

연속적인 온도 변화에 따른 에멀전의 점탄성 특성에 대한 연구

최세빈* · 이준상*

Study for storage modulus of emulsions under continuous temperature change

Se Bin Choi*, Joon Sang Lee*

Abstract : In order to analyze the jamming and unjamming transition of oil-in-water emulsions under continuous temperature change, we simulated an emulsion system whose critical volume fraction is 0.3 which was validated with the experimental results under oscillatory shear stress, and calculated the elastic modulus using the phase lag between strain and stress. Through heating and cooling, the emulsion experienced unjamming and jamming. Especially, insufficient jamming phenomenon, which means that the elastic modulus does not reach the expected value at the same temperature, occurred when the emulsion system was cooled. We found that the frequency faster than the relaxation of the deformed droplets was the reason for the insufficient jamming. We justified the relation between the frequency and the relaxation by simulating frequency dependency of the difference between the elastic modulus when cooled and the expected value at the same temperature.

1. 서 론

폼 (foam), 에멀전 (emulsion) 콜로이드 액체와 같은 점탄성 특성을 가지는 물질들은 액체처럼 흐르는 상태에서 고체와 같이 고정되는 전이 현상 (jamming transition)을 나타내게 된다. 이러한 전이 현상의 메커니즘을 이해하는 것은 식품, 폴리머, 윤활 산업 등에서 유용하게 이용될 수 있기 때문에 현재까지 많은 연구가 이루어져 왔다.^{(1), (2)} 에멀전에서 전이 현상에 영향을 주는 3가지 요소는 다음과 같다; 1) 액적 (droplet)의 볼륨비, 2) 가해지는 전단 응력, 3) 온도가 그것이다.⁽³⁾ 보통 볼륨비가 증가하고 전단응력과 온도가 감소함에 따라 시스템은 액체 상태에서 고체 상태로 전이되는 모습을 보여주게 된다. 전이된 이후에 시스템은 고체의 특성인 탄성력 (elasticity)를 가지게 되고, 이에 따라 외부 힘에 의해서 변형된 시스템이 힘이 사라진 후에 원래 상태로 되돌아오는 성질을 가지게 된다.

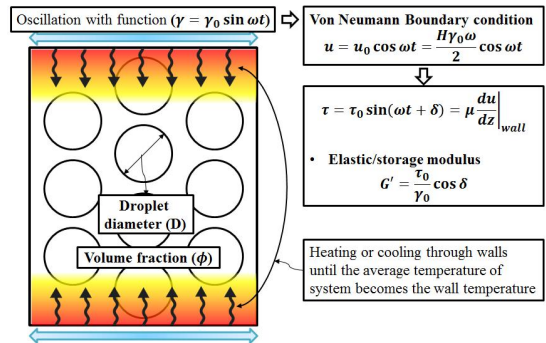


Fig. 1 Simulation domain and boundary conditions

본 논문에서는 수치해석적으로 연속적인 온도 변화에 의한 에멀전의 저장탄성력 (storage modulus)을 연구하고, 그에 따라 관찰되는 전이 현상에 대해 분석하였다. 벽 온도에 의해 시스템이 가열될 때, 저장 탄성력은 서서히 감소하기 시작해 고체에서 액체로 전이되는 모습을 보여주었고, 시스템이 냉각될 때는 빠른 진동 속도 때문에 저장 탄성력이 충분히 증가하지 못하는 모습을 보여주었다.

* 연세대학교 기계공학과

2. 본 론

2.1. 삼차원 격자 볼츠만 기법(D3Q19)

볼츠만 방정식을 BGK (Bhatnagar-Gross-Krook) 근사법으로 단순화시키고 이를 격자화 시킨 식은 다음과 같다.

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = \frac{\Delta t}{\tau} [f_i^{eq}(x, t) - f_i(x, t)] \quad (1)$$

여기서 f 는 분포함수, c 는 격자 속도이다. 평형 분포함수 f_i^{eq} 는 다음과 같이 정의 된다.

$$f^{eq} = \rho \omega_i \left[1 + \frac{3}{c^2} \cdot u + \frac{9}{2c^4} (c_i \cdot u)^2 + \frac{3}{2c^2} u \cdot u \right] \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도, ω 는 가중계수를 나타낸다.

2.2. 가열시 저장 탄성력의 변화

Fig. 2에서 시스템의 평균 온도가 5도에서 25도까지 가열될 때, 저장 탄성력은 서서히 증가하여 결국 온도가 25도로 일정한 시스템에서 측정된 값에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 초기 낮은 온도에서는 전단 응력에 의해 액적들의 변형이 작지만, 온도가 증가함에 따라 변형율이 서서히 증가하게 되기 때문이다. 즉, 액적의 변형율은 계속적으로 증가하고 원래 구 형태로 회복하지 않기 때문에 연속적인 증가의 경향만 가지게 되는 것이다.

2.2. 가열시 저장 탄성력의 변화

Fig. 3에서 시스템의 평균 온도가 25도에서 5도까지 냉각될 때, 저장 탄성력은 서서히 증가하다가 온도가 5도로 일정한 시스템에서 측정된 값에 도달하지 못하고

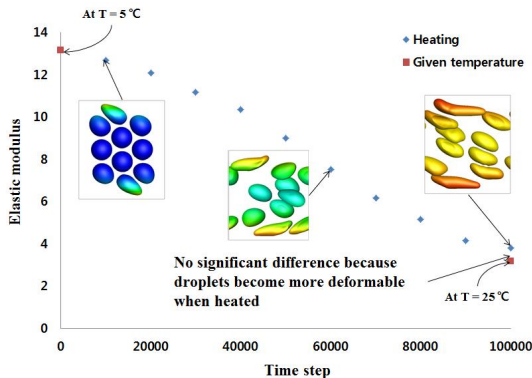


Fig. 2 Elastic modulus as the jammed emulsion is heated and temperature contour at three time steps (10000, 60000, and 100000)

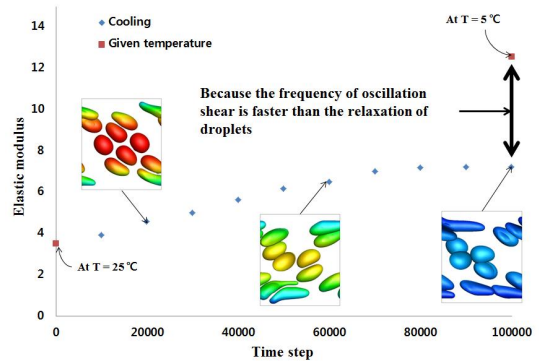


Fig. 3 Elastic modulus as the jammed emulsion is cooled and temperature contour at three time steps (10000, 60000, and 100000)

높은 온도에서 크게 변형된 액적들이 온도가 감소함에 따라 원래 형태로 돌아와야 하지만 진동 속도가 빨라서 변형이 계속 유지되기 때문에 해석할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 연속적인 온도 변화의 환경 하에서 에멀전의 저장 탄성력의 특성을 분석하였다. 가열 시, 저장 탄성력은 서서히 감소하여 고체에서 액체로의 전이 현상을 보여주었고, 냉각 시에는 빠른 진동 속도로 인해 저장 탄성력이 충분히 증가하지 못하여 액체에서 고체로의 전이 현상이 나타나지 않았다.

후 기

This work was supported by a grant from the Mid-career Researcher Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (Grant number, NRF-2013R1A2A2A01015333).

참고 문헌

- (1) Brioli, G., 2007, "Jamming: A new kind of phase transition?", Nature Physics, pp. 222~223.
- (2) Bi, D. et al., 2011, "Jamming by shear", Nature, pp. 355~358.
- (3) Cates, M. E., et al., 1998, "Jamming, force chains, and fragile matter", Phys. Rev. Lett., pp. 1841~1844.