

점탄성 유체의 정압 열팽창계수, 밀도 및 전단속도 0에서의 점도에 대한 실험 연구

조금남 · 최민구

성균관대학교 기계공학과
(1995년 6월 5일 접수)

Experimental Study on the Isobaric Thermal Expansion Coefficient, Density and Zero-shear-rate Viscosity of Viscoelastic Fluid

Keumnam Cho and Mingoo Choi

Department of Mechanical Engineering, Sung Kyun Kwan University,
300 Chunchun-dong, Changan-ku, Suwon 440-746, Korea
(Received June 5, 1995)

요 약

점탄성유체의 물성치들 중 정압열팽창계수 및 밀도는 자연대류 열전달 연구에, 전단속도 0에서의 점도는 점탄성유체에 대한 모델들 사용 시 필요하다. 본 연구에서는 점탄성유체이며 마찰 감소 첨가제, 유전자 분리용액등으로 사용하는 Separan AP-273 용액의 정압열팽창계수, 밀도 및 전단속도 0에서의 점도에 대한 농도 및 온도의 영향을 조사하였다. 작동유체의 물성치들은 10~60°C의 온도범위와 100~20,000 wppm의 농도범위에서 측정되었다. 작동유체의 물성치들에 미치는 열주기와 노화의 영향을 조사하기 위해서 정압열팽창계수와 전단속도 0에서의 점도를 교대로 두번씩 측정했다. 정압열팽창계수 및 밀도를 측정하는 장치의 측정 정밀도는 증류수에 대한 측정치와 문헌에 나타난 자료를 비교하여 얻었고 이는 $\pm 2\%$ 이내였다. Separan AP-273 용액의 정압열팽창계수 및 밀도는 증류수의 값들과 측정온도 및 농도범위내에서 일치하였으므로 장치의 측정정밀도인 $\pm 2\%$ 이내에서 증류수의 값들로 대체될 수 있다. 작동유체의 정압열팽창계수와 밀도는 열주기와 노화의 영향을 받지 않았다. 낙하식 점도계를 사용해 측정된 겔보기점도 값들을 나타내는 flow curve에서 전단속도가 0이 되는 방향으로 겔보기점도를 외삽시켜 Separan AP-273용액에 대한 전단속도 0에서의 점도를 얻었다. 정압열팽창계수 측정 전후에 측정된 작동유체에 대한 전단속도 0에서의 점도는 열주기와 노화로 인해 퇴화되었다.

Abstract - The isobaric thermal expansion coefficient and density are needed for the study of free convection heat transfer and the zero-shear-rate viscosity is needed for utilizing the viscoelastic models among the properties of viscoelastic fluid. The present study investigated the effects of concentration and temperature on the isobaric thermal expansion coefficient, density and zero-shear-rate viscosity of Separan AP-273 solution which is a viscoelastic fluid as a drag-reduction additive, a separation fluid for DNA molecule etc. The properties of working fluid were measured within the range of temperature from 10 to 60°C and concentration from 100 to 20,000 wppm. The isobaric thermal expansion coefficients and the zero-shear-rate viscosities were measured twice in turn to investigate the effects of the thermal cycling and aging on the properties of working fluid. The measuring accuracy of the experimental apparatus measuring the isobaric thermal expansion coefficient and density was obtained by comparing the measured values with the data in the literature for distilled water and it was within $\pm 2\%$. The isobaric thermal expansion coefficient and density of Separan AP-273 solution can be replaced with the values of distilled water with the accuracy of the apparatus of $\pm 2\%$ since they were agreed with the values of distilled water within ex-

perimental temperature and concentration ranges. The isobaric thermal expansion coefficient and density of working fluid were not affected by thermal cycling and aging. The zero-shear-rate viscosity of Separan AP-273 solution was obtained by extrapolating the apparent viscosity to the shear rate of zero on the flow curve showing the apparent viscosities measured by the Falling Needle Viscometer(FNV). The zero-shear-rate viscosity of working fluid was measured before and after measuring the isobaric thermal expansion coefficient and it was degraded due to the thermal cycling and aging.

Keywords: Isobaric thermal expansion coefficient, density, zero-shear-rate viscosity, Separan AP-273 solution, temperature, concentration.

1. 서 론

실제적으로 활용하는 비뉴턴 유체의 대부분은 점탄성 유체이며 본 연구에서 사용한 Separan AP-273 용액은 점탄성유체인 polyacrylamide 용액에 속한다. Polyacrylamide 용액의 특성은 문헌에 잘 나타나 있다[1]. Polyacrylamide는 nonionic, anionic, cationic 고분자로 분류할 수 있으며 본 연구에서 사용한 Separan AP-273 용액은 anionic polyacrylamide 용액이며 마찰감소 첨가제, 유전자 분리용액 등으로 널리 활용된다 [2~5]. Polyacrylamide 수용액은 전단속도가 증가함에 따라 겔보기점도가 감소하는 pseudoplastic(또는 shear thinning) 특성을 나타내고 어느 정도 이상의 탄성효과를 지닐 때 rod-climbing 효과가 나타나며 이는 자료에서 쉽게 찾아볼 수 있다[6].

이러한 점탄성 유체를 사용하는 기계계통을 설계하는 경우 점탄성유체와 관련한 정량적인 지식이 필요하고 특히 유체유동과 관련된 경우 전달 물성치들인 정압열팽창계수, 밀도, 겔보기점도, 전단속도 0에서의 점도등에 대한 지식이 요구된다. 유체의 정압열팽창계수 및 밀도에 대한 지식은 밀도차에 의해 구동력을 갖는 자연대류 열전달 연구 시에는 필수적이다. 뉴턴 유체인 물에 대한 정압열팽창계수 값들은 광범위한 온도 및 압력범위에 대해 찾아볼 수 있다[7]. 순수점성 비뉴턴 유체의 정압열팽창계수에 대한 온도 및 온도의 영향을 조사하거나[8] 점탄성유체의 정압열팽창계수에 대한 온도의 영향만 조사한 것은 있다[9]. 이들 외는 대부분 비뉴턴 유체의 정압 열팽창계수값이 물의 값들과 유사하다고 실험에 근거하지 않은 추정을 하였다[10~11].

뉴턴유체에 대한 밀도 결정 방법은 비뉴턴 유체의 겔보기점도와 밀도사이의 관계를 풀기 어렵기 때문에 비뉴턴 유체에 대한 밀도를 결정하고자 하는 경우에 적용 제한을 받는다[12]. 비뉴턴 유체에 대한 밀도를 결정하는

방법으로는 기준 온도에서 측정된 기준 밀도 값을 이용하고 측정된 정압열팽창계수들의 최소오차차승식을 적분시켜 유체의 밀도를 결정하는 방법이 있다[13]. 이 방법에서는 뉴턴 유체인 증류수에 대해 결정된 밀도 값들을 넓은 온도 및 압력범위에 대해 나타난 밀도 값들 [14~16]과 비교하여 뉴턴 유체에 대한 밀도결정 방법의 정밀도를 조사하였다.

비뉴턴 유체에 대해 사용되는 여러 가지 모델들 중 Ellis, Cross, Carreau 모델들 등에서 전단속도 0에서의 점도 값들은 중요하게 이용되며 이는 전단속도의 변화에 따라 측정된 겔보기점도 값들을 flow curve 상에서 전단속도가 0이 되는 값으로 외삽시켜 얻어진다.

순수점성 비뉴턴유체의 정압열팽창계수, 밀도, 전단속도 0에서의 점도등에 대한 측정연구는 비교적 많이 수행되었으나 점탄성 유체의 값들에 대한 연구는 순수점성 비뉴턴유체의 경우에 비해 미흡한 실정이다[17, 18]. 따라서 점탄성 유체에 대한 열유체 관련 문제들을 정량적으로 해석하고 최적화시키는데 필요한 물성치들을 측정하기 위해 본 연구에서는 Separan AP-273 용액의 정압 열팽창계수, 밀도 및 면찰 속도 0에서의 점도 값들에 미치는 온도 및 온도의 영향을 실험적으로 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험절차

Separan AP-273용액의 정압열팽창계수를 측정할 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 정압 열팽창계수 측정장치는 두 개의 동심원통으로 구성되며 바깥쪽 원통을 아크릴관으로 안쪽 원통을 수정관(내경:1.864 cm, 외경:2.10 cm)으로 만들었다. 수정의 열팽창 계수는 $5.5 \times 10^{-7}(1/K)$ 정도로 아주 작기 때문에 작동유체와 접하는 부분들에 대해 수정을 사용했고 작동온도 범위내에서 수정의 팽창 및 수축으로 인한 측정오차는 무시할 수 있었다. 두 개의 동심원통 사이에 항온조로 온도가 조절된 물을

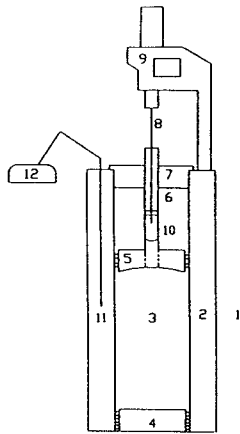


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus for the isobaric thermal expansion coefficient.

- | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Outer tube | 7. Acryl support |
| 2. Inner quartz tube | 8. Stainless steel rod |
| 3. Test fluid in inner tube | 9. Digital micrometer |
| 4. Quartz plug with 3 O-rings | 10. Test fluid in capillary tube |
| 5. Quartz piston with 2 O-rings | 11. Platinum resistance thermometer |
| 6. Quartz capillary tube | 12. Digital multimeter |

순환시켜 작동유체의 온도를 일정하게 유지시켰다. 안쪽 원통내에 채운 작동유체를 원통 하단부에서는 3개의 O-ring을 부착한 하단 수정마개로 밀봉시켰고 원통 상단부에서는 상단 수정마개 주위와 안쪽 원통 사이를 O-ring에 의해 밀봉시켰다. 상단 수정마개 중앙부에 수정모세관의 하단부를 붙여서 수정 모세관 내부를 제외한 부분들을 밀봉했다. 수정 모세관 상단은 아크릴 지지물에 의해 안쪽 원통내 중심부에 있게 했다. 수은으로 보정한 수정모세관의 내경은 1.9899 mm였고 측정오차는 +0.0095, -0.0068 mm였다. Separan AP-273용액의 농도는 0.1 mg의 정밀도를 갖는 저울에 의해 증류수와 고분자물질의 무게를 측정하여 결정되었고 용액은 magnetic stirrer에 의해 1~2일 정도 교반시켜 완전히 혼합시켰다. 작동유체의 정압열팽창계수는 온도변화에 따른 안쪽 원통내 용액의 부피변화를 측정하여 결정했으므로 용액 내부의 공기방울을 제거해야 했다. 용액내 공기는 안쪽 원통내로 용액을 주입하기 전 5×10^{-4} torr까지 진공상태를 만들 수 있는 진공 펌프로 제거했다. 원통내 유체의 온도 변화에 따른 부피 변화는 수정모세관내에 차있는 유체의 meniscus 높이 변화를 측정하여 알 수 있었

다. 유체의 meniscus높이 변화는 디지털마이크로미터의 축에 부착한 수정모세관 내부의 강철선을 이용해 측정했다. 정압열팽창계수를 측정하기 전 설정한 온도에서 수정모세관내 작동유체의 meniscus에 강철선의 하단을 위치시켜 연결한 마이크로미터의 눈금을 0으로 조정한 후 온도를 1~2°C만큼 변화시켜 얻은 작동유체의 meniscus 높이변화를 마이크로미터로 측정했다. 마이크로미터의 측정정밀도는 0.001 mm였다. 두 원통사이에 위치시킨 백금저항온도계를 이용해 작동유체의 온도를 측정했다. 보정한 백금 저항온도계는 $\pm 0.001^\circ\text{C}$ 이내의 정밀도를 나타냈다. 정압열팽창계수 측정장치의 측정정밀도는 증류수의 측정치와 문헌에 나타난 자료를 비교함에 의해 조사하였다.

증류수를 사용해 보정한 volumetric flask(용량: 24.933 ml 정밀도: ± 0.007 ml)를 이용해 측정된 기준 온도에서의 기준밀도와 측정된 정압열팽창계수에 대한 최소오차자승식의 계수 값들로 부터 작동유체의 밀도를 결정했다. 따라서 작동유체의 밀도 결정시 기준온도에서의 기준밀도만 측정했다.

작동유체에 대한 전단속도 0에서의 점도는 전단속도에 따른 겔보기점도를 나타내는 flow curve상에서 전단속도가 0이 되는 방향으로 겔보기점도를 외삽시켜 얻어지므로 전단속도에 따른 겔보기점도만 측정했다. 작동유체의 전단속도에 따른 겔보기점도를 측정하는 실험장치의 개략도는 Fig. 2에 나타났다. 이는 정압열팽창계수 측정장치와 형태가 유사하나 안쪽 원통내의 구성부품들은 다르다. 안쪽 원통 상부에 위치한 needle launcher는 needle이 안쪽 원통의 중심선을 따라 중력방향과 평행하게 낙하하도록 보조한다. Needle의 낙하속도는 낙하거리를 낙하시간으로 나누어 얻어진다. 따라서 정확한 수직낙하거리가 필요하므로 안쪽 원통주위에 일정한 길이(10 cm) 마다 측정선을 새겨서 낙하거리를 표시했다. 각 구간의 길이는 0.02 mm의 정밀도를 갖는 버니어캘리퍼스로 측정되었다. Needle과 유체의 밀도 차이가 작을수록 needle밀도의 정확한 값이 필요하므로 needle 밀도는 간접적인 방법으로 정밀하게 측정되었다. 이는 물과 공기중에 위치한 needle을 0.1 mg의 정밀도를 갖는 저울에 매달아 무게를 측정후 needle에 대해 작용하는 힘들간의 평형에 대한 원리를 이용해 needle의 밀도를 측정하는 방법이다. 일련의 needle들은 낙하 후 안쪽 원통 하단부에 위치한 collector내에 들어가므로 측

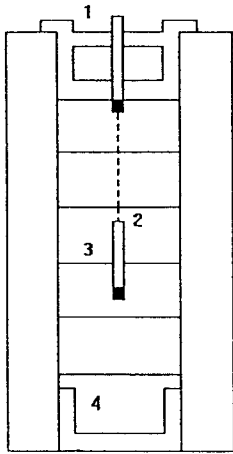


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus for the apparent viscosity.

- 1. Needle launcher
- 2. Needle
- 3. Measurement line
- 4. Collector

정후 collector를 끌어올려 needle들을 재 사용했다. 작동유체의 전단속도에 따른 겔보기점도는 needle의 체윈과 낙하속도를 FNV에 대한 이론식들에 대입하여 계산할 수 있다. FNV를 사용하는 경우 보다 더 큰 전단속도 범위에서 작동유체의 겔보기점도를 측정할 수 있는 회전식 점도계도 사용했다. Cone and Plate형 회전식 점도계(미국 Brookfield 사, Model LVDV-I+)를 사용해 측정된 겔보기점도값을 FNV에 의해 측정된 값들과 동일한 flow curve상에 나타내어 비교했다.

작동유체의 물성치들에 대한 측정 온도범위는 10~60 °C였고, 측정 농도범위는 100~ 20,000 wppm였다. 정압열팽창계수와 전단속도 0에서의 점도에 대한 열주기 및 노화의 영향을 조사하기 위해 이들을 교대로 두번씩 측정했다. 물성치들의 측정순서는 1st η-1st β-2nd η-2nd β였고 두번씩의 β와 η 측정에 걸린 전체시간은 2~5일 정도였다.

3. 이론 및 오차 해석

3.1 이론

뉴턴 및 비뉴턴 유체의 정압열팽창계수는 일정한 압력 하에서 다음과 같다.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\delta\rho}{\delta T} \right) = -\frac{\delta(1/\rho)}{\delta T} = \frac{1}{V} \left(\frac{\delta V}{\delta T} \right) \tag{1}$$

온도 변화에 따른 부피 변화를 측정된 후 이를 식 (1)에 대입하여 β를 얻는다. 유체의 농도 및 온도 변화에 따른 β는 최소오차자승법에 의해 식 (2)와 같은 다항식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\beta = \sum_{m=0}^m a_m T^m, \quad \beta = \sum_{n=0}^n b_n C^n \tag{2}$$

일정한 농도를 갖는 유체의 온도 변화에 따른 밀도는 식 (1)과 (2)를 연립한 후 적분하면 식 (3)과 같다.

$$\rho = \rho_0 \exp \left[\sum_{m=0}^m \left(\frac{a_m}{m+1} \right) (T_0^{m+1} - T^{m+1}) \right] \tag{3}$$

일정한 온도에서 유체의 농도 변화에 따른 밀도는 식 (3)과 같은 형태로 얻어질 수 없으므로 다음과 같이 결정한다. 유체의 각기 다른 농도 값에서 식 (3)을 이용하여 구한 온도 변화에 따른 밀도 값들을 일정한 온도에서 유체의 농도 변화에 따른 밀도 값들로 재정리한다. 이는 최소오차자승법에 의해 식 (4)와 같은 다항식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\rho = \sum_{s=0}^s d_s C^s \tag{4}$$

FNV에 대한 문헌에 기술된 식들을 이용해 전단속도에 따른 유체의 겔보기점도 값을 구한다[12].

$$\dot{\gamma}_w = \frac{u_\infty}{R} p^+ \left(\frac{\lambda^2}{k} - k \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{u_\infty}{R} F(n) \tag{5}$$

$$\eta = \frac{P(n)}{B(n)} \frac{g(\rho_s - \rho_f)}{u_\infty} \tag{6}$$

$$P(n) = \left(\frac{1}{R} p^+ \left(\frac{\lambda^2}{k} - k \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{n-1} \tag{7}$$

$$B(n) = \frac{1}{R^{n+1}} \left[2p^{+n} + \frac{2}{k} p^{+n} \left(\frac{\lambda^2}{k} - k \right) \right] \tag{8}$$

작동 유체의 flow index(n)과 직경비(k)에 따른 p⁺와 η의 값은 문헌에서 찾을 수 있다[12]. 식(5)와 (6)에서 얻은 전단속도와 겔보기점도를 나타내는 flow curve 상에서 전단속도가 0이 되는 방향으로 겔보기점도를 외삽시키면 전단속도 0에서의 점도를 구할 수 있다. 이렇게 구한 전단속도 0에서의 점도는 최소오차자승법에 의해 식 (9)와 같은 다항식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\eta_0 = \sum_{u=0}^u e_u T^u, \quad \eta_0 = \sum_{v=0}^v f_v C^v \tag{9}$$

3.2 오차 해석

정압열팽창 계수에 대한 전체오차는 식 (1)을 이용하여 구하면 식 (10)과 같다.

$$\epsilon_{\beta/\beta} = \epsilon_{\nu}/\nu + \epsilon_{\Delta\nu}/\Delta\nu + \epsilon_{\Delta T}/\Delta T = 2(\epsilon_{\nu}/D) + \epsilon_L/L + 2(\epsilon_{dc}/dc) + \epsilon_{\Delta}/\Delta l + \epsilon_{\Delta T}/\Delta T \quad (10)$$

식 (10)을 이용해 계산한 정압열팽창계수에 대한 전체 오차 범위는 다음과 같다.

$$\epsilon_{\beta/\beta} = \pm 1.701 \sim \pm 2.326 \%$$

밀도에 대한 전체 오차는 기준 밀도에 대한 오차와 정압 열팽창 계수에 대한 오차의 합이므로 식 (11)과 같다.

$$\epsilon_{\rho/\rho} = \epsilon_{\rho_0/\rho_0} + \epsilon_{\beta/\beta} = \epsilon_m/m + \epsilon_{\nu_0}/\nu_0 + \epsilon_{\beta/\beta} \quad (11)$$

식 (11)을 이용해 계산한 밀도에 대한 전체 오차 범위는 다음과 같다.

$$\epsilon_{\rho/\rho} = \pm 1.800 \sim \pm 2.425\%$$

전단속도 0에서의 점도는 전단속도에 따른 겔보기점도 값들을 이용해 얻어지는 값이므로 이에 대한 전체 오차범위를 정밀하게 구하기는 힘들다 대략적으로 겔보기 점도에 대한 오차 범위로 대치될 수 있다. 겔보기점도에 대한 이론식으로 부터 오차를 구하는 것 또한 p^+ 와 n 과 k 에 따라 변화하므로 어렵다. 따라서 FNV에 대한 문헌[12]에 기술된 겔보기점도의 측정오차범위인 $\pm 3\%$ 를 겔보기점도와 전단속도 0에서의 점도에 대한 전체오차로 추정한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험 장치 보정

정압열팽창계수 측정 장치의 측정정밀도는 증류수에 대한 측정치와 문헌[14]에 나타난 자료들을 비교하여 $\pm 2\%$ 로 얻어졌고 이는 Fig. 3에 나타나 있다. 증류수의 정압열팽창계수 측정치들로 부터 구한 최소오차자승식의 값들을 문헌[14]에 나타난 자료들과 비교했을 때 얻은 % 오차는 $-0.53 \sim +0.96\%$ 범위 내였다. 정압 열팽창계수 측정 장치의 측정 정밀도가 오차 해석에서 구한 정압열팽창계수에 대한 최대 오차 범위인 $\pm 2.3\%$ 보다 작으므로 본 측정장치에서 얻은 값들을 신뢰할 수

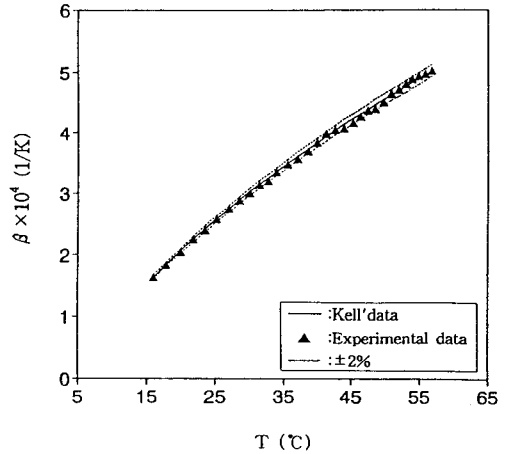


Fig. 3. Isobaric thermal expansion coefficient vs. temperature for distilled water.

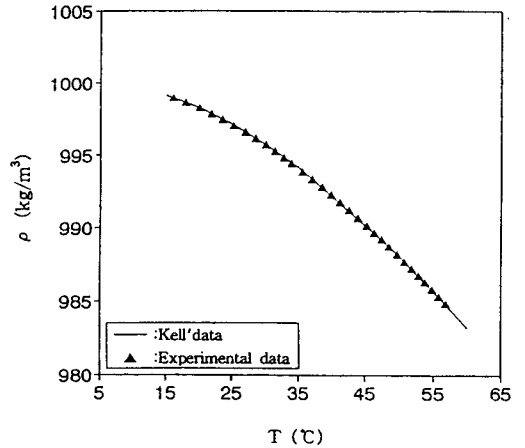


Fig. 4. Density vs. temperature for distilled water.

있다.

증류수의 정압열팽창계수에 대한 최소오차자승식의 계수 값들과 기준 온도에서 측정된 기준밀도값을 이용하여 증류수의 밀도를 구했으며 이는 Fig. 4에 나타나 있다. 증류수의 밀도값들을 최소오차자승법에 의해 계산된 값들과 문헌[14]에 나타난 자료들과 비교했을 때 얻은 % 오차는 $-0.49 \sim +0.005\%$ 범위 내였다. 밀도 측정장치의 측정 정밀도가 오차해석에서 구한 밀도에 대한 최대 오차 범위인 $\pm 2.4\%$ 보다 작으므로 밀도 측정장치에서 얻은 값들을 신뢰할 수 있다.

겔보기점도 및 전단속도 0에서의 점도 측정 장치의 측정정밀도는 FNV에 의한 겔보기점도 측정정밀도가 \pm

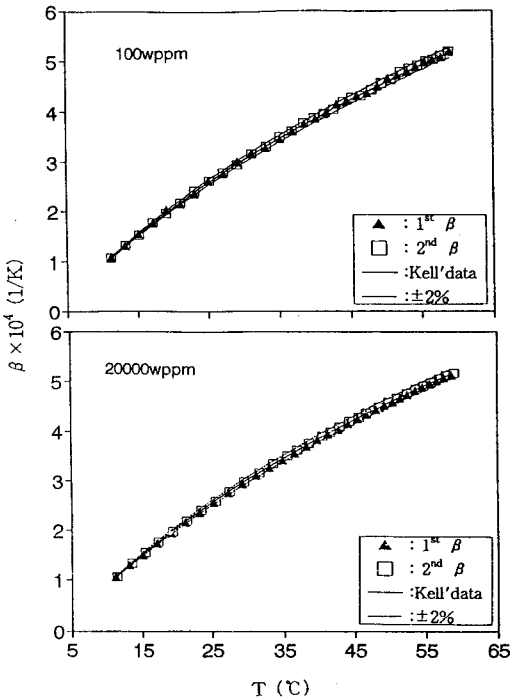


Fig. 5. Isobaric thermal expansion coefficient vs. temperature for Separan AP-273 solution with 100 wppm and 20,000 wppm.

3%인 것이 알려져 있으므로 별도로 조사하지 않았다. FNV와 함께 사용한 cone and plate형의 회전식 점도계(RTV)는 전단속도가 비교적 큰 범위에서 겔보기점도를 측정하는데 사용하였고 두 점도계에 의해 측정된 값들은 전단속도가 중복되는 범위에서 비교되었고 비교적 잘 일치되었다.

4.2 정압열팽창계수

Separan AP-273 용액의 정압열팽창계수는 100, 200, 500, 1,000, 5,000, 10,000, 및 20,000 wppm의 7가지 농도에 대해 10~60°C의 작동 온도 범위에서 측정되었다. 정압열팽창계수 측정시 대기압은 760~770 mmHg의 범위에서 일정하게 유지되었다. Separan AP-273 용액의 정압열팽창계수에 미치는 열주기 및 노화의 영향을 조사하기 위해서 정압열팽창계수는 겔보기점도와 교대로 두번에 걸쳐 측정되었다. 작동유체의 정압열팽창계수들은 7가지 농도 전부에 대해 증류수의 정압열팽창계수들과 정압열팽창계수 측정 장치의 측정정밀도인 ±2% 이내에서 일치하였다. 이 결

과로부터 Separan AP-273 용액의 정압열팽창계수는 용액의 농도와 무관하게 증류수의 값들로 대체될 수 있음을 알 수 있다. 7가지의 농도 값들 중 대표적으로 최소와 최대의 농도 값을 갖는 Separan AP-273 용액의 정압열팽창계수 측정치가 Fig. 5에 보여져 있다. 온도가 증가함에 따라 작동유체의 정압열팽창계수는 증류수의 값과 같이 증가하였다. Fig. 5에 나타나 있듯이 겔보기점도를 측정하기 전후 두번에 걸쳐 측정한 1st β와 2nd β값들도 정압열팽창계수 측정장치의 측정 정밀도 이내에서 서로 일치했다. 이는 Separan AP-273 용액의 정압열팽창계수에 미치는 열주기 및 노화의 영향이 없음을 나타낸다. 순수 점성 비뉴턴유체인 CMC (Carboxymethyl Cellulose) 용액의 정압열팽창계수 값도 측정 장치의 측정정밀도 범위 내에서 증류수의 정압열팽창계수와 일치한다는 문헌(8)의 결과를 동시에 고려하면 순수 점성 비뉴턴유체와 점탄성유체용액의 정압열팽창계수는 용액의 농도와 무관하게 증류수의 값들로 대체될 수 있다.

4.3 밀도

Separan AP-273 용액의 밀도는 증류수로 보정한 volumetric flask를 이용해 기준온도에서 용액의 기준 밀도를 구하고 7가지의 다른 농도를 갖는 용액 각각의 정압열팽창계수에 대한 최소오차차승식들의 계수들을 이용하여 온도의 함수로 구했다.

구해진 작동유체의 밀도값들은 모든 농도에 대해 문헌에 나타난 증류수의 밀도 값들과 밀도 측정장치의 측정 정밀도보다 작은 ±0.5 % 이내에서 일치하였다. 이 결과로부터 Separan AP-273 용액의 밀도는 정압열팽창계수의 경우와 마찬가지로 용액의 농도와 무관하게 증류수의 값들로 대체될 수 있음을 알 수 있다. 7가지의 농도 값들 중 대표적으로 최소와 최대의 농도값을 갖는 Separan AP-273 용액의 밀도 측정치가 Fig. 6에 보여져 있다. 온도가 증가함에 따라 작동유체의 밀도는 증류수의 값과 같이 감소하였다. Fig. 6에서 나타나 있듯이 두 번에 걸쳐 얻어진 1st ρ와 2nd ρ값들도 밀도 측정장치의 측정 정밀도 이내에서 서로 일치했다. 이는 Separan AP-273 용액의 밀도에 미치는 열주기 및 노화의 영향이 정압 열팽창 계수의 경우와 같이 없음을 나타낸다. CMC용액의 밀도 값도 증류수의 밀도 값과 측정 장치의 측정 정밀도 범위에서 일치한다는 문헌(13)의 결

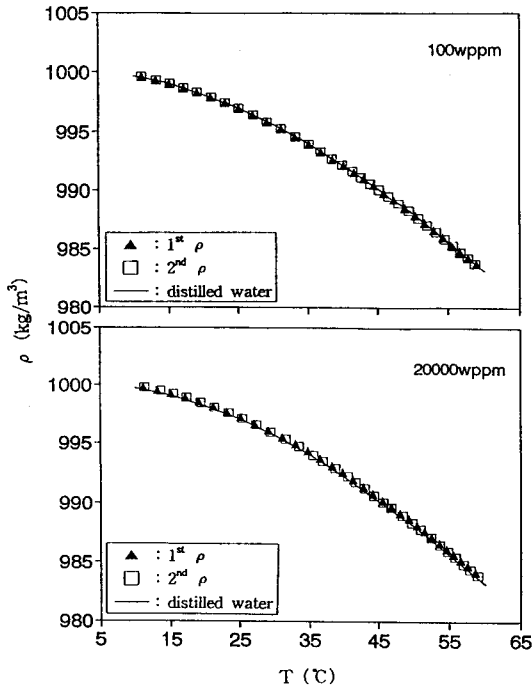


Fig. 6. Density vs. temperature for Separan AP-273 solution with 100 wppm and 20,000 wppm.

과를 고려하면 순수 점성 비뉴튼유체와 점탄성유체용액의 밀도 값은 용액의 농도와 무관하게 증류수의 값들로 대체될 수 있다.

4.4 겔보기점도 및 전단속도 0에서의 점도

Separan AP-273 용액의 겔보기점도는 7가지 농도 값과 10, 20, 30, 40, 50 및 60°C의 6가지 온도에 대해 측정되었다. Separan AP-273 용액의 겔보기점도는 정압열팽창계수와 밀도 값을 측정하기 전후 두 번 측정되었으며 이는 정압열팽창계수 및 밀도에 대한 경우와 마찬가지로 온도 변화에 따른 열주기 및 노화가 겔보기점도에 미치는 영향을 조사하기 위함이었다. 7가지 농도값들 중 대표적으로 10,000 wppm 농도를 갖는 Separan AP-273 용액의 겔보기점도가 10°C 및 60°C 에서 Fig. 7에 나타나 있다. 낙하식 점도계와 회전식 점도계에 의해 측정된 겔보기점도 값들은 전단속도가 중복되는 구간에서 비교적 잘 일치하였다. 작동유체는 일정한 전단속도에서 온도가 커질수록 겔보기점도가 감소하며 일정한 온도에서 전단속도가 커질수록 겔보기점도가 감소하는 pseudoplastic (또는 shear thinning) 현상을 보였다.

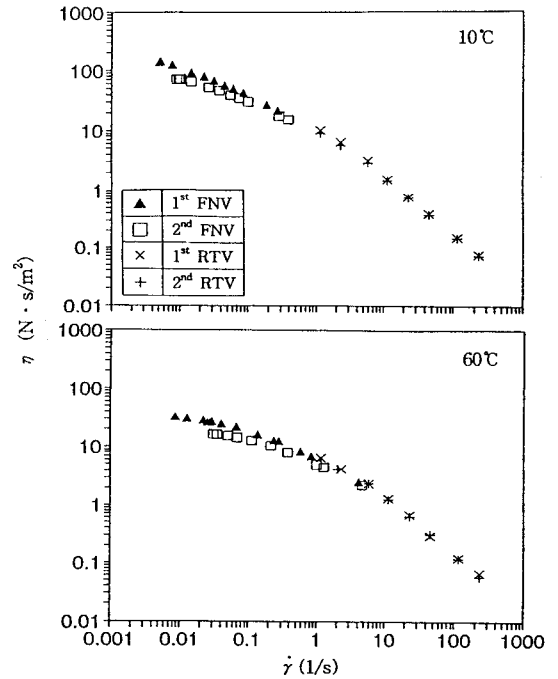


Fig. 7. Apparent viscosity vs. shear rate for Separan AP-273 solution with 10,000 wppm at 10°C and 60°C.

Fig. 7에 나타나 있듯이 1st β전에 측정된 1st η보다 1st β 후에 측정된 2nd η는 열주기와 노화 때문에 작았다. 이는 신선한 고분자용액이 갖는 긴 분자구조가 열주기에 의한 노화 때문에 끊어져서 분자구조가 짧아지는 퇴화현상이 일어나기 때문이다. 이러한 1st η와 2nd η의 차이는 일정한 농도 및 온도 조건하에서 전단속도가 작을수록 커졌고 일정한 농도와 전단속도하에서 작동온도가 낮을수록 커졌다. 본 연구에서 조사한 작동 온도 및 농도 범위에 대해 Separan AP-273 용액의 퇴화는 최고 약 60% 정도까지 나타났다. Separan AP-273 용액에 대한 겔보기점도를 보여주는 flow curve상에서 전단속도가 낮은 영역에 잘 맞는 Cross모델을 통해 전단속도가 0이 되는 지점으로 겔보기점도를 외삽시켜 전단속도 0에서의 점도를 구했다. 이렇게 구한 작동유체에 대한 전단속도 0에서의 점도를 7가지 농도에 대해 온도에 따라 Fig. 8에서 Fig. 11까지에 나타냈다. Fig. 8에서 Fig. 11까지에 보여져 있듯이 전단속도 0에서의 점도는 모든 작동농도 범위에서 온도가 감소함에 따라 급격하게 증가하였다. Fig. 8에 나타난 100 wppm의 경우를 제외

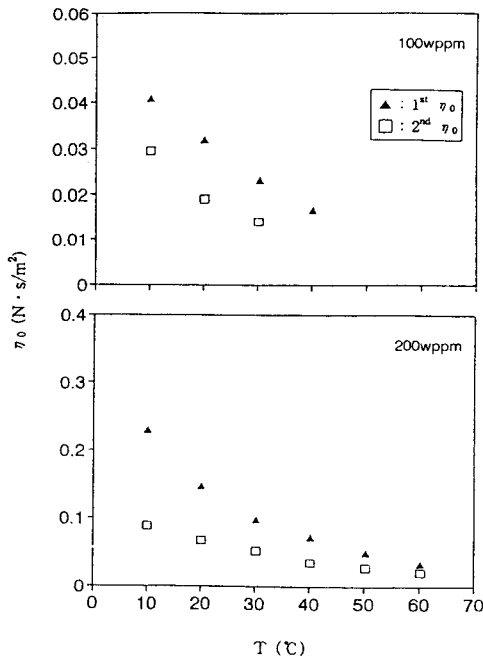


Fig. 8. Zero-shear-rate viscosity vs. temperature for Separan AP-273 solution with 100 wppm and 200 wppm.

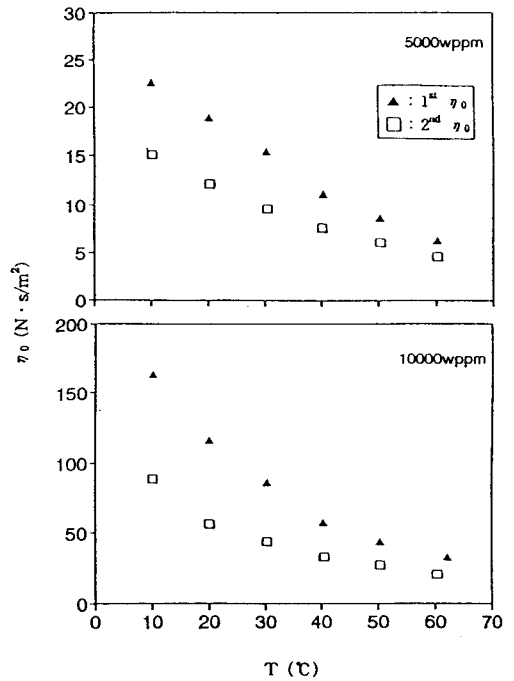


Fig. 10. Zero-shear-rate viscosity vs. temperature for Separan AP-273 solution with 5,000 wppm and 10,000 wppm.

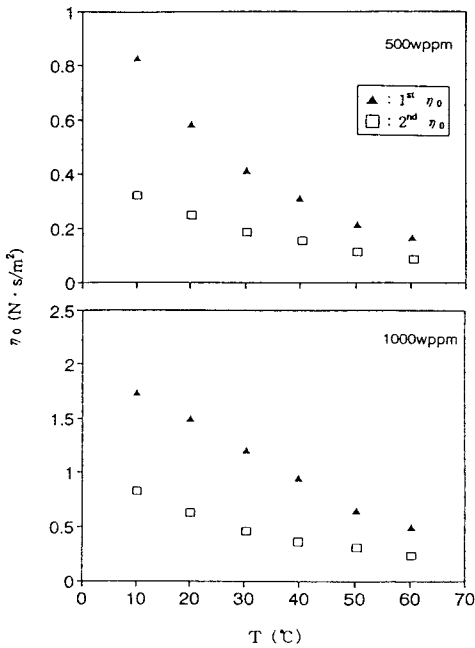


Fig. 9. Zero-shear-rate viscosity vs. temperature for Separan AP-273 solution with 500 wppm and 1,000 wppm.

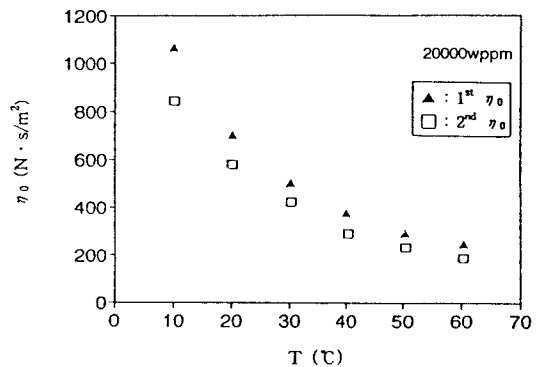


Fig. 11. Zero-shear-rate viscosity vs. temperature for Separan AP-273 solution with 20,000 wppm.

한 나머지 경우들에 대한 전단속도 0에서의 점도 값들은 6 가지 온도 모두에 대해 얻어졌다. 100 wppm의 저농도 Separan AP-273 용액에 대한 겔보기점도를 FNV로 측정할 때 50°C 이상의 온도에서는 낙하속도가 너무 빨라 겔보기점도를 측정할 수 없었기 때문에 100 wppm용액에 대한 전단속도 0에서의 점도는 얻을 수 없었다. 1st η값들로부터 구한 1st η₀ 값들을 2nd η값들로부터

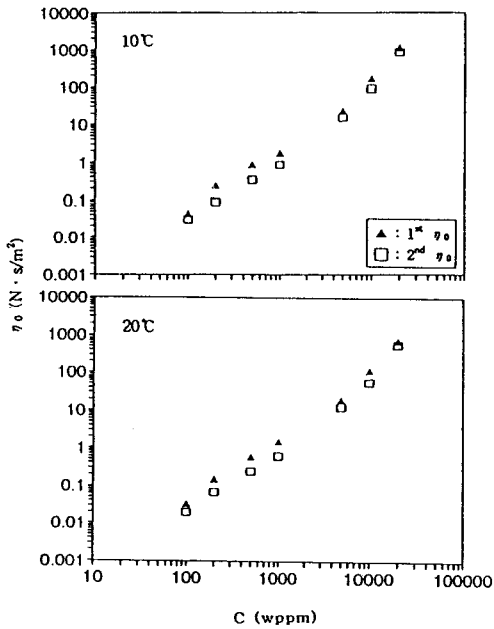


Fig. 12. Zero-shear-rate viscosity vs. concentration at 10°C and 20°C for separan AP-273 solution.

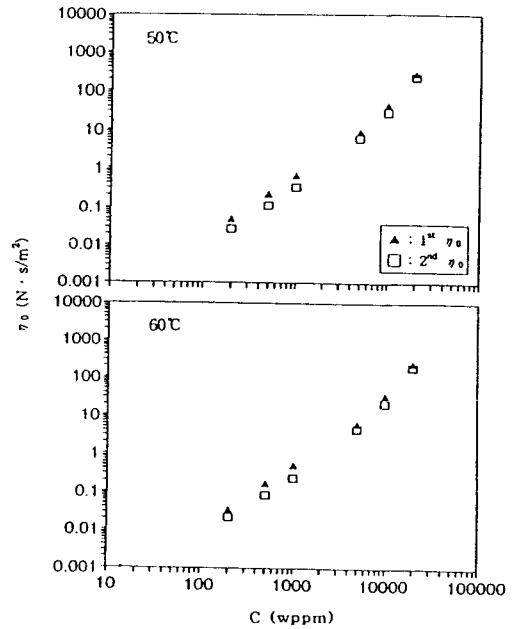


Fig. 14. Zero-shear-rate viscosity vs. concentration at 50°C and 60°C for separan AP-273 solution.

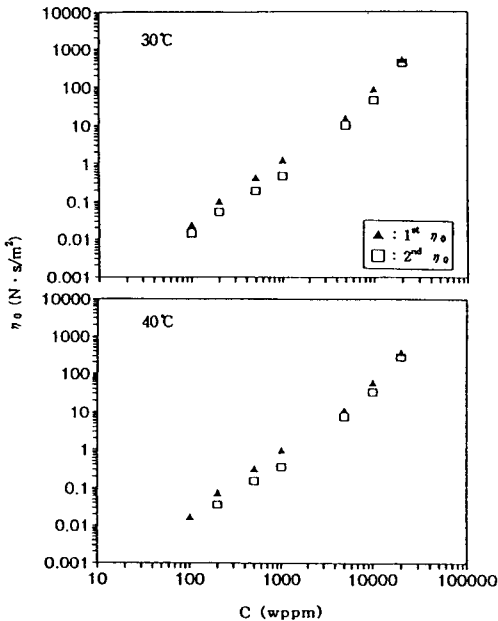


Fig. 13. Zero-shear-rate viscosity vs. concentration at 30°C and 40°C for separan AP-273 solution.

터 구한 2nd η₀ 값들과 비교했을 때 나타난 η₀의 퇴화 정도는 전단속도가 낮은 경우에 측정된 η의 퇴화 정도와

거의 동일하거나 약간 더 컸다. 작동유체에 대한 전단속도 0에서의 점도 값들은 최소오차자승법에 의해 온도의 함수로 얻어졌으며 결정 계수들은 모두 0.99 이상이였다.

작동 유체에 대한 전단속도 0에서의 점도를 일정한 온도에서 농도변화에 따라 Fig. 12에서 Fig. 14까지 나타냈다. Fig. 12에서 Fig. 14까지에 나타나 있듯이 일정한 온도 하에서 전단속도 0에서의 점도 증가율은 농도의 증가율보다 약간 더 작았다. Fig. 12에서 Fig. 14까지에 나타난 6 가지의 온도들은 7 가지의 농도들에 대해 측정된 온도의 평균치이며 이들은 ±0.1°C내로 일치했다. 온도 변화에 따른 점탄성 유체의 겔보기 점도 변화율이 약 10%/°C임을 고려하면 ±0.1°C의 온도 변화는 약 ±1% 만큼의 겔보기점도에 대한 오차를 수반한다. 그러므로 Fig. 12에서 Fig. 14까지에 나타난 전단속도 0에서의 점도는 약 ±1%의 오차범위에서 보여지고 있다.

5. 결 론

Separan AP-273 용액의 물성치들인 정압열팽창계

수, 밀도 및 전단속도 0에서의 점도 값들을 온도 및 농도 변화에 따라 측정했다. 측정 온도 범위는 10~60°C였고 농도 범위는 100~20,000 wppm였다. 작동 유체의 물성치 측정장치들을 사용해 정압열팽창계수, 밀도 및 전단속도 0에서의 점도를 측정하기 전 장치들의 측정 정밀도를 조사했다. 작동유체의 물성치들에 미치는 열주기 및 노화의 영향을 조사하기 위해서 물성치들을 교대로 두번씩 측정하였다.

본 연구에서 얻은 결과들을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 측정온도 범위 내에서 정압열팽창 계수 측정 장치의 측정정밀도는 $\pm 2\%$ 이내였고 밀도 측정장치의 측정정밀도는 $\pm 0.5\%$ 이내였다.

둘째, Separan AP-273 용액의 정압열팽창계수들은 7가지 농도 전부에 대해 증류수의 정압열팽창계수들과 정압열팽창계수 측정 장치의 측정 정밀도인 $\pm 2\%$ 이내에서 일치하였다. 즉, Separan AP-273 용액의 정압열팽창계수는 용액의 농도와 무관하게 $\pm 2\%$ 의 오차범위 내에서 증류수의 값들로 대체될 수 있다. 증류수 및 Separan AP-273 용액의 정압열팽창계수는 온도가 증가함에 따라 증가했다.

셋째, Separan AP-273 용액의 밀도 값들은 증류수의 밀도값들과 밀도측정장치의 측정정밀도 보다 작은 $\pm 0.5\%$ 이내에서 일치하였다. 즉, Separan AP-273 용액의 밀도는 용액의 농도와 무관하게 $\pm 0.5\%$ 의 오차범위 내에서 증류수의 값들로 대체될 수 있다.

넷째, Separan AP-273 용액의 정압열팽창계수 및 밀도는 열주기 및 노화의 영향을 받지 않았다.

다섯째, Separan AP-273 용액의 겔보기점도를 측정 농도와 온도 범위인 7 가지의 농도와 6 가지의 온도에 대해 전단속도에 따라 측정하였으며 작동 유체는 전단속도 증가에 따라 겔보기점도가 감소하는 shear thinning 현상을 보였다.

여섯째, Separan AP-273 용액에 대해 1st β 전후에 측정된 겔보기점도 값들은 열주기 및 노화때문에 감소했다. 작동온도 및 농도범위에서 측정된 최대 퇴화는 약 60%까지 나타났다. 전단속도 0에서의 점도에 대한 퇴화정도는 전단속도가 작은 경우에 측정된 겔보기점도에 대한 퇴화정도와 거의 동일하거나 약간 더 컸다.

일곱째, Separan AP-273 용액의 전단속도 0에서의 점도는 온도가 감소함에 따라 급격하게 증가했고 농도가 증가함에 따라서는 거의 선형적으로 증가했다.

후 기

이 논문은 1994년도 한국 과학 재단에서 지원한 목적 기초 연구(과제번호: 941-1000-027-1)에 의해 연구되었으며 이에 감사를 표합니다.

기 호

C	: Concentration of fluid [wppm]
D	: Diameter of system [cm]
d_c	: Diameter of capillary quartz tube [cm]
g	: Gravitational constant [cm/s ²]
k	: Ratio of needle diameter to system diameter [dimensionless]
m	: mass [kg]
n	: Flow index of non-Newtonian fluid [dimensionless]
p^+	: Dimensionless pressure of power law fluid [dimensionless]
R	: Radius of system [cm]
T	: Temperature [°C]
T_0	: Reference fluid temperature [°C]
u_∞	: Terminal velocity of infinite length of needle in unbounded fluid [cm/s]
V	: Volume [cm ³]
wppm	: Parts per million by weight [dimensionless]

Greek letters

β	: Thermal expansion coefficient [1/K]
$\dot{\gamma}$: Shear rate [1/s]
$\dot{\gamma}_w$: Shear rate at needle wall [1/s]
ϵ	: Uncertainty
η	: Apparent viscosity [N · s/m ²]
η_0	: Zero-shear-rate viscosity [N · s/m ²]
λ	: Position of maximum velocity [dimensionless]
ρ	: Density [g/cm ³]
ρ_f	: Density of fluid [g/cm ³]
ρ_s	: Density of needle [g/cm ³]
ρ_0	: Reference density of fluid [g/cm ³]

참고문헌

1. K. Othmer, "Encyclopedia of Chemical Technology(Vol. 1)", John Wiley and Sons, New York, 1982, p. 212.
2. K. Cho, B. Pak, Y.I. Cho and N.A. Park, *The Winter Annual Meeting of the ASME*, **124**, 53 (1991).
3. K. Cho, D. Chee and Y.I. Cho, *Proceedings of the Fifth Asian Congress of Fluid Mechanics*, **1**, 25 (1992).
4. K. Cho, Y.I. Cho and N.A. Park, *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **45**, 105 (1992).
5. D. Chee, Y.I. Cho, K. Cho and P. Lu, *Sep. Technol.*, **4**, 55 (1994).
6. R.B. Bird, R.C. Armstrong and O. Hassager, "Dynamics of Polymeric Liquids(Vol.1: Fluid Mechanics)", John Wiley and Sons, New York, 1987, p. 62.
7. T.F. Irvine, Jr. and M.R. Duignan, *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, **12**, 465 (1985).
8. 조금남, 대한기계학회 논문집, **18**, 670 (1994).
9. T.F. Irvine, Jr., I. Kim, K. Cho and F. Gori, *Experimental Heat Transfer J.*, **1**, 155 (1987).
10. T. Fujii, O. Miyatake, M. Fujii, H. Tanaka, K. Murakami, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **16**, 2177 (1973).
11. J.D. Dale and A.F. Emergy, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, **94**, 64 (1972).
12. N.A. Park and T.F. Irvine, Jr., *Rev. Sci. Instrum.*, **59**, 2051 (1988).
13. K. Cho and T.F. Irvine, Jr., The 3rd World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, 1762 (1993).
14. G.S. Kell, *J. Chem. Eng. Data*, **20**, 97 (1975).
15. G.S. Kell and E. Whalley, *J. Chemical Physics*, **62**, 3496 (1975).
16. U. Grigull, J. Straub and P. Schiebener, "Steam Tables in SI units", 2nd ed., Springer-Verlag Publishing Co., 1976, p.82.
17. K.C. Tam and C. Tiu, *J. Rheology*, **33**, 257 (1989).
18. Y. Takahashi, F. Suzuki, M. Miyachi, *Polymer J.*, **18**, 89 (1986).