 이용하여 기울기 $\alpha(A)^{1/2}$로부터 구하였으며, $-\ln(W / W_0)=0$ 또는 $W / W_0=1$일 때 직선의 교차점(intersection)으로부터 최대입자크기(D_{max})를 구하였다. Sauter 평균 지름(D_{32})은 ADE 매개 변수(α)와 최대입자크기(D_{max})로 표현되는 다음의 식 (5)으로 표현된다[13].

$$1/D_{32} = 1/\alpha + 1/D_{max} \quad (5)$$

그러나, 입자의 전체 부피와 표면적에 의존하는 평균 입자 크기(D_{32})의 원래 정의는 다음과 같다[8].

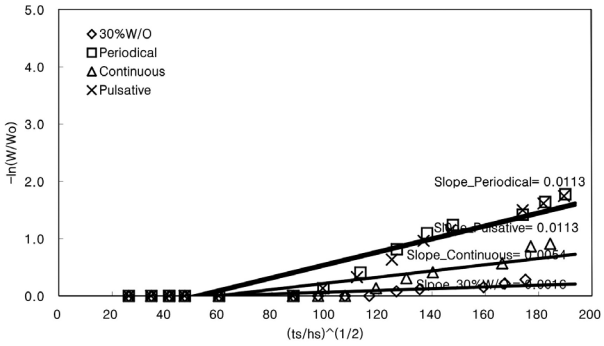


Figure 7. Sedimentation curve of microwaved 30% W/O emulsion for 300 sec (sample #2).

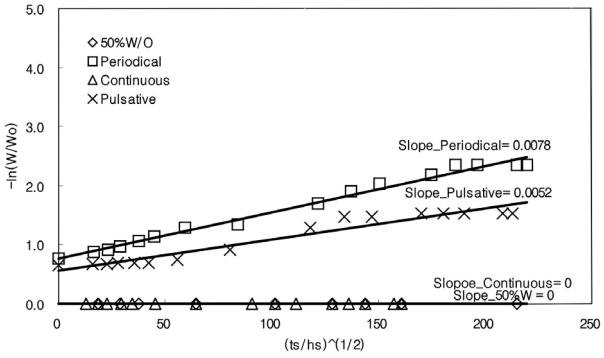


Figure 8. Sedimentation curve of microwaved 50% W/O emulsion for 600 sec (sample #3).

$$D_{32} = \Sigma(N_i \cdot D_i^3) / \Sigma(N_i \cdot D_i^2) \quad (6)$$

여기서, N_i는 에멀젼에서 직경이 D_i인 분산 입자의 개체수를 나타낸다.

Figure 6은 30% W/O형 에멀젼(sample #1)에 연속식, 펄스식과 주기식으로 마이크로파를 600 sec 동안 조사 후, 식 (5)의 $(t_s/h_s)^{1/2}$에 대한 함수로써 -In(W/W_0)를 plot하여 나타낸 것이다. 이때 각각의 기울기 $\alpha(A)^{1/2}$ 값은 0.0065, 0.0089, 그리고 0.0294를 나타내었으며, 이러한 결과는 주기식 마이크로파 조사에 의한 에멀젼의 물 분리 속도가 연속식과 펄스식 조사 방식보다 상대적으로 약 4.52, 3.30배 빠르게 진행되었음을 나타낸다. 한편, 300 sec간 마이크로파가 조사된 30% W/O형 에멀젼(sample #2)에서 기울기는 연속식에서 0.0054를 나타내고 주기식과 펄스식 조사에서 0.0113로 같았으나, 주기식 조사에 의한 에멀젼의 물 분리가 더 앞선 시간에 진행되었다(Figure 7).

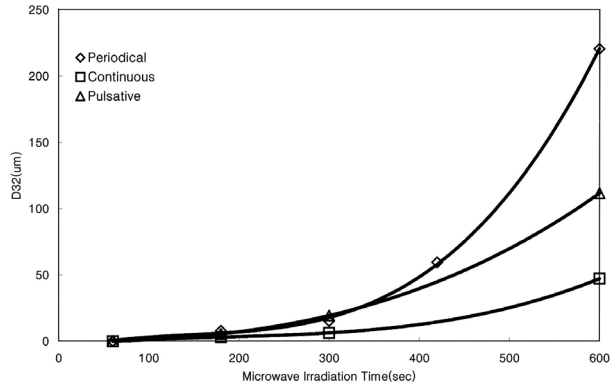


Figure 9. Droplet size on microwave effect in 30% W/O emulsion.

Figure 8은 에멀젼에 물이 50% 함유된 W/O형 에멀젼(sample #3)에 연속식, 펄스식 그리고 주기식 조사에 의하여 600 sec 동안 마이크로파가 조사된 에멀젼의 물 분리 속도를 나타낸 것이다. 30% W/O형 에멀젼에 나타난 것처럼 50% W/O형 에멀젼(sample #3)에서도 연속식 0.0, 펄스식 0.0052, 그리고 주기식에서 0.0078로 주기식에서 가장 큰 기울기 값을 나타내었으며 물 분리 속도도 펄스식보다 약 1.50배 빠르게 진행되었다. 그러나, 연속식에서는 에멀젼에 분산된 극성의 물 입자들간 합체가 이루어질 충분한 에너지를 흡수하지 못하여 물의 분리가 전혀 이루어지지 않았다. 또한, 300 sec 동안 세 가지 조사 방식에 의하여 조사된 에멀젼에서도 모두 물의 분리가 없었다.

Figure 6~8의 기울기와 조사 시간에 대하여 측정된 에멀젼 온도와 stoke's식을 이용하여 얻어진 침강 상수(A)로부터 ADE 매개 변수(α)를 구하였으며, -In(W/W_0)=0 또는 W/W_0=1 일 때 직선의 교차점(intersection)으로부터 최대 입자 크기(D_{max})를 얻었다. 이 값들과 식 (5)에 의하여 최종적으로 Sauter 평균 지름(D_{32})을 구하였다. Table 3~5에 마이크로파 조사 방식에 대한 각각의 에멀젼들의 Sauter 평균 지름과 다른 매개 변수의 값들을 나타내었다. 에멀젼의 Sauter 평균 지름의 증가는 분산 입자간 합체의 활발한 진행으로 에멀젼의 불안정도가 증가함을 나타낸다.

30% W/O형 에멀젼(sample #1)에 600 sec 동안 마이크로파 조사되었을 때 Sauter 평균 지름(D_{32})은 연속식 47.183 μm, 펄스식 111.547 μm, 그리고 주기식에서 220.476 μm로 주기식에서 가장 큰 값을 얻었다(Table 3). 또한, 마이크로파의 조사 시간이 길수록 Sauter 평균 지름도 증가되었다(Table 4). 이러한 현상은 마이크로파 조사 시간에 의한 에멀젼의 온도 상승으로 분산 입자간 합체가 더 빠르게 진행되었기 때문이다. 50% W/O형 에멀젼(sample #3)에 600 sec 동안 마이크로파

Table 3. Sauter Mean Dimeter and Other Parameters on Microwave Effect in 30% W/O Emulsion (sample #1)

	Periodical			Continuous		Pulsative	
t_{mw} (s)	0	60	600	60	600	60	600
T_{avg} (℃)	17.81	21.59	52.18	21.25	60.11	25.87	82.62
A ($cm^{-1} \cdot s^{-1}$)	81.862	64.608	1.621	78.293	12.878	77.413	3.593
$\alpha \times A^{(1/2)}$	0.0	0.0	0.029	0.0	0.024	0.0	0.032
α/D_{max}	0.0	0.0	0.047	0.0	0.394	0.0	0.503
α (μm)	0.0	0.0	230.927	0.0	65.763	0.0	167.633
D_{max} (μm)	0.0	0.0	4871.868	0.0	166.996	0.0	333.399
D_{32} (μm)	0.0	0.0	220.476	0.0	47.183	0.0	111.547

Table 4. Sauter Mean Dimeter and Other Parameters on Microwave Effect in 30% W/O Emulsion (sample #2)

	Periodical			Continuous		Pulsative	
t_{mw} (s)	0	180	300	180	300	180	300
T_{avg} (℃)	118.04	31.88	42.06	30.23	39.35	42.01	56.70
A ($cm^{-1} \cdot s^{-1}$)	81.005	10.055	2.674	51.003	42.858	34.978	13.309
$\alpha \times A^{(1/2)}$	0.002	0.003	0.011	0.003	0.005	0.004	0.011
α/D_{max}	0.093	0.154	0.572	0.138	0.318	0.208	0.600
α (μm)	1.778	9.146	69.104	3.501	8.249	6.594	30.974
D_{max} (μm)	19.198	59.464	120.769	25.348	25.906	31.673	51.624
D_{32} (μm)	1.627	7.926	45.954	3.076	6.257	5.458	19.359

Table 5. Sauter Mean Dimeter and Other Parameters on Microwave Effect in 50% W/O Emulsion (sample #3)

	Periodical			Continuous		Pulsative	
t_{mw} (s)	0	60	600	60	600	60	600
T_{avg} (℃)	20.70	22.47	54.34	24.02	38.02	22.00	44.98
A ($cm^{-1} \cdot s^{-1}$)	79.105	26.306	0.132	81.218	0.940	79.682	0.224
$\alpha \times A^{(1/2)}$	0.0	0.0	0.008	0.0	0.0	0.0	0.005
α/D_{max}	0.0	0.0	0.770	0.0	0.0	0.0	0.568
α (μm)	0.0	0.0	214.652	0.0	0.0	0.0	109.775
D_{max} (μm)	0.0	0.0	278.878	0.0	0.0	0.0	193.402
D_{32} (μm)	0.0	0.0	121.293	0.0	0.0	0.0	70.027

가 조사되었을 때 연속식에서 Sauter 평균 지름은 물 분리가 이루어지지 않아 구할 수 없었으나 펄스식과 주기식에서는 각각 70.027 μm, 121.293 μm로 30% W/O형 에멀젼처럼 주기식에서 더 큰 값을 나타내었다(Table 5).

Figure 9는 30% W/O형 에멀젼에서 각각의 마이크로파 조사 방식에 의한 Sauter 평균 지름(D_{32})을 나타낸 것이다.

에멀젼의 Sauter 평균 지름(D_{32})은 연속식과 펄스식 조사보다 주기식 조사에서 더 큰 값들을 나타내었다. 또한, 400～600 sec 동안 주기적 방식에 의해 마이크로파가 조사된 에멀젼의 Sauter 평균 지름(D_{32})은 빠르게 증가되었다. 이와 같은 결과는 주기식에 의하여 조사된 에멀젼의 내부에서 분산 입자간 합체 현상이 다른 방식보다 빠르게 진행되었기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 마이크로파 조사 방식(연속식, 펄스식, 주기식)에 의한 에멀젼의 분리 효율을 비교 검토하였다. 또한, 각각의 조사 방식에 의하여 조사된 에멀젼들의 물 분리율과 오일 회수율을 구하고, ADE 식으로부터 얻어진 Sauter 평균 지름(D_{32})을 이용하여 마이크로파에 대한 에멀젼의 안정성을 검토하였다. 이와 같은 연구 결과들로부터 다음의 결론들을 얻었다.

(1) 주기적 방식에 의하여 마이크로파가 조사된 30%, 50% W/O형 에멀젼에서 물 분리율과 오일 회수율이 가장 우수하였다.

(2) 30%, 50% W/O형 에멀젼에서 Sauter 평균 지름(D_{32})은 연속식과 펄스식 마이크로파 조사 방식보다 주기적 조사 방식에서 더 크게 나타났다.

그러므로, 마이크로파에 의한 에멀젼의 분리 효율은 입사되는 마이크로파의 전계 강도를 강하게 하여 조사하는 주기식 조사 방식에 의하여 향상될 수 있다.

사용된 기호

A : sedimentation constant, (=(P_w - P_{oil}) · g/18 μ_{oil}) [cm]
D_i : diameter of droplet in emulsion, [cm]
D_{max} : maximum droplet size in emulsion, [cm]
D_{32} : Sauter mean diameter, [cm]
g : gravity acceleration constant, [cm/s^2]
h_s : settling height, [cm]
N_i : numbers of droplets with diameter D_i, [-]
n : the population of particles at time t, [-]
t_s : settling time, [s]
W : water content of emulsion after sedimentation time t_s, [%]
W_0 : original water content of emulsion, [%]
u_w : the settling velocity of single droplet, [cm/s]

그리스 문자

α : parameter of Amsterdam Distribution Equation [cm]
ρ_w, ρ_{oil} : density of water and oil [g/cm^3]
μ_{oil} : viscosity of oil phase [g/cm · s^2]

참 고 문 헌

1. IUPAC, *Pure Apple. Chem.*, **31**, 579 (1972).
2. 임경희, 에멀젼 기술과 계면 활성제, 한국과학기술원, 대전 (1993).
3. 박광하 외, *J. Environ. Res.*, **2**, 1A (2002).
4. R. C. Little and R. L. Patterson, *Environ. Sci. Tech.*, **12**, 584 (1978).
5. K. Arnold and M. Stewart, Surface Production Operation, **1**, Gulf

Pub. Co., Huston (1986).
6. C. S. Fang, P. M. C. Lai, B. K. L. Chang, and W. J. Klaila, *Environ. Progr.*, **8**, 235 (1989).
7. S. E. Lenore, E. G. Arnold, and D. E. Andrew, Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., *Am. Pub. Health Assoc.*, Washington (1998).
8. M. P. Lai, Ph.D. Dissertation, Louisiana Tech Univ. LA (1990).
9. E. R. Peterson, *Microwave: Theory and Application in Materials Process IV*, ACS (American Ceramic Society), OH (2001).
10. D. F. Evans and H. Wennerstrom, *The Colloidal Domain*, 2nd ed., Wiley-VCH, NY (1999).
11. C. Bezemer and N. Schwarz, *Kolloid-Zeitschrift*, **146 Bd.**, 145 (1956).
12. N. Schwarz and C. Bezemer, *Kolloid-Zeitschrift*, **146 Bd.**, 139 (1956).
13. F. H. Meijs and R. W. Mitchell, *J. Petrol. Tech.*, 563 (1974).