

# 비정상유동장에서 모세관점도계의 점도측정

박흥준\* · 유상신\*\* · 서상호\*\*\*

## Viscosity Measurement in the Capillary Tube Viscometer under Unsteady Flow

Heung Jun Park, Sang Sin Yoo, Sang Ho Suh

**Key Words:** Capillary Tube Viscometer(모세관점도계), Unsteady Flow(비정상유동), Non-Newtonian Fluid(비뉴턴유체), Experimental Study(실험적연구)

### Abstract

The objective of the present study is to develop a new device that the viscous characteristics of fluids are determined by applying the unsteady flow concept to the traditional capillary tube viscometer. The capillary tube viscometer consists of a small cylindrical reservoir, capillary tube, a load cell system that measures the mass flow rate, interfacers, and computer. Due to the small size of the reservoir the height of liquid in the reservoir decreases as soon as the liquid in the reservoir drains out through the capillary and the mass flow rate in the capillary decreases as the hydrostatic pressure in the reservoir decreases resulting in a decrease of the shear rate in the capillary tube. The instantaneous shear rate and driving force in the capillary tube are determined by measuring the mass flow rate through the capillary, and the fluid viscosity is determined from the measured flow rate and the driving force.

### 1. 서론

액체의 점성을 측정하는 장치로서 모세관 점도계, Saybolt 점도계, 원통형 회전점도계, 원추/원판 회전점도계, 낙구식 점도계 등이 많이 사용된다. 이들 점도계는 측정하고자 하는 점도의 크기, 전단률의 범위, 온도의 범위 등에 의하여 제한을 받고 있다<sup>(1)</sup>.

비뉴턴유체의 유변학적 성질중 점도와 관련된 특성을 결정하기 위해서는 전단률이 매우 낮은 영역의 점도, 일명 영전단률 점도와 중간전단률 영역의 멱법칙 점도, 그리고 전단률이 매우 큰 영역의 점도, 일명 무한전단률 점도가 필요하다. 현재 실험적으로 사용되고 있는 점도계를 이용하여 산업적으로 많이 사용되는 물, 글리세린, 폴리

머 용액 등의 점도를 측정할 때 영전단률 점성측정에는 낙구식 점도계가 적합하며, 중간영역의 점도측정에는 회전식 점도계가 적합하고, 전단률이 매우 큰 영역인 무한전단률 점도측정에는 모세관 점도계가 적합하다.

모세관 점도계의 원리를 이용하여 유동이 빠른 상태에서부터 유동이 거의 정지상태에 이르는 비정상상태의 유동하에서 액체의 점도를 측정할 수 있는 방법이 제안되고 있다<sup>(2)</sup>. 스캐닝(scanning) 모세관점도계는 전통적인 모세관점도계를 사용할 때 직면하는 실험적 어려움을 극복하고 넓은 범위의 전단률에 걸친 액체의 점성을 비정상유동상태에서 측정하는 장치이다.

본 연구에서는 작은 크기의 저장조에 연결된 수직 모세관을 통하여 흐르는 유량을 직접 수집하여 질량유량을 결정하고 유출된 유량에 해당하는 저장조의 압력수두를 보정하여 주므로써 전단응력을 결정하는 새로운 개념의 액체점도측정장치에 대하여 연구하였다. 모세관 출구로 나가는

\* 한국항공대 기계설계학과 대학원

\*\* 한국항공대 항공우주 및 기계공학부 교수

\*\*\* 숭실대 기계공학과 교수

질량유량만 정밀하게 측정하면 저장조에 작용하는 액주의 압력수두는 컴퓨터에 의해 정확하게 계산될 수 있으며 이 결과를 이용하면 비정상유동상태하에서 액체의 점도를 결정할 수 있다.

$$H_l = K_l \frac{v_m^2}{2g} \quad (7)$$

따라서 점도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{\pi r K^4}{8QL} \left[ H_l + L - (K_u + K_d) \left( \frac{v_m^2}{2g} \right) \right] \quad (8)$$

## 2. 모세관내 비정상유동

모세관내 미소검사체적에 대한 비압축성유체의 연속방정식과 유동방향의 운동량방정식은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(v_z) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (2)$$

모세관내 완전히 발달된 비정상상태에서 식 (2)는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} \right) = \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (3)$$

이 식을 정리한 후 적분하면 유량은

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

수정베르누이 방정식을 이용하면 비정상유동을 나타내는 항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = K_u \frac{\gamma}{L} \frac{v_m^2}{2g} \quad (5)$$

$p$ 는  $z$ 방향으로 직선적으로 감소하므로 모세관 길이  $L$ 에 대하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$- \left( \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g_z \right) = \frac{\gamma(H_l + L)}{L} \quad (6)$$

모세관의 입구단과 출구단 손실등 운동량 손실을 고려하면

## 3. 실험

실험장치의 주요 부분은 저장조(reservoir), 모세관(capillary tube), 로드셀(load cell)과 컴퓨터로 구성되어 있으며 그 배치도는 Fig. 1과 같다. 저장조의 재질은 아크릴이고, 외경과 내경은 각각 21 mm와 19 mm이고 길이는 600 mm인 원형관이다. 적은 양의 시료를 이용하고 비정상유동 상태하에서 액체의 점성을 측정하려는 장치의 특성을 고려하여 저장조의 내경은 작게 제작하였다. 장치에 사용된 모세관은 시중에서 주사 바늘로 사용되는 모세관으로써 재질은 스테인리스강이다. 측정된 각 모세관의 내경은 3.222, 1.737, 1.222, 0.765 mm이다. 저장조와 모세관의 설치는 지면과 수직이 되도록 수준기를 이용하여 정확히 설치하였다. 실험장치의 자세한 내용은 참고문헌<sup>(3)</sup>에 수록되어 있다.

모세관 아래에 설치된 시료 받이통에 액체는 수집되고 시료 받이통의 아래에 설치된 로드셀에 의하여 수집된 액체의 질량은 측정된다. 시간이 흐름에 따라 누적되는 질량에 의한 로드셀의 출력전압은 실시간으로 컴퓨터에 입력되게 하고 컴퓨터에 내장된 시계의 시간을 이용하여 출력전압 값과 함께 기록되도록 하였다. 시간변화에 대한

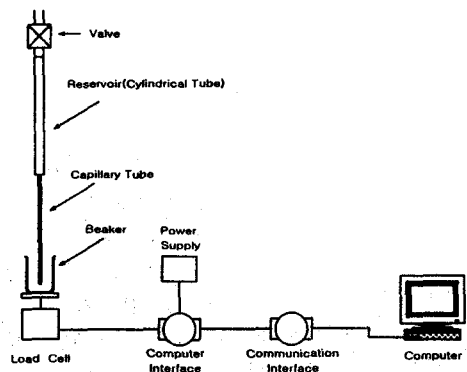


Fig. 1 Schematic of the experimental setup for viscosity measurement

질량변화를 EXCEL프로그램으로 옮겨 유량을 결정한 후 이 유량과 유속 그리고 저장조의 수두 변화에 의한 압력차를 식 (8)에 대입하여 액체의 점도를 계산하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 물

실험장치의 신뢰도를 확인하기 위하여 특성이 이미 잘 알려져 있는 물을 실험액체로 하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 모세관은 직경이 1.222 mm인 관을 사용하였으며 저장조내 액체의 초기수두는 572 mm로 하였다.

Fig. 2는 실험적으로 측정된 시간에 대한 질량 변화를 나타내는 그림이다. 물의 점도는 앞에서 계산한  $H_p$ , 유량 ( $Q$ )과 평균유속 ( $v_m$ )을 식 (8)에 대입하여 계산하였다. 손실계수는 액체의 속도, 유로의 형태, 액체의 종류에 따라 다르게 나타나는데 물의 경우 손실계수 ( $K_u + K$ )는 2.5로 하였다. Fig. 3은 시간에 따른 물의 점도변화를 판단틀에 대하여 나타낸 것이다.

물의 점도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다<sup>(4)</sup>.

$$\ln \frac{\mu}{\mu_0} = a + b \left( \frac{T_0}{T} \right) + c \left( \frac{T_0}{T} \right)^2 \quad (9)$$

여기서  $T$ 는 절대온도를 나타내고,  $T_0 = 273 K$ ,  $\mu_0 = 0.001792 Pa \cdot s$ 이며  $a = -2.1$ ,  $b = -4.45$ ,  $c = 6.55$ 이다. 이 식의 정확도는  $\pm 1\%$ 인 것으로 보고되어 있다. 식 (9)로 계산된 20.4 °C에서의 물의 점도는  $0.001014 Pa \cdot s$ 이다. Fig. 3에서 실험으로 구한 물의 점도의 평균값인  $0.001026 Pa \cdot s$ 는 약 1%의 오차를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

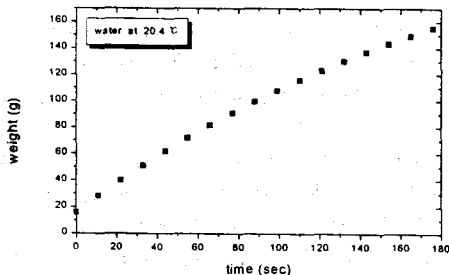


Fig. 2 Collected mass of water versus time

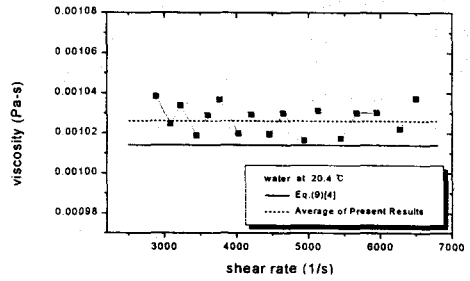


Fig. 3 Water viscosity versus shear rate

##### 4.2. 글리세린 수용액

뉴턴유체에 대한 실험장치의 신뢰성을 재확인하기 위하여 물과 같이 뉴턴유체로 거동을 하는 글리세린 수용액을 사용하여 실험하였다, 저장조의 높이는 600mm이고 실험에 사용한 모세관의 직경은 농도 15 wt%에서 45 wt%까지는 1.737 mm의 관을 사용하였으며 60 wt%이상에서는 3.222 mm의 관을 사용하였다. Fig. 4는 농도에 따른 글리세린수용액의 점도변화를 측정하여 Guichardon<sup>(5)</sup>의 결과와 비교한 것이다. 전반적으로 본 실험적 연구의 실험결과가 아래쪽에 위치하는 것으로 보아 순수한 의료용 글리세린이 아닌 공업용 글리세린을 사용한 것이 다소 낮은 점도를 나타내는 주된 원인인 것으로 여겨진다.

##### 4.3 폴리머 수용액

실험에 사용한 고분자폴리머는 Polyacrylamide 로써 상품명은 Separan AP-273이다. Separan AP-273은 분자량이 대단히 큰 폴리머이며 물에 미소량을 용해해도 항력감소현상(drag reduction phenomenon)이 대단히 우수한 것으로 알려져 있다. 따라서 저항감소현상과 유변학적 특성의 관계를 연구하는데 많이 사용되어 왔다. Fig. 5는

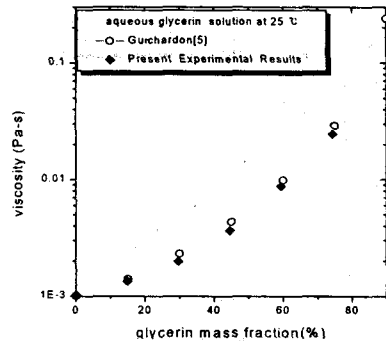


Fig. 4 Viscosity of aqueous glycerin solutions

농도에 따른 Separan 수용액의 점도변화를 측정하여 Hartnett 등<sup>(6)</sup>의 결과와 비교한 것이다. 실험결과에 의하면 다소 큰 오차를 나타내는데 이것은 시간의 경과 그리고 물의 PH에 따라서 점도의 차이가 나타나는 Separan 수용액의 특성이 주된 요인인 것으로 판단된다.

#### 4.4 흙탕물

흙탕물은 물에 미세한 흙의 입자들이 부유되어 있는 2상유체(two phase fluid)이다. 기존의 모세관 점도계, 회전 점도계, 낙구식 점도계는 흙탕물과 같은 혼탁액의 점도측정에 적합치 못하다. 본 연구에서는 소형 저장조와 모세관을 사용하였고 컴퓨터에 로드셀의 신호를 연결하여 짧은 시간안에 실험을 마칠 수 있으므로 고품입자의 침전 문제점을 극복하고 흙탕물의 점도를 실험적으로 측정할 수 있었다.

시중에서 쉽게 구할 수 있는 공작용 점도흙을 물에 풀어 고운채로 거른 후에 건조하여 얻은 분말을 사용하여 실험하였다. 흙탕물의 전단률변화에 따른 점도변화를 Fig. 6에 나타내었다.

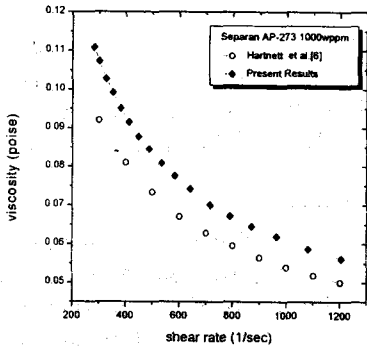


Fig. 5 Viscosity versus shear rate for aqueous Separan 1000wppm solution

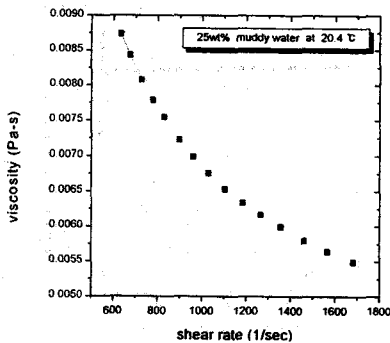


Fig. 6 Viscosity versus shear rate for 25 wt% muddy water

## 5. 결론

모세관 점도계에서 비정상유동에 의한 저장조 내 액주 높이의 변화와 비정상유동의 운동량방정식 및 수정 Bernoulli 방정식을 이용하면 비정상유동상태하에서 액체의 점도를 측정할 수 있다. 비정상유동 모세관점도계는 저장조의 지름과 높이 변화가 용이하여 실험에 소요되는 시간이 대단히 짧기 때문에 부유입자(suspended particle)를 가진 액체의 점성측정에 적합하다.

실험에 사용된 액체중 물과 글리세린 수용액은 뉴턴유체이며 폴리머 Separan AP-273 수용액과 진흙분말로 탁해진 흙탕물은 비뉴턴유체이다. 비뉴턴유체를 멱급수 모델로 나타낼 때 폴리머수용액과 진흙물은 Pseudoplastic 유체이다. Separan의 농도가 증가할수록 수용액의 점도는 증가하는데 폴리머 농도 10wppm까지는 거의 뉴턴유체로 거동하고 그 이상으로 증가하면 비뉴턴유체의 특성을 나타낸다. 흙탕물에서 진흙의 농도가 증가될수록 비뉴턴유체의 멱법칙모델 지수 ( $n$ )는 감소된다.

## 후기

이 연구는 보건복지부가 지원하는 보건의료기술연구개발사업(HMP-97-M-5-0058)에 의해 수행되었기에 이에 감사를 표합니다.

## 참고문헌

- (1) J. P. Holman, Experimental Methods for Engineers 6th Ed., McGraw- Hill, 1994.
- (2) Y. I. Cho, W. T. Kim, and K. R. Kensey, "A New Scanning Capillary Tube Viscometer", Review of Scientific Instrument, Vol. 70, pp. 2421-2423, 1999.
- (3) 박홍준, 비정상유동하에서 모세관점도계의 특성에 관한 연구, 한국항공대학교, 석사학위논문, 2000.
- (4) F. M. White, Viscous Fluid Flow, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, 1991.
- (5) P. Guichardon, "Extension of Chemical Method for the Study of Micromixing Process in Viscous Media", Chemical Engineering Science, Vol. 52, No.24, pp. 4649-4658, 1997.
- (6) J. P. Hartnett and Y. I. Cho, Non-Newtonian Fluids, in Handbook of Heat Transfer, 3rd Ed., Chapter 10, Edited by W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, and Y. I. Cho, McGraw-Hill, New York, 1998.