

落球式 粘度計를 利用한 粘彈性流體의 流動에 關한 研究

A Study on the Flow Behavior of the Viscoelastic Fluids in the Falling Ball Viscometer

全 秉 烈*
Chan Yeal Jean

ABSTRACT

The falling ball viscometer has been widely used for measuring the viscosity of the Newtonian fluids because of its simple theory and low cost.

The use of the falling ball viscometer for measuring the non-Newtonian viscosity has been of interest to rheologists for some years.

The analysis of the experimental results in a falling ball viscometer rest on Stokes law which yields the terminal velocity for a sphere moving through an infinite medium of fluids.

An attempt to use the falling ball viscometer to measure the non-Newtonian viscosity in the intermediate shear rate range was successfully accomplished by combining the direct experimental observations with a simple analytical model for the average shear-stress and shear rate at the surface of a sphere.

In the experiments with highly viscoelastic polyacrylamide solutions the terminal velocity was observed to be dependent on the time interval between the dropping of successive balls.

The time-dependent phenomenon was used to determine characteristic diffusion times of the concentrated solutions of polyacrylamide.

I. 서 론

유체역학에서 일반적으로 이용되어지는 대부분의 유체들은 이상유체 (완전유체) 와 뉴우튼유체이다. 이상유체는 전단응력이 없는 즉, 마찰이 전혀없는 유체이며 뉴우튼유체는 전단응력과 전

단율사이에 선형적인 관계가 있는 유체이다.

2 차대전 이후 실제유체에 대한 연구가 산업에 이용되면서 이상유체와 유체이론을 실제상황에 적용하는데 상당한 어려움이 뒤따랐다. 이것은 대부분의 실제유체가 비뉴우튼유체의 성질을 나타내고 있으며 전단응력이 전단율에 선형적으로 비례하지 않기 때문이다.¹⁾

이 비뉴우튼유체들의 예로는 고분자용액 (hi-

* 正會員 : 檀國大學校 大學院 機械工學科

gh polymer solution), 고분자용융물 (polymer melt), 혼탁액 (suspension), 유탁액 (emulsions) 등이 있으며 이와같은 여러가지 성질은 소방호스에서 분출되는 물의 확산 각도를 크게하고 종이에 코우팅을 할 경우 코우팅재료의 성질을 좌우하는 것 등의 중요한 역할을 하고 있다.²⁾

일반적으로 액체의 점성을 측정하는 방법중 낙구식 점도계는 이론 (Stokes law) 이 간단하고 장치를 만드는데 경비가 많이들지 않기 때문에 뉴우튼유체의 점성을 측정하는데 있어 널리 사용되어 왔다. 그러나 최근 몇년동안 비뉴우튼유체의 정상전단점성 (Steady shear viscosity) 의 측정과 낮은 전단을 범위에서의 점성 측정에 대한 연구가 유동학자들에게 관심의 대상이 되고 있다. 낮은 전단을 범위에서의 점성 측정에 대한 중요성은 영 전단율점성 (zero shear rate viscosity) 을 측정할 수 있으며 점탄성유체의 완화시간 (Relaxation time) 을 결정할 수 있기 때문이다.³⁾

본 연구에서는 낙구식 점도계를 이용하여 점탄성유체인 Separan AP-273 의 2,500 wppm에서 온도변화에 대한 측정 시간간격 (Time Interval) 이 점성에 미치는 영향을 실험적으로 결정하였다.

고분자폴리머 (high molecular polymer) 용액의 가장 중요한 성질은 비뉴우튼유체의 점성이며 이것은 전단율에 따라 유체의 점성이 변화된다. log-log 그래프에 폴리머용액에 대한 점성과 전단율과의 관계를 도시하면 전단율의 10^{-1} 에서 10^1 까지의 범위에서 점성이 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있고 (Fig.1) 선형적으로 감소하는 직선에 대하여 지수법칙 (power law model) 을 적용하면 다음과 같이 표시할 수 있다.⁴⁾

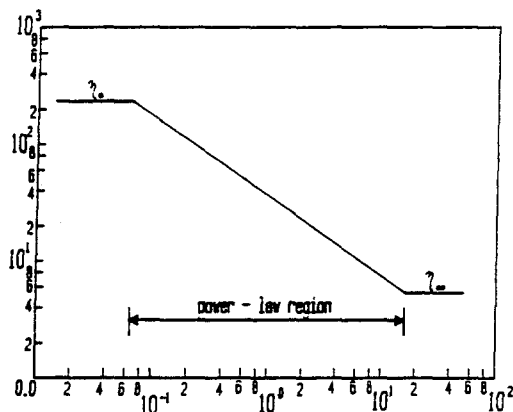


Fig. 1. A typical viscosity curve for non-Newtonian fluids.

$$\eta = m(\dot{\gamma})^{n-1} \dots\dots\dots (2-9)$$

$n = 1$ 일 경우 점성계수는 전단율과 무관하게 변화하며 뉴우튼유체의 경우가 된다. 비뉴우튼유체의 점성은 전단율이 증가함에 따라 감소하며 대부분의 폴리머용액에 대하여 n 은 1보다 적게되고 이러한 유체를 전단연화 또는 위소성 (pseudo-plastic)이라하며 n 이 1보다 클 경우 전단후화 또는 팽창성이라 한다.

비 뉴우튼유체의 점성은 뉴우튼유체에서의 전단율과 전단율로부터 구할 수 있다. Faxen's 의 종말속도를 이용한 구의 저항계수의 식과 레이놀즈수가 $0 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ 의 범위에서 White가 제시한 식은 다음과 같다.

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{gD}{eV^2} (\rho_s - \rho) \dots\dots\dots (2-2)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \dots\dots\dots (2-3)$$

(2-2) 식과 (2-3) 식에서 구한 뉴우튼 유체

의 점성계수로 다음과 같은 식을 이용하여 전단응력과 전단률을 구할 수 있다.

$$\tau_n = \frac{2}{9}gR(\rho_s - \rho) \dots\dots\dots (2-4)$$

$$\dot{\gamma}_n = \frac{\tau_n}{\eta} \dots\dots\dots (2-5)$$

비 뉴우튼유체의 평균전단응력 (τ_{ave}) 과 평균전단율 ($\dot{\gamma}_{ave}$)은 (2-4) 식과 (2-5) 식에서의 전단응력과 전단율 비인 기울기 n 값을 이용하여 다음과 같은 상한과 하한의 수정계수에 의해서 구할 수 있다.

upper bound

$$\tau_{ave} = (0.2827 + 0.8744n + 0.4562n^2 - 0.7486n^3) \frac{2}{9}gR(\rho_s - \rho) \dots\dots\dots (2-26)$$

lower bound

$$\tau_{ave} = (0.6388 + 0.6418n - 0.4344n^2 + 0.1560n^3) \frac{2}{9}gR(\rho_s - \rho) \dots\dots\dots (2-27)$$

upper bound

$$\dot{\gamma}_{ave} = (-1.731 + 41.28n - 116.0n^2 + 123.9n^3 - 46.72n^4) \left(\frac{V_{\infty}}{R} \right) \dots\dots\dots (2-88)$$

lower bound

$$\dot{\gamma}_{ave} = (-2.482 + 54.35n - 160.1n^2 + 178.2n^3 - 69.04n^4) \left(\frac{V_{\infty}}{R} \right) \dots\dots\dots (2-99)$$

윗식의 평균전단응력과 평균전단율을 이용하여 겉보기점도를 다음과 같이 표시할 수 있다.⁵⁾

$$\eta_{app} = \frac{\tau_{ave}}{\dot{\gamma}_{ave}} \dots\dots\dots (2-30)$$

II. 실험장치

실험장치의 주요구성부분은 헬륨-네온 가스 레이저 (Helium Neon Gas laser), 실린더 (Cylinder), 비임분할기 (Beam splitter), 항온조 (Constant temperature bath and circulator), 열전대 (Thermocouple), 디지털온도계 (Digital thermometer), 디지털타이머 (Digital timer), 수광기 (Photo transistor), 등이며 그 배치는 Fig.2와 같다.

시료실린더는 내경이 서로 다른 5개 투명실린더를 사용하였으며 구와 실린더 직경비는 $0.036 \leq DB/DC \leq 0.157$ 의 범위에서 측정하였다.

또한 각실린더의 길이는 구가 종말속도에 도달할 수 있는 최소한의 길이 (40 cm)를 선택하여 72.6 cm - 74.5 cm를 사용하였다.

측정이 이루어 지는 동안 강구의 낙하속도는 시료실린더내부의 유체온도에 민감하게 작용되므로 유체의 온도와 항온조의 온도 및 구의 온도를 일정하게 유지시켜 주어야 한다.

이를 위하여 시료실린더 외부에 항온조를 설치하였으며 측정이 이루어지는 동안 동일한 온도가 이루어지도록 하였다.

실험유체로는 탄성체이며 저농도에서 비교적 퇴화현상이 적고 저항감소 효과가 대단히 좋은 것으로 알려져 있는 폴리머 (Polyacrylamide Separan Ap-273, Dow Chemical Co.)을 사용하였다. 폴리머의 농도는 2,500 wppm으로 순수한 증류수 5 리터에 분말 12.5 g을 용해시켰으며 증류수는 주사용증류수 (대한약품공업 (주))를 사용하였다.

본실험에서는 동일한 구 1개로써 연속적인 실험을 할 수 있도록 장치를 보완하였으며 완화시간을 측정하기 위하여 30 초, 1분, 3분, 5분, 20분 간격으로 동일한 구를 시료실린더에

떨어뜨렸다.

III. 결과 및 고찰

(1) 기울기 n의 결정

Separan AP-273의 2500wppm에 대한 기울기 n은 식(2-3)과(2-4)의 전단응력과 전단율에 대한 기울기를 결정하였다.

n의 결과치를 Table 4-1에 표기하였으며 용액의 온도가 증가함에 따라 기울기 n의 값은 감소하게 된다.

Table 4-1 Slope n in the Separan AP-273

concentration	temperature		
	25 °C	30 °C	35 °C
2,500 wppm	0.5126	0.5049	0.4819

(2) 평균전단응력과 평균전단율

기울기 n의 값과 함께 식(2-6)에서 식(2-9)까지를 이용하여 점탄성유체의 평균전단응력과 평균전단율을 계산하였다. 위식에 의한 upper bound와 lower bound에서 n에 대한 다항식을 다음과 같이 C1, C2로 표기하였다.

upper bound :

$$C1 = -1.731 + 41.28n - 116.0n^2 + 123.9n^3 - 46.72n^4$$

$$C2 = 0.2827 + 0.8744n + 0.4526n^2 - 0.7486n^3$$

lower bound :

$$C1 = -2.482 + 54.35n - 160.1n^2 + 178.2n^3 - 69.04n^4$$

$$C2 = 0.6388 + 0.6418n - 0.4344n^2 + 0.1560n^3$$

Table 4-2에서 온도가 증가할수록 C1 값에 따라 변화하는 평균전단율은 증가하

게 되며 C2에 의하여 변화하는 평균전단율은 감소하게 된다.

Table 4-2 Correction factor for Separan AP-273

temperature	upper bound		lower bound	
	C1	C2	C1	C2
25 °C	2.4111	0.7490	2.5450	0.8750
30 °C	2.4511	0.7450	2.5957	0.8722
35 °C	2.5691	0.7254	2.7482	0.8647

(3) 벽의 영향

측정에 의한 종말속도는 무한한 유체의 매질을 근거로 하기 때문에 측정된 종말속도와 무한한유체의 매질속에서의 종말속도의 비가 벽의 수정계수(Cwc)가 된다. Fig. 3에서 온도가 증가할수록 직경비에 대한 기울기는 증가하며 직경비가 0.05보다 적어지면 온도변화에 관계없이 변수정계수는 거의 동일한 값이 된다.

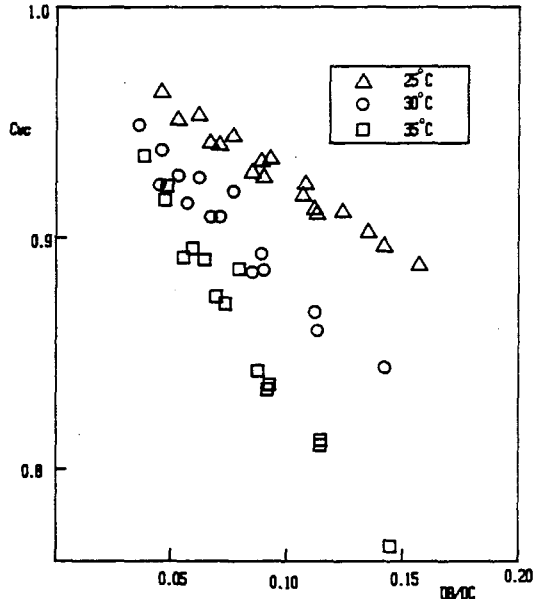


Fig. 3. Wall correction constants vs. DB/DC for Separan 2500 wppm solution.

또한 직경비가 증가할수록 온도변화에 따른 벽수정계수의 값은 현저한 차이를 보이게 된다.

(4) 시간에 의존하는 점성계수

종말속도의 측정으로부터 점탄성유체의 변형을 측정 시간에 대한 현상으로 나타내었다. 즉, 측정시간간격이 감소할수록 종말속도는 증가하게 되며 점탄성유체의 점성계수는 감소하게 된다. 또한 점탄성유체의 평균응력과 평균전단율의 비인 겔보기점도 (apparent viscosity)와 시간에 대한 함수관계를 Fig. 4에 표시하였다.

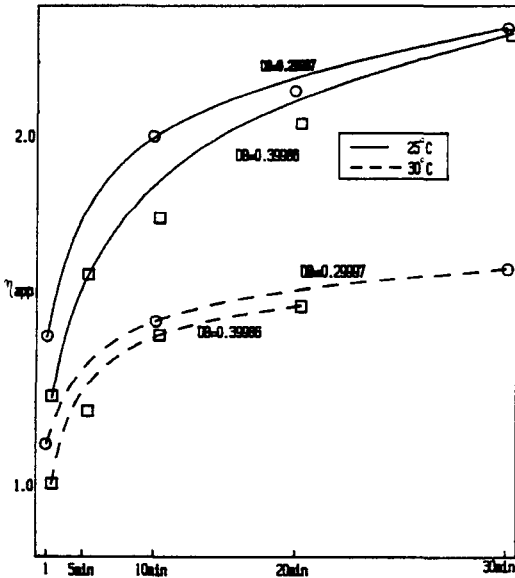


Fig. 4. Relaxation time vs. Apparent viscosity 2500 wppm solution (Dc=3.525cm).

이것으로부터 응력이 없는 처음의 상태를 복귀하기 위한 시간은 20분 - 30분 정도라고 말할 수 있다.

또한 동일한 직경에서 온도가 증가할수록 겔보기 점도는 감소하며 구의 직경이 클수록 비교적 빠른 시간내에 처음의 상태로 되돌아 오는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

- (1) 전단응력과 전단율에 대한 기울기(n)는 온도가 증가할수록 감소한다.
- (2) 점탄성유체의 평균전단응력과 평균전단율은 전단응력과 전단율의 비에 따라 변화하며 온도가 증가할수록 평균전단응력은 감소하며 평균전단율은 증가하게 된다.
- (3) 온도가 증가할수록 측정된 종말속도는 증가하게 되며 동일한 직경비에서의 벽수정계수는 적어지고 이에 대한 기울기의 값은 증가하게 된다.
- (4) 동일한 구의 직경에서 온도가 증가할수록 평균전단응력과 평균전단율의 비인 겔보기점도는 감소하게 되며 구의 직경이 클수록 빠른 시간내에 처음의 상태로 복귀된다.

參 考 文 獻

1. J. Happel & H. Brenner, "Low Reynolds number hydrodynamics," Prentice Hall Inc., (1965).
2. 유정열., "비뉴우튼 유체의 유동현상," 대한 기계학회 Vol. 25, No 4, (1985)
3. D. Kanchanalakshana and A.J. Ghajar, "An Improved Falling Sphere Viscometer for Intermediate Concentrations of Viscoelastic Fluids," Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 13 (1986)
4. Cho, Y.I., "The study of Non-Newtonian flows in the Falling Ball Viscometer. Ph. D. Thesis, University of Illinois, Chicago Circle, (1979).
5. Cho, Y.I., J.P. Hartnett and Lee, W.Y. "Non-newtonian Viscosity measurements in the intermediate shear rate range with the Falling-Ball viscometer," J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 15 (1984).
6. 유상신., "점탄성유체의 유동 및 열전달에 영향을 주는 인자에 관한 연구," 공사 논문집