

축소관 영역에서의 다중 비뉴턴액적 변형

김시조*, 김상대*, 권영돈**

안동대학교 기계공학부*

성균관대학교 섬유공학과**

Deformation of multiple non-Newtonian drops in the entrance region

S.J. Kim*, S.D. Kim*, Y.D. Kwon**

Department of Mechanical Engineering, Andong National University,

Andong, Kyungbuk 760-749, Korea*

Textile Engineering, Sungkyunkwan University,

Suwon, Kyonggi 440-746, Korea**

1. 서론

이상(Two-phase) 유동에서 형성되는 액적(Liquid droplet)의 거동은 유동의 혼합 및 유변학적 특성에 큰 영향을 미치게 되므로 이에 대한 공학적 연구는 매우 중요하다. 공학적으로 액적은 압출 및 사출공정과 같은 혼합유동에서 혼합의 특성과 제품의 역학적 특성에 영향을 미칠 수 있다[1]. 최근의 연구로는 비뉴턴 유체 속의 비뉴턴 액적의 변형을 FEM 으로 해석한 연구결과가 보고되어 있다[2]. 본 연구에서는 축소관관의 축소부 영역에서 액적의 변형 양상을 유한요소법(FEM)을 이용하여 모사하였다. 액적과 주위유체는 각각 뉴턴-뉴턴, 비뉴턴-뉴턴, 비뉴턴-비뉴턴 점성일 경우 3 가지에 대해서 고려했다. 점성 모델은 멱법칙(truncated power-law model)를 적용했다. 벌칙함수법을 사용해서 지배식으로부터 압력변수들을 제거함으로써 계산시간을 줄였다. 연속된 큰 변형을 보이는 액적의 형상을 모사하기 위해서 비정렬격자생성과 자동격자재생성 기법을 적용하였다.

2. 이론

2.1 연속방정식과 운동량 방정식

본 논문의 고려대상인 주위유체와 액적에 대한 연속방정식과 운동량방정식은 각각 식 (1),(2)와 같이 나타낼 수 있다[2].

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{v}_m = 0; \quad \nabla \cdot \mathbf{v}_d = 0 \quad , \quad \rho_m \left(\frac{\partial \mathbf{v}_m}{\partial t} + \mathbf{v}_m \cdot \nabla \mathbf{v}_m \right) &= -\nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}}_m + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}}_m; \\ \rho_d \left(\frac{\partial \mathbf{v}_d}{\partial t} + \mathbf{v}_d \cdot \nabla \mathbf{v}_d \right) &= -\nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}}_d + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}}_d \end{aligned} \quad (1), (2)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 2~4 는 액적의 반경 R_d 가 0.0015 일 때 액적/주위유체에 부여된 점성에 따른 액적의 형상 변화를 보여준다. 전체적인 액적의 변형경향을 보면, 액적의 전단부는 뾰족해지고 후단부는 둥글어지며, 액적의 전체길이는 증가하는 형상으로 변화된다. Fig. 2 의 (a)와 (c)에 보이는 것처럼, 액적과 주위유체의 점성이 각각 뉴턴-뉴턴, 비뉴턴($n_d=0.8$)-뉴턴 점성의 경우에는 액적형상변화는 거의 동일하게 나타난다. 액적과 주위유체의 점성이 각각 비뉴턴-비뉴턴인 경우에는 액적의 변형이 다른 두 경우에 비해서 작아지며 액적의 길이도 짧아지게 되고 액적의 전단부가 뾰족하게 변형되는 경향도 적게 나타난다. 이에 비해서 액적의 역지수 n_d 가 0.4 로 감소한 경우(d)에는 액적의 변형이 두드러지게 나타나서 긴 타원체의 형태를 나타낸다. 이러한 경향은 액적의 개수가 각각 2 개와 4 개로 증가한 Fig. 3 과 Fig. 4 에서도 동일하게 관찰할 수 있다.

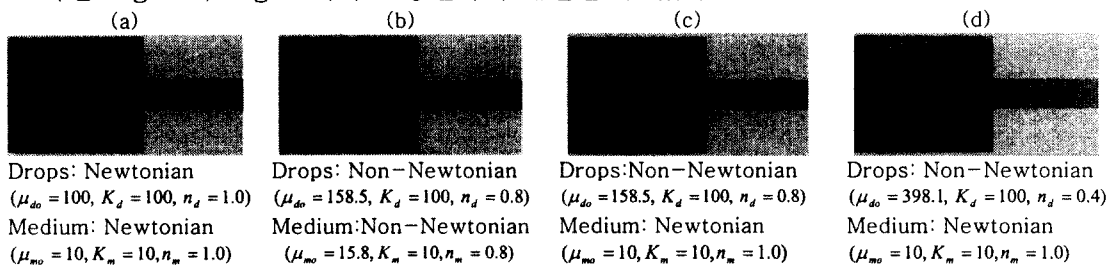


Fig. 2. Computed shapes of a drop for four different cases.

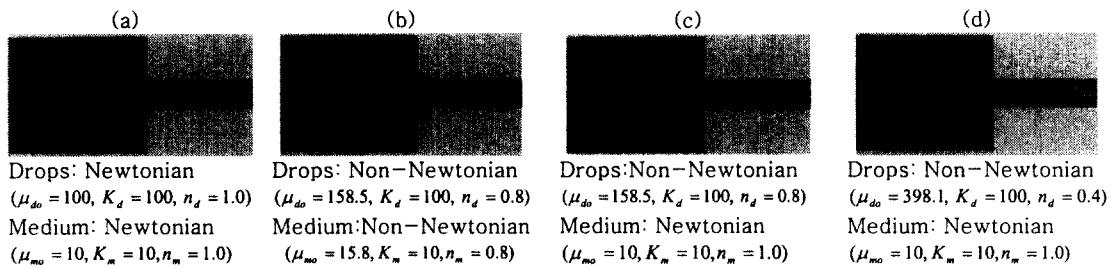


Fig. 3. Computed shapes of two drops for four different cases.

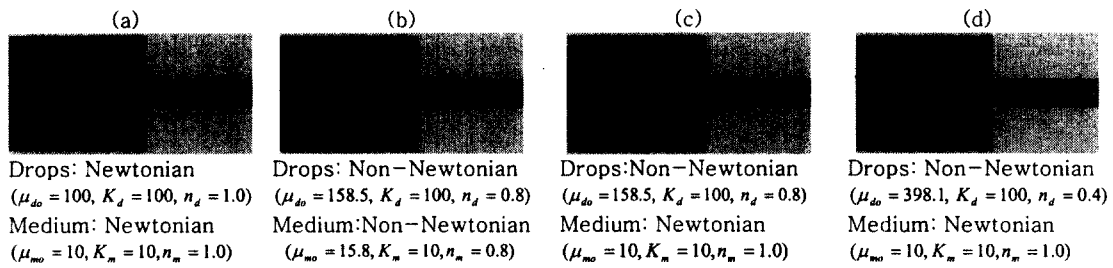


Fig. 4. Computed shapes of four drops for four different cases.

Fig. 5 와 Fig.6 은 액적의 이동속도를 비교하기 위해, 각각 Fig. 2 와 Fig. 3 의 (a)~(d) 각각의 경우에 대해서 무차원 시간과 액적전단부 위치의 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 5 를 보면 축소부 근처에서 액적전단부의 이동속도가 급격히 증가한다. 그리고, (a)와 (c)의 경우에는 액적의 이동속도 증가가 거의 동일하고, (d)

의 경우를 보면 (c)의 경우에 비해서 멱지수 n_d 가 0.8 에서 0.4 로 감소함에 따라 액적의 속도증가가 감소한다. 액적과 주위유체 모두 비뉴턴 점성인 경우(b)는 액적 전단부의 이동속도 증가가 가장 적음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 6 을 보면, (a)와 (c)의 경우에서 액적전단부 이동속도 증가가 비슷함은 Fig. 5 와 같이 나타나지만, (b)와 (d)의 속도증가는 Fig. 5 와는 반대로 액적과 주위유체 모두 비뉴턴 점성인 (b)의 경우에 더욱 빨리 액적 전단부 속도가 증가한다. 여기에서 무차원 시간은 식(10)으로부터 구할 수 있다.

$$t^* = \frac{t}{(R_2/v_0)} \tag{10}$$

여기에서 v_0 는 평균유속이며 $(Q/\pi R_2^2)$ 로 구하며, t 는 실제 시간을 나타내고, t^* 는 무차원화된 시간을 나타낸다.

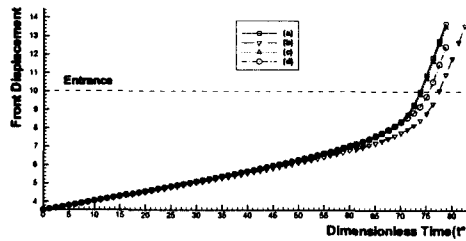


Fig. 5. Plot of dimensionless time vs front displacement of drops in case of Fig. 2.

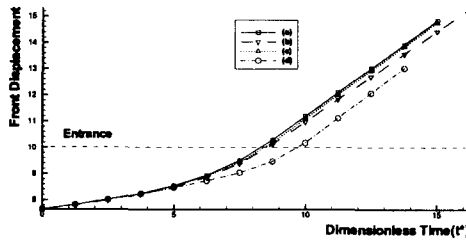


Fig. 6. Plot of dimensionless time vs front displacement of drops in case of Fig. 3.

4. 후기

본 논문은 한국과학재단 목적기초연구(과제번호:R02-2001-01215)지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

5. 참고문헌

1. S.J. Kim, "이상 폴리머 혼합물에서의 액적 변형 해석을 위한 자동격자생성 기법이 포함된 유한요소법 개발," Journal of the Korea Fiber Society, vol.37, No.4, pp.234~235 (2000).
2. S.J. Kim and C.D. Han, "Finite element analysis of axisymmetric creeping motion of a deformation non-Newtonian drop in the entrance region of a cylindrical tube," J. Rheol. 45(6), Nov./Dec., pp.1279~1280 (2001).