

## PIV를 이용한 점탄성 유체의 특성 확산시간에 대한 측정

전 찬 열\*

### Experiment of Characteristic Diffusion Time of Viscoelastic Fluid by Particle Image Velocimetry

Chan yeal Jeon\*

**요 약** 폴리머용액의 특성확산시간은 낙구의 종말속도를 측정함으로써 결정할 수 있다. 확산시간은 폴리머 용액의 농도가 증가할수록 증가한다. 입자영상유속장치(PIV)를 이용하여 구주위의 유동현상을 가시화 하였다. 2000 ppm의 경우 30초 간격으로 떨어뜨렸을때의 속도가 0초(처음)나 40초후, 50초후에 떨어뜨렸을때와 비교하여 가장 크게 나타났다. 뉴턴 유체에서는 낙구의 전방과 후방에서 구주위의 유동장이 동일하게 나타났다.

**Abstract** The average diffusion time of a polyacrylamide solution was determined by measuring the terminal velocities of the falling balls. The diffusion time increased as the polyacrylamide concentration increased. The PIV (Particle Image Velocimetry) system was employed to visualize the flow phenomena around balls. For a time interval of 30 seconds in the 2000 wppm, velocity vectors were larger than in case of 0 seconds, 40 seconds and 50 seconds in the falling ball. However, in the Newtonian fluid, flow vsualization around balls were performed at both upstream and downstream of the falling ball.

**Key Words** : PIV(입자영상유속장치), diffusion time, Newtonian fluid

### 1. 서 론

물체가 유체 내부에서 정지하거나 운동을 하면 흐름 방향에 저항력이 발생하고 접촉면에 수직으로 수직항력과 면에 평행한 마찰력이 작용한다. 층류상태에서 응력과 변형률이 비선형 관계를 나타내는 비 뉴턴유체(non-Newtonian fluid)는 일정한 전단응력하에서 시간의 변화에 따라 겔보기 점도가 감소하는 디소트로픽(thixotropic) 유체와 시간이 변함에 따라 겔보기 점도가 증가하는 레오펙틱(rheopectic) 유체가 있고 변형 후에도 가해진 응력이 제거되면 부분적으로 원래의 형태로 되돌아가는 점탄성 유체(viscoelastic fluid)가 있다[1]. 뉴턴유체인 용매에 고분자 폴리머를 미소량 첨가하여 만든 폴리머 용액은 점탄성 유체의 특성과 저항 감소 현상은 물론 뉴턴 유체와는 전혀 다른 특성을 나타내므로 이들 유체의 유변학적 특성에 관한 많은 연구가 진행되고 있다[2-3].

Kanchanalakshana 등[4]은 낙구식 점도계에서 강구 대신 속이 빈 알루미늄 구(hollow aluminium ball)에

미세한 구멍을 뚫어 적당량의 물을 투입하고 구의 밀도를 조절하여 500 wppm~1000 wppm인 낮은 농도 용액에서의 점성을 측정함으로써 전단률이 2(1/sec) 이상인 영역에서의 점성을 측정하였으나 영 전단률 점성계수와 점탄성 유체의 특성 시간은 결정하지 못하였다. Cho 등 [5]은 점탄성 유체인 Separan AP-273 용액의 2000 wppm 이상인 용액에서의 점성 특성을 낙구식 점도계로 측정하였으나 유동 및 열전달 특성 연구[6]에 이용되는 낮은 농도인 100 wppm~500 wppm 용액의 실험에서는 구의 이동시간이 1/100~5/100초 범위의 짧은 시간내에서 이동하므로 스톱워치를 이용한 실험에서는 측정상의 어려움으로 Weissenberg rheogoniometer와 모세관 점도계를 이용하였다. 낙구식 점도계에서 점탄성 유체의 점성특성을 측정할 때 처음에 구를 떨어뜨린 후 10초, 20초, 30초, 1분 등의 일정한 시간 간격에 따라 처음 떨어뜨린 구를 회수하여 다시 떨어뜨리면 시간 간격에 따라 종말 속도가 서로 다르게 측정되는 현상을 알 수 있다. 일정한 시간 간격에 따라 떨어뜨려 측정된 종말 속도가 처음 구를 떨어뜨릴 때의 종말 속도와 같은 값이 되는데 요하는 시간 간격, 즉 측정된 종말 속도가 시간 간격의 영향을 받지 않는 시간을 특성 확산 시

\*중부대학교 정보공학부 정보기계공학전공  
Tel : 041-750-6754

간(characteristic diffusion time)이라고 정의한다. 특성 확산 시간은 낙구식 점도계에서 구를 떨어뜨려 실험적으로 결정할 수 있으나 실험 장치 및 실험 방법의 어려움으로 인하여 많은 결과가 발표되어 있지 않았다. 점탄성 유체인 Separan AP-273 수용액을 사용하여 특성 확산 시간을 측정한 연구 결과들을 보면 Cho[5]는 농도 3500wppm 용액에서, Kwack 등[7]은 농도 2000wppm 용액에서 구를 이용한 종말속도의 측정 결과로부터 특성 확산 시간이 존재하는 것을 실험적으로 측정하였다.

본 연구에서는 유동마찰 및 열전달 감소현상 연구에 많이 이용되는 polyacrylamide Separan AP-273수용액(300 wppm, 500 wppm, 2000 wppm)을 이용하여 낮은 레이놀즈 수의 유동현상에 대한 물리적인 특성을 규명하고 속이 빈 알루미늄 구의 밀도를 실험유체와 거의 동일한 정도로 유지할 수 있도록 구속에 철분을 삼입하고 구의 밀도를 조절하여 측정하고자 한다. 측정장치 중 시료 실린더 내부에 있는 유체를 교란시키지 않고 떨어뜨린 구를 회수하여 다시 떨어뜨릴 수 있는 실험장치를 제작하므로써 낮은 농도 용액의 특성 확산 시간을 정확히 측정하였다. 또한, 동일한 구를 이용하여 측정구간을 측정할 때 측정시간의 간격에 따라 측정시간이 변화하게 되며 이러한 변화에 대한 영향을 규명하기 위하여 유동가시화 장치인 PIV 시스템과 CACTUS 2000 소프트웨어를 이용하였다[8].

## 2. 이 론

### 2.1 구 주위의 점성유동

체적력이 없는 정상 비압축성 점성 유동에서 유동의 속도가 매우 작은 경우에는 관성항은 점성항이나 압력항에 비하여 매우 작으므로 낮은 Reynolds 유동에 대한 지배방정식은 관성항이 무시되므로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \tag{1}$$

$$\nabla p = \eta \nabla^2 \vec{v} \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)를 Stokes 방정식이라고 하며 낮은 Reynolds 유동에서는 점성항이 압력항과 평형을 이룬다. 반경이 R인 구가 유체속에서 크리이프 운동을 할 때 구에 작용하는 전향력  $D_r$ 는 표면응력(압력과 점성응력) 분포의  $U_\infty$  방향의 성분을 고려하면 다음과 같다.

$$D_r = -\int_{\pi}^0 \tau_{r\theta}|_{r=R} \sin \theta dA - \int_{\pi}^0 p(R) \cos \theta dA \tag{3}$$

$$(\text{단, } dA = 2\pi R^2 \sin \theta d\theta)$$

$$D_r = D_v + D_p = 4\pi\mu U_\infty R + 2\pi\mu U_\infty R = 6\pi\mu U_\infty R \tag{4}$$

식 (4)는 Stokes의 항력으로 점성저항과 압력저항으로 구분된다. 점성저항이 전체 저항의 2/3 즉, 67%로서 대부분의 저항은 점성저항이 차지한다. 이러한 결과는 높은 Reynolds 유동의 경우 압력 저항이 전체 저항의 대부분을 차지하는 결과와 매우 대조적이며 항력계수  $C_D$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_D = \frac{2D_r}{\rho U_\infty^2 \pi R^2} = \frac{24}{Re} \tag{5}$$

## 3. 실 험

### 3.1 실험 장치

본 실험을 위하여 제작된 측정장치의 주요 구성부분은 구를 떨어뜨리는 시료실린더와 일정온도를 유지하기 위한 항온조 등이며 시료 속에서 낙하하는 구 주위의 유동장에 대한 계측과 가시화된 영상을 처리하기 위하여 He-Ar레이저, 화상 입력장치인 8 mm캠코더와 디지털 카메라 및 이미지보드와 레코더 등으로 구성되어 있다. 실험에 사용된 He-Ar 레이저는 낙하하는 구 주위에서 유동장을 발생시키는 평면광원용 장치이며 8 mm캠코더와 6 mm의 디지털 카메라는 유동장을 녹화하고 반복 처리하는 작업을 통하여 구 주위의 가시화된 데이터를 처리하였다. 실험에 사용된 시료실린더는 길이 800 mm, 안지름이 각각 55.78 mm, 62.98 mm, 93.96 mm인 3개의 투명 아크릴 관으로 제작하고 실린더의 지름은 1/100 mm까지 측정할 수 있는 내경 마이크로 미터(측정범위: 0~350 mm, Mitutoyo Co.)를 이용하여 측정하였다. 실험에 사용된 속이 빈 알루미늄 구(미국 Industrial Tevtonics Co.제품)의 밀도를 조절하기 위하여 알루미늄 구에 미세한 구멍을 뚫고 미소량의 철분을 삼입한 후 저울(model: HL 52, Meller Co.)을 이용하여 1/10000 g까지 구의 무게를 조절하였으며 표면이 상하지 않도록 구멍이 뚫어진 부분에 실리콘 접착제를 접착하여 표면처리를 하였다. 실험에 사용된 속이 빈 알루미늄 구는 1004.7 kg/m<sup>3</sup>~1602.0 kg/m<sup>3</sup>인 밀도의 범위를 사용하였다.

### 3.2 실험 유체

뉴턴유체인 농도 99%의 글리세린(대전화금(주)제품)을 이용하여 구주위의 유동현상을 비교하였으며 비 뉴턴 유체로는 점탄성 유체인 Polyacrylamide Separan AP-

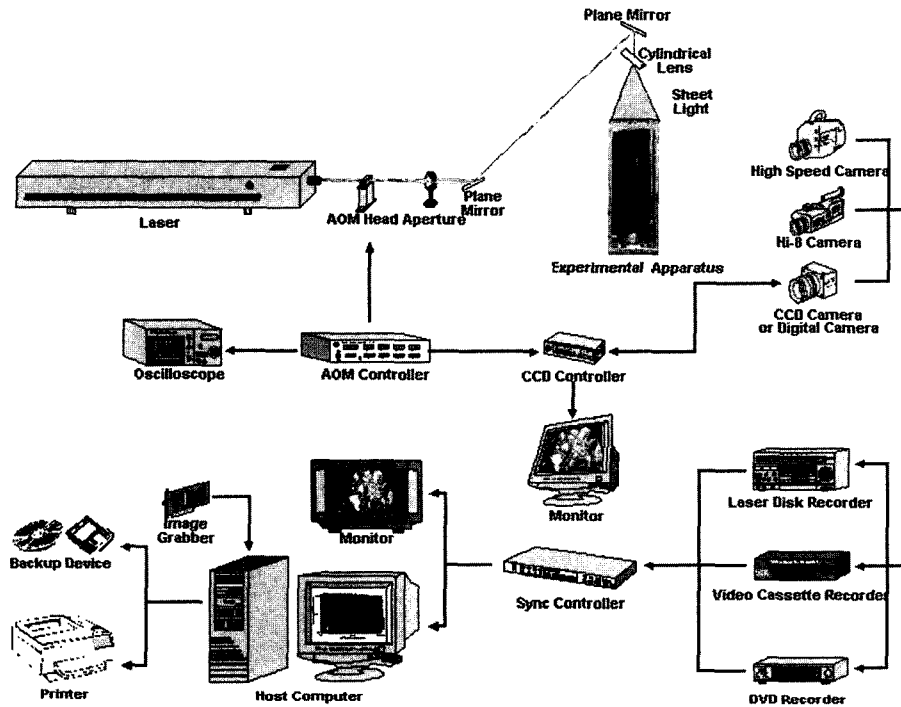


Figure 1. Schematic arrangement of PIV.

273(Dow Chemical Co. 제품) 수용액으로 저농도에서 비교적 퇴화 현상이 적고 저항감소 효과가 대단히 좋은 것으로 알려져 있는 수용성 폴리머를 사용하였다.

### 3.3 유동의 가시화

유동장에서 유체입자의 거동을 가시화하기 위해서는 추종성이 우수한 입자를 선택하여야 하며 입자의 선별은 광원과 함께 PIV계측 정도에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 수중에는 작동수와 비중이 유사한 구형입자를 사용하여야 하며 그 크기는 계측 유동장의 공간스케일을 충분히 재현할 수 있도록 비중이 1.02전후이며 물과 비중차가 작은 PolyVinyl Chloride 입자를 사용하였다. 레이저 광원으로 계측영역에 sheet light를 형성하면 산란광이 발생하므로 sheet light가 형성된 부분을 제외한 모든 부분에 대하여 검은 색 코팅지로 부착하여 산란광을 제거하였으며 계측영역에서 나타날 수 있는 잡음성분을 최소화하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 특성 확산시간

점탄성 유체의 특성확산시간은 낙구식 점도계에서 구를 떨어뜨리는 시간간격을 변화시켜 구할 수 있다.

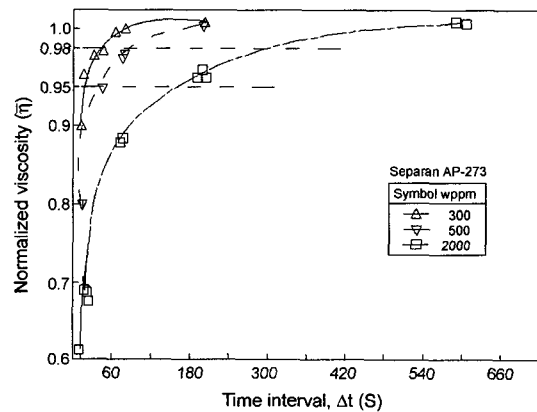


Figure 2. Normalized viscosity & time interval for aqueous polymer solutions.

처음 떨어뜨린 구의 종말속도를 기준으로 구를 떨어뜨리는 시간간격에 따른 점성의 변화를 표준화점성(normalized viscosity)으로 나타낼 수 있다. 동일한 밀도의 알루미늄 구를 떨어뜨릴 때 처음에 떨어뜨린 구의 종말속도와 동일한 속도에 도달할 때까지의 시간간격을 측정하여 특성 확산시간(characteristic diffusion time)을 결정하였다. 측정된 종말속도를 이용하여 점성계수를 결정하고 그 결과를 측정시간 간격으로 나타내면

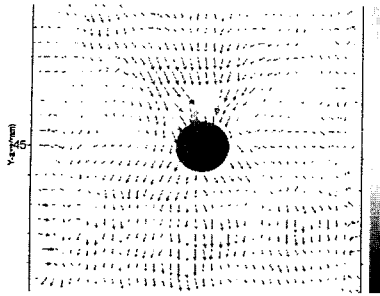


Figure 3. Velocity flow field for 2000 wppm polymer solution at 30°C (t = 0).

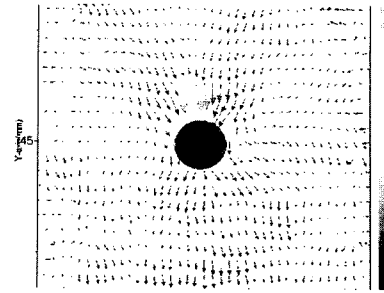


Figure 5. Velocity flow field for 2000wppm polymer solution at 30°C (t = 40).

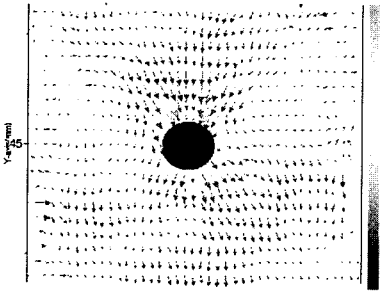


Figure 4. Velocity flow field for 2000wppm polymer solution at 30°C (t = 30).

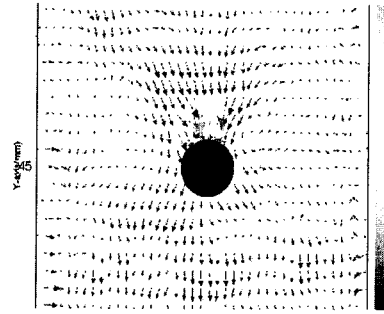


Figure 6. Velocity flow field for 2000wppm polymer solution at 30°C (t = 50).

Figure 4와 같다.

Cho 등[5]은 Separan AP-273 3500과 5000, 10000 wppm 용액의 실험결과에서 특성확산시간을 정상치의 95%에 도달되는 시간으로 정의하였다. 그러나 본연구에서 정상치의 95% 또는 98%에 도달하는 시간을 특성 확산 시간으로 정할 때 1000 wppm의 경우 90 sec와 180 sec로 거의 2배가되며 500 wppm의 경우 10 sec와 30 sec로 3배에 이르게 된다. 점탄성 유체의 특성 확산 시간은 용액의 농도가 증가할수록 크게 증가하며 물리적 성질을 나타내는 주요한 특성의 하나이므로 정상치의 2%오차를 인정하여 98%에 해당하는 측정시간을 특성확산시간으로 정하는 것이 타당하다고 판단된다.

#### 4.2 가시화 현상

구 주위의 유동현상을 가시화하기 위하여 농도 2000 wppm인 폴리머용액에서 구의 밀도가  $1241.6 \text{ kg/m}^3$ 이며 구와 실린더의 직경비가 0.151인 경우 일정한 시간 간격에 따라 낙하하는 구 주위의 유동현상을 영상처리 장치인 PIV 시스템에서 가시화하여 Figure 3과 Figure 4, Figure 5, Figure 6에 각각 나타내었다. Figure 3은 처음 구를 떨어뜨려 구 주위의 유동을 가시화한 것이며 Figure 4는 떨어뜨린 구를 회수하여 30초 후에 다시 시

료실린더에 떨어뜨린 것이며 Figure 5와 Figure 6은 40초 후에 50초 후에 측정구간을 통과하는 구 주위의 유동장을 프로세싱한 결과이다. 그림의 결과에서 나타난 구 주위의 가시화는 구 주위의 유동속도를 나타내며 유동속도가 클수록 속도벡터가 크게 표시된다. 그림에서 알 수 있듯이 처음 구를 떨어뜨리면 측정 구간내에서 구의 앞쪽과 뒤쪽의 속도분포가 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 구의 진행방향보다 구 후류측에서 유동속도가 증가하는 것을 보여주고 있다. 처음구를 떨어뜨린 후 30초가 경과한 경우의 구 주위의 유동패턴은 처음 구를 떨어뜨린 경우에서 보다 크게 나타남을 알 수 있고 t = 40과 t = 50으로 진행할수록 감소하게 된다. 시간간격에 따라 낙하하는 구의 속도는 서로 다른값으로 측정되므로 가로축에 실린더의 직경 60 mm를 10 mm 간격으로 나누고 세로축에는 낙하하는 구의 앞, 뒤를 6개 구간으로 등분하여 49개의 점으로 나누어 각각에 대하여 속도를 측정하였다. 처음구를 떨어뜨린 후의 각 지점에서의 속도측정결과를 Figure 7에 나타내었다. 동일한 방법으로 30초 후에, 회수한 구를 다시 떨어뜨려 측정된 결과를 Figure 8에 도시하였으며 낙하후 t = 40, t = 50초 후에 떨어뜨린 구 주위의 속도를 Figure 9와 Figure 10에 도시하였다.

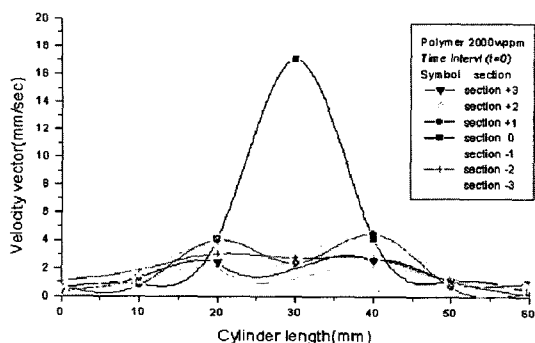


Figure 7. Velocity vector vs around falling ball at t=0.

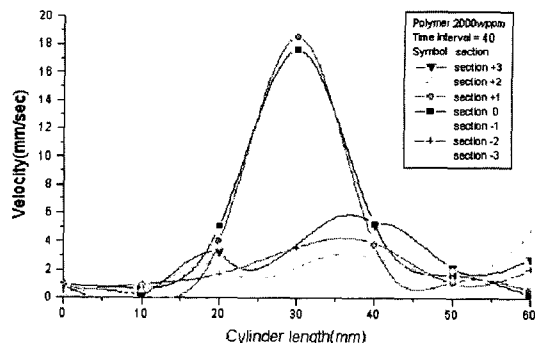


Figure 9. Velocity vector vs around falling ball at t=40.

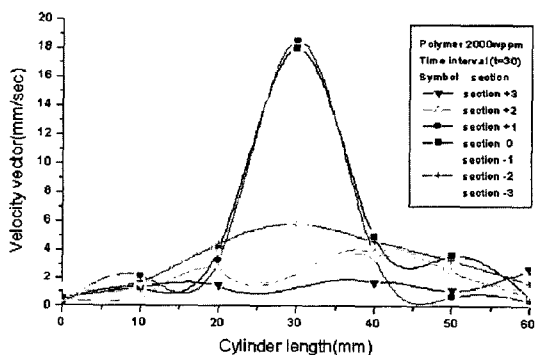


Figure 8. Velocity vector vs around falling ball at t=30.

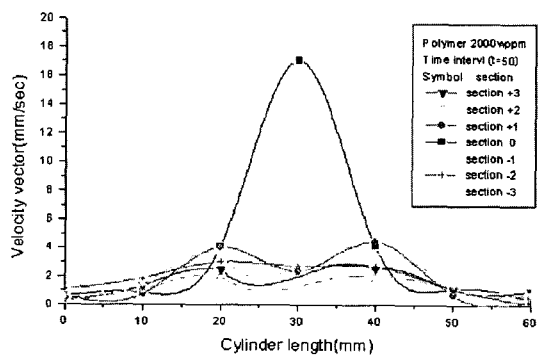


Figure 10. Velocity vector vs around falling ball at t=50.

실험 결과 처음구를 떨어뜨린 후 t=30초가 경과되었을 경우, 구 중심 부분에 대한 속도분포는 17.9582 mm/sec이며 t=40인 경우는 17.5759 mm/sec, t=0과 t=50에서는 각각 17.0566 mm/sec와 17.0504 mm/sec로 측정되었다. 또한 구 앞쪽과 뒤쪽의 속도분포의 비는 t=30의 경우 3.106이며 t=40에서는 5.487, t=50에서 7.129, t=0일 때는 7.11로 t=30에서 시간이 경과할수록 속도분포의 비는 증가하게 된다. 이 결과로부터 폴리머용액에서 떨어뜨리는 시간간격이 변함에 따라 구 주위의 종말속도가 변화하게 되며 시간 간격에 따라 구 주위의 유동현상이 다르게 나타난다.

### 5. 결 론

점탄성 유체인 Separan AP-273의 폴리머용액을 이용하여 제작된 낙구식 점도계에서 측정시간 간격에 따라 종말속도가 다르게 측정되는 특성 확산시간을 영상 유속장치를 이용하여 실험적으로 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 낙하하는 구 주위의 유동현상을 가시화한 결과 처음구를 떨어뜨린 후 일정시간이 경과하여 처음과 동

일한 상태에 도달함으로써 특성확산시간이 존재하는 것을 확인하였다.

(2) 점탄성 유체의 특성확산시간 측정에서 구 전후방의 속도분포의 비는 t=30을 정점으로 시간이 경과할수록 속도분포의 비는 증가한다.

### 감사의 글

본 연구는 2000년도 중부대학교 교내 연구비로 지원받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 노오현, "점성유체역학기초", 박영사, 1998.
- [2] Sumner, D., Wong, S. S. T., Price, S. J., and Paidousis, M. P., 'Fluid Behaviour of Side-by-Side Circular Cylinders in Steady Cross-Flow,' Journal of Fluids and Structures, Vol. 13, pp. 309-338, 1999.
- [3] Gottlieb, M., "Zero Shear Rate Viscosity Measurements for Polymer Solutions by Falling Ball Viscometer"

- try." J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Vol. 6, pp. 97-109, 1979.
- [4] Kanchanalakshana, D., Ghajar, A. J., "An Improved Falling Sphere Viscometer for Intermediate Concentrations of Viscoelastic Fluids." Int. Comm. Heat Mass Transfer. Vol. 13, pp. 219-233, 1986.
- [5] Cho, Y. I., Hartnett, J. P., "Viscoelastic Effects in the Falling Ball Viscometer." Society of Rheology, Boston. 1979.
- [6] Caswell, B., Schwarz, W. H., "The Creeping Motion of a Non-Newtonian Fluid Past a Sphere." Fluid Mechanics. Vol. 13, pp. 417-426, 1962.
- [7] Kwack, E. Y., Hartnett, J. P., "New Method to Determine Characteristic Time of Viscoelastic Fluids." Int. Comm, Heat Mass Transfer. Vol. 10, pp. 77-82, 1983.
- [8] Buchhave, P., "Particle Image Velocimetry-Status and Trends." Exp. Ther. and Fluid Sci. Vol. 5, pp. 586-604, 1992.