

레시틴/디솔비톨/물 혼합물의 유변학적 성질 연구

추은애 · 김나현 · 강민석 · 이영민 · 이희영[†]

금오공과대학교 화학공학과
(2023년 3월 3일 접수, 2023년 3월 15일 수정, 2023년 3월 20일 채택)

Investigation of Rheological Properties of Lecithin/D-sorbitol/Water Mixtures

Eun-Ae Chu, Na-Hyeon Kim, Min-Seok Kang, Yeong-Min Lee and Hee-Young Lee[†]

Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic Korea
(Received March 3, 2023; Revised March 15, 2023; Accepted March 20, 2023)

초 록

유기용매 상에서 레시틴은 양친매성 분자의 특성 때문에 구형의 역 마이셀로 자가조립된다. 이러한 레시틴 용액에 D-sorbitol, 물과 같은 첨가제가 들어갈 경우 레시틴의 분자 형태의 변화를 유도하여 역 실린더형 마이셀로의 변환을 이끌게 된다. 이번 연구에서는, 레시틴과 D-sorbitol/물의 혼합물을 이용하여 샘플의 유변학적 변화를 관찰한다. 또한, 이러한 유변학적 변화와 용액 내부의 자가조립된 나노구조체와의 연관성을 확인하기 위해 엑스선 소각 산란분석기(SAXS)를 이용하여 나노구조체의 형태 및 크기 등을 확인한다. 이러한 혼합물을 이용하여 제조된 점도가 높고 점탄성을 지닌 유체는 약물전달, 식품젤 등의 분야에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

Abstract

Lecithin can self-assemble into reverse spherical micelles in organic solvents due to its amphiphilic properties. With additives such as D-sorbitol and water, the reverse spherical micelles are transformed into reverse cylindrical micelles by the morphology change of lecithin molecules. In this study, the rheological properties of lecithin/D-sorbitol/water mixtures were investigated. In addition, the small angle X-ray scattering (SAXS) technique was used to examine the shape and size of the formed nanostructures related to their rheological properties. Such mixtures are expected to be used in drug delivery and oleogels because of their high viscosity and viscoelastic behavior.

Keywords: Lecithin, D-sorbitol, Water, Rheology, Small angle X-ray scattering

1. 서 론

레시틴은 인산을 함유하고 있는 인지질의 한 종류이다. 레시틴은 양친매성 특성 때문에 수용액 상에서 이중층 구조의 수직에서 수백 나노미터 리포솜, 유기용매 상에서 단일층 구조의 수 나노미터 역 마이셀로 자가조립된 나노구조체를 형성한다[1,2]. 레시틴으로 구성된 수용액 상의 리포솜은 세포막과의 유사성 때문에 다양한 바이오 물질과 관련된 전달 시스템에 활용되고 있으며, 세포막의 대체 구조체로서도 많은 바이오 관련 실험에 사용되고 있다[1-7].

유기용매 상에서도 레시틴은 자가조립 구조체를 형성하는데, 분자들의 방향이 반대로 배열되기 때문에 구형의 역 마이셀로 자가조립된다[1,2]. 즉 소수성 꼬리 부분이 유기용매로 향하며, 친수성 머리 부분이 내부로 향하여 유기용매로부터 보호받게 된다. 이러한 레시틴 용액에 물, 염, 알코올 첨가제를 넣게 되면, 구형의 역 마이셀이 실린더

모양의 역 마이셀 혹은 이중층 구조인 역 리포솜이 형성된다[8-17]. 이는 레시틴의 분자 형태의 변화로 설명될 수 있는데, 유기용매 상에서 구형의 역 마이셀이 형성될 때 레시틴은 역 원뿔 형태를 지니고 있다. 첨가제로 인해 레시틴의 머리 부분의 면적이 늘어나거나 혹은 꼬리 부분의 면적이 줄어들게 되어, 잘린 역 원뿔 형태 혹은 역 실린더 형태로 레시틴 형상이 변화될 때, 역 실린더형 마이셀 혹은 역 리포솜이 만들어진다. 이러한 역 실린더형 마이셀 혹은 역 리포솜은 그 합성법 및 안정성의 문제 때문에 수용액 상에서 보다 그 연구가 더디게 진행되고 있다[17].

본 연구에서는 레시틴과 당알코올의 한 종류인 D-sorbitol의 혼합물에 물을 첨가하여 유변학적으로 어떠한 변화가 일어나는지를 알아본다. 앞에서 언급한 바와 같이, 유기용매 상의 레시틴에 당알코올 혹은 물이 첨가될 때, 역 실린더형 마이셀이 형성된다[11]. 이 때 역 실린더형 마이셀이 서로 얽힐 만큼 충분히 길어지게 될 때, 점도가 급격히 변하거나, 점탄성 성질을 지닌 유체로 변하게 된다. 본 연구에서는, 레시틴과 당알코올 혼합물을 제조하여 유변학적 변화를 우선 관찰하고, 여기에 물을 첨가하여 물이 레시틴/당알코올 혼합물의 점도, 점탄성에 어떠한 영향을 끼치는지 확인한다.

[†] Corresponding Author: The Kumoh National Institute of Technology
Department of Chemical Engineering, Gumi 39177, Republic Korea
Tel: +82-54-478-6792 e-mail: lhysshr@kumoh.ac.kr

2. 실험

2.1. 실험 재료

콩 레시틴(95% purity)은 Avanti Polar Liquids에서 구입하였다. D-sorbitol(≥ 98% purity) 및 테케인(99%)은 Sigma-Aldrich에서 구입하였다. 메탄올(> 99.99% purity)은 Merck에서 구입하였다. 물은 탈이온수(deionized water)를 이용하였다.

2.2. 실험 방법

레시틴과 D-sorbitol을 메탄올 상에 녹여 100 mM의 저장용액을 준비한다. 레시틴과 D-sorbitol을 각 실험에서 요구하는 농도로 혼합한 후 질소 가스를 이용하여 메탄올을 제거한다. 이를 다시 데시케이터에서 24시간동안 용매가 충분히 제거되도록 한다. 용매가 제거된 후 샘플에 테케인을 넣고, 55 °C에서 300 rpm으로 충분히 교반하여 샘플이 투명해지도록 한다. 투명하고 균일하게 만들어진 샘플들은 유동계 및 SAXS측정장비를 통한 분석 전 최소 24시간 동안 안정화한다.

2.3. 유변학적 연구

Steady-shear와 dynamic rheology 측정을 위해서 TA instruments, Discovery HR-2 모델 유동계가 사용되었다. 샘플 측정 시, 40 mm 지름을 가진 평행판을 이용하여, 샘플과 평행판 사이의 간격이 1.0 mm 가 되도록 하였다. 모든 샘플은 20 °C에서 측정되었고, Peltier-based temperature controller를 사용하여 온도를 조절하였으며, 용매의 증발을 최소화하기 위해 솔벤트 트랩을 사용하였다. Dynamic rheology 측정에서, 모든 샘플은 dynamic stress sweep에서 측정된 선형 점탄성 구간에 속하는 압력 이내에서 측정되었다.

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

SAXS 측정은 포항 가속기 연구소의 4C SAXS II beamline에서 진행되었다. 16.9 keV의 에너지를 갖는 X-선을 이용하였고 산란 패턴은 MAR-CCD 영역 검출기로 수집하였으며, 외경이 1.5 mm인 quartz capillary cells에 샘플을 주입하였다. 0.007에서 0.3⁻¹ 사이의 q 범위에 대한 데이터를 얻기 위해 1 및 4 m의 샘플-검출기 거리가 이용되었다. 산란 벡터의 크기는 $q = (4\pi/\lambda) \sin 2\theta$ 이며, 여기서 θ 와 λ 는 각각 산란 각도, X선 빔 소스의 파장이다.

2.5. SAXS modeling

SAXS 데이터 모델링은 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 얻은 패키지를 사용하였고, IGOR 소프트웨어로 실행되었다[18]. 이 연구에서 우리는 cylinder radius에 대한 폼 팩터 모델만을 고려하였다.

2.5.1. Cylinders

Cylinder radius 모델은 다음 방정식을 사용하여 표현할 수 있다 [19,20].

$$P(q) = (\Delta\rho)^2 (\pi r_c^2 L)^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} [F(q, \alpha)]^2 \sin \alpha d\alpha \quad (1)$$

여기서

$$F(q, \alpha) = \frac{2J_1(qr_c \sin \alpha)}{(qr_c \sin \alpha)} \frac{\sin(qL \cos \alpha/2)}{(qL \cos \alpha/2)} \quad (2)$$

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

$$P(q) = \int f(r)P(q, r)dr \quad (3)$$

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

$$f(r) = \left(\frac{z+1}{r_{avg}}\right)^{(z+1)} \frac{r^z}{\Gamma(z+1)} \exp\left(- (z+1) \frac{r}{r_{avg}}\right) \quad (4)$$

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

$$p_d = \frac{1}{\sqrt{z+1}} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 레시틴/D-sorbitol/물 혼합물의 유변학

Figure 1은 테케인 상에서 40 mM 레시틴과 5(a), 10(b), 15(c), 20(d) mM D-sorbitol의 혼합물에 0~120 mM의 물을 첨가했을 때, steady rheology를 통한 전단속도에 따른 점도 변화를 나타낸다. 거의 대부분의 샘플들은 전단속도 증가에 따른 shear thinning 현상을 보여주고 있으며(10^1 Pa·s 이하의 점도 샘플들의 경우 Newtonian 유체 거동을 보임), 낮은 전단속도 구간에서 Newtonian 유체 거동을 보이며 이 구간에서의 평균값으로부터 zero-shear 점도값을 얻을 수 있다.

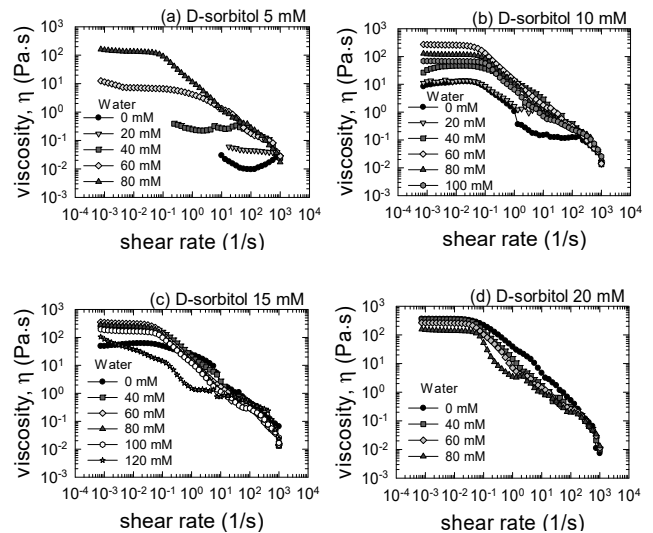


Figure 1. Steady-shear rheology of lecithin/D-sorbitol mixtures with different concentrations of water in decane. Lecithin concentration is fixed at 40 mM.

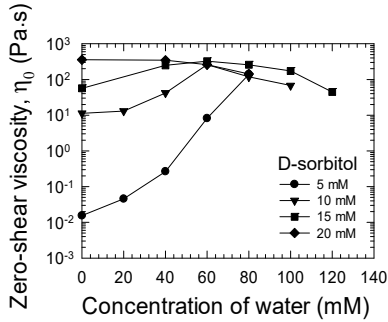


Figure 2. Zero-shear viscosity (η_0) for lecithin/D-sorbitol mixtures as a function of water concentration. Lecithin concentration is fixed at 40 mM.

Figure 2는 Figure 1에서부터 얻은 zero-shear 점도값을 물의 함량에 따라서 보여준다. 5 mM D-sorbitol 샘플의 경우, 물이 없을 때에는 zero-shear 점도가 데케인 용매의 점도와 유사하다. 물의 함량이 증가함에 따라서 zero-shear 점도가 점점 증가하여 80 mM의 물 샘플의 경우 약 139 Pa·s의 점도를 나타낸다. 그 이상의 물이 첨가될 때는 상 분리 현상이 발생한다. 10 mM의 D-sorbitol 샘플의 경우, 물이 없을 때 약 10 Pa·s의 점도에서 시작해서 60 mM의 물을 첨가할 때까지 점도는 계속 증가하여 약 261 Pa·s의 최대 점도값을 나타낸 후, 80과 100 mM의 물이 첨가될 때는 각각 118, 69 Pa·s로 점도가 다시 줄어드는 경향을 보여준다. 15 mM D-sorbitol 샘플의 경우도, 10 mM D-sorbitol 샘플과 유사하게 60 mM의 물이 첨가될 때까지 점도가 증가한 후, 그 이상의 물이 120 mM까지 첨가될 때 점도가 다시 줄어든다. 다만, 10 mM D-sorbitol 샘플보다 같은 물의 농도에서 더 높은 점도를 나타낸다. 20 mM D-sorbitol 샘플의 경우, 물이 없을 때 최대 점도값 (358 Pa·s)을 가진 후, 물이 첨가됨에 따라서 점도가 점점 감소하는 경향을 보여준다.

Figure 3은 데케인 상에서 40 mM 레시틴과 5(a), 10(b), 15(c), 20(d) mM D-sorbitol의 혼합물에 80 mM의 물을 첨가한 샘플들의 dynamic rheology로부터 얻은 frequency sweep 결과값들을 보여준다. 저장 탄성률(storage modulus, G')과 손실 탄성률(loss modulus, G'')의 경우 높은 진동수에서는 저장탄성률이 상대적으로 크고, 낮은 진동수에서는 손실탄성률이 상대적으로 크기 때문에 모든 샘플이 점탄성(viscoelastic) 거동을 하고 있음을 보여준다. 이러한 점탄성 거동은 역실린더형 마이셀의 전형적인 특성 중 하나이다. 저장 탄성률과 손실 탄성률의 교차점으로부터 계산된 완화시간은 5, 10, 15, 20 mM D-sorbitol의 샘플에 대해서 각각 약 7.1, 4.6, 9.0, 4.2 s이다.

3.2. 레시틴/D-sorbitol/물 혼합물의 SAXS 분석

용액 내부에 나노구조체 형성을 확인하기 위해 SAXS 분석을 실시하였다. Figure 4는 레시틴 20 mM과 D-sorbitol 2.5(a), 5(b), 7.5(c), 10(d) mM에 물을 첨가하였을 때 SAXS 결과값들을 보여준다. SAXS 실험을 위해서 농도를 반으로 감소시킨 이유는 입자 사이의 상호작용과 관련이 있는 structure factor를 배제하기 위함이다. 원으로 표시되고 있는 값들은 SAXS 실험값을 의미하며, 실선으로 표시된 값들은 data fitting 결과값들을 의미한다. 낮은 wave vector (q)에서 산란 intensity (I)의 기울기가 -1에 가까운 것으로 볼 때, 샘플 내에 실린더형 구조체가 형성된 것으로 판단된다. 이를 실험 결과값의 data fitting을 통해 더욱 구체적으로 파악한다. 실선으로 표시된 값과 원으로 표시

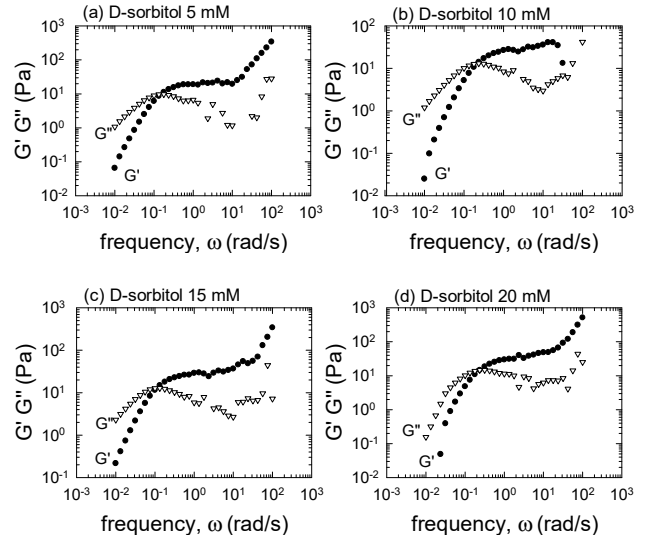


Figure 3. Dynamic rheology data (elastic modulus (G') and viscous modulus (G'') as a function of the frequency (ω)) of 40 mM lecithin/(a) 5 mM, (b) 10 mM, (c) 15 mM, and (d) 20 mM D-sorbitol mixtures with 80 mM concentration of water in decane.

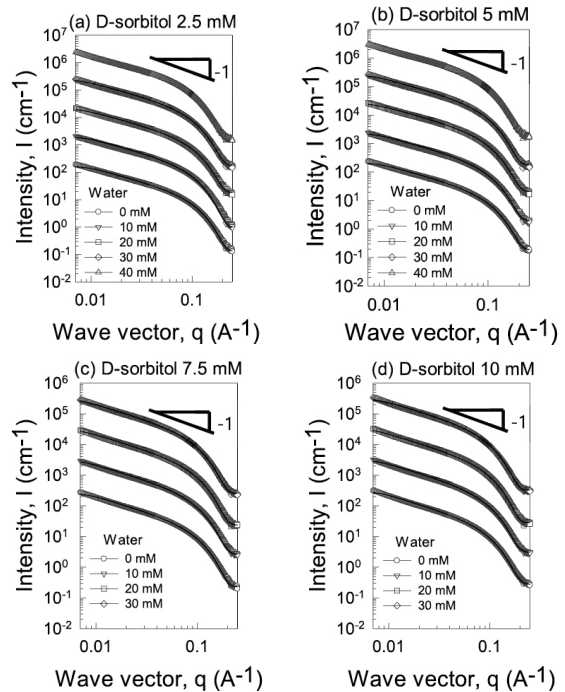


Figure 4. SAXS spectra of 20 mM lecithin/(a) 2.5 mM, (b) 5 mM, (c) 7.5 mM, and (d) 10 mM D-sorbitol mixtures in decane as a function of water concentration. The solid lines through the data are fit to suitable models.

된 값이 일치하는 것으로 볼 때 flexible cylinder 모델을 활용한 data fitting이 잘 된 것으로 판단된다. 이를 통해 샘플에 역실린더형 마이셀이 형성되었음을 확인한다. 또한 data fitting을 통해서 얻은 역실린더형 마이셀의 다양한 정보들이 Table 1에 요약되어 있다.

Table 1에서 나타난 바와 같이 2.5 mM D-sorbitol 샘플의 경우, 물의 함량이 증가함에 따라서 반지름 및 윤곽길이(contour length)가 증

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

Lecithin/ D-sorbitol/ Water (mM)	Fit type	Radius (Å)	Contour length (Å)	Kuhn length (Å)
20/2.5/0	Flexible cylinder	16.0	395	359
20/2.5/10	Flexible cylinder	16.3	405	356
20/2.5/20	Flexible cylinder	16.5	430	398
20/2.5/30	Flexible cylinder	16.7	445	424
20/2.5/40	Flexible cylinder	17.1	437	413
20/5/0	Flexible cylinder	16.2	405	371
20/5/10	Flexible cylinder	16.4	421	379
20/5/20	Flexible cylinder	16.7	436	393
20/5/30	Flexible cylinder	17.2	458	406
20/5/40	Flexible cylinder	17.2	447	420
20/7.5/0	Flexible cylinder	16.7	435	391
20/7.5/10	Flexible cylinder	16.9	474	425
20/7.5/20	Flexible cylinder	17.0	520	466
20/7.5/30	Flexible cylinder	17.2	510	475
20/10/0	Flexible cylinder	16.9	447	393
20/10/10	Flexible cylinder	17.1	457	410
20/10/20	Flexible cylinder	17.3	536	484
20/10/30	Flexible cylinder	17.5	430	400

가하고 있음을 알 수 있다. 특히, 물의 농도 증가에 따른 윤곽길이의 증가는 점도 증가의 중요한 원인이 됨을 확인하였다. 즉 이 샘플의 점도 증가는 역 실린더형 마이셀의 윤곽길이 증가에 기인한다. 5, 7.5, 10 mM D-sorbitol 샘플들의 경우 물 함량의 증가에 따라 윤곽길이 변화에 있어 유사한 경향을 보여주는데, 물의 농도가 증가함에 따라서 윤곽길이가 증가하여 최대치 값을 가진 후 다시 감소한다. 이는 앞에서 언급된 대응되는 샘플들의 물의 농도 증가에 따른 점도 변화(최대치 점도값 후에 다시 감소)와 유사함을 알 수 있다. 따라서 샘플의 물의 농도 증가에 따른 점도 변화는 역 실린더형 마이셀의 윤곽길이와 깊은 상관관계가 있음을 알 수 있다.

3.3. 메커니즘

Rheology 및 SAXS 실험을 통하여 레시틴/D-sorbitol 혼합물에 물을 첨가할 때 점도 변화가 일어나고 이는 혼합물 내부의 역 실린더형 마이셀 길이와 깊은 연관이 있다는 것을 확인하였다. 역 실린더형 마이셀 길이 성장은 레시틴 분자의 형태 변화로 설명될 수 있다. 레시틴은 테케인과 같은 유기용매 상에서 역 원뿔 형태를 지니는데 여기에 D-sorbitol을 첨가하면 레시틴 머리 부분과 수소결합을 하게 되고, 이는 레시틴 머리 부분의 면적을 증가시켜 잘린 역 원뿔 형태로 변환을 일으킨다. 이러한 잘린 역 원뿔 형태는 역 실린더형 마이셀이 형성되는데 있어 최적의 조건이 된다. 레시틴과 D-sorbitol 혼합물에 물을 첨가하게 되면, 물과 레시틴 머리 부분, D-sorbitol과의 수소결합이 생기게 되고, 이는 레시틴 머리 부분의 면적을 더욱 증가시키는 역할을 한다. 이는 잘린 역 원뿔 형태로의 변환을 더욱 촉진시키고, 이와 더불어 역 실린더형 마이셀 길이 성장을 도와주게 된다. 또한 SAXS data fitting 결과로부터 물의 함량이 증가함에 따라 반지름의 길이가 증가하는 것을 확인하였는데, 이를 통해 레시틴 꼬리 부분의 면적이 감소

함을 알 수 있다(레시틴 꼬리 부분의 탄화수소들이 더욱 정렬된 구조를 갖게 됨). 하지만 물의 함량이 지나치게 많아지게 되는 경우, 레시틴의 머리 부분의 면적이 늘어남과 동시에 꼬리 부분이 면적이 크게 증가하여 레시틴 분자 형태가 역 실린더형으로 변환될 수 있으며, 이는 역 실린더형 마이셀의 길이 성장을 억제하게 된다. 이러한 역 실린더형 마이셀 길이의 감소는 높은 물의 함량을 지닌 샘플들의 점도 감소로 나타난다. 유사하게 높은 농도의 D-sorbitol (20 mM)에 물을 첨가할 때, 분자 형태가 역 실린더형으로 변형되어 점도가 지속적으로 감소하게 된다.

4. 결 론

이번 연구에서는 유기용매인 테케인 상에서 레시틴과 D-sorbitol 혼합물에 물을 첨가했을 때 점도 등의 유변학적 변화 및 자가 조립 나노구조체 변형에 대해서 알아보았다. 점도 등의 유변학적 변화 관찰을 위해서 steady and dynamic rheology 분석 방법이 사용되었으며, 샘플 내의 나노구조체 형태, 크기 분석 등을 위해서 SAXS 기술이 적용되었다. 5 mM D-sorbitol 샘플의 경우, 물의 함량 증가에 따라 점도가 증가하는 경향을 나타내었고, 10, 15 mM D-sorbitol 샘플들의 경우, 물의 함량 증가에 따라 점도가 증가하여 최대치를 나타낸 후 다시 감소하는 경향을 보였다. 20 mM D-sorbitol 샘플들의 경우, 물의 첨가와 함께 점도가 지속적으로 감소하였다. 이러한 점도 변화는 용액 내부에 형성된 역 실린더형 마이셀의 길이와 밀접한 상관관계를 보여주었다. 본 연구를 통하여 유기용매의 점도를 좀 더 다양한 방법으로 변화시킬 수 있었으며, 또한 수용액에 녹을 수 있는 다양한 물질을 유기젤 상에 분산시킬 수 있기 때문에, 약물전달, 식품젤(올레오젤) 분야 등에 활용 가능성이 높아질 것으로 기대된다.

감 사

This paper was supported by Kumoh National Institute of Technology (202002330001).

References

1. J. N. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*, 3rd ed., 535-567, Academic Press, CA, USA (1992).
2. D. F. Evans and H. Wennerstrom, *The Colloidal Domain: Where Physics, Chemistry, Biology, and Technology Meet*, 2nd ed., 10-37, Wiley-VCH, NY, USA (1999).
3. D. D. Lasic, *Liposomes: from Physics to Applications*, 1st ed., 35-51, Elsevier, CA, USA (1993).
4. J. H. Fendler, *Membrane mimetic chemistry: Characterizations and Applications of Micelles, Microemulsions, Monolayers, Bilayers, Vesicles, Host-Guest Systems, and Polyions*, 1st ed., 87-110, Wiley, MI, USA (1982).
5. M. J. Ostro, *Liposomes: From Biophysics to Therapeutics*, 1st ed., 25-49, Informa Healthcare, NY, USA (1987).
6. J. H. Lee, V. Agarwal, A. Bose, G. F. Payne, and S. R. Raghavan, Transition from unilamellar to bilamellar vesicles induced by an amphiphilic biopolymer, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 048102 (2006).
7. B. Alberts, A. Johnson, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts, and P. Walter, *Molecular Biology of the Cell*, 4th ed., 15-27, Garland Science, NY, USA (2002).

8. S. H. Tung, H. Y. Lee, and S. R. Raghavan, A facile route for creating “Reverse” vesicles: Insights into “Reverse” self-assembly in organic liquids, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 8813-8817 (2008).
9. 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).
10. H. Y. Lee, K. Hashizaki, K. Diehn, and S. R. Raghavan, Reverse self-assembly of lipid onions induced by gadolinium and calcium ions, *Soft Mater.*, **9**, 200-207 (2013).
11. M. G. Kim, E. J. Oh, K. S. Jin, J. W. Chang, and H. Y. Lee, Effect of sugar alcohols on the reverse self-assembly of lecithin in diverse organic solvents, *J. Mol. Liq.*, **330**, 115670 (2021).
12. Y. A. Shchipunov, Lecithin organogel: A micellar system with unique properties, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **183-185**, 541-554 (2001).
13. 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).
14. 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).
15. 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).
16. 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).
17. E. J. Oh, D. G. Park, Y. S. Lim, K. S. Jin, and H. Y. Lee, Structural transition of reverse cylindrical micelles to reverse vesicles by mixtures of lecithin and inorganic salts, *J. Colloid Interface Sci.*, **615**, 768-777 (2022).
18. 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).
19. K. Hashizaki, Y. Sakanishi, S. Yako, H. Tsusaka, M. Imai, H. Taguchi, and Y. Saito, New lecithin organogels from lecithin/polyglycerol/oil systems, *J. Oleo Sci.*, **61**, 267-275 (2012).
20. 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).

Authors

Eun-Ae Chu; M.Sc., Graduate Student, Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic Korea; dea05034@gmail.com

Na-Hyeon Kim; B.Sc., Graduate Student, Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic Korea; 20236008@kumoh.ac.kr

Min-Seok Kang; B.Sc., Graduate Student, Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic Korea; 20236001@kumoh.ac.kr

Yeong-Min Lee; B.Sc., Graduate Student, Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic Korea; 20236073@kumoh.ac.kr

Hee-Young Lee; Ph.D., Professor, Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic Korea; lhysshr@kumoh.ac.kr