

낙구식 점도계와 모세관 점도계를 이용한 점탄성유체의 점성과 특성시간의 측정

전찬열 · 황태성* · 유상신**

한국직업훈련관리공단 CAD/CAM

*수원공업전문대학 열처리과

**한국항공대학 기계설계과

(1990년 4월 4일 접수)

Measurements of Viscosity and Characteristic Times of Viscoelastic Fluids with the Falling Ball Viscometer and Capillary Tube Viscometer

Chan Yeal Jeon, Tae Sung Hwang* and Sang Sin Yoo**

Department of CAD/CAM, Korea Vocational Training and Management Agency

**Department of Heat Treatment, Su Won Industrial College*

***Department of Mechanical Engineering and Design, Hankuk Aviation University*

(Received April 4, 1990)

요 약

레이저와 타이머장치를 설치한 낙구식 점도계에서 구와 니들이 주어진 구간을 통과하는 시간을 측정하여 종말속도를 정확히 결정하였고 점성이 작은 유체의 낮은 전단률 점성과 영 전단률 점성은 속이 빈 알루미늄 구와 니들을 이용하여 측정하였다. 알루미늄 구와 니들의 속에 철분을 삽입하여 밀도를 다양하게 변화시켰다. 낙구식 점도계에서 측정한 낮은 전단률 점성과 영 전단률 점성, 그리고 모세관 점도계에서 측정한 높은 전단률 점성과 무한 전단률 점성을 이용하여 점탄성 유체의 특성이완시간을 결정하였다. 실린더 속의 시험용 유체를 교란시키지 않고 밑면에 떨어진 구를 회수하는 장치를 설치하였다. 이 장치는 하나의 구로써 점탄성유체의 특성완시간을 측정하는데 대단히 효과적이었다. Polyacrylamide Separan AP-273 용액(농도 500-2000 wppm)의 특성이완시간과 특성완산시간을 낙구식 점도계와 모세관 점도계의 실험결과를 이용하여 결정하고 폴리머 용액의 퇴화 현상을 실험적으로 분석하였다.

Abstract—Terminal velocities of balls and needles are determined by the measured passing times of a given interval with the laser and timer system installed in the falling ball viscometer. Viscosity at low rate of shear and zero-shear-rate viscosity of low viscous fluids are measured by hollow aluminium balls and needles are varied by inserting some iron powder depending on the density required. Measured viscosity at low rate of shear and zero-shear-rate viscosity with the falling ball viscometer and viscosity at high rate of shear and infinite-shear-rate viscosity with the capillary tube viscometer are used to calculate the relaxation times of viscoelastic fluids. Ball removal device is installed to remove the dropped ball from the bottom of the cylinder without disturbing the sample fluids in

the cylinder. It is found that the device is very effective in measuring the characteristic diffusion time of viscoelastic fluids with a single ball. Characteristic relaxation time and characteristic diffusion time of Polyacrylamide Separan AP-273 with concentrations of 500-2000 wppm are determined by the experimental results of the falling ball viscometer and capillary tube viscometer, and degradation phenomena of polymer solutions is investigated experimentally.

Keywords: Viscoelastic fluid/characteristic relaxation time/characteristic diffusion time/hollow ball/needle/zero-shear-rate viscosity/infinite-shear-rate viscosity/degradation.

1. 서 론

낙구식 점도계(falling ball viscometer)는 점성이 큰 유체의 점성계수를 측정하는 장치로 널리 이용되어왔다. 낙구식 점도계에서 액체 중에 떨어지는 강구(steel ball)의 종말속도를 측정하면 전단률이 큰 영역에서의 점성계수를 측정할 수 있으나 전단률이 낮은 영역의 실험에는 거의 이용되지 못하여왔다. Cho[1]는 낙구식 점도계에 강구보다 밀도가 훨씬 작은 알루미늄구, 테프론구 및 나이론구를 이용함으로써 점성이 작은 유체와 낮은 전단률 영역의 점성측정이 가능토록 하였으며 점탄성 유체의 Polyacrylamide Separan AP-273 높은 농도 용액(5000과 10000 wppm)의 점성을 낙구식 점도계를 이용하여 측정하였다. Cho 등[2]은 낙구식 점도계로 높은 농도 용액의 점성 특성을 측정할 수 있었으나 점탄성 유체 중 유동 및 열전달 특성 연구[3-5]에 많이 이용되는 낮은 농도(1000 wppm 이하) 용액의 실험에서는 제작된 구가 너무나 짧은 시간내에 측정구간을 통과하게 되는 측정상 어려움으로 인하여 Weissenberg rheogoniometer을 이용하였다. Kanchanalakshana 등[6]은 낙구식 점도계에서 강구 대신 속이 빈 알루미늄 구(hollow aluminium ball)에 구멍을 뚫고 적당량의 물을 투입하여 구의 밀도를 조절하고 낙하하는 구의 종말속도를 측정하여 낮은 농도(500 내지 1000 wppm) 용액에서의 점성을 측정함으로써 전단률이 2(1/sec) 이상인 영역에서의 점성을 측정할 수 있었다.

영 전단률 점성계수와 무한전단률 점성계수를 측정하면 유변학적 모델을 이용하여 점탄성 유체의 특성이완시간(characteristic relaxation time)을 결정할 수 있다. 낙구식 점도계에서 점탄성 유체의 점성 특성을 측정하면 구를 떨어뜨리는 시간간격에

따라 종말속도가 서로 다른 값을 나타내는 현상을 관찰할 수 있는데 이를 특성확산시간(characteristic diffusion time)이라 하며, 이 시간은 구를 떨어뜨린 후 측정된 종말속도가 시간간격에 영향을 받지않는 시간으로 정의한다. Cho 등[7]은 유사한 여러 종류의 구(강구, 알루미늄구, 테프론구, 나이론구)를 사용하여 Separan AP-273 2000 내지 10000 wppm 용액의 영 전단률 점성을 측정하고 모세관 점도계를 사용하여 무한전단률 점성을 측정함으로써 Powell-Eyring모델로부터 특성이완시간을 산출하였으며 3500 wppm 이상인 용액의 특성확산시간을 실험적으로 결정하였다. Park[8]은 유체가 들어있는 수직 원통속에 구 대신 니들(needle)을 떨어뜨려 떨어지는 니들의 종말속도를 측정함으로써 유체의 점성을 결정하는 낙침식 점도계(falling needle viscometer)를 고안하였다. Park 등[9]은 낙침식 점도계에 Separan AP-237 2000 wppm 용액을 이용할 때 전단률이 10^{-4} (1/sec)까지의 낮은 전단률 점성을 측정할 수 있었다.

본 연구에서는 영 전단률 점성계수를 측정하기 위하여 속이 빈 알루미늄 구와 니들의 밀도를 실험 유체와 거의 동일한 값이 되도록 구 속에 철분을 넣어 조절하였고 농도가 낮은 폴리머 용액의 종말속도를 정확히 결정할 수 있도록 레이저를 장치한 타이머를 이용하였으며 무한전단률 점성계수는 모세관점도계를 이용하여 측정하였다. 구가 떨어질 때 나타나는 특성확산시간을 측정하기 위하여 시료실린더 내부의 유체를 교란시키지 않고 떨어진 구 또는 니들을 회수하여 다시 시료실린더에 떨어뜨릴 수 있도록 실험장치를 설계 제작하였고 점탄성 유체인 Separan AP-273의 저농도 용액에 대한 특성이완시간을 실험적으로 결정하고 퇴화로 인한 점탄성 유체의 특성변화를 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 낙구식 점도계

낙구식 점도계의 주요 구성부분은 헬륨-네온 가스레이저(helium-neon gas laser), 디지털 타이머(digital timer), 시료실린더, 항온조, 어댑터 등이며 그 개략도는 Fig. 1과 같다. 유체속에서 낙하하는 구의 종말속도를 정확히 측정하기 위하여 헬륨-네온 가스레이저(출력: 5 mw, 비임직경: 0.9 mm) 2대를 시료실린더의 상단과 하단에 설치하였다. 시료실린더 속에 있는 유체의 중앙부에 구 또는 니들을 떨어뜨릴 때 주어진 측정구간에 투사되는 레이저 광을 구 또는 니들이 차단하게 되며 주어진 구간에서 통과하는 시간을 1/1000초에서 60분까지 측정할 수 있는 디지털 타이머를 제작함으로써 지금까지의 실험에 사용된 스톱워치에 의한 측정오차를 줄일 수 있도록 하였다. 디지털 타이머에 부착된 수광 다이오드는 레이저로부터 받은 비임을 구와 니들이 떨어지면서 차단하는 순간을 감지하기 위한 것이다. 제작된 타이머의 정확도는 싱크로스코프(synchroscope)를 이용하여 확인하였다. 레이저장치와 타이머에서 측정된 시간을 이용하여 산출한 낙하속도가 낙하하는 구의 종말속도인가를 확인하기 위하여 실린더 상단에서 200 mm 간격을 유지하며 레이저와 수광기를 여러 구간으로 이동시켜 가면서 낙하속도를 측정하였다. 이 결과 Separan AP-273 500 wppm 용액의 경우 실린더 상단에서 400 mm되는 곳으로

부터 종말속도에 도달됨을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 상단으로부터 400 mm 되는 곳과 500 mm 되는 곳 사이에 구 또는 니들이 통과하는 시간을 측정하여 종말속도를 결정하였다.

시료실린더의 길이는 750 mm이며 내경이 각각 55.78 mm, 65.20 mm, 93.96 mm인 3개의 실린더를 사용하였고 항온조 내부에서 손쉽게 교환할 수 있도록 항온조 내부와 시료실린더 끝단에 플랜지를 제작하여 볼트와 너트로서 체결하였다. 떨어진 구와 니들의 회수가 용이하도록 시료실린더 하단에 원추형 아크릴관을 제작하여 부착하였다. 떨어뜨린 구 또는 니들이 측정구간의 레이저 비임을 차단하기 위해서는 이들이 시료실린더의 중심을 정확히 통과하여야 한다. 따라서 실린더 상부에 끼워지는 어댑터(adapter)는 대단히 중요한 역할을 하는 구성요소이며 그 상세도는 Fig. 2와 같다. 강구 어댑터의 경우는 강구 지름보다 0.02 mm 정도 큰 드릴로 어댑터 중심에 구멍을 뚫고 리머(reamer)로 다듬질하여 서로 다른 5개의 어댑터를 제작하였으며 속이 빈 알루미늄구의 어댑터는 지름 9.50 mm의 드릴과 리머를 이용하여 제작하였다. 구를 떨어뜨릴 때 용액의 온도와 구의 온도가 동일하지 않으면 구 주위에 기포(air bubble)가 발생된다. 구를 떨어뜨리기 전에 항온조 내부에 시료실린더와 분리하여 구를 넣어둘 수 있는 아크릴관을 부착함으로써 기포가 형성되는 것을 방지할 수 있었다. 강구는 밀도가 크기 때문에 떨어지는 속도가 커서 낙하도중에 기포가 생성되는 일이 없지만 낙하속도가 낮은 속이 빈 알루미늄구 주위에 기포가 생기는 경우가 많았다. 기포가 생성되는

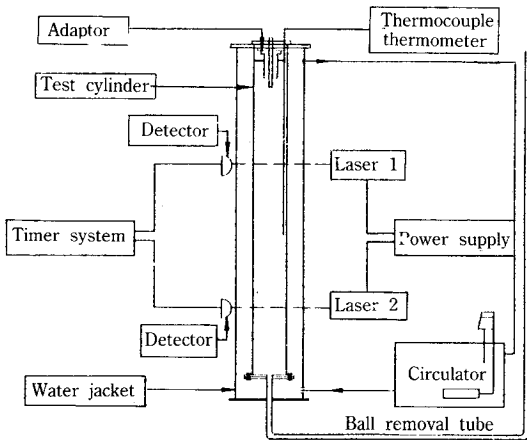


Fig. 1. Schematic diagram of the falling ball viscometer.

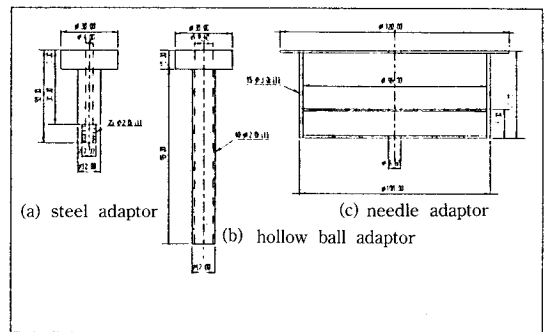


Fig. 2. Detail drawings of system adapters.

것을 막기 위하여 어댑터 주위에 많은 구멍을 뚫어 기포를 제거할 수 있도록 하였다. 니들실험을 위한 어댑터는 3개의 원형 아크릴판 중심에 니들이 통과할 수 있도록 드릴과 리머를 이용하여 다듬질 하였다. 원형아크릴판 3개가 일정한 간격으로 원형 아크릴판 내부에 부착된 것은 니들이 시료실린더의 중심을 정확히 통과하여 레이저 비임을 차단할 수 있도록 니들을 유도하기 위한 것이다. 니들 어댑터의 경우 3개의 원형아크릴판을 부착한 아크릴판 주위에 많은 구멍을 뚫어 니들이 시료실린더 내부에 끼워질 때 니들이 시료에 잠길 수 있도록 하여 떨어뜨린 니들 주위에 기포가 생성되는 것을 방지하였다. 어댑터의 정밀도를 유지하기 위하여 CNC 선반과 CNC 밀링(model ; F1-CNC, EMCO Maier Co.)을 이용하여 제작하였다.

2.2 구와 니들

외경이 서로 다른 5개의 강구를 진원도 측정기(model ; E-RT-13B-C, Tokyo Precision Co.)에서 1/1000 mm의 허용 오차까지 측정하였으며 저울(model ; HL52, Meller Co.)을 이용하여 강구의 무게를 1/10000 g까지 측정후 밀도를 계산하였다. Table 1에 강구의 지름, 질량 그리고 밀도를 표시

Table 1. Details of steel balls

Ball No.	Diameter (mm)	Mass (g)	Density (g/mm ³)
1	1.9966	0.0419	7.6737
2	2.9967	0.1093	7.7591
3	3.9986	0.2600	7.7687
4	4.9943	0.5072	7.7771
5	6.9960	0.8779	7.7721

Table 2. Details of hollow aluminium balls

Ball No.	Diameter (mm)	Mass (g)	Density (g/mm ³)
1	9.50	0.4474	0.9966
2	9.50	0.4493	1.0008
3	9.51	0.4525	1.0048
4	9.50	0.4733	1.0543
5	9.50	0.5159	1.1492
6	9.50	0.6689	1.4900
7	9.50	0.8094	1.8029

하였다.

지름 9.50-9.51 mm의 속이 빈 알루미늄 구(미국 Industrial Tectonics Co. 제품)에 0.3 mm의 구멍을 뚫고 적절한 철분을 삽입한 후 표면을 실리콘 접착제로 매끈하게 하여 알루미늄 구의 밀도를 변화시켰다. 측정에 사용된 15개의 속이 빈 알루미늄 구중 7개 구의 지름과 질량 및 밀도의 범위를 Table 2에 표시하였다.

니들을 제작하기 위하여 길이가 대략 50 mm에서 127 mm인 모세관에 미소량의 철분을 삽입하고 양 끝을 반원상태로 막은 후 니들의 무게를 측정하여 니들의 밀도를 결정하였다. 실험에 사용된 27개 니들중 8개 니들의 지름, 길이, 질량 그리고 밀도를 Table 3에 나타내었다.

2.3 모세관 점도계

모세관 점도계는 시료저장통, 모세관, 항온유지 순환장치, 압력조정기 및 압력탱크 등으로 구성되어 있고 모세관 점도계의 개략도는 Fig. 3과 같다[3]. 시료저장통은 내경 102 mm, 길이 285 mm인 원통형 용기이며 용기둘레에 물재킷(water jacket)을 설치하여 일정온도의 물을 계속 순환시켜 저장통내의 유체의 온도가 일정하게 유지되도록 하였다. 저장통 내부의 시료온도는 저장통에 설치한 3개의 열전대를 이용하여 측정하였다. 시료저장통 상단의 덮개에는 압력기체 공급용 호스와 공기압력 측정용 탭을 설치하였고 시료저장통에 시료를 채운 뒤에는 가스킷과 6개의 볼트를 이용하여 시료저장통을 완전히 밀폐시키고 저장통 하단에는 모세관을 연결할 수 있게하였다. 압축산소 탱크로부터 압력 조정기를 통하여 일정압력의 기체를 시료저장통의 액면 상단

Table 3. Details of needles

Needle No.	Diameter (mm)	Length (mm)	Mass (g)	Density (g/mm ³)
1	1.55	74.46	0.1661	1.1904
2	1.55	74.18	0.1773	1.2593
3	1.56	74.71	0.1910	1.3469
4	1.57	74.21	0.2067	1.4489
5	1.55	74.47	0.3822	2.7389
6	1.57	74.41	0.4941	3.4542
7	6.23	106.15	3.5220	1.1101
8	6.25	93.42	3.1403	1.1206

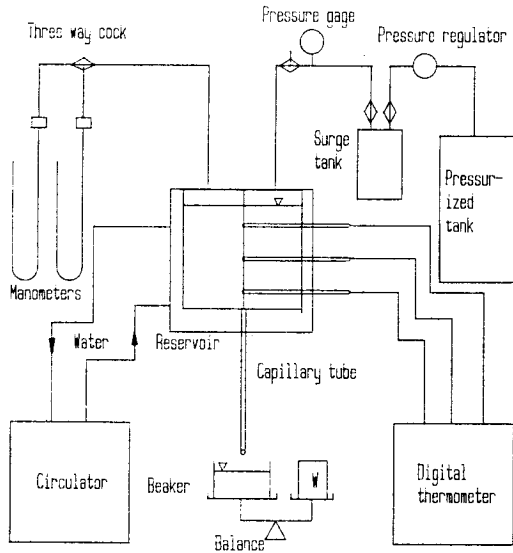


Fig. 3. Schematic diagram of the capillary tube viscometer.

에 공급함으로써 시료저장통의 공기압이 일정하게 유지되도록 조정하였고 시료저장통 상단의 압력은 액주계를 이용하여 측정하였다. 모세관의 하단을 열어 주어진 양의 시료가 흘러 나오는데 요하는 시간을 측정하여 유체의 속도를 결정하였다. 매회 실험마다 저장통에서 흘러나온 유체의 양을 합하여 시료저장통의 액면 위치를 결정하고 상단의 액면 높이를 이용하여 모세관 입구와 출구의 압력차를 산출하였다. 겔보기점도 측정에 사용한 모세관은 호칭치수 1 mm인 스테인리스 강관으로 상단에 연결용 수나사를 부착하여 시료저장통에 연결할 수 있도록 하였다. 압력조정기는 모세관을 통하여 실험유체가 흘러나갈 때 상단의 공기압력을 보충하는데 사용하였고 2개의 U자 액주계에는 물과 수은을 각각 사용하여 공급된 압력이 낮을 때는 물 액주계를 사용하고 압력이 높을 때는 수은 액주계를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 종말속도, 전단응력 및 전단률

낙구식 점도계 실험장치의 신뢰성을 확인하기 위

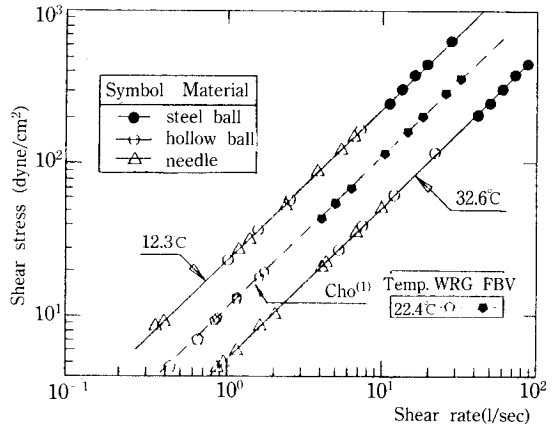


Fig. 4. Shear stress vs. shear rate for 92% glycerin.

하여 뉴턴유체인 글리세린을 12.3°C와 32.6°C에서 서로 다른 크기의 강구와 속이 빈 알루미늄 구 및 니들에 대한 종말속도를 측정하였다. 측정된 종말속도는 유체를 둘러싸고 있는 벽의 영향을 받으므로 구와 니들에 대한 종말속도는 Cho 등[7]과 Park[8]이 제시한 식을 이용하여 무한유체에서의 종말속도를 구하였다.

$$\text{구} : V = V_{ms} \quad D/D_c \leq 0.02 \quad (1a)$$

$$V = V_{ms} / [1.0148 - 0.7375D/D_c] \quad D/D_c > 0.02 \quad (1b)$$

$$\text{니들} : V = V_{ms} / ECF \quad (2)$$

구[1]와 니들[8]의 전단응력과 전단률은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\text{구} : \dot{\gamma}_n = \frac{2V}{D} \quad (3a)$$

$$\tau_n = \frac{1}{9} g D(\rho_s - \rho) \quad (3b)$$

$$\text{니들} : \dot{\gamma}_n = \frac{2V}{D} \frac{1 - k^2}{k^2(1 - \ln k) - (1 + \ln k)} \quad (4a)$$

$$\tau_n = \frac{k^2 - 1}{1 + k^2} \frac{gD(\rho_s - \rho)}{4} \quad (4b)$$

식 (3)과 식 (4)를 이용하여 구한 전단응력과 전단률의 관계를 Fig. 4에 표시하였다. 측정된 전단률은 넓은 온도범위에서 Cho[1]가 실험한 측정치와 동일한 기울기를 나타내며 온도변화에 대한 글리세

린의 점성계수를 실험온도 범위에서 표준치[10]와 비교한 측정오차는 대략 3% 정도이다. 지금까지 발표된 연구결과를 종합해보면 구를 이용하는 경우에는 종말속도가 크기 때문에 전단률이 4(1/sec) 이하인 낮은 전단률에 해당하는 점성계수의 측정이 불가능 하였으나 본 실험에서는 속이 빈 알루미늄 구와 니들을 이용함으로써 전단률이 1(1/sec) 이하인 낮은 범위에서도 점성계수 측정이 가능하였다.

식 (1)의 종말속도로부터 산출한 레이놀즈수와 항력계수의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 10°C에서 30°C 범위에 강구와 속이 빈 알루미늄 구의 밀도를 변화시켜 측정할 실험결과들은 Stokes 이론과 잘 일치하는 것을 알 수 있으며 강구보다 속이 빈 알루미늄 구를 이용함으로써 대단히 낮은 레이놀즈수의 측정이 가능하다.

3.2 비뉴턴유체의 평균 전단응력과 평균 전단률

비뉴턴유체 속에서 낙하하는 구와 니들에서의 평균 전단응력과 평균 전단률을 산출하기 위한 유동 특성상수 n은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[7, 8].

$$\text{구} : n = \frac{d(\ln \tau_w)}{d(\ln \dot{\gamma})} \tag{5}$$

$$\text{니들} : n = \frac{d[\ln(\rho_s - \rho)]}{d(\ln V)} \tag{6}$$

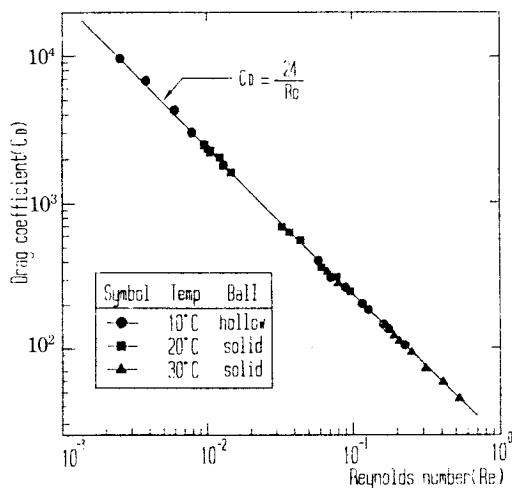


Fig. 5. Drag coefficient vs. Reynolds number for 92% glycerin.

구를 사용할 때 비뉴턴유체의 평균 전단률과 평균 전단응력은 각각 뉴턴유체의 전단률과 전단응력 그리고 수정계수 C₁과 C₂를 이용하여 구할 수 있다[1].

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

$$\tau_{av} = C_2 \tau_n \tag{7b}$$

니들에서의 평균 전단률과 평균 전단응력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[8].

$$\dot{\gamma}_{av} = \left(\frac{2V}{D}\right)k \left(\frac{F^2}{k} - k\right)^{1/n} - P^+ \tag{8a}$$

$$\tau_{av} = \left(\frac{k^2}{F^2} - 1\right) \frac{gD(\rho_s - \rho)}{4} \tag{8b}$$

낙구식 점도계에서 걸보기점도는 평균 전단응력에 대한 평균 전단률로 나타낼 수 있으며 Separan AP-273 1000 wppm과 2000 wppm 용액에서 구와 니들을 이용하여 측정된 걸보기점도와 평균 전단률의 관계를 Fig. 6에 표시하였다.

Fig. 6에서 속이 빈 알루미늄 구와 니들을 이용한 걸보기점도와 영 전단률 점성계수와의 관계는 잘 일치하며 니들을 이용하면 낮은 전단률 점성을 측정할 수 있다.

3.3 특성이완시간

낙구식 점도계에서 속이 빈 알루미늄 구 또는 니들을 이용하여 낮은 전단률에서의 영 전단률 점성계수를 측정하고 모세관 점도계에서 높은 전단률 점성계수를 측정하면 점탄성유체의 특성이완시간을 구할 수 있다. 점탄성유체의 특성이완시간을 나타

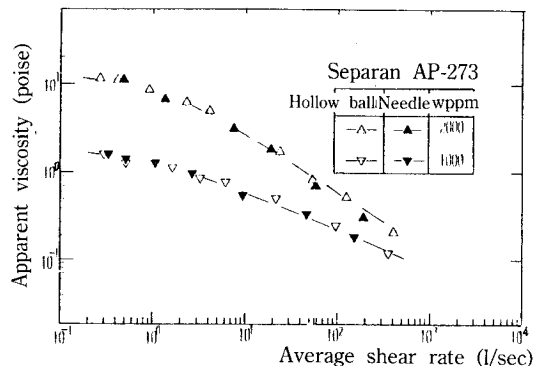


Fig. 6. Apparent viscosity vs. average shear rate for aqueous polymer solutions.

내는 여러 가지 모델[12]은 Table 4와 같다.

제안된 유변학적 모델은 영 전단률 점성계수만을 측정하여 특성이완시간을 결정하는 Eyring 모델, Sutterby 모델이 있으며 영 전단률 점성계수와 무한 전단률 점성계수를 이용한 Powell-Eyring 모델, Chang-Darby 모델[11]이 있다. Separan Ap-273 300 내지 2000 wppm 용액을 이용하여 측정된 실험결과를 제안된 모델에 의하여 산출한 특성이완시간은 Table 5와 같다. 모든 모델에서 특성이완시간은 농도가 증가할수록 증가하며 동일한 농도에서 영 전단률 점성계수와 무한 전단률 점성계수를 이용하여 산출한 특성이완시간은 영 전단률 점성계수만을 이용한 경우보다 훨씬 크게 나타난다. 점탄성유체의 유동에 많이 이용되는 Deborah수나 Weissenberg 수는 특성이완시간에 따라 선형적으로 변화하므로 각 유동모델에서 산출된 특성이완시간은 무차원수에 크게 영향을 미치게된다. 유체가 열교환기나 관내 유동에 이용될 때 전단률이 큰 것을 고려하면 Powell-Eyring 모델 또는 Chang-Darby 모델이 공학적으로 실용성 있는 모델로 판단된다. Fig. 7은 1000 wppm 이하 용액의 특성이완시간을 Powell-Eyring 모델에서 계산된 값으로 표시하였으며 300,500

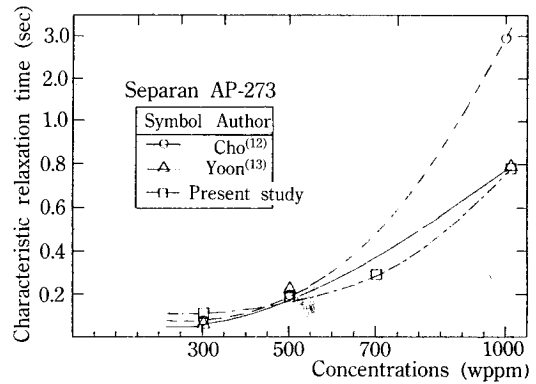


Fig. 7. Characteristic relaxation times for aqueous polymer solutions.

wppm의 낮은 농도 용액에서는 영 전단률 점성계수와 무한전단률 점성계수의 차이가 크지 않기 때문에 Cho 등[12]과 Yoon 등[13] 그리고 본 실험에서의 특성이완시간은 거의 같은 크기의 위수를 나타내고 있으나 농도가 증가할수록 영 전단률 점성계수와 무한전단률 점성계수의 차이가 증가함으로 특성이완시간의 차는 크게 나타난다.

3.4 특성확산시간

Table 5. Characteristic relaxation times (sec)

Investigator	300 wppm	500 wppm	700 wppm	1000 wppm	1500 wppm	2000 wppm
Eyring	0.079	0.095	0.119	0.763	1.020	3.200
Sutterby	0.054	0.082	0.102	0.355	0.854	2.500
Powell-Eyring	0.237	0.255	0.820	1.073	1.430	6.830
Chang-Darby	0.062	0.115	0.227	0.909	1.100	5.430

Table 4. Rheological models for characteristic relaxation time

Models	Viscosity(η)	Characteristic time(sec)
Eyring ^[1]	$\eta = \eta_0 \left[\frac{\sinh^{-1} \lambda_1 \dot{\gamma}}{\lambda_1 \dot{\gamma}} \right]$	λ_1
Sutterby ^[12]	$\eta = \eta_0 \left[\frac{\sinh^{-1} \lambda_1 \dot{\gamma}}{\lambda_1 \dot{\gamma}} \right]^\alpha$	λ_1
Powell-Eyring ^[12]	$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \left[\frac{\sinh^{-1} \lambda_1 \dot{\gamma}}{\lambda_1 \dot{\gamma}} \right]^\alpha$	λ_1
Chang-Darby ^[11]	$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{(1 + \lambda_1^2 \dot{\gamma}^2)^\alpha}$	λ_1

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

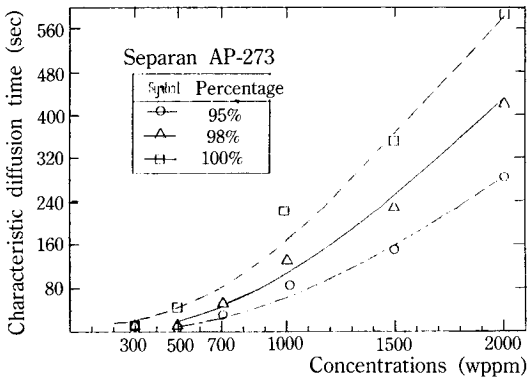


Fig. 8. Characteristic diffusion times for aqueous polymer solutions.

점탄성유체의 특성확산시간은 낙구식 점도계에서 구를 떨어뜨리는 시간간격을 변화시킬 때 구할 수 있다. Cho 등[7]은 Separan AP-273 3500과 5000, 10000 wppm 용액의 실험결과에서 특성확산시간을 정상치의 95%에 도달되는 시간으로 정의하였다. 본 실험에서는 지금까지 문헌에 발표된 농도보다 낮은 농도 용액(300-2000 wppm)에서의 실험결과를 얻었으며 특성확산시간을 정상치의 95%, 98% 그리고 100%되는 시간으로 구분하여 Fig. 8에 표시하였다. 특성확산시간은 용액의 농도가 증가할수록 크게 증가한다. 특성확산시간이 구를 이용할 때 나타나는 점탄성유체의 물리적성질 이라면 점성계수의 정상치와 95%에 도달하는 시간간격에 너무나 큰 차이가 나타나는 것을 고려할 때 정상치와 2% 오차를 인정하여 98%에 해당되는 측정시간을 특성확산시간으로 정하는 것이 타당하다고 판단된다. 시료실린더에 니들을 1분, 3분, 5분, 10분, 20분 간격으로 떨어뜨린 후 회수하여 다시 시료실린더에 떨어뜨려 측정된 종말속도는 니들을 떨어뜨리는 시간간격에 무관하게 거의 일정한 값을 나타낸다. 이것은 구를 떨어뜨린 실험결과와 전혀 다른 현상이다. 따라서 점탄성유체의 특성확산시간은 구를 이용할 때 측정할 수 있다. 니들을 사용하면 특성확산시간에 무관하게 짧은 시간안에 낮은 전단률 점성을 측정할 수 있다. 동일한 실험장치에서 구와 니들을 떨어뜨릴 때 측정된 종말속도가 다르게 나타나는 현상에 대하여 보다 정확한 실험적 연구가 요구된다.

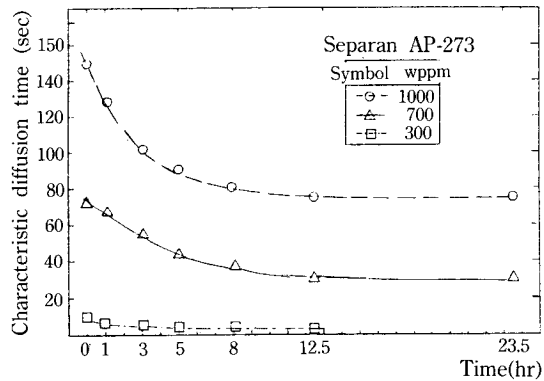


Fig. 9. Characteristic diffusion times vs. running time for aqueous polymer solutions.

3.5 퇴화로 인한 특성시간의 영향

점탄성유체의 퇴화로 인한 물리적 성질의 변화를 측정하기 위하여 300, 700, 1000 wppm의 폴리머 용액을 장시간 유동 및 열전달 실험장치에 재순환시켜 가면서 일정한 시간간격으로 시료를 채취하여 낙구식 점도계와 모세관 점도계로 영 전단률 점성계수와 무한전단률 점성계수를 측정하였다. 시간간격에 따라 구를 떨어뜨린 후 점성계수가 정상치에 도달한 측정시간의 98%에 해당되는 측정시간을 특성확산시간으로 결정하여 용액의 퇴화로 인한 특성확산시간의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 퇴화가 진행될수록 특성확산시간은 계속하여 감소하게 되며 재순환시키는 과정에서 12시간 이상 경과되면 퇴화의 정도가 작아져서 특성확산시간이 크게 변하지 않는다. 특성확산시간이 크게 변하지 않는 것은 점성과 탄성을 포함하고 있는 점탄성유체중 탄성의 영향이 거의 퇴화된 것으로 생각된다. 농도가 낮은 용액에서도 특성확산시간이 존재함을 확인할 수 있으며 퇴화현상은 초기에 급격하게 일어나다가 시간이 경과되면 퇴화의율이 감소되고 퇴화가 진행되면 특성확산시간이 감소하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

낙구식 점도계와 모세관 점도계에서 폴리머용액 (Separan AP-273)의 영 전단률 점성과 무한전단률 점성을 측정하여 특성이완시간을 산출하고 낙구식 점도계에 밀도를 변화시킨 속이 빈 알루미늄 구와

니들을 사용하여 종말속도를 측정함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 낙구식 점도계에 속이 빈 알루미늄 구와 니들의 밀도를 용액의 밀도에 가깝도록 조절하여 사용하면 낮은 범위의 평균전단률과 영 전단률점성을 측정할 수 있다.

2. 유변학적 모델중 영 전단률 점성계수와 무한 전단률 점성계수를 이용한 Powell-Eyring 모델은 가장 큰 특성이완시간을 나타낸다.

3. 낙구식 점도계에 구를 이용할 때는 점탄성유체의 특성확산시간이 존재 하지만 니들을 사용하면 특성확산시간이 나타나지 않는다.

4. 폴리머용액의 낮은 농도에도 특성이완시간과 특성확산시간이 존재하고 퇴화가 진행되면 특성이완시간과 특성확산시간은 계속하여 감소한다.

Nomenclature

- D : 구와 니들의 지름
- D_c : 실린더 지름
- ECF : 끝부분 수정계수
- F : 최대 속도의 위치
- g : 중력의 가속도
- k : 지름비 (D/D_c)
- n : 유동 특성상수
- p^+ : power law 유체의 무차원 압력
- V_{ms} : 측정된 종말속도
- V : 무한유체 속에서의 종말속도

Greek Letters

- $\dot{\gamma}$: 전단률
- η : 겔보기 점도
- η_0 : 영 전단률 점성
- η_∞ : 무한 전단률 점성
- λ_1 : 특성이완시간(characteristic relaxation time)

- λ_2 : 특성확산시간 (characteristic diffusion time)
- ρ : 유체의 밀도
- ρ_s : 구와 니들의 밀도
- τ : 전단응력

하첨자

- av : 평균치
- n : 뉴턴유체

References

1. Y.I. Cho, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Chicago Circle, (1979).
2. Y.I. Cho and J.P. Hartnett, Letters in Heat and Mass Transfer, **6**, 335-342 (1979).
3. 황태성, 박사학위논문, 단국대학교 대학원, (1988).
4. 엄정섭, 박사학위논문, 단국대학교 대학원, (1989).
5. 전찬열, 유상신, 대한기계학회 논문집, 제 14권 제 1호, 241-250 (1990).
6. D. Kanchanalakshana and A.J. Ghajar, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, **13**, 219-233 (1986).
7. Y.I. Cho, J.P. Hartnett and W.Y. Lee, *J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **15**, 61-74 (1984).
8. N.A. Park, Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering Dept., State University of New York at Stony Brook, (1984).
9. N.A. Park, Y.I. Cho and . Irvine, *J. of Non-Newtonian Fluids Mechanics*, To be Published.
10. H.P. Robert and H.C. Cecil, "Chemical Engineering Handbook", Fifth Edition, McGraw-Hill, New York, 3-87 (1973).
11. H.D. Chang and R. Darby, *AIChE J.* **30**, 274-280 (1984).
12. Y.I. Cho and J.P. Hartnett, Handbook of Heat Transfer Applications, McGraw-Hill, New York, 2-5-19 (1986).
13. H.K. Yoon and A.J. Ghajar, *Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf.*, McGraw-Hill, New York, 937-942 (1986).