대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 E pp. 738~741 KSME 01S641

모세관내 과도유동현상을 이용한 비뉴턴유체의 점도측정

조민태* · 서상호** · 유상신***

Viscosity Measurement of Non-Newtonian Fluids Using the Transient Flow Phenomena in the Capillary Tube

Min-Tae Cho*, Sang-Ho Suh** and Sang-Sin Yoo***

Key Words : Viscosity(점도), Capillary Tube(모세관), Transient Flow(과도유동), Non-Newtonian Fluid(비뉴턴유체), Experiment Study(실험적 연구)

Abstract

The purpose of the present study is to measure the viscosity of liquid in the capillary tube viscometer using the unsteady flow concept. The capillary tube viscometer is consisted of a small cylindrical reservoir, capillary tubes, and the mass flow rate measuring system interfaced with computer. Two capillary tubes with 1.152 and 3.002 mm I.D. are used to determine the diameter effects on the viscosity measurements. The instantaneous shear rate and gravitational driving force in the capillary tube are determined by measuring the mass flow rate through the capillary tube instantaneously. The measured viscosities of water and aqueous Separan solution are in good agreement with the reported experimental data.

1. 서 론

액체의 점도를 측정하는 장치에는 모세관점도계, 원통형회전점도계, 원추/원판회전점도계, 낙구식점도계 등이 있는데 이들 점도계는 정상유동상태하에서 액체의 점도를 측정하는 장치이고, Saybolt 점도계는 일정량의 액체를 수집하는데 걸리는 시간을 측정하여 점도의 척도로 이용하는 장치이다. 각각의 점도계는 측정하려는 액체의 점도, 전단률의 범위, 측정온도의 범위 등에 따라 편리한 사용한계를 가진다[1]. Saybolt 점도계를 제외한 대부분의 점도계는 정상유동상태 하에서 실험을 수행하야 하기 때문에 주어진 전단률 또는 유동속도 하에서 자료를 얻는데 많은 시간이 소요되고 장치작동특성으로 인하여 전단률의 범위를 넓이는데 한계가 있다.

뉴턴유체의 점도는 주어진 온도하에서 전단률에 무관하게 일정한 값을 나타내는데 반하여 비뉴턴유체의 점도는 전단률에 따라 점도가 변하기 때문에 비뉴턴유체의 연구를 위해서는 넓은 범위에 걸친 점도측정이 대단히 중요시 되고 있다. 특히, 전단률이 매우 낮은 영역의 점도, 또는 영전단률점도와 점도가 전단률의 멱으로 표시되는 영역의 점도, 그리고 전단률이 매우 큰 영역의 점도 또는 무한전단률점도를 측정해야 비뉴턴유체의 유변학적 특성을 알 수 있다.

실험이 간편하면서도 넓은 범위의 전단률에 대한 실험이 가능한 장치로써 과도현상을 이용한 점도측정방법이 최근 보고되고 있다. Cho 등[2]이 발표한 스캐닝(scanning) 모세관점도계와 박홍준 등[3]과 서상호 등[4]이 발표한 모세관점도계는 전통적인 모세관점도계를 사용할 때 직면하는 실험적 어려움을 극복하고 넓은 범위의 전단률에 걸친 액체의 점성을 비정상유동상태에서 측정하는 장치이다.

본 연구에서는 용량이 적고 직경이 일정한 원통형 저장조에 연결된 수직 모세관을 통하여 흐르는 유량을 직접 수집하여 질량유량을 결정하고 유출된 유량에 해당하는 저장조의 압력수두를 보

* 숭실대학교 대학원 기계공학과
** 숭실대학교 기계공학과
*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

정함으로서 액체의 점성계수를 측정하는 장치에 대하여 연구하였다. 특히, 모세관의 직경변화와 비뉴턴유체의 점도변화의 관계를 알아보고자 하였다. 본 연구에서 사용된 모세관점도계는 모세관 출구로 나가는 질량유량을 정밀하게 시간의 함수로 측정하면 저장조에 작용하는 액주의 압력수두는 컴퓨터에 의해 정확하게 계산될 수 있으며 이 결과를 이용하면 비정상유동상태하에서 액체의 점도를 결정할 수 있다.

2. 모세관내 비정상유동과 점도

비압축성유체의 모세관내 완전히 발달된 비정상유동에서 운동량방정식은 다음과 같이 정리될 수 있다[3].

$$\rho\frac{\partial v_z}{\partial t}=\frac{\mu}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)-\frac{\partial p}{\partial z}+\rho g_z \qquad (1)$$

이 식을 적분하면 유량은 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$Q=-\frac{\pi R^4}{8\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial z}+\rho\frac{\partial v_z}{\partial t}-\rho g_z\right) \qquad (2)$$

비정상유동을 나타내는 항은 순간평균속도를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho\frac{\partial v_z}{\partial t}=K_u\frac{\gamma}{L}\frac{v_m^2}{2g} \qquad (3)$$

p는 z방향으로 직선적으로 감소하므로 모세관 길이 L에 대하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial z}-\rho g_z\right)=\frac{\gamma(H_l+L)}{L} \qquad (4)$$

모세관의 입구와 출구의 손실을 고려하면

$$H_l=K_l\frac{v_m^2}{2g} \qquad (5)$$

따라서 점도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu=\frac{\pi\gamma R^4}{8QL}\left[H_l+L-(K_u+K_l)\left(\frac{v_m^2}{2g}\right)\right] \qquad (6)$$

액체의 점도는 온도변화의 영향을 받는다. 실험장치의 신뢰도 확인을 위해서 표준액체로서는 물과 글리세린이 많이 이용된다. White[5]는 물의 점도와 온도에 관한 다음 식을 보고하였다.

$$\ln\frac{\mu}{\mu_0}=a+b\left(\frac{T_0}{T}\right)+c\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \qquad (7)$$

여기서 T는 절대온도이고, $T_0=273\ K$, $\mu_0=0.001792\ Pa\cdot s$이며 $a=-2.1$, $b=-4.45$, $c=6.55$이다.

비뉴턴유체의 점도는 주로 전단률에 따라 변하는 특성을 보이므로 많은 구성방정식이 제시되어 있지만 혈액이나 Separan 수용액 등에는 다음과 같은 Carreau model[6]이 많이 사용된다.

$$\mu=\mu_\infty+(\mu_0-\mu_\infty)[1+(\lambda\dot{\gamma})]^{\left(\frac{q-1}{2}\right)} \qquad (8)$$

여기서 $\dot{\gamma}$는 전단률이며, 참고문헌 (7)에 발표된 Separan 500wppm 수용액의 경우에 μ_0=0.018 Pa·s, μ_∞=0.0016 Pa·s, λ=2.5 s, q=0.62이다.

3. 실 험

실험장치는 항온실, 저장조, 모세관, 로드셀과 A/D 변환기 및 컴퓨터로 구성되어 있으며 그 배치도는 Fig. 1과 같다. 저장조는 투명한 아크릴관이며, 외경과 내경이 각각 21 mm와 19 mm이고 길이는 600 mm이다. 적은 양의 시료를 이용하여 비정상유동 상태하에서 액체의 점성을 측정하려는 장치의 특성을 고려하여 저장조의 내경은 작게 제작하였다. 장치에 사용된 모세관의 재질은 스테인리스강이며, 사용된 모세관의 내경은 1.154와 3.002 mm이며 길이는 400 mm이다. 저장조와 모세관은 지면에 대하여 수직이 되도록 설치하였다.

점도는 온도의 함수이므로 정확한 실험온도를 설정하기 위하여 모세관과 로드셀 장치는 항온실 내에 설치하였다. 실험에 사용된 유체는 물과 비뉴턴유체의 거동을 보이며 혈액대용유체로서 많이 사용되는 Separan 500 wppm 수용액이다.

모세관 아래에 시료 받이통을 설치하여 모세관을 통과한 액체를 수집하고 시료 받이통의 아래에 있는 로드셀에 의하여 수집된 액체의 질량이 측정되도록 하였다. 시간이 흐름에 따라 시료받이통에 누적되는 시료질량을 로드셀의 출력전압

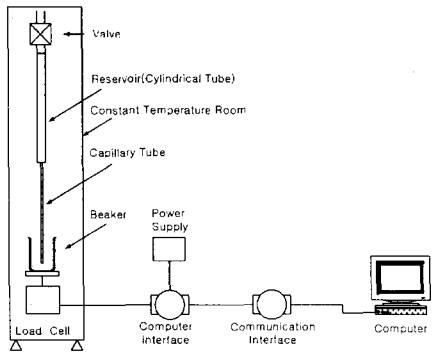

Fig. 1 Schematic of the capillary tube viscometer under unsteady flow

으로 환산하여 실시간으로 컴퓨터에 입력시켜서 시간과 출력전압을 기록하였다. 시간변화에 대한 질량변화를 EXCEL프로그램으로 옮기어 유량을 결정한 후 이 유량과 유속 그리고 저장조의 수두변화에 의한 압력차를 식 (6)에 대입하여 액체의 점도를 계산하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 물의 점도측정

Fig. 2는 물의 점도를 20 ℃에서 모세관점도계로 측정하여 전단률의 함수로 나타낸 것이다. 여기서 d_1과 d_2는 각각 관의 직경이 1.154와 3.002 mm인 경우이다. 직경이 d_1인 모세관을 사용한 경우에는 물의 점성계수가 전단률에 따라 평균 0.000994 Pa·s로서 White[4]에 의하여 제시된 물의 점도식으로 부터 계산 된 값과 약 2.9 %의 오차를 보이고 있다. 직경이 d_2인 경우에는 0.000996 Pa·s로서 약 2.7 %의 오차를 나타낸다. 이때 사용된 관의 손실계수는 각각 1.1과 3.8이다.

모세관점도계로 측정된 물의 점성계수를 확인하기 위하여 Fig. 3에 Brookfield Cone/plate 점도계를 사용하여 측정한 점도를 나타내었다. Cone/plate 점도계의 cone은 CP-40과 CP-42를 사용하였다. Brookfield 점도계에서 전단률이 낮은 경우에는 오차가 커서 측정치의 신뢰도가 낮으므로 비교 대상에서 제외하였다. Cone/plate 점도계를 사용하여 구한 물의 점성계수는 전단률의 변화에 따라 거의 일정한 값을 나타내고 있으며, 평균값은 0.0112 Pa·s로서 White가 제시한 물의 점도와 비교할 때 약 9.4%의 오차를 보이고 있다.

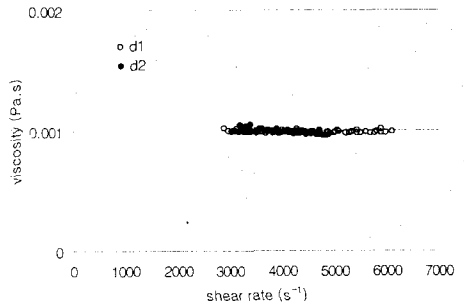

Fig. 2 Water viscosity versus shear rate obtained by the capillary tube viscometer

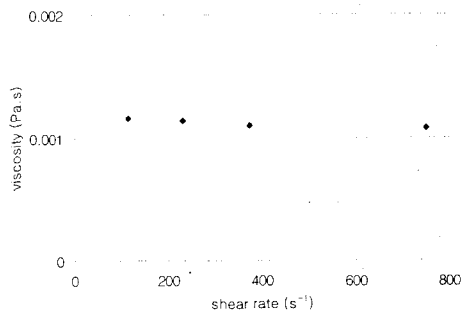

Fig. 3 Water viscosity versus shear rate obtained by the cone/plate viscometer

4.2 Separan 500wppm의 점도측정

Fig. 4는 20 ℃에서 모세관점도계를 사용하여 측정한 Separan 500wppm 수용액의 점성계수이다. Fig. 4에서 d_1과 d_2는 모세관의 직경이 각각 1.154와 3.002 mm인 경우이다. Carreau model은 비뉴턴유체의 점도를 전단률의 함수로 나타낸 자료로서 문헌[7]에 나와 있는 Separan 500wppm 수용액의 점도를 곡선접합(curve-fits)하여 얻은 것이다. 비뉴턴유체 실험시 관의 손실계수는 물의 점도측정시 얻은 값인 1.1과 3.8을 각각 적용하였다. Fig. 4에서 Separan 수용액의 점도는 관의 직경이 작은 d_1에서 실험범위의 전단률에 대하여 Carreau model 보다 높게 나타나고 있다. 그러나, 점도가 변화하는 양상은 Carreau model과 유사하게 나타나고 있다. 관의 직경이 d_2의 경우에서는 Carreau model과 유사한 값을 보인다. 그러나 점도가 전단률의 변화에 따라 Carreau model과 많은 차이를 보일 수 있음을 알 수 있다.

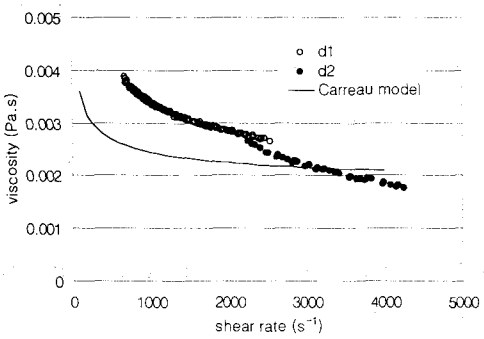

Fig. 4 Separan 500wppm viscosity versus shear rate obtained by the capillary tube viscometer

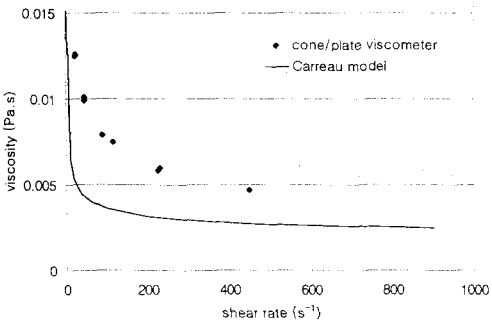

Fig. 5 Separan 500wppm viscosity versus shear rate obtained by the cone/plate viscometer

Fig. 5는 Separan 500wppm 수용액의 점성계수를 Brookfield Cone/plate 점도계를 사용하여 20 ℃에서 측정한 결과를 Carreau model과 비교하여 보여주고 있다. Cone/plate 점도계를 사용하여 측정한 Separan수용액의 점도 역시 물의 경우와 같이 넓은 전단률 범위에 대하여 측정이 될 수 있으나 허용오차범위를 넘는 자료는 제외하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 cone/plate 점도계로 구한 값은 Carreau model보다 높게 나타난다. 그러나, 점성계수가 변화하는 경향은 유사하다. Cone/plate 점도계를 사용할 때 얻을 수 있는 전단률의 범위가 모세관 점도계와는 다르므로 직접적인 비교는 하기 어려우나 유사한 경향을 보이고 있다. 수용성고분자폴리머 용액은 폴리머의 퇴화정도(aging), 용매의 특성, 혼합방법 등에 따라 유변학적 성질이 크게 변하는 것으로 보고되어 있다. 따라서 타 연구결과와의 정량적인 비교는 곤란하다.

5. 결론

과도유동현상을 이용하여 점도를 측정하는 모세관점도계는 Brookfield cone/plate 회전점도계보다 물의 점도를 정확하게 측정하는데 편리하게 사용될 수 있다. 모세관내 과도유동현상을 이용하면 1회의 실험으로 넓은 범위의 전단률에 걸친 점도를 얻을 수 있으므로 비뉴턴유체의 점도측정에 유용하다. Separan 500wppm 수용액의 점도는 Carreau model과 유사한 경향을 나타내고 있으며, 모세관의 직경이 클 때 Carreau model에 더 근사한 값을 나타낸다. 물을 사용한 실험에서 얻은 손실계수를 Separan 수용액에 적용하였으나 Separan 수용액의 유변학적 특성이 물과 다르므로 손실계수에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30400-009-2)와 한국항공대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

참고문헌

(1) Holman, J. P., 1994, Experimental Methods for Engineers 6th Ed., McGraw-Hill.

(2) Cho, Y. I., Kim, W. T., and Kensey, K. R., 1999, "A New Scanning Capillary Tube Viscometer", Review of Scientific Instrument, Vol. 70, pp. 2421~2423.

(3) 박홍준, 유상신, 서상호, 2000, "비정상유동장에서 모세관점도계의 점도측정", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 825~828.

(4) 서상호, 유상신, 조민태, 2000, "모세관내 비정상유동 개념을 이용한 비뉴턴유체 및 혈액의 점도특성", 제 1 회 한국 유체공학학술대회, pp. 487~490.

(5) White, F. M., 1991, Viscous Fluid Flow, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York.

(6) Carreau, P. J., 1968, Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin, Madison.

(7) Pak, B., Cho, Y. I. and Choi, S. U. S., 1990, "Separation and Reattachment of Non- Newtonian Fluid Flows in a Sudden Expansion Pipe", J. of Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 37, pp. 175~199.