

## 상용 마요네즈의 정상유동특성 및 소진폭 전단변형하에서의 동적 점탄성

차자호 · 장갑식 · 송기원  
부산대학교 공과대학 섬유공학과

### Steady Shear and Small Amplitude Oscillatory Shear Flow Behavior of Commercial Mayonnaises

Jah-Ho Cha, Gap-Shik Chang, and Ki-Won Song  
Dept. of Textile Eng., Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

#### 1. 서 론

마요네즈는 식물성 식용유(vegetable oil)와 난황(egg yolk)을 주원료로 하고 이에 식초, 식염, 당류 등을 부가하여 유화시킨 식품으로서 식물성 식용유의 함량은 65 % 이상으로 규정하고 있다[1]. 사용하는 기름의 종류와 품질은 마요네즈의 풍미나 물성에 큰 영향을 미치며 잘 정제된 샐러드유가 일반적으로 사용되고 있다.

마요네즈는 물질 구조상 입자 분산계(disperse system)에 해당하며 그 구조적 특성으로 인하여 항복응력(yield stress) 및 비뉴턴 점성 거동(non-Newtonian viscous behavior)을 나타내는 점소성 물질로 간주할 수 있다[2-5]. 또한 마요네즈는 시간경과에 따라 내부구조의 파괴가 진행되어 점성이 저하하는 시간의존성 유동거동(time-dependent flow behavior ; thixotropy)을 나타낸다[6,7].

본 연구의 목적은 마요네즈의 기본적 유변학적 특성을 파악함에 있다. 이를 위해 점탄성유체 및 반고형 물질 전용의 회전형 레오메트리 시스템을 사용하여 현재 국내 시판중인 세 종류의 상용 마요네즈의 정상유동특성 및 소진폭 전단 변형하에서의 동적점탄성을 광범위한 전단속도와 각주파수 영역에서 측정하였다.

본 논문에서는 이들 측정결과로부터 정상유동특성의 전단속도 의존성 및 동적 점탄성의 각주파수 의존성을 보고하였다. 그리고 항복응력의 향을 갖는 몇 가지 점소성 유동모델을 사용하여 정상유동특성을 정량적으로 평가하고 이들 모델의 적용성을 비교·검증하였다. 나아가서 수정된 형태의 지수법칙 관계식을 도입하여 정상유동특성(비선형 거동)과 동적 점탄성(선형 거동)간의 상관관계에 대해 검토하였다.

#### 2. 실험

##### 2.1. 시료 및 측정 시스템

본 연구에서 사용한 시료로는 현재 오뚜기 식품(주)에서 국내 시판중인 세 종류의 상용 마요네즈(상품명 : GOLD, FRESH, HALF)를 선정하였다. 시료 구입시 제품의 변형 및 변질 상태에 주의하였으며 5 °C의 저온에서 보관하면서 실험에 사용하였다.

시료의 정상유동특성 및 동적 점탄성 측정에는 Rheometric Scientific Inc. (USA)의 점탄성유체 및 반고형 물질 전용의 레오메트리 시스템인 Advanced Rheometric Expansion System(모델명 : ARES-200FRTN1-BATH-STD)을 사용하였다.

측정부의 기하학적 형상으로는 직경  $D = 25 \text{ mm}$ 의 평행원판을 채용하였으며 두 원판사이의 간격은  $h = 1 \text{ mm}$ 로 일정하게 유지하였다. 또한 마요네즈의 유변학적 성질 측정시에는 무시할 수 없는 상당한 정도의 벽면 미끄러짐(wall slip) 현상이 발생하므로[8-10] 실제 측정시에는 시료와 측정부 벽면과의 미끄러짐 방지를 위해 양 원판 표면에 적당한 거칠기의 사포(sandpaper)를 부착하였다.

## 2.2. 측정방법 및 실험조건

우선 정상유동특성의 전단속도 의존성을 파악하기 위해서 시간  $t$ 에 따라 전단속도를  $\dot{\gamma} = 0.025 \sim 500 \text{ 1/s}$ 의 범위에서 대수 스케일(logarithmic scale)에 따라 단계적으로 증가시키면서 이에 대한 응력 및 점도를 측정하였다.

또한 일정한 크기의 스트레인 진폭  $\gamma_0$ 을 유지하면서 시간  $t$ 에 따라 각주파수가  $\omega = \omega(t)$ 로 점차 증가하는  $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$ 의 정현적 진동 전단변형을 시료에 부가하여 그 응답을 측정함으로써 동적 점탄성의 각주파수 의존성을 조사하였다. 이때 각주파수는  $\omega = 0.025 \sim 100 \text{ rad/s}$ 의 범위에서 대수 스케일에 따라 단계적으로 증가시켰으며, 진동 전단변형의 크기는 본 연구에서 사용한 모든 시료의 선형 거동이 인정되는 작은 크기의 스트레인 진폭  $\gamma_0 = 1 \%$ 를 부여하였다.

이상의 실험에서 마요네즈는 측정 중에 구조의 파괴가 발생하므로 매 측정시마다 새로운 시료를 사용하였다. 또한 시료 충전에 의한 잔류응력이 존재하지 않도록 시료가 안정화되기 위한 충분한 시간을 부여하였다. 측정 온도는 모든 실험 조건에서  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였으며 시료가 온도 평형 상태에 도달하였음을 확인한 후 측정을 개시하였다.

## 3. 결과 및 토론

### 3.1. 정상유동특성

Fig. 1 과 Fig. 2는 각각 GOLD 및 FRESH 마요네즈의 유동곡선 및 점도곡선을 나타낸 것이다.

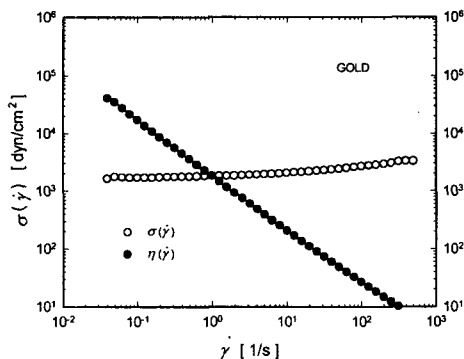


Fig. 1. Shear stress and steady shear viscosity vs. shear rate for GOLD mayonnaise.

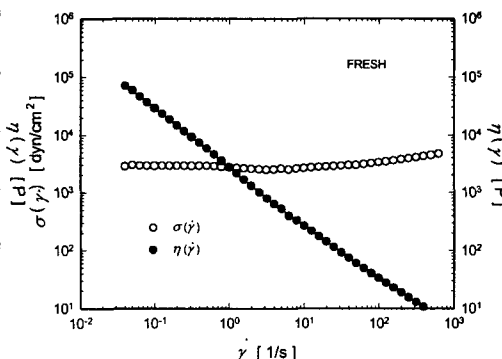


Fig. 2. Shear stress and steady shear viscosity vs. shear rate for FRESH mayonnaise.

낮은 전단속도 영역에서 전단속도가 감소할수록 전단응력이 일정치에 도달하는 결과로부터 마요네즈는 상당한 크기의 항복응력을 갖는 점소성 물질임을 알 수 있다. 이러한 특성은 FRESH 마요네즈의 경우에 보다 명확히 나타나며 전단속도가  $\dot{\gamma} = 6.0 \text{ 1/s}$  정도까지는 전단응력이  $\sigma = 2700 \text{ dyn/cm}^2$  정도로 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 또한 전단응력의 전단속도 의존성도 고분자 물질의 경우와는 달리 그다지 크게 나타나지 않는다. 점도곡선의 특성을 살펴보면 낮은 전단속도 범위에서 뉴턴 거동은 보이지 않으며 전단속도가 증가할수록 정상류 점도가 급격히 감소하는 shear-thinning 거동을 나타내고 있다.

3.2. 동적 점탄성

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 GOLD 및 FRESH 마요네즈에 대해 선형성을 인정할 수 있는 작은 크기의 스트레인 진폭  $\gamma_0 = 1 \%$ 를 부여하였을 때 각 주파수  $\omega$ 에 따른 저장 탄성률  $G'(\omega)$ 과 손실 탄성률  $G''(\omega)$ 의 변화를 나타낸 것이다. GOLD와 FRESH 마요네즈 모두 각주파수가 증가할수록 저장 탄성률 및 손실 탄성률은 점차로 증가하고 있지만 고분자 물질의 경우와는 달리 양자의 각주파수 의존성은 그다지 크게 나타나지 않는다. 또한 측정된 전 각주파수 범위에서 저장 탄성률이 손실 탄성률보다 항상 큰 값을 갖는 결과로부터 마요네즈는 광범위한 각주파수 영역에서 점성적 성질에 비해 탄성적 성질이 보다 우세함을 알 수 있다.

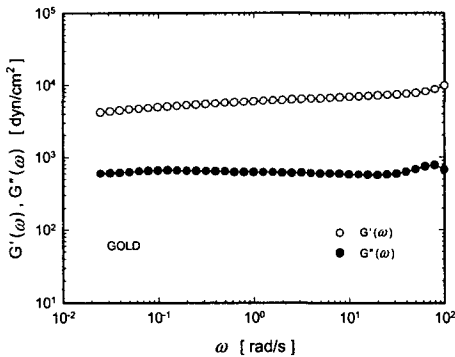


Fig. 3. Storage and loss moduli vs. angular frequency for GOLD mayonnaise.

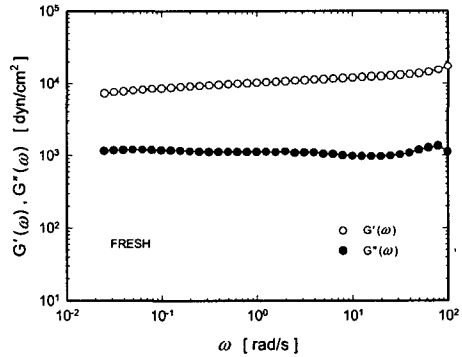


Fig. 4. Storage and loss moduli vs. angular frequency for FRESH mayonnaise.

3.3. 정상유동특성과 동적 점탄성의 상관관계

고분자 액체의 경우 비선형 거동을 나타내는 정상유동특성과 선형 거동을 나타내는 동적 점탄성간에 상관성이 존재한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이에 관한 최초의 연구로서 DeWitt는 정상류점도와 동적점도간의 상관성을 이론적으로 유도하여 다음과 같은 관계식을 제시하였다[11].

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta'(\omega) \quad \text{at } \dot{\gamma} = \omega \tag{1}$$

또한 Cox와 Merz는 고분자 용융물에 대한 실험결과를 바탕으로 정상류점도와 복소점도의 절대치간의 등가 관계를 나타내는 다음과 같은 경험식을 제시하였다[12].

$$\eta(\dot{\gamma}) = |\eta^*(\omega)| \quad \text{at } \dot{\gamma} = \omega \tag{2}$$

그러나 이들 관계식은 마요네즈와 같은 반고형 식품류의 경우에는 그 적용성이 성립하지 않는다[13,14]. 따라서 본 연구에서는 수정된 형태의 지수법칙 관계식을 도입하여 마요네즈의 정상유동특성(비선형 거동)과 동적 점탄성(선형 거동)간의 상관관계를 검토해 보기로 한다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 GOLD 및 FRESH 마요네즈에 대한 정상류점도의 전단 속도 의존성과 동적점도, 복소점도의 각주파수 의존성을 비교하여 나타낸 것으로서 복소점도의 절대치가 정상류점도 및 동적점도에 비해 높게 나타나며 그 크기는 복소점도, 정상류점도 동적점도의 순이다.

한편 정상류점도, 동적점도 및 복소점도는 모두 전단속도 또는 각주파수가 증가할수록 직선적으로 급격히 감소하는 거동을 나타내고 있다. 따라서 이들의 유동거동은 power-law 모델을 잘 만족하기 때문에 정상유동특성과 동적 점탄성간의 상관관계는 다음과 같은 수정된 형태의 지수 법칙 관계식으로 기술할 수 있다.

$$|\eta^*(\omega)| = C \cdot \eta(\dot{\gamma})^\alpha \quad \text{at } \dot{\gamma} = \omega \quad (3)$$

$$\eta'(\omega) = C' \cdot \eta(\dot{\gamma})^\alpha \quad \text{at } \dot{\gamma} = \omega \quad (4)$$

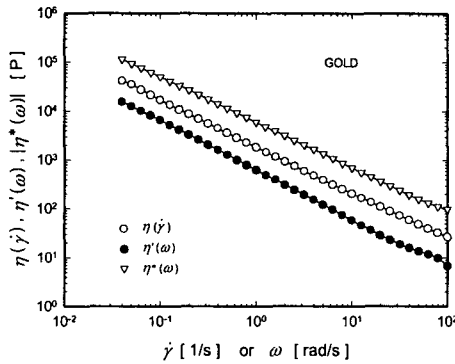


Fig. 5. Comparison of steady shear viscosity with dynamic and complex viscosities for GOLD mayonnaise.

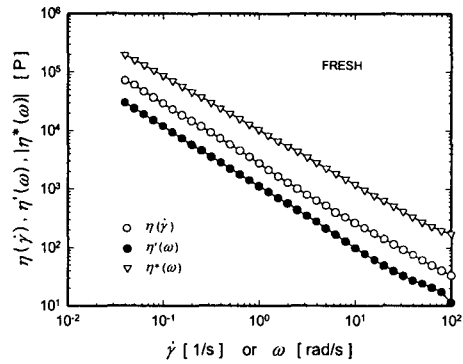


Fig. 6. Comparison of steady shear viscosity with dynamic and complex viscosities for FRESH mayonnaise.

#### 4. 참고문헌

- [1] 보건복지부, "식품공전", 한국식품공업협회, p. 485, 1995.
- [2] M. A. Rao, and H. J. Cooley, *J. Food Process Eng.*, **6**, 159 (1983).
- [3] D. De Kee, R. K. Code, and G. Turcotte, *J. Rheol.*, **27**, 581 (1983).
- [4] M. Dervisoglu and J. L. Kokini, *J. Food Sci.*, **51**, 541 (1986).
- [5] R. Y. Ofoli, R. G. Morgan, and J. F. Steffe, *J. Texture Stud.*, **18**, 213 (1987).
- [6] C. F. Shoemaker and P. F. Figoni, *Food Technol.*, **49**, 110 (1984).
- [7] M. D. C. Paredes, M. A. Rao, and M. C. Bourne, *J. Texture Stud.*, **19**, 247 (1988).
- [8] J. M. Franco, C. Gallegos, and H. A. Barnes, *J. Food Eng.*, **36**, 89 (1998).
- [9] J. Plucinski, R. K. Gupta, and S. Chakrabarti, *Rheol. Acta*, **37**, 256 (1998).
- [10] J. A. Goshawk, D. M. Binding, D. B. Kell, and R. Goodacre, *J. Rheol.*, **42**, 1537 (1998).
- [11] T. W. DeWitt, *J. Appl. Phys.*, **26**, 889 (1955).
- [12] W. P. Cox and E. H. Merz, *J. Polym. Sci.*, **28**, 619 (1958).
- [13] J. Munoz and P. Sherman, *J. Texture Stud.*, **21**, 411 (1990).
- [14] M. A. Rao and H. J. Cooley, *J. Texture Stud.*, **23**, 415 (1992).