

과도유동현상을 이용한 모세관점도계 개발 및 적용

서상호* · 조민태* · 김동주* · 노형운**

Development and Application of Capillary Tube Viscometer Transient Flow Concept

Sang-Ho Suh*, Min-Tae Cho*, Dong-Joo Kim*, Hyung-Woon Roh**

Key Words : Capillary Tube Viscometer(모세관점도계), Transient Flow Concept(과도유동 개념), Viscosity Measurements(점도측정), Hemodynamics(혈류역학), Pump Performance(펌프성능)

ABSTRACT

The objective of the present study were to measure the viscosities of non-Newtonian fluids by the transient flow concept in a capillary tube and to apply to hemodynamic studies and pump performance evaluations. The developed capillary tube viscometer could be used to measure the viscosities of the non-Newtonian fluids for a wide range of the shear rate by a run of experiment in a very short time interval. The measured viscosities of water and blood for different shear rates were good agreement with those of the well established data. The measured viscosities for muddy water varied with the shear rates.

1. 서론

산업현장에서 펌프로 양수하는 액체인 흙탕물, 오수, 펄프 등은 인체내의 혈액과 같이 전단율에 따라 점도가 변하는 비뉴턴유체의 특성을 갖는다^(1,2).

혈류역학적 연구시 고려되어야 하는 중요한 특성 중의 하나는 혈장내의 혈구들로 인한 비뉴턴유체의 특성이다. 또한, 청수가 아닌 비뉴턴유체를 취급하는 원심펌프의 성능을 평가할 때 유동특성에 따라 변화하는 점도특성이 고려되어야 한다. 비뉴턴유체를 양수할 때의 펌프성능평가를 하기 위해서는 반드시 유체의 점도를 측정하여 성능실험결과를 파악하거나 수치해석하여야 한다.

본 연구에서는 유체의 점도측정 방법 중 비뉴턴유체의 점도를 모세관의 과도유동현상을 이용하여 측정할 수 있는 방법을 개발하고 이를 수치해석과 실험에

적용하고자 하였다. 이를 위하여 먼저 개발된 점도측정장치를 이용하여 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 점도를 측정하여 기존의 자료와 비교·검토함으로써 측정장치의 신뢰성을 검증하고, 그 결과를 혈류역학적 연구와 펌프성능해석에 활용하고자 하였다.

2. 모세관 점도계 개발

개발된 모세관 점도계는 항온실, 저장조, 모세관, 로드셀과 A/D 변환기 및 컴퓨터로 구성되어 있으며 그 개략도는 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.

* 숭실대학교 기계공학과

** 조선대학교 항공우주공학과

E-mail : suhsangho@rocketmail.com

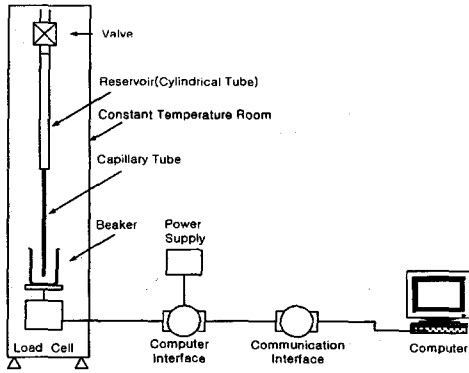


Fig. 1 Schematic of the capillary tube viscometer under transient flow

점도는 온도의 함수이므로 정확한 실험온도를 설정하기 위하여 모세관과 로드셀 장치는 항온실 내에 설치하였다. 실험에 사용된 유체는 물, 혈액과 효탕물이다. 모세관 아래에 시료 받이통을 설치하여 모세관을 통과한 액체를 수집하고 시료받이통의 아래에 있는 로드셀에 의하여 수집된 액체의 질량이 측정되도록 하였다. 시간이 흐름에 따라 시료받이통에 누적되는 시료 질량을 로드셀의 출력전압으로 환산한 후 실시간으로 컴퓨터에 입력시켜서 시간과 함께 기록하였다. 시간변화에 대한 질량변화로부터 유량을 결정한 후 이 유량과 유속 그리고 저장조의 수두변화에 의한 압력차를 원통좌표계에 대한 Navier-Stokes 방정식으로부터 얻은 식 (1)에 대입하여 액체의 점도, μ ,를 계산하였다.

$$\mu = \frac{\pi \gamma R^4}{8QL} \left[H_t + L - (K_u + K_D) \left(\frac{v_m^2}{2g} \right) \right] \quad (1)$$

3. 모세관 점도계의 성능 검증

3.1 뉴턴유체의 점도측정

실험장치의 타당성을 확인하기 위하여 뉴턴유체이며 점도특성이 이미 잘 알려져 있는 물을 실험액체로 사용하였다. 물의 점도변화는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다⁽³⁾.

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

여기서 T 는 절대온도를 나타내고, $T_0=273K$, $\eta_0 = 0.001792 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 이며 $a=-2.1$, $b=-4.45$, $c=6.55$ 이다. 이 식의 정확도는 $\pm 1\%$ 인 것으로 보고되어 있다. 식 (2)로 계산된 20.4°C 에서의 물의 점도는 $0.001014 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 이다. Fig. 2는 실험으로 구한 물의 점도와 식 (2)를 통해 얻은 값을 비교·도시하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 개발된 모세관 점도계로 측정하여 구한 물의 점도의 평균값인 $0.001026 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 는 식 (2)로 계산한 결과와 약 1%이내의 오차로 잘 일치한다.

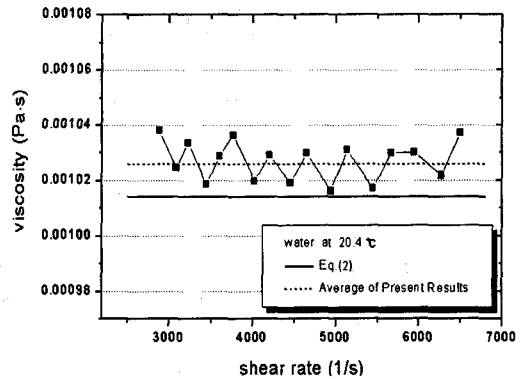


Fig. 2 Viscosities of water for different shear rates

3.2 비뉴턴유체의 점도측정

3.2.1 혈액

이 점도계를 이용하여 대표적인 비뉴턴유체인 혈액의 점도를 Fig. 3과 같이 측정하였다. 인체의 체온과 같은 온도인 37.5°C 에 맞추어 실험함으로써 점도계의 신뢰성을 재차 검증하였다. 혈액의 점도는 물보다 높기 때문에 실험시 모세관에 점착현상이 실험오차에 중요한 영향을 주므로 질량 측정은 정밀성을 개선하기 위하여 여러번 반복 측정하였다⁽³⁾.

Fig. 3은 Kameneva 등⁽²⁾이 측정한 혈액의 점도와 실험결과를 비교한 것이다. 그림에서 저전단율에서 나타나는 차이는 실험에 사용한 혈액의 항응고 처리 때문에 나타난 것으로 판단된다. Kameneva 등은 혈액에 EDTA처리를 함으로써 응고를 방지하였고, 본 실험에서는 특별한 항응고처리를 하지 않고 실험하였기 때문에 저전단율에서 점도의 차이가 나타나지만 비교적 두 실험결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있어 개발된 점

도계의 신뢰성을 확인하였다.

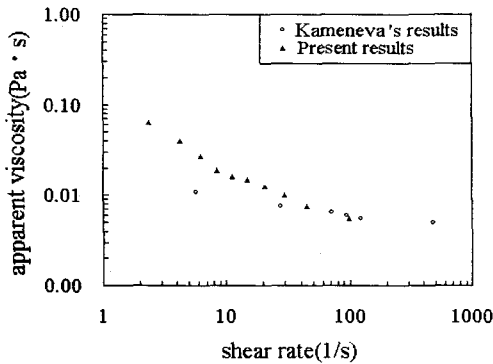


Fig. 3 Blood viscosities for different shear rates

다.

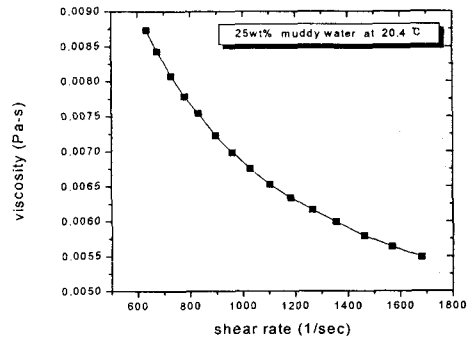


Fig. 4 Viscosity versus shear rate for 25wt% muddy water

3.2.2 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 Fig. 1과 같이 개발된 점도계를 사용하여 짧은 시간안에 점도 측정이 가능하므로 고형입자의 침전 문제점을 극복하고 흙탕물의 점도를 실험적으로 측정할 수 있었다. 흙탕물의 전단률변화에 따른 점도변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보듯이 흙탕물은 전단율의 변화에 따라 변하는 비뉴턴유체임을 확인할 수 있다.

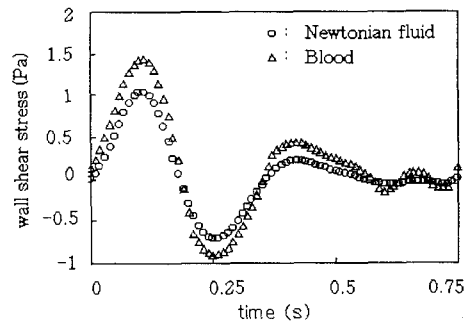


Fig. 5 Comparison of the wall shear stress for the Newtonian and Non-Newtonian fluid

4. 모세관 점도계의 적용

4.1 혈류역학적 연구

혈류역학적 연구에서는 혈액유통과 혈관질환의 상관관계를 규명하여 병의 발생기전을 파악하고 이를 치료에 활용한다. 개발된 점도계를 이용하여 구한 점도 자료를 적용하여 혈관내 혈류역학적 특성을 구한 결과의 한 예는 Fig. 5와 같다. 혈액을 뉴턴유체로 간주한 결과와 혈액을 비뉴턴유체로 고려한 본 연구의 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 큰 차이가 크게 남을 알 수 있다. 따라서, 비뉴턴유체를 뉴턴유체로 간주하여 유동을 해석하는 것은 비뉴턴유체의 유동을 제대로 파악하지 못하는 오류를 범할 수 있음을 암시해 주고 있

4.2 펌프의 성능연구

하수처리장이나 제지공정에서 이송되는 액체는 흙탕물, 오니, 펄프액 등이다. 일반적으로 펌프장 설계시 작동유체로 청수로 간주하여 설계사양에 적합한 펌프를 선정한다. 본 연구에서는 청수와 흙탕물 등과 같은 비뉴턴유체가 작동유체로 사용될 때의 펌프성능을 구하고자 한다. 양수액체 중에서 가장 보편적인 흙탕물을 작동유체로 선택하여 개발된 모세관점도계를 이용하여 흙탕물에 대한 점도의 특성을 살펴보고 펌프의 성능을 구하였다.

점도변화에 따른 원심펌프의 성능변화를 수치해석하기 위하여 TASCflow를 사용하였다. 임펠러의 회전에 의한 유동특성을 해석하기 위하여 회전하는 임펠러와

회전하지 않는 케이싱을 동시에 계산하기 위한 기법인 multi frame of reference를 사용하였다. 이 기법은 전체 유동장을 회전하는 영역과 회전하지 않는 영역으로 나누어 각각의 영역에 대하여 계산을 수행하며, 임펠러 출구에서의 결과를 케이싱 입구에서의 입구조건으로 적용하여 유동장을 계산하는 방법이다.

Fig. 6은 청수와 흙탕물을 사용하여 수치해석으로 구한 케이싱내의 속도벡터를 보여주고 있다. 흙탕물에 비하여 청수일 경우 케이싱 내부에서 재순환영역이 넓게 자리잡고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 청수와 흙탕물의 물성치를 사용하여 수치해석으로 구한 성능해석 결과를 보여주고 있다. 펌프효율의 변화는 흙탕물이 청수에 비하여 전체 유량에 걸쳐 약 3%가량 감소한 결과를 보여주고 있으며, 이것은 성능수정선도를 사용하여 구한 결과와 유사하다. 수치해석에 의해 계산된 양정은 물과 흙탕물이 큰 변화를 보이지 않고 있으며, 성능수정선도를 사용하여 구한 결과와도 유사하다⁽⁴⁾. 이는 점도에 대한 양정감소효과와 흙탕물의 밀도에 의

한 상승효과가 결합되어 나타난 것으로 판단된다. 그러나, 흙탕물에 대하여 수치해석으로 구한 동력은 물에 비하여 약 5%가량 증가하였다.

5. 결론

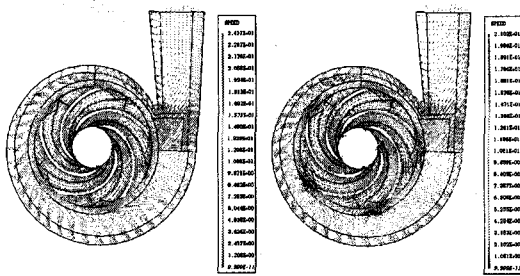
모세관 점도계를 개발하여 비뉴턴유체의 점도특성을 구하고, 이를 혈류역학적 연구와 펌프성능해석에 활용하였다. 모세관 점도계에서 비정상유동에 의한 저장조내 액주높이의 변화와 비정상유동의 운동량방정식 및 수정 Bernoulli 방정식을 이용하면 비정상유동상태 하에서 액체의 점도를 간편하게 측정할 수 있다.

모세관 점도계를 이용하여 측정된 혈액과 흙탕물의 점도는 기존의 자료와 잘 일치하였다. 측정된 점도 자료를 이용하여 혈류역학적 문제와 펌프의 성능예측에 이용하였다.

비뉴턴유체가 작동유체인 경우가 뉴턴유체가 작동유체인 경우에 비하여 혈관내의 유동특성이나 펌프의 성능이 달라짐을 확인할 수 있었다. 앞으로의 연구는 다양한 비뉴턴유체에 대한 점도자료를 확보하여 이를 실제 유동문제에 확장적용하여 상세한 유동특성이나 성능특성을 구하는 일이다. 이를 위해 개발된 모세관 점도계를 개량하여 넓은 범위의 점도측정이 가능하도록 지속적인 연구를 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Kensey, K. R., Cho, Y. I., and Chang, M., 1997, "Effects of whole blood viscosity on atherogenesis", *The Journal of Invasive Cardiology*, Vol. 9, pp.17~24.
- (2) Kameneva, M. V., Antaki, J. F., Watach, M. J., Borovetz, H. S., and Kormos, R. L., 1994, "Heparin effect on red blood cell aggregation", *Biorheology*, Vol.31, No.3, pp. 297~304.
- (3) 서상호, 유상신, 조민태, 2000, "모세관내 비정상유동 개념을 이용한 비뉴턴유체 및 혈액의 점도특성", 제 1 회 한국유체공학학술대회, pp. 487~490.
- (4) 조민태, 서상호, 김동주, 성순경, 2000, "유체의 점도변화가 펌프성능에 미치는 영향", 유체기계연구개발발표회, pp.61~64.



(a) water (b) muddy water
Fig. 6 Velocity vectors for the centrifugal pump with water and muddy water

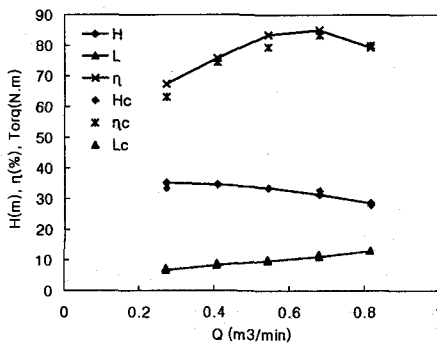


Fig. 7 Performance curves for the centrifugal pump with water and muddy water