

밀배아유 원료 O/W 유화액의 제조 및 안정성평가: CCD-RSM을 이용한 최적화

홍세흠 · 장현식* · 이승범*.[†]

단국대학교 고분자공학과, *단국대학교 화학공학과
(2021년 7월 29일 접수, 2021년 9월 17일 수정, 2021년 9월 17일 채택)

Emulsification and Stability of Wheat Germ Oil in Water Emulsions: Optimization using CCD-RSM

Seheum Hong, Hyun Sik Jang* and Seung Bum Lee*,[†]

Department of Polymer Science and Engineering, Dankook University, Gyeonggi 16890, Korea

*Department of Chemical Engineering, Dankook University, Gyeonggi 16890, Korea

(Received July 29, 2021; Revised September 17, 2021; Accepted September 17, 2021)

초 록

천연 밀배아유와 복합 sugar ester를 이용하여 밀배아유 원료 O/W (oil in water) 유화액을 제조하였다. HLB 값, 유화제의 첨가량 및 유화시간이 O/W wheat germ oil 유화액의 평균 입자크기, 유화점도 및 ESI에 미치는 영향을 조사하였으며, 반응표면분석방법인 중심합성계획모델에 의해 제조된 유화과정의 파라미터를 모의하고 최적화하였다. O/W wheat germ oil 유화액의 제조를 위한 최적의 공정조건은 HLB 값(hydrophile-lipophile balance value)은 8.4, 유화제의 첨가량은 6.4 wt%, 유화시간은 25.4 min이며, 최적조건에서 중심합성계획(central composite design, CCD-RSM) 모델을 통한 예측 반응치는 7일 후의 유화액을 기준으로 MDS (mean droplet size)= 206 nm, 점도 = 8125 cP, ESI 98.2%이었다. 또한 실제 실험을 통해 얻어진 유화액의 MDS, 점도 및 ESI는 각각 209 nm, 7974 cP 및 98.7%로 나타났다. 따라서 중심합성계획 모델을 통해 밀배아유 원료 유화액의 안정성을 평가하는 최적화 과정을 설계할 수 있었다.

Abstract

An O/W (oil in water) emulsion, wheat germ oil raw material, was produced by using natural wheat germ oil and composite sugar-ester. The effects of variables such as the hydrophile-lipophile balance (HLB) value, added emulsifier amount, and emulsification time on the average particle size, emulsification viscosity and ESI of O/W wheat germ oil emulsion were investigated. The parameters of the emulsification process produced by the central composite design model of the response surface methodology (CCD-RSM), which is a reaction surface analysis method, were simulated and optimized. The optimum process conditions obtained from this paper for the production of O/W wheat germ oil emulsion were 8.4, 6.4 wt%, 25.4 min for the HLB value, amount of emulsifier, and emulsion time, respectively. The predicted reaction values by CCD-RSM model under the optimum conditions were 206 nm, 8125 cP, and 98.2% for mean droplet size (MDS), viscosity, and ESI, respectively, based on the emulsion after 7 days. The MDS, viscosity and ESI of the emulsion obtained from actual experiments were 209 nm, 7974 cP and 98.7%, respectively. Therefore, it was possible to design an optimization process for evaluating the stability of the emulsion of wheat germ oil raw material by CCD-RSM.

Keywords: Wheat germ oil, Sugar ester, O/W emulsion, Emulsion stability, CCD-RSM

1. 서 론

밀배아유(wheat germ oil)는 밀배아에서 추출한 식물성 오일로 oleic acid, linoleic acid, linolenic acid 등 불포화지방산뿐만 아니라 비타민 E, 인지질(phospholipid), 스테롤(sterol) 및 옥타코사놀(octacosanol) 및

기타 생리활성 성분이 풍부한 오일이다. 그 중에서도 비타민 E 함량은 식물성 오일 중 가장 많으며, α , β , γ , δ 형 4종류의 비타민을 함유하고 있어 강력한 천연 항산화 물질로 알려져 있다. 그러나 밀배아유는 낮은 용해도 및 빛, 열, 산소에 대한 민감성을 가지므로 실제 생산에서의 적용이 제한적이다. 생물학적 활성물질의 일반적인 문제점을 고려하여, 유통기술을 적용하면 활성물질의 안정성을 어느 정도 향상시키고 활성물질의 화학적 분해를 방해하며 활성 물질의 효과를 유지할 수 있다[1-2]. 천연 계면활성제인 sugar ester는 무취 및 무독성 비이온 계면활성제로 눈과 피부에 자극적이지 않으며 음식뿐만 아니라 생분해성이 뛰어나 의약품 및 화장품에도 적합하다. Sugar ester의

[†] Corresponding Author: Dankook University
Department of Chemical Engineering, Gyeonggi 16890, Korea
Tel: +82-31-8005-3559 e-mail: leesb@dankook.ac.kr

HLB 값(hydrophile lipophile balance value)은 1~16까지 다양하며, 모든 등급의 sugar ester는 우수한 계면활성제 기능을 나타낸다. 비이온 계면활성제의 유화능력은 친수성기의 수분 흡수 능력과 친유성기의 유 흡수 능력 사이의 균형에 달려 있다. 이러한 상대 균형을 정량화하기 위한 지표로 HLB 값을 사용한다[3-4]. 유화액은 계면활성제를 첨가하여 안정화시킴으로써 간단하게 제조될 수 있지만, 유화액은 큰 열역학적 불안정한 유체 계면계를 함유하고 있다. 따라서 응집(flocculation), 병합(coalescence), Ostwald 숙성(Ostwald ripening) 및 상분리를 포함한 다양한 물리적 및 화학적 메커니즘으로 인해 시간이 지남에 따라 해유화(demulsification)하는 경향이 있다[5,6].

반응표면분석법(response surface methodology, RSM)은 연속 가변 표면모델을 설정하고, 생물학적 과정과 상호 작용에 영향을 미치는 요인을 평가하고, 최적 수준의 범위를 결정하는 데 사용되는 생물학적 과정을 최적화하는 통계적 실험 설계법이다. 그리고 필요한 실험군의 수는 상대적으로 적고, 인적 및 물질적 자원을 절약할 수 있으므로, 이 방법은 다양한 생물학적 공정 최적화에 성공적으로 적용되었다[7].

본 연구에서는 비이온 계면활성제인 sugar ester-370 (S-370) 및 sugar ester-1670 (S-1670)을 유화제로 사용하여 밀배아유 원료 O/W 유화액을 제조하였다. 유화과정의 독립변수로 HLB 값, 유화제의 첨가량, 유화시간을 설정하여 반응치인 유화액의 평균입자크기(mean droplet size, MDS), 유화액의 점도 및 유화안전도지수(emulsion stability index, ESI)에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 반응표면분석법 중 중심합성계획(central composite design, CCD-RSM)모델 최적화 분석에 의해 유화안정성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1. O/W 유화액의 유화과정

천연 밀배아유(The Kerfoot Group, England) 및 초순수(Vivagenen EXL-III)와 천연 비이온 계면활성제인 sugar ester (S-370 및 S-1670)를 사용하여 유화액을 제조하였다. 밀배아유 원료 O/W 유화액의 제조하기 위해 유상과 수상의 질량비를 2:8로 유지한 후 유화액의 총 질량을 200 g으로 설정하였다. 유상 및 수상은 가열교반기(HSD150-03P, Misung Scientific Co., Ltd.)를 이용하여 70 °C로 예열하였으며, 비이온 계면활성제인 S-370 (HLB 값 = 3.0)는 유상에 S-1670 (HLB 값 = 6.0)는 수상에 용해시켰다. 유화과정은 high-speed emulsifier (Homomixer Mark II, T.K. Primix)를 이용하여 6000 rpm으로 유화시켰다. 유화과정의 변수로는 HLB 값(6.0~10.0), 계면활성제의 첨가량(5.0~7.0 wt%), 유화시간(20~30 min) 등으로 설정하였으며, 제조된 유화액은 25 °C incubator에 7 일간 보관한 후 유화안정성을 평가하였다.

2.2. 비이온 계면활성제의 HLB 값 계산

본 연구에서는 비이온 계면활성제인 S-370와 S-1670를 혼합하여 HLB 값 변화에 따른 유화특성을 관찰하였다. 이때 혼합 계면활성제의 HLB 값은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$HLB_{OW} = \frac{HLB_O \times W_O + HLB_W \times W_W}{W_{OW}} \quad (1)$$

여기서 HLB_{OW} 는 혼합 계면활성제의 HLB 값이고, HLB_O 는 S-370의 HLB 값, HLB_W 는 S-1670의 HLB 값이다. 또한 W_O 와 W_W 는 각각 S-370와 S-1670의 질량이고, $W_{OW} = W_O + W_W$ 는 혼합계면활성제의

질량이다.

2.3. 유화안정성의 평가

유화의 동적 광산란(dynamic light scattering, DLS) 분석은 ZETA Sizer (Zen 3600, Malvern)을 사용하여 나노유화액의 평균입자크기(mean droplet size, MDS) 및 PDI (polymer dispersity index)를 측정하였다. 다중산란효과(multiple scattering effect)를 피하기 위해, 각 유화액 샘플을 200배 희석하고 25 °C에서 3회 반복 측정하였다. 또한 유화액의 점도는 25 °C에서 Brookfield 점도계(DV-II+ Pro, Brookfield Co.)를 사용하여 측정하였다. Creaming층 또는 침전층의 양을 계산함으로써 유화액의 중력 분리 정도에 통해 유화의 안정성을 평가할 수 있다. 본 연구에서의 ESI는 25 °C에서 7 일 후의 유화액을 이용하여 다음 식으로 계산하였다.

$$ESI(\%) = 100\% \times \frac{H_E - (H_S + H_C)}{H_E} \quad (2)$$

여기서 H_E 는 전체 유화액의 높이이고, H_C 는 Creaming 층의 높이이며, H_S 는 침전층의 높이이다. ESI가 클수록 유화액은 더 큰 안정성을 가지고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. CCD-RSM을 이용한 회귀방정식 분석

CCD-RSM을 이용한 밀배아유 원료 O/W 유화과정에서의 독립변수는 HLB 값(6.0~10.0), 계면활성제의 첨가량(5.0~7.0 wt%), 유화시간(20~30 min)을 사용하였고, 반응치는 MDS, 점도 및 ESI로 선택하였다. 본 연구에서의 실험조건 및 결과를 Table 1에 나타내었다.

Figure 1은 반응치로 MDS의 반응표면도 및 등고선도로 나타낸 그림이다. 독립변수인 HLB 값, 유화제의 첨가량, 유화시간이 증가함에 따라 반응치인 MDS는 감소하다가 증가하는 경향을 나타내었다. MDS가 작을수록 계면막(interfacial film)의 분자 구조가 좋고, 유화의 안정성이 높아지므로 최소 MDS를 갖는 조건을 최적조건으로 결정할 수 있다[8,9]. Figure 1의 등고선도의 모양은 요인 상호작용의 강도를 반영하며, CCD-RSM에 의해 다음의 회귀방정식을 얻었다.

$$S = 1530 - 132.6x_1 - 161.0x_2 - 17.64x_3 + 8.132x_1^2 + 13.79x_2^2 + 0.474x_3^2 + 0.87x_1x_2 - 0.400x_1x_3 - 0.850x_2x_3 \quad (3)$$

여기서 S 는 CCD-RSM에서의 반응치로 MDS이다. 독립변수 x_1 , x_2 및 x_3 각각 HLB 값, 유화제의 첨가량 및 유화시간이다. 반응치로 MDS (S)에 대한 각 독립변수의 영향을 고찰하기 위해 P -값, F -값 등을 Table 2에 나타내었다. 각 변수의 영향의 유의성은 P -값으로 검증되며, P -값이 작을수록 반응치에 대한 영향의 유의성이 더 크다. 또한 영향 정도의 분석을 통해 각 요인의 F -값은 영향의 크기를 반영할 수 있으며, F -값이 클수록 반응치에 대한 영향이 커진다. MDS의 변화와 관련된 주효과도로 F_{x_1} -값, F_{x_2} -값 및 F_{x_3} -값의 비율은 2.2 : 1.0 : 1.3이다. MDS의 변화와 관련된 교호효과도로 $F_{x_1x_2}$ -값, $F_{x_1x_3}$ -값 및 $F_{x_2x_3}$ -값의 비율은 1.0 : 5.2 : 5.9이다. 주효과도를 비교하여 MDS에 영향정도

Table 1. Basic Experimental Setup of Response Surface Methodology

No.	Emulsification Condition			Experimental Data		
	HLB Value [-]	Emulsifier [wt%]	Time [min]	MDS [nm]	Viscosity [cP]	ESI [%]
1	8.0	6.0	25.0	215	7884	97.4
2	6.0	5.0	30.0	283	5728	84.2
3	8.0	7.7	25.0	239	7582	96.1
4	6.0	5.0	20.0	312	4496	83.5
5	8.0	6.0	25.0	206	7882	97.5
6	8.0	4.3	25.0	253	5877	85.8
7	10.0	7.0	20.0	277	6926	93.1
8	11.4	6.0	25.0	269	7279	84.1
9	8.0	6.0	33.41	228	6440	94.6
10	8.0	6.0	25.0	206	7881	97.4
11	8.0	6.0	25.0	220	7879	97.2
12	8.0	6.0	25.0	206	8120	97.0
13	10.0	5.0	30.0	265	6957	89.7
14	8.0	6.0	16.6	253	5932	95.1
15	4.6	6.0	25.0	329	4717	78.6
16	10.0	5.0	20.0	275	6744	87.2
17	6.0	7.0	20.0	272	5579	91.2
18	6.0	7.0	30.0	261	6818	88.9
19	8.0	6.0	25.0	207	7678	97.9
20	10.0	7.0	30.0	215	7558	92.1

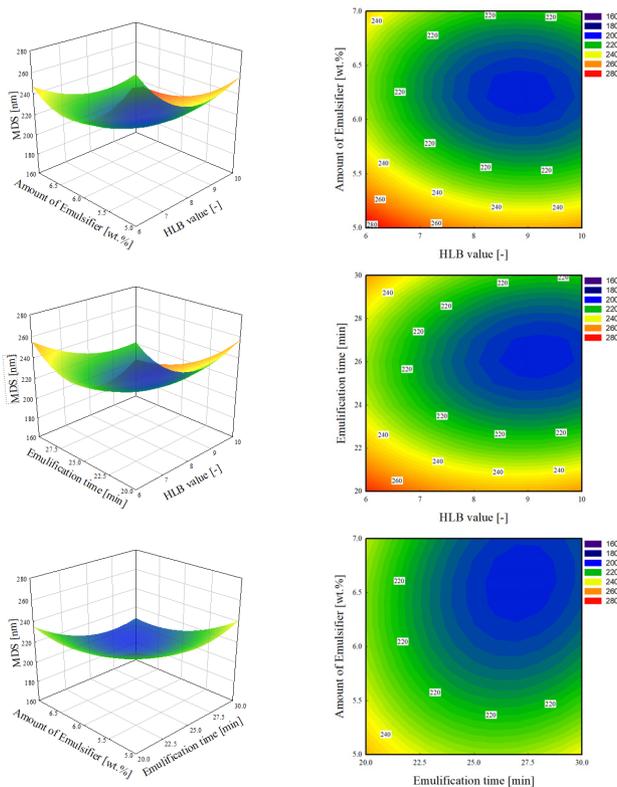


Figure 1. 3D surface and contour graph of MDS according to various variables.

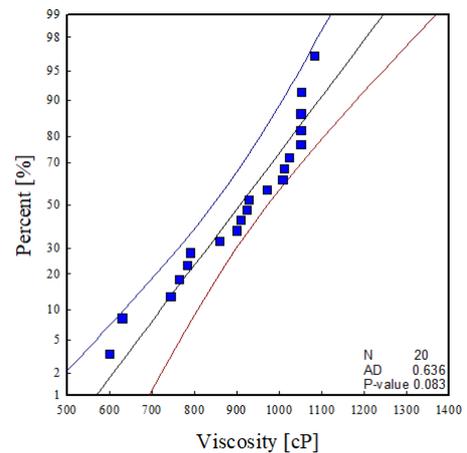


Figure 2. Probability plot of the MDS of the emulsion.

를 미치는 독립변수는 HLB 값이 가장 크고 유화시간, 유화제의 첨가량의 영향이 컸으며, 교호효과도를 비교하여 MDS에 영향정도를 미치는 독립변수의 조합은 유화제의 첨가량과 유화시간, HLB 값과 유화시간, HLB 값과 유화제의 첨가량순서로 크게 나타났다. O/W 유화액의 MDS만을 고려할 경우 최적 조건은 HLB 값 = 8.5, 유화제의 첨가량 = 6.4 wt%, 유화시간 = 28.0 min 이고, 이때의 CCD-RSM을 통해 MDS의 예측값은 203 nm이다.

Figure 2는 데이터를 통해 얻은 반응치로 MDS를 정규 95% 신뢰구간 내의 확률도를 나타낸 그래프이다. 데이터가 정규분포를 따르는지

Table 2. Various Analysis of Regression Coefficients and Equation of the MDS, Viscosity and ESI

Source	MDS		Viscosity		ESI	
	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value
Model	18.51	< 0.0001	50.19	< 0.0001	485.50	< 0.0001
x_1	19.78	0.001	145.34	0.00	271.36	0.00
x_2	9.10	0.013	50.57	0.00	707.37	0.00
x_3	12.10	0.006	25.93	0.00	0.43	0.525
x_1x_2	0.17	0.688	4.92	0.051	14.04	0.004
x_1x_3	0.89	0.367	6.73	0.027	8.03	0.018
x_2x_3	1.01	0.339	0.46	0.512	35.29	0.00
x_1^2	106.21	0.00	119.44	0.00	3056.24	0.00
x_2^2	19.08	0.001	42.23	0.00	482.96	0.00
x_3^2	14.08	0.004	95.85	0.00	71.32	0.00
Lack of fit	6.89	0.027	4.01	0.077	2.25	0.197

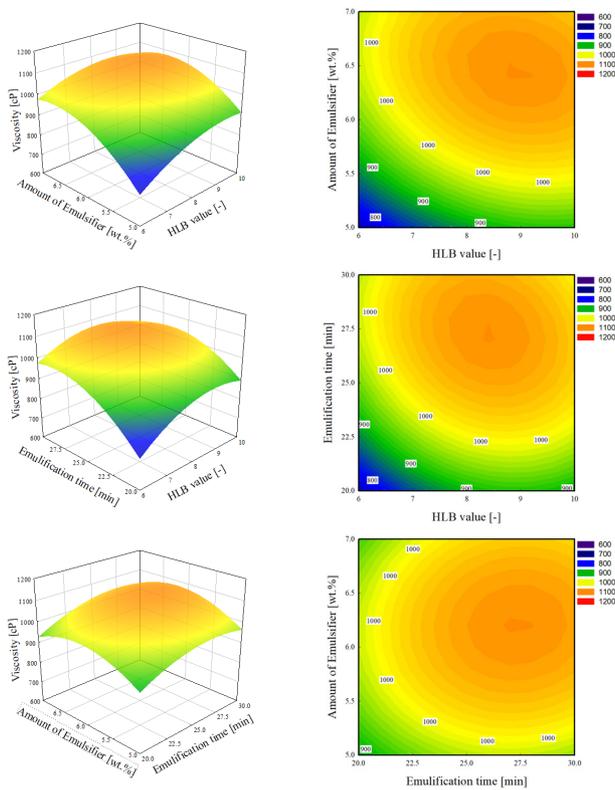


Figure 3. 3D surface and contour graph of viscosity according to various variables.

확인하려면 P -값을 유의 수준과 비교하여야 한다. 일반적으로 유의 수준 α 는 0.05이다. 본 연구에서의 데이터는 적합정규분포선과 상대적으로 가깝게 나타났으며, 유화액의 MDS에 대한 정규분포의 P -값 (0.172)이 유의 수준 0.05보다 크므로 데이터가 정규분포를 따른다. 반응치로 MDS 모두 상한선과 하한선의 범위 내에 모든 데이터가 존재하고 기준선을 크게 벗어나지 않으므로 모의회귀방정식의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

실험설계에 의해 독립변수인자 HLB 값, 유화제의 첨가량, 유화시간 및 반응치로 유화액의 점도에 대해 CCD-RSM을 수행하였다. Figure 3은 각 독립변수에 따른 반응치인 유화액 점도의 반응표면도 및 등고선도를 나타낸 그림이다. 3 가지 독립변수가 증가함에 따라, 유화액의 점도는 증가하다 감소하였다. 유화액의 점도가 크면, 유화액 입자가 서로 충돌하기 위해 극복해야하는 에너지 장벽이 더 커져, 유화액 입자의 증합에 저항하는 능력이 향상되고 유화액 안정성이 향상된다[10,11]. 따라서 최대 점도를 나타내는 조건을 최적조건을 설정하였다. 실험결과를 CCD-RSM을 이용하여 분석한 결과 다음의 회귀방정식을 얻었다.

$$V = -43882 + 3943x_1 + 5407x_2 + 1303x_3 - 159.5x_1^2 - 379.3x_2^2 - 22.86x_3^2 - 86.9x_1x_2 - 20.33x_1x_3 + 10.7x_2x_3 \quad (4)$$

여기서 V 는 CCD-RSM에서의 반응치로 유화액의 점도이다. Table 2의 유화액의 점도 변화와 관련된 주효과도인 F_{x_1} -값, F_{x_2} -값 및 F_{x_3} -값의 비율은 5.6 : 1.0 : 2.0로 나타났으며, 교호효과도도 $F_{x_1x_2}$ -값, $F_{x_1x_3}$ -값 및 $F_{x_2x_3}$ -값의 비율은 10.7 : 14.6 : 1.0로 나타났다. 주효과도를 비교하여 유화액의 점도에 영향정도를 미치는 독립변수는 HLB 값 > 유화시간 > 유화제의 첨가량으로 얻을 수 있었다. 교호효과도를 비교하여 유화액의 점도에 영향정도를 미치는 독립변수는 (HLB 값×유화시간) > (HLB 값×유화제의 첨가량) > (유화제의 첨가량×유화시간)으로 얻을 수 있다. O/W 유화액의 점도만을 고려하면, 최적 조건은 HLB 값 = 8.9, 유화제의 첨가량 = 6.5 wt%, 유화시간 = 26.1 min이고, 이때 CCD-RSM을 통해 유화액 점도의 예측값은 8184 cP이다.

Figure 4는 데이터를 통해 얻은 반응치로 유화액의 점도를 정규 95% 신뢰구간 내의 확률도를 나타낸 그래프이다. 그리고 유화액의 점도에 대한 정규 분포 P -값(0.083)이 유의 수준 0.05보다 크므로 데이터가 정규분포를 따른다는 원래의 가설을 만족하였다.

실험설계에 의해 독립변수인자 HLB 값, 유화제의 첨가량, 유화시간 및 반응치로 ESI에 대해 CCD-RSM을 수행하여 Figure 5에 나타내었다. 3 가지 독립변수가 증가함에 따라 유화액의 ESI가 증가한 후 감소하는 것으로 나타났다. ESI가 크면 유화액 입자의 충돌 및 계면접선

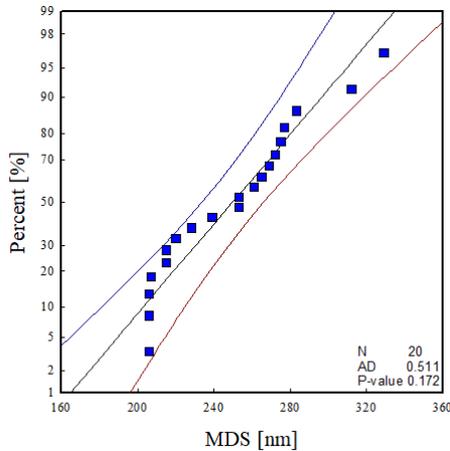


Figure 4. Probability plot of the viscosity of the emulsion.

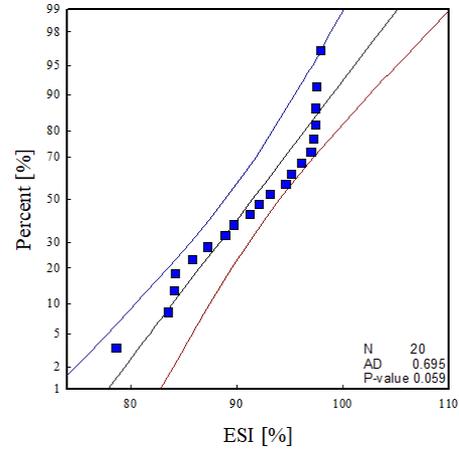


Figure 6. Probability plot of the ESI of the emulsion.

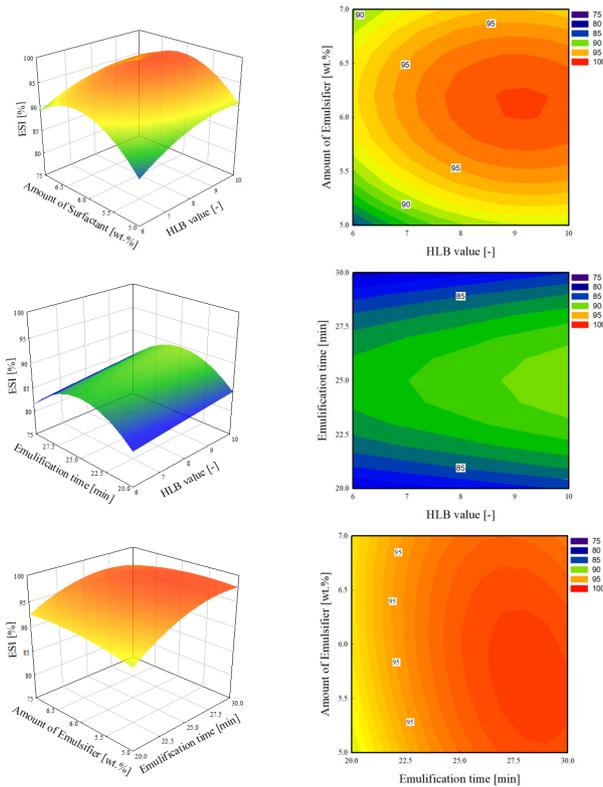


Figure 5. 3D surface and contour graph of ESI according to various variables.

방향의 전단작용이 높은 저항성을 가지며, 계면의 층들 사이의 상호작용이 증가하여 유화시스템이 해유화 및 상분리 등의 경향이 어려워진다[12]. 따라서 ESI 값이 100에 가까울수록 유화액 안정성이 우수한 최적조건으로 설정하였다. 반응치인 ESI의 CCD-RSM 분석결과 산출된 회귀방정식은 다음과 같다.

$$E = -147.06 + 23.965x_1 + 35.77x_2 + 2.372x_3 - 1.4084x_1^2 - 2.239x_2^2 - 0.03442x_3^2 - 0.2562x_1x_2 + 0.0387x_1x_3 - 0.1625x_2x_3 \quad (5)$$

여기서 E는 CCD-RSM에서의 반응치로 유화액의 ESI이다. ESI의 변화와 관련된 주효과도로 F_{x_1} -값, F_{x_2} -값 및 F_{x_3} -값의 비율은 631.1:1645.1:1.0로 나타났다. ESI의 변화와 관련된 교호효과도로 $F_{x_1x_2}$ -값, $F_{x_1x_3}$ -값 및 $F_{x_2x_3}$ -값의 비율은 1.8:1.0:4.4로 나타났다. 주효과도를 비교하여 ESI에 영향정도를 미치는 독립변수는 유화제의 첨가량 > HLB 값 > 유화시간으로 얻을 수 있다. 교호효과도를 비교하여 ESI에 영향정도를 미치는 독립변수는 (유화제의 첨가량×유화시간) > (HLB 값×유화제의 첨가량) > (HLB 값×유화시간)으로 나타났다. O/W 유화액의 ESI만을 고려할 경우 최적 유화조건은 HLB value = 8.2, 유화제의 첨가량 = 6.7 wt%, 유화시간 = 23.4 min이고, 이때 ESI 예측 값은 98.4%이다.

Figure 6은 데이터를 통해 얻은 반응치로 ESI를 정규 95% 신뢰구간 내의 확률도로 나타낸 그래프이다. 그리고 유화액의 ESI에 대한 정규분포 P값이 0.059로 유의 수준 0.05보다 크게 나타나 데이터가 정규분포를 만족하였다. 또한 반응치의 P값이 MDS > 점도 > ESI 순으로 나타나 MDS에 대한 결과가 점도나 ESI보다 정확도가 더 높게 나타났다.

3.3. 종합만족도 평가

Figure 7은 종합만족도 그래프이다. O/W 유화액은 CCD-RSM의 수학적 모델을 통해, 유화액의 MDS를 최소화하고, 점도를 최대화하며, ESI를 최대화하는 세 가지 반응치를 동시에 만족하는 최적 유화조건은 HLB 값 = 8.4, 유화제의 첨가량 = 6.4 wt%, 유화시간 = 25.4 min이다. 이 최적조건에서 모델을 통해 최적 반응치는 유화액의 MDS = 206 nm, 점도 = 8125 cP, ESI 98.2%이다. 이러한 조건에서 평균값을 얻기 위해 3 회 실험을 반복 수행하였으며 실제 실험을 통해 얻어진 유화액의 MDS, 점도 및 ESI는 각각 209 nm, 7974 cP 및 98.7%으로 안정적인 유화액을 제조하였다. 따라서 CCD-RSM을 실제 유화과정 에 적용하여 만족스러운 결과를 얻었다.

4. 결 론

본 연구는 천연 밀배아유를 유상으로 사용하고, 천연 복합비이온계 면활성제인 sugar ester를 이용하여 O/W 유화액을 제조하였다. O/W 유화액의 안정성을 평가하기 위해 유화액의 MDS, 점도, ESI를 CCD-RSM의 반응치로 설정하여 최적화 과정을 수행하였다.

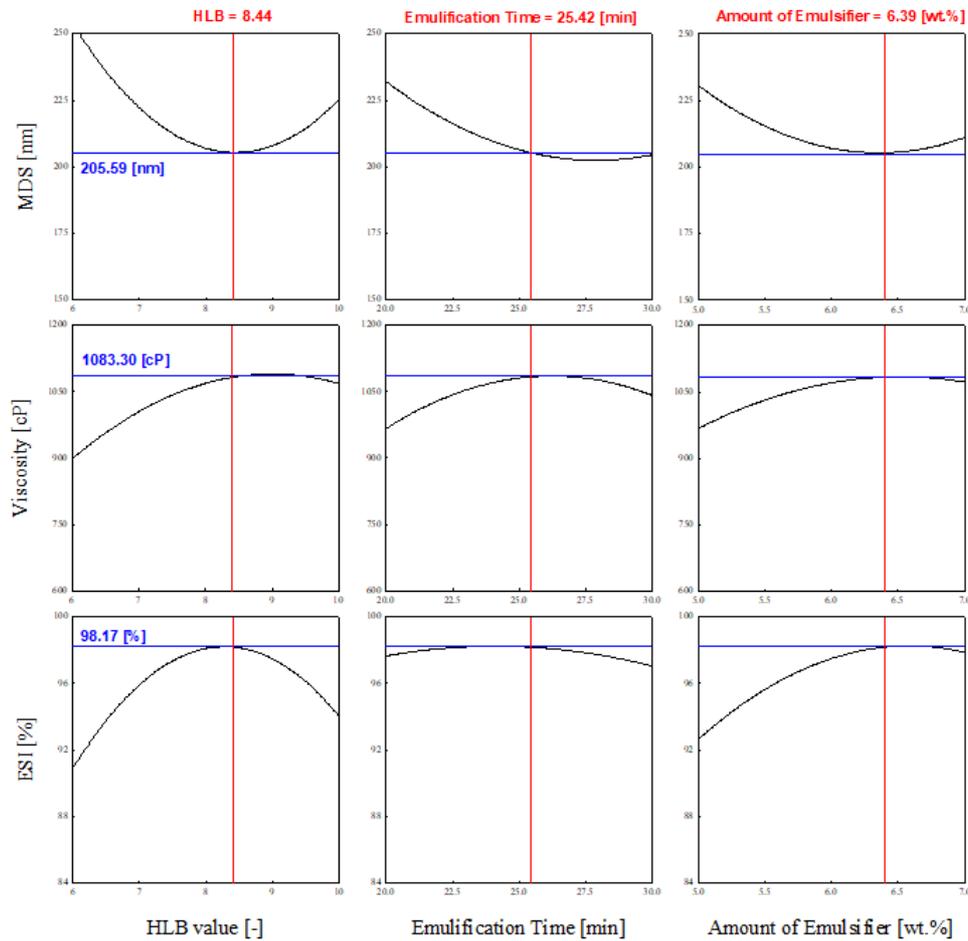


Figure 7. Optimization graph of response surface for MDS, viscosity, and ESI.

1. CCD-RSM을 사용하여 3 가지 반응치의 반응표면도, 등고선도 및 독립변수의 F 값을 분석하였다. MDS에 가장 큰 영향을 미치는 주효과도는 HLB 값이며 교호효과도는 (유화제의 첨가량×유화시간)이었다. 또한 유화액의 점도와 ESI에 가장 큰 영향을 미치는 주효과도는 유화제의 첨가량이며 교호효과도는 (유화제의 첨가량×유화시간)이었다.
2. 밀배아유 원료 O/W 유화액 제조의 안정성은 MDS, 점도 및 ESI의 3 가지 반응치로 CCD-RSM모델에 의해 평가되었다. O/W wheat germ oil 유화액의 제조를 위한 최적의 공정조건은 HLB 값은 8.4, 유화제의 첨가량은 6.4 wt%, 유화시간은 25.4 min이며, 최적조건에서 CCD-RSM 모델을 통한 예측 반응치는 유화액의 MDS = 206 nm, 점도 = 8125 cP, ESI 98.2%이었다. 또한 실제 실험을 통해 얻어진 유화액의 MDS, 점도 및 ESI는 각각 209 nm, 7974 cP 및 98.7%로 나타났다.

References

1. M. M. Anwar and N. E. Mohamed, Amelioration of liver and kidney functions disorders induced by sodium nitrate in rats using wheat germ oil, *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, **8**, 77-83 (2015).
2. Z. P. Gumus, E. Guler, B. Demir, F. B. Barlas, M. Yavuzc, D. Colpankanb, A. M. Senisik, S. Teksoz, P. Unake, H. Coskunol, and S. Timur, Herbal infusions of black seed and wheat germ oil: Their chemical profiles, in vitro bio-investigations and effective formulations as phyto-nanoemulsions, *Colloids Surf., B*, **133**, 73-80 (2015).
3. S. Angéla and S. R. Pirooska, Sucrose esters as natural surfactants in drug delivery systems-A mini-review, *Int. J. Pharm.*, **433**, 1-9 (2012).
4. W. C. Griffin, Classification of surface-active agents by "HLB", *J. Soc. Cosmet. Chem.*, **1**, 311-326 (1949)
5. A. Kabalnov, Thermodynamic and theoretical aspects of emulsions and their stability, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, **3**(3), 270-275 (1998).
6. S. W. Han, H. Y. Song, T. W. Moon, and S. J. Choi, Influence of emulsion interfacial membrane characteristics on Ostwald ripening in a model emulsion, *Food Chem.*, **242**, 91-97 (2018).
7. S. Dashamiri, M. Ghaedi, A. Asfaram, F. Zare, and S. Wang, Multi-response optimization of ultrasound assisted competitive adsorption of dyes onto Cu(OH)₂-nanoparticle loaded activated carbon: Central composite design, *Ultrason. Sonochem.*, **34**, 343-353 (2017).
8. S. B. Lee, C. Zuo, Y. Xu, and I. K. Hong, Emulsification of natu-

- ral sunscreen with green tea extract: optimization using CCD-RSM, *App. Chem. Eng.*, **31**(5), 532-538 (2020).
9. F. Tu, B. J. Park, and D. Lee, Thermodynamically stable emulsions using janus dumbbells as colloid surfactants, *Langmuir*, **29**(41), 12679-12687 (2013).
 10. M. Fan, C. Nie, H. Du, J. Ni, B. Wang, and X. Wang, An insight into the solar emulsification of highly emulsified water produced from oilfields by monitoring the viscosity, zeta potential, particle size and rheology, *Colloids Surf., A*, **575**, 144-154 (2019).
 11. I. M. Klink, R. J. Phillips, and S. R. Dungan, Effect of emulsion drop-size distribution upon coalescence in simple shear flow: A population balance study, *J. Colloid Interface Sci.*, **353**, 467-475 (2011).
 12. V. Castel, A. C. Rubiolo, and C. R. Carrara, Droplet size dis-

tribution, rheological behavior and stability of corn oil emulsions stabilized by a novel hydrocolloid (Brea gum) compared with gum arabic, *Food Hydrocolloids*, **63**, 170-177 (2017).

Authors

Seheum Hong; Ph.D., Professor, Department of Polymer Science and Engineering, Dankook University, Gyeonggi 16890, Korea; hong@dankook.ac.kr

Hyun Sik Jang; M.Sc., Researcher, Department of Chemical Engineering, Dankook University, Gyeonggi 16890, Korea; hyunsick5879@naver.com

Seung Bum Lee; Ph.D., Professor, Department of Chemical Engineering, Dankook University, Gyeonggi 16890, Korea; leesb@dankook.ac.kr