

Leonov 모델에 대한 4:1 축소유동에서의 비뉴턴액적 변형

김시조, 권영돈*

안동대학교 기계공학부, 성균관대학교 응용화학부*

Deformation of non-Newtonian drops
in the 4:1 contraction flow for the Leonov model

S.J. 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. 관련연구로 1972년 Hyman 과 Skalak 에 의해 뉴턴 유체가 흐르는 원형관의 중심을 따라 이동하는 다른 뉴턴 액적의 미소변형에 관한 연구가 수행되었다. FEM 을 이용한 점성학 연구로는 1997년 Bozzi 등에 의해 축대칭 수직관내의 뉴턴 유체 속을 지나가는 뉴턴 액적의 변형이 예측되었다. 최근의 연구로는 비뉴턴 유체 속의 비뉴턴 액적의 변형을 FEM 으로 해석한 연구결과가 보고되어 있다[1,2].

본 연구에서는 점탄성 유동 해석에 관한 FEM 공식화 및 프로그램을 개발하고 개발된 프로그램에서 중요 해석 인자가 액적 변형에 미치는 영향을 해석하는데 그 목적이 있으며 궁극적으로 점탄성 액적의 변형, 분리, 합침 등의 현상을 이해하여 이상 점탄성 유동에서의 최적 혼합 현상을 제어하는데 있다.

2. 이론

2.1 연속방정식과 운동량 방정식

Creeping 유동장에 대한 주위유체와 액적에 대한 연속방정식과 운동량방정식은 아래와 같이 표현될 수 있으며, 여기서 G 는 전단계수(Shear modulus)를 나타낸다.

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = 0, \quad \sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2se_{ij} + (1-s)G\left(\frac{I_1}{3}\right)^n c_{ij}$$

2.2 Leonov 구성방정식 (Leonov constitutive equation)

주위유체와 액적에 대한 Leonov 모델에 대한 구성방정식은 아래와 같이 표현될 수 있으며 여기서 θ 는 완화시간, \underline{c} 는 Elastic-Finger Strain 텐서이다[1].

$$\underline{\dot{c}} + \frac{1}{2\theta} \left(\underline{c}^2 + \frac{I_2 - I_1}{3} \underline{c} - \delta \right) = \underline{0}$$

2.3 계면장력 (Interfacial tension)

액적과 주위유체 사이의 계면에서는 계면 평형 조건을 만족하여야 한다. 이 조건식은 계면에서 액적 외부와 내부의 전응력의 차이와 곡률, 계면 장력(ξ)의 관계를 이용해서 아래와 같이 나타낼 수 있다[2].

$$nn(\underline{T}_m - \underline{T}_d) = \frac{\xi}{R_c}, \quad tn(\underline{T}_m - \underline{T}_d) = 0$$

2.4 경계조건

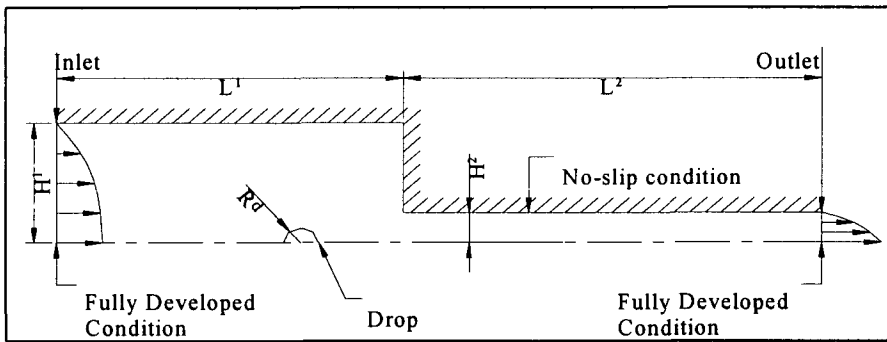


Fig. 1. Schematic diagram describing the geometry and boundary condition.

Fig.1 은 본 수치계산에서 이용된 계산영역과 계산조건을 나타낸다. 이상유동 중의 두 유체는 비압축성이고 서로 섞이지 않으며, 액적은 중립부력을 유지함으로써 유동의 중심을 따라서 움직인다. 입/출구 경계조건으로는 Fig.1의 왼쪽에서 오른쪽으로 진행하는 완전히 발달된 속도분포를 뉴턴-랩슨 방법으로 구하여 적용하였다. 유체와 관의 내부면 사이에는 비 미끄럼 조건(No-slip)을 적용하였다. 계산에 사용된 수치는 모두 SI 단위계이며 입구 축 높이 H_1 은 4이고 출구 축 높이 H_2 는 1이다. 그러므로 축소비 $H_1:H_2$ 는 4:1이다.

3. 유한요소 공식화 및 계면추적

본 연구에서는 Leonov 모델에 대한 4:1 축소유동에서의 비뉴턴액적 변형 양상을 유한요소법(FEM)을 이용하여 모사하였다. 서로 다른 물성을 가진 두 종류의 점탄성 액적 변형에 대한 문제는 수치해석적인 방법으로 예측된 결과가 많지 않다. 따라서 본 논문에서는 점탄성 주위유체의 유동장내에서 액적의 전진에 따른 점탄성 액적의 변형을 수치 해석하였다. 해석기법으로는 EVSS 법의 문제점인 Upper-Convective Derivative 항이 나타나지 않는 DEVSS-G 방법을 사용하였고 벌칙함수법을 사용해서 지배방정식으로부터 압력변수들을 제거함으로써 계면 조건식을 자동으로 만족시키도록 하였다. 연속된 큰 변형을 보이는 액적의 형상을 모사하기 위해서 비정렬격자생성과 자동격자재생성 기법을 적용하였고 계면의 시간에 따른 변형을 추적하기 위해 계면에서 Lagrangian Description 을 사용하여 새로운 계면을 계산하고 계면에서의 입자를 재배치 시켜 효과적인 액적 변형을 얻었다.

4. 결과 및 고찰

수치해석으로 액적의 위치, 크기, n , θ , 계면장력 ξ , 유량 Q 등의 변화에 대한 액적의 변형 정도를 알아보았다. 본 논문에서는 대표적인 수치 결과에 대하여 논의하고자 한다. 수치 데이터로, 액적과 주위 유체 모두 동일한 조건, 즉 $\theta = 1.0$, $G=1.0$, $n=0.1$, $s=0.1$, $\xi=0.007$, $Q=0.27$, 액적 반경 $R_d = 0.5$ 인 경우에 대한 액적의 변형 정도를 Fig.2 에 보였다. 원형인 초기 액적이 이동하면서 액적의 전체적인 형상은 원형에서 타원형으로 변화한다. 액적이 출구로 빠져나오면서 약간의 recoil 이 수반되며, 액적의 후단측부가 찌그러져서 점차 뾰족한 형상으로 변화하며 액적의 전단부는 둥근형상으로 변화한 후, 전단부만 다시 볼록한 형상으로 변화하는데, 이는 Break-up 이 일어나려는 시점으로 보인다.

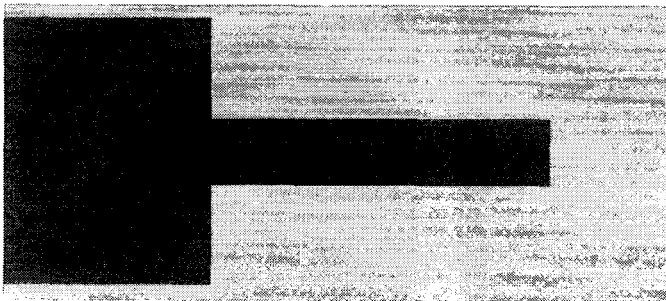


Fig. 2. Deformation of a drop for a special case.

이러한 변형 정도를 더욱 명확하게 나타내기 위해 Fig. 3.에 변형되는 모든 액적을 후단부로 맞추어 Fig. 3.에 나타내었다. Fig. 3.에 보여주듯이 n 값을 0.1,

0.3 변화시켰을 때 액적의 형상은 같은 위치에서 거의 동일한 형상을 나타내었으며 다른 n 값(0.6 과 0.8)에 대하여도 같은 현상이 발견되었다. 그외 액적의 위치, 크기, n , θ , 계면장력 ξ , 유량 Q 등의 변화에 대한 액적의 변형 정도를 수치해석으로 알아보았으며 논문 발표 시 자세히 언급할 예정이다.

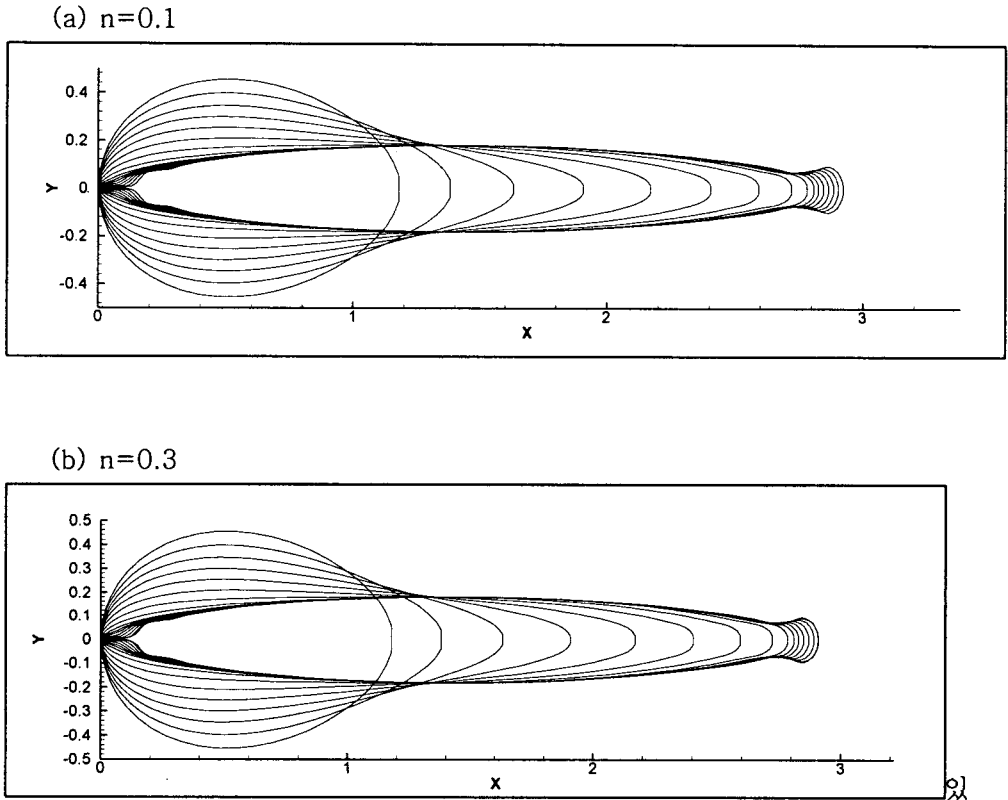


Fig. 3. Computed shapes of viscoelastic drops for two different cases.

후 기

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

5. 참고문헌

1. M. Gupta, C. A. Hieber, and K. K. Wang, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 24 493 (1997).
2. S.J. Kim and C.D. Han, *J. Rheol.* 45(6), 1279 (2001).