

사코진과 타우린을 이용한 음이온 계면활성제의 합성 및 물성

조정은 · 신혜린 · 정노희[†]

충북대학교 공업화학과
(2018년 10월 5일 접수, 2018년 10월 23일 심사, 2018년 12월 13일 채택)

Synthesis and Properties of Anionic Surfactants Using Sarcosine and Taurine

Jung-Eun Cho, Hye-Rin Shin, and Noh-Hee Jeong[†]

Department of Engineering Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea
(Received October 5, 2018; Revised October 23, 2018; Accepted December 13, 2018)

초 록

본 논문은 탄소 길이에 따른 지방족 알코올과 사코진과 타우린을 이용하여 음이온 계면활성제를 합성하였으며, 합성한 계면활성제들의 구조를 ¹H NMR 분석을 통하여 확인하였다. 합성 음이온 계면활성제의 임계미셀농도는 10⁻²~10⁻⁴ mol/L이며, 임계미셀농도에서의 표면장력 값은 21~39 mN/m이었다. Ross-Miles 방법에 의하여 탄소 12개일 때의 합성 계면활성제가 좋은 기포력과 기포안정성을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 사코진을 이용한 계면활성제는 대두유에서 타우린을 이용한 계면활성제는 벤젠에서 유흥력이 좋음을 알 수 있었다. 합성한 계면활성제의 물성은 임계미셀농도, 기포력, 유흥력을 측정하여 평가하였다.

Abstract

Anionic surfactants were synthesized by using an sarcosine, taurine and fatty alcohol with varying the carbon chain length. The structure of synthesized surfactants was confirmed by ¹H NMR analysis. The critical micelle concentration of the synthetic anionic surfactant was 10⁻²~10⁻⁴ mol/L and the surface tension value at the critical micelle concentration was between 21 and 39 mN/m. It was confirmed by the Ross-Miles method that the synthetic surfactant with the carbon chain of 12 showed a good foaming power and stability. In addition, the surfactant using the sarcosine was found to have a good affinity in soybean oil while that using taurine in benzene. The physical properties of synthesized surfactants were determined by measuring the critical micelle concentration, foaming power and emulsifying stability.

Keywords: Fatty alcohol, Anionic surfactant, Critical micelle concentration, Foaming property, Emulsion stability

1. 서 론

계면활성제란 동일 분자 내에 친수성과 소수성의 성질을 동시에 가지고 있는 양친매성 물질로 계면의 성질을 현저하게 변화시키는 물질을 말한다[1,2]. 계면활성제의 구조는 일반적으로 친수성의 머리 부분과 소수성의 꼬리부분의 두 부분으로 이루어져 있으며 머리 부분은 극성 또는 이온성으로서 친수성을 가지며, 꼬리부분은 비극성 탄화수소의 알킬사슬로서 친유성을 가짐에 따라 수용액 내에서 물과의 거의 상호 작용을 하지 않는다. 따라서 계면활성제의 표면 활성은 계면활성제의 친수성과 소수성의 균형에 따라 바뀌게 된다[3,4].

계면활성제는 일반적으로 세척력, 유흥력, 분산력, 침투력, 기포력 등을 지니고 있어, 각기 그 특성에 따라 세척제, 유흥제, 부유선광제, 기포제, 섬유처리제, 도료분산제, 윤활유 첨가제, 살균제 등의 가정용,

공업용으로 사용되고 있다[5-8]. 이에 따라 환경적으로 문제가 없는 환경친화적 계면활성제 원료 개발의 필요성이 제기되고 있으며, 환경독성을 대체할 수 있는 물질로 고급 알코올에 에틸렌옥사이드를 넣은 고급 알코올 에톡실레이트 화합물에 관심을 가지게 되었다[9,10]. 습윤성과 세정력이 우수한 다양한 종류의 음이온 계면활성제가 개발되어 사용되고 있다. 이러한 고급 알코올에 에틸렌옥사이드를 추가한 고급 알코올 에톡실레이트는 식물성 원료로부터 유도된 물질이기 때문에 환경적으로는 알킬페놀 에톡실레이트보다는 우수하나, 직쇄상의 분자 구조를 가지고 분자 내에 페닐기가 없기 때문에 성능 측면에서는 열등한 것으로 알려져 있고 비용적인 면에서도 경쟁력이 떨어지는 것으로 알려져 있다[11-13].

최근 계면활성제의 개발동향은 분자설계 기술을 바탕으로 한 새로운 합성기술의 개발로 다양한 분자구조를 지니고 있는 계면활성제와 고기능성의 특수형 계면활성제들이 그 응용분야에 적합한 새로운 기능을 지닌 제품들이 개발되어 상용화되고 있으며, 습윤성과 세정력이 우수한 다양한 종류의 음이온성 계면활성제들이 개발되고 있다. 양친매성 구조를 갖는 물질로 본 논문을 토대로 생체 계면활성제와 관련하여 화장품, 의약품, 식품, 세제 등 화학 합성계면활성제를 대체할 수 있다[14-17].

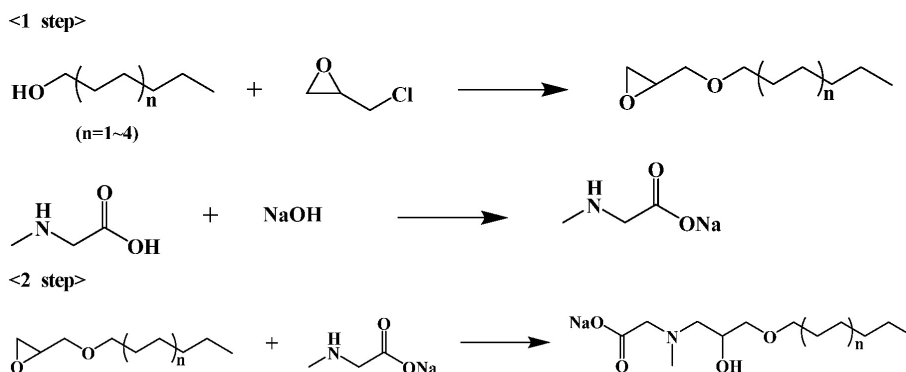
[†] Corresponding Author: Chungbuk National University,
Department of Engineering Chemistry, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea
Tel: +82-43-261-2440 e-mail: nhjeong@cbnu.ac.kr

Table 1. Chemical Structures and Characteristics of the Synthesized Surfactants (SF)

NaOOC-CH2-CH2-N(CH3)-CH2-CH(OH)-CH2-OR
ASE

NaO3S-CH2-CH2-CH2-CH2-NH-CH2-CH(OH)-CH2-OR
ATE

SF	R	Molecular mass (g/mol)	Yield (%)	Purity (%) (from NMR)
ASE-8	C ₈ H ₁₇	298.38	97	99
ASE-10	C ₁₀ H ₂₁	326.43	97	99
ASE-12	C ₁₂ H ₂₅	354.49	96	99
ASE-14	C ₁₄ H ₂₉	382.54	95	99
ATE-8	C ₈ H ₁₇	347.17	98	99
ATE-10	C ₁₀ H ₂₁	375.50	96	99
ATE-12	C ₁₂ H ₂₅	403.24	97	99
ATE-14	C ₁₄ H ₂₉	431.61	96	99



Scheme 1. Synthesis process of synthesized alkyl sarcosine ether.

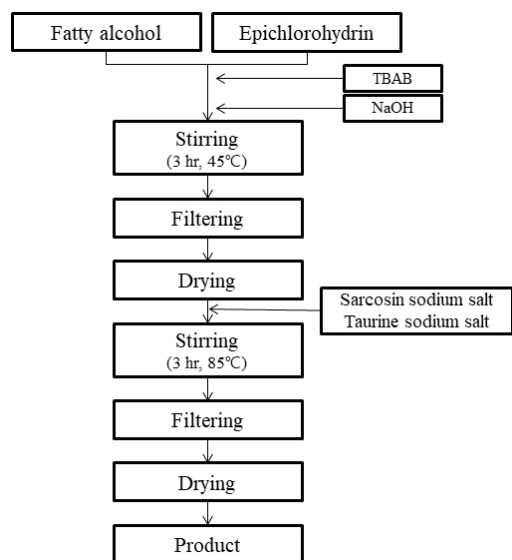


Figure 1. Flowchart for synthesis of ASE-n and ATE-n.

본 연구에서는 지방족 알코올을 이용하여 다양한 음이온 계면활성제 alkyl sarcosine ether (ASE), alkyl taurine ether (ATE)를 합성하였다. 합성한 계면활성제는 critical micelle concentration (c.m.c), 기포력,

유화력을 측정하여 계면활성제의 특성을 비교하고 알아보았다.

2. 실험

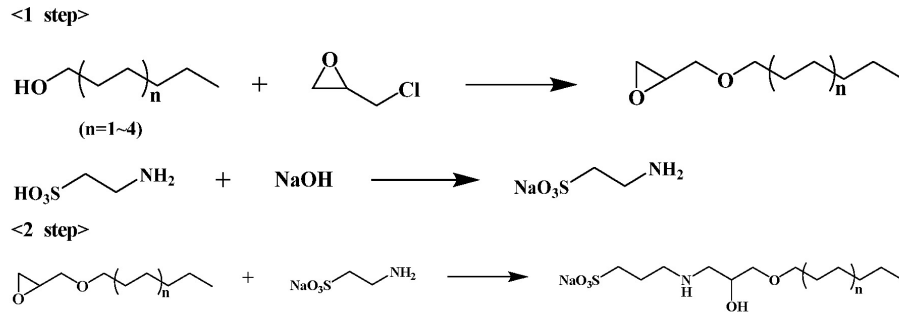
2.1. 실험재료 및 장치

본 실험에 사용된 알코올은 순도 99% 이상의 n-octanol, n-decanol, n-dodecanol, n-tetradecanol은 TCI Chemical Co.에서 구입하여 정제없이 사용하였다. Potassium hydride, sodium hydride, sodium chloride, hexane, ethyl alcohol, sodium sulfite anhydrous, tetrabutylammonium bromide, epichlorohydrine은 Samchun Pure Chemical Co.에서 구입하였으며, sarcosine은 ACROS Organics Co.에서 구입하여 정제 없이 사용하였다. Taurine은 Kanto Chemical Co.에서 구입하였으며, allyl bromide는 Junsei Chemical Co.에서 각각 구입하여 정제 없이 사용하였다.

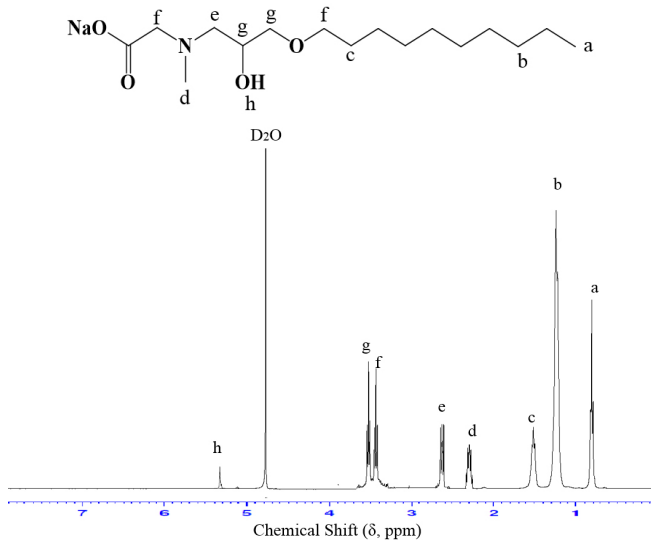
합성 물질의 구조를 확인하기 위해 Bruker Co.의 수소핵자기공명분석기 ¹H-NMR DPX-500을 사용하였으며, 내부 표준물질로는 tetramethylsilane (TMS) 용매 사용하여 δ 단위(ppm)로 표시하였다.

2.2. ASE-n 합성(n = 8,10,12,14)

500 mL 3구 둥근바닥 플라스크에 octanol (1 mol), epichlorohydrine (1 mol), NaOH (1 mol), tetrabutylammonium bromide (0.025 mol)를 넣고 45 °C에서 3 h 교반시킨 후, 5% 염화나트륨 수용액으로 2회 추출



Scheme 2. Synthesis process of synthesized alkyl taurine ether.

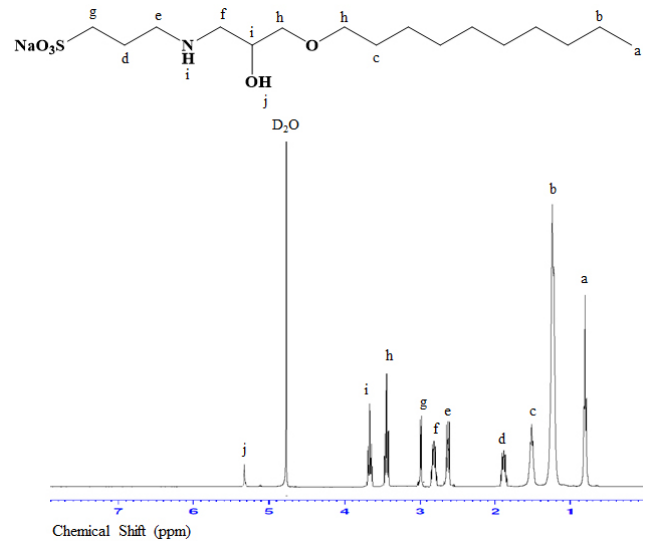
Figure 2. ¹H-NMR spectrum of synthesized ASE-10.

후 evaporator을 이용하여 octyl epoxy ether를 얻을 수 있다. 데칸올, 도데칸올, 테트라데칸올은 위의 방법과 동일한 물비를 넣어 반응을 하여 octyl epoxy ether를 합성한다. 98% 이상의 순도를 얻는다.

100 mL 3구 둥근바닥 플라스크에 sarcosine (1 mol), sodium hydroxide (1 mol)와 증류수를 넣고, 60 °C에서 2 h 교반시킨다. 반응 종료 후 용매를 제거하여 sarcosine sodium salt를 합성한다. Octyl epoxy ether (1 mol), sarcosine sodium salt (1 mol)와 에탄올을 100 mL 3구 둥근 바닥 플라스크에 넣고, 환류온도에서 3 h 동안 반응하여 진행한다. 반응 종료 후 필터링하여 85 °C에서 12 h 건조시킨다(Scheme 1, Figure 1). 반응 생성물은 ¹H-NMR을 통해 확인하였으며, 98% 이상의 순도를 얻는다(Table 1).

2.3. ATE-n 합성(n = 8,10,12,14)

2.2에서 octyl epoxy ether와 동일한 실험방법으로 진행하였다. 100 mL 3구 둥근바닥 플라스크에 taurine (1 mol), sodium hydroxide (1 mol)와 증류수를 넣고, 60 °C에서 2 h 교반시킨다. 반응 종료 후 용매를 제거하여 taurine sodium salt를 합성하였다. Octyl epoxy ether (1 mol), taurine sodium salt (1 mol)와 증류수를 100 mL 3구 둥근바닥 플라스크에 넣고, 환류온도에서 3 h 동안 반응하여 진행한다. 반응 종료 후 필터링하여 85 °C에서 12 h 건조시킨다(Scheme 2). 반응 생성물은 ¹H-NMR을 통해 확인하였으며, 98% 이상의 순도를 얻는다(Table 1).

Figure 3. ¹H-NMR spectra of ATE-10.

2.4. 계면활성제의 물성 평가

계면활성제의 표면장력 측정은 Wilhelmy plate법[18]을 이용하여 25 °C에서 10⁻⁴~10⁻¹ mol/L농도 범위 내에서 계면활성제 수용액을 만든 후 표면장력계를 이용하여 3회 측정 후 평균값으로 하였다. 계면활성제 농도 증가에 따라 더 이상 표면장력 값이 변하지 않는 농도를 계면활성제의 *c.m.c* 값으로 결정하였다. 기포력 측정은 KSM ISO 696 : 2008의 규정에 따라 Ross-Miles법[19]에 의한 기포력 측정 장치를 사용하여 25 °C에서 0.1 wt%의 수용액의 기포력을 3회 반복 측정된 값의 평균치를 나타내었으며, 5 min 지난 후 거품의 높이를 측정하여 거품의 안정도로 표시하였다. 유화력 측정은 Rosano와 Kimura의 방법[20]으로 200 mL 비커에 0.1 wt% 농도의 시료가 용해된 수용액 50 mL와 식물유인 대두유와 유기용매인 벤젠을 50 mL 취하고 호모지나이저(WiseTis®)를 이용하여 3,000 rpm에서 10 min간 교반시켰다. 유화된 액체를 100 mL의 메스실린더에 넣고 실온에서 방치한 다음 일정 시간 마다 유화된 액상 전체 부피에 대한 감소비율을 구하여 유화력으로 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. ¹H-NMR

ASE-n의 ¹H NMR은 500 MHz에서 D₂O 용매를 사용하였다. δ 5.41 (1H, s), 3.79-3.70 (3H, m), 3.51-3.48 (4H, m), 2.89-2.81 (2H, m),

Table 2. Surface Properties of the Synthesized Surfactants (SF) at 25 °C

SF	γ_{cmc} (mN/m)	<i>c.m.c</i> (mol/L)	Γ_{max} (mol/cm ³)	<i>A</i> _{min} (nm ²)
ASE-8	24.15	1.35×10^{-3}	1.8	1.53
ASE-10	22.64	1.18×10^{-3}	1.13	1.48
ASE-12	23.39	3.24×10^{-4}	1.26	1.32
ASE-14	21.66	2.88×10^{-4}	1.32	1.26
ATE-8	30.12	6.76×10^{-3}	1.35	1.23
ATE-10	28.28	7.59×10^{-3}	1.55	1.07
ATE-12	25.16	7.24×10^{-3}	2.17	0.77
ATE-14	22.15	5.89×10^{-3}	2.93	0.57

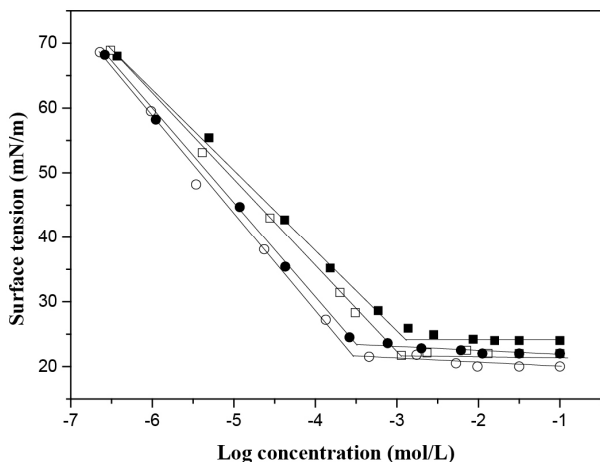


Figure 4. Surface tension vs. concentration for the synthesized surfactants: ■ = ASE-8, □ = ASE-10, ● = ASE-12, and ○ = ASE-14.

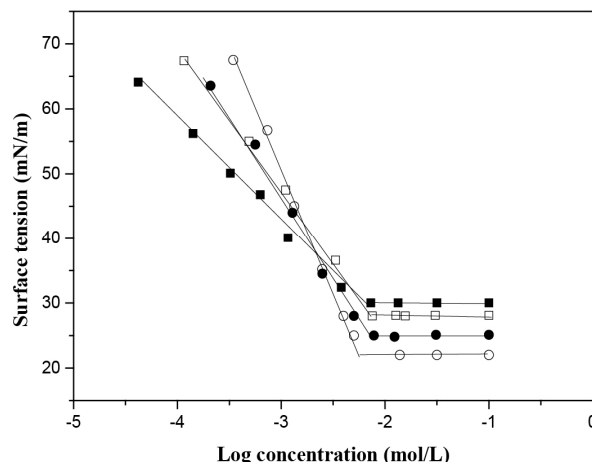


Figure 5. Surface tension vs. concentration for the synthesized surfactants: ■ = ATE-8, □ = ATE-10, ● = ATE-12, and ○ = ATE-14.

2.34-2.31 (3H, m), 1.54-1.51 (2H, m), 1.26-1.24 (10H, m), 0.83-0.81 (3H, m) ppm 범위에서 합성 화합물을 확인하였다(Figure 2). ATE-n의 ¹H NMR은 (500 MHz, D₂O) δ 5.42 (1H, s), 3.71-3.62 (3H, m), 3.51-3.42 (4H, m), 3.02-2.93 (2H, m), 2.90-2.77 (2H, m), 2.70-2.61 (2H, m), 2.98-2.81 (2H, m), 1.55-1.52 (2H, m), 1.26-1.23 (10H, m), 0.82-0.80 (3H, m) ppm 범위에서 합성 화합물을 확인하였다(Figure 3).

3.2. 표면장력 및 임계미셀농도

합성 계면활성제의 임계미셀농도는 농도에 따른 표면장력을 측정 한 결과로부터 구하였다. 네 가지의 합성한 계면활성제는 탄화수소 사슬 길이 8, 10, 12, 14를 변화시켜 측정하였다(Table 2). ASE-n의 *c.m.c*의 값은 1.35×10^{-3} ~ 2.29×10^{-4} mol/L로 탄소 길이의 증가에 따라 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 임계표면장력은 20.23~23.80 mN/m로 탄소 길이가 증가함에 따라 임계표면장력 또한 증가하는 것을 알 수 있다(Figure 4). ATE-n의 *c.m.c*의 값은 5.89×10^{-3} ~ 7.59×10^{-3} mol/L로 탄소 길이의 증가에 따라 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 임계표면장력은 22.15~30.12 mN/m로 탄소 길이가 증가함에 따라 임계표면장력 또한 증가하는 것을 알 수 있다(Figure 5).

따라서, 소수성 부분의 탄소수가 증가할수록 임계미셀농도의 감소를 나타내어 탄소 길이에 따라 -log *c.m.c* 값은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 최대 표면 초과 농도(Γ_{max})와 분자당 최소 영역(*A*_{min})에 관하여 식 (1)에 나타내었다.

$$\Gamma_{max} = (1/RT)(-d\gamma/d\ln C)_T = (4.606RT)^{-1}(-d\gamma/d\log C)_T \tag{1a}$$

$$A_{min} = 10^{14}/(N\Gamma_{max}) \tag{1b}$$

R은 이상기체상수 8.314 J/mol, T는 켈빈 온도, $(-d\gamma/d\log C)_T$ 는 log C에 대한 표면장력 기울기를 나타낸다. N은 아보가드로수 6.023×10^{23} 이다. 탄소의 길이가 길어질수록 분자당 면적은 증가하는 것을 알 수 있다. ASE-n의 분자당 최소 영역 값은 1.53, 1.48, 1.32, 1.26 nm²이다. ATE-n의 분자당 최소 영역 값은 1.23, 1.07, 0.77, 0.57 nm²이다. 알킬사슬의 길이가 증가할수록 합성한 음이온 계면활성제의 분자당 최소 영역이 감소하는 것을 알 수 있다.

3.3. 기포력

계면활성제 용액의 특징적인 현상 중의 하나로 기포의 생성을 들 수 있다. 순수한 액체는 기포를 만들지 않지만, 특정한 물질을 용해하고 있는 액체는 거품을 만들 수 있다. 이 거품은 세척에 많은 도움을 준다. 초기 기포 높이는 ASE-8은 12 cm, ASE-10은 16 cm, ASE-12은 22 cm, 그리고 ASE-14은 10 cm이며, 5 min 후의 기포높이는 ASE-8은 8 cm, ASE-10은 12 cm, ASE-12은 18 cm, 그리고 ASE-14은 4 cm이다. ASE-12는 5 min 후에도 비교적 큰 기포높이를 가지고 있으므로 기포안정성이 우수한 것을 확인하였다(Figure 6). ATE-n의 초기 기포

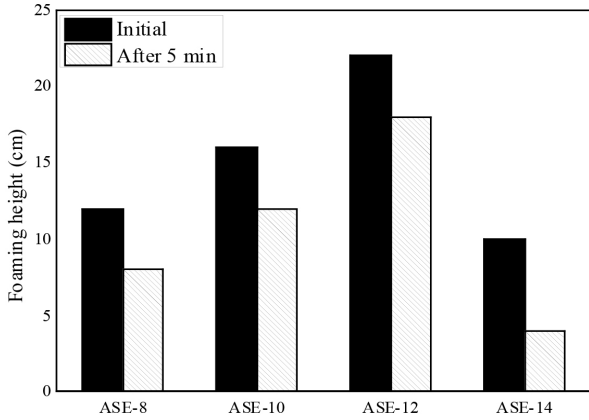


Figure 6. Foaming power and stability of synthesized ASE-n.

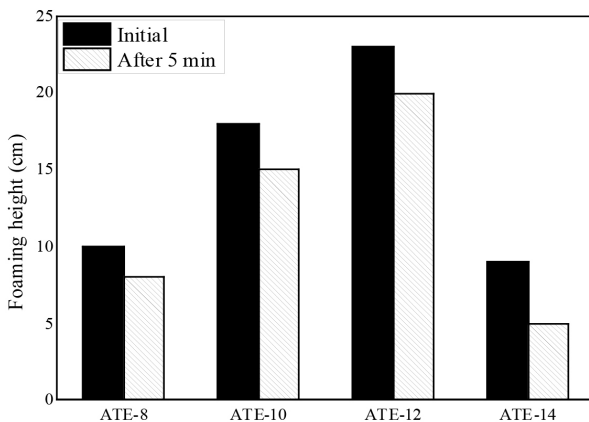


Figure 7. Foaming power and stability of synthesized ATE-n.

높이는 ATE-8은 10 cm, ATE-10은 18 cm, ATE-12은 23 cm, 그리고 ATE-14는 9 cm이며, 5 min 후의 기포높이는 ATE-8은 8 cm, ATE-10은 15 cm, ATE-12은 20 cm, 그리고 ATE-14는 5 cm이다. 따라서 5 min 후의 기포력도 ATE-12이 더 우수함을 알 수 있었다(Figure 7). 소수성부분이 길어질수록 표면장력이 낮아지기 때문에 기포력에 영향을 미치게 되어, 합성한 계면활성제에서는 0.1 M에서 ASE-12와 ATE-12에서 기포안정성이 우수하였다.

3.4. 유화력

200 mL의 비커에 0.1% 농도의 시료수용액 50 mL를 취하고 유기용제 또는 식물유를 50 mL를 취해 25 °C에서 호모게나이저를 이용하여 교반하면 에멀전 형태가 된다. 시간이 지날수록 시료 수용액은 하층으로 분산상의 오일은 상층으로 층분리 되는데 이때 초기 전체용적에 대한 유화상의 비를 측정하였다. 유기용매인 벤젠에 대한 유화력을 평가하였는데, 시간의 흐름에 따라 완만한 유화용적 비의 감소를 볼 수 있었다. ASE-n은 0.1 wt% 농도의 ASE-n수용액을 코코넛오일 그리고 벤젠과 섞은 후 회복되는 지점의 시간을 측정하였다. 코코넛오일에 대한 유화력을 평가하였는데, 약 6 h 이후 큰 유화용적 비의 감소를 볼 수 있었다. 벤젠에 대한 유화력은 코코넛 오일에 비해 비교적 큰 유화용적 비의 감소를 보였으며, 약 5 h 이후 급격한 유화용적 비의 감소가 있었다. 유기용매와 식물유를 비교해 본 결과 유기용매에서 보다 식물유에서 우수한 유화력을 보였으며, 식물유에서의 유화안정성이 더 우수한 것을 알 수 있었으면 탄산염을 포함한 ASE-12는

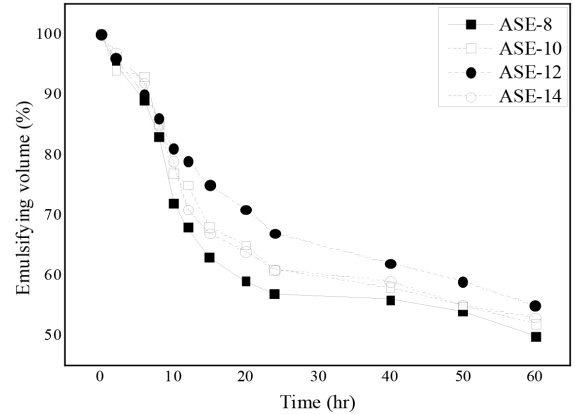


Figure 8. Variation in the emulsifying volume of benzene over time with the synthesized ASE-n surfactants.

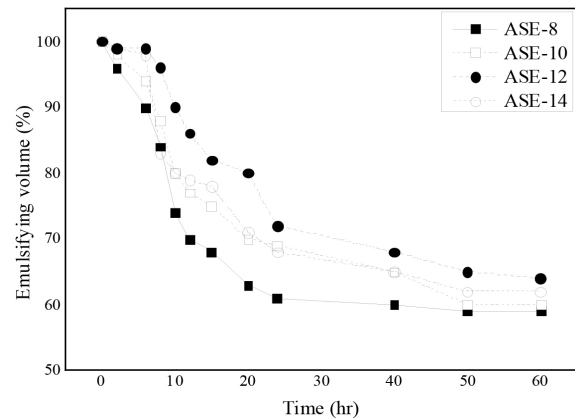


Figure 9. Variation in the emulsifying volume of coconut oil over time with the synthesized ASE-n surfactants.

다른 합성한 계면활성제보다 유화력이 좋음을 알 수 있었다(Figures 8, 9). 합성한 계면활성제인 ATE-n은 벤젠에서 20 h 경과 시 약 70%의 유화력을 갖는 것을 확인하였다. 벤젠에서의 유화력이 대두유에서의 유화력보다 우수함을 확인하여 슬론산염을 포함한 ATE-n은 벤젠과 같은 유기용매에서 더 좋은 유화력을 가지는 것을 알 수 있었으며, ATE-12는 유기용매와 식물유에서 다른 합성 계면활성제 보다 좋은 유화력은 보임을 확인하였다(Figures 10, 11).

4. 결 론

본 연구에서는 탄소사슬길이에 따른 고급 알코올을 이용하여 sarcosine과 taurine을 이용하여 2종류의 계면활성제를 합성하였다. 합성 계면활성제의 수율은 95~98%로 얻어졌으며, ¹H-NMR 분석 결과를 통하여 순도 99%임을 확인하였다. ASE-n의 c.m.c의 값은 1.35 × 10⁻³~2.29 × 10⁻⁴ mol/L이며, c.m.c에서의 임계표면장력은 20.23~23.80 mN/m이다. ATE-n의 c.m.c의 값은 5.89 × 10⁻³~7.59 × 10⁻³ mol/L이며, c.m.c에서의 임계표면장력은 22.15~30.12 mN/m로, 탄소 사슬 길이 변화에 따라 탄소 사슬이 길어짐에 따라 c.m.c 값이 작아지고, 분자당 최소 영역 값 또한 감소하는 것을 확인하였다. 기포력은 탄소수 12개 일 때 2종류의 계면활성제 모두 가장 우수한 기포력을 가지는 것을 확인하였다. ASE-n의 유화력은 식물유에서의 유화안정성이 더 우수

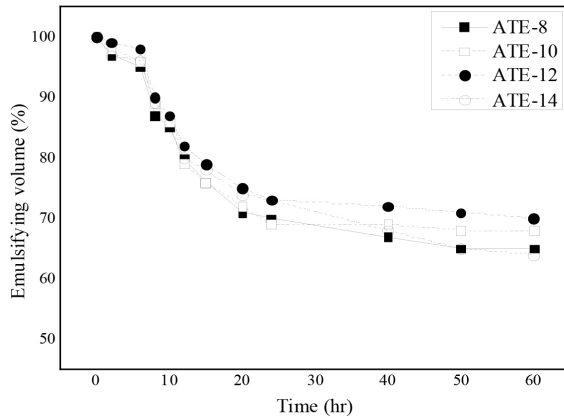


Figure 10. Variation in the emulsifying volume of benzene over time with the synthesized ATE-n surfactants.

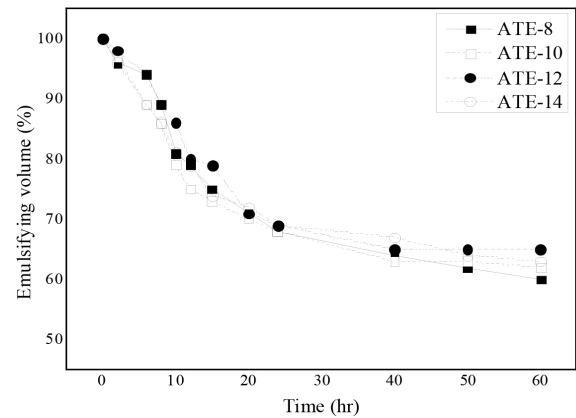


Figure 11. Variation in the emulsifying volume of coconut oil over time with the synthesized ATE-n surfactants.

한 것을 알 수 있다. ATE-n의 유화력은 유기용매에서 우수한 유화력을 보여 유화안정성이 우수한 것을 알 수 있었다. 기본적인 특성을 가지고 합성계면활성제를 대체해 나갈 수 있는 생체 계면활성제에 이용할 수 있을 것으로 기대해 본다.

References

1. J. S. Park and J. C. Lim, Investigation on a zwitter ionic surfactant having ethylene oxide, *Appl. Chem. Eng.*, **10**, 605-608 (2006).
2. N. H. Jeong, S. S. Park, H. K. Jeong, K. H. Cho, and K. D. Nam, The synthesis of anionic oligomer surfactant with α -sulfo alkanic acid, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **4**, 381-392 (1993)
3. C. Stubenrauch, Sugar surfactants - aggregation, interfacial, and adsorption phenomena, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, **6**, 160-170 (2001).
4. S. C. Biswas and D. K. Chattora, Kinetics of adsorption of cationic surfactants at silica-water interface, *J. Colloid Interface Sci.*, **205**(1), 12-20 (1998).
5. M. Mishra, P. Muthuprasanna, K. S. Prabha, P. S. Rani, I. A. S. Babu, I. S. Chandiranm G. Arunachalma, and S. Shalini, Basics and potential applications of surfactants-a review, *Int. J. Pharm. Technol. Res.*, **1**, 1354-1365 (2009).
6. S. Lee, B. J. Kim, J. G. Lee, and J. C. Lim, Synthesis and characterization of interfacial properties of sorbitan laurate surfactant, *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 37-44 (2011).
7. M. J. Scott and M. N. Jones, The biodegradation of surfactants in the environment, *Biochim. Biophys. Acta*, **1508**, 235-251 (2000).
8. D. H. Kim, S. K. Chang, and S. W. Park, Surfactants, *J. Anal. Sci. Technol.*, **13**, 27-48 (2000).
9. J. C. Lim, B. J. Kim, and K. Y. Choi, A study on synthesis of glycidol based nonionic surfactant, *Korean Chem. Eng. Res.*, **50**, 282-291 (2012).
10. T. Geng, C. Zhang, Y. Jiang, H. Ju, and Y. Wang, Synergistic effect of binary mixtures contained newly cationic surfactant: Interaction, aggregation behaviors and application properties, *J. Mol. Liq.*, **232**, 36-44 (2017).
11. W. Rybinski and K. Hill, Alkyl polyglycosides-properties and applications of a new class of surfactants, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **37**, 1328-1345 (1998).
12. K. H. Raney, Optimization of nonionic/anionic surfactant blends for enhanced oily soil removal, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **68**, 525-531 (1991).
13. Y. Jin, S. Tian, J. Guo, X. Ren, X. Li, and S. Gao, Synthesis, characterization and exploratory application of anionic surfactant fatty acid methyl ester sulfonate from waste cooking oil, *J. Surfactants Deterg.*, **19**, 467-475 (2016).
14. C. Nimisha and V. K. Tyagi, Synthesis, properties, and applications of amino acids based surfactants: A Review, *J. Dispers. Sci. Technol.*, **34**(6), 800-808 (2013).
15. H. C. Kang, B. M. Lee, J. H. Yoon, and M. J. Yoon, Synthesis and surface-active properties of new photosensitive surfactants containing the azobenzene group, *J. Colloid Interface Sci.*, **231**, 255-264 (2000).
16. M. Zhou, J. Zhao, X. Wang, J. Jing, and L. Zhou, Synthesis and characterization of novel surfactants 1,2,3-tri(2-oxypropylsulfonate-3-alkylether-propoxy) propanes, *J. Surfactants Deterg.*, **16**, 665-672 (2013).
17. M. M. El-Shahawi, A. A. S. Shalaby, A. M. E. D. Gabre, and A. E. H. M. Ghonim, Surface active properties and biological activities of novel anionic surfactant based on oxapyridazinone derivatives, *J. Surfactants Deterg.*, **19**, 137-144 (2016).
18. T. S. Kim, T. Kida, Y. Nakatsuji, T. Hirao, and I. Ikeda, Surface-active properties of novel cationic surfactants with two alkyl chains and two ammonio groups, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **73**(7), 907-911 (1996).
19. S. G. Oh and D. O. Shah, Relationship between micellar lifetime and foamability of sodium dodecyl sulfate and sodium dodecyl sulfate/1-hexanol mixtures, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **7**(7), 1316-1318 (1991).
20. F. O. Opawale and D. J. Burgess, Influence of interfacial properties of lipophilic surfactants on water-in-oil emulsion stability, *J. Colloid Interface Sci.*, **197**, 142-150 (1998).