

Colloidal Gas Aphrons의 제조와 안정성에 대한 연구

윤미혜 · 조대철[†]

순천향대학교 에너지환경공학과

(2007년 3월 2일 접수, 2007년 6월 3일 채택)

A Study on Preparation of Colloidal Gas Aphrons and Stability

Mi-hae Yoon · Daechul Cho[†]

Department of Energy & Environmental Engineering, Soonchunhyang University

ABSTRACT : The stability of CGAs(colloidal gas aphrons) prepared from non-ionic and ionic surfactants was investigated. Those surfactants were sodium dodecyl sulfate(SDS), Triton X-100, Tween 80 and Quillaja Saponin. The stability of CGAs prepared from single surfactants or mixed surfactants(two components) using a CGA generator was investigated as functions of temperature, surfactant concentration and stirring time. Saponin among the single surfactants has shown the longest duration time(143 min) and then, Triton X-100, SDS, and Tween 80 were followed by at room temperature. In case of CGAs heated up to 70°C, SDS endured for 116 min but Saponin lasted for only 105 min, which was a considerable reduction of the duration time of CGAs at room temperature. For mixed surfactant pairs, stability of any one pairs stood between the two. That meant no synergic effect for surfactant blending. At the higher temperature, Saponin+Triton X-100 was disclosed to be the lowest, 53 min, meanwhile Saponin+SDS was the highest at ambient temperature. The CGAs, initially about 140 μm in diameter, began to grow right after the agitation to be about 190 μm owing to coalescence of the bubbles and then became to collapse. When heated, CGAs including Saponin tended to be smaller while the others to be larger. In summary, we found that the stability of CGAs or the duration time was greater for single surfactants and at room temperature rather than for mixed surfactants that caused substantial intermolecular interactions in the CGA structure and at the higher temperature.

Key Words : Colloidal Gas Aphron(CGA), Surfactant, Stability, Duration Time

요약 : 비이온성 및 이온성 계면활성제를 이용하여 제조한 CGA(colloidal gas aphron)의 안정성을 고찰하였다. 실험에서 이용한 계면활성제는 SDS(Sigma-Aldrich, Co.), Triton X-100, Tween 80, Quillaja Saponin이다. CGA발생장치를 이용하여 단일 성분의 계면활성제 및 혼합 계면활성제에 의한 CGA를 제조하였고, 농도, 온도, 시간에 따른 CGA의 안정성을 조사하였다. 단일 성분 CGA의 경우, Saponin이 143분의 지속시간을 보여 가장 높은 안정성을 나타내었고 Triton X-100, SDS, Tween 80순으로 안정성이 높았다(상온). CGA제조 시 계면활성제 용액을 70°C로 가열한 경우, SDS가 가장 높은 안정성을 보였으며(116분) Saponin은 상온에 비해 안정성이 낮아졌다(105분). 혼합 계면활성제일 경우, 두 계면활성제의 중간 수준의 안정성을 보였으며, SDS+Saponin 조합이 139분으로 가장 안정성이 컸다. 가열한 혼합 계면활성제에서는 Saponin+Triton X-100 조합이 가장 안정성이 낮아 53분에 불과했다. CGA는 초기 평균 입경이 약 140 μm였다가 융합이 일어나면 그 크기가 약 190 μm로 상승하고 이후 붕괴하는 양상을 띠었다. 가열하여 제조한 CGA에서는, Saponin이 포함된 경우 상온에 비해 그 크기가 감소하였으며, 타 계면활성제에서는 일반적으로 그 크기가 증가하였다. 요약하면 CGA는 가열했을 때 보다는 상온일때, 분자간 상호작용이 크게 작용하는 혼합 계면활성제보다 단일 계면활성제일 경우, CGA 지속시간이 길어져 안정성이 높아졌다.

주제어 : CGA, 계면활성제, 안정성, 지속시간

1. 서론

토양내 유기오염물질의 중요한 분해 기작의 하나로서 생물학적 분해는 그 효율과 농도 저감이 여러 환경 요인에 크게 영향을 받기 때문에 분해 반응의 효율성과 지속성을 보장할 수 없다. 특히 유기오염물질이 토양 깊이에 존재할 경우 최종 전자수용체인 산소와 영양물질이 부족하여 오염물의 호기적 생분해도는 감소하게 된다. 이 때 산소와 영양물질을 외부

에서 공급하여 호기성 분해에 필요한 조건을 충족시켜 주면, 자연 정화능을 최대한 활용하면서 유기오염물질의 환경친화적인 무기물화를 이룰 수 있다.¹⁾ 이를 효과적으로 실행할 수 있는 기술의 하나로 CGA가 최근 각광을 받고 있다. CGA는 평류를 형성하여 토양에 산소를 비교적 균일하게 공급하여 계면활성제를 통한 오염물질의 탈착증진과 대사능력을 가진 미생물을 공급을 할 수 있다.²⁾ CGA는 Colloidal Gas Aphron의 약어로서 약 4,000~8,000 rpm으로 교반해 줄 때 형성되며 작은 기포 방울이 잘 합체되지 않고 존재하여 콜로이드의 성질을 나타낸다. CGA의 구조는 장시간 산소공급이 가능하도록 안정화되어야 하고, 표면적이 확대되도록 입자크

[†] Corresponding author
E-mail: daechul@sch.ac.kr
Tel: 041-530-1665

Fax: 041-530-4728

Table 1. Chemical properties and concentration ranges of surfactants used in this study

Surfactants	Properties	Molecular Formula	Molecular weight	Critical Micelle Concentration(CMC)
SDS	Anionic	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$	288 g/mol	0.242%
TritonX-100	Non-ionic	$\text{C}_6\text{H}_{17}\text{C}_6\text{H}_4\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_{9.5}\text{H}$	628 g/mol	0.0141%
Tween 80	Non-ionic	$\text{C}_{18}\text{S}_6\text{EO}_{20}$	1,310 g/mol	0.00148%
Saponin	Non-ionic	$(\text{C}_{26}\text{H}_{31}\text{O}_{10})_n$	-	0.1%

기가 작아야 표면을 통한 산소의 확산 및 생물학적 분해가 촉진될 수 있다. 표면을 통한 산소의 확산 또한 잘 일어나 생물학적 분해 촉진에 효과적으로 이용될 수 있다.^{3~5)} 그러나 CGA의 크기가 너무 작아지면 내부 압력이 증가하여 일정 직경 이하의 CGA는 소멸된다. 또한 CGA의 크기가 작아질수록 shell 표면의 계면활성제 밀도가 높아지면서 reverse Gibbs 효과가 작용하여 크기가 더 줄어드는 것을 억제한다. Soapy shell이 친수성 물질을 운반할 수 있는 부분이라면, CGA 외곽에 계면활성제의 소수성기로 둘러싸인 소수성 구립자는 소수성 입자를 흡착시킬 수 있는 부분이며 이것은 2차원 미셀처럼 작용하여 입자를 물리화적으로 흡착시킴으로써 입자의 결빙 용해도를 높인다.¹⁾ 이러한 구조적 특성 때문에 CGA는 여러 가지 목적에 이용될 수 있으며 CGA의 적용을 위해 안정성과 크기를 연구하는 것은 매우 중요하다.⁶⁾

CGA는 Sebba에 의해 처음 구성된 작은 구형의 기포이며 soapy shell이 air core를 둘러싼 구조를 하고 있다고 알려져 있다.⁷⁾ CGA는 계면활성제 용액을 Spinning disc generator를 이용하여 4,000 rpm으로 고속 혼합시키면 효과적으로 발생시킬 수 있다. 음식물 폐수로부터의 단백질, 호모 등을 분해하는 공정방법은 여과법, 침전 그리고 부상법을 이용하지만 Somnuk 등과 Hashim & Gupta 등은 비용이 저렴한 CGA를 적용하였고,^{8~10)} Wang 등은 구리와 같은 중금속의 분리와 미세입자 분리에 응용하였으며^{11,12)} Jauregi 등은 전자 현미경과 X선 회절 분석법으로 CGA를 관찰하여 soapy shell의 두께를 측정하기도 하였다.^{13,14)} 최근 박등은 CGA를 산소와 영양분, 미생물의 공급매체로 사용하여, 지하 환경에 존재하는 오염물질이 효과적으로 생분해되기 위해 필요한 물질을 공급하는 기술에 관해 연구하였다.¹⁾

본 연구는 비이온성 및 대표적인 이온성 계면활성제 SDS 등 네 가지 계면활성제를 이용하여 계면활성의 종류별 CGA의 특징에 대해 연구하고, 단일 계면활성제와 혼합 계면활성

제로 CGA를 형성 후 지속시간에 따른 안정성을 연구하였다. 향후 CGA의 안정성을 검증하고, 산소뿐만 아니라, 미생물, 수분, 영양분을 동시에 공급할 수 있는 운반체로 이용하는 연구로 확장하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 계면활성제 선정

본 연구에서는 계면활성제로서 SDS(Sigma-Aldrich, Co.), Triton X-100, Tween 80, Quillaja Saponin의 4가지를 사용하였다. Table 1에 계면활성제의 특성을 기술하였다.¹⁵⁾

2.2. CGA 제조

CGA를 제조하기 위해 사용되는 발생장치는 Sebba⁷⁾의 spinning disc generator를 기본으로 하여 Fig. 1과 같은 장치를 사용하였다.

소정의 농도의 계면활성제 수용액 500 mL를 CGA발생장치에 넣고 8,000 rpm으로 교반하였다. 교반후 15분간 방치한 뒤 1 mL를 채취하여 최적의 교반시간을 결정하였다. 교반시간 범위는 120~1,200 s였다. 교반시간 및 계면활성제 농도를 최적화 한 후 각 CGA에 대하여 정해진 시간 간격에 따라 위상차 현미경(Olympus Model BX 51)을 100배 사용하여 시간별로 측정하였고 Image Analyser(FOCUS Technology Image Measurement System)를 사용하여 CGA가 소멸될 때까지 관찰촬영을 하였다. 또한 평균 오차 범위를 벗어난 기포를 제외한 10개의 입자를 추출하여 평균입경을 산출하였다.

온도는 상온일 경우와 70°C일 경우에 CGA의 특성 변화를 관찰하였고 위 조건에서 CGA를 구성하는 계면활성제 농도를 0.5~3 CMC로 변화시켜 가며 CGA의 안정성을 비교해 보았다.

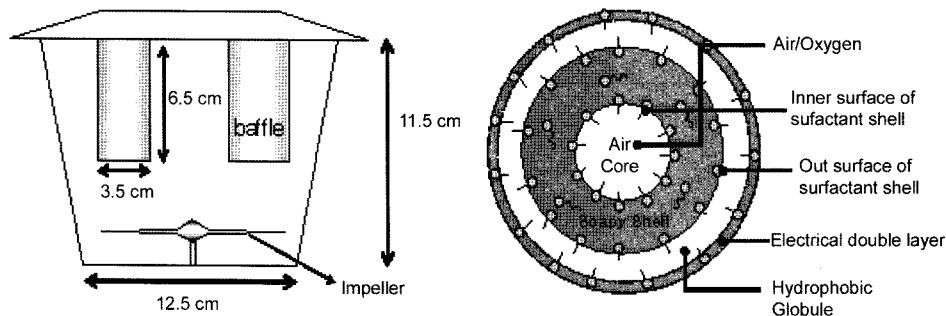


Fig. 1. A CGA generator and a schematic of colloidal gas aphrons.

3. 결 과

3.1. 단일 계면활성제에 의한 CGA 최적 제조 조건 및 안정성 검토

3.1.1. 최적 제조조건

SDS와 Triton X-100은 최적 농도 2 CMC와 10분으로 혼합했을 때 균일한 CGA를 형성하였으며 Saponin과 Tween 80은 1 CMC의 농도와 15분으로 혼합하였을 때 균일한 CGA를 형성하였다(Table 2). 이 처럼 CGA는 많은 양의 계면활성제 분자가 필요하기 때문에, CMC보다 낮은 농도의 계면활성제 용액에서 발생시킨 CGA는 불안정하기 때문에 CMC와 같은 농도 범위이거나 높은 농도에서 CGA를 형성해야 한다.¹⁾ 각 계면활성제의 최적농도를 혼합하여 최적의 혼합시간을 산출한 결과 SDS + Saponin조합은 20분으로 나타났으며, 그 외의 혼합 계면활성제의 최적 혼합시간은 15~20분으로 나타났다(Table 3).

3.1.2. CGA의 안정성 비교

CGA는 계면활성제층으로 그 형태가 안정화되어 있어, 기체 방울이 쉽게 합체되지 않는다. 열역학적으로 기체 방울이 합체되려는 경향이 있지만, 합체 현상의 에너지 장벽으로 작용하는 계면활성제층으로 둘러싸인 CGA는 오랜 시간 깨

Table 2. Optimal conditions of CGA's formation and stability for single surfactants

Surfactants	Optimum mixing time	Optimum concentration	Decay time (room temperature)	Decay time (70°C)
SDS	10 min	2 CMC	105 min	116 min
Saponin	15 min	1 CMC	143 min	105 min
Tween 80	15 min	1 CMC	81 min	90 min
Triton X-100	10 min	2 CMC	112 min	102 min

지지 않고 존재할 수 있다. 기포가 여러 개 모여 다각 형태의 거품 구조를 이루면, 여러 개의 거품이 닿아있는 액상 부분은 작은 곡률 반경을 갖게 되는데 이 부분을 안정 경계층(plateau border)이라 한다. 거품 내 기상은 동일한 압력을 나타내므로, 안정 경계층부분에서는 곡률반경이 큰 층상부분보다 액상 압력이 낮아, 이 압력 차에 의해 액체가 안정 경계층쪽으로 흐르면서 기포막의 박막화가 진행되고 용합이 나타난다.¹⁾

Fig. 2는 SDS로 형성된 CGA의 지속시간에 따른 변화를 기록한 것이다. SDS는 음이온성 계면활성제로 수용액 중에서 이온 해리하여 음이온 부분이 계면활성을 나타낸다. 크기가 작아 내부압력이 큰 기포로부터 크기가 커 내부 압력이 작은 기포로 기체 확산이 일어난 뒤 기상을 나누고 있는 층

Table 3. Optimal conditions of CGA's formation and stability for mixed surfactants

Surfactants	Optimum mixing time	Optimum concentration	Decay time (room temperature)	Decay time (70°C)
SDS+Saponin	20 min	2+1 CMC	139 min	105 min
SDS+Tween 80	15 min	2+1 CMC	74 min	73 min
SDS+Triton X-100	20 min	2+2 CMC	70 min	105 min
Saponin+Tween 80	20 min	1+1 CMC	69 min	75 min
Saponin+Triton X-100	20 min	1+2 CMC	65 min	53 min
Tween 80+Triton X-100	15 min	2+1 CMC	74 min	74 min

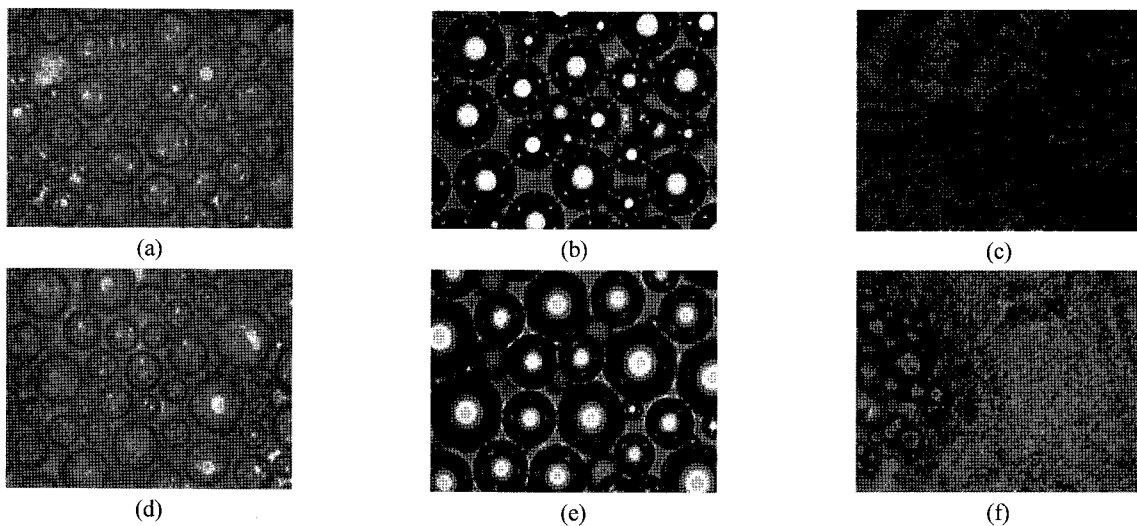


Fig. 2. Photographs of CGAs including SDS in 15 min(a), 60 min(b), and 105 min(c) at room temperature; in 15 min(d), 60 min(e), and 116 min(f) at 70°C.

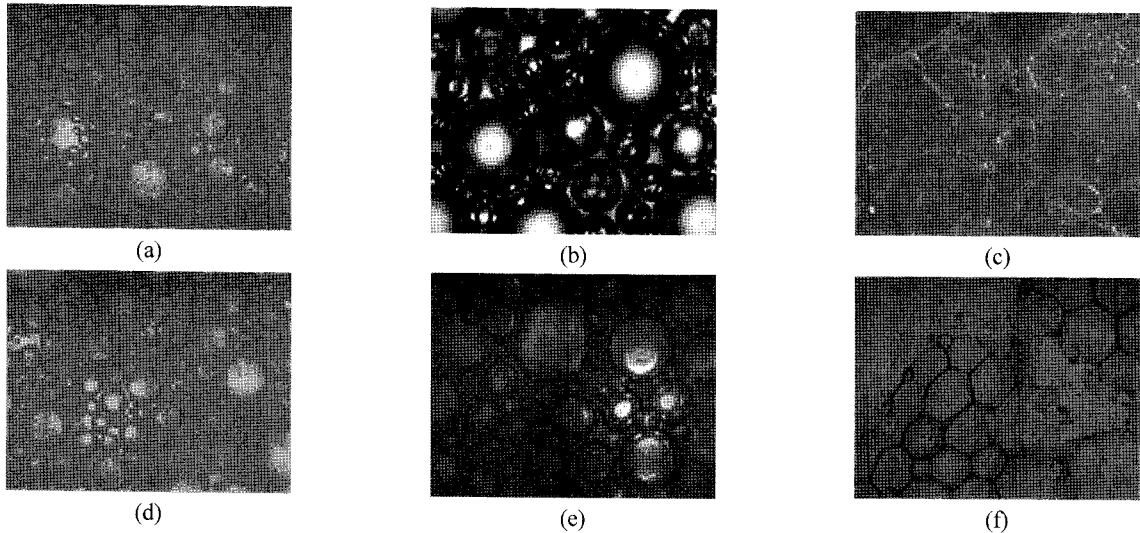


Fig. 3. Photographs of CGAs including Saponin in 15 min(a), 60 min(b), and 143 min(c) at room temperature; in 15 min(d), 60 min(e), and 105 min(f) at 70°C.

상 기포막이 깨지면서 거품의 합체 뒤 기포 사이에 존재하는 액상의 빠른 수리학적 배수(drainage)로 시간이 지남에 따라 CGA의 크기가 커진 후 작아지는 것을 확인하였다.¹⁶⁾

SDS용액의 표면장력은 3.47 mM에서 48.5 mN/m 정도이고, 농도가 10.40 mM까지 증가하면 표면장력은 34.5 mN/m까지 감소하며¹⁷⁾ 표면장력이 낮을수록 기포력은 증가하는 경향이 있기 때문에¹⁸⁾ Fig. 2와 3을 비교로 부터 SDS는 Saponin에 비해 빠르고 쉽게 CGA를 형성하는 것으로 보인다. SDS의 경우 soapy shell의 형태가 뚜렷하였으며 CGA의 크기 또한 균일하였다. 상온에서 SDS의 CGA 크기는 135 µm이며 70°C로 가열하였을 경우 151.8 µm로 증가하였다. Air core의 크기 역시 75 µm에서 가열하였을 경우 82 µm로 커졌다. Soapy shell의 크기는 상온일 경우 CGA의 크기 100 µm일 때 16.5 µm로 약 6:1이며, 가열(70°C)했을 경우 CGA의 크기 175 µm일 때 21.5 µm로 약 8:1의 비율을 나타내 가열시 soapy shell이 상대적으로 작아짐을 확인할 수 있다.

Saponin은 식물로부터 생산된 생계면활성제로서 그 구조가 매우 복잡하고 분자량이 크다. Saponin의 CGA 크기는 상온에서 224 µm이며 가열하였을 때 230 µm로 증가하였다. CGA의 지속시간이 다른 계면활성제에 비해 길었으며 상온일 경우 같은 시간에서 CGA를 촬영한 결과 soapy shell의 형상이 다른 계면활성제에 비해 뚜렷하지 않음을 알 수 있었다. Soapy shell의 크기는 상온일 경우 CGA의 크기 287.5 µm일 때 22.3 µm로 약 13:1이었으나 가열(70°C)했을 경우 형상이 뚜렷하지 않아 측정이 어려웠다(Fig. 3).

Tween 80은 안정성이 다른 계면활성제에 비해 떨어졌다. 빠르게 CGA의 수가 줄어들었으며 CGA 형성 후 60분 뒤에는 급속도로 CGA가 소멸됨을 확인하였다.

Tween 80의 CGA 크기는 상온에서 135 µm이고, 가열하였을 경우 156 µm로 증가하였고, air core의 크기도 81.7 µm에서 85.2 µm로 약간 증가 하였다. 상온에서 soapy shell의 전체 CGA대비 크기는 약 5:1로서 가열(70°C)한 경우와 그

비율이 비슷하고 상온과 가열(70°C)의 CGA 지속시간 또한 유사하였다. 상대적으로 SDS나 Triton X-100에 비해 큰 분자량을 지녔으나 CGA 안정성은 가장 낮게 측정되었다.

Triton X-100의 경우 CGA의 크기는 상온에서 208.2 µm이고, 가열하였을 때 230 µm로 커졌다. Air core는 72.5 µm에서 79.3 µm로 약간 커졌다. Soapy shell의 크기는 상온일 경우 CGA의 크기 195 µm일 때 31.8 µm로 약 6:1이며, 가열(70°C)일 경우 CGA의 크기 275 µm일 때 42.2 µm로 약 6.5:1이며, 상온과 가열(70°C)의 CGA 지속시간 및 구조적 형상에 차이가 없어 안정된 CGA 상태를 유지한다고 생각된다.

상온과 70°C에서의 CGA의 소멸시간을 비교해보면 상온일 경우 Saponin의 CGA지속시간이 143분으로 가장 높게 나타났고, Tween 80이 81분으로 낮은 안정성을 보였다(Fig. 4). 보통 이온성 계면활성제의 경우, 공간적 척력에 의해 비이온성 계면활성제보다 높은 안정성을 나타낸다. 하지만 Saponin은 생물계에서 추출되는 구조가 복잡하고 분자량이 큰 계면활성제로서 액상막에서 기체의 확산을 지연하는 효과가 커 CGA의 안정화에 기여하는 것으로 사료된다.¹⁾

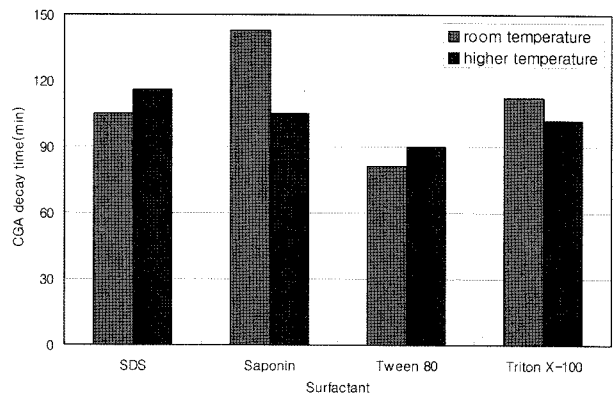


Fig. 4. Comparison of CGA decay times at room temperature and higher temperature for single surfactants(70°C).

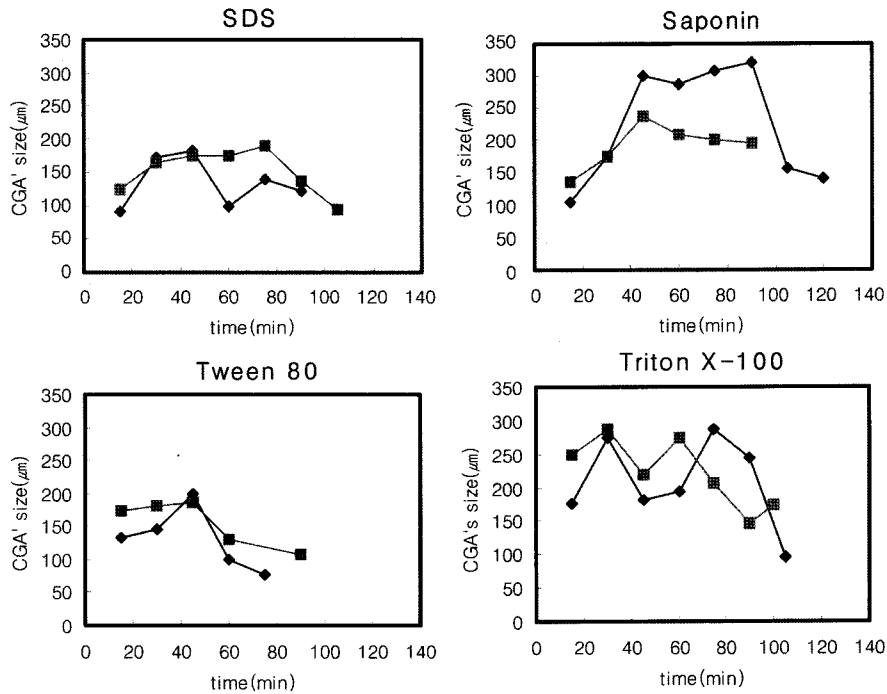


Fig. 5. comparison of the decaying size of CGAs formed with single surfactants at room temperature(◇) and higher temperature(70°C, □).

각각의 계면활성제의 상온일 경우와 가열(70°C)했을 경우의 평균 크기를 산출한 결과(Fig. 5) 음이온성 계면활성제인 SDS로 형성된 CGA의 크기가 가장 작게 나타났으며 이는 음이온성 계면활성제의 정전기적 척력과 공간적 척력에 의한 영향으로 생각된다. 또한 상온일 경우보다 가열하였을 경우 일반적으로 CGA의 크기가 컸으며 이는 가열에 따라 CGA의 air core가 팽창한 것으로 판단되며 Saponin은 분자적 특수성 때문에 크기가 축소되는 것으로 보인다. 모든 CGA는 그 크기가 초기에 증가하였다가 감소하는 경향을 보였으며 이는 여러 연구에서 지적한 생성-융합-소멸의 과정이 나타

난 것으로 평균적으로 30~50분이 경과했을 때 융합이 발생하였다.

3.2. 혼합 계면활성제에 의한 CGA의 안정성 검토

단일 계면활성제의 실험에서 구한 각 계면활성제의 최적 농도를 바탕으로 두 종류의 계면활성제를 혼합하여 제조한 CGA의 안정성을 비교하였다.

SDS와 Saponin의 두 계면활성제를 혼합하였을 때 가장 긴 CGA 지속시간(139분)을 나타냈다(Fig. 6). SDS+Saponin에서 제조된 CGA의 크기는 상온일 때 161 μm이고 soapy

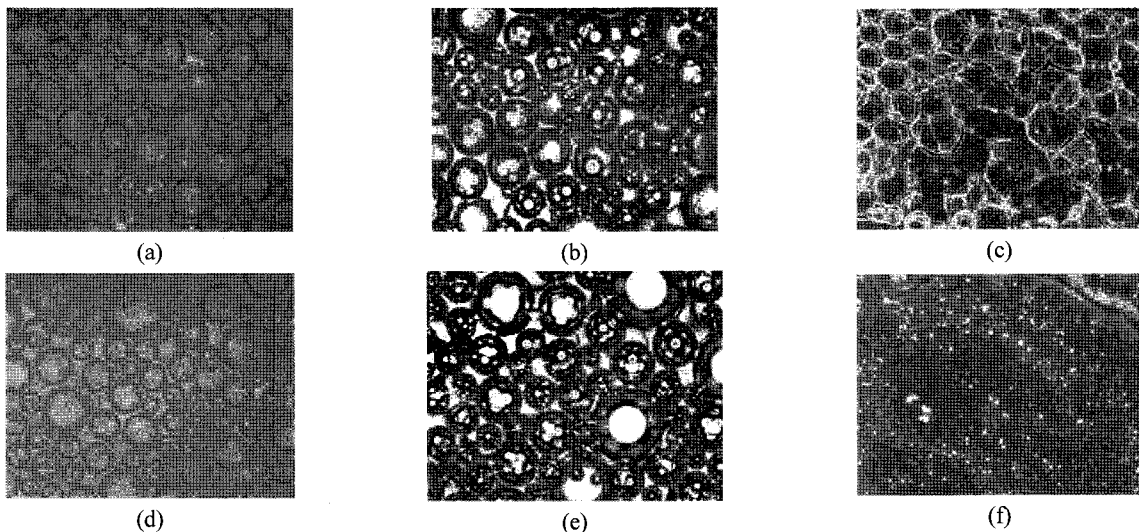


Fig. 6. Photographs of CGAs including SDS+Saponin in 15 min(a), 60 min(b), and 139 min(c) at room temperature; in 15 min(d), 60 min(e), and 105 min(f) at 70°C.

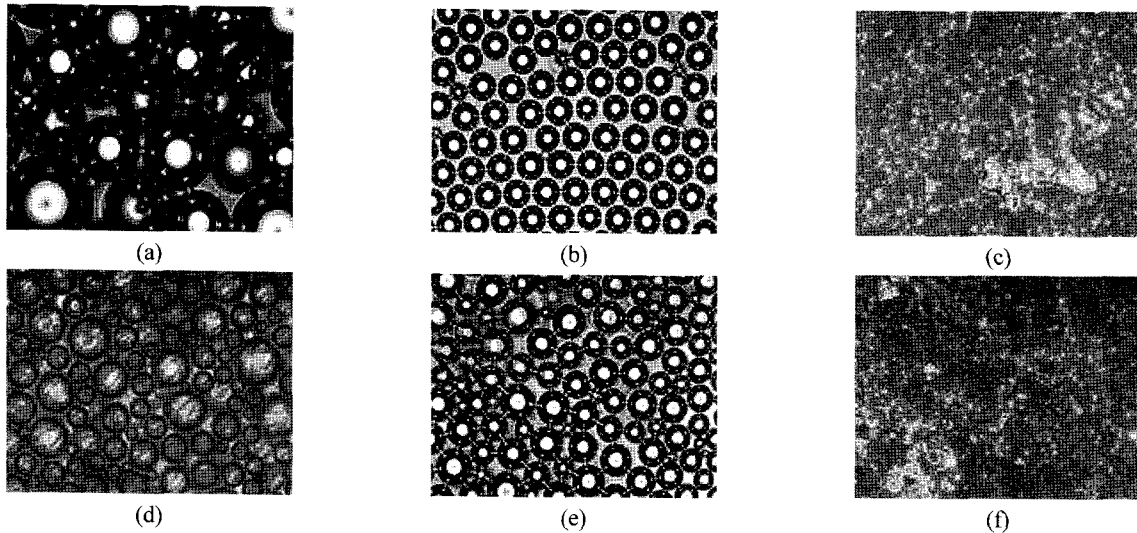


Fig. 7. Photographs of CGAs including Saponin+Triton X- 100 in 15 min(a), 45 min(b), and 65 min(c) at room temperature; in 15 min(d), 45 min(e), and 53 min(f) at 70°C.

shell은 22.7 μm 로 단일 성분 CGA 크기의 중간에 해당하였다. 또한 그 비율은 약 7:1로서 단일 계면활성제의 경우보다 soapy shell이 확대되었다.

한편 Saponin+Triton X-100 조합의 경우(Fig. 7)도 평균적 CGA 입경은 125 μm 로서 개별 계면활성제의 크기에 비해 매우 작게 나타났다. 이와 더불어 실험에서 Saponin이 포함된 조합에서 관찰 초기에 매우 급격한 크기 감소가 일어났다. 이는 단일 계면활성제 CGA에서는 관측되지 않는 특이 과정으로 교반에 의한 CGA형성과 정상 구조의 생성이 두 분자의 특성에 크게 좌우됨을 시사한다. 즉, Saponin과 같은 거대 고분자 당류와 저분자인 Triton X-100 또는 이온성 SDS 분자가 CGA의 soapy shell 및 소수성 구립자를 형성

하는 과정에서 큰 열역학적 불안정을 겪는다고 추측할 수 있다. 즉, 정전기적 척력 및 공간 배제에 의한 두 분자간 상호작용이 급변함으로써 단일 성분 CGA가 갖고 있던 안정된 분자 배열이 깨어진다고 볼 수 있다. 이는 계면에서의 사소한 장력변화나 air core 압력 변화에 따른 배수를 촉진하여 CGA의 융합-소멸 과정의 단축으로 이어진다고 판단된다. Fig. 8은 단일 및 혼합성분 CGA의 형성 모식도이다.

SDS+Saponin의 경우 상온에서 139분 70°C에서 105분으로 중간정도의 안정성을 보이고 있는 반면 그 외의 혼합 계면활성제의 경우 안정성이 떨어짐을 보여준다(Fig. 9). SDS와 Saponin의 혼합 외에 다른 혼합 계면활성제를 비교해보면 단일 계면활성제일 경우보다 CGA의 지속시간이 급속도

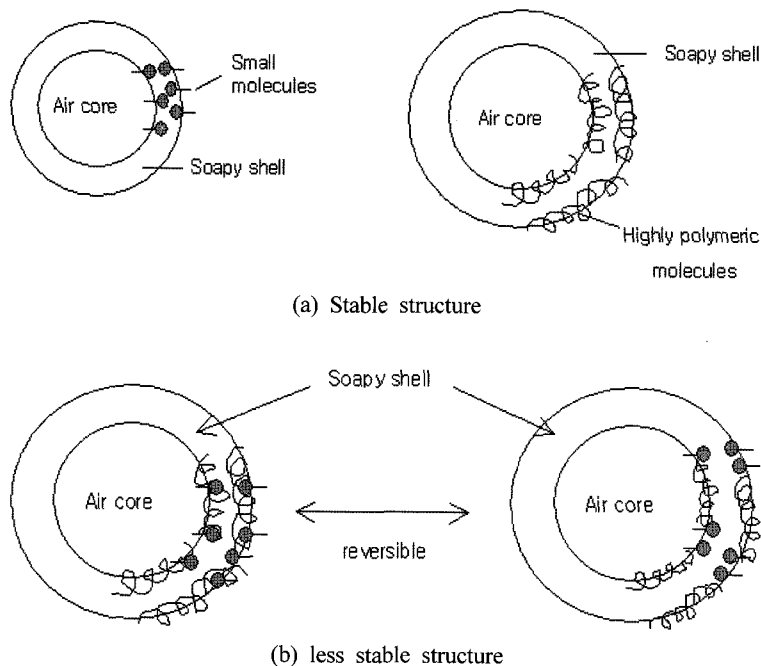


Fig. 8. Schematic of CGA formation when a single-component (a) or a two-component (b) surfactant was used.

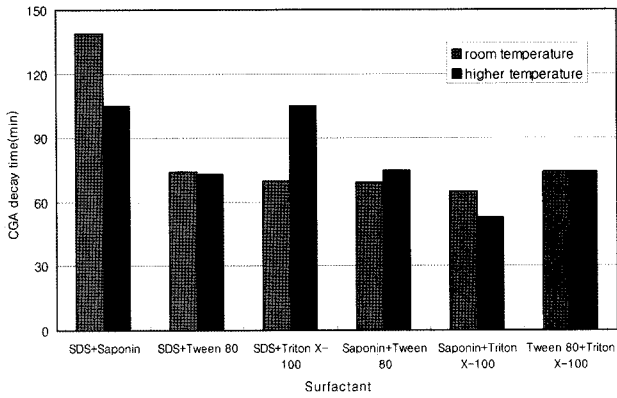


Fig. 9. Comparison of CGA decay times at room temperature and higher temperature for mixed surfactants(70°C).

로 떨어짐을 확인할 수 있었다. 각각의 혼합된 계면활성제의 상온일 경우와 가열(70°C)의 평균 크기를 산출한 결과 단일 계면활성제일 때보다 CGA의 전체 평균 크기는 줄었다. CGA의 지속시간과 CGA의 크기를 비교해 본 결과 혼합된 계면활성제는 단일 계면활성제일 경우보다 계면활성제의 점

가량은 늘더라도 안정성은 떨어짐을 확인하였다. Fig. 10의 그래프를 분석해 보면 CGA의 용합이 약 15분~30분이 경과했을 때 발생함을 알 수 있다. 이는 단일 계면활성제의 용합보다 더 빠른 시간대에 일어나며 이는 단일 계면활성제보다 CGA의 지속시간이 낮아지는 것으로 귀착된다.

4. 결론

- 1) 단일 계면활성제일 경우 상온일 때 Saponin의 CGA 지속시간이 143분으로 가장 안정성이 높았으며 Triton X-100, SDS, Tween 80순으로 나타났다. 70°C로 가열한 상태의 CGA에서는 SDS, Saponin, Triton X-100, Tween 80순이었다.
- 2) 혼합 계면활성제일 경우 SDS+Saponin 조합의 경우 상온에서 139분으로 높은 안정성을 나타내었다. 70°C에서 SDS+Saponin 조합과 SDS+Triton X-100 조합의 CGA 지속시간은 105분으로 가장 높았다.
- 3) CGA의 크기에 따른 안정성을 검토한 결과 생성-용합-소멸의 단계를 거쳐 일어나는데 용합이 초기에 시작되면 지속시간이 감소하였고, 혼합계면활성제를 사용할 때 단일 계

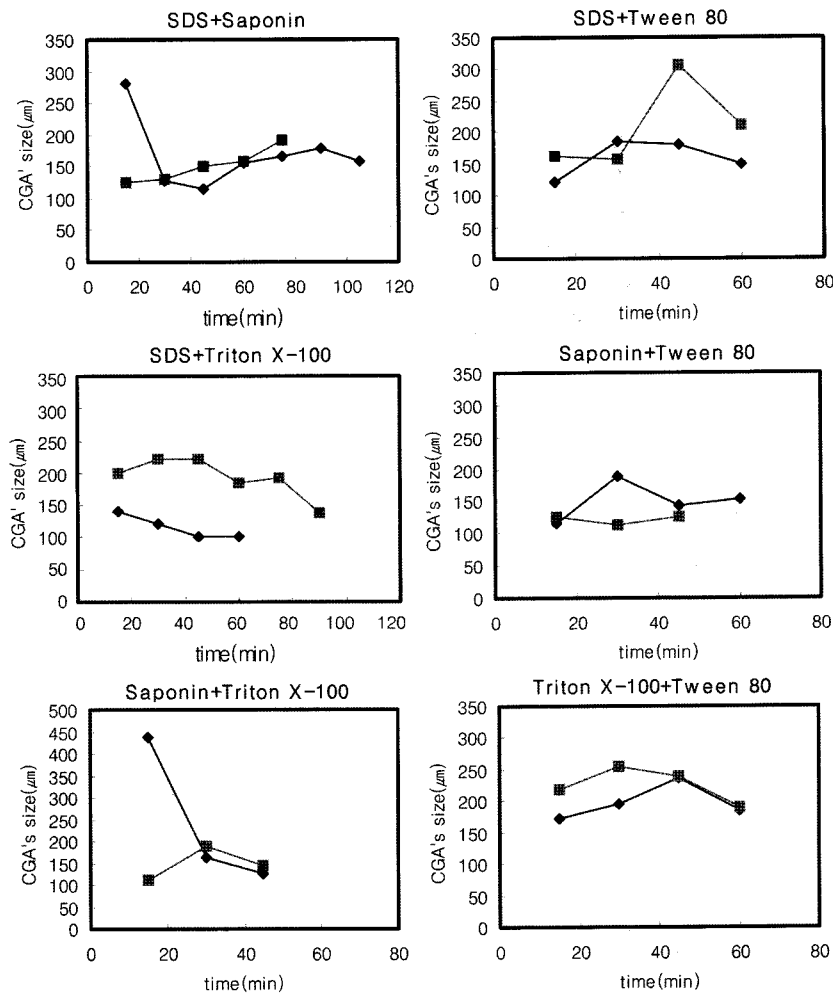


Fig. 10. Comparison of the decaying size of CGAs formed with mixed surfactants at room temperature(◇) and higher temperature(70°C, □).

면활성제보다 분자간 상호작용의 영향으로 안정성이 감소하였다.

4) 계면활성제 용액을 가열한 경우 CGA의 안정성은 일반적으로 낮아지며 air core 등의 확대로 크기도 증가하지만 Saponin과 같은 거대 분자가 개입될 경우는 예외성도 존재하였다.

참고문헌

1. 박주영, "A Study on the Development of Multifunctional Colloidal Gas Aphrons for the Enhancement of Aerobic Biodegradation in the Subsurface," 서울대학교 대학원(2005).
2. Jackson, A., Kommalapati, R., Roy, D., and Pardue, J., "Enhanced Transport of Bacteria through a Soil Matrix Using Colloidal Gas Aphron Suspensions," *J. Environ. Sci. Health*, **A33**(3), 369~384(1998).
3. Yujie, D. and Tong, D., "Stabilization and characterization of colloidal gas aphrons dispersions," *J. Colloid Int. Sci.*, **261**(2003).
4. Yujie, D., Tong, D., Fing, W., and Ke, X., "Enhancement of oxygen gas-liquid mass transfer with colloidal gas aphron dispersions," *Physicochem. Eng. Aspects*, **240**, 165~171(2004).
5. 박주영, 남경필, "토양의 자연정화능과 다기능성 Colloidal Gas Aphron을 이용한 지하 환경에서의 BTEX 처리기술 개발," 한국지하수토양환경학회(2004).
6. Jauregi, P., Varley, J., and Mitchell Geoffrey, R., "Colloidal Gas Aphrons(CGA) : Dispersion and Structural Features," *AIChE J.*, **46**(1), 24~36(2000).
7. Sebba, F., *Foams and Biliquid Foams: Aphrons*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey(1987).
8. Somnuk, J., Kumchai, R., and Virote, B., "Protein separation by colloidal gas aphrons using nonionic surfactant," *Sep. Purif. Technol.*, **35**, 23~29(2004).
9. Hashim, M. A. and Gupta, B. S., "The Application of colloidal gas aphrons in the recovery of fine ocellulose fibres from paper mill wastewater," *Biores. Technol.*, **64**, 199~204(1998).
10. Hashim, M. A., Gupta, B. S., Kumar, S. V., Lim, R., Lim, S. E., and Tan, C. C., "Effect of Air to Solid Ratio in the Clarification of Yeast by Colloidal Gas Aphrons," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **71**, 335~339 (1998).
11. Wang, Y. D., Wen, H. Z., Huang, Y. Y., and Dai, Y. Y., "Separation of Cu(II) from an Aqueous Solution by Using Colloidal Gas Aphrons," *J. Che. Eng. Jpn.*, **34**(9), 1127~1130(2001).
12. Mansur, Elmabruk H. A., Wang, Y., and Yujie, D., "Removal of suspensions of fine particles from water by colloidal gas aphrons(CGAs)," *Sep. Purif. Technol.*, **48**, 71~77(2006).
13. Jauregi, P. and Varley, J., "Colloidal Gas Aphrons : A Novel Approach to Protein Recovery," *Biotechnol. Bioeng.*, **59**(4), AUGUST 20, 471~481(1998).
14. Jauregi, P. and Varley, J., "Colloidal Gas Aphrons : Potential Applications in Biotechnology," *TIBTECH*, **17**, 389~395(1999).
15. Kim, Y. S., Son, Y. S., Son, Y. K., Khim, J. H., and Song, J. H., "Bioactive Foam Reactors for the Enhanced Biological Degradation of Toluene," 대한환경공학회지, 468~475(2005).
16. Myers, D., "Surfaces, Interfaces, and Colloids : Principles and Applications," *VCH Publishers, Inc.*, New York, NY, 251~270(1991).
17. Watanabe, K., Niwa, S., and Mori, Y. H., "Surface Tensions of Aqueous solutions of Sodium Alkyl Sulfate in Contact with Methane Under Hydrate-Forming Conditions," *J. Chem. Eng. Data*, **50**, 1672~1676(2005).
18. 박재구, 임정렬, "계면활성제 수용액의 기포력 및 포말 안정도에 관한 실험적 연구," 한국자원공학회지, **32**, 230~236(1995).