

PIV 시스템을 이용한 폴리머 용액의 특성시간에 관한 실험적 연구

이재수[†] · 전찬열* · 박종호**

A Study of the Characteristics Times of Polymer Solutions Using the PIV System

Jae-Su Lee, Chan-yeal Jeon, Jong-Ho Park

Key Words: Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Apparent Viscosity(겔보기 점도), Memorial Fluid(기억유체)

Abstract

Characteristics diffusion time of viscoelastic fluids are determined experimental results of terminal velocity by using the falling ball viscometer.

The characteristics diffusion time of viscoelastic fluids are determined with help of the sphere device which is installed to return the dropped sphere from the bottom of the test cylinder without disturbing the working fluids. Terminal velocity of the sphere the reason why experimental of characteristics diffusion time that it is have an effect on the time interval of the measuring. Viscous of the fluid the temperature changed in order to have an effect on temperature and terminal velocity of the ball it becomes larger the possibility of knowing.

A result of visualization for flow phenomena of around the sphere uses the PIV and the density of the polymer solution which it appears 2000wppm is to a case which is the right and left becomes symmetry to be it will be able to confirm and according to the time interval, to observed velocity vector of same at first drop the sphere.

1. 서 론

1. 점탄성 유체의 점성특성

점탄성 유체가 매끈한 원형관 속을 난류상태로 흐를 때 레이놀즈(Reynolds) 수와 마찰계수(friction factor)의 관계를 좌표에 나타내면 마찰계수는 동일한 Reynolds 수에서 뉴턴유체에 비하여 크게 감소하며, 그 차이는 뉴턴유체에 비하여 최

대 80% 정도까지 이른다고 보고 되어 있다.⁵⁾ 저항감소 현상을 나타내는 비뉴턴유체는 열전달 감소현상도 나타내는데 뉴턴유체와 비교할 때 열전달 계수는 90% 정도의 감소 현상을 나타낸다.

폴리머 용액의 유변학적 특성은 용액의 용해도와 폴리머의 분자량 등에 의해 크게 영향을 받으므로 폴리머를 이용하여 비뉴턴유체를 만들 때 폴리머의 농도변화에 따른 물리적 성질은 공학에 적용할 수 있을 정도로 체계화 되어 있지 못하고 있는 것이 실정이다. 그리고 주어진 온도와 압력에서 점탄성 유체의 점성은 전단률에 따라서 변화되므로 유동과 열전달 특성에 관계되는 모든 유변학적 특성은 실험이 진행되고 있는 상태에서 측정되어야 한다. 따라서 점탄성 유체의 물리적 성질을 정확히 결정할 수 있는 실험적 연구⁵⁾와

[†] 충남대학교 기계공학과

E-mail : holyrealm@cnu.ac.kr

* 중부대학교 메카트로닉스공학과

** 충남대학교 기계공학과

유변학적 모델의 검토가 요구되고 있으며, 폴리머 용액의 유변학적 특성을 이용한 새로운 무차원수를 도입할 때 물리적 현상이 명확히 설명되어 질 수 있을 것이다.

2. 점성 측정장치

낙구식 점도계는 점성이 큰 유체의 점성계수를 측정하는 장치로 널리 이용되어 왔다.²⁾ 그러나 낙구식 점도계에서 액체 중에 떨어지는 구(ball)의 종말속도를 측정하면 높은 전단률 영역의 점성계수는 쉽게 측정할 수 있으나 전단률이 낮은 영역의 실험에는 구가 주어진 구간을 통과하는 시간을 측정하는데 어려움이 있어 낙구식 점도계가 많이 이용되지 못하고 있는 것이 실정이다.¹⁾

2. 이 론

1. 구 주위의 흐름

비 압축성 유체의 유동은 다음과 같은 연속 방정식과 Navier-Stokes 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{div } \vec{V} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \left(\vec{V} \cdot \text{grad} \right) \vec{V} \right\} \quad \dots (2.2)$$

$$= -g \text{rad } p + \eta \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{f}$$

Reynolds 수가 대단히 작아서 관성력을 무시할 수 있다면 식은 다음과 같이 된다.

$$\eta \nabla^2 \vec{V} = g \text{rad } p \quad \dots\dots (2.3)$$

이 식은 흐름이 아주 느린 점성유동에 적용할 수 있으며 경계조건은 벽에서 $V_t=0, V_n=0$ 이며 무한히 먼 곳에서 속도는 자유흐름 속도와 같다.

Reynolds 수가 대단히 작은 크리이프 흐름 구역에서 전체항력의 2/3는 점성으로 인한 마찰 항력이며 1/3은 압력에 의한 항력이다. 구가 유체속을 유동할 때 받는 항력을 무차원 계수인 항력계수를 이용하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$F_t = C_D \left(\frac{1}{2} \rho V^2 A \right) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

윗 식으로부터 구 주위를 흐르는 뉴턴 유체의 항력 계수는 Reynolds 수만의 함수로 표시된다.

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

농도가 낮은 폴리머 용액의 점성 측정에서는 Reynolds 수의 범위가 1이상일 경우에는 관성력을 포함시킨 White⁸⁾의 실험식을 이용한다.

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \quad \dots\dots$$

(2.6)

Kanchanalakshana⁷⁾ 등은 식(2.6)을 이용하여 뉴턴 유체의 점성을 결정하였다. 뉴턴 유체의 전단률과 전단응력은 다음과 같다.

$$\dot{\gamma}_n = \frac{2V}{D} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\tau_n = g D (\rho_s - \rho_l) / 9 \quad \dots (2.8)$$

비뉴턴 유체에서 응력과 변형률은 다음과 같은 Power law 모델로 나타낼 수 있다.

$$\tau_{av} = m (\dot{\gamma}_{av})^n \quad \dots\dots\dots$$

(2.9)

Cho⁴⁾는 수정계수 C_1 과 C_2 를 이용하여 비뉴턴 유체의 평균 전단률과 평균 전단응력을 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$\dot{\gamma}_{av} = c_1 \dot{\gamma}_n \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

$$\tau_{av} = c_2 \tau_n \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Cho⁴⁾는 뉴턴 유체의 크리이프 흐름 구역에서 전항력에 대한 근사해를 다음과 같이 나타내었다.

$$5.7143 \leq D_r / \pi \eta U_\infty R \leq 6.2222 \quad \dots (2.12)$$

식(2.12)는 엄밀해인 $F_t = 6\pi\eta VR$ 에 비하여 상한과 하한에서 3.7%와 4.8%의 오차를 나타내므로 Cho⁴⁾는 수정계수 C_1 과 C_2 의 상한과 하한을 Tomita가 제시한 수정된 유동함수를 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

상한값(Upper Bound)

$$C_1 = -1.731 + 41.28n - 116.0 n^2 + 123.9 n^3 - 46.72 n^4 \quad \dots(2.13a)$$

$$C_2 = 0.2827 + 0.8744n - 0.4526n^2 + 0.7486n^3 \quad \dots(2.13b)$$

하한값(Lower Bound)

$$C_1 = -2.482 + 54.35n - 160.1 n^2 + 178.2 n^3 - 69.04 n^4 \quad \dots(2.14a)$$

$$C_2 = 0.6388 + 0.6418n - 0.4344n^2 + 0.1560n^3 \quad \dots(2.14b)$$

식(2.13)과 식(2.14)의 유동 특성상수 n 은 log-log 좌표에 표시된 전단응력과 전단률의 관계를 이용하여 구할 수 있다.

$$n = -\frac{d(\ln \tau_n)}{d(\ln \dot{\gamma}_n)} \dots\dots\dots (2.15)$$

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

$$n_{app} = \frac{\tau_{av}}{\dot{\gamma}_{av}} \dots\dots\dots (2.16)$$

3. 본 론

1. 점성측정 장치

본 실험에 사용된 측정장치는 헬륨-네온 가스 레이저(He-Ne Gas Laser), 디지털 타이머, 시료 실린더, 항온조로 구성되어 있으며 실린더 속의 유체를 낙하하는 속이 빈 알루미늄 구 등으로 구성되어 있다. Fig. 3.1은 실험장치의 전경을 나타낸 것이고 Fig 3.2는 낙구식 점도계의 계략도를 나타낸 것이다.

헬륨-네온 가스 레이저는 직진 광원을 발생하는 장치로써 본 실험에서는 시료실린더의 상단에서 380mm되는 곳과 480mm되는 곳을 측정구간으로 설정하고 가스 레이저를 각각 1대씩 설치하였으며 가스 레이저 비임이 시료실린더의 중심을 통과하도록 하였다. 구가 레이저가 설치된 구간을 통과할 때 비임을 차단하게 되며 디지털 타이머가 비임을 차단하는 시간간격을 1/1000초에서 60초까지 측정할 수 있도록 제작함으로써 실험의 측정오차를 줄일 수 있도록 하였다.

시료실린더는 길이 770mm이고 안지름 각각 62.98mm, 110mm인 2개의 투명 아크릴 관을 사용하여 제작하였고 항온조 내부에 서로 다른 2개의 실린더를 손쉽게 교체할 수 있도록 시료실린더 끝단에 사각의 플랜지를 부착하고 항온조 내부에 시료실린더와 동일한 크기의 플랜지를 설치하여 볼트와 너트로 체결할 수 있도록 하였다.

2. 실험 방법

지금까지 발표된 연구에서는 종말속도를 측정하기 위하여 지름이 거의 동일한 여러 개의 구를 사용하였으나 본 실험에서는 1개의 구를 사용하여 연속적으로 실험하였다.



Fig. 3.1 Photograph of the falling ball viscometer.

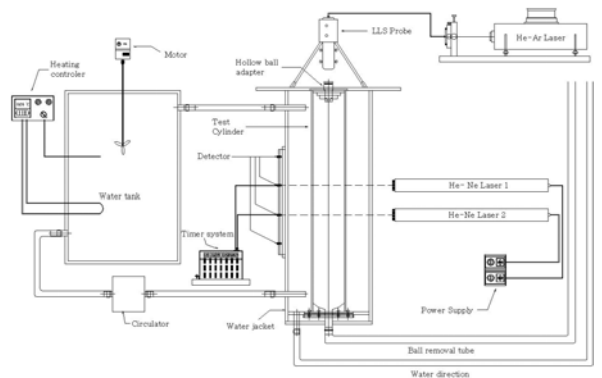


Fig. 3.2 Schematic diagram of the falling ball viscometer.

속이 빈 알루미늄 구는 표면에 미세한 구멍을 뚫고 적당량의 철분을 삽입한 후 구의 표면이 상하지 않도록 실리콘 접착제를 이용하여 접착하여 표면처리 하였다. 유체의 밀도와 거의 가까운 정도까지 속이 빈 알루미늄 구의 밀도를 조절하기 위해 비이커에 시험유체를 넣고 알루미늄 구를 떨어뜨려 보는 방법으로 구의 밀도를 조절하였다.

4. 실험결과 및 고찰

1. 점탄성 유체의 점성특성

본 실험에서는 현재까지 문헌에서 발표된 것보다 낮은 농도인 500wppm에서 2000wppm 용액에 대한 폴리머 용액을 이용하여 실험 결과를 얻었다. 본 실험에서의 특성확산시간은 구를 이용할 때 일어나는 점탄성 유체의 유동특성이므로 점성계수를 정상치의 95%에 도달하는 시간 간격에서 측정한 값으로 정의하는 것은 무리가 있다고 사료된다. 따라서 본 실험에서는 정상치의 97~98%에 해당하는 시간 간격을 특성 확산시간으로 결정하였다.

Fig. 4.1 ~ Fig. 4.3은 실린더 내경을 변화시켜 각각의 실린더에서 처음 구를 떨어뜨린 구의 종말속도를 기준으로 시간 간격에 따른 구의 종말속도의 변화를 나타낸 것이다. 낮은 레이놀즈 수 유동에 있어서 시간 간격에 따른 종말속도의 비를 나타낸 것으로 Fig. 4.1은 실린더 내경이 110 mm인 경우로 폴리머 용액의 농도가 2000wppm, 500wppm일 때 특성확산 시간은 각각 120sec, 40sec로 측정되었고 처음 구를 떨어뜨려 측정된 종말속도를 기준으로 폴리머 용액의 농도가 2000wppm이고 시료 실린더내의 온도가 25°C이며 구의 밀도가 1130.41kg/m³일 때의 시간 간격에 따른 종말속도의 변화와, 폴리머 용액의 농도가 500wppm이고 시료 실린더내의 온도가 30°C이며 구의 밀도가 1106.21kg/m³일 때의 시간 간격에 따른 종말속도의 변화가 나타났다. C.Y.Jeon¹⁾의 결과는 폴리머 용액의 농도가 2000wppm인 경우에 시간 간격에 따른 종말속도의 변화에 의해 나타난 결과로 실험을 통해 제시한 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 C.Y.Jeon¹⁾가 제시한 결과와 종말속도의 변화에 차이가 있는 것은 C.Y.Jeon¹⁾가 실험에 사용한 구의 밀도범위가 약 600kg/m³ ~ 1600kg/m³의 구를 이용해 결과를 제시하였으나 본 실험에 사용된 구의 밀도범위는 1106.21kg/m³ ~ 1609.71kg/m³였다. 따라서 실험에 사용된 구의 밀도범위의 차이로 구의 밀도가 작은 경우의 특성확산 시간을 측정하지 못한 상태에서 실험결과를 제시해 결과적으로는 다소 차이가 있었다.

Fig. 4.2는 실린더 내경이 83mm인 경우로 역시 처음 구를 떨어뜨려 측정된 종말속도를 기준으로 한 종말속도의 변화를 나타낸 것이다. 폴리머 용액의 농도가 2000wppm에서 500wppm까지 낮아질 때 특성확산 시간은 각각 130sec, 60sec, 60sec, 40sec, 40sec로 측정되었고, 구의 밀도를 1130.41 kg/m³로 동일하게 유지한 상태에서 폴리머 용액의 농도를 2000ppm에서 500wppm까지 변화시키고 이 때 각각의 상태에서 용액의 온도를 20°C에서 30°C까지 변화시켜 측정된 것으로 역시 C.Y.Jeon¹⁾가 제시한 것과 유사한 형태를 보이고 있다.

Fig. 4.3은 실린더의 내경이 63mm인 경우로

폴리머 용액의 농도가 2000wppm부터 500wppm으로 낮아질 때 특성확산 시간은 각각 120sec, 90sec, 60sec, 50sec, 40sec으로 측정되었다. 구의 밀도가 1130.41kg/m³와 1106.21kg/m³로 거의 동일한 밀도를 가질 때 시료 실린더내의 온도를 20°C에서 점차적으로 30°C까지 변화시켜 폴리머 용액의 농도를 2000wppm에서 500wppm까지 변화시키면서 실험을 통해 측정된 결과를 나타낸 것이다. C.Y.Jeon¹⁾와 제시한 2000wppm인 폴리머 용액을 이용해 실험한 결과와 마찬가지로 시간 간격에 따른 종말속도의 변화가 유사한 형태를 보이고 있다. 이러한 형태 역시 구의 밀도범위가 넓지 못한 상태에서 실험을 통해 측정된 것으로 구의 밀도범위가 폭넓게 설정된다면 C.Y.Jeon¹⁾가 제시한 결과와 같은 형태의 결과를 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 4.1 ~ Fig. 4.3에서 알 수 있듯이 실린더 내경이 일정한 상태에서 용액의 밀도를 변화시켜 측정된 종말속도의 변화는 용액의 밀도가 낮아수록 특성확산 시간이 짧아지는 것을 알 수 있다.

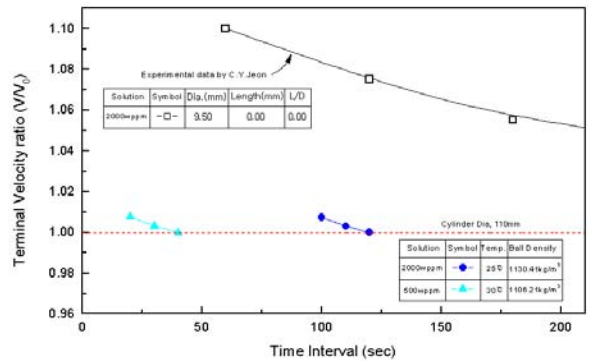


Fig. 4.1 Terminal velocity ratio vs time interval for aqueous polymer solution at cylinder Dia. 110mm.

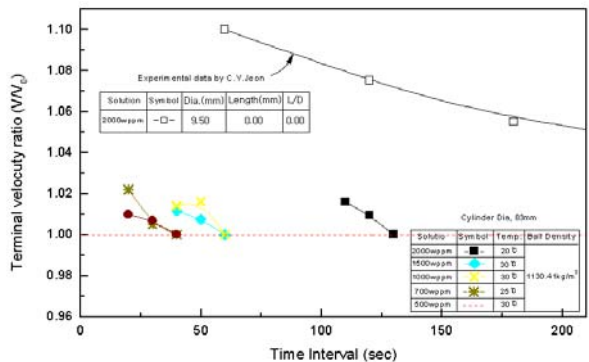


Fig. 4.2 Terminal velocity ratio vs time interval for aqueous polymer solution at cylinder Dia. 83mm.

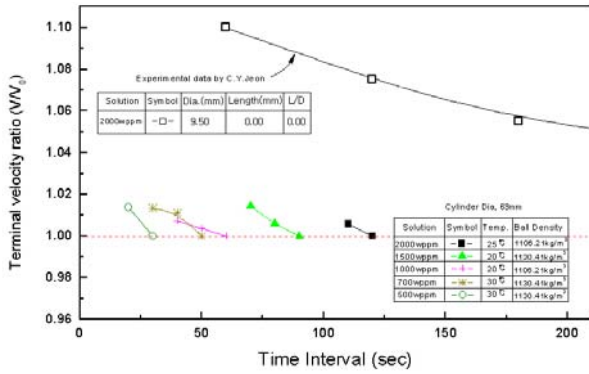


Fig. 4.3 Terminal velocity ratio vs time interval for aqueous polymer solution at cylinder Dia. 63mm.

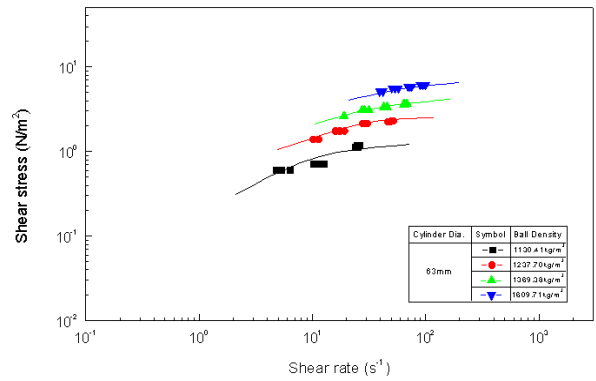


Fig. 4.6 Shear rate vs Shear stress of polymer solution at cylinder Dia 63mm.

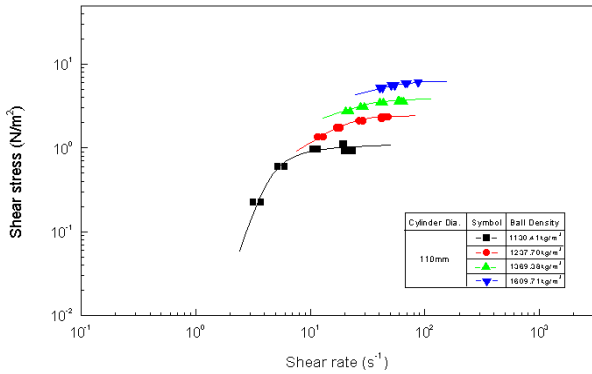


Fig. 4.4 Shear rate vs Shear stress of polymer solution at cylinder Dia 110mm.

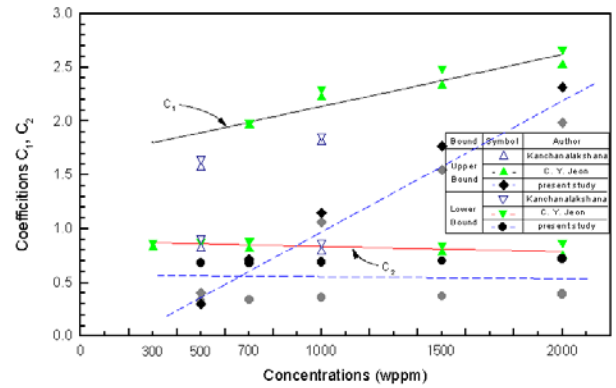


Fig. 4.7 Values of Coefficient C_1 and C_2 for polymer solutions.

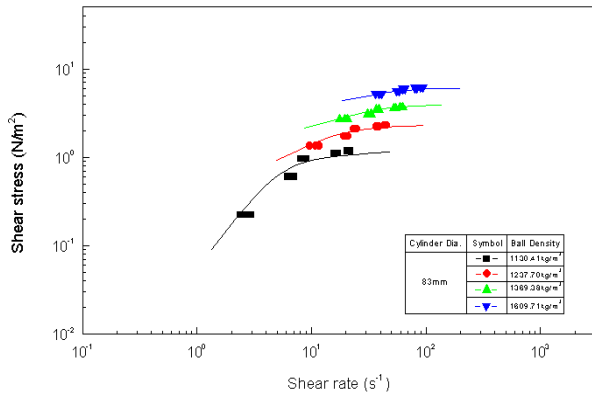


Fig. 4.5 Shear rate vs Shear stress of polymer solution at cylinder Dia 83mm.

비뉴턴 유체의 평균전단률(Average Shear-rate)과 평균전단응력(Average Shear-stress)을 산출하기 위해서는 유동 특성상수(n)를 포함하고 있는 수정 계수 C_1 과 C_2 를 결정해야 한다. 유동 특성상수를 결정하기 위하여 전단률과 전단응력의 관계를 Fig. 4.4 ~ Fig. 4.6에 나타내었다.

Fig. 4.4는 실린더의 직경이 110mm로 고정된 상태에서 구의 밀도를 $1130.41\text{Kg/m}^3 \sim 1609.71\text{Kg/m}^3$ 로 변화시켰을 경우에 전단률과 전단응력을 나타낸 것으로 구의 밀도가 1130.41Kg/m^3 에서 1609.71Kg/m^3 로 변화할 때 전단응력은 일정한 반해 온도가 증가함에 따라 전단률이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 폴리머 용액의 농도가 낮을수록 전단응력은 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4.5와 Fig. 4.6은 실린더 직경이 각각 83mm, 63mm인 경우에서 전단률에 대한 전단응력을 나타낸 것이다. 그림에서 Fig. 4.4와 마찬가지로 구의 밀도가 같으면 전단응력은 일정하고, 전단률이 증가한다. 실린더의 내경을 일정하게 하고 폴리머 용액의 농도를 2000wppm에서 500wppm까지 변화시키면 구의 밀도가 1130.41Kg/m^3 정도에서 전단응력에 대한 전단률은 크게 증가하여 점차 일정해 진다. 이는 물의 밀도가 1

임을 생각해 볼 때 폴리머 용액의 농도가 낮을수록 용액의 밀도와 물의 밀도에 1에 가깝다는 것을 의미하는 것이다.

전단률에 대한 수정계수값의 상한과 하한은 농도가 증가할수록 증가하지만 전단응력에 대한 수정계수값의 상한과 하한은 농도가 증가할수록 감소한다. 수정계수값 C_1 과 C_2 는 용액의 농도를 ξ (wppm)로 표시할 때 Fig. 4.7과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 4.7에 보이는 것과 같이 Kanchanalakshana⁷⁾의 결과와 C.Y.Jeon¹⁾의 결과와 유사한 형태의 경향을 보이고는 있으나 수정계수값 C_1 , C_2 가 Kanchanalakshana⁷⁾과 C.Y.Jeon¹⁾등이 제시한 결과의 범위와 일치하지 않는 것은 구의 밀도범위가 제시한 전체범위 중 일부분에 해당하기 때문에 전단률과 전단응력의 관계를 이용해 유동특성 상수를 구하는 과정에서 n 값이 다르게 나타났기 때문이다. 따라서 본 연구를 계기로 구의 밀도범위를 광범위하게 선정하여 측정범위를 확대해 많은 데이터를 결과로 제시해야 할 것이다.

5. 결 론

폴리머 용액을 이용하여 낙구식 점도계(Falling Ball Viscometer)에서 폴리머 용액의 점성특성을 실험적으로 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 폴리머 용액의 특성확산 시간은 25℃에서 구의 밀도가 0.5139g의 경우에는 120초가 지난 후, 그리고 구의 밀도가 0.7318g의 경우는 20초가 지난 후에 처음 구를 떨어뜨려 측정된 낙하시간과 동일한 시간이 측정되었다.
2. 구의 밀도와 측정 온도가 동일한 경우 실린더의 직경이 클수록 폴리머 용액의 특성확산 시간이 증가하였고, 실린더 직경과 구의 밀도가 동일한 상태에서 온도를 변화시켰을 경우에는 온도가 높을수록 특성확산 시간이 감소하였다.
3. 낙구식 점도계에서 구를 이용하여 점탄성 유체의 특성확산 시간을 측정할 수 있었고, 폴리머의 농도가 증가할수록 특성확산 시간도 증가한다.
4. 수용성 폴리머 용액에 일정한 시간 간격을 두고 구를 낙하시키면 구 주위의 유동장이 변화

하는 것을 알 수 있었으며, 이로써 낙하속도가 변화하게 되고, 점성과 탄성을 함유하는 기억유체(memorial fluid)라는 것을 알 수 있었다.

5. 2000wppm의 경우 구의 좌, 우의 속도벡터가 대칭을 이루었으며, 처음 구를 떨어뜨렸을 때 촬영된 영상을 가시화 한 결과 구의 좌우에 속도벡터가 크게 발달한 것을 알 수 있었고, 120sec가 지난 후 구의 영상을 가시화한 결과 처음 구를 떨어뜨렸을 때의 속도벡터와 동일한 크기의 속도벡터가 나타났다. 이것은 구 주위에서의 벡터의 형상 변화와 시간 간격을 두고 떨어뜨린 구의 종말속도의 상태변화가 유사하다.

참고문헌

- (1) 전찬열, 1990, "球와 니들을 利用한 粘彈性流體의 特性時間과 黏性係數에 關한 研究.", 단국대학교 대학원.
- (2) 전찬열, 이재수, 2003, "폴리머 용액의 측정시간 간격에 따른 종말속도의 실험적 연구", 한국산학기술학회 춘계학술대회논문집, 제4권, 제1호, pp98-101.
- (4) Cho Y. I., Hartnett J. P., 1979, "The Falling Ball Viscometer-A New Instrument for Viscoelastic Fluids." Letters in Heat and Mass Transfer., 6, pp.335-342.
- (5) Cho Y. I., Hartnett J. P., 1979, "Viscoelastic Effects in the Falling Ball Viscometer." Society of Rheology, Boston.
- (6) Cho Y. I., 1979, "The study of Non-Newtonian Flows in the Falling Ball Viscometer." Ph. D. Thesis, University of Illinois at Chicago Circle.
- (7) Kanchanalakshana D., Ghajar A. J., 1986, "An Improved Falling Sphere Viscometer for Intermediate Concentrations of Viscoelastic Fluids." Int. Comm. Heat Mass Transfer., 13, pp.219-233.
- (8) White F. M., 1974, "Viscous Fluid Flow" McGraw-Hill Co., New York.