

<論 文>

## 원형관속을 유동하는 점탄성 유체의 입구 영역 열전달 특성에 관한 연구

엄정섭\* · 황태성\*\* · 유상신\*\*\*

(1989년 7월 10일 접수)

### The Heat Transfer Characteristics of Viscoelastic Non-Newtonian Fluids in the Entrance Region of Circular Tube Flows

Chung Sup Eum, Tai Sung Hwang and Sang Sin Yoo

**Key Words:** Degradation(퇴화 현상), Minimum Friction Asymptote(최소저항 점근선), Thermal Entrance Length(열적 입구 길이), Characteristic Relaxation Time(특성이완 시간), Weissenberg Number(Weissenberg 수), Viscoelastic Graetz Number(점탄성 Graetz 수), Eddy Diffusivity of Heat(와류 열확산 계수)

#### Abstract

The heat transfer characteristics of the drag reducing polymer solutions are investigated experimentally in the thermal entrance region of circular tube flows. Fluids used in experiments are the aqueous solutions of high molecular polymer, polyacrylamide Separan AP-273 and the range of polymer concentrations is from 20 to 1000 wppm. Two stainless steel tubes with inside diameter 8.5mm ( $L/D=712$ ) and 10.3mm ( $L/D=1160$ ) are used for the heat transfer flow loops. The flow loop is set up to measure friction factors and heat transfer coefficients of test sections in two different modes; the recirculating flow system and once-through flow system. The test tubes are heated directly by electricity to apply the constant heat flux boundary conditions to the wall. Three different types of adaptors are used to observe the effects of the upstream flow conditions of the heat transfer test sections. The viscosity and characteristic relaxation time of the test fluids circulating in the flow system are measured by the capillary tube viscometer and falling ball viscometer at regular time intervals. The installed adaptors exhibit slight effect on the entrance heat transfer of Newtonian fluid. However, no noticeable effects are observed for the entrance heat transfer of the drag reducing fluids. The order of magnitude of the thermal entrance lengths of the drag reducing fluids which follow the minimum friction asymptote is much longer than that of Newtonian fluids in turbulent flows. A new dimensionless parameter, the viscoelastic Graetz number, is defined and all the experimental data are recasted in terms of the viscoelastic Graetz number. The local Nusselt number of the viscoelastic fluids is represented as a function of flow behavior index  $n$  and the viscoelastic Graetz number. As degradation continues the viscosity and the characteristic relaxation time of the testing fluids decrease. Weissenberg number defined by the relaxation time and  $D/V$  appears to be a proper dimensionless parameter in describing degradation effects on heat transfer of the viscoelastic fluids.

## 기 호 설 명

$Cp$	: 정압 비열
$D$	: 시험관 안지름
$f$	: Fanning의 마찰 계수 $\left[ \tau_w / \left( \frac{\rho v^2}{2} \right) \right]$
$Gr$	: Graetz 수 ( $PeD/x$ )
$Gr_v$	: 점탄성 Graetz 수 ( $Re_a Pe D/x$ )
$h$	: 열전달 계수
$j_h$	: 무차원 열전달 계수 ( $StPr^{2/3}$ )
$k$	: 열전도 계수
$L$	: 시험관 길이
$Nu$	: Nusselt 수 ( $hD/k$ )
$n, n'$	: 유동 특성 상수
$Pe$	: Peclet 수 ( $RePr$ )
$Pr$	: Prandtl 수 ( $Cp\mu/k$ )
$Re$	: Reynolds 수 ( $\rho VD/\mu$ )
$r_0$	: 시험관 반지름
$St$	: Stanton 수 ( $h/\rho VCp$ )
$T$	: 실험 유체의 온도
$t$	: 점탄성 유체의 특성 시간
$u$	: 유체의 $x$ 방향 속도 성분
$V$	: 관속의 평균 유속
$Ws$	: Weissenberg 수 ( $tV/D$ )
$y$	: 벽으로부터의 거리
$\dot{\gamma}$	: 전단률
$\Delta$	: 열경계층 두께
$\epsilon_h$	: 와류 열확산 계수
$\epsilon_m$	: 와류 운동량 확산 계수
$\mu$	: 점성 계수
$\nu$	: 동점성 계수
$\rho$	: 유체의 밀도
$\tau$	: 전단 응력
삼 첨 자	
$+$	: 무차원 양
하 첨 자	
$b$	: 혼합 유체
$ex$	: 시험관의 출구
$m$	: 평균값
$w$	: 관 벽

\* 정회원, 유한공업전문대학 기계설계과

\*\* 정회원, 수원공업전문대학 열처리과

\*\*\* 정회원, 한국항공대학 기계설계과

## 1. 서 론

매끈한 원형관속을 흐르는 점탄성 유체의 마찰 계수가 최소 저항 점근선(minimum friction asymptote)<sup>(1)</sup>을 따를때 열전달 현상을 규명하려는 많은 연구 결과들이 발표되어 왔으나<sup>(2-9)</sup> 발표된 결과들이 서로 다르게 나타나 있어 실제 공학에서 손쉽게 사용될 수 있는 일치된 결과식을 제시하지 못하고 있다. 연구 결과들이 다르게 나타난 주 원인은 실험적 연구에 사용된 시험관의 길이가 열적으로 완전히 발달된 열전달 영역에 도달할 정도로 길지 못하였고 실험 용액이 퇴화(degradation)됨에 따라 실험 결과들이 크게 변화되기 때문이다.

Cho와 Hartnett<sup>(3)</sup>는 점탄성 유체의 열적 입구 길이(thermal entrance length)가 시험관 지름의 400 내지 500배 정도라고 발표하였으나 시험관의 무차원 길이( $L/D$ ) 1100에서도 열적으로 충분히 발달된 상태에 도달되지 못한다는 연구 결과<sup>(4)</sup>가 발표되어 있다. 시험관의 무차원 길이가 길어질수록 실험적으로 얻은 최소 열전달 계수의 값은 더 적게 나타나는 것으로 발표되어 있다.

점탄성 유체의 열적 입구 길이가 뉴턴 유체에 비하여 비교할 수 없을 정도로 길다는 사실은 점탄성 유체를 열교환기에 사용하는 경우에 열전달 현상이 대부분 열적 입구 길이 영역에 국한된다는 것을 뜻하므로 열적으로 충분히 발달된 상태의 열전달 계수 못지 않게 열적 입구 길이 영역에서의 열전달 계수를 예측할 수 있는 결과식이 요구되고 있다.

유체의 유동 특성을 나타내는 Reynolds 수와 마찰 계수 이외에 점탄성 유체의 유변학적 특성(rheological characteristics)을 이용한 새로운 무차원 수의 도입과 용액의 퇴화 정도를 체계적으로 나타낼 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 해석적으로 열적 입구 길이를 규명하는데 필요한 와류 열확산 계수를 실험 결과를 이용하여 결정하고, 시험관 입구의 형상 변화가 열전달 특성에 미치는 영향을 실험적으로 결정하며, 열적 입구 길이 영역에서 국소 열전달 계수를 표시할 수 있는 실험식을 제시하고, 유체의 전단율에 따른 점성 계수의 실험 결과와 점탄성 유체의 특성 시간을 이용한 새로운 무차원 수인 Weissenberg 수를 결정하여 퇴화 현상을 분석하고자 한다.

## 2. 점탄성 유체의 성질과 무차원 수

점탄성 유체의 점성 특성은 두개의 상수를 이용하는 power law 모델로 나타낼 수 있다.

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

원형관속의 층류 유동에서 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$\tau_w = K'(8V/D)^n \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 비교하면

$$n' = n \quad (3)$$

$$K' = K[(3n+1)/4n]^n \quad (4)$$

이다.

$n$ 은 log-log좌표로 표시한 층류 유동 곡선에서 전단 응력과 전단률의 관계를 이용하여 구한다.

$$n = \frac{d(\ln \tau_w)}{d(\ln \dot{\gamma})} \quad (5)$$

비뉴턴 유체의 유동 특성 중 전단률이 영에 가까울 때와 무한히 클 때에는 뉴턴 유체와 같은 특성을 나타낸다는 물리적 성질을 이용하여 영 전단률 점성 계수( $\mu_0$ )와 무한 전단률 점성 계수( $\mu_\infty$ )를 측정하면 점탄성 유체의 특성 시간을 결정할 수 있다. 공학적인 응용면에서 식 (6)으로 표시된 Powell-Eyring 모델이 가장 적합한 것으로 발표되어 있다<sup>(3)</sup>.

$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \frac{\sinh^{-1}(t\dot{\gamma})}{t\dot{\gamma}} \quad (6)$$

겉보기 점도(apparent viscosity)는 주어진 전단율에서 전단 응력과 전단률의 비로 정의하고 이 값을 이용하여 Reynolds 수와 Prandtl 수를 정의할 수 있다.

$$\mu_a = \tau_w / \dot{\gamma}_w \quad (7)$$

$$Re_a = \rho VD / \mu_a \quad (8)$$

$$Pr_a = C_p \mu_a / k \quad (9)$$

유체의 특성 시간( $t$ )과 유동의 특성 시간( $D/V$ )을 이용하여 Weissenberg 수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$W_s = tV/D \quad (10)$$

속도 분포식의 적분을 이용하여 Virk 등<sup>(1)</sup>은 점탄성 유체의 최소 저항 점근선을 식 (11)과 같이 나타내고, Cho와 Hartnett<sup>(2)</sup>는 실험 결과를 이용하여 상관 관계식 (12)를 발표하였다.

$$1/\sqrt{f} = 19.0 \log_{10}(Re_a \sqrt{f}) - 32.4 \quad (11)$$

$$f = 0.20 Re_a^{-0.48} \quad (12)$$

점탄성 유체의 마찰 계수가 최소 저항 점근선을 따를 때 열전달 계수도 감소하는데 Cho와 Hartnett<sup>(2)</sup>와 황태성<sup>(10)</sup>은 각각 무차원 길이( $L/D$ ) 430과 1100에서 얻은 실험 결과를 이용하여 최소 열전달 점근선(minimum heat transfer asymptote)을 식 (13)과 (14)와 같이 발표하였다.

$$j_h = 0.03 Re_a^{-0.45} \quad (13)$$

$$j_h = 0.0084 Re_a^{-0.34} \quad (14)$$

점탄성 유체의 최소 저항 점근선에 관한 실험 결과들은 여러 연구자들에 의하여 거의 동일한 것으로 확인되었으나 최소 열전달 점근선은 실험적 연구에 사용된 시험관 길이에 따라 결과들이 다르게 나타나 있다. 해석적인 방법을 이용하면 열적으로 충분히 발달된 원형관속의 열전달은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있고<sup>(3)</sup>

$$u^+ \frac{\partial T^+}{\partial x^+} = \frac{1}{r_0^+ - y^+} \frac{\partial}{\partial y^+} \left[ (r_0^+ - y^+) \left( \frac{1}{Pr} + \frac{\epsilon_h}{v} \right) \frac{\partial T^+}{\partial y^+} \right] \quad (15)$$

점탄성 유체의 경우 와류 열확산 계수( $\epsilon_h/v$ )를 식 (16)과 같이 가정하여 식 (15)를 적분하면 무차원 열적 입구 길이를 식 (17)로 나타낼 수 있고 무차원 열적 입구 길이를 실험적으로 측정하면 와류 열확산 계수를 결정할 수 있다.

$$\frac{\epsilon_h}{v} = a(y^+)^b \quad (16)$$

$$x^+ = \int_0^{r_0^+}$$

$$\frac{\int_0^{x^+} u^+(r_0^+ - y^+) dy^+ \left[ r_0^+ - \frac{4}{Re} \int_0^{x^+} u^+(r_0^+ - y^+) dy^+ \right]}{r_0^+(r_0^+ - \Delta^+) \left[ \frac{1}{Pr} + a(\Delta^+)^b \right]} d\Delta^+ \quad (17)$$

## 3. 실험

유동과 열전달 특성을 실험하기 위한 유체 순환 장치는 저장 탱크, 펌프, 유동 안정실, 시험관, 혼합실, 벤츄리미터 및 입구 형상 교환 장치등으로 구성되어 있고 유체 순환 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 유동 안정실에는 시험관에 유입되는 실험 유체의 입구 온도를 측정할 수 있도록 열전대 탐침을 설치하였으며 시험관 입구에서 유입되는 유체 유동을 변화시키기 위한 부차물의 형상은 Fig. 2와 같다.

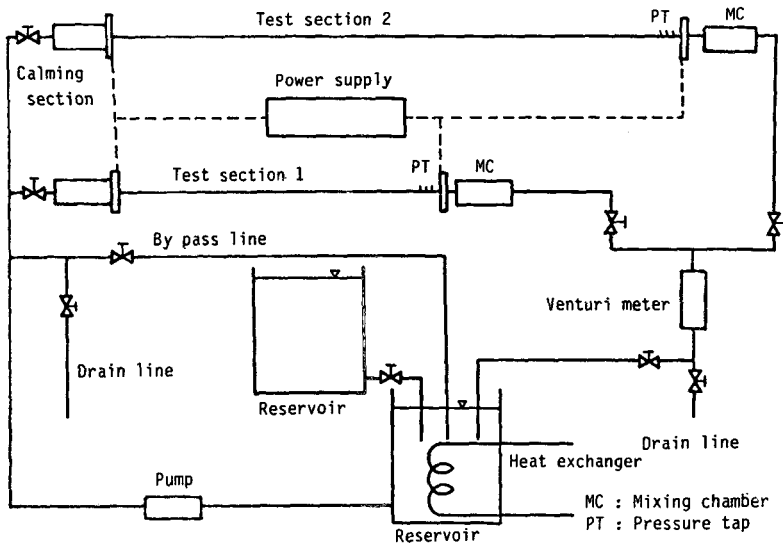


Fig. 1 Schematic diagram of the flow loop

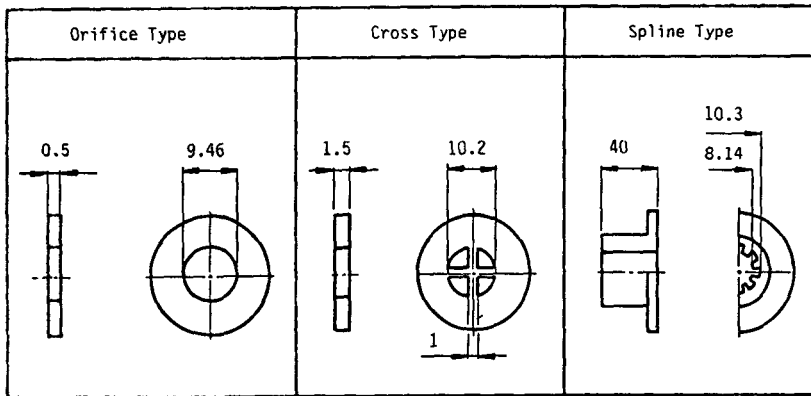


Fig. 2 Inlet shapes of the flow loop for test of the upstream conditions

2개의 시험관은 이음매가 없고 내면이 매끈한 스테인리스 강관으로서 시험관 1은 안지름 8.5mm, 무차원 길이 712이고, 시험관2는 안지름 10.3mm, 무차원 길이 1160이며 시험관 양단에 직류 전원을 공급하여 관벽에서 일정한 열플럭스를 발생하고 시험관 입구로부터 유체 역학적 경계층과 열적 경계층이 동시에 발달하기 시작하는 경계 조건을 형성하도록 하였다. 실험 장치의 상세한 내용과 실험 방법은 참고문헌 (10)에 수록되어 있다. 실험에서 사용한 점탄성 유체는 Polyacrylamide(Separan AP-273)를 수도물에 용해하여 제조한 폴리머 용액 (20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 500, 700 및

1000wppm)을 사용하였고 폴리머 용액 제조 과정에서 발생하는 폴리머 용액 특성의 퇴화를 방지하기 위하여 일정량의 수도물을 호스를 통하여 저장 탱크에 낙하시키면서 떨어지는 물에 폴리머 분말을 떨어뜨려 제조하는 방법을 사용하였다. 실험이 진행되는 동안 대략 1시간 간격으로 순환하고 있는 실험 유체를 채취하여 모세관 점도계와 낙구식 점도계를 이용하여 점성 계수를 측정하였다. 매회 폴리머 용액의 실험이 끝날때마다 실험 장치내에 수도물을 순환시켜 시험관을 깨끗이 세척하였다.

4. 실험 결과 및 검토

4.1 입구 형상에 의한 영향

뉴턴 유체의 원형관속 유동에서 입구 형상이 변화될 때 입구 영역에서의 Nusselt 수의 변화는 Kays와 Crawford<sup>(11)</sup>에 의하여 요약되어 있으며 대체적으로 볼 때 입구 형상이 복잡할수록 주어진 입구 길이에서 Nusselt 수는 큰 것으로 나타나 있다.

시험관 입구에 트리핑 와이어(tripping wire)를 설치하여 열전달 효과를 증가시키려는 연구가 박승덕<sup>(12)</sup>에 의하여 발표되었다. Kays와 Crawford<sup>(11)</sup>와 박승덕<sup>(12)</sup>의 연구는 공기를 이용한 연구 결과이며 점탄성 유체의 경우에도 입구에 설치한 부착물이 열전달 효과에 영향을 줄 수 있는지는 발표되어 있지 않다.

시험관 입구에 3가지의 다른 모양을 가진 부착물을 설치하고 물을 이용하여 실험한 관벽 온도 분포

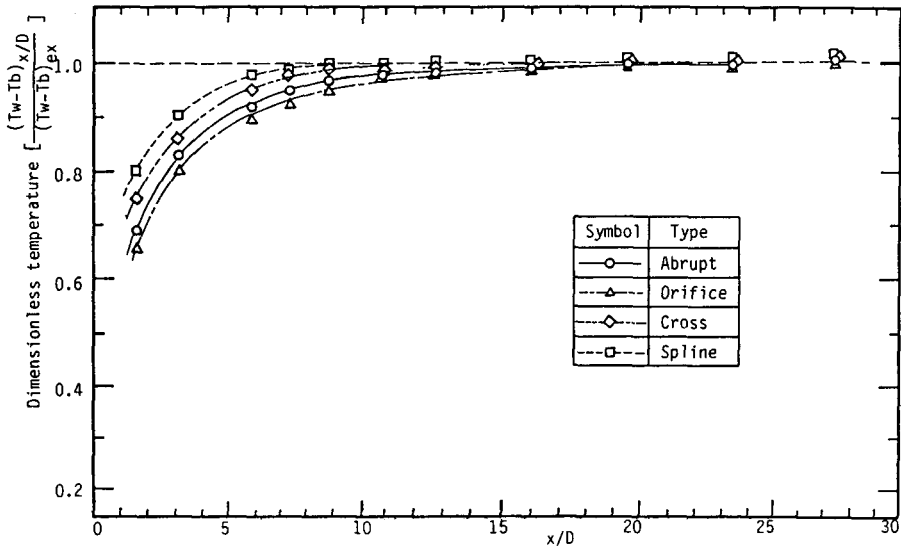


Fig. 3 Wall temperature distribution along the test section for water for different entrance shapes

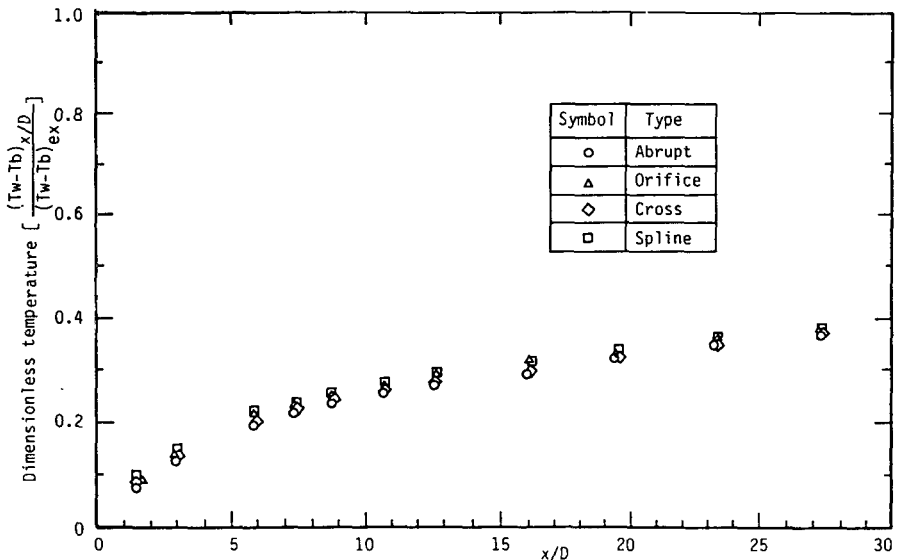


Fig. 4 Wall temperature distribution for 700wppm polymer solutions for different entrance shapes

는 Fig. 3과 같고, 폴리머 용액을 이용하여 실험한 관벽 온도 분포는 Fig. 4와 같다.

물을 이용한 실험에서는 입구 형상에 따라 관벽 온도 분포가 약간 다르게 나타나지만 폴리머 용액의 실험에서는 입구에 설치한 부착물의 영향이 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 Prandtl 수가 적은 뉴턴 유체의 열전달에서는 입구에 설치한 부착물이 열전달에 영향을 주고 있으나 점탄성 유체의 경우에는 입구 형상의 변화가 입구 영역에서의 열전달에 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

### 4.2 와류 열확산 계수(Eddy Diffusivity of Heat)

점탄성 유체의 원형관속 유동에서 Mizushina와 Usui<sup>(2)</sup>, Kwack과 Hartnett<sup>(13)</sup> 그리고 황태성<sup>(10)</sup>은 최소 열전달 점근선을 따르는 유동에서 와류 열확산 계수는 식 (16)의 형태로 나타내었고 Yoon과 Ghajar<sup>(6)</sup>는 열확산 계수와 운동량 확산 계수( $\epsilon_h/\epsilon_m$ )의 비를 Weissenberg 수와 저항 감소율의 함수로서 표시하였다.

$$\frac{\epsilon_h}{\nu} = a(y^+)^b \quad (16)$$

연구자와 모델 상수( $a, b$ )는 Table 1과 같으며 Yoon과 Ghajar<sup>(6)</sup>의 상수값은 저항 감소율을 0.8, Weissenberg 수를 200으로 취하고  $y^+ = 100$ 일때

$\epsilon_h/\nu$ 의 값을 5로 추정하여 식(16)으로 표시할 수 있는 상수값을 산출하였다.

폴리머 농도에 따른 점탄성 유체의 관벽 온도 분포는 Fig. 5와 같고 이 결과로 볼 때 무차원 길이 1100에서도 열적으로 충분히 발달된 영역에 도달되지 못하였음을 알 수 있으나 열적 입구 길이를 1100이라고 할 때 와류 열확산 계수는 Table 1에 표시한 Hwang<sup>(10)</sup>의 결과와 같다.

최소 저항 점근선을 따르는 폴리머 용액의 열적 입구 길이 영역에서 온도 분포 변화를 최소 사승법에 의해 수식으로 나타내고 이를  $L/D=1100$ 이상까지 연장하면 1000wppm용액은 Reynolds 수 30000에서 열적 입구 길이가 3000으로 예상되며 이 때 와류 열확산 계수는 식 (18)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\epsilon_h}{\nu} = 7.5 \times 10^{-8} y^{+3} \quad (18)$$

Table 1 Constants  $a$  and  $b$  in equation (16)

Investigator	$a$	$b$	Remark
Mizushina et al <sup>(2)</sup> .	$1.2 \times 10^{-5}$	3	
Kwack et al <sup>(13)</sup> .	$2.0 \times 10^{-6}$	3	$Re_a = 20000$
	$1.5 \times 10^{-6}$	3	$Re_a = 30000$
Yoon et al <sup>(6)</sup> .	$5.53 \times 10^{-7}$	3	$FR = 0.8, W_s = 200$
Hwang <sup>(10)</sup>	$2.4 \times 10^{-7}$	3	$L/D = 1100$

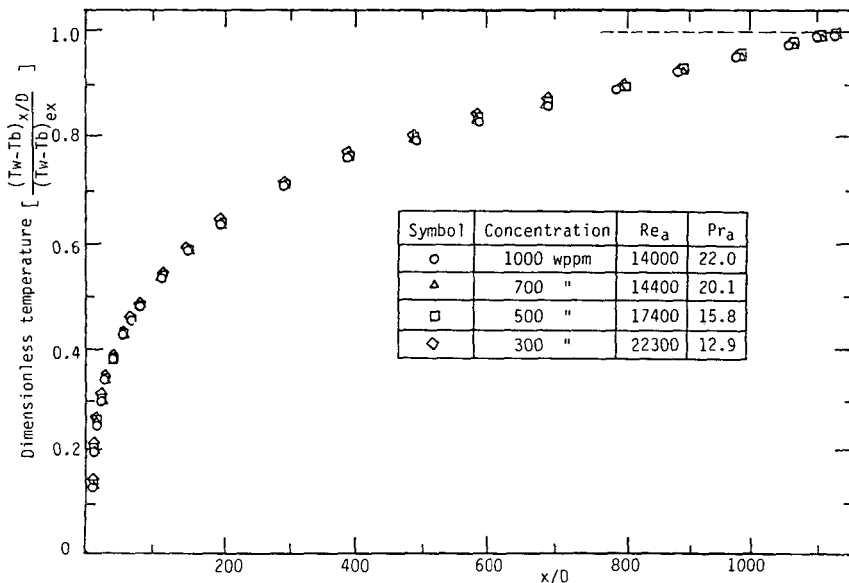


Fig. 5 Wall temperature distribution for polymer solutions along the dimensionless length

이와같이 와류 열확산 계수가 대단히 작은 것으로 볼 때 점탄성 유체의 유동에서는 Reynolds 수가 큰 경우에도 와류에 의한 영향이 대단히 적은 것은 알 수 있다.

4.3 열적 입구 길이 영역에서 열전달 계수

점탄성 유체의 최소 저항 점근선과 같이 열전달 계수를 최소 열전달 점근선으로 표시하려는 연구들이 이루어져 왔으며 Reynolds 수가 큰 유동에서는 뉴턴 유체의 난류 유동 열전달 결과와 비교한 경우가 많다. 최소 열전달 점근선은 Cho와 Hartnett<sup>(9)</sup>, 황태성<sup>(10)</sup>에 의하여 제시된바 있으나 그 결과가 서로 다르고 열적 입구 길이가 분명하게 규명되지 않은 상태에서는 공학적인 응용면에서 효용성이 결여되고 있다.

국소 열전달 계수는 무차원 길이에 따라 식 (19)와 같이 발표되어 왔다.

$$j_h = c \left( \frac{x}{D} \right)^a Re_a^b \tag{19}$$

연구자, 상수(a, b, c)값, 무차원 길이(L/D) 및 Reynolds 수의 범위를 Table 2에 표시하였으며 Fig. 6에 이들의 실험식과 본 실험에서 얻은 결과를 표시하였다.

Table 2에서 상수의 값들은 무차원 길이 600이하인 실험 결과를 이용하여 얻은 값들이다.

폴리머 농도 300에서 1000wppm까지의 용액을 사용하여 무차원 길이 1100 범위에서 얻은 결과중 퇴화의 영향이 거의 없다고 판단되는 실험 결과들은 식(20)과 같이 나타낼 수 있다. 이 식은 무차원 길이 10이상에서는 실험의 결과와 잘 일치하며 Toh 등의 결과식과 비교할 때 무차원 시험관의 길이(x/D)가 10 내지 600인 경우 ±16%내에서 일치한다.

$$j_h = 0.093(x/D)^{-0.34} Re_a^{-0.36} \tag{20}$$

4.4 열적 입구 길이 영역에서 국소 Nusselt 수

점탄성 유체의 난류 유동에서 난류 생성이 가장 활발한 구역의 와류 열확산 계수를 산출해 보면 와류 열확산 계수는 동점성 계수와 같은 위수(order of magnitude)임을 알 수 있다. 즉 식 (18)로부터 무차원 거리 y<sup>+</sup>에 100 내지 500을 대입하면 크기의 위수가 1정도임을 알 수 있다. 또한 시험관 벽의 온도 분포를 이용하여 결정된 입구 영역에서의 Nusselt 수를 보면 무차원 길이의 변화에 따르

Table 2 Constants a, b and c in equation (19)

Investigator	c	a	b	x/D	Re <sub>a</sub> range
Kwack et al. <sup>(4)</sup>	0.13	-0.24	-0.45	≤450	6000-60000
Ng et al. <sup>(5)</sup>	0.12	-0.25	-0.43	≤480	6000-40000
Mattys <sup>(7)</sup>	0.377	-0.293	-0.523	35-560	6000-90000
Toh et al. <sup>(8)</sup>	0.15	-0.29	-0.43	≤600	14900-55700

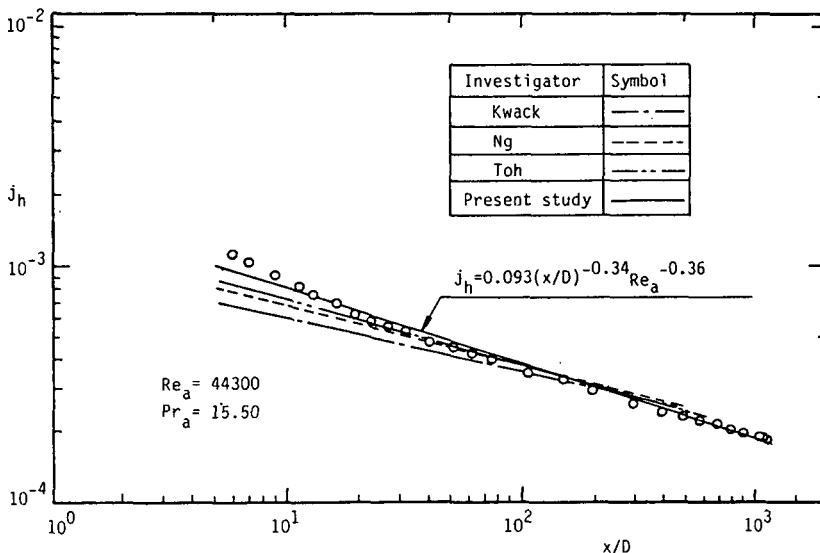


Fig. 6 Dimensionless heat transfer j-factors along the dimensionless length

는 Nusselt 수의 변화는 층류 유동 열전달 결과와 유사한 점을 발견할 수 있다. 이러한 결과들로부터 점탄성 유체의 입구 영역 열전달 현상은 층류 열전달에 이용하는 상관 관계식의 형태로 표시해 보는 것도 의미 있는 것으로 판단된다.

Power law 모델로 표시할 수 있는 비뉴튼 유체의 원형관속 층류 유동 열전달에서 열적 입구 길이 영역과 완전히 발달된 영역의 Nusselt 수는 각각 식 (21) 과 (22)로 표시할 수 있다<sup>(14)</sup>.

$$Nu_x = 1.41 \left[ \frac{(3n+1)}{4n} \right]^{\frac{1}{3}} Gr^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

$$Nu_{\infty} = \left[ \frac{8(3n+1)(5n+1)}{(1+12n+31n^2)} \right] \quad (22)$$

여기서,

$$Gr = Pe \ D/x \quad (23)$$

점탄성 유체의 열적 입구 길이 영역에서 얻은 실험 결과를 분석하면 뉴튼 유체의 실험 결과를 표시하는데 사용되는 Graetz 수와는 다른 형태의 무차원 수가 요구된다. 따라서 점탄성 유체의 경우에는 Graetz 수를 수정한 점탄성 Graetz 수(viscoelastic Graetz number,  $Gr_v$ )를 정의하여 국소 Nusselt 수는  $Nu_{\infty}$ 와  $Gr_v$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$Gr_v = Re_a Pe \frac{D}{x} \quad (24)$$

$$Nu_x = Nu_{\infty} + c Gr_v^n \quad (25)$$

식 (25)에서  $Nu_{\infty}$ 는 식 (22)를 이용하면 유동 특성 상수  $n=0.7$ 일 때  $Nu_{\infty}=4.538$ 이며 폴리머

용액의 농도가 300, 500, 700 및 1000wppm의 실험 결과를 이용하여  $c$ 와  $a$ 를 산출하면 본 연구에서 얻은 결과는 식 (26)과 같이 표시할 수 있다.

$$Nu_x = 4.538 + 0.04 \ Gr_v^{0.357} \quad (26)$$

점탄성 Graetz 수를 이용하여 Fig. 7에 실험 결과를 나타내었다.

실험식 (26)은 폴리머 농도 300 내지 1000wppm 과 무차원 시험관의 길이 5 내지 1120의 범위에서 실험 결과와  $\pm 18\%$  내에서 일치한다.

### 4.5 퇴화의 영향

폴리머 용액에 계속 재순환할 때 퇴화 현상이 발생하고 열전달 현상에 영향을 미친다. 20 내지 100 wppm 용액을 펌프를 이용하여 시험관을 통과시킨 후 버리는 방법을 이용하여 실험한 결과 50wppm 이상의 용액은 무차원 길이 1100에서도 완전히 발달된 열전달 구역에 도달하지 못하며 200wppm 이상의 용액은 펌프를 통하여 재순환시키는 실험에도 열적 입구 길이는 1100을 넘는다. 순환 시간이 길어짐에 따라 열적 입구 길이는 줄어들게 된다.

200wppm 용액의 순환 시간에 따른 관벽 온도 분포의 변화를 Fig. 8에 표시하였다. 이러한 결과로부터 폴리머 농도가 낮을수록 퇴화의 진행이 빠르며 폴리머 용액의 특성이 퇴화됨에 따라 열적 입구 길이는 줄어들고 열전달 계수는 증가한다.

퇴화에 의한 점탄성 유체의 마찰 계수와 열전달

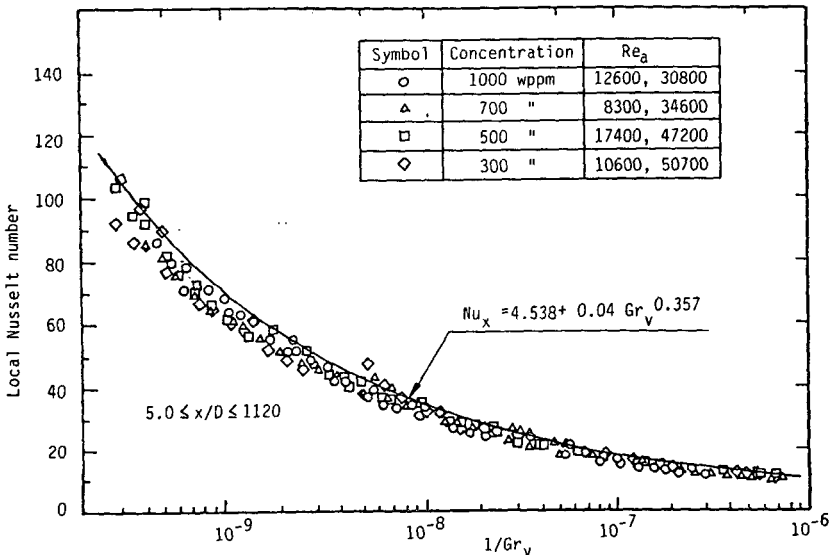


Fig. 7 Local Nusselt numbers versus viscoelastic Graetz numbers for polymer solutions



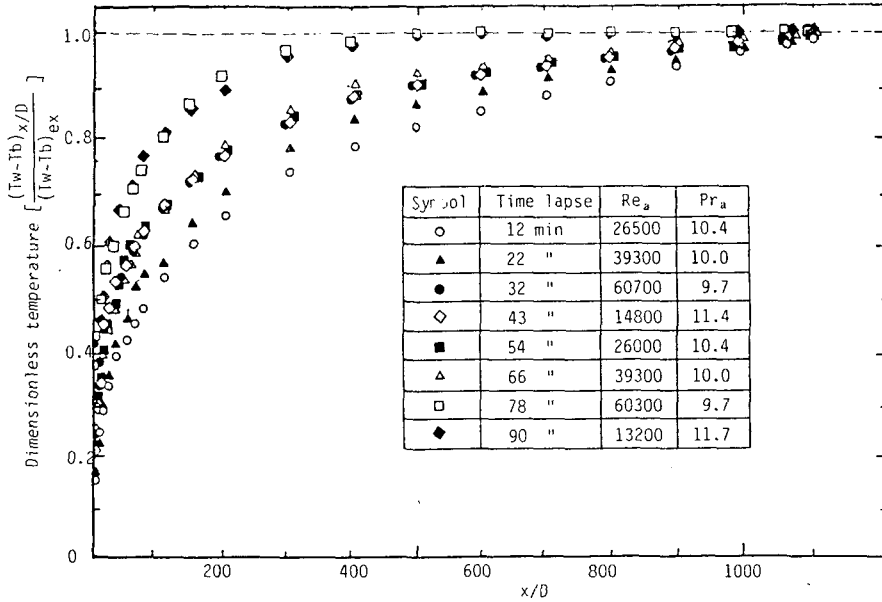


Fig. 8 Dimensionless wall temperature distribution for 200 wppm polymer solutions

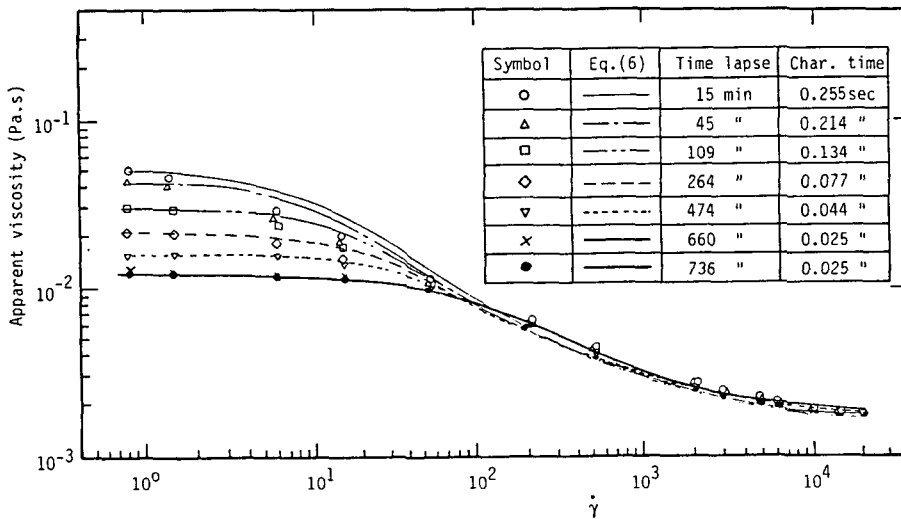


Fig. 9 Degradation effects of steady shear viscosity for 700wppm polymer solutions

계수를 해석하기 위해서는 점탄성 성질의 영향을 나타낼 수 있는 유체의 특성 시간을 포함하는 무차원 수를 필요로 한다. Mizushina 등<sup>(2)</sup>은 분자 이론에 의한 구성 방정식을 이용한 모델을 사용하여 특성 시간을 결정하였고 Argumendo 등<sup>(15)</sup>은 복잡한 비선형 구성 방정식을 이용한 모델을 사용하여 특성 시간을 결정하였으나 이러한 방법들로는 특성 시간을 결정하기가 매우 복잡하여 실용성이 결여되기 때문에 단순히 점성 특성만을 이용하여 특성 이

완 시간(characteristic relaxation time)을 결정할 수 있는 Powell-Eyring 모델이 많이 이용되고 있다. Kwack과 Hartnett<sup>(16)</sup>는 Powell-Eyring 모델을 이용하여 특성 이완 시간을 결정하고 Weissenberg 수를 구하여 퇴화로 인한 마찰 계수와 열전달 계수가 증가하기 시작하는 임계 Weissenberg 수를 제시하였다.

본 연구에서는 700wppm 용액을 장시간동안 재순환시키는 실험을 하면서 채취한 용액을 낙구식

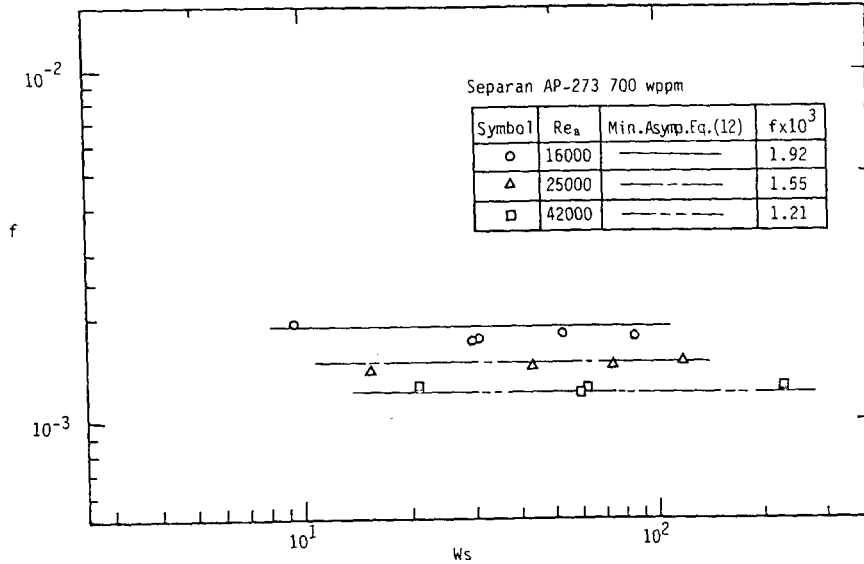


Fig. 10 Friction factor results as a function of the Weissenberg number in recirculating flow system

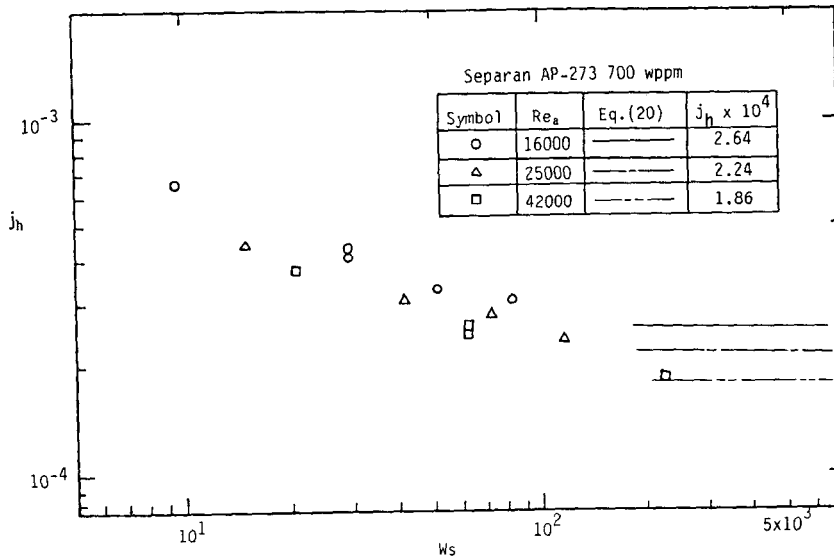


Fig. 11 Dimensionless heat transfer *j*-factor versus Weissenberg number

점도계와 모세관 점도계로 측정된 점성 계수로 부터 영 전단을 점성 계수( $\mu_0$ )와 무한 전단을 점성 계수( $\mu_\infty$ )를 결정하고 실험에서 구한 점성 계수를 Powell-Eyring 모델인 식 (6)으로 나타낼 때 실험 값과의 표준 편차가 가장 적게 되는 특성 시간을 결정하였다. 순환된 시간에 따라 측정된 점성 계수와 결정된 특성 이완 시간은 Fig. 9와 같다. 그림에서 선들은 실험적으로 결정된 특성 이완 시간을 Powell-Eyring 모델에 대입하여 계산한 곡선들이다.

이 결과로부터 퇴화가 진행 될수록 점성 계수는 감소되는데 낮은 전단율에서는 점성 계수의 감소율이 크지만 높은 전단율에서는 그 감소율이 대단히 적다. 따라서 폴리머 용액은 퇴화될수록 점성 계수와 특성 이완 시간이 감소된다. 특성 이완 시간을 이용하여 Reynolds 수 16000, 25000, 42000 부근에서 계산된 Weissenberg 수에 따른 마찰 계수와 무차원 열전달 계수의 변화는 각각 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다.

마찰 계수는 Weissenberg 수의 변화에 무관하게 거의 일정한 값을 나타내지만 무차원 열전달 계수는 Weissenberg 수가 감소함에 따라 증가되는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 Weissenberg 수는 폴리머 용액의 열전달에서 퇴화 정도를 표시하기에 적합한 무차원 수임을 알 수 있다. 그러나 700wppm 용액의 실험 자료만으로는 엄제 Weissenberg 수를 제시하는 것이 곤란하다.

## 5. 결 론

점탄성 유체인 Separan AP-273 폴리머 20 내지 1000wppm 용액을 이용하여 관벽에서 일정한 열플럭스를 발생하고 시험관 입구 형상을 변화시키면서 입구로부터 유체 역학적 경계층과 열적 경계층이 동시에 발달하는 경계 조건 아래서 점탄성 유체의 열적 입구 길이 영역에서 열전달 특성을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시험관 입구의 형상 변화는 Prandtl 수가 적은 뉴튼 유체의 열적 입구 길이 영역의 열전달에 영향을 주지만 점탄성 유체의 열적 입구 길이 영역의 열전달에는 영향을 주지 않는다.

(2) 최소 저항 점근선을 따르는 점탄성 유체의 열적 입구 길이 영역( $L/D < 1100$ )에서 열저항을 나타내는 국소 열전달 계수는  $j_h = 0.093(x/D)^{-0.34} Re_a^{-0.36}$ 으로 나타낼 수 있다.

(3) 최소 저항 점근선을 따르는 점탄성 유체의 원형관속 열전달에서는 점탄성 Graetz 수( $Gr_v$ )를 정의할 수 있고 국소 Nusselt 수는  $Nu_x = Nu_\infty + 0.04 Gr_v^{0.357}$ 으로 표시할 수 있고  $Nu_\infty$ 는 power law 모델의  $n$ 의 값에 따라 결정한다.

(4) 농도가 낮은 용액일수록 퇴화의 속도가 빠르며, 용액이 퇴화 될수록 점성 계수와 특성 이완 시간은 감소하고 열전달 효과는 증가한다. 또한 퇴화가 진행될수록 높은 전단률에서보다는 낮은 전단률에서 점성이 크게 감소한다.

(5) 열전달에서 용액의 퇴화 정도를 나타낼 수 있는 무차원 수로는 Powell-Eyring 모델의 특성 이완 시간과 유동 상태를 나타내는  $D/V$ 를 이용하여 계산한 Weissenberg 수가 적합하다.

## 참 고 문 헌

(1) Virk, P.S., Mickley, H.S. and Simth, K.A., 1970,

"The Ultimate Asymptote and Mean Structure in Toms' Phenomenon", Trans. ASME, J. Applied Mechanics, Vol. 37, pp. 488~493.

(2) Mizushima, T. and Usui, H., 1977, "Reduction of Eddy Diffusion for Momentum and Heat in Viscoelastic Fluid Flow in a Circular Tube", Physics of Fluids, Vol. 20, No. 10, Pt. 11, pp. s100~s108.

(3) Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., 1982, "Non-Newtonian fluids in Circular Pipe Flow", Advances in Heat Transfer, Vol. 15, Academic Press, New York, pp. 59~141.

(4) Kwack, E.Y., Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., 1981, "Heat Transfer to Polyacrylamide Solutions in Turblent Pipe Flow: the Once-Through Mode", AIChE Symposium Series, Vol. 77, No. 288, pp. 123~130.

(5) Ng, K.S., Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., 1980, "Heat Transfer Performance of Concentrated Polyethylene Oxide and Polyacrylamide Solutions", AIChE Symposium Series, Vol. 76, No. 199, pp. 250~256.

(6) Yoon, H.K. and Ghajar, A.J., 1986, "A New Heat Eddy Diffusivity Equation for Calculation of Heat Transfer to Drag Reducing Turbulent Pipe Flows", Proc. of 8th Int. Heat Transfer Conference, Vol. 3, pp. 937~942.

(7) Matthys, E.F., 1985, "An Experimental Study of Convective Heat Transfer, Friction, and Rheology for Non-Newtonian Fluids: Polymer Solutions, Suspension of Fibers, and Suspensions of Particulates", Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.

(8) Toh, K.H. and Ghajar, A.J., 1988, "Heat Transfer in the Thermal Entrance Region for Viscoelastic Fluids in Turbulent Pipe Flows", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 31, No. 6, pp. 1261~1267.

(9) 유상신, 황태성, 엄정섭, 1988, "점탄성 특성을 가진 폴리머 용액의 난류 유동 열적 입구 길이에 관한 실험적 연구", 대한 기계 학회 논문집, 제12권, 제5호, pp. 1189~1196.

(10) 황태성, 1988, "난류 상태로 유동하는 점탄성 유체의 열전달 현상에 관한 연구", 박사 학위 논문, 단국 대학교 대학원.

(11) Kays, W.M. and Crawford, M.E., 1980, Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York.

(12) 박승덕, 1975, "콤팩트 열교환기의 성능 향상에 관한 연구", 과학 기술처 연구 보고서, R-75-13.

(13) Kwack, E.Y. and Hartnett, J.P., 1984, "Estimated Eddy Diffusivities of Momentum and Heat of Viscoelastic Fluids", Int. J. Heat and Mass Transfer,

Vol. 27, No. 9, pp. 1525~1532.

(14) Burmeister, L.C., 1982, Convective Heat Transfer, John Wiley and Sons, pp. 245~249.

(15) Argumendo, A., Tung, T.T. and Chang, K.I., 1978, "Rheological Property Measurements of Drag-Reducing Polyacrylamide Solutions", Trans. Soc.

Reol., Vol. 22, pp. 449~470.

(16) Kwack, E.Y. and Hartnett, J.P., 1982, "Effect of Diameter on Critical Weissenberg Numbers for Polyacrylamide Solutions in Turbulent Pipe Flow", Int. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 25, No. 6, pp. 797~805.