

전단력 영역에서의 비뉴턴 유체의 열전도율 측정

이 동 렬* · Thomas F. Irvine, Jr.**

(1997년 8월 14일 접수)

Thermal Conductivity Measurements of Non-Newtonian Fluids in a Shear Field

Dong-Ryul Lee and Thomas F. Irvine, Jr

Key Words: Non-Newtonian Fluids, Thermal Conductivity, Shear Rate Effects

Abstract

An investigation was carried out to determine experimentally the thermal conductivities of non-Newtonian fluids in a shear field. Both time independent purely viscous and viscoelastic fluids were considered. A coaxial cylinder apparatus with a rotating outer cylinder was used to establish the velocity field in the test fluid. First, the thermal conductivity of distilled water was measured to validate the instrument. The experimental water data agreed within 1% of literature values and there was no effect of outer cylinder rotation (shear field). However, for non-Newtonian fluids such as aqueous CMC and Separan solutions, there were significant increases in thermal conductivities of up to 70% for CMC and 50% for Separan depending on the shear rate, polymer concentration and temperature. Considering the shear rate dependent thermal conductivity in the study of heat transfer in non-Newtonian fluids could be important. As in natural convection, the momentum and energy equations could no longer be solved separately but would have to be solved simultaneously.

기 호 설 명	
Br	: 브린크만 수 [-]
C_p	: 비열 [J/kgK]
E	: 전선전압 [Volt]
I	: 전선전류 [Ampere]
K	: 멱법칙 상수 [Nsn/m ²]
k	: 작동유체의 열전도율, $k=k(\dot{\gamma})$ [W/mK]
k_c	: 기점전단율 열전도율 [W/mK]
k_s	: 전단율종속 열전도율 [W/mK]
k^+	: 무차원 열전도율, k_r/k_0 [-]
l	: 원통 길이 [m]
n	: 멱법칙 지수 [-]
Q	: 전체 열전달 [W]
Q_{actual}	: 실제 열전달, $Q_{actual}=Q-Q_{loss}$ [W]
Q_{loss}	: 열손실 [W]
R_T	: 전선저항 [Ω]
r	: 반지름 [m]
r_{avg}	: 평균 반지름 [m]
r_i	: 내부원통 반지름 [m]
r_o	: 외부원통 반지름 [m]
T	: 온도 [K or $^{\circ}C$]
T_i	: 내부원통온도 [K or $^{\circ}C$]
T_0	: 외부원통온도 [K or $^{\circ}C$]

*대구효성가톨릭대학교, 공과대학 기계자동차공학부

**Department of Mechanical Engineering State University of New York at Stony Brook Stony Brook, New York 11794, U. S. A.

u	: 유동방향속도 [m/s]
u_θ	: 원주방향속도 [m/s]
u_r	: 반지름방향속도 [m/s]
u_z	: 축 방향속도 [m/s]
ω_0	: 외부원통 각속도 [rad/s]
wppm	: parts per million by weight [-]
x	: 유동방향좌표 [m]
y	: 횡방향 좌표 [m]
z	: 축방향 좌표 [m]

그리스문자

$\dot{\gamma}$: 전단율 [1/s]
$\dot{\gamma}_0$: 최소 작용 전단율 [1/s]
η_0	: 기점전단율 점도 [$N \cdot s/m^2$]
η_a	: 겉보기 점도, $\tau/\dot{\gamma}$ [$N \cdot s/m^2$]
τ	: 전단응력 [N/m^2]
ΔT	: 내부 및 외부 원통 벽의 온도차이 [K or $^\circ C$]

하첨자

0	: 정지 유동장
avg	: 평균
$\dot{\gamma}$: 변수 전단율
i	: 내부 원통
o	: 외부 원통
r	: 반지름 방향
w	: 벽

상첨자

+	: 무차원
---	-------

1. 서 론

유동특성상 고분자 용액, 현탁액, 슬러리(slurries)과 같이 비뉴턴적이거나 혹은 유변학적인 다수의 산업유체들은 종종 화학공정, 음식업, 그리고 많은 다른 실제응용에 사용된다. 이는 다수의 그러한 유체들을 열거함으로써 설명될 수 있다. 그의 실례로는 페인트, 약제, 아교, 인쇄잉크, 음식물, 다양한 현탁액, 비누 세제 슬러리, 혈액, 생체액, 고분자 용액, 석탄물 혼합물 등이 있다. 그것들의 구조적 본질로 인해, 그런 유체들은 물, 공기와 같은 뉴턴 유체와는 상당히 다르게 작용한다. 최근에는 실제응용에 있어서 비뉴턴 유체들을 최대한 이

용하고 물리적 본질을 이해하기 위해서 비뉴턴 유체들에 관한 정량적인 정보를 입수하기 위하여 새로운 관심이 불기 시작했다.

비뉴턴 유체들의 점성적 물성(viscous property)을 측정하기 위하여 다수의 연구가 수행되어 왔다. 대부분의 이전의 연구들은 등온체계에서 이루어졌다. 한 시스템 내에서 온도차이가 존재할 때 열전도율과 같은 열물성(thermal property)의 정보가 필요하다.

비뉴턴 유체의 열전도율에 대한 이전의 실험적 연구의 가장 중요한 사실은 대다수의 측정들이 정지 유체상태에서 이루어 졌다는 것이다. 겉보기 점도의 경우와 같이 열전도율에 전단율의 영향이 존재한다면 물성 측정은 유체가 정지 경계조건에 대하여 운동상태에 있을 때의 전단율 범위 내에서 행해져야 한다.

점탄성 유체의 열전도율에 대한 전단율의 영향은 소수의 이전의 연구에서 조사되어 왔으나 결과들은 서로 모순된 점을 보여 주었다. Cocci 및 Picot⁽¹⁾에 의하면 Dow 200 유체의 열전도율은 전단율이 0에서 300 (s^{-1}) 사이에서는 전단율이 증가함에 따라 증가하였고, Chitrangad 및 Picot,⁽²⁾ Picot et al.⁽³⁾에 의하면 전단율이 200 (s^{-1}) 이하의 낮은 범위 내에서는 Dow 200 유체와 폴리에틸렌 용해물의 열전도율은 각각 전단율이 증가함에 따라 증가하고, 극대점에 이르렀다가 전단율이 200에서 400 (s^{-1}) 사이에서는 열전도율은 전단율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여주었다. 열전도율의 최소치와 최대치의 차이는 10~20% 정도였다. Cocci 및 Picot⁽¹⁾은 또한 Dow 200 유체의 열전도율 증가율은 온도가 증가함에 따라 감소함을 보여주었다. 그 이외에도 Picot et al.⁽³⁾은 액체와 고체 상태에서 고분자 물질은 분자량에 따라 열전도율이 증가함도 보여주었다.

그와는 반대로 Wallace et al.⁽⁴⁾에 의하면 고분자 분자량에 따라 전단율이 0에서 400 (s^{-1}) 사이에서 폴리에틸렌 용해물의 열전도율은 전단율이 증가함에 따라 때로는 증가 혹은 감소함이 조사되었다. 저 분자량의 고분자 용해물 실험을 통해 전단율의 증가에 따라서 55%의 열전도율의 감소가 야기되었다. 고 분자량의 고분자 용해물은 처음에는 열전도율의 감소를 보여주다 고전단율에서는 열전도율의 증가를 보여주었다. 최근에 원추-판(Cone-and-plate) 시스템을 이용한 Loulou et al.⁽⁵⁾ 및 Chalice

Table 1 Previous measurements of thermal conductivity in a shear field.

Experimental Technique	Test Material	Reference
Axial flow cell	Polymer liquid (Dow 200 fluid)	Cocci and Picot [1]
Couette flow	Polymer liquid (Dow 200 fluid)	Chitrangad and Picot [2]
Couette flow	Polymer melts (polyethylene melts)	Picot <i>et al.</i> [3]
Couette flow	Polymer melts (polyethylene melts)	Wallace <i>et al.</i> [4]
Cone and-plate cell	Polymer solutions (Carbopol solutions)	Loulou <i>et al.</i> [5]
Cone and-plate cell	Polymer solutions (CMC solutions)	Chaliche <i>et al.</i> [6]

et al.^[6]의 연구에 의하면 전단율 증속 열전도율은 Carbopol 용액(1000 및 2000 wppm)에 대해 저전단율(20 s^{-1})에서는 3% 변화와 CMC 용액(30000 및 80000 wppm)에 대해 전단율(50 s^{-1})에서는 5% 변화를 보여 주었다. 그외에도 Chaliche *et al.*^[6]는 온도의 증가 또는 고분자 농도가 감소함에 따라 전단율이 증가할때 열전도율이 점차적으로 증가함을 보여주었다. 온도가 높아짐에 따라 열전도율이 증가하였고 농도가 낮아질수록 열전도율이 증가하였다. 그러나 Loulou *et al.*^[5]의 연구를 제외한 지금까지 보고된 열전도율 데이터는 겔보기 점도가 변화하는 전단율의 영역에서 결정되었다는 사실은 불확실하다. 왜냐하면 전단율에 대한 점도 곡선은 위에 열거된 참고 문헌에는 제시되지 않았기 때문이다. Table 1은 참고문헌에 열거된 이전의 열전도율에 관한 측정자료이고 Fig. 1은 이전에 보고되었던 비뉴톤 유체의 전단율 증속 열전도율의 정성적 곡선을 보여주고 있다.

이 연구의 목적은 두 가지 비뉴톤 유체, 즉 CMC 및 Separan 용액의 점성적 물성을 측정하고 난후 점성적 물성이 전단율에 따라 크게 변화하는 전단율 영역에서의 운동상태의 유체의 열전도율을 측정하고 전형적인 대류 열시스템의 열전달 문제에 있어서 전단력에 증속한 열전도율의 영향을 조사하는 것이다.

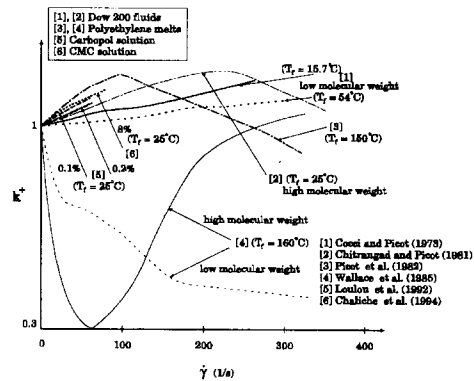


Fig. 1 Qualitative curves of the shear rate dependent thermal conductivity of non-Newtonian fluids previously reported. Percentage quantities are percents by weight of solutes.

2. 작동유체에 대한 실험 점도 결과치

전단율에 따른 겔보기 점도측정을 위해 선택된 유체는 농도 1500, 2500, 5000 wppm의 묽은 CMC 7H4 수용액과 농도 1000, 2000 wppm의 Separan AP-273 수용액이었다.

Figs. 2 및 3은 농도 1500, 2500, 5000 wppm의 CMC 7H4 수용액과 농도 1000, 2000 wppm의 Separan AP-273 수용액의 유동곡선, 즉 전단율에 따른 겔보기 점도를 보여주고 있다. Figs. 2 및 3

에 보여진 측정은 낙침 점도계 (FNV) (Park 및 Irvine⁽⁷⁾)를 이용하여 수행되었다. Park *et al.*⁽⁸⁾에 언급된 바와 같이 낙침 점도계는 의소성 유체 (pseudoplastic fluid) 및 점탄성 유체 (viscoelastic fluid)의 점성적 물성을 측정하는데 적합하다. Figs. 2 및 3에 보여진 바와 같이 FNV 데이터는 대략, CMC 1500 wppm에 대해서는 $10^0 < \dot{\gamma} < 10^3$, CMC 2500 wppm에 대해서는 $5 \times 10^{-1} < \dot{\gamma} < 5 \times 10^2$, CMC 5000 wppm에 대해서는 $10^{-1} < \dot{\gamma} < 10^2$, 그리고 Separan 1000, 2000 wppm에 대해서는 $10^{-2} < \dot{\gamma} < 6 \times 10^2$ 영역내의 물성치를 포함하고 있다.

FNV 데이터는 뉴톤 영역 및 천이 영역 (transition region)의 값을 포함하고 Figs. 2 및 3에서 관찰된 바와 같이 멱법칙 영역의 시작을 의미하고 있

다. CMC 그림에서, 점선은 실험치에 대한 Cross 모델을 표시하고 있고 Separan 그림에서의 점선은 실험치에 대한 Curve-fitting을 표시하고 있다. Figs. 2 및 3은 대략 CMC 수용액에 대해서는 $10^1 < \dot{\gamma} < 10^3$ 그리고 Separan 수용액에 대해서는 $10^{-1} < \dot{\gamma} < 6 \times 10^2$ 의 멱법칙 영역을 표시하고 있다.

시험용액의 물성치를 측정된 결과로써 CMC 수용액의 열전도율에 대한 작용 전단율 영역은 $10 < \dot{\gamma} < 1000 \text{ s}^{-1}$ 이고 Separan 수용액의 영역은 $10^{-1} < \dot{\gamma} < 600 \text{ s}^{-1}$ 임을 알 수 있었다. 열전도율과 같은 열물성 (thermal property)이 비뉴톤 유체의 동점도 (dynamic viscosity)와 같은 전달 물성 (transport property)의 경우처럼 전단율의 함수로서의 표현가능 여부를 결정하기 위하여 전달 물성이 전단율에 따라 크게 변화하는 동일한 멱법칙 전단율 영역에서 운동상태의 비뉴톤 유체의 열전도율을 측정할 수 있었다.

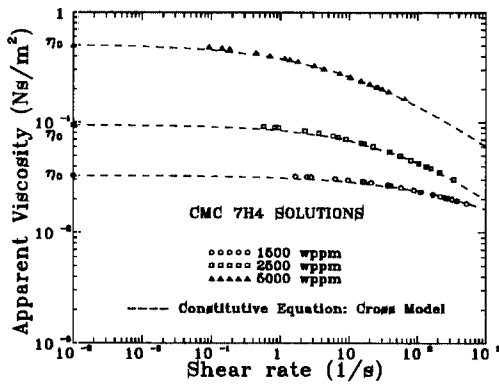


Fig. 2 Apparent viscosity of CMC solutions (1500, 2500, and 5000 wppm) plotted against shear rate.

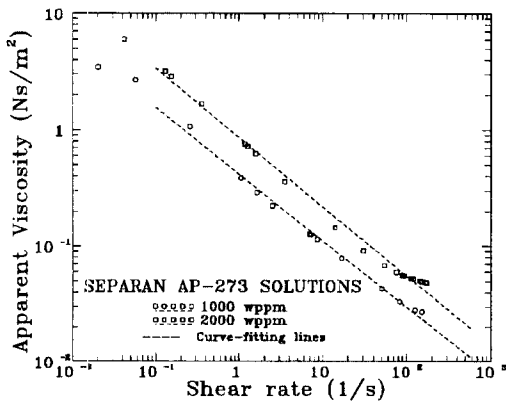


Fig. 3 Apparent viscosity of Separan solutions (1000 and 2000 wppm) plotted against shear rate.

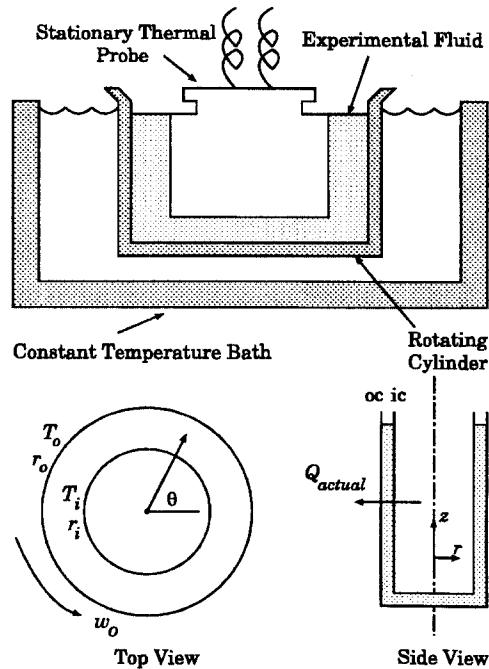


Fig. 4 Schematic of experimental apparatus for thermal conductivity measurements in a shear field.

3. 실험장치 : 열전도율 측정

3.1 실험기구의 일반적 개요

실험계획에 있어서 열전도율은 대략 Figs. 2 및 3에 나타난 바와 같이 상당한 비뉴턴 영향을 보여주는 동일한 역법칙 전단율 영역에서 측정되었다. 이를 성공적으로 수행하기 위하여 Fig. 4에 설명된 것과 같은 실험적 조정이 이루어 졌다.

Fig. 4는 안쪽 원통은 정지상태이고 바깥쪽 원통은 회전상태인 동축 원통형 시스템을 보여주고 있다. 원통의 치수는 다음과 같다. 바깥쪽 원통의 내경은 5.60 cm, 안쪽 원통의 외경은 5.35 cm이다. 실험유체는 원통사이가 1.25 mm 틈새에 위치하고 있다. 그리하여 만약 틈의 너비가 내경보다 충분히 작을 경우에는 원통사이의 틈에는 평면 쿠엣 유동(plane Couette flow)이 형성되어 진다. 안쪽 원통은 전열선을 담고 있는 열탐침(thermal probe)으로 구성되어 있다. 이중 원통 조립기구는 바깥쪽 원통을 알려진 일정한 온도로 유지하기 위하여 항온조에 위치하고 있다. 틈새의 온도차이는 대략 10°C 정도이었다.

전단율 영역에 있는 비뉴턴 열전도율의 측정을

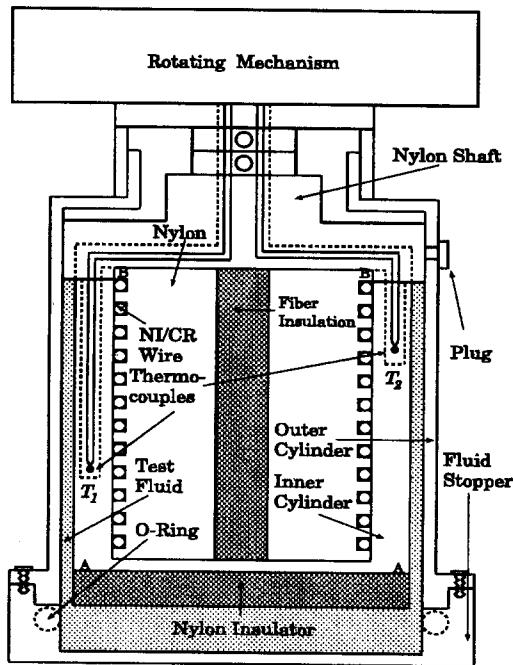


Fig. 5 Schematic of the thermal conductivity cell.

위해 사용된 실험기구는 Fig. 5에 자세히 보여주고 있다.

이 시스템은 항온조, 회전 바깥쪽 원통, 정지 안쪽 원통, 회전 기계장치 및 안쪽 원통의 온도를 측정하기 위하여 보정된 열전대, T_1 , T_2 등으로 구성되어 있다. 이 실험의 필요 측정치는 안쪽 원통과 바깥쪽 원통사이의 벽면 온도차(ΔT), 열량(Q), 원통 길이(l), 실린더 반경비(r_o/r_i), 전선 저항(R), 전선 전압(E), 전선 전류(I), 바깥쪽 원통의 각속도(ω_o)이다.

실험이 진행되는 동안 필요한 측정치는 바깥쪽 원통의 회전속도, 안쪽 원통과 바깥쪽 원통사이의 온도차, 전력 공급계로부터의 입열량이다.

3.2 역법칙 유체에 대한 지배방정식

실험기구의 성능을 고려하기 위하여 역법칙 유체를 이용한 원형 쿠엣 유동(circular Couette flow)에 대한 지배방정식을 제시하는 것이 유용하다. 이는 점성소산(viscous dissipation), 틈의 전단율 변화량(gap shear rate variation) 등과 같은 그러한 영향의 유무를 조사하는데 도움을 준다. 역법칙 구상방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

$$\eta_a = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

여기서 K 는 역법칙 상수이고 n 은 역법칙 지수이다.

Fig. 4에 보여진 시스템에 대한 지배방정식은 다음과 같은 무차원 변수와 계수에 의해 무차원화 될 수 있다.

$$\begin{aligned} u_\theta^+ &= \frac{u_\theta}{r_o \omega_o} \\ r^+ &= \frac{r}{r_i}, \quad r_o^+ = \frac{r_o}{r_i} \\ T^+ &= \frac{T - T_o}{T_i - T_o}, \quad k^+ = \frac{k}{k_{ref}} \\ \theta^+ &= \frac{\theta}{\theta_{ref}}, \quad \eta_a^+ = \frac{\eta_a}{\eta_{ref}} \\ Br &= \frac{K (r_o \omega_o)^{n+1}}{2k_o r_i^{n-1} (T_i - T_o)} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 k_{ref} 는 기점전단율 열전도율 (k_o)이고 η_{ref} 는 기점전단율 점도 (η_o)이고 Br 은 브린크만 수이다. u_r 및 u_z 는 0이고 u_θ 및 T 는 오직 r 의 함수이다. 비뉴턴 유체의 정상유동에 대한 무차원

화된 지배방정식은 다음과 같다.

연속 방정식 :

$$\frac{\partial u_{\theta}^+}{\partial \theta^+} = 0 \quad (4)$$

운동량 방정식 :

$$\frac{1}{r^{+2}} \frac{d}{dr^+} \left[r^{+2} \eta_a^+ \left(\frac{du_{\theta}^+}{dr^+} - \frac{u_{\theta}^+}{r^+} \right) \right] = 0 \quad (5)$$

에너지 방정식 :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r^+} \frac{d}{dr^+} \left(r^+ k^+ \frac{dT^+}{dr^+} \right) \\ & = -2Br \left(\frac{du_{\theta}^+}{dr^+} \right)^{n-1} \left[\frac{du_{\theta}^+}{dr^+} - \frac{u_{\theta}^+}{r^+} \right]^2 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5) 및 (6)에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r^+ = 1, \quad u_{\theta}^+ = 0, \quad T^+ = 1 \\ r^+ = r_0^+, \quad u_{\theta}^+ = 1, \quad T^+ = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

3. 세부 설계 고려사항

뉴턴 및 비뉴턴 유체에 대한 점성열(viscous heating)의 영향은 본 실험에서 사용된 동축회전 원통형 시스템에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 브린크만 수 (Br)가 1보다 훨씬 작다는 사실이 증명되어야 한다. 본 실험의 작용영역에서 브린크만 수 (Br)를 계산해 본 결과 최대 멱법칙 브린크만 수(Br)는 0.024임을 알 수 있었다. 그래서 작용 멱법칙 영역에서는 점성소산(viscous dissipation)의 영향은 거의 무시할 정도였다.

전체열량(total heat input)은 작동유체의 틈을 통해 열전도에 의하여 바깥쪽 원통으로 전달될 뿐만 아니라 다른 열전달에 의하여 나일론 축(Nylon shaft) 및 실험기구의 그외의 부분으로 열이 전달된다. 예측되는 최대 전체 열손실은 대략 1.41% 정도이다. 모든 열손실은 실제 열전도율 측정에서 교정되었다.

표준 온도계(RTD)를 이용해서 보정된 두개의 K형 열전대는 안쪽 원통의 온도를 측정하기 위하여 사용되었다. 두 열전대의 온도는 표준 온도계(RTD)와 보정된 온도식 사이에서 열전대 I에 대해서는 0.0160°C, 열전대 II에 대해서는 0.0148°C의 최고 온도편차를 보였다. 그외에도 실험도중 열전대 I 과 열전대 II 사이에 실험 측정 최대온도 차이는 0.1°C ($T_2 > T_1$). 이런 오차(uncertainty)는 측정된 열전도율의 오차해석에서 온도 측정 오차로

설명될 수 있었다.

안쪽 원통과 바깥쪽 원통사이의 틈은 축방향으로 일정해야 한다. 그렇지 않을 경우 편심효과(eccentricity)가 발생한다. 그런 편심효과는 열전도율의 감소를 야기시킨다. 동심 열전도율과 비교하여 0.1% 낮은 결과를 보여준 측정된 바깥쪽 원통의 편심은 0.0051 cm이었다. 그외에도 편심영향은 아마 유체혼합을 야기시킬 수도 있으나 본 실험에서 그런 영향은 거의 존재하지 않았다. 또한 그 영향은 물에서도 발생할 수 있으나 거의 구별하기 어려웠다. 그러므로 본 실험에 의한 측정에는 편심효과는 고려되지 않았다.

평면 쿠테 유동(Couette flow)에서 원통의 틈 사이에서 일정한 오직 하나의 전단율이 존재한다. 현 실험기구는 원형 쿠테 유동을 형성하기 때문에 안쪽 원통에서 바깥쪽 원통까지의 전단율의 변화량을 고려하는 것이 필요하다. CMC와 Separan용액이 멱법칙 유체의 거동을 나타내는 사실을 고려한다면 틈새 평균 전단율과의 최대 전단율 변화량은 CMC는 8.34%이며 Separan은 6.26%이다.

전단율 측정에 있어서 존재할 수 있는 또 다른 오차(uncertainty)는 유체의 절보기 점도가 온도구배(temperature gradient)로 인하여 원통의 틈 사이에서 변화한다는 사실에 의해 기인한다. 이는 곡률(curvature)에 의한 전단율 변화량과는 반대로 전단율이 안쪽에서 바깥쪽 원통으로 갈수록 감소되는 사실을 야기시킨다. 이런 열전단율 변화량(thermal shear rate change)은 곡률 변화량(curvature change)과 같은 정도의 크기(order of magnitude)이며 전체 전단율 오차(overall shear rate uncertainty)를 줄일 수 있을 것이다. 그러나 이런 오차 감소법은 여기서는 적용되지 않았고 오차 해석(error analysis)에서 보여준 전단율은 오직 곡률효과(curvature effect)를 고려한 원통 사이의 평균치이다.

만약 두개의 수직 원통(vertical cylinders) 사이에서 자연 대류현상이 발생할 수 있다면, 열전도율 측정에 오차가 존재할 것이다. Eckert 및 Drake⁽⁹⁾에 의해 보고된 바에 의하면 임계 Rayleigh No. ($Ra_{cr} = 1000$)가 존재하는데 그 밑의 범위에서는 두개의 원통 사이에서는 오직 순수 전도(pure conduction)에 의한 열전달만 발생한다. 현재의 실험에서는 최대의 Rayleigh No.는 최저의 점도를 가진 유체, 즉 물에 대해 존재한다. 물의 경우에

있어서 최대 Rayleigh No.는 261임으로 인해 자연 대류효과는 존재할 수 없다. 이런 경우는 불의 열전도율의 측정에 의해 예증될 수 있을 것이다.

어떤 특정한 경우에 있어서 회전 쿠프레트유동(rotating Couette flow)에는 2차 유동(secondary flow)이 발생할 수 있다. 이런 유동은 측정된 열전도율을 증가시킬 수 있기 때문에 그것의 발생 가능성에 대한 조사가 수행되었다. 회전 원통의 각속도, 평균 원통 반지름, 원통간의 틈(cylinder gap)에 기초하는 임계값 이상의 Taylor No.에서는 두개의 동축 원통사이에서 어느 원통이 회전하느냐에 따라 2차 유동이 발생할 수 있다. 그러나 내부 원통은 정지상태에 있고 외부 원통은 회전할 때 이런 조건하에 있는 점성 뉴톤 유체의 운동상태는 심지어 외부 원통이 매우 고속일 때도 항상 안정된(stable) 상태임이 입증되었다.

본 연구에서 사용된 작업유체의 다섯개 농도(CMC 1500, 2500, 5000 wppm, 및 Separan 1000, 2000 wppm)상의 Taylor No.의 현재 범위는 CMC 용액에 대해서는 Sinevic 등⁽¹¹⁾에 의해, Separan 용액에 대해서는 Larson⁽¹²⁾에 의해 설명되어진 바와 같이 원통간의 틈(cylinder gap), 벽법칙 지수(flow index), 유체 밀도, 벽법칙 상수(flow consistency)의 데이터로부터 임계 Taylor No. 보다 작게 계산되었다. 그러므로, 비록 임계 Taylor No. (Ta_{cr})가 회전상태의 내부 원통에 대해 계산할 수 있는 값이지만, 현 실험에서 회전 외부

원통에 대한 작업유체의 유동은 안정된(stable) 상태라 예측할 수 있다. 진보된 유동의 안정성의 확인은 Park 등⁽⁸⁾의 연구에서 발견될 수 있다. 이 연구에서는 2000 wppm Separan 수용액에 대해서 겔보기 점도 vs. 전단율이 측정되었다. 비록 낙침 점도계가 비회전 장치임에도 불구하고 회전 원통형 점도계와 낙침 점도계를 이용한 실험으로부터 두 실험 데이터는 거의 일치하고 있음을 보여 주었다. 그 외에도, 원심력에 대한 온도구배 방향은 안정된(stable) 상태의 열시스템으로 기인하는 쪽으로 향함을 알 수 있었다.

5. 실험 절차와 측정

푸리에 전도법칙(Fourier's law of conduction)이 적용 가능하고, 실험 기구는 정상 상태에서 작동하고, 원통간의 틈 사이에서 반지름 방향으로 전단율의 변화를 무시할 수 있고, 원통간의 틈 사이에서의 열전도율이 온도의 독립함수라는 가정하에 열전도율의 작용 방정식은 중공 원통(hollow cylinder)에 대한 단순 열전도 방정식이 된다.

$$k = \frac{Q \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi L \Delta T} \quad (8)$$

열전달 계수는 이미 논의되었던 작용 전단율 범위상에서 운동 상태에서의 자주 사용되어지는 비뉴

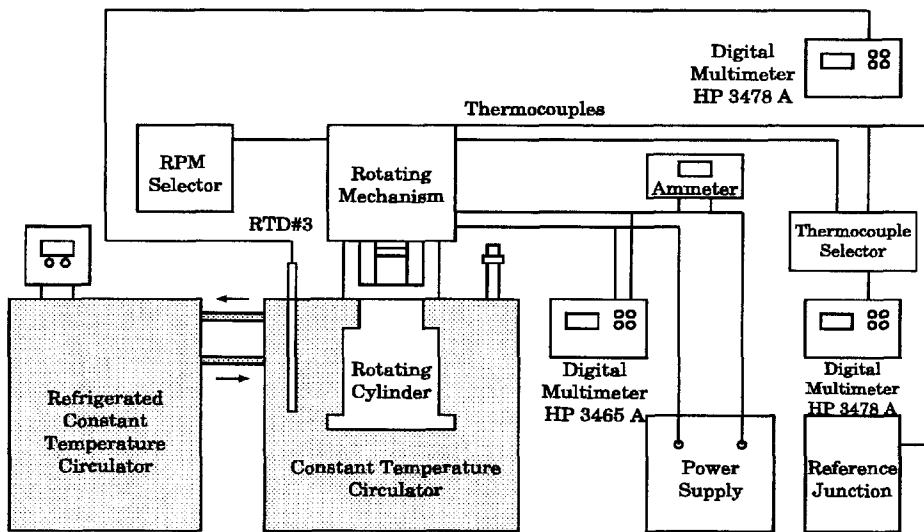


Fig. 6 Schematic of overall experimental apparatus.

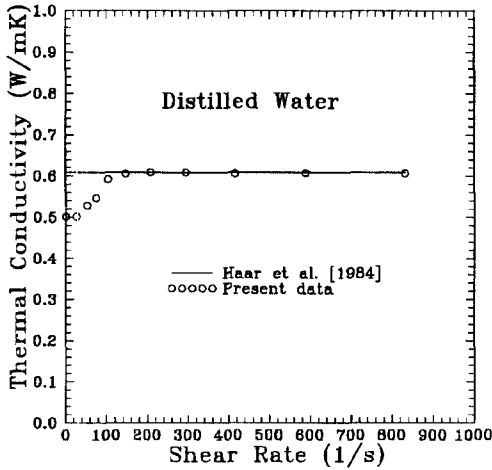


Fig. 7 Thermal conductivity vs. shear rate for distilled water at fluid temperature (26°C) without convecting fins.

톤 유체들의 함수 및 그 함수들의 전단율의 함수로서 측정될 수 있었다.

전체적인 실험의 개요도는 실험과정의 이해를 돕기 위해서 Fig. 6에 표시되어 있다.

6. 뉴턴 및 비뉴턴 유체에 대한 실험결과

6.1 물의 열전도율 측정

비뉴턴 유체의 열전도율을 측정하기 전에 실험 장치를 보정하기 위하여 증류수에 대한 다수의 측정이 먼저 수행되어야 한다. 이런 실험의 목적은 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째로는 현 실험 장치가 문헌치와 동일한 값을 측정할 수 있는지의 여부를 결정할 수 있고, 둘째는 물은 뉴턴 유체임으로 인해 전단율 효과가 존재하지 않는 사실을 확인하고, 셋째로는 자연 대류 현상이 발생하지 않음을 보여주는데 그 목적을 두었다.

Fig. 7은 물에 대한 측정을 설명해 주고 있다. 그림에서 보여 주는 바와 같이 다음과 같은 세가지 현상을 발견할 수 있다. 첫째, 물의 열전도율은 대략적으로 100 s⁻¹ 이상의 전단율에서 Haar 등⁽¹³⁾에 의한 기준치에 1% 이내의 오차가 발생하였고 자연 대류의 효과는 나타나지 않았다. 둘째, 작용 전단율 범위 내에서 뚜렷한 전단율 효과를 발견할 수 없었다. 셋째로는, 아주 낮은 전단율에서는 열전도율은 낮게 측정되었다. 세번째와 같은 이런 현상은

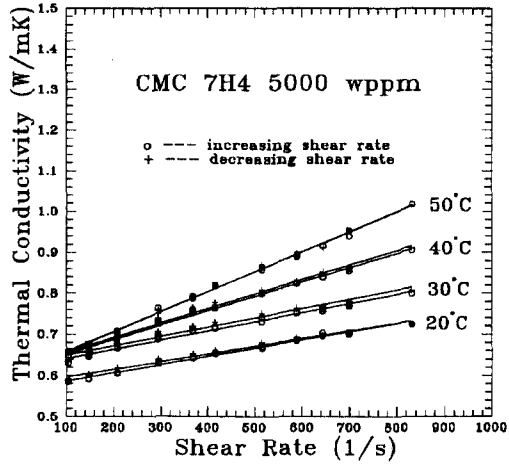


Fig. 8 Thermal conductivity vs. shear rate for CMC 5000 wppm at four different temperatures.

낮은 회전속도에서 외부 원통에서의 열전달 계수(heat transfer coefficient)가 낮은 데에서 비롯된다. 이는 외부 원통의 온도를 항온조 온도(bath temperature)보다 높여 주게된다. 그래서 이런 문제는 대류 열전달 계수를 증가시키기 위하여 외부 원통에 몇 개의 세로 방향의 핀(longitudinal fins)을 부착시키므로써 해결될 수 있다.

6.2 전단력 영역 내에서의 열전도율 측정

Fig. 8은 4개의 다른 온도(20, 30, 40, 50°C)에서 CMC 7H4 5000 wppm 용액에 대한 열전도율 vs. 전단율의 관계를 보여주고 있다. 이 데이터는 고분자의 퇴화(polymer degradation)현상이 존재하지 않음을 확인하기 위하여 증가했다가 동시에 감소하는 전단율 범위(100 ≤ γ̇ ≤ 900)에서 획득할 수 있었다.

전단율에 대한 비뉴턴 유체의 점도의 관계와는 달리 열전도율은 전단율이 증가함에 따라 증가하는 추세를 보였다. 특정한 전단율상의 고온에서의 열전도율은 저온에서의 그것보다 높음을 알 수 있었다. 그러므로 온도의 영향은 중요하고 전단율에 대한 고온에서의 열전도율의 증가치는 저온에서의 그것보다 큰 것을 또한 발견할 수 있었다. Fig. 9는 CMC 7H4 2500 wppm 용액에 대한 열전도율 vs. 전단율의 관계를 나타내 준다. 이 그림의 일반적인 경향은 Fig. 8과 비슷한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 10은 CMC 7H4 1500 wppm 용액에 대한 열전도율 vs. 전단율의 관계를 나타내 주고 또한 Fig. 8 및 9와 유사한 경향을 보여주고 비록 훨씬 더 넓은 전단율 영역 상에서 존재하지만 Chaliche 등⁽⁶⁾의 연구에서 보고된 바와 같이 유사하게 증가하는 전단율에 따라 열전도율이 증가하는 명백한 종속성을 보여 주었다. 비뉴턴 유체와 같은 구조 액체(structured liquids)에 대해서는 전단력의 영향은 액체 자체의 구조와 그 액체의 열전도율의 변화를 가져올 수 있다. 그 결과로써 열전도율은 전단율에

종속된다고 할 수 있는 것이다. 즉 전단율이 증가함에 따라 분자들의 얽힘상태는 열물성치의 변화에 지배적인 역할을 할 수 있다. 고 전단율에서의 열전도율의 증가는 회전하는 분자들의 얽혀져 있는 집합체들의 형성으로부터 기인하는 것이다. 전단율의 증가에 따른 열전도율의 증가는 기존의 물성치의 변화와는 별개의 유동 메카니즘을 제시하고 있는 것이다. 그외에도 고분자 액체들은 분자들의 얽혀져 있는 집합점(entanglement junction)에서 생성되는 점성열의 양과 같은 양의 탄성에너지가 분

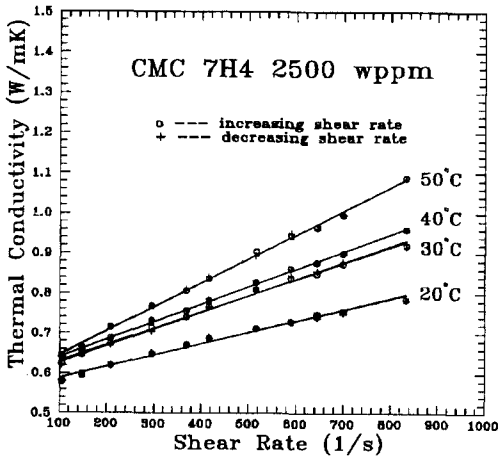


Fig. 9 Thermal conductivity vs. shear rate for CMC 2500 wppm at four different temperatures.

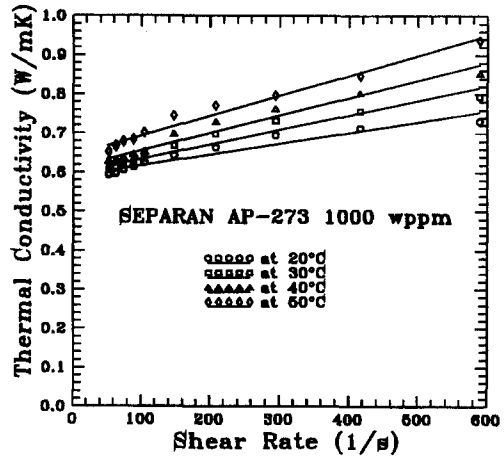


Fig. 11 Thermal conductivity vs. shear rate for Separan 1000 wppm at four different temperatures.

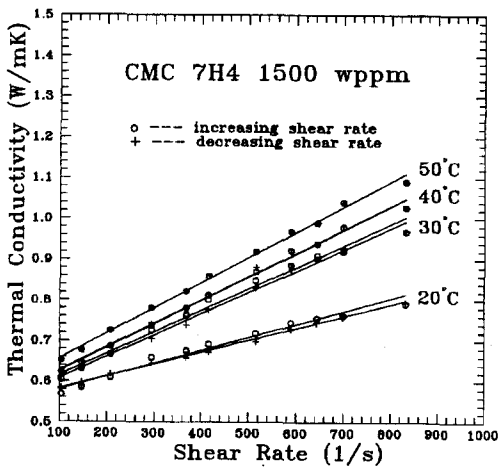


Fig. 10 Thermal conductivity vs. shear rate for CMC 1500 wppm at four different temperatures.

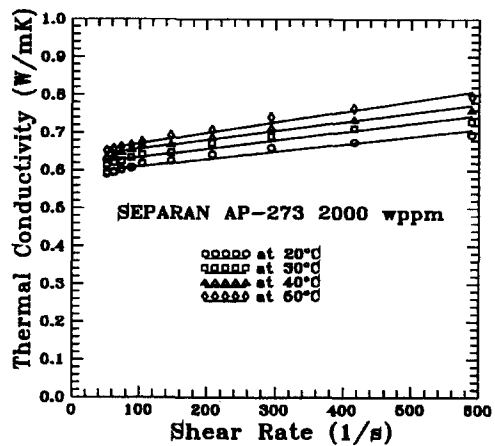


Fig. 12 Thermal conductivity vs. shear rate for Separan 2000 wppm at four different temperatures.

자들의 무작위 고리(random coil)에 저장되어 있기 때문에 분자의 유동 메커니즘에 변화를 가져온다고 할 수 있는 것이다. 본 실험에서의 점성열의 영향은 앞에서 설명된 바와 같이 무시할 수 있었다. 분자들의 회전속도가 커질수록 분자들의 탄성 에너지는 고분자 액체의 상대 열전도율(relative thermal conductivity, $\frac{k_f}{k_0}$)의 더 큰 변화를 야기시킬 수 있는 것이다.

Fig. 8~10은 흥미있는 열전도율-전단율 특성을 표시하고 있다. 최저 농도(1500 wppm)의 용액은 최고 농도(5000 wppm)의 용액보다 전단율에 대한 열전도율의 증가치가 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 다음의 그림에서도 보여지겠지만, 동일한 현상은 Separan 용액의 실험에서도 발견될 수 있었다. 그러나 이런 현상은 Loulou 등⁽⁵⁾과 Chalice 등⁽⁶⁾의 문헌치에서도 일치하고 있다. Separan AP-273 1000 및 2000 wppm 용액은 변수전단율 영역(50~600 s⁻¹)에서 조사되었고 이 실험의 결과는 각각 Fig. 11 및 12에 네 개의 다른 온도(20, 30, 40, 50°C)에서 전단율에 대한 열전도율의 그래프로서 표시되었다. 이 그래프의 일반적인 경향과 특징은 이전의 CMC 그래프와 꽤 유사하였다. Fig. 11 및 12의 그래프는 전단율에 대한 명백한 열전도율의 종속성을 보여주고 있다. 전단율 종속도(degree of shear rate dependence)는 CMC 및 Separan 수용액에 대해 모두 온도에 대해서 증가한다. Fig. 8~12는 항상 고분자 농도가 0 wppm이 될 때까지 열전도율의 전단율 종속성을 보여주지는 않는다. Loulou 등⁽⁵⁾과 Chalice 등⁽⁶⁾의 연구에 의해 고분자 농도가 감소함에 따라 전단율이 증가할 때 열전도율이 점차적으로 증가함을 보여준 바와 같이 본 실험에서도 열전도율의 전단율 종속성은 최적 고분자 농도 실험영역(optimal experimental concentration level)을 벗어난 영역에서는 더 이상은 유효하지 않음을 나타내 주고 있는 것이다. 즉 저농도의 고분자 용액이 점성소산(viscous dissipation)의 영향이 존재하지 않는 작용 전단율 영역에서 열전도율의 전단율 종속성의 증가함과 동일한 작용 전단율 영역에서 저농도의 고분자 용액은 고농도의 고분자 용액보다 열전도율이 큰 실험적 사실을 보여주는 최적 고분자 농도 실험영역(optimal experimental concentration level)이 확실히 존재함을 입증하고 있는 것이다. 본 실험의 고분자

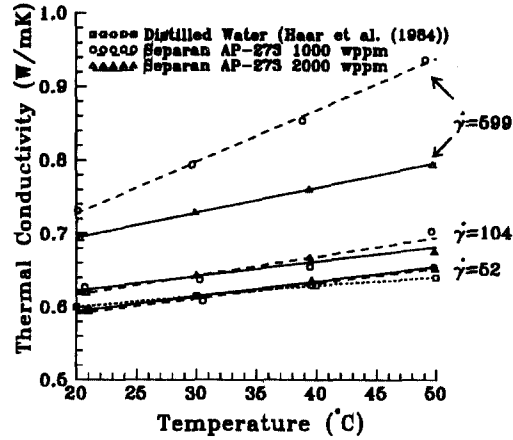


Fig. 13 Thermal conductivity vs. temperature for distilled water and Separan solutions (1000 and 2000 wppm) at various shear rates.

농도 실험 영역(1500~5000 wppm for CMC solution and 1000~2000 wppm for Separan solution)은 최적 고분자 농도 실험영역에 포함됨을 알 수 있다.

Fig. 13은 증류수 및 Separan 용액의 현 실험 데이터의 유체온도, 전단율, 농도, 및 열전도율과 같은 열적효과 및 전단율 효과(thermal and shear rate effects)에 대한 합성된 그래프라고 할 수 있다. 1000 wppm의 저농도 용액은 2000 wppm의 고농도 용액보다 높은 전단율에서 더 강한 온도의 함수인데 이는 동일한 고 전단율($\dot{\gamma} \geq 200$)에서 저농도 용액(1000 wppm)은 동일한 온도에서 고농도 용액(2000 wppm)보다 더 큰 열전도율을 갖는다. 고분자 액체들은 분자들의 얽혀져 있는 접합점(entanglement junction)에서 생성되는 점성열의 양과 같은 양의 탄성에너지가 분자들의 무작위 고리(random coil)에 저장되어 있기 때문에 분자의 미세 구조 및 유동 메커니즘에 변화를 가져온다고 할 수 있는 것이다. 분자들의 상대 온도와 회전속도가 커질수록 분자들의 탄성 에너지는 농도에 따른 고분자 액체의 열전도율의 더 큰 차이를 야기시킬 수 있는 것이다.

그림에서 나타나지는 않았지만 동일한 전단율에서 CMC 용액과 Separan 용액의 차이점은 Separan 용액은 동일한 온도상의 상이한 농도(1000 및 2000 wppm)에서의, CMC 용액보다 더 큰 열전도율의 변화량을 갖고 있다. CMC 용액은

의 소성 유체(pseudoplastic or shear-thinning fluid)에 가깝지만 Separan 용액은 점탄성 유체(viscoelastic fluid)의 특성을 나타내는 유체이기 때문에 Separan 용액은 CMC 용액 보다 더 큰 탄성(elasticity)을 소유하고 있어서 분자간의 탄성에너지 영향으로 전단 속도에 더 민감하기 때문에 점도변화의 경우와 동일하게 Separan 용액의 열전도율 변화가 더 크다고 할 수 있다.

7. 실험체계의 오차해석

푸리에 전도법칙(Fourier's law of conduction)에 의하여 원통좌표에 대한 이중원관(annulus)의 열전도율의 작용방정식은 식 (8)에 설명되어 있다. 이전에 논의되었던 바와 같이 열전도율식에서 기하학적인 상수항($\frac{2\pi l}{\ln(\frac{r_o}{r_i})}$)은 실제의 실험 이전에 직

접 측정될 수 있다. 반면에 실험중의 측정치는 열량(Q)과 안쪽 원통과 바깥쪽 원통사이의 벽면 온도차(ΔT)가 될 수 있다. 첫째로는, 양쪽 원통 벽면사이의 온도 차이는 실제로는 벽면자체 안에서 온도 강하(temperature drops)가 존재하기 때문에 ΔT 와 동일하지 않다. 둘째로는, 동력계(power supply)로부터의 열량(heat input)은 작동유체의 틈을 통해 전도에 의하여 바깥쪽 원통으로 열전달되고 또한 안쪽 원통의 나일론(Nylon) 축과 안쪽 원통과 바깥쪽 원통을 제외한 다른 부분의 열전도율 측정기구(thermal conductivity cell)로 열전달된다. 그러므로 이런 오차들(uncertainties)은 모두가 온도차(ΔT)의 함수가 되고 또한 열전도율 측정기구(thermal conductivity cell)의 기하학적인 조건과 전체 유입열량의 함수가 될 수 있다. 실험

$$k = k(Q, r_o, r_i, l, \Delta T)$$

$$dk = \left(\frac{\partial k}{\partial Q}\right)dQ + \left(\frac{\partial k}{\partial r_o}\right)dr_o + \left(\frac{\partial k}{\partial r_i}\right)dr_i + \left(\frac{\partial k}{\partial \Delta T}\right)d\Delta T + \left(\frac{\partial k}{\partial l}\right)dl$$

$$\frac{\Delta k}{k} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \frac{1}{(\ln r_o - \ln r_i)^2} \left[\left(\frac{\Delta r_o}{r_o}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r_i}{r_i}\right)^2 \right] + \left(\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k(T)}{k(T)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k(\dot{\gamma})}{k(\dot{\gamma})}\right)^2}$$

8. 결 론

열전도율의 실험적 측정이 전단력 영역하에서 비뉴턴 유체에 대해 수행되었다. 두 가지의 비뉴턴

Table 2 Predicted overall errors in measured thermal conductivity and shear rate.

k Uncertainties Error(%)	$\dot{\gamma}$ Uncertainties Error(%)
$\frac{\Delta Q}{Q}$ 1.41	$\frac{\Delta r_o}{r_o}$ 0.31
$\frac{\Delta r_o}{r_o}$ 0.0090	$\frac{\Delta r_i}{r_i}$ 0.0090
$\frac{\Delta r_i}{r_i}$ 0.0095	$\frac{\Delta r_i}{r_i}$ 0.0095
$\frac{\Delta l}{l}$ 0.041	$\frac{\Delta r_{axc}}{r_{axc}}$ 0.0093
$\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}$ 1.7	- -
$\frac{\Delta k(T)}{k(T)}$ 3.4	- -
$\frac{\Delta k(\dot{\gamma})}{k(\dot{\gamma})}$ 4.1	$\dot{\gamma}_i \neq \dot{\gamma}_o$ 8.34
$\left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{total}$ 5.77	$\left(\frac{\Delta \dot{\gamma}}{\dot{\gamma}}\right)_{total}$ 8.54

기구에 대해 수행되어진 완성된 오차해석은 Lee⁽¹¹⁾에 의해 보고되었다. 그 결과치는 Table 2에 표시되어 있다. Table 2에 보여진 바와 같이 열전도율의 최고 예측 오차는 5.77%이고 전단율의 최고 예측 오차는 8.54%이다. Fig. 7에 보여진 물의 열전도율의 측정오차 결과는 Table 2에 계산된 값보다는 작게 나타내고 있는 사실을 나타내주고 있어 위에서 언급한 열전도율의 개개의 변수에 대한 오차들의 보완(error compensation)이 존재하였다.

열전도율에 대한 오차(uncertainty in k)는 다음과 같은 함수식으로 표현되고 예측되는 전체 오차(overall error, $\Delta k/k$)는 각 개개의 오차들의 제곱의 합의 제곱근으로서 계산되었다[Taylor⁽¹⁵⁾].

유체, 즉 의소성 유체인 CMC 용액과 점탄성 유체인 Separan 용액이 작동유체로서 사용되었다.

비뉴턴 유체의 열전도율을 측정하기 이전에 우선 뉴턴 유체, 즉 물의 열전도율이 결정되었다. 작용전단율 영역($100 \leq \dot{\gamma} \leq 900 \text{ s}^{-1}$)하에서 뉴턴 유체의

열전도율에 대한 어떤 전단율 효과를 발견 할 수 없었다.

그외에도, 측정된 물의 열전도율은 기준치의 1% 오차 범위내에 존재하였다.

비뉴턴 유체에 대해서는 온도의 변화 (20°C ~ 50°C) 에 따라 CMC 용액 ($100 \leq \dot{\gamma} \leq 900$) 과 Separan 용액 ($50 \leq \dot{\gamma} \leq 600$) 에 대해 각각 20~70% 및 20~50% 정도의 열전도율이 증가하는 전단율에 대해 증가하고 있음을 실험적으로 발견할 수 있었다. 전단율에 대한 열전도율의 증가치는 고농도 용액보다 저농도 용액에 대해 더 크게 존재한다. CMC 용액 및 Separan 용액의 열전도율은 온도와 전단율이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 대구효성가톨릭대학교 연구지원비에 의하여 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Cocci, A. A. and Picot, J. J. C., 1973, "Rate of Strain Effect on the Thermal Conductivity of a Polymer Liquid," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 13, pp. 337~341.
- (2) Chitrangad, B. and Picot, J. J. C., 1981, "Similarity in Orientation Effects on Thermal Conductivity and Flow Birefringence for Polymers Polydimethylsiloxane," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 21, pp. 782~786.
- (3) Picot, J. J. C., Goobie, G. I., and Mawhinney, G. S., 1982, "Shear-Induced Anisotropy in Thermal Conductivity of Polyethylene Melts," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 32, pp. 154~157.
- (4) Wallace, D. J., Moreland, C. and Picot, J. J. C., 1985, "Shear Dependence of Thermal Conductivity in Polyethylene Melts," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 25, pp. 70~74.
- (5) Loulou, T., Peerhossaini, H., and Bardon, J. P., 1992, "Etyde Experimentale de la Conductivite Thermique de fluides Non-Newtoniens sous Cisaillement Application Aux Solutions de Carbopol 940," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 2557~2562.
- (6) Chalice, M., Delaunay, D., and Bardon, J. P., 1994, "Transfert de Chaleur Dans une Configuration Cone-plateau et Mesure de la Conductivite Thermique en presence d'une Vitesse de Cisaillement," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 2381~2389.
- (7) Park, N. A. and Irvine, T. F. Jr., 1988, "Measurements of Rheological Fluid Properties with the Falling Needle Viscometer," *Rev. Sci. Instr.*, Vol. 59, pp. 2051~2058.
- (8) Park, N. A., Cho, Y. I., and Irvine, T. F. Jr., 1990, "Steady Shear Viscosity Measurements of Viscoelastic Fluids with the Falling Needle Viscometer," *J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 34, pp. 351~357.
- (9) Eckert, E. R. G. and Drake, F. Jr. 1972, "Analysis of Heat and Mass Transfer," McGraw-Hill, New York, p. 541.
- (10) Taylor, G. I., 1923, "Stability of a Viscous Fluid Contained between Two Concentric Rotating Cylinders," *Phil. Trans. A223*, pp. 289~343.
- (11) Sinevic, V., Kuboi, R., and Nienow, A. W., Power Numbers, "Taylor Numbers and Taylor Vortices in Viscous Newtonian and Non-Newtonian Fluids," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 41, pp. 2915~2923.
- (12) Larson, R. G., "Taylor-Couette Stability Analysis for a Doi-Edwards Fluid," *Rheol. Acta*, Vol. 28, pp. 504~510.
- (13) Haar, L., Gallagher, J. S., and Kell, G. S., 1984, "NBS/NRC Steam Tables: Thermodynamic and Transport Properties and Computer Programs for Vapor and Liquid States of Water in SI Units," McGraw-Hill, New York.
- (14) Lee, D. L., 1995, "Thermal Conductivity Measurements of Non-Newtonian Fluids in a Shear Field," Mech. Eng. Dept., Ph. D. Thesis, State Univ. of New York at Stony Brook.
- (15) Taylor, J. R. 1982, "Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties Physical Measurements," Mill Valley, California: University Science Books.