

Lecithin/LiCl 유기젤의 펜탄올 영향에 대한 유변학적 연구

김민국 · 추은애 · 이희영[†]

금오공과대학교 화학공학과
(2021년 11월 10일 접수, 2021년 11월 18일 수정, 2021년 11월 19일 채택)

Effects of Pentanol on the Rheology of Lecithin/LiCl Organogel

Min-Gook Kim, Eun-Ae Chu and Hee-Young Lee[†]

Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic of Korea
(Received November 10, 2021; Revised November 18, 2021; Accepted November 19, 2021)

초 록

양친매성 인지질의 한 종류인 레시틴은 데케인과 같은 비극성 유기용매상에서 구형의 역마이셀을 형성한다. 염화리튬과 같은 이온이 레시틴용액에 첨가될 때, 유기젤이 실린더형 마이셀의 얽힘으로 인해 유기젤로 변환하게 된다. 이번 연구에서, 우리는 레시틴과 염화리튬 혼합물의 유변학적 성질에 대한 보조계면활성제로서의 펜탄올 효과를 연구하고자 한다. 유변학 연구를 통해, 유기젤에 펜탄올이 첨가될 때, 유기젤의 점도와 탄성 성질이 감소하였다. 이러한 감소는 실린더 마이셀의 길이의 감소가 그 원인이며, 엑스선 소각 산란분석기를 통해 이를 확인하였다.

Abstract

Lecithin, a zwitterionic phospholipid, forms spherical reverse micelles in nonpolar organic solvents such as decane. The addition of monovalent ions like lithium chloride (LiCl) to lecithin organosols induces the transformation of organosols into organogels due to the entanglement of reverse cylindrical micelles. In this study, we investigate the effect of pentanol acting as co-surfactant on rheological properties of lecithin/LiCl mixtures. From rheological studies, we find that the viscosity and elastic property of organogels decreased upon the addition of pentanol to organogels. The decrease in viscosity and elastic property can be attributed to the shortening of reverse cylindrical micelles confirmed by small angle X-ray scattering (SAXS).

Keywords: Lecithin/LiCl, Rheology, Small-angle X-ray scattering, pentanol

1. 서 론

양친매성 인지질의 한 종류인 레시틴은 친수성 머리 부분과 소수성 꼬리 부분으로 이루어져 있으며, 유기용매상에서 자기조합에 의하여 구형의 역마이셀을 형성한다[1,2]. 여기서 “역”은 양친매성 분자의 친수성 머리부분과 소수성 꼬리부분의 방향이 수용액상에서의 방향과 반대로 정렬하게 됨을 의미한다. 즉, 역마이셀의 친수성 머리부분이 안쪽으로 향하여 유기용매 상으로부터 보호를 받게 되며, 소수성 꼬리부분이 바깥쪽으로 유기용매 상과 접촉하게 된다. 이러한 레시틴 용액에 물, 염, 당알코올 등의 첨가물이 섞이게 될 때, 구형의 마이셀이 실린더형의 마이셀로 변환된다[3,4,5,6,7,8,9,10]. 이는 레시틴 머리 부분과 첨가물들 사이에 수소결합, 정전기적 결합 등에 의해서 레시틴 분자의 형태가 바뀌기 때문이다. 레시틴 분자는 유기용매상에서 역 원뿔 형태를 지니고 있는데, 여기서 critical packing parameter

(CPP)는 1보다 훨씬 크게 된다. CPP란 양친매성 분자에서 친수성 머리 부분의 평균 면적 대비 소수성 꼬리 부분의 평균 면적으로, 양친매성 분자의 자기조합 나노구조체 형태를 설명하는 주요 지표가 된다 [1,2]. 레시틴 용액에 위에서 언급한 첨가물들이 섞이게 될 때, 친수성 첨가물들은 친수성 레시틴 머리 부분에 위치하게 되고, 이는 레시틴 머리 부분의 면적이 늘어나거나 혹은 꼬리 부분의 면적이 줄어드는 결과로 나타나게 된다. 이때 레시틴 분자 형태는 역 원뿔 모양에서 역 잘린 원뿔 모양으로 변환되고, 레시틴 분자의 CPP 값이 줄어드는 결과로 나타나게 된다. 이러한 레시틴 분자 형태의 변화를 통하여 구형의 역마이셀은 실린더형 역마이셀로 변환되게 된다. 특히, 실린더형 역마이셀 수가 충분히 많고 길어져 서로 얽히게 될 때 용액의 점도는 급격히 상승하게 된다[6,7,9]. 수용액상에서 양친매성 분자의 자기조합에 의한 마이셀과 같은 나노구조체에 비해서 유기용매상에서 양친매성 분자의 자기조합에 의한 역마이셀과 같은 나노구조체는 재료의 제한성 및 합성의 복잡성 때문에 상대적으로 연구가 적게 이루어져 있다[11,12,13,14].

본 논문에서는 레시틴과 염화리튬의 혼합물을 이용하여 실린더형 역마이셀을 합성한 후, 이를 펜탄올을 활용하여 다시 구형 역마이셀로 변환시키는 연구를 진행한다. 실린더형 역마이셀이 형성될 때 용

[†] Corresponding Author: The Kumoh National Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Gumi 39177, Republic of Korea
Tel: +82-54-478-7692 e-mail: lhysshr@kumoh.ac.kr

액의 점도는 급격히 상승하게 되고, 구형의 역마이셀로 변환 시 용액의 점도는 용매의 점도와 거의 같은 수준으로 다시 감소하게 된다. 유기용매의 점도를 높게 만드는 것에 많은 연구자들이 흥미를 가지고 있는데 이는 높은 점도를 갖는 유기용매가 약물전달, 식용 및 연료 젤, 효소 촉매 작용 등 다양한 분야에서 활용될 수 있기 때문이다 [15,16,17,18,19]. 또한 이러한 유기젤들은 식용 오일, 연료 등의 실제 사용을 위해 다시 액체로 변환시킬 필요가 있는데, 일반적으로는 열이나 압력을 가하는 방법을 사용한다[9,10,20]. 본 연구에서는 소량의 펜탄올과 같은 알코올을 활용하여 열이나 압력을 가하지 않고 효율적으로 유기젤을 액체로 만드는 연구를 진행하고자 한다. 샘플의 점도 및 점탄성 등의 유변학적 특성을 연구하기 위해 유동계를 활용하였으며, 샘플 내부의 자기조립된 나노구조체의 모양 및 크기 등을 분석하기 위해 엑스선 소각 산란분석기(Small-angle X-ray scattering, SAXS)를 이용하였다.

2. 실험

2.1. 실험 재료

콩 레시틴(95% purity)은 Avanti Polar Lipids에서 구입하였다. 염화리튬(LiCl, anhydrous 99.99% purity) 및 데케인(99%)은 Sigma-Aldrich에서 구입하였다. 메탄올(> 99.99% purity)은 Merck에서 구입하였다.

2.2. 실험 방법

먼저 메탄올 상에 레시틴과 염화리튬을 녹여 각각 100 mM의 저장 용액을 만든다. 각 용액을 실험에서 요구하는 농도가 되도록 혼합한 후 흡휴드 안에서 질소 가스를 이용하여 용매를 제거한다. 이를 다시 55 °C의 진공 오븐에서 24시간동안 용매가 충분히 제거되도록 한다. 마지막으로, 용매가 제거된 샘플에 데케인(4mL)을 첨가하고, 샘플을 55 °C에서 충분히 교반하여(300 rpm) 샘플이 균일하고 투명해지도록 한다. 이러한 방법으로 만들어진 유기젤에 펜탄올을 첨가한 후 샘플이 균일할 때까지 20 °C에서 교반한다(300 rpm). 만들어진 샘플들은 측정장비를 통한 분석 전 최소 24시간 동안 안정화 시간을 갖도록 한다.

2.3. 유변학적 연구

Steady-shear와 dynamic rheology 측정에는 TA instruments, Discovery HR-2모델의 유동계가 이용되었다. 샘플을 측정할 때 40 mm 지름을 가진 평행판을 사용하였고, 1.0 mm 간격에서 측정되었다. 모든 샘플은 20 °C에서 측정되었고, Peltier-based temperature controller가 온도 조절에 사용되었다. 또한 용매의 증발을 최소화하기 위해 솔벤트트랩을 사용하였다. Dynamic rheology 측정에서, 모든 샘플은 dynamic stress sweep에서 측정된 압력 하에서 측정되었고, 이 압력에서 샘플들은 선형 점탄성 구간에 속하게 된다.

2.4. Small-angle X-ray scattering (SAXS)

SAXS 측정은 포항 가속기 연구소의 4C SAXS II beamline에서 수행되었다. 16.9 keV의 에너지를 갖는 X-선을 사용하였고 산란 패턴은 MAR-CCD 영역 검출기로 수집하였다. 샘플은 외경이 1.5 mm인 quartz capillary cells에 주입하였다. 0.007에서 0.3 ⁻¹ 사이의 q 범위에 대한 데이터를 얻기 위해 2개의 샘플-검출기 거리, 1 및 4 m를 사용하였다. 산란 벡터의 크기는 $q = (4\pi/\lambda) \sin\theta$ 이며, 여기서 θ 는 산란 각도이고 λ 는 X선 빔 소스의 파장이다.

2.5. SAXS modeling

SAXS 데이터 모델링은 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 얻은 패키지를 사용하여 수행되었고 IGOR 소프트웨어로 실행되었다[21]. 이 연구에서 우리는 타원체와 cylinder radius에 대한 폼 팩터 모델만을 고려하였다.

2.5.1. Ellipsoids

균일 타원체 모델은 각각 장축 R_b 및 단축 R_a 로 표시되었다. 타원은 R_a 축을 중심으로 회전하여 타원체를 정의하였다[22,23].

$$P(q) = (\Delta\rho)^2 \left(\frac{4}{3}\pi R_a R_b^2\right)^2 \int_0^1 \left[3 \frac{\sin x - x \cos x}{x^3}\right] d\mu \tag{1}$$

여기서

$$x = q \sqrt{\mu^2 R_b^2 + R_a^2(1 - \mu^2)} \tag{2}$$

여기서 μ 는 파동 벡터 q 와 타원체의 대칭축 사이의 $\cos\theta$ 이다.

2.5.2. Cylinders

Cylinder radius 모델은 다음 방정식을 사용하여 표현할 수 있다 [22,23].

$$P(q) = (\Delta\rho)^2 (\pi r_c^2 L)^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} [F(q, \alpha)]^2 \sin \alpha d\alpha \tag{3}$$

여기서

$$F(q, \alpha) = \frac{2 J_1(q r_c \sin \alpha) \sin(q L \cos \alpha / 2)}{(q r_c \sin \alpha) (q L \cos \alpha / 2)} \tag{4}$$

여기서 $\Delta\rho$ 는 산란 대비이며, 이는 산란체와 용매의 산란 길이 밀도 간의 차이이고, r_c 는 실린더의 반경이다. J_1 은 1종 1차 베셀 함수이다. 다분산 반경이 있는 실린더의 경우 폼 팩터는 반경 분포에 대해 평균을 내었다.

$$P(q) = \int f(r) P(q, r) dr \tag{5}$$

여기서 $P(q, r)$ 는 반지름이 r 인 실린더의 폼 팩터이다. 실린더 반경을 갖는 다분산성의 슬츠 분포는 다음과 같이 주어진다.

$$f(r) = \left(\frac{z+1}{r_{avg}}\right)^{z+1} \frac{r^z}{\Gamma(z+1)} \exp\left(- (z+1) \frac{r}{r_{avg}}\right) \tag{6}$$

여기서 r_{avg} 는 평균 실린더 반경이고 Γ 는 감마 함수이다. 다분산 지수 p_d 는 다음과 같이 정의된다.

$$p_d = \frac{1}{\sqrt{z+1}} \tag{7}$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 레시틴/염화리튬/펜탄올 혼합물의 steady-shear rheology

Figure 1은 데케인상에서 40 mM lecithin과 10~50 mM 염화리튬의 혼합물에 0~100 mM의 펜탄올을 첨가한 샘플에 대한 steady-shear rheology 결과를 보여준다. 레시틴에 용액의 경우 10 mM에서 40 mM로 염화리튬의 농도를 증가시키기에 따라서 점도가 점점 증가하다가 50 mM의 염화리튬 농도에서 약간 감소하게 된다. 이는 염화리튬이 레시틴 머리부분에 위치하게 됨에 따라서 레시틴의 분자 형태가 역 잘린 원뿔 모양으로 변형되기 때문이다. 여기서, 점도가 높은 모든 샘플들은 전단몰어짐(shear thinning) 현상을 보여준다. 위의 샘플들에 펜탄올을 첨가할 경우, 펜탄올의 농도가 높아짐에 따라 샘플들의 점도가 점점 낮아지고 있음을 알 수 있다. Figure 1의 steady-shear rheology 결과값에서 뉴턴 유체 구간에서의 영전단점도(zero-shear viscosity)값들을 펜탄올 농도 변화에 따라서 정리한 결과값들을 Figure 2에 나타내었다. 펜탄올의 농도가 증가함에 따라서 영전단점도가 점점 감소하고 결국에는 용매의 영전단점도와 거의 같게 되는 것을 알 수 있다. 더욱 중요한 것은, 레시틴과 염화리튬 혼합물의 영전단점도가 높을 경우, 같은 펜탄올의 농도에서 더 높은 영전단점도를 나타내고 있다. 예를 들어, 30과 40 mM 염화리튬 샘플들을 비교하였을 경우, 40 mM의 펜탄올을 첨가하였을 때, 샘플들의 영전단점도는 각각 약 0.6과 400 Pa.s이다. 이는 레시틴과 염화리튬 혼합물의 영전단점도가 높을수록, 펜탄올의 농도를 증가시켰을 때 영전단점도가 더 천천히 감소한다는 것을 의미한다. 또한, 레시틴과 염화리튬 혼합물의 영전단점도가 높을 경우, 용매의 영전단점도와 거의 같게 만들기 위해 더 많은 양의 펜탄올이 필요하다. 예를 들어 10 mM 염화리튬 샘플의 경우, 약 70 mM 펜탄올에서 샘플의 영전단점도가 용매의 점도와 거의 같게 되는 반면에, 40 mM 염화리튬 샘플의 경우 이를 위해 100 mM의 펜탄올이 필요하다. 위의 실험 결과들을 통해서 레시틴과 염화리튬의 혼합물에 의해 형성된 유기젤은 점도가 낮을수록 펜탄올에 의해 액체화되기 쉽다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 레시틴/염화리튬/펜탄올 혼합물의 dynamic rheology

Figure 3은 데케인상에서 레시틴/염화리튬/펜탄올 혼합물의 dynamic rheology 결과값들을 보여준다. 여기서, 레시틴과 염화리튬의 농도는 40 mM로 고정되었으며, 펜탄올의 농도는 0, 60, 100 mM로 변화시켰다. Dynamic rheology 실험에서 G' 와 G'' 는 각각 탄성계수와 점성계수를 나타내고 있으며, G' 값이 더 크게 되면 샘플은 고체와 같은 성질을 지니게 되며 반대로 G'' 가 더 크게 되면 샘플은 액체와 같은 성질을 나타내게 된다. 0 mM 펜탄올 샘플의 경우, 전체 진동수 구간에서 G' 값이 G'' 값보다 더 크기 때문에 샘플은 고체와 같은 성질을 지니게 된다. 60 mM 펜탄올 샘플의 경우, 큰 진동수(짧은 시간) 구간에서는 G' 값이 G'' 값보다 크기 때문에 고체와 같은 성질을 지니게 되지만, 낮은 진동수(긴 시간) 구간에서는 G'' 값이 G' 값보다 커지기 때문에 액체와 같은 성질을 나타내게 된다. 여기서 샘플의 완화시간(G' 값과 G'' 값이 교차하는 지점에서의 진동수의 역수 값) 약 0.1초가 된다. 100 mM 펜탄올 샘플의 경우, 전체 진동수 구간에서 G'' 값이 G' 값보다 더 크기 때문에 샘플은 액체와 같은 성질을 나타내게 된다. 결과적으로, 펜탄올의 농도가 증가함에 따라서 레시틴/염화리튬의 유기젤은 점점 액체화된다는 것을 확인할 수 있다. 이는 펜탄올의 농도가 증가함에 따라서 점도가 점점 낮아지는 steady-shear rheology 결과값과 좋은 상관관계를 보여준다.

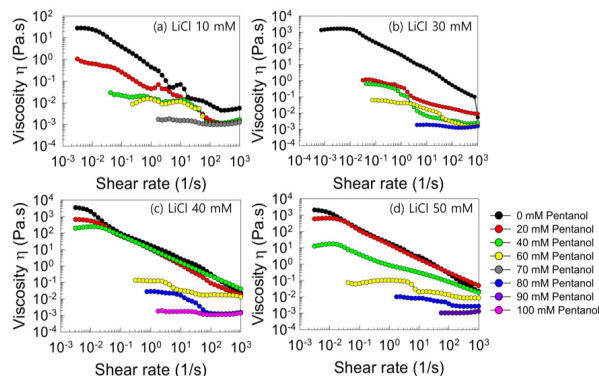


Figure 1. Steady-shear rheology of lecithin/LiCl mixtures with different concentrations of pentanol in decane. Lecithin concentration is fixed at 40 mM.

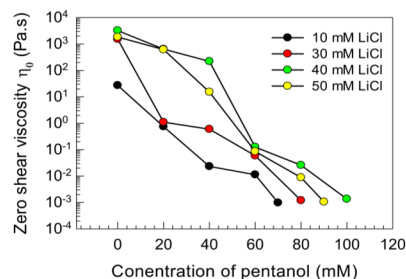


Figure 2. Zero-shear viscosity (η_0) for lecithin/LiCl mixtures as a function of pentanol concentration. Lecithin concentration is fixed 40 mM.

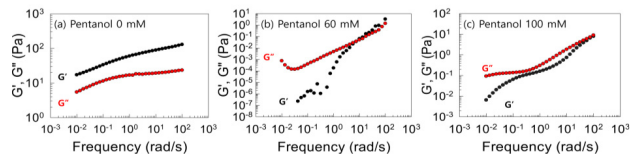


Figure 3. Dynamic rheology data (elastic modulus (G') and viscous modulus (G'') as a function of the frequency (ω)) of lecithin (40 Mm)/LiCl (40 Mm) mixtures with a different concentration of pentanol in decane.

3.2. 레시틴/염화리튬/펜탄올 혼합물의 SAXS

Figure 4는 레시틴(40 mM)/염화리튬(40 mM) 혼합물에 펜탄올 첨가에 따른 SAXS 결과값들을 보여준다. 동그라미 기호의 경우 실험값을 보여주며, 실선은 데이터 모델링을 통한 결과 값들을 나타낸다. 데이터 모델링을 위한 식들은 실험방법에 자세히 나타나 있는데, 100 mM 펜탄올 샘플의 경우 구형 역마이셀, 나머지 샘플들의 경우 실린더형 역마이셀을 위한 식들이 사용되었다. 0 mM 펜탄올 샘플의 경우 낮은 파수 백터(q) 구간에서 데이터 기울기가 거의 -1에 가깝다. 이는 실린더형 역마이셀의 전형적인 결과값이다. 펜탄올의 농도가 증가함에 따라서 그 기울기가 점점 감소하게 되는데, 이는 산란된 구조체, 즉 실린더형 역마이셀의 크기가 감소함을 의미한다. 100 mM 펜탄올 샘플의 경우, 낮은 q 구간에서 데이터 기울기가 거의 0에 가깝게 되는데, 이는 구형 역마이셀의 전형적인 결과값이다. 모든 실험값들은 데

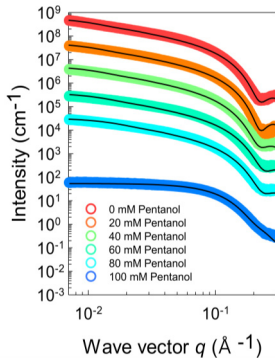


Figure 4. SAXS spectra of lecithin (40 Mm)/LiCl (40 Mm) mixtures in decane as function of pentanol concentration. The solid lines through the data are fits to suitable models.

이터 모델링을 통한 결과값들과 상당히 일치하고 있으며, 이러한 모델링을 통해서 얻은 역마이셀의 반지름과 길이의 값들이 Table 1에 나타나 있다. 펜탄올의 농도가 증가함에 따라서 실린더형 역마이셀의 길이가 점점 감소하고 결국에는 구형의 역마이셀로 변환됨을 확인할 수 있다. 예를 들어, 0 mM 펜탄올 샘플의 경우 그 실린더형 역마이셀 길이가 45.4 nm인 반면에 80 mM 펜탄올 샘플의 경우 그 길이가 29 nm로 감소하고 있으며, 100 mM 펜탄올 샘플의 경우 구형 역마이셀의 형태를 갖게 된다. 따라서 레시틴/염화리튬 유기젤의 점도 감소는 실린더형 역마이셀의 길이 감소 및 구형 역마이셀로의 변환과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 간접 푸리에 변환(indirect Fourier transformation, IFT) 방법을 통하여 SAXS 실험값을 분석할 수 있는데, 이를 통해 역마이셀의 모양 및 길이를 추정할 수 있다[24,25,26]. 100 mM 펜탄올 샘플의 경우, 대칭적인 형태의 쌍거리분포함수[pair-distance distribution function, $p(r)$]를 보여주고 있는데 이는 구형의 역마이셀을 의미한다. 나머지 샘플들은 비대칭적인 형태의 $p(r)$ 를 나타내고 있는데, 이는 실린더형의 역마이셀을 의미한다. 특히, 이 경우, $p(r)$ 이 x축과 만나는 지점을 통하여 실린더형 역마이셀의 길이를 추측할 수 있는데, 펜탄올의 농도가 늘어남에 따라서 그 길이가 짧아지고 있음을 알 수 있다.

3.4. 메커니즘

우리는 지금까지 유변학 및 SAXS 실험을 통하여 레시틴/염화리튬 혼합물이 적절한 몰비율에서 실린더형 역마이셀의 형성을 통해 유기젤이 합성되고, 펜탄올이 첨가될 때 유기젤이 액체화된다는 것을 확인하였다. 이러한 유기젤의 액체화는 실린더형 역마이셀의 길이 변화 및 구형 역마이셀로의 전환을 통해서 일어나게 된다. 즉, 레시틴/염화리튬 혼합물을 통해 만들어진 실린더형 역마이셀이 충분한 수와 길이를 갖게 될 때, 서로 얽히게 되고, 이러한 역마이셀의 얽힘을 통해 용매의 점도가 급격하게 증가하게 된다. 여기에 펜탄올이 첨가될 때 역마이셀의 길이가 짧아지게 되고(결국에는 구형 역마이셀로 변환됨), 역마이셀들의 얽힘이 풀리게 됨에 따라, 용매의 점도는 다시 낮아지게 된다.

또한, 분자의 기하학적 구조(CPP)의 변화를 통해 역마이셀의 길이가 짧아지게 됨을 설명할 수 있다. 펜탄올의 경우 공동계면활성제(cosurfactant)로 사용되고 있는데, 펜탄올의 친수성 머리부분(-OH)은 레시틴의 머리 부분에, 소수성 꼬리부분(-CH₂)부분은 레시틴의 꼬리부분으로 파고들게 된다(Figure 6). 이 경우, 레시틴 친수성 머리부분

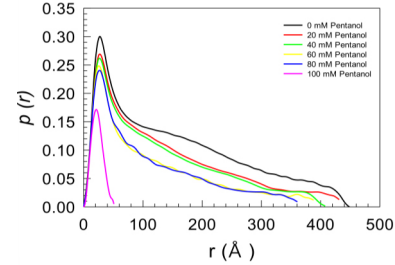


Figure 5. Pair distance distribution functions corresponding to the SAXS data.

Table 1. Fitting Parameters Obtained from SAXS Modeling in Fig. 4.

Lec/LiCl (mM)	Model	Radius (Å)	Length (Å)
40/0	Cyl-PolyRadius	16.9	454
40/20	Cyl-PolyRadius	16.9	440
40/40	Cyl-PolyRadius	16.9	415
40/60	Cyl-PolyRadius	15.5	366
40/80	Cyl-PolyRadius	15.5	290
Lec/LiCl (mM)	Model	R _a (Å)	R _b (Å)
40/100	Ellipsoid	16.7	58.9

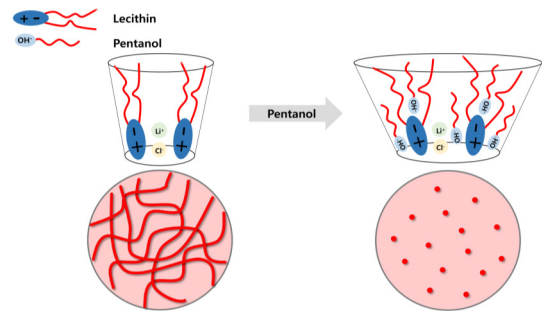


Figure 6. Schematic illustration of the transformation of reverse self-assembly micelles induced by lecithin/pentanol mixtures upon the addition of pentanol.

의 면적이 늘어나는 것 대비 소수성 꼬리부분의 면적이 늘어나는 비율이 더욱 커지게 됨에 따라서 CPP 값은 더욱 커지게 된다. 따라서, 실린더형 역마이셀을 만드는 레시틴 분자의 기하학적 구조는 실린더형 역마이셀을 형성하기 어려워지기 때문에 실린더형 역마이셀의 길이는 점점 짧아지게 되고, 결국 구형의 역마이셀이 형성되게 된다.

4. 결 론

이번 논문에서 우리는 데케인상에서 레시틴과 염화리튬 혼합물을 이용해서 유기젤을 합성하고, 여기에 펜탄올을 첨가하여 유변학적 변화를 관찰하였다. Steady-shear rheology 및 dynamic rheology 실험을 통하여 펜탄올 농도가 증가함에 따라서 유기젤의 점도가 감소하며, 액체 성질을 더욱 강하게 띠게 됨을 확인하였다. 이러한 유기젤의 점도 감소는, 샘플 내의 실린더형 역마이셀의 길이가 짧아짐에 따라서 나타나게 된다는 것을 SAXS 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 레시틴과 염화리튬을 이용한 유기젤은 합성의 편리성 및 생체 적합성 재료의 사용이라는 측면에서 다양한 응용 분야에 활용될 수 있으며, 압력 및 열을 사용하지 않고 소량의 펜탄올을 이용한 유기젤의 액체화

는 유기젤 사용의 편리성을 증대시킬 것으로 기대된다.

Acknowledgment

This paper was supported by Kumoh National Institute of Technology.

References

1. J. N. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*, Academic Press, San Diego, CA, USA (1991).
2. D. F. Evans and H. Wennerstrom, *The Colloidal Domain: Where Physics, Chemistry, Biology, and Technology Meet*, Wiley-VCH, New York (2001).
3. D. M. Willard, R. E. Riter, and N. E. Levinger, Dynamics of polar solvation in lecithin/water/cyclohexane reverse micelles, *J. Am. Chem. Soc.*, **120**, 4151-4160 (1998).
4. Y. A. Shchipunov, Lecithin organogel: A micellar system with unique properties, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **183-185**, 541-554 (2001).
5. R. Scartazzini and P. L. Luisi, Organogels from lecithins, *J. Phys. Chem.*, **92**, 829-833 (1988).
6. H. Y. Lee, K. K. Diehn, S. W. Ko, S. H. Tung, and S. R. Raghavan, Can simple salts influence self-assembly in oil? Multivalent cations as efficient gelators of lecithin organosols, *Langmuir*, **26**, 13831-13838 (2010).
7. S. H. Tung, Y. E. Huang, and S. R. Raghavan, A new reverse wormlike micellar system: Mixtures of bile salt and lecithin in organic liquids, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 5751-5756 (2006).
8. S. T. Lin, C. S. Lin, Y. Y. Chang, A. E. Whitten, A. Sokolova, C. M. Wu, V. A. Ivanov, A. R. Khokhlov, and S. H. Tung, Effects of alkali cations and halide anions on the self-assembly of phosphatidylcholine in oils, *Langmuir*, **32**, 12166-12174 (2016).
9. C. R. Lee, Y. K. Lee, E. J. Oh, K. S. Jin, and H. Y. Lee, Effect of aliphatic solvents on the reverse self-assembly of lecithin and calcium chloride mixtures, *J. Mol. Liq.*, **316**, 113790 (2020).
10. Y. G. Jung, C. R. Lee, H. J. Kim, M. G. Kim, K. S. Jin, and H. Y. Lee, Effect of hydrocarbon chain length of aliphatic solvents on the reverse self-assembly of lecithin and monovalent ion mixtures, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **607**, 125441 (2020).
11. K. Mukherjee, S. P. Moulik, and D. C. Mukherjee, Thermodynamics of micellization of Aerosol OT in polar and nonpolar solvents. A calorimetric study, *Langmuir*, **9**, 1727-1730 (1993).
12. G. Dutt, Does the onset of water droplet formation alter the microenvironment of the hydrophobic probes solubilized in nonionic reverse micelles?, *J. Phys. Chem. B*, **108**, 7944-7949 (2004).
13. H. Y. Lee, K. K. Diehn, K. Sun, T. Chen, and S. R. Raghavan, Reversible photorheological fluids based on spiropyran-Doped reverse micelles, *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 8461-8463 (2011).
14. L. K. Shrestha, R. G. Shrestha, and K. Aramaki, Intrinsic parameters for the structure control of nonionic reverse micelles in styrene: SAXS and Rheometry studies, *Langmuir*, **27**, 5862-5873 (2011).
15. P. Terech and R. G. Weiss, Low molecular mass gelators of organic liquids and the properties of their gels, *Chem. Rev.*, **97**, 3133-3160 (1997).
16. Z. D. Knezevic, S. S. Siler-Marinkovic, and L. V. Mojovic, Kinetics of lipase-catalyzed hydrolysis of palm oil in lecithin/izooctane reversed micelles, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **49**, 267-271 (1998).
17. D. Madamwar and A. Thakar, Entrapment of enzyme in water-restricted microenvironment for enzyme-mediated catalysis under microemulsion-based organogels, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **118**, 361-369 (2004).
18. F. Dreher, P. Walde, P. Walther, and E. Wehrli, Interaction of a lecithin microemulsion gel with human stratum corneum and its effect on transdermal transport, *J. Control Release*, **45**, 131-140 (1997).
19. M. Kreilgaard, Influence of microemulsions on cutaneous drug delivery, *Adv. Drug Deliv. Rev.*, **54**, S77-S98 (2002).
20. H. J. Lee, H. J. Kim, D. G. Park, K. S. Jin, J. W. Chang, and H. Y. Lee, Mechanism for transition of reverse cylindrical micelles to spherical micelles induced by diverse alcohols, *Langmuir*, **36**, 8174-8183 (2020).
21. S. R. Kline, Reduction and analysis of SANS and USANS data using IGOR Pro, *J. Appl. Cryst.*, **39**, 895-900 (2006).
22. J. S. Pedersen, Analysis of small-angle scattering data from colloids and polymer solutions: modeling and least-squares fitting, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **70**, 171-210 (1997).
23. J. S. Pedersen and P. Schurtenberger, Scattering functions of semiflexible polymers with and without excluded volume effects, *Macromolecules*, **29**, 7602-7612 (1996).
24. C. W. Macosko, *Rheology: Principles, Measurements, and Applications*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany (1994).
25. O. Glatter, A new method for the evaluation of small-angle scattering data, *J. Appl. Cryst.*, **10**, 415-421 (1977).
26. O. A. Ogunsola, M. E. Kraeling, S. Zhong, D. J. Pochan, R. L. Bronaugh, and S. R. Raghavan, Structural analysis of "flexible" liposome formulations: new insights into the skin-penetrating ability of soft nanostructures, *Soft Matter*, **8**, 10226-10232 (2012).

Authors

Min-Gook Kim; M.Sc., Graduate student, Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic of Korea; koukousou123@kumoh.ac.kr
 Eun-Ae Chu; B.Sc., Graduate student, Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic of Korea; dea05034@kumoh.ac.kr
 Hee-Young Lee; Ph.D., Professor, Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic of Korea; lhysshr@kumoh.ac.kr