

<論 文>

점탄성 특성을 가진 폴리머용액의 난류유동 열적입구길이에 관한 실험적 연구

유 상 신* · 황 태 성** · 엄 정 섭***

(1988년 6월 15일)

An Experimental Study on the Thermal Entrance Lengths for Viscoelastic Polymer Solutions in Turbulent Tube Flow

Sang Sin Yoo, Tai Sung Hwang and Chung Sup Eum

Key Words : Degradation(퇴화현상), Heat Transfer(열전달), Minimum Drag Asymptote(최소 저항점근선), Minimum Heat Transfer Asymptote(최소열전달점근선), Thermal Entrance Length(열적입구길이), Turbulent Flow(난류유동), Viscoelastic Fluid(점탄성유체)

Abstract

Thermal entrance lengths of turbulent tube flow for viscoelastic polymer solutions are investigated experimentally in the recirculating flow system with tubes of inside diameters 8.5mm ($L/D=710$) and 10.3mm ($L/D=1158$), respectively. In the present system, the hydrodynamic and thermal boundary layers develop simultaneously from the beginning of the test section. To provide the boundary condition of constant heat flux at the wall, the test tubes are heated directly by electricity. The polymer solution used in the current study is 1000 wppm aqueous solution of polyacrylamide(Separan AP-273). The apparent viscosity of the polymer solutions circulating in the flow system are measured by the capillary tube viscometer at regular time intervals. Thermal entrance lengths vary due to the rate of degradation. The entrance lengths of degraded polymer solutions are about 500~600 times the diameter. However, the entrance lengths of fresh polymer solutions are greater than the lengths of the test tubes used in this study suggesting that thermal entrance lengths for viscoelastic polymer solutions are greater than 1100 tube times the diameters. Friction factor is almost insensitive to the degradation, but the heat transfer j_H -factor is affected seriously by degradation. Based on the present experimental data of fresh solutions a correlation for the heat transfer j_H -factor is presented.

기 호 설 명

C_p : 유체의 정압비열
 D : 시험관의 직경

f : Fanning의 마찰계수
 h : 열전달계수
 h_f : 마찰손실수두
 j_H : 무차원 열전달계수
 k : 유체의 열전도계수
 k_s : 시험관의 열전도계수

*정회원, 한국항공대학 항공기계과
**정회원, 수원공업전문대학 열처리과
***정회원, 유한공업전문대학 기계설계과

L/D : 시험관의 무차원길이
 Nu : Nusselt수
 Pr : Prandtl수
 q_w : 시험관벽의 열 flux
 Re : Reynolds수
 r_i : 시험관의 내면반경
 r_o : 시험관의 외면반경
 St : Stanton수
 T_b : 유체의 혼합평균온도
 T_{wi} : 시험관 내면벽 온도
 T_{wo} : 시험관 외면벽 온도
 v : 유체의 유동속도
 μ : 유체의 점성계수
 ρ : 유체의 밀도
 τ_w : 관벽의 전단응력

1. 서 론

점탄성 특성을 나타내는 폴리머용액이 원관내를 난류상태로 흐를 때 유동저항은 동일한 Reynolds 수에서 뉴우튼유체의 유동저항에 비하여 현저히 감소한다. 저항감소는 한계가 있으며 저항이 가장 많이 감소되는 한계를 최소화항점근선⁽¹⁾(minimum drag asymptote)이라고 한다. Cho와 Hartnett⁽²⁾는 실험적 연구를 통하여 내면이 매끈한 관의 마찰계수는 Virk⁽¹⁾가 제안한 최소화항점근선보다 6~20% 낮게 될 수 있음을 발표하였고 폴리머용액의 퇴화 영향, 용매(solvent)와 용질(solute)의 영향에 대한 연구결과도 발표하였다⁽³⁻⁵⁾.

폴리머용액의 마찰계수에 대하여는 많은 연구결과들이 발표되었으나 열전달특성에 관한 연구는 별로 많지 않다. 지금까지 발표된 연구결과들은 시험관의 길이가 충분히 길지 못하여 완전히 발달된 난류유동의 열전달특성을 명확하게 규명하였다고 보기는 어렵다. Gupta 등⁽⁶⁾은 무차원길이(L/D) 40인 시험관을 이용하여 점탄성유체의 열전달특성을 실험적으로 연구하였고, Yoo⁽⁷⁾는 무차원길이 110인 시험관을 이용하여 뉴우튼유체인 물과 순수점성비뉴우튼유체(purely viscous non-Newtonian fluid) 및 점탄성유체의 열적입구길이를 실험적으로 측정 한 결과 순수점성비뉴우튼유체는 뉴우튼유체인 물과 거의 같은 크기의 열적입구길이를 나타내지만 점탄성유체의 열적입구길이(L/D)는 110보다 훨씬 크다는 사실을 발표하였다. Mizushina와 Usui⁽⁸⁾는

무차원길이 160인 시험관의 실험결과를 이용하여 와동확산감소(reduction of eddy diffusion)를 발표하였고 Ng등⁽⁹⁾은 무차원길이 280, 475 및 620인 시험관을 이용하여 점탄성유체의 열적으로 완전히 발달된 영역의 열전달 실험결과를 얻으려고 하였으나 무차원길이 430인 곳도 열적입구길이를 완전히 벗어 나지 못하였다고 발표하였다. Cho와 Hartnett⁽¹⁰⁾는 무차원길이 620인 시험관을 이용하여 실험한 결과 점탄성유체의 열적입구길이는 직경의 400~500배까지 된다고 하였고 Yoon⁽¹¹⁾은 무차원길이 617인 시험관의 실험결과를 이용하여 열적으로 완전히 발달된 영역에서 열 와동확산계수(heat eddy diffusivity)를 예측할 수 있는 실험식을 발표하였다. 그러나 Yoo⁽¹²⁾는 난류상태인 점탄성유체의 정확한 열적입구길이를 결정하기 위해서는 물리적 성질이 잘 확인된 점탄성유체를 사용하여 무차원길이가 적어도 1000 이상인 시험관을 이용하여 실험해야 한다고 주장하였다.

본 연구에서는 내경이 각각 8.5mm와 10.3mm이며 무차원길이가 각각 710과 1158인 두 개의 시험관을 사용하는 유동장치를 제작하여 시험관 입구에서부터 유체역학적 경계층(hydrodynamic boundary layer)과 열적 경계층(thermal boundary layer)이 동시에 발달하기 시작하는 경계조건을 형성하고 관벽에서 일정한 열 플럭스(constant heat flux)를 발생하는 조건을 부여하였다. 퇴화현상(degradation)에 대하여 비교적 안정성을 가진 폴리아크리라마이드(polyacrylamide) Separan AP-273을 수도물에 용해하여 제조한 폴리머용액으로 유동특성과 열전달특성을 실험하여 열적입구길이와 열전달특성을 규명하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

유동특성과 열전달특성을 실험하기 위한 유체순환장치는 저장탱크, 펌프, 시험관, 혼합실(mixing chamber) 및 벤투리미터 등으로 구성되어 있고 유체순환장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 저장탱크는 원통형 PVC 용기이며 하단에 흡입관을 설치하여 펌프와 연결하였다. 펌프는 정용량형 트로코이드 펌프로서 유량은 70l/min이다. 펌프 다음에는 바이패스관(by pass line)을 설치하였고 시험관을 흐르는 유량은 밸브를 이용하여 조정할 수 있게 하였

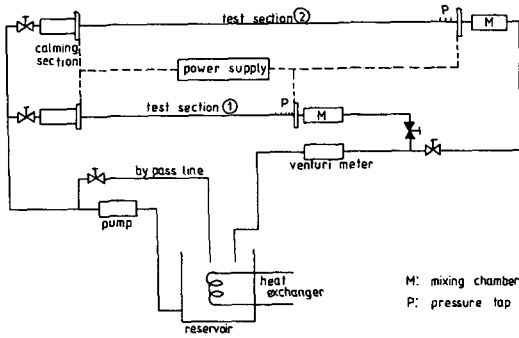


Fig. 1 Schematic diagram of the flow loop

다. 시험관 바로 상류에는 유동안정실(calming section)을 설치하고 여기에 공기빼기구멍(air vent), 드레인-콕 및 입구온도 측정용 열전대탐침(probe)을 설치하였다. 시험관 바로 하류에는 출구의 혼합평균온도(bulk mean temperature)를 측정할 수 있도록 혼합실(mixing chamber)을 설치하였다.

시험관은 이음매가 없고 내면이 매끈한 두 개의 스테인리스강관(stainless steel tube)을 사용하였고 시험관 ①은 내경 8.5mm, 두께 1mm, 길이 6050mm이며 시험관 ②는 내경 10.3mm, 두께 1.2mm, 길이 11930mm이다. 시험관의 양단에는 두께 6mm, 직경 250mm인 동판을 부착하고 시험관과 동판의 접촉부분을 은납매하여 접촉부분의 전기저항을 최소로 하였다. 시험관 ①에는 하류에 5개의 압력탭을 설치하였고 27개의 열전대를 관벽에 부착하였으며 시험관 ②에는 3개의 압력탭을 설치하고 30개의 열전대를 부착하여 관벽의 온도를 측정하였다. 시험관 ②의 압력탭과 열전대의 설치 위치는 Fig. 2와 같다.

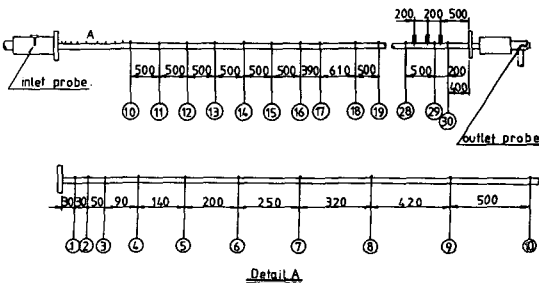


Fig. 2 Locations of thermocouples and pressure taps on test section ②

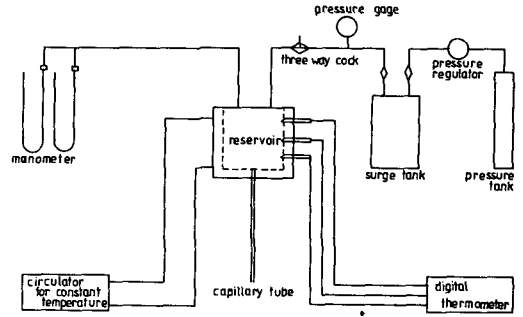


Fig. 3 Schematic diagram of the capillary tube cometer

실험에 사용된 열전대(동-콘스탄탄)는 관벽에 부착하기 전에 항온조에 넣어 각각의 열전대가 지시하는 온도를 백금저항온도계로 측정된 온도와 비교하여 보정(calibration)하였으며, 시험관벽에 동시멘트(copper cement)를 얇게 바른 다음 그 위에 열전대를 부착하고 도선을 관벽 둘레에 3회 감아주었다. 모든 열전대와 입구 및 출구에 설치한 열전대탐침(probe)은 데이터 기록장치인 Digistrip III에 연결하여 온도를 기록하였다.

시험관의 열 손실을 방지하기 위하여 유리섬유와 스티로폴 파이프커버로 단열하였다. 전원장치는 입력이 3상 220V이고, 출력은 최대 200A에서 50V의 직류 전압을 사용할 수 있다. 시험관 입구의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 저장탱크 안에 동관으로 된 코일형 열교환기(coil type heat exchanger)를 설치하고 동관속에 냉각수를 통과시켜 실험 유체의 온도를 조정하였다. 벤투리미터를 이용하여 유량을 측정하였으며 벤투리미터는 정상상태에서 일정시간 동안 흘러나온 물의 무게를 측정하여 보정 하였다. 마찰손실 수두는 2m 높이의 액주계(manometer)를 이용하여 측정하였다.

모세관점도계는 시료저장통, 모세관, 압력조정기 및 압력탱크 등으로 구성되어 있다. 시료저장통은 내경 102mm, 길이 285mm이며, 내경 0.9764mm, 길이 341mm인 모세관을 사용하였다. 모세관점도계의 개략도는 Fig. 3과 같다.

2.2 실험 방법

물을 이용한 열전달실험은 시험관내에 수도물을 순환시키면서 실험장치내에 들어있는 공기를 모두 제거하고 전원장치의 출력 전압을 일정하게 설정한

후 냉각수의 유량을 조절하여 시험관 입구온도가 일정하게 유지되도록 하였다. 정상상태에 도달하였을 때 전원장치의 전압, 유량 및 마찰손실수두를 측정하고 입구, 출구 및 관벽의 온도를 기록하였다.

폴리아크리라마이드(상품명 Separan AP-273)를 300, 500, 700 및 1000wppm의 농도가 되도록 수 도물에 용해시켜 제조한 폴리머용액의 열전달실험은 물을 이용한 실험과 같은 순서로 진행하면서 대략 1시간 간격으로 순환하고 있는 실험유체를 채취하여 모세관점도계에서 점성특성을 측정하였다. 매 회실험을 시작하기 전에 물을 이용한 실험을 실시하여 관벽온도와 마찰손실수두를 측정함으로써 실험장치의 정확성을 확인하고 폴리머용액의 실험이 끝난 후 물을 순환시켜 시험관 및 실험장치를 깨끗이 청소하고 다시한번 마찰손실수두와 관벽온도를 측정하여 실험장치의 이상유무를 검사하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 물성과 무차원 매개변수

비교적 낮은 농도의 폴리머용액의 밀도, 비열 및 열전도계수는 물과 거의 같은 것으로 입증되어 있다⁽⁶⁻⁷⁾. 그러나 물과는 판이하게 다른 점성특성은 응력과 변형율의 관계를 두 개의 상수를 사용하여 일반화시킬 수 있다.

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

여기서 K 와 n 은 유체의 점성특성을 나타내는 상수이다. 유체가 원관내를 층류 상태로 흐를 때 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_w = K'(8v/D)^{n'} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 비교하면

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

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

이 되며 실험적으로 K' 와 n' 를 결정할 수 있다.

Fanning의 마찰계수는 다음과 같이 정의한다.

$$f = \tau_w / (1/2 \rho v^2) \quad (5)$$

식 (2)를 (5)에 대입하면

$$f = 16/Re' \quad (6)$$

이 되고 Re' 가 일반 Reynolds수가 된다.

$$Re' = [\rho v^{2-n'} D^{n'}] / [K' (8^{n'-1})] \quad (7)$$

일반 Reynolds수를 이용하면 층류 구역의 마찰계수가 Re' 만의 함수인 특징을 가지지만 국소적인 점성의 영향을 나타내는 데에 어려움이 있기 때문

에 주어진 변형율에 대한 겉보기점도(apparent viscosity)를 정의하고 이 값을 이용하여 Reynolds수와 Prandtl수를 정의하였다.

$$\mu_a = \tau_w / \dot{\gamma}_w \quad (8)$$

$$Re_a = \rho v D / \mu_a \quad (9)$$

$$Pr_a = C_p \mu_a / k \quad (10)$$

모세관점도계의 실험결과로부터 겉보기점도를 결정하였고 밀도, 비열 및 열전도계수는 물의 값을 취하여 Re_a , Pr_a 를 계산하였다. 무차원 열전달계수 j_H 는 다음 식으로 계산하였다.

$$j_H = St Pr_a^{2/3} \quad (11)$$

국소 열전달계수는

$$h = q_w (T_{wi} - T_b) \quad (12)$$

로 계산하고, 내면벽의 온도는 식(13)으로 계산하였다.

$$T_{wi} = T_{wo} - Q [r_o^2 \ln(r_o/r_i) - (r_o^2 - r_i^2) / 2] / [2\pi L k_s (r_o^2 - r_i^2)] \quad (13)$$

식 (13)에서 k_s 는 시험관의 열전도계수로서 참고문헌(13)의 값을 이용하여 계산하였다. 시험관에 공급되는 열량은 시험관 양단에 걸리는 전압과 시험관의 전기저항으로 계산하였다.

3.2 물의 실험결과

실험장치의 정확성을 확인하기 위하여 물을 이용

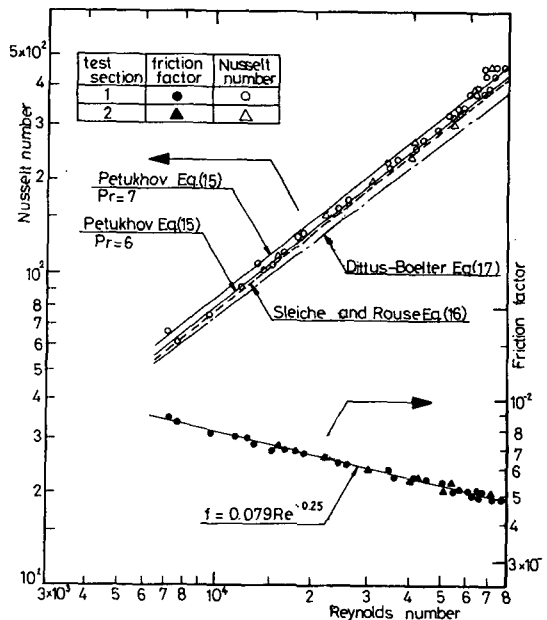


Fig. 4 The Nusselt numbers and friction factors vs. Reynolds numbers for water.

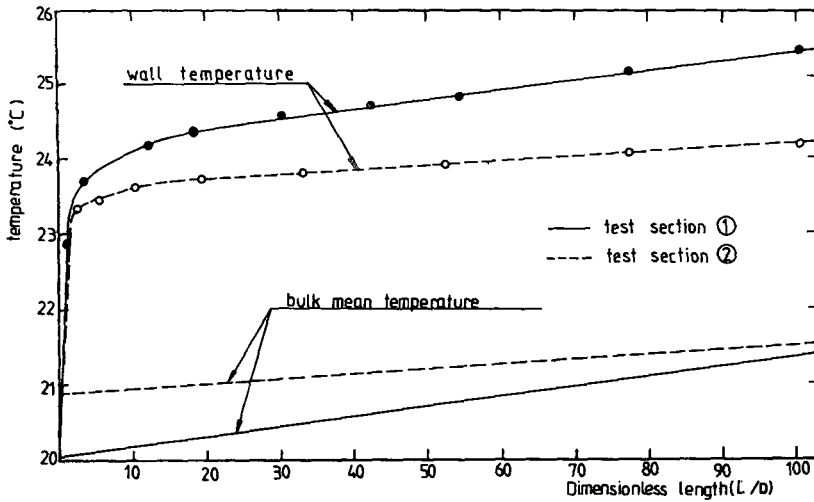


Fig. 5 The temperature distribution at entrance region for water

한 실험결과를 마찰계수는 Blasius식으로 계산한 값과 비교하였고 Nusselt 수는 Petukhov⁽¹⁴⁾, Sleicher-Rouse⁽¹⁵⁾ 및 Dittus-Boelter식으로 계산한 값과 비교하였다.

$$f = 0.079/Re^{0.25} \quad (14)$$

$$Nu_p = [Re Pr (f/2)] / [1.07 + 12.7(Pr^{2/3} - 1)\sqrt{f/2}] \quad (15)$$

$$Nu_{s-r} = 5 + 0.015Re^a Pr^b \quad (16)$$

여기서 $a = 0.88 - 0.24/(4 + Pr)$

$$b = 0.333 + 0.5 \exp(-0.6Pr)$$

$$Nu_{d-b} = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (17)$$

실험결과를 이용하여 구한 Nusselt수와 마찰계수는 Fig. 4와 같다. 마찰계수는 Blasius식과 비교할 때 오차의 범위가 $\pm 5\%$ 이며 Nusselt 수는 Dittus-Boelter식으로 계산한 값보다는 크며 Petukhov식으로 계산한 값과 거의 일치하고 있다. 이러한 결과들로부터 만들어진 실험장치를 이용하여 폴리머용액의 열전달실험을 할 때 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 물을 이용한 열전달실험에서 시험관 입구 부근의 관벽 온도 분포는 Fig. 5와 같다. 관벽온도가 혼합평균온도에 평행한 선을 따라 분포되는 구간까지 도달하는데 요하는 열적입구길이는 무차원길이 15~20으로 이미 잘 알려진 연구자들의 결과와 일치하고 있어 마찰계수 및 Nusselt수의 결과와 함께 실험장치의 신뢰성을 확인할 수 있다.

3.3 폴리머용액의 실험결과

여러가지 농도의 폴리머용액을 사용하여 실험한 결과 폴리머의 농도와 퇴화의 정도에 따라 열적입구길이는 다르게 되고 농도가 낮을수록 퇴화의 영향이 크기 때문에 1000wppm의 실험결과를 이용하여 열적입구길이를 규명하였다. Cho와 Hartnett는 관벽온도와 유체의 온도 차이를 시험관 출구의 값에 대한 비로서 열적입구길이를 결정하였으나 본 연구에서는 관벽의 온도 구배와 유체의 온도구배가 동일하게 되는 곳까지를 열적 입구길이라고 보고 실험결과를 해석하였다. 비교적 퇴화되지 않은 1000 wppm 폴리머용액의 관벽 온도분포는 Fig. 6과 같다. 물의 열전달실험에서 나타나는 온도분포와는

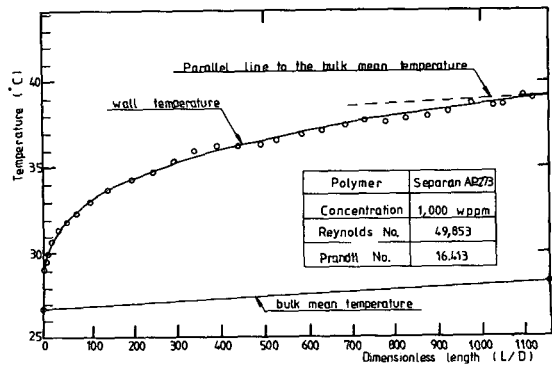


Fig. 6 Typical temperature distribution along the test section ② for polymer solution.

Table 1 The apparent viscosity for 1000 wppm polymer solution at shear rate of 10000 s⁻¹

Run No.	Apparent viscosity (Pa · s × 10 ³)	Viscosity of water (Pa · s × 10 ⁴)	μ_a/μ_w	Time lapse (hour)
1	3.0169	9.8247	2.96	1
2	2.7940	9.8247	2.75	2
3	2.6406	9.8247	2.59	3
4	2.5007	9.8247	2.46	6
5	2.2835	9.8247	2.24	7

전혀 다른 현상을 보여주고 있다. 온도분포 경향으로 볼 때 무차원길이 1100에서도 열적으로 완전히 발달된 영역에 도달되지 않았음을 알 수 있다. 이것으로 보아 비교적 퇴화되지 않은 1000wppm 폴리머용액의 열적입구길이는 무차원길이 1100보다 크다고 판단된다. Cho와 Hartnett⁽⁶⁾는 열 와동 확산계수 (eddy diffusivity of heat)를 이용하여 열적입구길이를 해석적으로 예측할 때 Reynolds수와 Prandtl수에 따라 무차원길이 200~800 범위에 있다고 하였으나 본 연구에서 실험한 결과는 해석적으로 예측한 범위보다 더 길다는 결과를 보여주고 있다.

퇴화의 영향으로 인한 관벽 온도분포의 변화를 검토하기 위하여 순환된 시간에 따른 관벽 온도분포의 변화를 Fig. 7에 표시하였다. 폴리머용액이 실험장치를 순환하기 시작한 초기에는 관벽의 온도가 시험관의 길이에 따라 계속적으로 증가되어 가고 있으나 순환 시간이 길어질수록 온도구배가 적어지며 대략 7시간이 지난 경우에는 무차원길이 600근방에서부터 수평에 접근하고 있음을 관찰할 수 있다. 이것으로 퇴화된 경우의 열적입구길이는 500~600으로 Cho와 Hartnett⁽¹⁰⁾의 연구결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

열전달실험이 진행되는 동안에 채취한 실험용액을 모세관점도계로 측정된 겔보기점도는 전단율 2000s⁻¹에서부터 12000s⁻¹까지 사이에서 측정되었으며 전단율 10000s⁻¹일 때 겔보기점도는 Table 1과 같다. 같은 온도의 물의 점성계수와 비교할 때 퇴화되지 않은 경우는 폴리머용액의 점도가 약 3배 정도 크고 퇴화가 될수록 점도는 작아짐을 알 수 있다. 전단율의 변화에 따른 폴리머용액의 유동곡선과 겔보기점도는 Fig. 8과 같다.

Cho와 Hartnett⁽⁶⁾는 점탄성 특성을 나타내는 폴리머용액의 최소저항점근선은

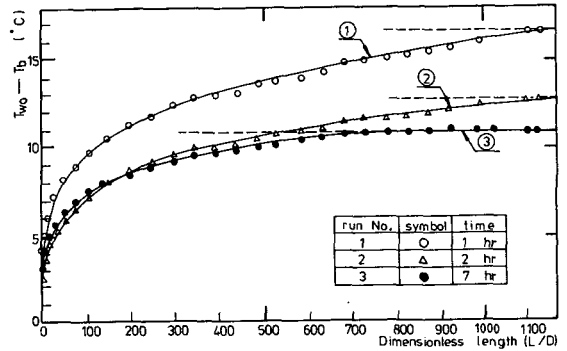


Fig. 7 Temperature distribution along the length with time lapse for 1000 wppm polymer solution.

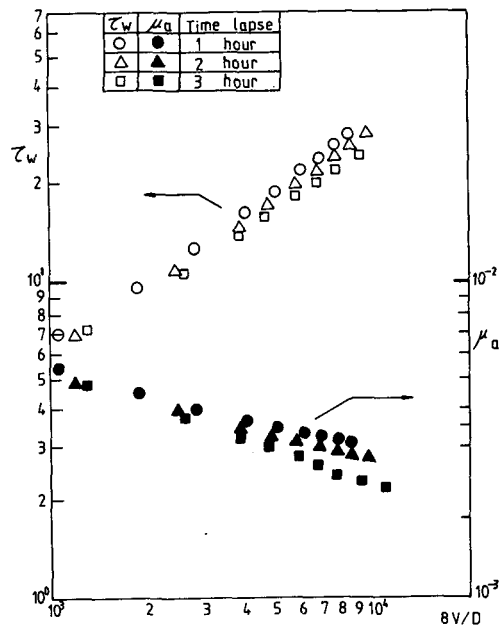


Fig. 8 Shear stress and apparent viscosity vs. shear rate at the wall.

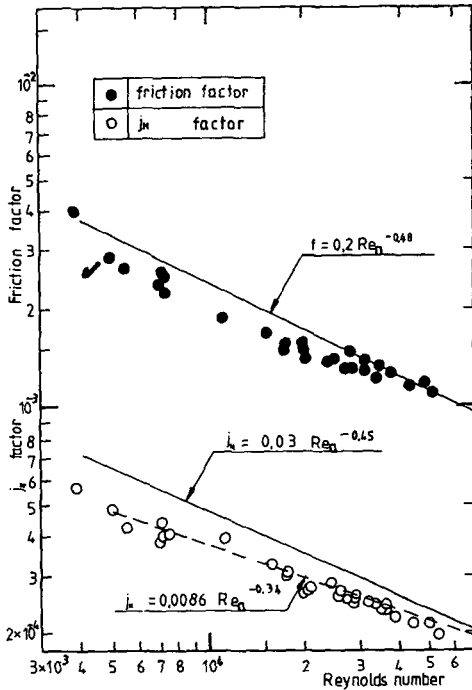


Fig. 9 The friction factors and j_H factors of fresh polymer solution at $L/D=1100$.

$$f = 0.20 Re_n^{-0.48} \quad (18)$$

으로 나타낼 수 있으며 최소열전달점근선(minimum heat transfer asymptote)은 Reynolds 수 6000에서부터 60000 사이에서

$$j_H = 0.03 Re_n^{-0.45} \quad (19)$$

으로 표시할 수 있다고 하였다.

비교적 퇴화되지 않은 폴리머용액의 실험결과 마찰계수와 열전달계수는 Fig. 9와 같다. 이 결과는 무차원길이 1100에서 얻은 것으로서 본 실험의 마찰계수는 Cho와 Hartnett의 최소저항점근선과 비교할 때 가장 큰 차이는 Reynolds수 1700 근방에서 -19% 정도이고 Reynolds수 5000 근방에서 6% 정도로서 최소저항 점근선에 비하여 Reynolds수 3000 이하에서는 약 10% 적고 Reynolds수 30000 이상에서는 최소저항 점근선에 거의 일치한다. 열전달계수는 최소열전달점근선보다 적다. 본 실험에서 얻은 열전달계수는 최소자승법(least square method)에 의하여 구하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$j_H = 0.0086 Re_n^{-0.34} \quad (20)$$

이 식은 Reynolds수 5000에서부터 50000까지 사이

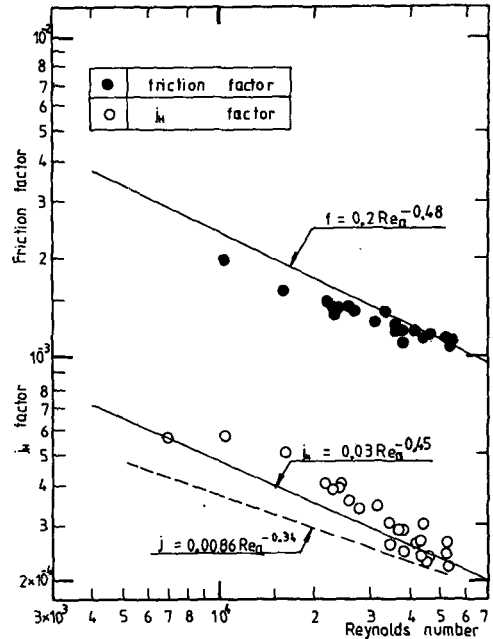


Fig. 10 The friction factors and j_H factors of degraded polymer solution at $L/D=1100$.

의 결과로서 실험치와의 차이는 대략 $\pm 7\%$ 범위에 있으며 Cho와 Hartnett의 최소열전달점근선 보다는 Reynolds수에 따라 8~20% 적은 값을 나타낸다.

퇴화된 폴리머용액의 실험결과는 Fig. 10과 같다. 마찰계수는 퇴화된 이후에도 최소저항점근선을 따르지만 열전달계수는 최소열전달점근선을 따르거나 약간 큰 것을 볼 수 있다. 이것으로 폴리머용액의 열전달특성의 퇴화는 마찰계수보다 빨리 일어나며 장시간 순환되어 퇴화된 폴리머용액일지라도 무차원길이 1100에서 구한 열전달계수는 Cho와 Hartnett의 최소열전달점근선에 머물러 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

유체역학적 경계층과 열적 경계층이 동시에 발달하기 시작하는 입구조건과 열플럭스가 일정한 열전달 실험장치에서 점탄성 특성을 나타내는 폴리머용액의 유동특성과 열전달특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 폴리머용액의 열적입구길이는 같은 농도의 용액일지라도 퇴화의 정도에 따라 달라지며 비교적 퇴화되지 않은 1000wppm 폴리머용액의 열적입구길이는 무차원길이 1100보다 크다.

(2) 무차원길이 1100에서 구한 비교적 퇴화되지 않은 폴리머용액의 열전달계수는 최소열전달점근선보다 적으며 Reynolds수 5000에서 50000까지 사이에서 $j_H = 0.0086 Re_a^{-0.34}$ 로 표시할 수 있다.

(3) 퇴화가 되어감에 따라 마찰계수의 증가보다는 열전달계수의 증가가 훨씬 빠르며 열적입구길이는 점차 감소되어 무차원길이 500~600까지 줄어들게 된다.

(4) 마찰계수는 무차원길이 1100에서도 최소화항 점근선을 따르며 열전달계수보다는 퇴화에 의한 영향이 적다.

참 고 문 헌

- (1) Virk, P.S., Mickley, H.S. and Smith, K.A., 1970, "The Ultimate Asymptote and Mean Flow Structure in Toms, Phenomenon", Trans. ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 37, pp. 488~493.
- (2) Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., 1980, "Analogy for Viscoelastic Fluids-Momentum, Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe Flow", Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 7, pp. 339~346.
- (3) Kwack, E.Y., Hartnett, J.P. and Cho, Y.I., 1980, "Chemical Effects in the Flow of Dilute Polymer Solutions", Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 7, pp. 1~6.
- (4) Kwack, E.Y., Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., 1981, "Solvent Effects on Drag Reduction of Polyox Solutions in Square Duct and Capillary Tube Flows", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 9, pp. 79~90.
- (5) 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.
- (6) Gupta, M.K., Metzner, A.B. and Hartnett, J.P., 1967, "Turbulent Heat Transfer Characteristics of Viscoelastic Fluids", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 10, pp. 1211~1224.
- (7) Yoo, S.S., 1974, "Heat Transfer and Friction Factor for Non-Newtonian Fluids in Turbulent Pipe Flow", Ph.D. Thesis, University of Illinois at Chicago.
- (8) Mizushima, T. and Usui, H., 1977, "Reduction of Eddy Diffusion for Momentum and Heat in Viscoelastic Fluid in Circular Tube", Phys. Fluids, Vol. 20, No. 10, Pt. 11, pp. s100~s108.
- (9) Ng, K.S., Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., 1980, "Heat Transfer Performance of Concentrated Polyethylene Oxide and Polyacrylamide Solutions", AIChE Symp. Ser. Vol. 76, No. 199, pp. 250~256.
- (10) Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., 1986, "Turbulent Heat Transfer of Non-Newtonian Fluids in Circular Pipe Flow", Heat Transfer: Korea-U.S.A. Seminar, pp. 469~494.
- (11) Yoon, H.K., 1986, "A Semi-Empirical Equation for Heat Eddy Diffusivity in Viscoelastic Pipe Flows under Constant Heat Flux", 대한기계학회, '86추계 학술대회초록집, pp. 221~226.
- (12) 유상신, 1984, "점탄성유체의 유동 및 열전달에 영향을 주는 인자에 관한 연구", 공사논문집, 제18집, pp. 94~115.
- (13) Touloukian, Y.S., Powell, R.W. and Ho, C.Y., 1970, "Thermophysical Properties of Matter", Vol. 1, pp. 1160~1175.
- (14) Petukhov, B.S., 1970, "Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties", Advances in Heat Transfer, Vol. 6, pp. 503~564.
- (15) Sleicher, C.A. and Rouse, M.W., 1975, "A Convenient Correlation for Heat Transfer to Constant and Variable Property Fluids in Turbulent Pipe Flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, 677~683.