

레시틴과 염들의 혼합물을 이용한 역실린더형 마이셀 형성

강민석 · 김나현 · 이창민 · 이희영[†]

금오공과대학교 화학공학과
(2024년 8월 6일 접수, 2024년 8월 20일 수정, 2024년 8월 21일 채택)

Formation of Reverse Cylindrical Micelles Using Mixtures of Lecithin and Salts

Min-Seok Kang, Na-Hyeon Kim, Chang-Min Lee and Hee-Young Lee[†]

Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic of Korea
(Received August 6, 2024; Revised August 20, 2024; Accepted August 21, 2024)

초 록

양친매성 특성을 지닌 계면활성제의 한 종류인 레시틴은 다양한 유기용매 상에서 구형의 역마이셀을 형성한다. 유기용매 상에서 용해도가 현저히 낮은 염들은 레시틴 친수성 머리부분과의 이온 결합을 통해 그 용해도가 급격히 높아지게 되고, 또한 레시틴의 분자 형태의 변형을 유도한다. 이를 통해 구형의 역마이셀은 실린더형 역마이셀로 변환이 되며 이렇게 형성된 실린더형 역마이셀이 네트워크를 형성할 때 급격한 유변학적 변화를 일으키게 된다. 본 연구에서는 레시틴 용액에 두 가지 염을 동시에 첨가하여 자가조립 구조체의 형성 및 유변학적 변화를 소각 엑스선 산란 분석기 및 유동계를 이용하여 정밀하게 분석한다.

Abstract

Lecithin is one type of surfactant with amphiphilic properties, which forms spherical reverse micelles in various organic solvents. Salts with markedly low solubility in organic solvents can significantly increase their solubility through ionic interactions through the hydrophilic head of lecithin, leading to changes in the molecular morphology of lecithin. As a result, spherical reverse micelles can transform into cylindrical reverse micelles, which can cause abrupt rheological changes when these cylindrical reverse micelles form a transient network. This study precisely analyzes the formation of self-assembled structures and rheological changes by simultaneously adding two types of salts to a lecithin solution, using small-angle X-ray scattering analysis and rheometry.

Keywords: Lecithin, Salts, Rheology, SAXS, Reverse self-assembly

1. 서 론

친수성과 소수성을 동시에 갖고 있는 양친매성 분자는 수용액 상에서 임계 농도 이상에서 마이셀, 리포솜 등과 같은 다양한 형태의 나노구조체로 자가조립된다[1,2]. 양친매성 분자의 수용액 상에서의 자가조립은 물분자의 엔트로피를 증가시키기 위해 양친매성 분자의 소수성 부분이 마이셀 내부로 향하게 하는 소수성 결합에 의해 주로 일어나게 된다[3-5]. 양친매성 분자들의 자가조립은 수용액 상에서 뿐만 아니라 유기용매 상에서도 일어나는데 이를 역자가조립이라 부르고, 이때의 자가조립은 수용액 상에서와는 다르게 양친매성 분자의 친수성 부분 사이에 수소 결합, 이온 결합 등에 의해서 주로 일어나게 된다[6-11]. 이러한 유기용매 상에서의 양친매성 분자의 역자가조립의 관한 연구는 재료의 한계 등으로 인해 수용액 상에서의 자가조립보다

는 훨씬 덜 진행되고 있다[12].

실린더형 마이셀은 지역적인 유연성을 유지하면서 그 길이가 수 마이크로미터까지 이른다. 이러한 실린더형 마이셀은 수용액 및 유기용매에서 형성될 수 있고, 특히 유기용매 상에서의 실린더형 마이셀을 제조하는데 가장 많이 알려진 방법은 양쪽성 이온의 인지질(친수성 부분)과 두 개의 탄화수소 사슬(소수성 부분)을 지니고 있는 레시틴 분자를 활용하는 것이다[6,13-18]. 레시틴 분자는 유기용매 상에서 구형 혹은 타원형의 역마이셀을 형성한다. 레시틴 용액에 약간의 물, 염, 알코올과 같은 첨가제가 추가될 때 구형의 역마이셀은 축의 방향으로 성장하여 실린더 형태를 띠게 된다. 이는 레시틴과 첨가제 사이의 결합에 의해 레시틴의 분자구조 형태가 실린더를 형성하는 데 유리하게 변하기 때문이다. 이러한 마이셀 길이의 증가와 이로 인한 마이셀의 얽힘은 일시적인 네트워크를 형성하고, 이는 점도 증가, 탄성력 강화 등의 샘플의 유변학적 성질을 변하게 한다[16,19-20].

기존에 레시틴과 첨가제(물, 염, 알코올 등)의 혼합물을 활용한 실린더형 역마이셀 합성에 관한 연구는 지속적으로 진행되어 왔으나, 레시틴과 두 가지 이상의 염 혼합물에 대한 연구는 아직 보고된 바 없다. 본 연구에서는 레시틴/염화나트륨/브로민화나트륨 혼합물을 이

[†] 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

용하여 도데케인 상에서 실린더형 역마이셀을 합성하고, 두 가지 염 혼합물이 사용될 때 실린더형 역마이셀의 성질 변화를 조사한다. 나노 크기의 실린더형 역마이셀을 분석하기 위해 용액 상에서 구조체의 변형을 일으키지 않는 소각 X선 산란(small angle X-ray scattering, SAXS) 기술을 활용한다.

2. 실험

2.1. 실험 재료

콩 레시틴(95% purity)은 Avanti Polar Liquids에서 구입하였다. 염화나트륨(NaCl, ≥ 99%), 브로민화나트륨(NaBr, ≥ 99%) 및 도데케인(≥ 99%)은 Sigma-Aldrich에서 구입하였다. 메탄올(> 99.99% purity)은 Merck에서 구입하였다.

2.2. 실험 방법

100 mM 레시틴과 염화나트륨, 브로민화나트륨을 메탄올 상에 녹여 저장용액을 준비한다. 이때 염화나트륨, 브로민화나트륨 저장용액의 경우 각각 따로 준비하며 100 mM 레시틴에 넣게 된다. 레시틴과 염화나트륨, 브로민화나트륨을 각 실험에서 요구하는 농도로 계산하여 혼합한 후 질소 가스를 이용하여 메탄올을 제거한다. 이를 55 °C의 진공오븐에서 24 h 동안 용매가 충분히 제거되도록 한다. 용매가 제거된 후 샘플에 도데케인을 넣고, 65 °C에서 300 rpm으로 충분히 교반하여 샘플이 균일해지도록 하며 해당 샘플은 하루 동안 후드에서 안정화한 이후 기기로 측정을 진행한다.

2.3. 유변학적 연구

TA instruments, Discovery HR-2 모델 유동계를 이용해 steady-shear 측정을 진행했다. 샘플 측정 시, 20 mm 지름을 가진 평행판을 이용하여, 샘플과 평행판 사이의 간격이 1.5 mm가 되도록 하였다. 모든 샘플은 20 °C 조건에서 측정되었고, 해당 온도는 Peltier-based temperature controller를 이용하였으며, 용매의 증발을 최소화하기 위해 솔벤트 트랩을 사용하였다.

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

포항 가속기 연구소의 4C SAXS II beamline에서 진행되었다. 16.9 keV의 에너지를 갖는 X선을 이용하였고, 산란 패턴은 MAR-CCD 영역 검출기로 수집을 진행했다. 또한, 외경이 1.5 mm인 quartz capillary cells에 샘플을 주입하여 측정을 진행했다. 0.007에서 0.6 Å⁻¹ 사이의 q 범위에 대한 데이터를 얻기 위해서는 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 데이터 모델링

SAXS 데이터 모델링은 National Institute of Standards and Technology (NIST)에서 얻은 패키지를 사용하였고, IGOR 소프트웨어로 실행되었다. 이 연구에서 우리는 cylinder radius에 대한 폼 팩터 모델만을 고려하였다[19,21].

2.5.1. Cylinders

Cylinder radius 모델은 다음 방정식을 사용하여 표현할 수 있다.

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

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 산란제와 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.

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

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/염/도데케인 혼합물의 유변학

본 실험에서 사용된 염(브로민화나트륨, 염화나트륨)들은 도데케인과 같은 무극성 용매에 용해되지 않는다. 하지만, 이러한 염들이 무극성 용매 상에서 레시틴과 혼합될 때 적정 물 비율에서 레시틴의 친수성 머리 부분과의 결합을 통해 무극성 용매 상에서도 기꺼이 용해될 수 있다. 도데케인 상에서 레시틴과 염들의 혼합물 샘플들은 20 mL 유리병에 담긴 상태에서 유리병을 뒤집었을 때, 아래로 흐르는 것 없이 샘플의 무게를 유지하는 것으로 보아 젤이 형성되었음을 Figure 1에서 확인하였다. 이러한 샘플들의 점도를 확인하기 위해 steady rheology 기술을 활용하였다. 낮은 전단속도(shear rate, 1/s)에서 뉴턴 유체 거동을 보이는 구간에서 평균값을 통해 영전단(zero-shear) 점도 값을 얻어 Figure 2에 나타내었다. Figure 2(a)에서는, 100 mM 레시틴에 브로민화나트륨의 농도가 110 mM에서 130 mM로 높아짐에 따라 영전단 점도의 값은 2883.9 Pa · s 에서 1477.2 Pa · s로 점점 감소한다. 이는 브로민화나트륨의 농도가 증가함에 따라서 실린더형 역마이셀의 길이가 감소하여 마이셀들의 얽힘이 줄어들음을 의미한다. Figure 2(b)는 100 mM 레시틴/30 mM 염화나트륨에 브로민화나트륨의 농도를 80 mM에서 100 mM로 증가시켰을 때, 영전단(zero-shear) 점도 값을 보여준다. 브로민화나트륨의 농도를 증가시키에 따라서, 영전단(zero-shear) 점도 값은 점점 증가함을 보여주었고, 이는 실린더형 역마이셀의 길이가 증가함을 의미한다.

이러한 유변학적 변화에 매우 중요한 샘플의 내부 나노구조체의 변화를 좀 더 자세히 관찰하기 위해 SAXS 기술을 활용하였다. Figure 3(a)는 도데케인 상에서 100 mM 레시틴과 110, 120, 130 mM 브로민화나트륨 샘플들의 SAXS 결과값을 보여준다. 도형으로 표현된 데이터는 실험값을 의미하며, 실선으로 표현된 데이터는 fitting 값을 의미

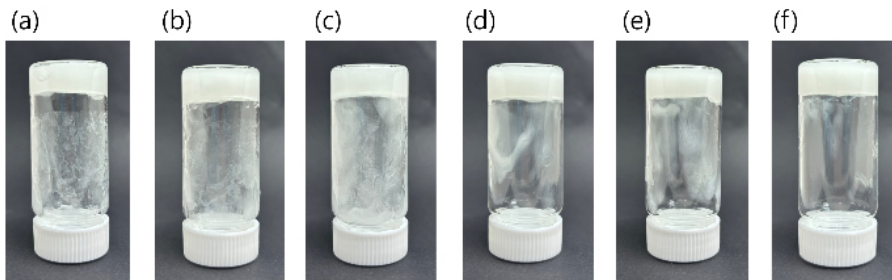


Figure 1. Images of each sample in the form of a gel using (a) NaBr 110 mM, (b) NaBr 120 mM, (c) NaBr 130 mM, (d) NaCl 30 mM + NaBr 80 mM, (e) NaCl 30 mM + NaBr 90 mM, (f) NaCl 30 mM + NaBr 100 mM.

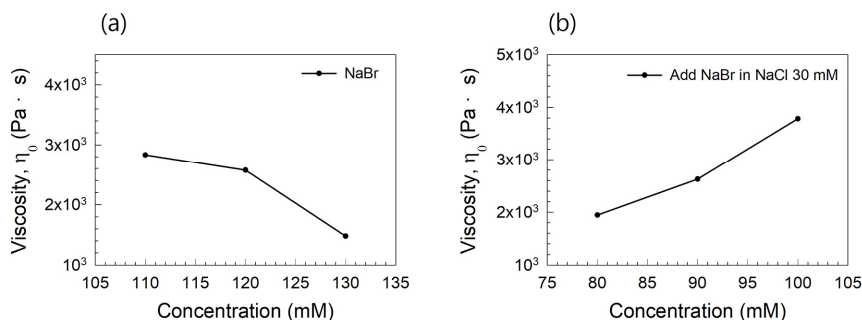


Figure 2. Data on the Zero-shear viscosity (η_0) of mixtures of lecithin and salts. In the dodecane phase, the lecithin concentration is fixed at 100 mM, about only NaBr (a) and about a mixture of NaCl and NaBr (b).

Table 1. Fitting Parameters Obtained from SAXS Modeling in Figure 3

Lecithin/NaBr/NaCl (mM)	Fit type	Radius (Å)	Length (Å)	Polydispersity of radius
100/100/0	Flexible cylinder	15.1	206	0.11
100/120/0	Flexible cylinder	15.1	195	0.1
100/125/0	Flexible cylinder	15.4	185	0.111
100/130/0	Flexible cylinder	15.4	185	0.101
100/80/30	Flexible cylinder	14.7	285	0.15
100/90/30	Flexible cylinder	16.0	420	0.12
100/100/30	Flexible cylinder	16.0	610	0.18

한다. log-log 그래프 상에서, 모든 SAXS 곡선들은 낮은 q 값들에서 산란 강도(I)의 기울기가 -1에 가깝게 되는데, 이는 전형적인 실린더형 마이셀의 SAXS 곡선 형태이다. 이를 통해 레시틴과 브로민화나트륨 혼합물들은 도데케인 상에서 실린더형 역마이셀을 만드는 것을 확인하였다. 또한 실린더 반지름 모델을 활용하여 실험 결과값 피팅을 통하여 얻어진 다양한 파라미터 값들은 Table 1에 요약되었다. 실험 데이터 값과 피팅 데이터 값들이 잘 일치하는 것으로 보아 얻어진 파라미터 값들의 신뢰도는 매우 높다. 브로민화나트륨의 농도가 100 mM에서 130 mM로 증가함에 따라 실린더형 역마이셀의 반지름 변화는 거의 없으나, 길이가 점차 감소하는 것(약 20.6 nm에서 18.5 nm)을 확인하였다. 이러한 길이의 감소 이유는 명확하지는 않지만, 아마도 과량의 브로민화나트륨이 실린더 체인의 끝부분을 안정화(end-cap)시키기 때문에, 더 많은 end-cap을 만들고, 이로 인해 실린더의 길이는 감소하는 것으로 판단된다.

Figure 3은 도데케인 상에서 레시틴 및 염 혼합물 샘플에 대한 SAXS 결과값을 보여준다. 여기서 레시틴과 염화나트륨은 각각 100

mM과 30 mM로 고정되었으며, 브로민화나트륨은 80, 90, 100 mM이 사용되었다. 즉, 염화나트륨과 브로민화나트륨의 총 몰농도는 Figure 3(a)에서의 브로민화나트륨 몰농도와 같게 설정되었다. Figure 3(b)에서의 모든 SAXS 곡선들은 Figure 3(a)에 유사하게 낮은 q 값들에서 I 가 -1의 가까운 기울기를 갖고 있음을 확인하였다. 이는 샘플 내의 실린더형 역마이셀의 형성을 의미하고, 이를 도데카 실린더 반지름 모델을 활용한 실험 결과값 피팅에 의한 파라미터 값들이 Table 1에 요약되어 있다. 브로민화나트륨의 몰농도가 80 mM에서 100 mM로 증가함에 따라, 실린더형 역마이셀의 반지름의 크기 변화는 거의 없지만, 길이는 28.5 nm에서 61 nm로 급격하게 증가함을 알 수 있다. 기존의 연구들에 의하면 염화나트륨은 레시틴과 용액에 첨가되어도 구형의 역마이셀의 형태에 영향을 주지 않는다. 즉, 브로민화나트륨과 달리 염화나트륨은 레시틴 용액에 첨가되더라도 실린더형 역마이셀로의 변화를 일으키지 않는다. 하지만, 염화나트륨이 레시틴/브로민화나트륨 용액에 첨가될 때 실린더형 역마이셀의 길이를 증가시킴을 확인할 수 있다(총 염의 농도가 130 mM인 샘플들의 실린더형 역마이셀

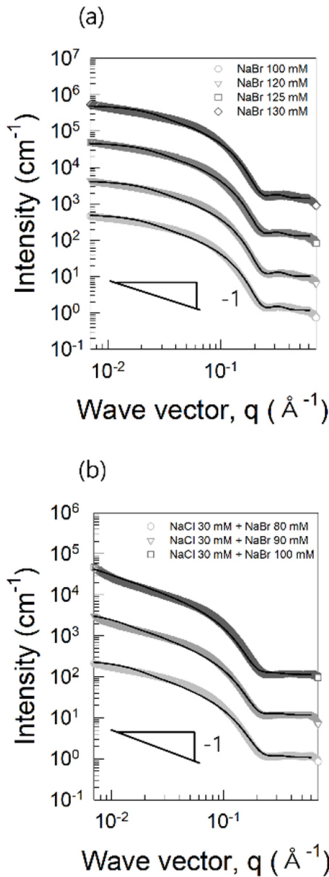


Figure 3. SAXS data for lecithin (100 mM) with varying concentrations of NaCl and NaBr in dodecane. The model fits are shown as solid lines through each data curve. (a) Data for NaBr added at various concentrations. (b) Data for NaBr added at various concentrations in the presence of NaCl 30 mM.

의 길이를 비교할 때). 더욱 중요한 것은 같은 농도의 염을 사용하였을 때, 브로민화나트륨을 단독으로 사용하였을 때와 비교하여 염화나트륨과 브로민화나트륨을 혼합하여 사용하였을 때 더 긴 길이를 지닌 실린더형 역마이셀이 형성된다. 예를 들어, 130 mM 브로민화나트륨 샘플 내부의 실린더형 역마이셀의 길이가 약 18.5 nm인데 반해, 30 mM 염화나트륨/100 mM 브로민화나트륨 샘플 내부의 실린더형 역마이셀의 길이는 61 nm에 이른다. 즉, 염의 혼합을 통해 실린더형 역마이셀의 길이를 더욱 더 효과적으로 증가시킬 수 있다. 이러한 실린더형 역마이셀 길이의 증가는 레시틴과 두 가지 염의 혼합물을 통해 유기젤의 합성을 더욱 효율적으로 할 수 있음을 의미한다.

레시틴/브로민화나트륨 혼합물에 염화나트륨의 첨가로 인한 실린더형 역마이셀 길이 증가에 대한 이유는 위의 실험들을 통해 현 단계에서는 확실하게 이야기할 수 없다. 그럼에도 불구하고 잠정적인 원인을 분석해 본다면, 위에서 언급한 바와 같이 염화나트륨은 단독으로 레시틴과 결합해서 역마이셀의 형태 변화를 일으키지 않는다. 하지만 브로민화나트륨과 함께 레시틴과 결합하게 될 때, 염화나트륨이 레시틴 친수성 머리 부분으로 들어가게 되고 이는 친수성 머리 부분의 평균 면적의 증가를 야기시켜(레시틴과 염화나트륨의 결합력이 약하기 때문에 소수성 탄화수소 사슬 부분에는 영향을 거의 미치지 않음.) 임계 패킹 파라미터($p = a_{tail}/a_{head}$, 여기서 a_{tail} 은 레시틴 소수성 탄

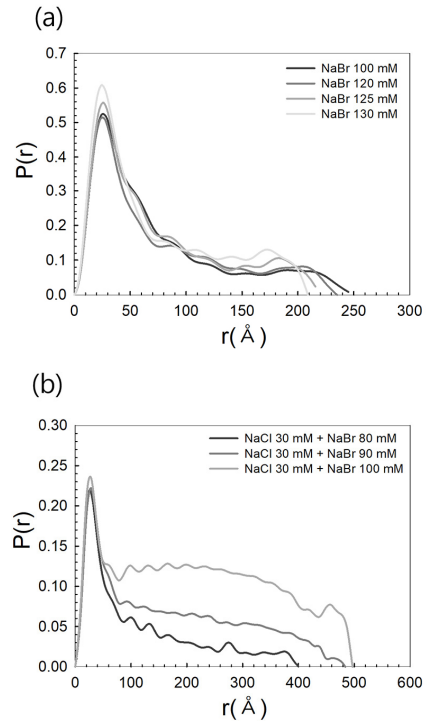


Figure 4. Indirect Fourier transformation (IFT) analysis of SAXS data for gels of lecithin (100 mM) and salts mixtures containing dodecane. In the cylinder model, the inflection point indicates the cylinder diameter. When the pair-distance distribution function ($p(r)$) approaches zero, it indicates the cylinder length. (a) Data for NaBr at various concentrations. (b) Data for NaBr at various concentrations in the presence of 30 mM NaCl.

화 수소 사슬 부분의 평균 면적이고, a_{head} 은 레시틴 친수성 머리 부분의 평균 면적임.)의 값은 줄어들게 된다. 이러한 p 값의 감소로 인해 레시틴의 분자 형태는 실린더형 역마이셀이 더 쉽게 길어질 수 있는 형태의 모양을 지닐 수 있도록 할 것으로 기대된다.

Figure 4는 SAXS 곡선의 간접 푸리에 변환(IFT) 결과값을 보여준다. 간접 푸리에 변환 방법은 SAXS 실험 결과값에 대해 내부 구조체에 대한 어떠한 가정도 없기 때문에 SAXS 결과값 분석에 많이 사용되고 있다. 모든 샘플들의 IFT의 쌍거리분포함수(pair-distance distribution function, $p(r)$)의 형태가 변곡점을 지닌 비대칭적인 모습을 보여주는데, 이는 실린더형 역마이셀의 전형적인 형태이다. 또한, $p(r)$ 이 x축과 접하게 되는 부분과 변곡점으로부터 실린더형 역마이셀의 길이와 반지름을 추측할 수 있다. Figure 4(a)에서 보는 바와 같이 브로민화나트륨의 농도가 110 mM에서 130 mM로 증가함에 따라서 변곡점의 위치는 거의 변화가 없지만(실린더형 역마이셀의 반지름의 변화는 없음.), $p(r)$ 이 x축과 접하게 되는 지점은 점점 왼쪽으로 이동(실린더형 역마이셀의 길이가 감소)하고 있다. Figure 4(b)의 경우, 브로민화나트륨의 농도가 80 mM에서 100 mM로 증가함에 따라서 변곡점의 위치는 거의 변화가 없지만, $p(r)$ 이 x축과 접하게 되는 지점은 점점 오른쪽으로 이동(실린더형 역마이셀의 길이가 증가)하고 있다. 이러한 SAXS 곡선의 간접 푸리에 변환(IFT) 분석은 SAXS fitting 결과와 상당한 유사성을 보여준다. 결과적으로, SAXS 분석을 통해 레시틴/염 혼합물의 샘플들의 점도 변화는 실린더형 역마이셀의 길이와 매우 밀접하게 연관되어 있음을 확인하였다.

4. 결 론

이번 연구에서는 무극성 용매인 도데케인 상에서 레시틴과 염 혼합물을 활용하여 점도 등의 유연학적 변화 및 자가 조립 나노구조체 형성에 대해서 조사하였다. 영전단 점도 등의 유연학적 변화 관찰을 위해서 steady 분석 방법이 활용되었으며, 용액 내의 실린더형 역마이셀의 형태 및 크기를 확인하기 위해 SAXS 기술이 이용되었다. 레시틴 용액에 브로민화나트륨이 단독으로 혼합되었을 때는 브로민화나트륨의 농도가 증가함에 따라서 실린더형 역마이셀 길이의 감소로 인해 영전단 점도가 감소하였으며, 염화나트륨과 브로민화나트륨 혼합물이 레시틴 용액에 첨가되었을 때는, 염 혼합물의 농도가 증가함에 따라서 실린더형 역마이셀의 길이 증가로 인해 영전단 점도가 증가하였다. 이를 통해 염 혼합물을 활용할 때 레시틴 용액의 점도를 증가시키는 것이 더욱 효과적임을 확인하였으며, 이러한 유기젤 합성에 있어서 사용된 물질들은 생체적합성 물질들이기 때문에 향후 적절한 유기용매 사용을 통해 바이오 분야에 활용 가능성이 높을 것으로 기대된다.

감 사

본 과제(결과물)는 경상북도와 구미시의 재원으로 지원을 받아 수행된 지역산업기반 인재양성 및 혁신기술개발사업의 연구결과입니다.

References

1. J. N. Israelachvili, *Intermolecular Surface Forces*, 3rd ed., 512-513, Academic Press, San Diego, CA, USA (1991).
2. E. Ruckenstein and R. Nagarajan, Critical micelle concentration. Transition point for micellar size distribution, *J. Phys. Chem.*, **79**, 2622-2626 (1975).
3. Y. Okahata and T. Kunitake, Self-assembling behavior of single-chain amphiphiles with the biphenyl moiety in dilute aqueous solution, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, **84**, 550-556 (1980).
4. S. Krimm, The hydrophobic effect: Formation of micelles and biological membranes, *J. Polym. Sci.*, **18**, 687 (1981).
5. M. V. Potesnova and N. M. Zadymova, Normal micelles and oil-in-water microemulsions in a water-toluene-Tween 80 ternary system, *Colloid J.*, **68**, 201-210 (2006).
6. P. Schurtenberger, R. Scartazzini, L. J. Magid, M. E. Leser, and P. L. Luisi, Structural and dynamic properties of polymer-like reverse micelles, *J. Phys. Chem.*, **94**, 3695-3701 (1990).
7. E. V. Shumilina, Y. L. Khromova, and Y. A. Shchipunov, A study of the structure of lecithin organic gels by IR spectroscopy with Fourier-transform, *Russ. J. Phys. Chem.*, **74**, 1210-1219 (2000).
8. C. W. Njauw, C. Y. Cheng, V. A. Ivanov, A. R. Khokhlov, and S. H. Tung, Molecular interactions between lecithin and bile salts/acids in oils and their effects on reverse micellization, *Langmuir*, **29**, 3879-3888 (2013).
9. K. Hashizaki, T. Chiba, H. Taguchi, and Y. Saito, Highly viscoelastic reverse worm-like micelles formed in a lecithin/urea/oil system, *Colloid Polym. Sci.*, **287**, 927-932 (2009).

10. 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).
11. C. Y. Lin and S. H. Tung, On the length of lecithin reverse worm-like micelles induced by inorganic salts: Binding site matters, *J. Mol. Liq.*, **329**, 115543 (2021).
12. 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).
13. D. M. Willard, R. E. Riter, and N. E. Levinger, Dynamic of polar solvation in lecithin/water/cyclohexane reverse micelles, *J. Am. Chem. Soc.*, **120**, 4151-4160 (1998).
14. Y. A. Shchipunov, Lecithin organogel: A micellar system with unique properties, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **183-185**, 541-554 (2001).
15. R. Scartazzini and P. L. Luisi, Organogels from lecithins, *J. Phys. Chem.*, **92**, 829-833 (1988).
16. 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).
17. F. Aliotta, M. E. Fontanella, R. E. Lechner, M. Pieruccini, B. Ruffe, and C. Vasi, Single-particle dynamics of water molecules confined in a lecithin-based gel, *Phys. Rev. E*, **60**, 7131-7136 (1999).
18. T. H. Ibrahim and R. Neuman, Nanostructure of open water-channel reversed micelles. I. ¹H NMR spectroscopy and molecular modeling, *Langmuir*, **20**, 3114-3122 (2004).
19. 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).
20. 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).
21. 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).

Authors

- Min-Seok Kang; B.Sc., Graduate Student, Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic of Korea; 20236001@kumoh.ac.kr
- Na-Hyeon Kim; B.Sc., Graduate Student, Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic of Korea; knh0882@kumoh.ac.kr
- Chang-Min Lee; B.Sc., Graduate Student, Department of Chemical Engineering, The Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic of Korea; 20246070@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