

<論 文>

## 낙구식 점도계를 이용한 점탄성 유체의 특성시간에 관한 실험적 연구

전 찬 열\* · 유 상 신\*

(1989년 11월 13일 접수)

### An Experimental Study on the Characteristic Times of Viscoelastic Fluids by Falling Ball Viscometer

Chan Yeal Jeon and Sang Sin Yoo

**Key Words :** Viscoelastic Fluid(점탄성 유체), Falling Ball Viscometer(낙구식 점도계), Capillary Tube Viscometer(모세관 점도계), Hollow Ball(속이 빈 구), Needle(니들), Characteristic Relaxation Time(특성 이완시간), Characteristic Diffusion Time(특성 확산시간), Zero-Shear-Rate Viscosity(영 전단률 점성계수), Infinite-Shear-Rate Viscosity(무한 전단률 점성계수), Degradation(퇴화 현상)

#### Abstract

Characteristic relaxation time and characteristic diffusion time of viscoelastic fluids are determined experimentally by measuring the zero-shear-rate viscosity by falling ball viscometer and the infinite-shear-rate viscosity by capillary tube viscometer. Fluids used in experiments are aqueous solutions of polyacrylamide Separan AP-273 and the polymer concentrations range from 300 to 2000 wppm. A newly designed laser beam and timer system is employed to overcome the difficulty in measuring terminal velocities of the low concentration solutions. Ball removal device is prepared to remove the dropped ball from the bottom of cylinder without disturbing the testing fluid. In order to measure the zero-shear-rate viscosity, densities of hollow aluminium balls are adjusted very close to the densities of testing fluids. Characteristic diffusion time, which is determined by the time interval of dropping balls, is observed when a ball is dropped by falling ball viscometer. However, terminal velocity of a needle by falling ball viscometer is not affected by the time interval of dropping needles and characteristic diffusion time is not measured with a dropping needle. Powell-Eyring model predicts the highest values of the characteristic relaxation times among models used for heat transfer experimental works for a given polymer solution. As degradation of a polymer solution continues, the zero-shear-rate viscosity decreases more seriously than the infinite-shear-rate viscosity. Characteristic relaxation times of polymer solutions decrease as degradation continues.

\*정회원, 단국대학교 대학원

\*\*정회원, 한국항공대학 기계설계과

## 기 호 설 명

$C_D$	: 항력계수
$D$	: 구의 지름
$D_c$	: 실린더의 지름
$n$	: 유동 특성상수
$P$	: 압력
$Re$	: 레이놀즈수
$Re'$	: 일반 레이놀즈수
$T$	: 절대온도
$\vec{V}$	: 속도 벡터
$V_{ms}$	: 측정된 종말속도
$V$	: 무한 유체에서의 종말속도
$\dot{\gamma}$	: 전단률
$\eta$	: 겔보기 점도
$\eta_0$	: 영 전단률 점성
$\eta_\infty$	: 무한 전단률 점성
$\bar{\eta}$	: 표준화점성(normalized viscosity)
$\lambda_1$	: 특성 이완시간(characteristic relaxation time)
$\lambda_2$	: 특성 확산시간(characteristic diffusion time)
$\rho$	: 유체의 밀도
$\rho_s$	: 구의 밀도
$\tau$	: 전단응력

## 하 첨 자

$av$	: 평균치
$n$	: 뉴튼유체

## 1. 서 론

미소량의 고분자 폴리머가 물에 용해된 폴리머 수용액은 응력과 전단률의 비 선형관계와 점탄성 유체의 특성을 나타낸다. 점탄성 유체가 매끈한 원형관 속을 난류상태로 흐를때 레이놀즈수와 마찰계수의 관계를  $Re-f$ 좌표에 나타내면 난류구역의 동일한 레이놀즈수에서 마찰계수는 뉴튼유체에 비하여 훨씬 감소하며 그 차이는 뉴튼유체에 비하여 최대 80%정도까지 이른다. 또한 최대 저항감소 점근선을 따르는 폴리머용액의 열전달계수는 뉴튼유체의 값과 비교하면 90%정도의 열전달 감소 현상을 나타낸다. 따라서 마찰저항과 열전달감소에 영향을 미치는 점탄성 유체의 물리적 성질에 관한 연구가

절실히 요구되고 있다. 저항감소 현상을 나타내는 저농도 폴리머 용액의 점탄성 특성을 결정하기 위하여 영 전단률 점성(zero-shear-rate viscosity)을 포함한 낮은 전단률 영역(low shear rate region)의 점성 측정에는 Weissenberg rheogoniometer가 많이 이용되고 무한 전단률 점성(infinite-shear-rate viscosity)과 함께 높은 전단률 영역(high shear rate region)에서의 점성 측정은 모세관 점도계(capillary tube viscometer)가 많이 이용되며 영 전단률과 무한 전단률 사이의 점성 측정에는 낙구식 점도계(falling ball viscometer)가 적합하다.

Turian<sup>(1)</sup>과 Gottlieb<sup>(2)</sup>는 낙구식 점도계를 사용하여 뉴튼유체에 적용했던 Tanner<sup>(3)</sup>의 벽 수정 실험식으로 비 뉴튼유체의 점성을 결정하였고 Cho<sup>(4)</sup>와 Cho등<sup>(5-7)</sup>은 점탄성 유체인 Separan AP-273의 높은 농도(5000과 10000wppm)용액에서의 점성 특성을 낙구식 점도계로 측정하였으나 낮은 농도(100 내지 500ppm)용액에서는 구가 아주 짧은 시간내에 측정구간을 통과하므로 측정상 어려움이 있어 Weissenberg rheogoniometer와 모세관 점도계를 이용하여 측정하였다. Kanchanalakshana 등<sup>(8)</sup>은 개선된 낙구식 점도계를 제작하여 500과 1000 wppm 용액의 점성을 측정 하였으나 영 전단률 점성계수와 점탄성 유체의 특성 시간은 결정하지 못하였다.

점탄성 유체의 특성 이완시간은 변형률이 무한히 작은 영 전단률 점성계수와 무한히 큰 무한 전단률 점성계수를 이용하면 유변학적 모델을 이용하여 구할 수 있다. 낙구식 점도계에서 점탄성 유체의 특성을 실험할 때 구를 떨어뜨리면 종말속도가 구를 떨어뜨리는 시간간격에 따라 다른값을 나타내는데 이것을 특성 확산시간이라한다. 특성 이완시간과 특성 확산시간은 점탄성 유체의 유동특성을 나타내는데 필요한 Deborah수나 Weissenberg수와 같은 무차원수를 얻는데 활용할 수 있는 중요한 유체의 성질이다. 유동 및 열전달에 이용되는 폴리머 용액들은 농도가 낮은(100 내지 1000wppm)용액이어서 낙구식 점도계를 이용한 종말속도 측정에 큰 어려움이 있기 때문에 아주 제한된 실험 결과만이 발표되어 있다.

본 연구에서는 낙구식 점도계를 이용하여 낮은 농도의 용액을 실험할 때 종말속도측정의 어려움을 해결하기 위하여 레이저와 특수 타이머를 설치하였으며 정확한 특성시간을 결정하기 위하여 실린더

내부의 시험유체를 교란시키지 않고, 떨어뜨린 구를 회수하는 장치를 제작하였다. 또한 주로 rheogoniometer에 의존하던 영 전단률 점성계수를 측정하기 위하여 속이 빈 알루미늄 구(hollow aluminium ball)의 밀도를 시험 유체와 거의 같은 정도까지 변화시켜가며 종말 속도를 측정하였으며 점탄성 유체로써 Separan AP-273의 낮은 농도인 300에서 2000wppm까지의 저농도 용액에 대한 특성 시간을 여러모델에 의하여 실험적으로 결정하고 저농도 폴리머 용액에서 퇴화로 인한 점탄성유체의 특성 변화를 분석하였다.

2. 특성 이완시간

비 압축성 점성유체의 3차원 느린 흐름에서는 관성력이 점성력에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작으므로 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(9)</sup>.

$$\text{div } \vec{V} = 0 \tag{1}$$

$$\text{grad } P = \mu \nabla^2 \vec{V} \tag{2}$$

경계조건은 벽에서  $v_i = 0$ ,  $v_n = 0$ 이며 벽으로부터 먼 거리에서는  $\vec{V} = U \vec{i}$ 이다. 전 항력은 구 주위의 압력 변화와 전단응력을 적분하여 구할 수 있으며 구 주위를 흐르는 뉴튼유체의 느린 흐름에서 항력 계수는 식 (3)과 같다.

$$C_D = \frac{24}{Re} \tag{3}$$

뉴튼유체에서 낙구에 대한 평형방정식을 이용하면 구의 항력 계수에 관한 식을 얻을 수 있다.

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

농도가 낮은 폴리머 용액의 점성 측정에서는 레이놀즈수의 범위가 증가되므로 관성력을 포함시킨 White<sup>(9)</sup>의 실험식을 이용한다.

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \tag{5}$$

Kanchanalakshana 등<sup>(8)</sup>은 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 뉴튼유체의 점성을 결정하였다. 비 뉴튼유체에서 응력과 변형률은 다음과 같은 power law 모델로 나타낼 수 있다.

$$\tau_{av} = m (\dot{\gamma}_{av})^n \tag{6}$$

Cho<sup>(4)</sup>는 수정계수  $C_1$ 과  $C_2$ 를 이용하여 비 뉴튼유체의 평균 전단률과 평균 전단응력을 다음과 같은 식으로 표시하였다.

$$\dot{\gamma}_{av} = C_1 \dot{\gamma}_n \tag{7}$$

$$\tau_{av} = C_2 \tau_n \tag{8}$$

수정계수  $C_1$ 과  $C_2$ 의 상한과 하한은 Cho<sup>(4)</sup>가 인용한 Tomita의 수정된 유동함수를 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

상한값(upper bound)

$$C_1 = -1.731 + 41.28n - 116.0n^2 + 123.9n^3 - 46.72n^4 \tag{9a}$$

$$C_2 = 0.2827 + 0.8744n + 0.4526n^2 - 0.7486n^3 \tag{9b}$$

하한값(lower bound)

$$C_1 = -2.482 + 54.35n - 160.1n^2 + 178.2n^3 - 69.04n^4 \tag{10a}$$

$$C_2 = 0.6388 + 0.6418n - 0.4344n^2 + 0.1560n^3 \tag{10b}$$

식 (9)와 식 (10)의 유동 특성상수  $n$ 은 log-log 좌표에 표시된 전단응력과 전단률의 관계를 이용하여 구할 수 있다.

$$n = \frac{d(\ln \tau_n)}{d(\ln \dot{\gamma}_n)} \tag{11}$$

낙구식 점도계에서 겉보기 점도(apparent viscosity)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = \frac{\tau_{av}}{\dot{\gamma}_{av}} \tag{12}$$

Cho<sup>(4)</sup>는 지수법칙의 상수  $m$ 과 유동 특성상수  $n$ 을 이용하여 비 뉴튼유체의 일반 레이놀즈수(generalized Reynolds number)를 정의하였다.

Table 1 Models for characteristic relaxation time

Models	Viscosity ( $\eta$ )	Characteristic time(sec)
Eyring	$\eta = \eta_0 \left[ \frac{\sinh^{-1} \lambda_1 \dot{\gamma}}{\lambda_1 \dot{\gamma}} \right]$	$\lambda_1$
Sutterby	$\eta = \eta_0 \left[ \frac{\sinh^{-1} \lambda_1 \dot{\gamma}}{\lambda_1 \dot{\gamma}} \right]$	$\lambda_1$
Powell-Eyring	$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \left[ \frac{\sinh^{-1} \lambda_1 \dot{\gamma}}{\lambda_1 \dot{\gamma}} \right]$	$\lambda_1$
Chang-Darby	$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{(1 + \lambda_1^2 \dot{\gamma}^2)^\alpha}$	$\lambda_1$

$$\alpha = \frac{6\pi m D^{2-n} V^{n+1}}{n+1}, \quad \Omega = \frac{1-n}{2}$$

$$Re' = \frac{\rho V^{2-n} D^n}{m} \quad (13)$$

영 전단률 점성계수와 무한 전단률 점성계수를 이용한 점탄성 유체의 특성 이완시간을 결정할 수 있는 몇개의 모델은 Table 1과 같다.

### 3. 실험장치 및 방법

실험 장치의 주요 구성 부분은 헬륨-네온 가스레이저(helium-neon gas laser), 디지털 타이머, 수광기, 시료실린더, 항온조, 물탱크 등이며 그 배치는 Fig. 1과 같다.

유체속에서 낙하하는 구의 종말속도를 정확히 측정하기 위하여 헬륨-네온 가스 레이저(출력: 5mW, 빔 지름: 0.9mm) 2대를 시료 실린더의 상단과 하단에 설치하고 이구간내에서 레이저 빔을 통과한 구의 낙하 시간을 1/1000초 까지 측정할 수 있는 디지털 타이머를 제작하였다. 레이저와 타이머를 이용한 측정속도가 떨어지는 구의 종말속도인가를 확인하기 위하여 각 실린더의 상단에서 20cm되는 곳으로부터 10cm 간격을 유지하며 레이저와 수광기를 각 구간으로 이동시켜 낙하속도를 측정하였다. 이 결과 폴리머 농도가 300wppm이고 구의 밀도가 0.9966인 경우 실린더 상단에서 40cm되는 곳부터 종말속도에 도달하였다. 종말속도에 도달된 부분으로부터 10cm 간격을 설정하여 떨어지는 구의 속도를 측정하였으며 끝면효과(end effect)를 고려하여 아래쪽 측정위치는 실린더 밑면으로부터 20cm 윗쪽에 있도록 하였다. 시료 실린더는 길이 75cm이고 내경이 서로 다른 3개(5.578cm, 6.520

cm, 9.396cm)를 항온조 내부에서 교환할 수 있도록 제작하였다.

지금까지 발표된 연구에서는 특성 이완시간을 결정하기 위하여 지름이 거의 동일한 여러개의 강구를 이용하여 종말속도를 측정하였으나 본 실험에서는 1개의 구를 이용하여 연속적인 실험을 할 수 있도록 실험장치를 제작하였다. 실험에 사용된 구는 0.1996cm에서 0.6996cm까지의 서로 다른 지름을 가진 5개의 강구와 밀도 변화가 용이한 지름 0.949~0.951cm의 속이 빈 알루미늄 구 13개(미국 Industrial Tectonics 회사제품)를 사용하였다. Table 2에 강구(steel ball)의 지름과 질량 그리고 밀도를 표시하였으며 Table 3에 속이 빈 알루미늄

Table 2 Details of steel balls

Ball No.	Dia. (cm)	Mass (g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.19966	0.0419	7.6737
2	0.29967	0.1093	7.7591
3	0.39986	0.2600	7.7687
4	0.49943	0.5072	7.7771
5	0.69960	0.8779	7.7721

Table 2 Details of hollow aluminium balls

Ball No.	Mass (g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.4469	0.9944
2	0.4474	0.9966
3	0.4493	1.0008
4	0.4509	1.0044
5	0.4525	1.0048
6	0.4563	1.0164
7	0.4588	1.0220
8	0.4871	1.0850
9	0.5162	1.1498
10	0.5529	1.2316
11	0.6693	1.4909
12	0.7185	1.6005
13	0.8100	1.8043

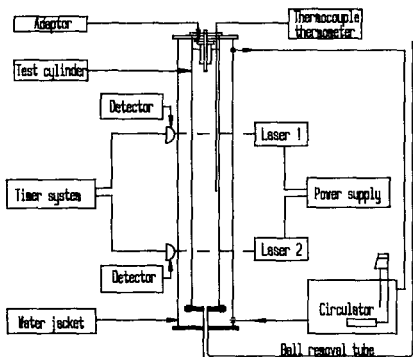


Fig. 1 Schematic diagram of the falling ball viscometer

Table 4 Details of needles

Needle No.	Dia. (cm)	Length (cm)	Mass (g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.625	9.344	3.100	1.1071
2	0.624	9.449	3.350	1.1892
3	0.623	9.408	3.995	1.3846

구(aluminium ball)의 질량과 밀도의 범위를 표시하였다.

크기가 다른 3개의 니들(needle)을 이용하여 종말 속도를 측정하였으며 Table 4에 니들의 지름, 길이, 질량 그리고 밀도를 표시하였다.

유체의 특성 확산시간을 측정하기 위해서는 실린더 속의 유체를 교란시키지 않은 상태에서 구를 연속적으로 떨어뜨려야 함으로 시료실린더와 구 회수용 관을 플렌지로 연결하고 처음 구를 떨어뜨려 회수한 후 30초, 1분, 3분, 5분, 10분, 20분, 30분 간격으로 회수된 구를 다시 시료 실린더에 떨어뜨렸다. 측정 시간 간격의 정확성을 유지하기 위하여 스톱 워치(측정범위 : 1/10초)를 사용하였다. 시험 유체는 뉴튼유체로써 글리세린(덕산제약제품)과 점탄성 유체로써 저 농도에서도 점탄성 특성을 나타내며 퇴화 현상이 적고 저항 감소 효과가 대단히 좋은 것으로 알려져 있는 폴리아크릴라마이드(Polyacrylamide) Separan AP-273을 수도물에 용해한 폴리머용액(300, 500, 700, 1000, 1500, 2000 wppm)을 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 뉴튼유체

실험장치의 신뢰성을 확인하기 위하여 뉴튼유체인 글리세린을 10°C, 20°C, 30°C의 온도에서 서로 다른 크기의 강구와 밀도가 다른 알루미늄 구를 이용하여 종말속도를 측정하였다. 측정된 종말속도는 유체를 둘러싸고 있는 벽의 영향을 받으므로 Cho<sup>(4)</sup>가 제시한 식을 이용하여 무한 유체에서의 종말속도를 구하였다.

$$V = V_{ms} \quad D/D_c \leq 0.02 \quad (14a)$$

$$V = V_{ms} / [1.0148 - 0.7375D/D_c] \quad D/D_c > 0.02 \quad (14b)$$

식 (14)의 종말속도로부터 산출한 레이놀즈수와 항력

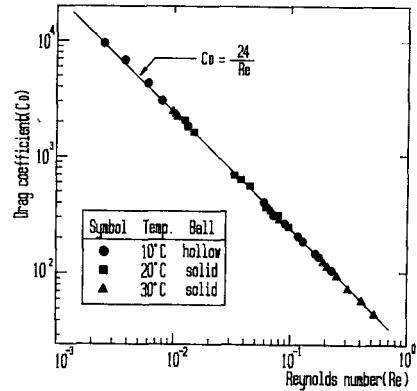


Fig. 2 Drag coefficient vs. Reynolds number for 92% glycerin

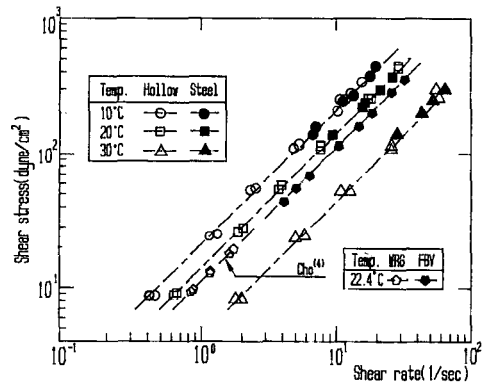


Fig. 3 Shear stress vs. shear rate for 92% glycerin

계수의 관계는 Fig. 2와 같다.

넓은 온도범위, 구의 크기와 밀도의 변화, 그리고 레이놀즈수의 대단히 넓은 범위에서 실험 결과들은 Stokes이론과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 강구보다 밀도를 변화시킨 알루미늄 구를 이용함으로써 대단히 낮은 레이놀즈수의 실험이 가능하다. 온도 변화에 대한 전단응력과 전단률의 관계를 Fig. 3에 표시하였다.

Cho<sup>(4)</sup>는 낙구식 점도계에서 알루미늄 구, 테프론 구 그리고 나이론 구를 이용하여 전단률이 4(1/sec) 이상인 범위에서 실험을 수행하였으나 본 실험에서는 속이 빈 알루미늄 구를 이용함으로써 전단률이 1(1/sec)보다 적은 범위에서도 실험이 가능하도록 하였다. 온도변화에 대한 글리세린의 점성계수 변화를 표준치<sup>(10)</sup>와 비교할 때 실험온도 범위에서 측정오차는 대략 ±2%정도이다.

4.2 평균 전단응력과 평균 전단률

비 뉴턴유체의 평균 전단응력과 평균 전단률을 산출하기 위해서는 유동 특성상수( $n$ )를 포함하고 있는 수정계수  $C_1$ 과  $C_2$ 를 결정하여야 한다. 유동 특성상수를 결정하기 위하여 전단응력과 전단률의 관계를 Fig. 4에 표시하였다.

전단응력과 전단률의 관계로부터 유동 특성상수 ( $n$ )는 모든 실험용액의 경우에 1보다 작으며 300 wppm의 경우에 0.6310이고 2000wppm의 경우에는 0.4873이며 농도가 증가할수록  $n$ 의 값은 감소한다. 식 (7)과 식 (8)의 평균 전단률과 평균 전단응력은 유동 특성상수를 이용한 수정계수값  $C_1$ 과  $C_2$ 를 결정함으로써 산출할 수 있으며 각 용액에 대한

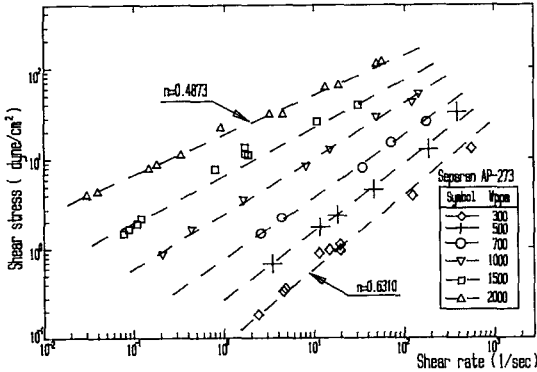


Fig. 4 Shear stress vs. shear rate for aqueous polymer solutions

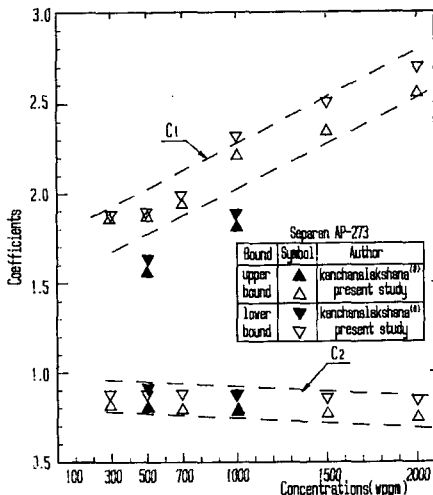


Fig. 5 Values of coefficient  $C_1$  and  $C_2$  for aqueous polymer solutions

수정계수의 상한값 및 하한값을 Fig. 5에 표시하였다. Kanchanalakshana등<sup>(8)</sup>이 낙구식 점도계를 이용하여 구한 낮은농도(500, 1000wppm)용액의 전단률에 대한 수정계수값 ( $C_1$ )은 실험값과 같은 크기의 위수를 나타내고 있으며 전단응력에 대한 수정계수값 ( $C_2$ )은 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 전단률에 대한 수정 계수값의 상한과 하한은 농도의 증가에 따라 증가하지만 전단응력에 대한 수정계수값의 상한과 하한은 농도가 증가할수록 감소한다.

4.3 특성 이완시간

지금까지 발표된 실험적 연구결과에 의하면, 종말속도는 낙구식 점도계에서 강구를 이용하여 측정하므로써 낮은 전단률에서의 점성계수 측정이 거의 불가능하였다. 따라서 영 전단률 점성계수는 대부분의 경우 rheometer 또는 rheogoniometer을 이용하여 측정하였다. 그러나 본 실험적 연구를 통하여 속이 빈 알루미늄 구의 밀도를 변화시키면 낙구식 점도계에서도 영 전단률 점성계수의 측정이 가능함을 확인하였다. 무한 전단률 점성계수는 낙구식 점도계에 사용된 동일한 시료를 사용하여 모세관 점도계에서 측정하였다. 각 용액에 대한 영 전단률 점성계수와 무한 전단률 점성계수를 Fig. 6에 표시하였다. 농도가 증가할수록 영 전단률 점성계수와 무한 전단률 점성계수의 차는 크게 나타난다. 전단률이 낮은 범위에서 겔보기 점도는 농도에 따라 현저한 차를 나타내고 전단률이 증가하면 겔보기 점도는 감소하여 전단률 10000(1/sec)이상에서 겔보기 점도는 농도에 따라 일정한 값에 도달하게 된다.

전단률이 영에 가까운 영역과 무한히 큰 영역에

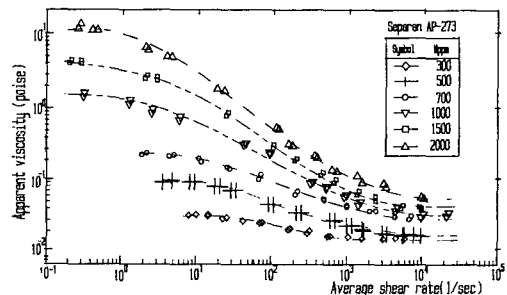


Fig. 6 Apparent viscosity vs. average shear rate for aqueous polymer solutions

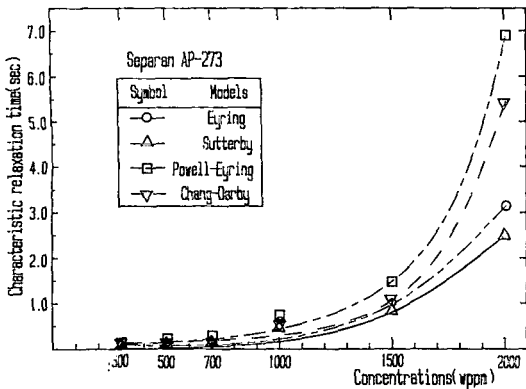


Fig. 7 Characteristic relaxation times for aqueous polymer solutions

서 비 뉴튼유체의 겔보기 점도가 일정하다는 물리적 성질을 이용하여 영 전단률 점성계수와 무한 전단률 점성계수를 측정함으로써 제안된 유변학적 모델로부터 특성 이완시간(characteristic relaxation time)을 구하였다. 특성 이완시간을 결정하는데 있어 Eyring모델과 Sutterby모델은 영 전단률 점성계수만을 이용하고 Powell-Eyring 모델과 Chang-Darby 모델은 영 전단률 점성계수와 무한 전단률 점성계수를 이용한다. 농도에 대한 모델의 특성 이완시간을 Fig. 7에 표시하였다.

모든 모델에서 특성 이완시간은 농도가 증가할수록 증가하며 동일한 농도에서 영 전단률 점성계수와 무한 전단률 점성계수를 이용하여 산출한 특성 이완시간은 영 전단률 점성계수만을 이용한 경우보다 훨씬 크게 나타난다. Deborah수나 Weissenberg수는 특성 이완시간과 종말속도에 따라 선형적으로 변화하므로 각 유동모델에서 산출된 특성 이완시간은 무차원수에 크게 영향을 미치게 된다. Fig. 7에서 700wppm까지는 각 모델에서 산출된 특성 이완시간의 차이가 별로 없으나 농도가 증가할수록 더욱더 차이가 크게 나타난다. 유체가 열교환기나 관내유동에 이용될때 전단률이 큰것을 고려하면 Powell-Eyring 모델 또는 Chang-Darby모델이 공학적으로 실용성있는 모델로 판단된다.

Cho 등<sup>(12)</sup>과 Yoon 등<sup>(13)</sup>은 1000wppm이하 용액의 특성 이완시간 결정에서 낙구식 점도계를 사용하지 않고 rheogoniometer와 Couette viscometer를 이용하여 측정하였다. Powell-Eyring모델을 이용하여 산출한 특성 이완시간은 Table 5와 같다.

Table 5 Characteristic relaxation times(sec)

Author	wppm	300	500	1000
Cho and Hartnett <sup>(6)</sup>		0.096	0.249	3.020
Yoon and Ghajar <sup>(8)</sup>		0.064	0.290	0.782
Present study		0.166	0.210	0.780

Cho 등<sup>(12)</sup>과 Yoon 등<sup>(13)</sup>, 그리고 본 실험에서 구한 특성 이완시간은 농도가 증가하면 증가하게 되고 300wppm의 경우 거의 같은 크기의 위수이고 500wppm에서는 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 1000wppm에서 Yoon 등<sup>(13)</sup>과 본 실험에서 구한 특성 이완시간은 거의 유사하지만 Cho 등<sup>(6)</sup>이 구한값과는 크게 다른데 이것은 낮은 전단률 범위에서 얻은 영 전단률 점성계수의 차이 때문이다.

#### 4.4 특성 확산시간

낙구식 점도계에서 점탄성 유체를 시험할 때 처음 구를 떨어뜨린 후 일정한 시간 간격을 두고 다시 구를 떨어뜨리면 처음 구가 떨어질때의 종말속도보다 다음구가 떨어질때의 종말속도는 크게 나타난다. 구를 떨어뜨리는 시간간격이 작을수록 종말속도값은 크게 나타나며 시간간격이 충분이 크면 처음 구를 떨어뜨린때의 종말속도와 같게된다. 종말속도가 증가하면 점성계수는 작게 나타난다. 처음 떨어뜨린 구의 종말속도를 기준으로 하여 구를

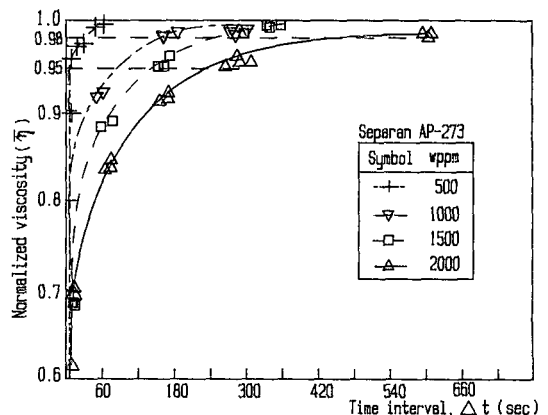


Fig. 8 Normalized viscosity vs. time interval for aqueous polymer solutions

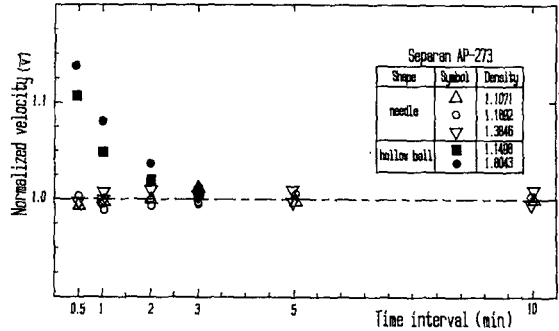
**Table 6** Characteristic diffusion times(sec)

wppm %	300	500	700	1000	1500	2000
95%	3.21	5.76	41.25	96.00	150.42	293.70
98%	12.20	29.16	72.35	150.42	238.38	505.50

떨어뜨리는 시간간격에 따른 점성의 변화를 표준화 점성(normalized viscosity)으로 나타낼 수 있다. 동일한 밀도의 알루미늄 구를 떨어뜨릴 때 처음에 떨어뜨린 구의 종말속도와 동일한속도에 도달할때까지의 시간간격을 측정하여 특성 확산시간(characteristic diffusion time)을 결정하였다. 측정된 종말속도를 이용하여 점성계수를 결정하고 그 결과를 측정시간 간격으로 나타내면 Fig. 8과 같다.

Cho<sup>(7)</sup>은 높은 농도(3500 wppm이상)에서 특성 확산시간을 정상치의 95%에 해당되는 시간으로 정의하였다. 정상치의 95% 또는 98%에 도달하는 시간을 특성 확산 시간으로 정할때 각 용액에 대한 특성 확산시간은 Table 6과 같다. 특성 확산시간은 농도에 따라 차이는 있으나 정상치의 98% 되는 시간은 95%되는 시간에 비하여 1000wppm의 경우 1.5배가 되며 500wppm의 경우 5배가 된다. 점탄성 유체의 특성 확산시간은 물리적 성질중 주요한 특성의 하나이므로 실험치 결정에서 5%의 오차를 인정하는 것보다는 정상치에 더욱더 가까운 98%를 선택하는 것이 바람직하다고 생각된다.

시료 실린더에 1개의 니들을 떨어뜨린 후 회수하여 1분, 3분, 5분, 10분, 20분 간격으로 회수된 니들을 다시 시료 실린더에 떨어뜨려 측정한 종말속도는 니들의 밀도에 따라 종말속도가 결정되며 니들을 떨어뜨리는 시간간격에는 무관하게 나타난다. Fig. 9는 처음 떨어진 구와 니들의 종말속도를 기준으로하여 측정시간 간격에 따른 종말속도를 나타내었다. 구를 떨어 뜨릴때와는 다르게 니들을 떨어뜨리면 측정시간 간격이 변하여도 종말속도는 거의 일정한 값을 유지하는 것을 알 수 있다. 이러한 실험결과로부터 구를 사용하면 점탄성유체의 특성 확산시간을 측정할 수 있으나 니들을 사용하면 특성 확산시간을 측정할 수 없음을 발표한 Park 등<sup>(14)</sup>의 결과와 일치한다. 동일한 실험장치에서 구 또는 니들을 사용할 때 종말속도 측정결과가 다르게 나타나는 현상에 대해서는 보다 정밀한 실험적 연구가 있어야 하겠다.



**Fig. 9** Normalized velocity vs. time interval for aqueous 1000 wppm solution

**4.5 퇴화로 인한 특성시간의 영향**

점탄성 유체의 퇴화로 인한 물리적 성질의 변화를 측정하기 위하여 300, 700, 1000wppm의 폴리머용액을 장시간 재순환시켜 가면서 일정한 시간 간격으로 시료를 채취하여 낙구식 점도계와 모세관 점도계로 영 전단률 점성 계수와 무한 전단률 점성 계수를 측정하였다. Powell-Eyring모형을 이용하여 특성 이완시간을 산출하고 정상치의 98%에 해당되는 시간을 특성 확산시간으로 결정하여 각 용액의 퇴화로 인한 특성 이완시간과 특성 확산시간의 변화를 나타내면 Table 7과 같다.

퇴화가 진행될수록 특성 이완시간과 특성 확산시간은 계속하여 감소하게 되며 700wppm의 경우 12.5시간이 경과하여 퇴화한 상태의 특성 이완시간은 처음의 1/10배가 되며 특성 확산시간은 1/2.5배가

**Table 7** Characteristic relaxation and diffusion times(sec) of the degrading polymer solutions

wppm	300		700		1000	
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
Hour						
0	0.166	12.20	0.260	72.35	0.780	150.42
1	0.155	9.37	0.202	67.54	0.445	125.43
3	0.101	8.03	0.130	55.73	0.352	100.68
5	0.033	7.54	0.065	45.65	0.260	90.34
8	0.021	6.43	0.044	39.65	0.160	82.64
12.5	0.018	6.03	0.021	30.52	0.085	77.18
23.5	—	—	0.020	29.89	0.060	72.83



된다. 그러므로 시간 경과에 따라 퇴화로 인한 특성 이완시간의 감소는 특성 확산시간보다 크게 나타난다.

퇴화로 인한 각 용액의 특성 이완시간의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 장시간 재 순환시키는 과정에서 12시간 이상 경과되면 퇴화의 정도가 작아져서 특성 이완 시간이 크게 변하지 않는다.

퇴화로 인한 겔보기 점도의 변화를 고찰하기 위하여 Fig. 11에 1000wppm용액의 겔보기 점도를 나타내었다. 퇴화가 진행되면 낮은 전단률에서 겔보기 점도는 크게 감소하지만 높은 전단률에서의 겔보기 점도는 별로 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 퇴화현상은 영 전단률점성에 크게 영향을 미치지만 무한 전단률 점성에는 별로 영향을 미치지 않는다. 이것으로부터 퇴화가 진행되면 특성 이완시간과 특성 확산시간이 감소하는 것을 알 수 있고 열 교환기나 공학적으로 응용되는 대부분의 유동에서는 영 전단률과 무한 전단률 점성계수를 이용하여 특성 이완시간을 결정하는 점탄성 특성모델이 유용함을 확인할 수 있다.

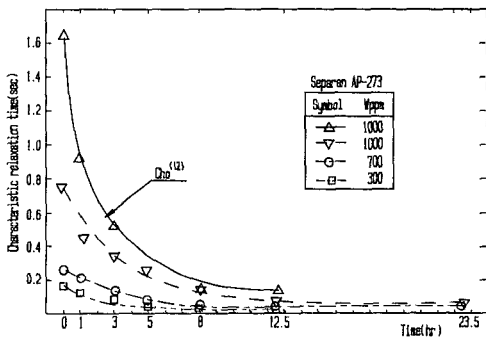


Fig. 10 Characteristic relaxation times vs. running time for aqueous polymer solutions

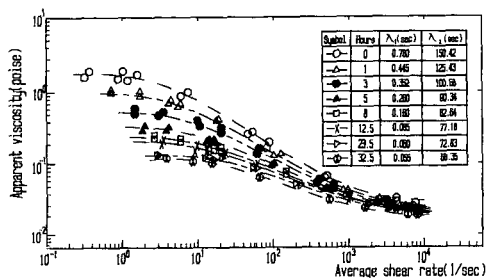


Fig. 11 Degradation effects on steady viscosity for 1000 wppm aqueous AP-273 solution

## 5. 결 론

점탄성유체로서 Separan AP-273의 300~2000 wppm 폴리머용액을 사용하고 낙구식 점도계에서 구와 니들의 밀도를 변화시켜 폴리머용액의 영 전단률 점성을 측정하고 모세관 점도계에서 무한 전단률 점성을 측정하여 점탄성유체의 특성 이완시간과 특성 확산시간을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 저농도 폴리머용액의 유동 특성상수( $n$ )는 1보다 작으며 저농도 용액으로부터 농도가 증가함에 따라  $n$ 의 값은 감소한다.

(2) 저농도 폴리머용액에도 특성 이완시간이 존재하며 농도가 증가할수록 특성 이완시간은 증가하게 되어 유동 및 열전달 실험에 사용되는 모델중 Powell-Eyring모델이 점탄성유체의 특성시간을 가장 크게 나타낸다.

(3) 낙구식 점도계에서 구를 사용하면 점탄성유체의 특성 확산시간을 결정할 수 있고 1000wppm의 특성 확산시간은 500wppm 용액에 비하여 5배 정도 증가하며 농도가 증가 할수록 특성 확산시간은 커진다.

(4) 폴리머용액이 퇴화되면 영 전단률 점성계수는 무한 전단률 점성계수에 비하여 크게 감소하고 퇴화가 진행되어 12.5시간이 경과하면 용액의 특성 이완시간은 특성 확산시간에 비하여 4배 정도 빨리 감소한다.

(5) 낙구식 점도계에서 구를 사용하면 점탄성유체의 특성 확산시간을 측정할 수 있지만 니들을 사용하면 특성 확산시간은 측정할 수 없다.

## 참 고 문 헌

- (1) Turian, R.M., 1976, "An Experimental Investigation of the Flow of Aqueous Non-Newtonian High Polymer Solutions Past a Sphere", AICHE J., Vol. 13, pp. 999~1006.
- (2) Gottlieb, M., 1979, "Zero-Shear-Rate Viscosity Measurements for Polymer Solutions by Falling Ball Viscometry", J. of Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 6, pp. 97~109.
- (3) Tanner, R.I., 1963, "End Effects in Falling-Ball Viscometry", J. Fluid Mech., Vol. 17, pp. 161~170.
- (4) Cho, Y.I., 1979, "The Study of Non-Newtonian

- Flows in the Falling Ball Viscometer", Ph. D. thesis, University of Illinois, Chicago Circle.
- (5) Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., 1979, "The Falling Ball Viscometer-A New Instrument for Viscoelastic Fluids", Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 6, pp. 335~342.
- (6) Cho, Y. I. and Harnett, J. P., 1982, "Non-Newtonian Fluids in Circular Pipe Flow", Advances in Heat Transfer, Vol. 15, pp. 60~134.
- (7) Cho, Y.I., Hartnett, J.P. and Lee, W.Y., 1984, "Non-Newtonian Viscosity Measurements in the Intermediate Shear Rate Range with the Falling-Ball Viscometer", J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 15, pp. 61~74.
- (8) Kanchanalakshana, D. and Ghajar, A.J., 1986, "An Improved Falling Sphere Viscometer for Intermediate Concentrations of Viscoelastic Fluids", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 13, pp. 219~233.
- (9) White, F.M., 1974, Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, pp. 204~206.
- (10) Robert, H.P. and Cecil, H.C., 1973, Chemical Engineering Handbook, Fifth Edition, McGraw-Hill, New York, pp. 3~87.
- (11) Chang, H. D. and Darby, R., 1984, "Generalized Correlation for Friction Loss in Drag Reducing Polymer Solutions", AIChE J., Vol. 30, pp. 274~280.
- (12) Cho, Y. I. and Hartnett, J. P., 1986, "Non-Newtonian Fluids", Handbook of Heat Transfer Applications, McGraw-Hill, New York, pp. 2-1-50.
- (13) Yoon, H.K. and Ghajar, A.J., 1986, "A New Heat Eddy Diffusivity Equation for Calculation of Heat Transfer to Drag Reducing Turbulent Pipe Flows", Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., McGraw-Hill, New York, pp. 937~942.
- (14) Park, N.A., Cho, Y.I. and Irvine, T.F., 1989, "Measuring Purely Viscous Properties of Viscoelastic Fluids with the Falling Needle Viscometer", J. of Non-Newtonian Fluids Mechanics, to be Published.