

# 1,4-부탄디올을 이용한 양이온 제미니 계면활성제의 합성 및 물성 평가

김경실 · 박종권 · 조정은 · 신혜린 · 정노희<sup>†</sup>

충북대학교 공업화학과  
(2018년 6월 28일 접수, 2018년 7월 26일 심사, 2018년 10월 6일 채택)

## Synthesis and Property Evaluation of Cationic Gemini Surfactants Using 1,4-Butanediol

Kyung-Sil Kim, Jong-Kwon Park, Jung-Eun Cho, Hye-Lin Shin, and Noh-Hee Jeong<sup>†</sup>

Department of Engineering Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea  
(Received June 28, 2018; Revised July 26, 2018; Accepted October 6, 2018)

### 초 록

본 연구에서는 소수성 사슬의 길이를 증가시키고 1,4-부탄디올을 스페이서로 사용하여 양이온성 제미니형 계면활성제를 합성하였으며 <sup>1</sup>H-NMR로 확인하였다. 합성한 계면활성제의 외형은 백색 분말로 나타났으며, Krafft's 점은 0 °C 이하로 나타났다. 측정된 임계미셀농도(*c.m.c*)는 표면장력법에 의해  $1.8 \times 10^{-3} \sim 6.5 \times 10^{-4}$  mol/L이었고 표면 장력은 22.5~26.1 dyne/cm이었다. Ross-Miles 방법에 의한 CG 14-6E-14의 초기 거품 높이는 16 cm이었고 5 min 후 높이 14 cm를 나타내어, 가장 좋은 초기 기포력과 기포안정성을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 합성한 양이온 제미니 계면활성제와 일반적으로 사용하고 있는 cetyltrimethylammonium bromide (CTAB)의 기포력 및 유화안정성을 비교하였다.

### Abstract

In this study, cationic gemini surfactants were synthesized by increasing the length of the hydrophobic chain and using 1,4-butanediol as a spacer, and the result was confirmed by <sup>1</sup>H-NMR. The synthesized surfactant was a white powder, and Krafft's point was below 0 °C. Surface tension measurements revealed that the evaluated critical micelle concentration (*c.m.c*) was  $1.8 \times 10^{-3} \sim 6.5 \times 10^{-4}$  mol/L with a surface tension of 22.5~26.1 dyne/cm at the *c.m.c*. The initial foam height for CG 14-6E-14 estimated by Ross-Miles method was 16 cm and after 5 minutes the height was 14 cm. It was confirmed that the initial foam force and foam stability were the highest. The foam test and emulsion stability of synthesized gemini cationic surfactants were also compared to those of cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), a commonly used surfactant.

**Keywords:** Cationic surfactant, Gemini surfactant, 1,4-Butanediol, Acyl chloride

## 1. 서 론

계면활성제는 계면에 흡착하여 표면자유에너지를 변화시키는 물질을 말하며 한 분자 내에 친수성과 친유성 부분을 동시에 갖는 양친매성 물질을 말한다[1]. 이러한 계면활성제는 섬유, 도료, 화장품, 식품, 의약품 및 고분자 공업 등 전 공업분야에 걸쳐 다양하게 이용되고 있다[2,3].

그중에 양이온 계면활성제는 전체 계면활성제 시장의 약 7%를 차지하고 있으며, 다양한 물질에 강하게 흡착하여 섬유유연제, 부식방지제, 살균제, 아스팔트 첨가제 및 안정제 등으로 사용되고 있다[4-6].

또한, 계면활성제 종류에 따른 종이의 흡착에 관한 연구 중 셀룰로오스-물 계면에서 양이온 계면활성제의 흡착이 빠르고 최종 흡착량이 가장 많다고 밝혀졌다[7]. 흡착속도는 양이온 > 음이온 > 비이온 순으

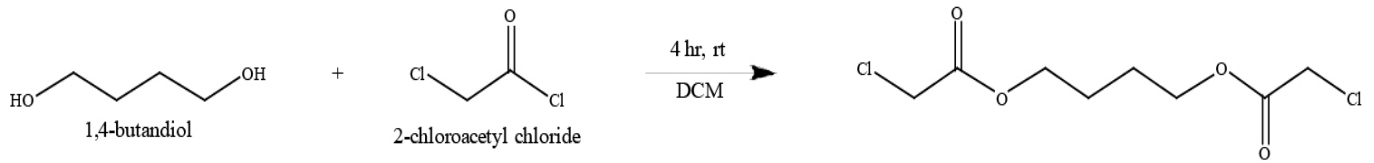
로 나타났으며, 이러한 결과는 물속에서 표면이 음으로 하전 되기 때문에 생기는 현상이라고 보고되었다[8-10].

최근에는 계면활성제의 분자구조를 변화시켜 이들 분자들의 물리화학적 성질을 바꾸고자 하는 노력이 계속되고 있다[11,12]. 단일 소수기와 친수기를 갖는 계면활성제는 계면활성제가 가지는 독성과 구조적 한계에서 오는 물성의 한계가 문제로 대두되었다[13,14]. 새로운 유형의 양친매성 화합물로 2개의 친수기와 2개의 소수기를 갖는 제미니 계면활성제가 대안으로 떠오르며 이를 통해 구조적 한계를 벗어나 다양한 형태의 제미니형 계면활성제가 개발되고 있다[15,16]. 제미니형 계면활성제는 단일형 계면활성제에 비해 더 높은 표면활성 즉, 낮은 임계미셀농도와 표면장력, 높은 흡착효율을 보여주기 때문에 학술계와 산업계 모두에 관심을 이끌어 내고 있다[17,18]. 위에서 언급한 양이온 계면활성제의 특성과 제미니형 계면활성제의 특성을 이용하여 산업에서 사용되는 기존의 계면활성제를 대체하여 사용해 더 좋은 물성을 가질 수 있다[19].

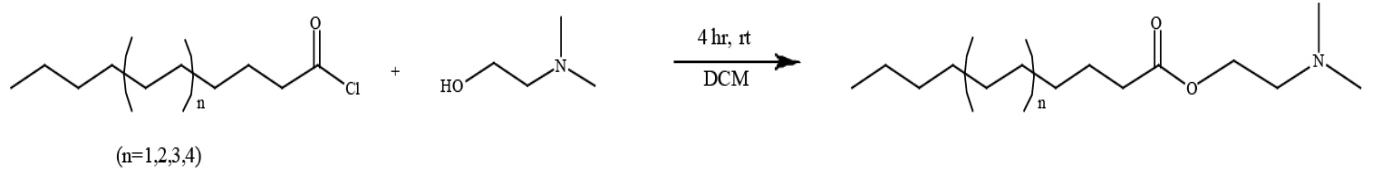
본 연구에서는 acyl chloride 4종을 2-dimethylaminoethanol과 합성하여 소수부는 연결부로 1,4-butanediol과 chloroacetyl chloride를 사용하여 양이온 제미니 계면활성제를 합성하였다. 합성한 화합물들을

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

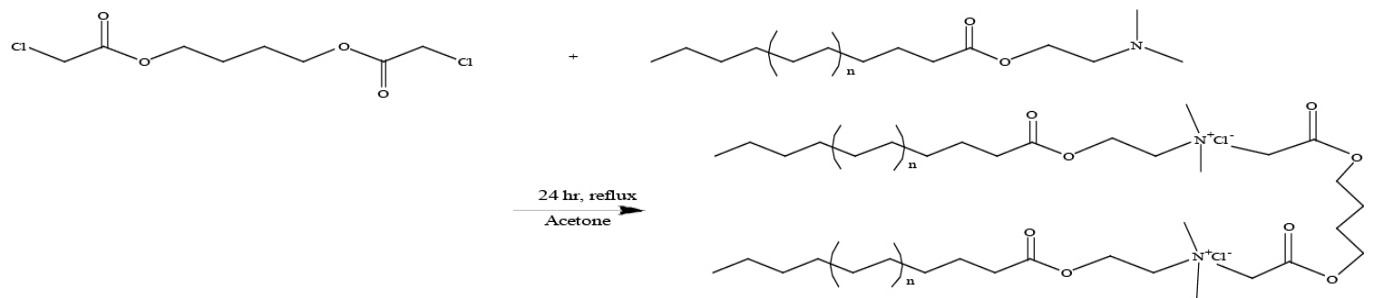
## Step 1



## Step 2



## Step 3



Scheme 1. Synthetic process of 2,2'-(butane-1,4-diylbis(oxy))bis(N-(2-(alkanoyloxy)ethyl)-N,N-dimethyl-2-oxoethan-1-aminium) chloride.

<sup>1</sup>H-NMR 분석으로 구조를 확인하였으며, 합성화합물의 알킬 사슬 길이에 따른 기초 계면활성제인 표면장력 및 임계미셀농도, hydrophile lipophile balance(HLB), 기포력 및 유화력 등을 측정하였다.

압증류하여 순수한 butane-1,4-diyl bis(2-chloroacetate)를 98% 이상의 수율로 얻었다.

<sup>1</sup>H NMR (500 MHz, CDCl<sub>3</sub>) : δ 1.60-1.62 (4H,m,CH<sub>2</sub>), 4.11-4.13 (4H,m,CH<sub>2</sub>), 4.32-4.34 (4H,m,CH<sub>2</sub>)

## 2. 실험

### 2.1. 실험재료 및 장치

본 실험은 순도 97% 이상의 decanoyl chloride, dodecanoyl chloride, tetradecanoyl chloride, hexadecanoyl chloride, chloroacetyl chloride, 1,4-butanediol은 Sigma Aldrich에서 구입하여 정제없이 사용하였다. 2-dimethylaminoethanol, dichloromethane, acetone, ethanol은 Samchun Pure Chemical Co.에서 구입하여 정제없이 사용하였다. 합성 및 제조를 위한 장치는 500 mL 용량의 둥근바닥 4구 플라스크, 적가깔때기, 환류냉각기, 온도계, 질소 주입관 등으로 구성하였다.

### 2.2. 양이온 제미니 계면활성제의 합성

양이온 제미니 계면활성제의 합성은 3단계 반응으로 진행하고, 합성한 양이온 제미니 계면활성제는 소수기의 탄소 길이가 각각 C<sub>10</sub>~C<sub>16</sub>인 acyl chloride와 2-dimethylaminoethanol을 합성하여 사용하였으며, spacer는 1,4-butanediol과 chloroacetyl chloride를 이용하여 합성하였다.

합성 반응과 과정은 Scheme 1에 나타내었다. 1단계 반응으로 500 mL 용량의 둥근바닥 4구 플라스크에 1,4-butanediol 9.0 g (0.1 mol)을 넣은 후, DCM (dichloromethane) 50 mL에 chloroacetyl chloride 11.3 g (0.1 mol)를 녹인 용액을 적가깔때기를 통해 적하하면서 25 °C에서 4 h 동안 반응을 진행하였다. 반응이 완료된 후 회전농축증발기로 감

2단계 반응으로 500 mL 용량의 둥근바닥 4구 플라스크에 decanoyl chloride 19.0 g (0.1 mol)을 넣은 후, DCM 50 mL에 2-dimethylaminoethanol 19.1 g (0.1 mol)를 녹인 용액을 적가깔때기로 적하하면서 25 °C에서 4 h 동안 반응을 진행하였다. 반응이 완료된 후 회전농축증발기로 감압증류하여 2-(dimethylamino)ethyl decanoate를 98% 이상의 수율로 얻었다.

<sup>1</sup>H NMR (500 MHz, CDCl<sub>3</sub>) : δ 0.87 (3H,m,CH<sub>3</sub>), 1.26-1.28 (10H,m,CH<sub>2</sub>), 1.33-1.34 (2H,m,CH<sub>2</sub>), 1.65-1.66 (2H,m,CH<sub>2</sub>), 2.31-2.33 (2H,m,CH<sub>2</sub>), 2.85-2.87 (6H,m,CH<sub>3</sub>), 3.33-3.34 (2H,m,CH<sub>2</sub>), 4.35-4.36 (2H,m,CH<sub>2</sub>)

3단계 반응인 양이온 제미니 계면활성제의 합성은 1단계 합성화합물인 butane-1,4-diyl bis(2-chloroacetate)와 2단계 합성화합물인 2-(dimethylamino)ethyl decanoate를 각각 acetone에 용해시켜 65 °C에서 24 h 동안 반응을 진행하였다. 반응이 종료된 후 생성물은 여과하여 백색 결정을 얻었다. 합성 반응 후 acetone으로 3회 재결정을 하여 72% 이상의 수율 및 순도로 최종 합성화합물을 얻었다. 합성한 최종 생성물을 <sup>1</sup>H-NMR을 통해 분석하였다.

Table 1. Appearance, Yield, HLB and Krafft Point of Surfactants

Compound	Appearance	Yield (%)	HLB	Krafft point (°C)
CG 10-E6-10	White solid	72.0	20.2	< 0
CG 12-E6-12		75.2	18.3	< 0
CG 14-E6-14		77.6	16.4	< 0
CG 16-E6-16		78.0	14.5	< 0

$^1\text{H}$  NMR (500 MHz,  $\text{D}_2\text{O}$ ) :  $\delta$  0.87 (3H,m, $\text{CH}_3$ ), 1.26-1.29 (12H,m, $\text{CH}_2$ ), 1.57-1.59 (4H,m, $\text{CH}_2$ ), 1.84-1.89 (2H,m, $\text{CH}_2$ ), 2.32-2.36 (2H,m, $\text{CH}_2$ ), 3.40-3.42 (6H,m, $\text{CH}_3$ ), 4.1-4.12 (2H,m, $\text{CH}_2$ ), 4.35-4.37 (2H,m, $\text{CH}_2$ ), 4.53-4.57 (2H,m, $\text{CH}_2$ )

위의 반응을 통하여 각각의 알킬기가  $\text{C}_{10}\sim\text{C}_{16}$ 인 양이온 제미니 계면활성제를 얻었다. 2,2'-(butane-1,4-diylbis(oxy))bis(N-(2-(alkanoyloxy)ethyl)-N,N-dimethyl-2-oxoethan-1-aminium) chloride는 알킬기의 탄소수에 따라 각각 decanoyl chloride를 사용할 경우 CG 10-E6-10로, dodecanoyl chloride를 사용할 경우 CG 12-E6-12로, tetradecanoyl chloride를 사용할 경우 CG 14-E6-14로, hexadecanoyl chloride를 사용할 경우 CG 16-E6-16로 명명하였다.

### 2.3. 합성한 계면활성제의 구조 분석

계면활성제의 구조 분석에는  $^1\text{H}$ -NMR (Avance 500 MHz, Bruker)을 사용하여 chemical shift를 측정하였으며 용매로는  $\text{D}_2\text{O}$ 를 사용하였다. 표면장력 및 임계미셀농도 측정에는 표면장력 측정기(CBVP-A3, Kyowa Interface Science Co.)를 사용하였다.

### 2.4. 합성한 계면활성제의 물성 평가

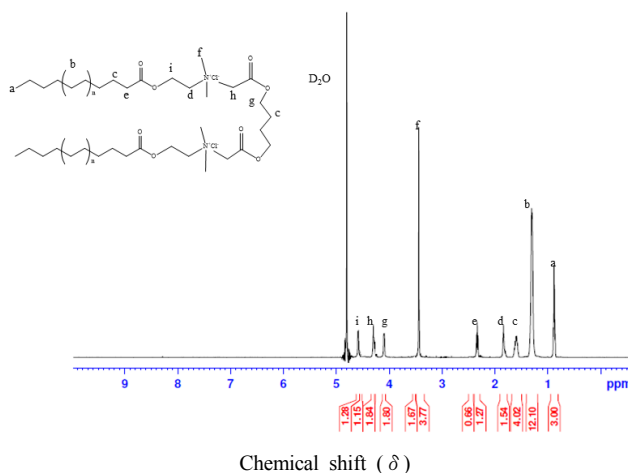
계면활성제의 표면장력 측정은  $10^{-5}\sim 10^{-1}$  mol/L 농도의 계면활성제 수용액을 만든 후 표면장력계를 이용하여 3회 측정 후 평균값으로 하였다. 표면장력 측정은 Wilhelmy plate법을 이용하였으며 사용한 백금 플레이트는 측정 전에 아세톤, 증류수 순으로 세척한 후, 건조하여 사용하였다[20]. 계면활성제의 임계미셀농도는 측정된 표면장력의 변곡점 내에서 여러 농도의 수용액을 만든 후 산정하였다.

계면활성제의 기포력은 Ross-Miles법에 의하여 0.1 wt%의 수용액의 기포력을 3회 반복, 측정된 값의 평균치를 기포력으로 표시하고, 5 min 지난 후 거품의 높이를 측정하여 그 거품의 안정도로 표시하였다[21].

계면활성제의 유화력은 Rosano와 Kimura의 방법을 개량하여 측정하였다[22]. 200 mL 비이커에 0.1 wt% 농도의 시료가 용해된 수용액 50 mL와 식물유인 대두유와 유기용매인 벤젠을 각각 50 mL 취하고 균질기를 이용하여 3,000 rpm에서 10 min간 교반시켰다. 유화된 액체를 100 mL의 메스플라스크에 넣고 실온에서 방치한 다음 72 h 동안 일정 시간 마다 유화된 액상 전체 부피에 대한 감소비율을 구하여 유화력으로 표시하였다.

계면활성제를 구성하고 있는 친수기와 친유기의 상대적 강도에 따라 친수성 혹은 친유성의 정도를 수치로 나타낸 것을 hydrophilic lipophile balance (HLB)라고 하며 HLB는 Davies법을 이용하여 산정하였고 식 (1)과 같다[23].

$$HLB = 7 + \sum(\text{hydrophilic group}) - \sum(\text{hydrophobic group}) \quad (1)$$

Figure 1.  $^1\text{H}$ -NMR spectrum of synthesized cationic gemini surfactants.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 양이온 제미니 계면활성제의 합성 및 분석 결과

양이온 제미니 계면활성제의 형상, 수율 등은 다음과 같이 실험 결과를 Table 1에 나타내었다.

계면활성제의 재결정 후 최종 합성수율은 72~78%가 얻어졌으며, 최종 합성물 모두 상온에서 백색 결정으로 얻었다. 또한 합성한 계면활성제의 HLB를 Davies법에 따라 확인하였을 때 14.5~20.2로 계산이 되었으며, Krafft point는 모두 0 °C 이하로 측정되었다. 또한 합성한 양이온 제미니 계면활성제의 구조 확인을 위해  $^1\text{H}$ -NMR 분석을 하였다.

#### 3.1.1. 수소핵 자기공명스펙트럼

2-2의 방법으로 합성한 양이온 제미니 계면활성제에 대한  $^1\text{H}$ -NMR 스펙트럼의 결과를 Figure 1에 도시하였다.

합성한 계면활성제에서 관측되는  $^1\text{H}$ -NMR 스펙트럼은 0.8~0.9 ppm 범위의 시그널에서 고급지방산 말단 메틸기의 수소, 1.26~1.29 ppm의 시그널 범위에서 장쇄 메틸렌기, 1.57~1.59 ppm의 시그널 범위에서 ( $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{C}=\text{O}-$ )의 메틸렌기, 2.31~2.33 ppm의 시그널에서 ( $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{C}=\text{O}-$ )의 메틸렌기, 3.40~3.42 ppm의 시그널 범위에서 ( $\text{CH}_3\text{N}-$ )의 메틸렌기, 각각 4.10~4.12, 4.22~4.24, 4.56~4.59 ppm의 시그널 범위에서 에스테르 옆 메틸렌의 수소로 나타남을 확인하였다. 메틸렌에 대한 신호의 면적비는 메틸렌의 수소 수에 비례한다. 사슬 길이에 따른 합성한 계면활성제의 스펙트럼은 동일하게 측정되었으며 1.26~1.29 ppm에서 관측되는 장쇄 메틸렌기 스펙트럼의 면적을 적분한 결과 탄소사슬의 길이가 10개에서 16개로 증가함에 따라 각각 24, 32, 40, 48의 값을 가지는 것을 확인하였다.

이와 같이  $^1\text{H}$ -NMR 기기 분석을 통하여 목적한 양이온 제미니 계

Table 2. Surface Tension and c.m.c of Synthesized Surfactants

Compounds	c.m.c ( $10^{-3}$ mol/L)	Surface tension (dyne/cm)
CG 10-E6-10	1.80	22.5
CG 12-E6-12	0.96	23.1
CG 14-E6-14	0.81	23.8
CG 16-E6-16	0.65	26.1

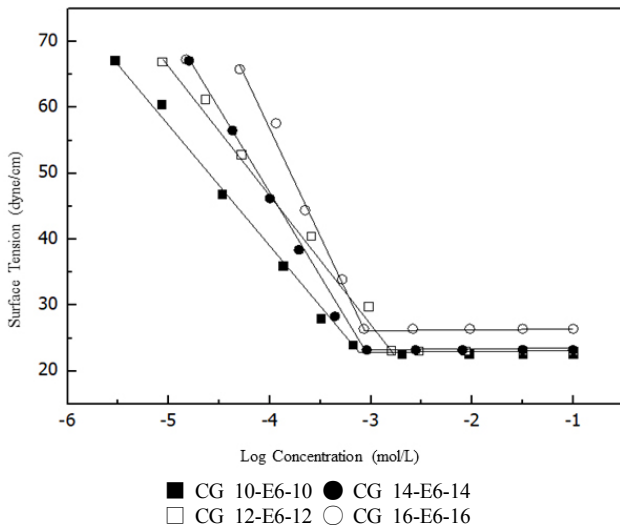


Figure 2. Surface tension of cationic gemini surfactants.

면활성제가 합성되었음을 확인하였다.

### 3.2. 계면활성제의 물성 평가

합성을 통하여 얻은 양이온 제미니 계면활성제의 물성을 확인하기 위해 HLB를 계산하였고, Krafft point, 기포력, 안정성, 유흥안정성 및 표면장력 실험을 하였다.

#### 3.2.1. 표면장력 및 임계미셀농도

합성한 양이온 제미니 계면활성제의 표면장력을 Figure 2에 나타냈고 25 °C에서 측정된 결과인 임계미셀농도와 표면장력을 Table 2에 나타내었다.

각각의 양이온 제미니 계면활성제에 대한 c.m.c는  $6.5 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-3}$  mol/L의 범위에서 표면장력은 22.5~26.1 dyne/cm로 측정되었다. 실험 결과를 통해 낮은 농도의 계면활성제에서 높은 표면장력 저하능을 확인하였다.

일반적인 계면활성제의 경우 소수성 알킬사슬이 길어질수록 표면장력의 저하능력이 크게 나타나고 친수성 부분이 클수록 표면저하능이 낮아지며 표면장력 감소하지만 합성한 계면활성제의 c.m.c는 알킬사슬수가 증가함에 따라 감소하고 표면장력은 증가하는 경향을 보였다. 하나의 소수기를 가지는 계면활성제는 소수부의 탄소수가 증가할수록 표면장력이 더 낮아지는 경향을 보이지만 제미니 계면활성제의 경우 소수부의 탄소수가 증가할수록 표면장력이 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 이유는 소수부끼리 회합하려는 경향이나 소수부 사이의 상호작용이 있는 것으로 판단된다.

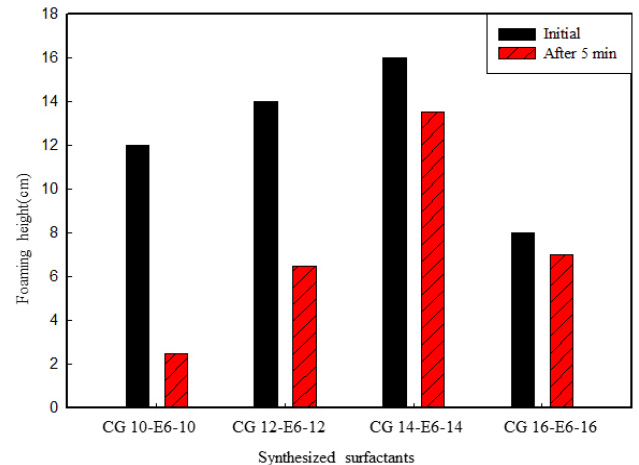


Figure 3. Initial foaming power and foaming stability after 5 min of synthesized surfactants.

#### 3.2.2. Krafft points

계면활성제의 물에 대한 용해도는 온도가 상승함에 따라 증가하는데 용해도가 급격히 증가하는 온도를 Krafft point라고 한다. 이것은 미셀을 형성하기 시작하는 온도이기도 하며 c.m.c 이상의 농도에서 용액에 가해진 계면활성제 분자들은 미셀로 존재한다. 위의 방법으로 합성물에 대한 Krafft point는 Table 2에 나타내었다. 실험을 통해 합성한 계면활성제의 Krafft point가 전부 0 °C 이하임을 확인하였는데, 이러한 결과는 합성한 계면활성제가 낮은 온도에서도 좋은 물성을 나타낼 수 있어서 다양한 분야의 산업에 적용을 기대할 수 있다.

#### 3.2.3. 기포력 및 기포안정성

위의 방법으로 기포력 및 기포안정도를 측정된 결과를 Figure 3에 나타내었다. 결과를 보면 CG 10-E6-10, CG 12-E6-12와 CG 14-E6-14의 경우 초기의 높이가 각각 12, 14 cm와 16 cm로 우수한 기포력을 보였다. CG 16-E6-16의 경우 8 cm의 기포력을 나타내었다. 이를 통해 합성한 제미니 계면활성제 C<sub>10</sub>~C<sub>14</sub>의 경우 기포력이 우수하였고, C<sub>16</sub>의 경우는 소수부의 길이가 상대적으로 길어 표면장력 저하능이 낮기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 5 min 뒤의 기포안정성을 측정하였을 때 CG 14-E6-14의 경우 13.5 cm로 우수함을 확인하였다. 소수부 길이에 따른 계면활성제들은 다양한 기포력 특성을 나타내었다. 일반 계면활성제인 CTAB의 초기 기포력은 13.5 cm에서 5 min 뒤 13 cm의 기포력을 나타내었다. 합성 계면활성제인 CG 14-E6-14의 기포력이 CTAB보다 더 우수한 기포력을 나타내었다.

#### 3.2.4. 유흥력

앞서 계산한 HLB 값을 통해 합성한 계면활성제는 O/W형 에멀전을 제조하는데 적합하다는 것을 알 수 있었다. 유흥력 측정은 Rosano 및

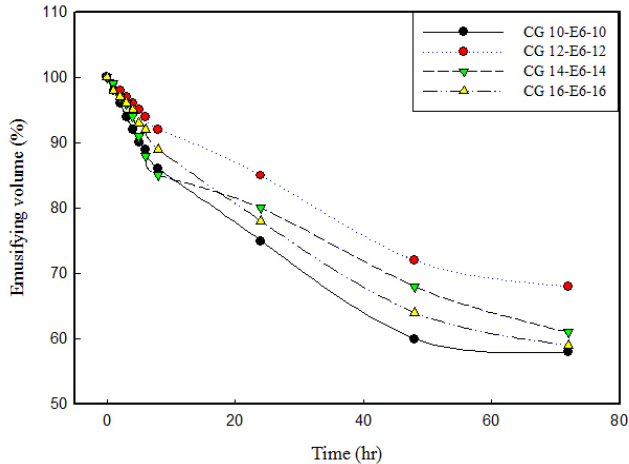


Figure 4. Emulsifying volume of benzene with synthesized surfactants.

Kimura의 방법을 개량하여 합성한 양이온 제미니 계면활성제를 이용하여 실험을 행하여 평가하였다. 평가 용매로는 유기 용매는 벤젠을 사용하였으며, 오일은 대두유를 사용하였다. 용매에 따른 유화력 실험 결과를 Figures 4, 5에 나타내었다. 합성화합물을 각각 0.1 wt% 농도의 수용액 50 mL와 분산상인 용매 50 mL를 호모게나이저(WiseTis<sup>®</sup>)를 이용하여 3,000 rpm에서 5 min간 유화시킨 후, 시간의 흐름에 따라 유화상을 기준으로 유상은 상층으로, 수상은 하층으로 층 분리가 일어나는데 이때 초기의 전체용적에 대한 유화상의 비를 측정하였다. 벤젠에서의 유화력 측정결과 시간의 흐름에 따라 서서히 유화상이 감소하는 경향을 보였으며, 그 결과로 8 h 후 유화력이 90% 이상 유지하는 것을 확인하였다. 또한 72 h 후 전체적으로 유화력이 65 ± 4%를 유지하는 것을 확인하였다. 대두유에서의 측정결과 시간의 흐름에 따라 빠르게 유화력이 감소하는 것을 확인할 수 있으며 8 h 후 65 ± 4%, 72 h 후의 유화력은 55 ± 4% 이하의 유화력을 나타낸 것을 확인하였다. CTAB의 벤젠에서의 유화력은 8 h 후 70%이었으며 72 h 후에는 60%의 유화력을 보였다. 또한, 대두유에서의 유화력은 8 h 후 66%이며, 72 h 후 55%의 유화력을 나타내었다. 이를 통해 합성한 양이온 제미니 계면활성제와 CTAB의 유화력은 식물성 오일인 대두유에서보다 유기용매인 벤젠에서 더 우수한 유화력을 보였으며, 합성 계면활성제는 CTAB보다 8 h에서 더 우수한 유화력을 나타내었다.

### 3.2.5. HLB

양이온 제미니 계면활성제의 HLB 값은 Davies의 산정 방식에 의하여 CG 10-6E-10은 20.2, CG 12-6E-12는 18.3, CG 14-6E-14는 16.4, CG 16-6E-16은 14.5로 계산되었다. 계면활성제의 탄소수 길이의 증가에 따른 소수성이 증가하여 계면활성제의 HLB는 감소하였다. HLB가 8~16일 때는 O/W 에멀전 유화제로, 13~15일 때는 세제, 15 이상일 때는 가용화제로 사용이 가능하다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 1,4-butanediol을 이용하여 양이온 제미니 계면활성제를 합성하였고 기초 물성을 검토하였다.

1. 합성한 양이온 제미니 계면활성제는 <sup>1</sup>H-NMR로 구조 분석하였으며, 4종 모두 백색 고체였고, 수율은 72~78%이었다.
2. 합성한 계면활성제의 Krafft point는 4가지 모두 0 °C 이하로 측

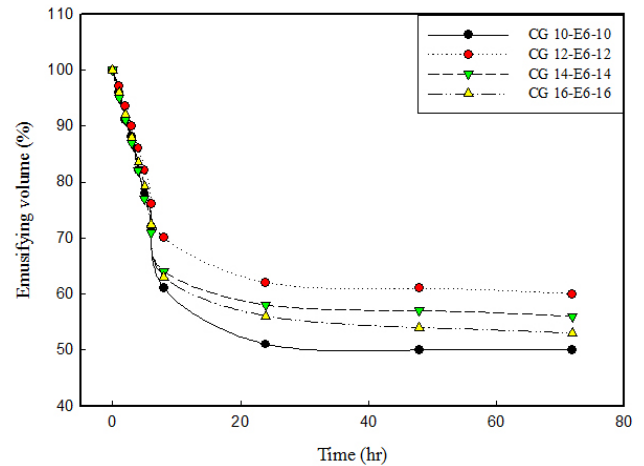


Figure 5. Emulsifying volume of soybean oil with synthesized surfactants.

정되었으며, Davies법에 의해 HLB는 14.5~20.2 범위의 값으로 계산되었다.

3. 벤젠에서의 유화력은 72 h 후 전체적으로 유화력이 65 ± 4%를 유지하였고, 대두유에서의 72 h 후 유화력은 55 ± 4% 이하의 유화력을 나타낸 것을 확인하였다. 대두유에서보다 유기용매인 벤젠에서 더 좋은 유화력을 갖는 것을 확인하였다.

4. 기포력 실험 결과 CG 14-6E-14가 가장 높은 초기 기포력과 기포 안정성을 갖는 것을 확인하였다.

5. 합성한 계면활성제의 임계미셀농도 및 표면장력은 소수부의 알킬기의 사슬이 증가함에 따라  $1.8 \times 10^{-3} \sim 6.5 \times 10^{-4}$  mol/L 범위에서 22.5~26.1 dyne/cm로 측정되었고, 이를 통해 알킬기의 길이가 길어질수록 표면장력 값은 증가하고 c.m.c는 감소하는 경향을 나타냈다.

## References

1. E. J. Choi, Y. S. Jeon, J. D. Lee, and N. H. Jeong, Synthesis and properties of gemini type's diethylene glycol dicarboxylates, *J. Korean Oil Chem. Soc.*, **27**(3), 257-265 (2010).
2. R. Sharma, A. Kamal, M. Abdinejad, R. K. Mahajan, and H. B. Kraatz, Advances in the synthesis, molecular architectures and potential applications of gemini surfactants, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **248**, 35-68 (2017).
3. A. R. Tehrani-Bagha and K. Holmberg, Cationic ester-containing gemini surfactants: Adsorption at tailor-made surfaces monitored by SPR and QCM, *Langmuir*, **24**, 6140-6145 (2008).
4. T. Banno, K. Kawada, and S. Matsumura, Creation of novel green and sustainable gemini-type cationics containing carbonate linkages, *J. Surfactants Deterg.*, **13**, 387-398 (2010).
5. 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).
6. A. R. Tehrani-Bagha, R. G. Singh, and K. Holmberg, Solubilization of two organic dyes by cationic ester-containing gemini surfactants, *J. Colloid Interface Sci.*, **376**, 112-118 (2012).
7. B. S. Ahn, Synthesis and their physical properties of cationic surfactants bearing hydrophobic chains of aromatic substituents, *J. Korean Oil Chem. Soc.*, **30**(3), 380-386 (2013).

8. A. Singh, J. D. Van Hamme, and O. P. Ward, Surfactants in microbiology and biotechnology: Part 2. Application aspects, *Biotechnol. Adv.*, **25**, 99-121 (2007).
9. T. Banno, K. Kawada, and S. Matsumura, Creation of novel green and sustainable gemini-type cationics containing carbonate linkages, *J. Surfactants Deterg.*, **13**, 387-398 (2010).
10. G. Chigwada, D. Wang, D. D. Jiang, and C. A. Wilkie, Styrenic nanocomposites prepared using a novel biphenyl-containing modified clay, *Polym. Degrad. Stab.*, **91**, 755-762 (2006).
11. X. Zhong, J. Guo, L. Feng, X. Xu, and D. Zh, Cationic gemini surfactants based on adamantane: Synthesis, surfaceactivity and aggregation properties, *Colloids Surf. A*, **441**, 572-580 (2014).
12. M. Akram, S. Yousuf, T. Sarwar, and K. U. Din, Micellization and interfacial behavior of 16-E2-16 in presence of inorganic and organic salt counterions, *Colloids Surf. A*, **441**, 281-290 (2014).
13. S. G. Silva, R. F. Fernandes, E. F. Marques, and M. Lusa C. D. Vale, Serine-based bis-quat gemini surfactants: Synthesis and micellization properties, *Eur. J. Org. Chem.*, **2012**(2), 345-352 (2012).
14. L. M. Bergström, A. T. Bagha, and G. Nagy, Growth behavior, geometrical shape, and second CMC of micelles formed by cationic gemini esterquat surfactants, *Langmuir*, **31**, 4644-4653 (2015).
15. D. Shukla and V. K. Tyagi, Cationic gemini surfactants: A review, *J. Oleo Sci.*, **55**, 381-390 (2006).
16. M. Akram, I. A. Bhat, S. Anwar, and K. U. Din, Molecular interaction of an ester-functionalized biodegradable gemini surfactant with lysozyme: Insights from spectroscopy, calorimetry and molecular docking, *J. Mol. Liq.*, **212**, 641-649 (2015).
17. R. Wang, Y. Tang, and Y. Wang, Effects of cationic ammonium gemini surfactant on micellization of PEO-PPO-PEO triblock copolymers in aqueous solution, *Langmuir*, **30**, 1957-1968 (2014).
18. A. Cukalovic and C. V. Stevens, Feasibility of production methods for succinic acid derivatives: A marriage of renewable resources and chemical technology, *Biofuel Bioprod. Biorefin.*, **2**, 505-529 (2008).
19. A. Pandey, A. Mittal, N. Chauhan, and S. Alam, Role of surfactants as penetration enhancer in transdermal drug delivery system, *Mol. Pharm. Org. Process Res.*, **2**, 10-20 (2014).
20. 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).
21. 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. of Am. Oil Chem. Soc.*, **7**(7), 1316-1318 (1991).
22. 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).
23. R. C. Pasquali, N. Sacco, and C. Bregni, The studies on hydrophilic-lipophilic balance (HLB): Sixty years after William C. Griffin's pioneer work, *Lat. Am. J. Pharm.*, **28**(7), 313-317 (2009).