

(論 文)

순수점성 비뉴턴유체의 물성치들에 대한 농도 및 온도의 영향

조 금 남*

(1993년 8월 28일 접수)

Effects of the Concentration and the Temperature on the Thermophysical Properties of Purely-Viscous Non-Newtonian Fluid

Keumnam Cho

Key Words : Isobaric Thermal Expansion Coefficient(정압 열팽창계수), Purely-Viscous Non-Newtonian Fluids(순수점성 비뉴턴유체), Density(밀도), Concentration(농도), Zero-Shear-Rate Viscosity(전단율 0에서의 점도), Zero-Shear-Rate Dynamic Viscosity(전단율 0에서의 동점도), Thermal Aging and Cycling(열노화 및 순환)

Abstract

The thermophysical properties of Non-Newtonian fluid as the function of the temperature and the concentration are needed in many rheological heat transfer and fluid mechanics problems. The present work investigated the effects of the concentration and the temperature on the thermophysical properties of purely-viscous Non-Newtonian fluids such as the isobaric thermal expansion coefficient, density, zero-shear-rate viscosity, and zero-shear-rate dynamic viscosity within the experimental temperature range from 25°C to 55°C. The densities of the test fluids were determined as the function of the temperature by utilizing a reference density and the least square equation for the measured isobaric thermal expansion coefficient. As the concentration of purely-viscous Non-Newtonian fluid was increased up to 10,000 wppm, the densities were proportionally increased up to 0.4%. The zero-shear-rate viscosities of test fluids were measured before and after the measurements of the first thermal expansion coefficients and the densities of Non-Newtonian fluid. Even though they were changed up to approximately 22% due to thermal aging and cycling, they had no effects on the thermal expansion coefficients and the densities of purely-viscous Non-Newtonian fluid. The zero-shear-rate dynamic viscosities for purely-viscous Non-Newtonian fluids were compared with the values for distilled water. They showed the similar trend with the zero-shear-rate viscosities due to small differences in the densities for both distilled water and purely-viscous Non-Newtonian fluid.

———— 기 호 설 명 ————

A, B, C : 상수 (식(3))

a, b, c, d, e : 상수 (식(6))

d : 안쪽 원통의 내경 ($=1.905 \times 10^{-2}$ m)

d_c : 수정 모세관의 내경 ($=2.087 \times 10^{-3}$ m)

L : 안쪽 원통내 작업유체가 삽입된 길이(m)

Δl : 수정 모세관내 높이차이(m)

m_1 : 비뉴턴유체의 무게(kg)

*정회원, 성균관대학교 기계공학과

- m_2 : 증류수의 무게 (kg)
- P : 압력 (N/m²)
- T : 온도 (K)
- T_0 : 기준온도 (K)
- ΔT : β 측정용 온도차이 (K)
- V : 부피 (m³)
- V_v : Volumetric flask의 부피 (m³)
- ΔV : 부피차이 (m³)
- ν : 비체적 (m³/kg)
- β : 정압 열팽창계수 (1/K)
- $\dot{\gamma}$: 전단율 (1/s)
- ϵ : 불확실성
- η_a : 의사점도 (N s/m²)
- η_0 : 전단율 0에서의 점도 (N s/m²)
- ν_N : 뉴턴유체의 동점도 (m²/s)
- ν_{NN} : 비뉴턴유체의 동점도(식(7)) (m²/s)
- ν_{NNO} : 비뉴턴유체에 대한 전단율 0에서의 동점도(식(8)) (m²/s)
- ρ : 밀도 (kg/m³)
- ρ_0 : 기준밀도 (kg/m³)

1. 서 론

자연대류에 관한 연구시 구동력은 온도차이에 의한 밀도차에 의해 발생되므로 작동 유체의 열팽창계수 및 밀도에 관한 정보가 절대적으로 필요하다. 뉴턴유체의 경우에 열팽창계수는 직접 측정 했거나 상태방정식에 의해 유도된 자료들을 문헌에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 대표적인 뉴턴유체인 물의 열팽창계수에 대한 자료는 Irvine과 Duignan⁽¹⁾의 논문에 광범위한 압력 및 온도범위에 대해 수록되어 있다. 뉴턴유체에 대한 밀도는 측정된 유체의 정압 열팽창계수에 대한 값과 기준온도에서 측정된 기준밀도의 값을 이용하는 Cho and Irvine⁽²⁾의 논문에 기술된 방법을 이용하거나 Park and Irvine⁽³⁾의 논문에 기술한 방법에 의해 결정할 수 있다. Park and Irvine의 문헌에 기술된 방법은 잘 알려진 뉴턴유체의 밀도 및 점도를 이용하여 측정장치의 정밀도를 검증한 후 구하고자 하는 뉴턴유체의 점도를 어느 일정 온도에서 측정하여 점도에 대한 식을 이용하여 밀도를 결정하는 방법이다. 이에 반해 비뉴턴유체의 경우에는 Fujii et al.⁽⁴⁾과 Dale and Emery⁽⁵⁾의 논문에 몇 가지 고분자 용액에 대한 열팽창계

수가 물에 대한 값과 유사하다고 기술하고는 있으나 열팽창계수에 대한 실험 결과는 Irvine et al.⁽⁶⁾에 의한 자료를 제외하고는 찾아 보기 힘들다. 실제 산업체에서 사용되고 있는 많은 액체들은 뉴턴유체가 아닌 비뉴턴유체에 속하므로 비뉴턴유체의 열팽창계수에 대한 실험치들이 비뉴턴유체에 대한 자연대류 문제들에서는 절실히 요구된다. 비뉴턴유체의 밀도는 뉴턴유체의 밀도 결정시 사용되고 Cho and Irvine⁽²⁾ 논문에 기술되어 있는 측정된 정압 열팽창계수와 기준온도에서 측정된 기준밀도를 이용하는 방법으로 유체의 밀도를 결정할 수 있으나 Park and Irvine⁽³⁾이 추천한 방법은 비뉴턴유체에 대한 점도 계산식이 단순하지 않기 때문에 비뉴턴유체에 대해서 직접적으로 적용시킬 수 없다. 상기한 뉴턴유체 및 비뉴턴유체의 밀도를 결정하는 방법에 비해 저울을 이용하여 질량을 측정하고 액체를 담은 용기의 체적을 측정하여 부피를 측정 후 밀도를 결정하는 방법은 다음과 같은 단점을 갖고 있다. 후자의 방법은 부피 측정시의 오차가 상대적으로 크고 온도변화에 따른 밀도값을 측정하고자 할 때 온도변화에 따른 질량 측정이 쉽지 않으므로 광범위한 온도범위에 대해 밀도를 측정하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 순수점성 비뉴턴유체의 몇 가지 농도에 대하여 정압 열팽창계수, 밀도, 전단율 0에서의 점도 및 전단율 0에서의 동점도값들을 온도의 함수식으로 찾아 비뉴턴유체의 물성치들에 대한 농도 및 온도의 영향을 찾아내고 비뉴턴유체의 유변학적 물성치인 전단율 0에서의 점도값들이 정압 열팽창계수 및 밀도에 미치는 영향을 알아내기 위하여 첫번째 정압 열팽창계수 및 밀도를 측정 및 결정하기 전후에 전단율 0에서의 점도를 온도의 함수로 측정했다. 측정장치의 정밀도에 대한 검증은 비뉴턴유체에 대한 물성치실험을 수행하기 전에 증류수의 열팽창계수를 측정장치로 측정 한 후 이를 Kell⁽⁷⁾의 문헌에 나타나 있는 값과 비교하고 측정된 증류수의 열팽창계수 자료들로부터 증류수의 밀도 값들을 온도의 함수로 결정한 후 Weast et al.⁽⁸⁾에 의한 값들과 비교함에 의해 수행되었다. 뉴턴유체 및 비뉴턴유체의 점도값들은 뉴턴유체 및 비뉴턴유체에 대한 점도 측정장치로 잘 알려진 Park and Irvine^(9,10)의 낙하바늘식 점도기 (falling needle viscometer, FNV)에 의해 측정되었다. 측정된 의사점도값들을 비뉴턴 유체에 대한 Flow curve 상

에서 전단율 0 이 되는 방향으로 곡선을 외삽시켜서 유변학적으로 중요한 물성치인 전단율 0에서의 점도(zero-shear-rate viscosity)를 찾아내었다. 비뉴턴유체의 전단율 0에서의 점도를 찾는 방법은 Park and Irvine⁽³⁾에 자세히 기술되어 있고 전단율 0에서의 점도값은 비뉴턴유체에 대해 사용되는 여러 모델들 중 Ellis, Cross, Carreau Model 등에서 특히 중요하게 이용된다.

2. 이론해석

Irvine et al.⁽⁶⁾과 Cho and Irvine⁽²⁾의 문헌에 기술된 것처럼 뉴턴 및 비뉴턴유체의 열팽창계수는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}\beta &= -(1/\rho)(\rho\delta/\delta T)_p \\ &= -(\delta(\ln\rho)/\delta T)_p \\ &= (1/V)(\delta V/\delta T)_p\end{aligned}\quad (1)$$

본 연구에서 압력은 대기압 상태로 일정하게 유지되므로 식(1)을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}\beta &= -(1/\rho)(\delta\rho/\delta T) \\ &= -(\delta(\ln\rho)/\delta T) \\ &= (1/V)(\delta V/\delta T)\end{aligned}\quad (2)$$

온도변화에 따른 작동유체의 열팽창계수는 온도에 대한 다항식의 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = A + BT + CT^2 \quad (3)$$

A, B, C는 각 작동유체에 대해 least square fitting을 시켜 정해지는 상수항 들이다. 식(2)와 (3)을 연립해서 풀면 작동유체의 밀도에 대한 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\ln(\rho/\rho_0) = A(T_0 - T) + B/2(T_0^2 - T^2) + C/3(T_0^3 - T^3) \quad (4)$$

ρ_0 는 기준온도인 T_0 에서 측정된 기준 밀도의 값이다. 식(4)를 풀어쓰면 작동유체의 밀도에 대한 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho = \rho_0 \exp[A(T_0 - T) + B/2(T_0^2 - T^2) + C/3(T_0^3 - T^3)] \quad (5)$$

비뉴턴유체에 대해 측정된 의사점도값들을 외삽시켜 얻은 전단율 0에서의 점도는 다음과 같이 온도에 대한 다항식의 형태로 표시할 수 있다.

$$\eta_0 = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 \quad (6)$$

뉴턴유체의 동점도 ν_N 와 비교하기 위하여 비뉴턴유체에 대한 동점도 ν_{NN} 을 다음과 같이 정의하고

$$\nu_{NN} = \eta_a / \rho \quad (7)$$

식(7)에서 의사점도 대신 전단율 0에서의 점도를 대입하면 전단율 0에서의 동점도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\nu_{NN0} = \eta_0 / \rho \quad (8)$$

식(5), (6)과 (8)을 이용하면 비뉴턴유체에 대한 전단율 0에서의 동점도를 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\nu_{NN0} &= (a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4) / \rho_0 \\ &\exp[-\{A(T_0 - T) + B/2(T_0^2 - T^2) \\ &\quad + C/3(T_0^3 - T^3)\}] \end{aligned} \quad (9)$$

3. 오차해석

정압 열팽창계수에 대한 전체 오차는 식(2)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_\beta / \beta = \epsilon_V / V + \epsilon_{\Delta V} / \Delta V + \epsilon_{\Delta T} / \Delta T \quad (10)$$

부피 V와 부피차이 ΔV 는 다음과 같다.

$$V = \pi d^2 L / 4, \quad \Delta V = \pi d^2 \Delta l / 4 \quad (11)$$

식(11)을 식(10)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\epsilon_\beta / \beta &= 2(\epsilon_d / d) + \epsilon_L / L + 2(\epsilon_{dc} / d_c) \\ &\quad + \epsilon_{\Delta l} / \Delta l + \epsilon_{\Delta T} / \Delta T\end{aligned} \quad (12)$$

중류수 및 CMC 7H4 5,000 wppm 및 10,000 wppm에 대해

$$\begin{aligned}d &= 1.905 \text{ cm}, \quad \epsilon_d = \pm 0.0025 \text{ cm}, \\ \epsilon_L &= \pm 0.0025 \text{ cm}, \quad L = 5.035 - 10.028 \text{ cm}, \\ \epsilon_{dc} &= \pm 0.0013 \text{ cm}, \quad d_c = 0.2087 \text{ cm}, \\ \epsilon_{\Delta l} &= \pm 0.01869 \text{ cm}, \quad \epsilon_{\Delta T} = 0.002^\circ\text{C} \\ \Delta l &= 1.2119 - 2.463 \text{ cm (중류수)}, \\ &\quad 1.4158 - 2.4327 \text{ cm (CMC 5,000 wppm)}, \\ &\quad 2.0709 - 2.7692 \text{ cm (CMC 10,000 wppm)} \\ \Delta T &= 1.713 - 2.500^\circ\text{C (중류수)}, \\ &\quad 2.098 - 2.484^\circ\text{C (CMC 5,000 wppm)} \\ &\quad 2.323 - 3.411^\circ\text{C (CMC 10,000 wppm)}\end{aligned}$$

위의 값들을 식(12)에 대입하여 정압 열팽창계수에 대한 전체 오차 범위를 계산하면 다음과 같다.

$$\epsilon_\beta / \beta = \pm 2.37 - 3.22\% \text{ (중류수)},$$

$$\pm 2.38 - 2.97\% (\text{CMC } 5,000 \text{ wppm}),$$

$$\pm 2.27 - 2.55\% (\text{CMC } 10,000 \text{ wppm})$$

작동유체의 밀도는 정압 열팽창계수에 대한 값을 적분하고 기준 온도에서의 기준 밀도값을 이용하여 결정되므로 밀도에 대한 전체오차는 기준 밀도에 대한 오차와 정압 열팽창계수에 대한 오차를 더해서 구할 수 있다. 즉,

$$\epsilon_{\rho}/\rho = \epsilon_{\rho 0}/\rho_0 + \epsilon_{\beta}/\beta \quad (13)$$

정압 열팽창계수에 대한 오차는 위에서 구한 값들을 이용할 수 있으므로 단지 기준밀도에 대한 오차만을 구하면 된다. 즉,

$$\epsilon_{\rho 0}/\rho_0 = \epsilon_{m_1}/m_1 + \epsilon_{V_0}/V_0 \quad (14)$$

어느 일정 기준온도에서 용기의 부피는 증류수에 의해 보정되므로

$$\epsilon_{V_0}/V_0 = \epsilon_{T_0}/T_0 + \epsilon_{m_2}/m_2 \quad (15)$$

식(15)를 식(14)에 대입하면

$$\epsilon_{\rho 0}/\rho_0 = \epsilon_{m_1}/m_1 + \epsilon_{T_0}/T_0 + \epsilon_{m_2}/m_2 \quad (16)$$

증류수 및 CMC 7H4 5,000 wppm 및 10,000 wppm에 대해

$$\epsilon_{m_1}, \epsilon_{m_2} = \pm 0.0001 \text{ (g)}, \quad \epsilon_T = \pm 0.002^\circ\text{C},$$

$$m_2 = 24.8579 \text{ (g)}, \quad m_1 = 2224.9171 \text{ (g)}$$

$$(5,000 \text{ wppm}), \quad 24.9770 \text{ (g)} (10,000 \text{ wppm}),$$

$$T_0 = 22.13^\circ\text{C} \text{ (증류수)},$$

$$22.77^\circ\text{C} (5,000 \text{ wppm}),$$

$$22.16^\circ\text{C} (10,000 \text{ wppm})$$

위의 값을 식(16)에 대입하여 기준밀도에 대한 오차 범위를 계산하면 모든 작동 유체에 대해 0.01%의 범위를 나타내므로 식(13)에 의해 계산된 밀도의 전체 오차는 다음과 같다.

$$\epsilon_{\rho}/\rho = \pm 2.38 - 3.23\% \text{ (증류수)},$$

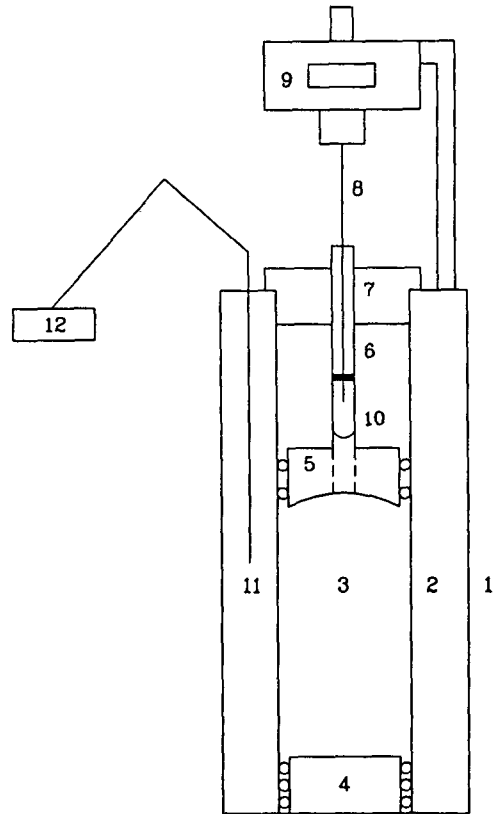
$$\pm 2.39 - 2.98\% (\text{CMC } 5,000 \text{ wppm})$$

$$\pm 2.28 - 2.56\% (\text{CMC } 10,000 \text{ wppm})$$

전단율 0에서의 점도는 앞에서 기술한 것처럼 전단율에 대한 의사점도 값들을 측정하여 전단율 0으로 외삽시켜 그에 대한 의사점도 값을 구하는 데 이 경우의 전체 오차범위는 Park and Irvine⁽³⁾에 의해 기술된 오차범위인 5%를 인용할 수 있다.

4. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1에



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

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

나타나 있다. 이 장치는 Irvine et al.⁽⁶⁾에 의해 사용된 장치와 동일한 것으로 상용화된 FNV(falling needle viscometer)를 개조하여 제작되었으며 두 개의 동심축 원통으로 구성되어 있다. 안쪽 원통(Fig. 1의 부품번호 2)은 내경이 1.905 cm 되는 수 정관이고 바깥쪽 원통(Fig. 1의 부품번호 1)은 유리관으로 만들어져 있어서 안쪽 원통과의 사이에 물을 채우고 항온조에 연결시켜 물을 순환 시킴

로써 실험장치내를 일정 온도로 유지시킬 수 있다. 수정은 열팽창계수가 $5.5 \times 10^{-7} (1/K)$ 일 정도로 아주 작기 때문에 작동유체와 접하는 부분들에 대해 사용하였다. 온도는 작동온도 범위에 대해 보정된 백금 저항 온도계 (Fig. 1의 부품번호 11)를 안쪽과 바깥쪽 관 사이의 순환수내에 위치시키고 이를 디지털 멀티미터 (Fig. 1의 부품번호 12)에 연결시켜 측정하였다. 백금 저항 온도계는 0.001°C 의 정밀도로 보정되었다. 안쪽 원통내에 위치한 작동 유체 (Fig. 1의 부품번호 3)는 하단에 3개의 O-ring이 부착된 하단 수정마개 (Fig. 1의 부품번호 4)로 막혀 있고 상단에는 상하로 이동 가능하도록 O-ring을 이용해서 상단 수정마개 (Fig. 1의 부품번호 5) 주위와 안쪽 원통 사이를 밀봉시키고 2.087 mm의 내경과 3 mm 두께를 갖는 수정 모세관 (Fig. 1의 부품번호 6)의 하단을 수정 마개 가운데에서 한 몸체로 붙여서 수정 모세관을 제외한 부분에 대해 모두 밀봉되어 있다. 수정 모세관의 상단은 Teflon으로 만든 지지물 (Fig. 1의 부품번호 7)에 의해 안쪽 원통내 중심부에 위치하도록 되어 있다.

본 실험에서 사용한 작동유체는 뉴턴유체로 증류수를 이용하였고 순수점성 비뉴턴유체로 Sodium Carboxymethylcellulose (CMC 7H4) 5,000 wppm 및 10,000 wppm을 사용하였다. 작동유체내에 존재하는 공기는 진공 펌프에 의해 제거되었으며 공기를 충분히 제거한 후 싸이폰의 원리에 의하여 안쪽 원통내로 서서히 삽입하였다. 실험시 압력은 대기압 상태였고 온도범위는 대략 $25^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$ 사이였다.

작동유체의 열팽창계수에 대한 측정은 작동유체의 온도변화에 의한 작동유체의 부피변화 (실제로는 모세관내의 유체 (Fig. 1의 부품번호 10)에 대한 부피변화)를 모세관 내부에서 유체의 Meniscus 높이 변화를 측정함에 의해 수행되었다. 이 Meniscus 높이변화는 열팽창계수 측정을 시작하는 온도에서 작동유체의 상부 Meniscus에 강철선 (Fig. 1의 부품번호 8)의 하단을 위치시키고 연결된 마이크로미터 (Fig. 1의 부품번호 9)를 0으로 조정한 후 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 만큼 작동온도를 변화시킨 후 변화된 Meniscus의 높이를 디지털로 읽고 측정온도로는 평균값을 취한다. 강철선이 모세관내에서 중심선상을 따라 움직이도록 강철선과 모세관 내부 사이에 보조물을 이용하여 중심에 위치시켰다. 실험장치 전체는 중력 방향에 수직하게 위치하도록 수평 조정 되어서 측

정시 유체의 Meniscus 중심선방향이 중력 방향과 일치하도록 하였다.

기준온도에서 작동유체의 기준밀도에 대한 측정 은 보정된 25 ml 용량의 Volumetric flask (미국 Corning사)에 의해 수행하였다. Volumetric flask 부피의 보정은 용기 및 유체의 무게와 유체의 온도를 측정하여 수행되었으며 보정치는 22.13°C 에서 24.9327 cm^3 이었다. 정압 열팽창계수 및 밀도 측정에 대 비뉴턴유체의 유변학적 물성치의 영향을 조사하기 위해서 첫번째 열팽창계수 및 밀도측정 전후에 작동온도에 따른 의사점도를 Falling Needle Viscometer (FNV)에 의해 측정하였다. Park and Irvine^(9,10)에 의해 개발된 FNV는 Fig. 1에 보여진 본 연구장치와 유사하며 일정온도를 유지시키기 위한 항온조와 연결된 두 개의 동심축 원통들, 여러가지 다른 밀도값을 갖는 Needle들, 안쪽 원통 상단부에서 위치하여 Needle들이 중심선상을 따라 관성력이 없이 자유낙하 하도록 보조하는 Needle launcher, 안쪽 원통 하단부에 위치하여 낙하된 Needle들을 끌어 올려 다시 사용할 수 있게 하기 위한 Needle collector, Needle의 Terminal 속도를 측정하기 위한 Stop watch나 Hall sensor를 이용한 Timing circuit 등으로 구성되어 있다. Needle들은 속이 빈 관내에 추나 자석을 삽입시키고 관의 양 끝을 반구형으로 밀봉시켜 만들어져 있다. 측정된 Terminal 속도, Needle 직경, 길이 및 밀도, 안쪽 원통직경, 유체의 밀도 및 온도 등을 이용하여 유체의 전단률과 의사점도가 결정된다. 점도기에서 사용된 Needle들의 밀도는 온도 변화에 따른 점도값들이 0.1% 내로 보증되는 Certified standard fluid (모델 S600)내에서의 Needle들의 Terminal 속도를 측정함에 의해 정밀하게 측정됐다. 25.00°C 에서 S 600의 밀도는 $0.8903 (\text{g}/\text{cm}^3)$ 이고 점도는 $1.337 (\text{N s}/\text{m}^2)$ 이었다. 전단율 0에서의 점도값을 해당 비뉴턴유체에 대한 Flow curve에서 외삽시켜 찾는 경우에 특히 정밀한 Needle의 밀도측정이 요구된다.

오차해석에 따른 정압 열팽창계수의 전체 오차범위는 증류수에 대하여 $\pm 2.37 \sim \pm 3.22\%$ 이고 CMC 5,000 wppm 에서는 $\pm 2.38 \sim \pm 2.97\%$, CMC 10,000 wppm에서는 $\pm 2.27 \sim \pm 2.55\%$ 였다. 밀도의 전체 오차범위는 정압 열팽창계수에 대한 전체 오차 범위에 $\pm 0.01\%$ 만큼이 더해진 값이었다. 전체 오차에 기여하는 가장 큰 오차는 모세관의

Meniscus 위치측정 및 모세관내경 측정오차였다. 열팽창계수 및 밀도는 최대 오차인 $\pm 3.22\%$ 이내에서 측정되고 전단율 0에서의 점도는 $\pm 5\%$ 이내에서 측정될 것으로 예측된다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 정압 열팽창계수

본 연구에서 사용된 측정장치의 정밀도는 넓은 온도범위에 대해 정압 열팽창계수 자료들이 문헌에 잘 알려져 있는 증류수를 작동유체로 선정하여 정압 열팽창계수를 측정된 후 문헌의 자료들과 비교

함으로써 검증되었다. 온도변화에 따른 부피변화를 측정된 후 이론해석에 기술된 식(2)를 이용하여 정압 열팽창계수를 얻었고 측정온도 범위는 26.68°C 에서 58.92°C 사이였다. 측정된 증류수의 정압 열팽창계수 자료들은 Fig. 2(a)에 다음과 같은 LSE와 함께 나타나 있다.

$$\beta(\text{증류수, 실험}) = -1.9651 \times 10^{-5} + 1.2393 \times 10^{-5} T - 5.6507 \times 10^{-8} T^2 \quad (17)$$

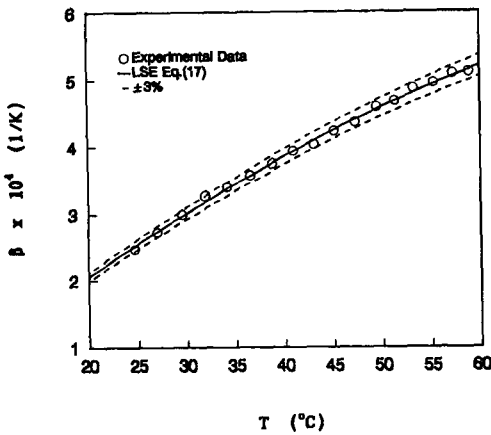
식(17)과 실험자료들간의 차이는 작동온도 범위내에서 $-2.89\% \sim +1.91\%$ 범위내에 있고 이는 Fig. 2(a)에 보여져 있다. 이는 오차해석에서 예측한 $2.37 \sim 3.22\%$ 이내에 있다. 식(17)을 이용해 계산한 값들은 Kell⁽⁷⁾의 LSE를 이용해 계산한 값들과 다음과 같은 % 오차에 의해 비교되었다.

$$\% \text{ dev.} = (\beta(\text{증류수, Kell}) - \beta(\text{증류수, 실험})) / \beta(\text{증류수, Kell}) \times 100 (\%) \quad (18)$$

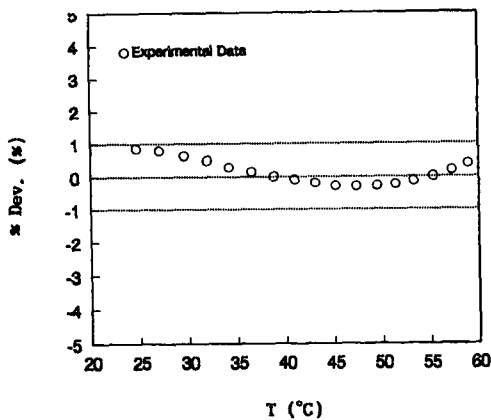
Kell의 LSE는 다음과 같다.

$$\beta(\text{증류수, Kell}) = -4.2101 \times 10^{-5} + 1.4730 \times 10^{-5} T - 1.2628 \times 10^{-7} T^2 + 6.3038 \times 10^{-10} T^3 \quad (19)$$

% 오차는 Fig. 2(b)에 나타난 것처럼 $-0.30\% \sim +0.87\%$ 범위에 있다. 이는 본 실험장치가 작동 온도범위내에서 뉴턴 및 비뉴턴유체의 물성치를 1% 이내로 측정할 수 있음을 보여 준다. 즉 순수 점성 비뉴턴유체로 선정된 CMC 7H4 5,000 wppm 과 10,000 wppm 용액에 대한 정압 열팽창계수를 오차해석에 의한 오차범위내에서 측정할 수 있다. 비뉴턴유체의 경우 정압 열팽창계수에 대한 유변학적 물성치의 영향을 알아보기 위하여 전단율 0에서의 점도를 첫번째 정압 열팽창계수를 측정하기 전 후에 측정하였다. 두번째의 전단율 0에서의 점도를 측정후 두번째의 정압 열팽창계수를 측정하였으므로 $\eta_{01} - \beta_1 - \eta_{02} - \beta_2$ 의 순으로 측정하였다. 비뉴턴유체의 정압 열팽창계수에 대한 측정은 뉴턴유체의 경우와 동일한 방법에 의해 수행되었다. Fig. 3(a)는 CMC 5,000 wppm 용액에 대한 β_1 과 β_2 자료들 온도의 함수형태인 LSE로 나타내고 있으며 이들의 LSE는 다음과 같다.



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Isobaric thermal expansion coefficient versus temperature for distilled water
(b) Percentage deviation in the isobaric thermal expansion coefficient versus temperature for distilled water

$$\beta_1 = -2.4787 \times 10^{-5} + 1.2767 \times 10^{-5} T - 6.3260 \times 10^{-8} T^2 \quad (20)$$

$$\beta_2 = +4.7598 \times 10^{-6} + 1.1107 \times 10^{-5} T - 4.0798 \times 10^{-8} T^2 \quad (21)$$

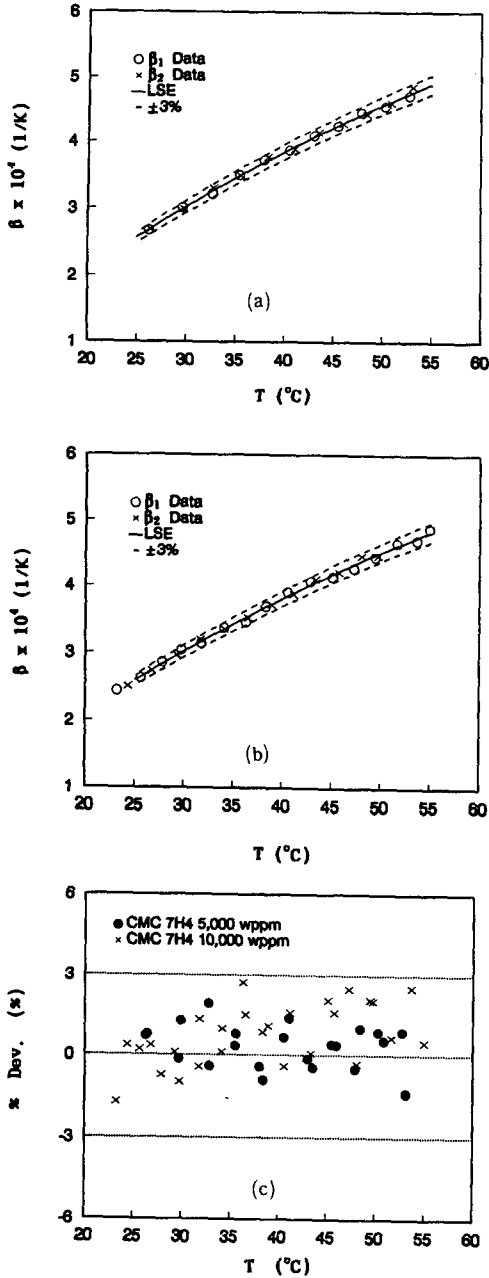


Fig. 3 (a) Isobaric thermal expansion coefficient versus temperature for CMC 7H4 5,000 wppm
 (b) Isobaric thermal expansion coefficient versus temperature for CMC 7H4 10,000 wppm
 (c) Percentage deviation in the isobaric thermal expansion coefficient versus temperature for CMC 7H4 5,000 wppm and 10,000 wppm

β_1 과 β_2 의 LSE에 대한 값들은 작동 온도범위에서 $-2.60 \sim +0.30\%$ 의 오차범위를 나타내고 이는 오차해석에 의해 예측했던 $\pm 2.38 \sim \pm 2.97\%$ 범위내에 속하므로 β_1 과 β_2 사이에 차이가 없다. 비뉴턴 유체의 정압 열팽창계수에 대한 유변학적 물성치인 전단율 0에서의 점도의 영향은 5.3에서 논의될 것이다. CMC 10,000 wppm 용액에 대한 β_1 과 β_2 도 마찬가지로 Fig. 3(b)에 실험자료 및 온도의 함수 형태인 LSE들로 나타나고 있으며 이들의 LSE는 다음과 같다.

$$\beta_1 = +1.5877 \times 10^{-5} + 1.0809 \times 10^{-5} T - 4.2002 \times 10^{-8} T^2 \quad (22)$$

$$\beta_2 = -3.0389 \times 10^{-6} + 1.1719 \times 10^{-5} T - 5.2333 \times 10^{-8} T^2 \quad (23)$$

β_1 과 β_2 의 LSE에 대한 값들은 작동 온도범위에 대해 $-0.27 \sim +2.25\%$ 의 오차범위를 나타내고 이는 오차해석에 의해 예측했던 $\pm 2.27 \sim \pm 2.55\%$ 범위내에 속하므로 β_1 과 β_2 사이에 차이가 없다고 할 수 있다.

정압 열팽창계수의 경우 뉴턴 및 비뉴턴유체에 대한 차이와 비뉴턴유체의 농도에 의한 영향을 조사하기 위해 CMC 5,000 wppm과 10,000 wppm 용액의 정압 열팽창계수에 대한 LSE들을 이용해 계산한 값들을 증류수에 대한 값들과 다음과 같은 % 오차를 이용하여 비교하였다.

$$\% \text{ dev.} = (\beta_{\text{증류수}} - \beta_{\text{CMC}}) / \beta_{\text{증류수}} \times 100(\%) \quad (24)$$

% 오차는 Fig. 3(c)에 나타나 있는 것처럼 $-1.39\% \sim +2.71\%$ 의 범위에 있으며 이는 오차해석에 의해 산정된 값들 범위내에 있다. 즉, 순수점성 비뉴턴유체의 온도에 따른 정압 열팽창계수는 농도와 무관하며 증류수에 대한 값들과 측정오차 범위내에서 같다.

5.2 밀도

비뉴턴유체의 밀도결정에 대한 정밀도는 정압 열팽창계수에 대한 것과 같은 방법으로 검증되었다. 즉, 증류수에 대해 기준온도에 대한 기준 밀도의 값과 정압 열팽창계수 자료를 이론해석에서 기술한 식(5)에 대입하여 밀도값들을 결정 한 후 밀도에 대한 LSE를 다음과 같이 구해서 계산한 값들을 Kell의 정압 열팽창계수에 대한 LSE를 이용하여 계산

한 값들과 함께 문헌에 나타나 있는 자료와 비교하여 밀도결정에 대한 정밀도를 검증하였다.

$$\rho = 998.2 \exp(1.9349 \times 10^{-3} + 1.9651 \times 10^{-5} T - 6.1965 \times 10^{-6} T^2 + 1.8836 \times 10^{-8} T^3) \quad (25)$$

이는 다음과 같은 % 오차를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다.

$$\% \text{ dev.} = (\rho_{\text{ref}} - \rho_{\text{실험이나 Kelli}}) / \rho_{\text{ref}} \times 100 (\%) \quad (26)$$

ρ_{ref} 는 Weast⁽⁶⁾에 의한 값들이다. 측정에 의한 값과 Kell의 LSE에 의한 값들 모두에 대한 %오차는 전체 작동 온도범위내에서 0.01%이고 이는 오차해석에 의한 전체 오차 범위보다 훨씬 작은 값이므로 비뉴턴유체의 밀도는 상당히 정밀하게 측정됨을 알 수 있다.

순수점성 비뉴턴유체인 CMC 5,000 wppm과 10,000 wppm 용액에 대한 밀도값들은 온도의 함수로 다음과 같은 LSE에 의해 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho &= 999.4 \exp(2.4963 \times 10^{-3} + 2.4787 \times 10^{-5} T - 6.3835 \times 10^{-6} T^2 + 2.1087 \times 10^{-8} T^3) \quad (5,000 \text{ wppm}) \\ \rho &= 1001.8 \exp(2.8534 \times 10^{-3} - 1.5877 \times 10^{-5} T - 0.5405 \times 10^{-5} T^2 + 1.4001 \times 10^{-8} T^3) \quad (10,000 \text{ wppm}) \end{aligned} \quad (27)$$

식(25)와 (27)에 나타난 증류수 및 CMC 5,000 wppm과 10,000 wppm 용액의 밀도에 대한 LSE들은 Fig. 5(a)에 나타나 있다. 첫번째와 두번째 결정된 밀도값들은 작동 온도범위내에서 0.01% 내로

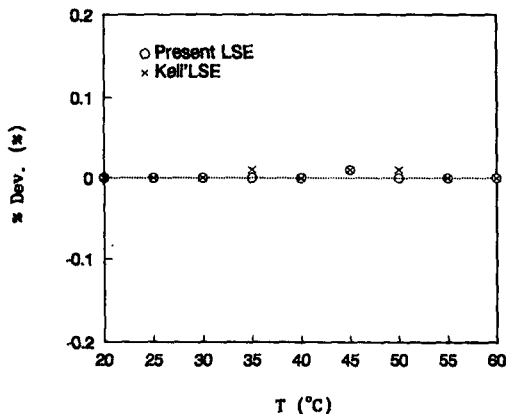
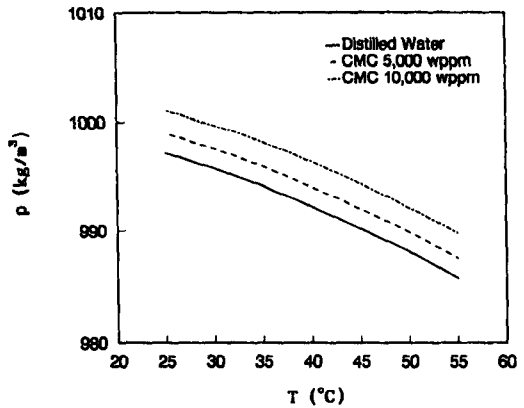


Fig. 4 Percentage deviation in the density versus temperature for distilled water

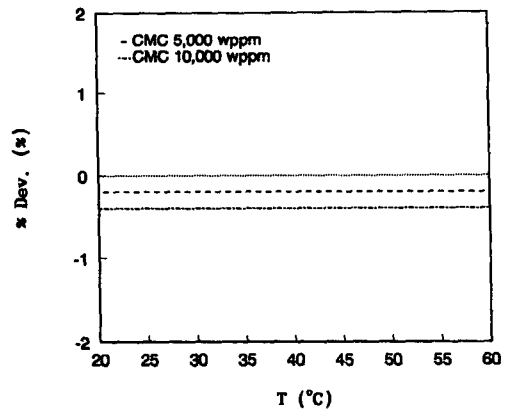
일치하였다. 비뉴턴유체의 밀도는 정압 열팽창 계수에 대한 경우와 같이 전단율 0에서의 점도값들 측정 사이에서 결정되었으며 밀도에 대한 유변학적 물성치인 전단율 0에서의 점도의 영향은 5.3에서 논의될 것이다.

밀도의 경우 뉴턴 및 비뉴턴유체에 대한 값들의 차이와 비뉴턴유체의 농도에 의한 영향을 조사하기 위해 CMC 5,000 wppm과 10,000 wppm 용액의 밀도에 대한 LSE들을 이용해 계산한 값들을 증류수에 대한 값들과 다음과 같은 % 오차를 이용하여 비교하였다.

$$\% \text{ dev.} = (\rho_{\text{증류수}} - \rho_{\text{CMC}}) / \rho_{\text{증류수}} \times 100 (\%) \quad (28)$$



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Density versus temperature for CMC 7H4 5,000 wppm and 10,000 wppm (b) Percentage deviation in the densities versus temperature for CMC 7H4 5,000 wppm and 10,000 wppm

% 오차는 Fig. 5(b)에 나타나 있듯이 전체 작동 온도범위에서 CMC 5,000 wppm 용액의 경우 -0.2%, 10,000 wppm 용액의 경우 -0.4%이다. 즉, 비뉴턴유체의 농도가 증가함에 따라 순수점성 비뉴턴유체의 밀도가 일정한 비율로 증가하고 있음을 알 수 있다.

5.3 전단율 0에서의 점도

순수점성 비뉴턴유체의 경우 유변학적 물성치인 전단율 0에서의 점도는 전단율에 대한 의사점도의 값을 나타내는 Flow curve 상에서 전단율이 0이

되는 방향으로 외삽시켜 얻은 의사점도 값이며 이에 대한 측정은 다음과 같은 목적에 의거해 수행되었다. 첫째, 농도와 온도에 따른 비뉴턴유체의 유변학적 물성치의 변화를 조사하기 위함과 둘째, 순수점성 비뉴턴유체의 물성치들인 정압 열팽창계수 및 밀도에 대한 전단율 0에서의 점도의 영향을 조사하기 위함이다. 전단율 0에서의 점도는 첫번째 정압 열팽창계수 및 밀도 측정전후에 측정되었으며 이들 측정자료는 Fig. 6(a)와 (b)에 자료들을 처리해서 얻은 다음과 같은 LSE들과 같이 나타난다.

CMC 5,000 wppm

$$\eta_{01} = 1.2936 - 7.6529 \times 10^{-2} T + 2.1387 \times 10^{-3} T^2 - 2.9570 \times 10^{-5} T^3 + 1.5849 \times 10^{-7} T^4 \quad (\beta_1 \text{ 측정전})$$

$$\eta_{02} = 1.4292 - 0.1010 T + 3.1829 \times 10^{-3} T^2 - 4.7257 \times 10^{-5} T^3 + 2.6741 \times 10^{-7} T^4 \quad (\beta_1 \text{ 측정후})$$

CMC 10,000 wppm

$$\eta_{01} = 1.8991 - 7.7238 \times 10^{-2} T + 1.2652 \times 10^{-3} T^2 - 7.4417 \times 10^{-6} T^3 \quad (\beta_1 \text{ 측정전})$$

$$\eta_{02} = 1.4961 - 5.3531 \times 10^{-2} T + 7.5632 \times 10^{-4} T^2 - 3.9181 \times 10^{-6} T^3 \quad (\beta_1 \text{ 측정후}) \quad (29)$$

순수점성 비뉴턴유체의 경우 전체 작동 온도범위에서 η_0 의 감소는 최고 21.8%까지 나타나고 있다. 이러한 감소는 열주기와 순환에 의해 비뉴턴유체 분자사슬들이 짧아짐이 주요 원인이며 이러한 현상이 연속적으로 일어나면 점진적으로 Fig. 6(a)와 (b)에 나타나 있는 뉴턴유체의 경우에 대한 값들 방향으로 접근하는 경향을 나타낼 것이다. 이런 점도 감소현상은 뉴턴유체에서는 나타나지 않는다. Fig. 6(a)와 (b)에 있는 증류수의 LSE는 Incropera and Dewitt⁽¹¹⁾에 있는 절대점도 값들을 이용해서 얻었다.

전단율 0에서의 점도값들과 교대로 측정된 정압 열팽창계수 및 밀도에 대한 값들은 η_0 가 최고 22%까지 변화해도 이로 인한 영향은 나타나지 않았으므로 순수점성 비뉴턴유체의 정압 열팽창계수 및 밀도는 전단율 0에서의 점도값 변화와 무관하다.

5.4 전단율 0에서의 동점도

비뉴턴유체에 대한 전단율 0에서의 동점도인 ν_{NNO} 를 η_0 와 를 이론해석의 식(8)에 대입해서 구한 후 뉴턴유체인 증류수의 동점도 ν_N 과 비교하고자 한다. 온도가 증가함에 따라 η_0 와 ρ 는 모두 감소하

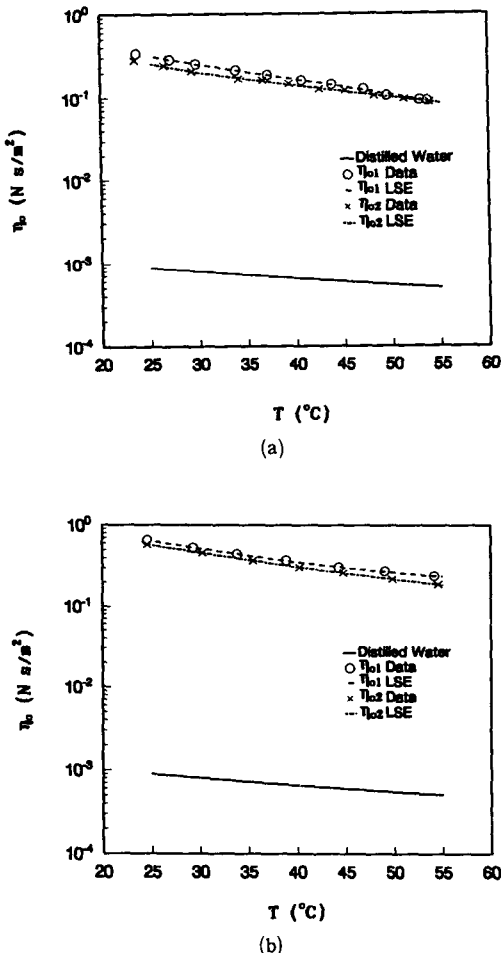


Fig. 6 (a) Zero-shear-rate viscosity versus temperature for CMC 7H4 5,000 wppm
(b) Zero-shear-rate viscosity versus temperature for CMC 7H4 10,000 wppm

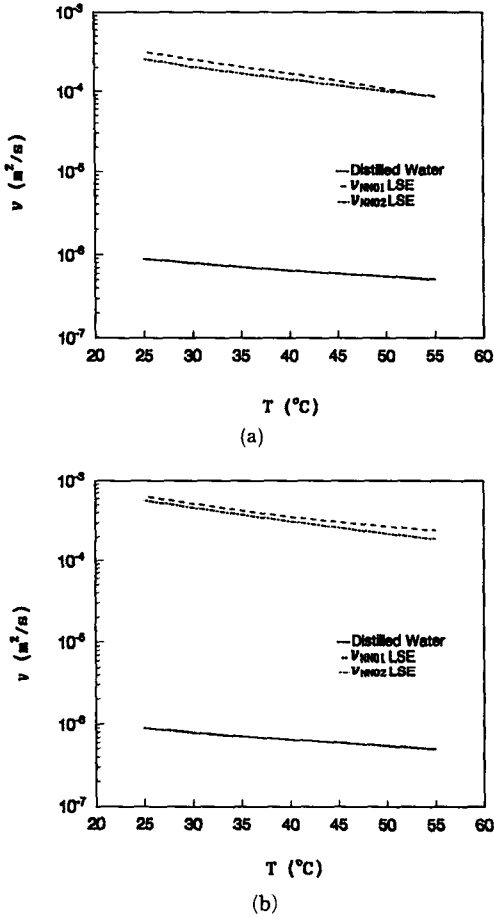


Fig. 7 (a) Zero-shear-rate dynamic viscosity versus temperature for CMC 7H4 5,000 wppm
(b) Zero-shear-rate dynamic viscosity versus temperature for CMC 7H4 10,000 wppm

는 경향을 나타낸다. ν_{NN0} 의 온도 및 농도에 따른 변화를 알아본 후 뉴턴유체인 증류수의 동점도 ν 와 비교하였다. Fig. 7(a)와 (b)에 비교 결과가 나타나 있으며 ν_{NN0} 의 전체적인 추세는 전단율 0에서의 점도와 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 이는 작동 온도 및 농도범위에서 뉴턴유체와 비뉴턴유체에 대한 밀도가 0.4% 이내의 차이만 나타내는 반면에 η_0 는 밀도의 경우보다 훨씬 큰 최고 22%까지의 차이를 보이기 때문이다.

6. 결론 및 요약

순수점성 비뉴턴유체의 물성치들인 정압 열팽창

계수, 밀도, 전단율 0에서의 점도 및 동점도 값들에 대한 농도 및 온도의 영향이 연구되었다. 실험장치에 대한 측정정밀도는 뉴턴유체인 증류수의 물성치값들을 측정한 후 문헌에 나타나 있는 자료들과 비교함으로써 검증되었다. 비교결과는 장치에 대한 측정오차해석의 전체 오차범위 내에 속하였으므로 실험장치에 의한 측정정밀도는 실험장치의 전체 오차범위인 최대 약 3% 이내였다. 이러한 실험장치를 이용하여 측정한 순수점성 비뉴턴유체의 물성치들에 대한 측정결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 순수점성 비뉴턴유체의 정압 열팽창계수는 온도가 증가함에 따라 뉴턴 유체인 증류수에서와 같이 증가하나 농도변화에 따라서는 변화가 없었다. 따라서 순수 점성 비뉴턴 유체의 정압 열팽창계수는 농도와 무관하게 실험장치의 오차범위인 3% 이내에서 증류수에 대한 값들로 대치 가능하다.

(2) 순수점성 비뉴턴 유체의 밀도는 온도가 증가함에 따라 뉴턴 유체인 증류수의 값과 같이 감소하고 농도가 증가함에 따라서는 일정한 비율로 전체 작동 온도범위내에서 증가하였다. 비뉴턴유체인 CMC 7H4 5,000 wppm 용액에서는 0.2%, 10,000 wppm 용액에서는 0.4%만큼 일정하게 증가하였다. 순수점성 비뉴턴유체의 다른 농도에 대한 밀도 값들도 추정할 수 있다.

(3) 전단율 0에서의 점도 η_0 는 다른 농도를 갖는 CMC용액에 대해 첫번째 정압 열팽창계수 및 밀도 값들 전후에 측정되었으며 이들은 열주기 및 순환에 의해 고분자의 고리가 짧아짐에 의해 최고 22%까지 감소하였고 농도변화에 따른 감소율은 큰 차이가 없었다. 이들의 변화에 대한 정압 열 팽창계수 및 밀도의 변화는 거의 없었다. 즉, 순수점성 비뉴턴유체의 정압 열팽창계수 및 밀도는 전단율 0에서의 점도와 무관하다.

(4) ν_{NN0} 변화는 η_0 와 ρ 모두가 온도증가에 따라 감소하는 경향을 나타내고 η_0 의 감소가 ρ 의 감소보다 훨씬 크기 때문에 온도변화에 따른 ν_{NN0} 의 변화는 η_0 의 경우와 거의 유사한 경향을 나타냈다. 농도변화에 따른 ν_{NN0} 의 변화는 거의 없었다.

향후 점탄성 비뉴턴유체의 온도 및 농도변화에 따른 물성치들에 대한 영향 연구로 연장시켜 비뉴턴 유체들의 물성치들에 관한 연구를 종합시킬 필요가 있다.

참고문헌

- (1) Irvine, Jr. T. F. and Duignan. M. R., 1985, "Isobaric Thermal Expansion Coefficients for Water over Large Temperature and Pressure Ranges," *Int. Comm. Heat & Mass Transfer*, Vol. 12, pp. 465~478.
- (2) Cho, K. and Irvine, Jr. T.F., 1993, "Determination of the density of Non-Newtonian fluids," *3rd World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Vol. 2, pp. 1762~1766.
- (3) Park, N. A. and Irvine, Jr. T. F., 1988, "Measurements of Rheological Fluid Properties with the Falling Needle Viscometer," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 59, No. 9, pp. 2051~2058.
- (4) Fujii, T. et al., 1973, "Natural Convective Heat Transfer from a Vertical Isothermal Surface to a Non-Newtonian Sutterby Fluid," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 2177~2187.
- (5) Dale, J. D. and Emergy, A. F., 1972, "The Free Convection of Heat from a Vertical Plate to Several Non-Newtonian Pseudoplastic Fluids," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 94, pp. 64~72.
- (6) Irvine, Jr. T. F., Insik Kim, Keumnam Cho and Fabio Gori, 1987, "Experimental Measurements of Isobaric Thermal Expansion Coefficients of Non-Newtonian Fluids," *J. of Experimental Heat Transfer*, Vol. 1, pp. 155~163.
- (7) Kell, G. S., 1975, "Density, Thermal Expansivity and Compressibility of Liquid Water from 0°C to 150°C," *J. Chem. Eng. Data*, Vol. 20, No. 1, pp. 97~105.
- (8) Weast, R. C., Astle, M. J. and Beyer, W. H., 1985, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 66th Ed., CRC Press, p. F-10.
- (9) Park, N. A. and Irvine, Jr., T. F., 1984, "The Falling Needle Viscometer-A New Technique for Viscosity Measurements," *Warme und Stoffubertragung*, Vol. 18, pp. 201~206.
- (10) Park, N. A., 1984, *Measurements of Rheological Properties of Non-Newtonian Fluids*, Ph.D. Thesis, State University of New York, Stony Brook, U.S.A.
- (11) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1990, *Fundamentals of Heat and mass Transfer*, John Wiley & Sons, 3rd Ed., pp. A22~A23.