

점탄성유체의 저항 및 열전달 감소현상과 퇴화의 영향에 관한 연구

A Study on the Drag and Heat Transfer Reduction Phenomena and Degradation Effects of the Viscoelastic Fluids

엄 정 섭* ; 전 찬 열** ; 유 상 신***
 C. S. Eum, C. Y. Jeon, S. S. Yoo

ABSTRACT

The drag and heat transfer reduction phenomena and degradation effects of drag reducing polymer solutions which are known as the viscoelastic fluids are investigated experimentally for the turbulent circular tube flows. Two stainless steel tubes are used for the experimental flow loops. Aqueous solutions of Polyacrylamide Separan AP-273 with concentrations from 300 to 1000 wppm are used as working fluids. Flow loops are set up to measure the friction factors and heat transfer coefficients of test tubes in the once-through system and the recirculating flow system.

Test tubes are heated by power supply directly to apply constant heat flux boundary conditions on the wall. Capillary tube viscometer and falling ball viscometer are used to measure the viscous characteristics of fluids and the characteristic relaxation time of a fluid is determined by the Powell-Eyring model.

The order of magnitude of the thermal entrance length of a drag reducing polymer solution is close to the order of magnitude of the laminar entrance length of Newtonian fluids. Dimensionless heat transfer coefficients of the viscoelastic non-Newtonian fluids may be represented as a function of flow behavior index n and newly defined viscoelastic Graetz number. As degradation continues viscosity and the characteristic relaxation time of the testing fluids decrease and heat transfer coefficients increase. The characteristic relaxation time is used to define the Weissenberg number and variations of friction factors and heat transfer coefficients due to degradation are presented in terms of the Weissenberg number.

기 호 설 명

C_p : 정압비열
 D : 시험관의 안지름

f : Fanning의 마찰계수 ($\tau_w/(\rho V^2/2)$)
 Gz : Graetz 수 ($Re Pr D/x$)
 Gz_v : 점탄성 Graetz 수 ($Re Gz$)
 h : 열전달계수 ($q_w/(T_{wi} - T_b)$)

* 유한공업전문대학 기계설계과

** 단국대학교 대학원

*** 한국항공대학 기계설계과

- j_h : 무차원 열전달계수($St Pr^{2/3}$)
 k : 열전도계수
 K, K' : 유동특성 상수
 L : 시험관의 길이
 n, n' : 유동특성 지수
 Nu : Nusselt 수($h D/k$)
 Pr : Prandtl 수($C_p \mu/k$)
 q_w : 시험관의 열플럭스
 Re : Reynolds 수($\rho V D/\mu$)
 T : 온도
 tr : 유체의 특성이완시간
 td : 유체의 특성확산시간
 V : 관속의 평균속도
 Ws : Weissenberg 수($tr V/D$)
 x : 시험관의 위치
 $\dot{\gamma}$: 전단율
 μ : 점성계수
 μ_0 : 영전단율 점성계수
 μ_∞ : 무한전단율 점성계수
 ν : 동점성계수
 ρ : 밀도
 τ : 전단응력
 〈하첨자〉
 a : 겔보기점도(Apparent viscosity)
 b : 혼합유체
 ex : 시험관 출구
 w : 관벽

1. 서 론

고분자 폴리머를 용해한 용액들의 응력과 변형을 관계는 뉴턴 유체와 다르게 나타나기 때문에 이 용액들은 비뉴턴유체로 분류되고, 특히 점탄성특성을 나타내는 유체를 점탄성유체(viscoelastic fluid)라 한다.

점탄성 특성을 나타내는 폴리머용액이 매끈한 원형관속을 난류상태로 흐를 때 마찰계수는 뉴턴유체에 비하여 훨씬 감소하며 뉴턴유체와의 차이는 최대 80% 정도까지 이른다.¹⁾ 저항감소현상을 나타내는 폴리머용액의 마찰계수를 종합하여 보면 뉴턴유체에 비하여 저항이 감소되는 한계가 존재함을 발견할 수 있

는데 Virk 등²⁾은 비뉴턴유체의 마찰계수가 취대로 감소되는 한계를 최소마찰접근선(minimum friction asymptote)이라 하였다.

난류구역에서 저항감소 효과가 좋은 폴리머용액일지라도 층류구역에서는 뉴턴유체의 마찰계수와 같은 특성을 따르며, Reynolds 수가 더욱 증가하면 층류 마찰계수의 연장선을 따르다가 Reynolds 수가 5,000 내지 6,000 이상이 되면 층류 마찰계수선의 연장선으로부터 서서히 이탈하여 최소 마찰 접근선을 따르게 된다. 뉴턴유체의 마찰계수는 임계 Reynolds 수 이상에서는 급격한 천이현상을 나타내지만 점탄성 유체의 마찰계수는 갑작스런 천이현상을 나타내지 않는다. 일반적으로 난류구역에서 점탄성유체의 마찰계수는 뉴턴유체의 마찰계수선과 최소마찰접근선 사이에 있게 된다. 저항감소효과는 용매, 폴리머의 종류, 분자량, 농도, 용액의 퇴화 정도, 유량 등에 따라 다른 것으로 발표되어 있다.

난류상태에서 저항감소현상을 나타내는 폴리머용액은 Reynolds 수 5,000 내지 6,000 이상에서 동일한 Prandtl 수의 뉴턴유체보다 열전달감소현상을 나타낸다. 열전달 감소현상에 관한 연구는 저항감소현상에 관한 연구에 비하여 적은 편이며 연구결과들이 아직 일치된 결론에 이르지 못하고 있다. 이것은 주로 점탄성유체의 원형관속 유동에서 열적입구길이(thermal entrance length)의 예측이 잘못되어 있고 실험용액이 순환되는 동안 계속 퇴화(degradation)됨에 따라 실험결과들이 크게 변화되기 때문이다.

저항감소효과가 좋은 Separan AP-273 폴리머용액을 이용하여, Kwack 등³⁾은 반지름과 무차원 시험관의 길이가 서로 다른 2개의 시험관에서 열적입구길이를 실험적으로 연구한 결과 무차원열적입구길이는 400 내지 500이라고 하였으며, Toh 등⁴⁾은 반지름이 다른 2개의 시험관을 이용하여 폴리머농도 200wppm 용액으로 실험한 결과 지름의 600배가 지난 뒤에도 열적으로 발달되고 있으며 Reynolds 수가 증가함에 따라 열적입구길이가 증가한다고 발표하였다. Mattys⁵⁾도 농도 200wppm

용액의 경우 무차원 시험관의 길이 600 이상에서도 열적으로 발달하고 있다고 발표하였다. 최근 업정섭 등⁶⁾은 점탄성유체가 최소마찰점 근선을 따를 때 열적입구길이는 1,100보다 크며 Reynolds 수에 따라 열적입구길이가 3,000 이상이 될 수도 있음을 실험적으로 입증하였다.

점탄성유체의 열적입구길이가 뉴턴유체에 비하여 훨씬 길다는 사실은 점탄성유체를 열교환기에 사용할 때 열전달 문제가 대부분 열적입구길이 영역에 국한된다는 것을 뜻하게 되어 열적으로 완전히 발달된 상태의 열전달계수 못지않게 열적입구길이 영역에서의 열전달계수를 예측할 수 있는 연구결과들이 요구되고 있다.

점탄성특성을 나타내는 폴리머용액의 퇴화현상에 관한 연구결과들은 많이 발표되어 있으나 유동과 열전달특성을 퇴화의 정도에 따라 명확하게 분석한 연구결과는 거의 없다. 유체의 유동과 열전달특성을 나타내는 Reynolds 수와 마찰계수만으로는 폴리머용액의 퇴화영향을 나타낼 수 없기 때문에 폴리머용액의 유변학적 특성(rheological characteristic)을 이용하여 새로운 무차원수를 정의하고 퇴화의 정도를 체계적으로 나타낼 수 있는 방법이 요청되고 있다.

본 연구에서는 실험유체의 점성특성과 특성시간을 모세 관점도계와 낙구식점도계를 이용하여 측정하고, 난류상태에서 저항감소현상을 나타내는 점탄성유체의 실험결과를 이용하여 새로운 최소마찰점근선 식을 제시하며, 열적입구길이 영역에서 새로운 무차원수를 정의하여 극소 열전달계수를 표시할 수 있는 실험식을 제시하고, 특성이완시간을 이용한 Weissenberg 수를 이용하여 폴리머용액의 퇴화에 따른 유동과 열전달현상을 체계적으로 연구하고자 한다.

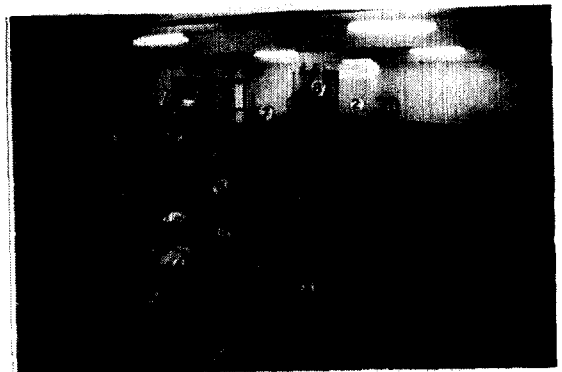
2. 실험

2.1 유체 순환 장치

유체의 유동과 열전달특성을 실험하기 위한

유체 순환 장치는 펌프, 바이패스관, 유동안정실, 시험관, 유체 혼합실, 벤튜리미터와 정압공을 이용한 압력수두 측정장치 및 유체 저장탱크 등으로 구성되어 있으며 유체 순환 장치를 포함한 실험장치의 전경은 Fig.1과 같다.

유동안정실에 실험유체의 입구온도를 측정할 수 있는 열전대탐침(probe)을 설치하였으며 실험 중인 유체의 시료를 채취할 수 있도록 제작하고 시험관 다음에는 혼합실을 설치하여 출구온도 측정용 열전대 탐침을 설치하였다. 시험관은 내면이 매끈한 이음매 없는 스테인레스강관으로서 시험관 1은 안지름 8.5 mm, 무차원 실험관의 길이(L/D) 712이고 시험관 2는 안지름 10.3mm, 무차원 시험관의 길이 1,160으로 제작하였다. 시험관 양단에 전력공급장치와 연결하여 열전달실험에서 일정한 열플럭스를 얻을 수 있도록 하였으며 시험관 입구로부터 유체역학적 경계층과 열적 경계층이 동시에 발달하기 시작하는 경계조건을 형성하도록 하였다. 실험장치의 상세한 내용과 실험방법은 참고문헌 [7]에 수록되어 있다.

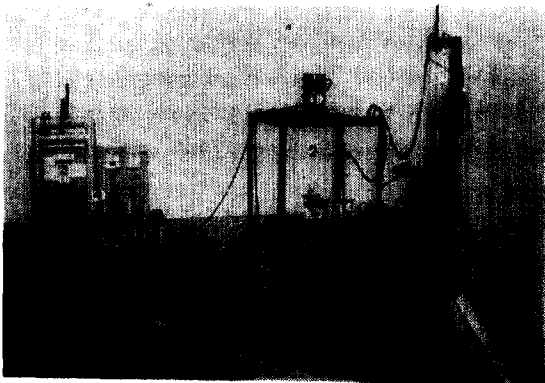


- | | |
|-------------------|---------------------|
| 1. Reservoir 1 | 2. Reservoir 2 |
| 3. Pump | 4. Calming section |
| 5. Test tube 1 | 6. Test tube 2 |
| 7. Mixing chamber | 8. Multi-manometers |
| 9. Power supply | 10. Data logger |

Fig.1 Photograph of experimental apparatus.

2.2 점성 측정 장치

유동과 열전달실험이 진행되는 동안에 채취한 폴리머용액의 걸보기점도는 모세관점도계와 낙구식점도계를 이용하여 측정하였다. 모세관점도계는 시료저장통, 압력조정기, 압력탱크, 항온유지장치 및 모세관으로 구성되어 있다. 시료저장통은 안지름 102mm, 높이 285mm인 원통형 용기이며 항온 유지를 위하여 둘레에 물자킷을 설치하여 시료온도를 일정하게 유지할 수 있도록 제작하였다. 모세관은 시료저장통 하단에 길이는 341.8mm이고 안지름은 0.9443mm인 스테인레스강관을 나사식으로 연결하였으며 모세관점도계의 사진은 Fig. 2와 같다.



- | | |
|----------------|---------------------|
| 1. Reservoir | 2. Capillary tube |
| 3. Balance | 4. Circulator |
| 5. Thermometer | 6. Manometers |
| 7. Surge tank | 8. Pressurized tank |

Fig. 2 Photograph of the capillary tube viscometer.

낙구식점도계는 헬륨-네온 가스레이저 (Helium-neon gas laser), 디지털타이머, 수광기, 시료실린더 및 항온유지장치 등으로 구성되어 있으며 낙구식점도계의 개략도는 Fig. 3 과 같다.

유체속에서 낙하하는 구의 종말속도를 정확히 측정하기 위하여 헬륨-네온 가스레이저

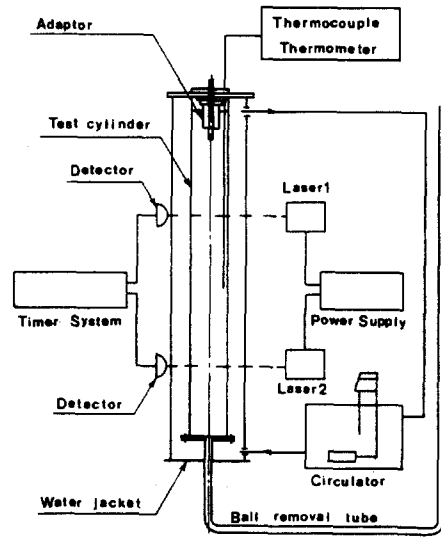


Fig. 3 Schematic diagram of the falling ball viscometer.

(출력; 5mW, 빔지름; 0.9mm) 두대를 시료실린더의 상단과 하단에 설치하고 이 구간내에서 레이저빔을 통과한 구가 떨어지는 시간을 밀리초까지 측정할 수 있는 디지털타이머를 제작하였다.

레이저와 타이머를 이용한 측정 속도가 떨어지는 구의 종말속도인가를 확인하기 위하여 각 실린더의 상단에서 20cm 되는 곳으로부터 10cm 간격을 유지하고 레이저와 수광기를 이동시키면서 떨어지는 구의 낙하속도를 측정하였을 때 실린더 상단에서 40cm 되는 곳으로부터 종말속도에 도달하여 이 곳으로부터 10cm 간격을 설정하여 떨어지는 구의 속도를 측정하였다. 시료실린더는 길이 75cm이고 안지름이 서로 다른 3개(5.575cm, 6.520cm, 9.396cm)를 항온조 내부에서 원활하게 교환할 수 있도록 제작하였다.

실험에 사용된 구는 지름이 0.1996cm 내지 0.6996cm인 5개의 강구(비중; 7.7591~7.7771)와 지름이 0.950cm이고 밀도를 변화시킬 수 있는 속이 빈 알루미늄구(비중; 0.9966~1.8043)와 니들(비중; 1.1071~1.3846)을 사용하였다. 유체의 특성확산시간을 측정하려면 실린더 속에 있는 유체를 교란시키지 않고 시간간격에

따라 연속적으로 구를 떨어뜨려야 하므로 시료실린더와 구 회수용관을 플랜지로 연결하여 처음 구를 떨어뜨린 후 30초 내지 30분 간격으로 회수한 구를 다시 시료실린더에 떨어뜨렸다.

2.3 실험용 폴리머용액

폴리머는 수용성 폴리머 중에서 소량만을 첨가하여도 저항감소 효과가 대단히 좋은 Dow Chemical 사 제품인 Polyacrylamide Separan AP-273을 이용하였고 수도물에 용해하여 제조한 300, 500, 700 및 1,000 wppm인 폴리머용액을 사용하였다. 폴리머용액 제조과정에서 발생하는 용액 특성의 퇴화를 방지하기 위하여 일정량의 수도물을 실험온도까지 가열한 뒤 저장탱크로 떨어뜨리면서 물속에 폴리머분말을 미소량씩 첨가하는 방법을 사용하였다.

점성계수 측정용 시료는 실험이 진행되는 동안 1시간 간격으로 채취하였으며 오랜시간 재순환시키는 실험에서는 채취 시간을 임의로 선정하였다.

2.4 실험장치의 보정

모세관 점도계의 신뢰성을 확인하기 위하여 물을 이용한 실험을 수행하였다. 층류유동에 적용되는 Hagen-Poiseuille 식을 이용하여 모세관 유동의 실험결과로부터 점성계수를 구하였으며 점성계수의 값을 참고문헌[8]과 비교한 결과 최대편차는 ±5% 범위 내에 있었다.

뉴턴유체인 글리세린을 낙구식 점도계에 채우고 크기가 다른 여러개의 강구와 속이 빈 알미늄 구를 이용하여 종말속도를 측정하였다. 측정된 종말속도로부터 산출한 Reynolds 수와 항력계수의 관계는 실험 온도범위(10℃~30℃)에서 구의 크기와 밀도의 변화에 관계없이 Stokes 이론과 잘 일치하였다.

낙구식점도계에서 강구를 이용하여 종말속도를 측정함으로써 지금까지는 낮은 전단율의 점성계수 측정이 거의 불가능하였으나 속이 빈 알미늄 구를 이용하여 밀도를 변화시킴으로써 낮은 전단율의 점성계수 측정이 가능하게 되었다. 모세관점도계를 이용하여 높은 전단율

에서의 점성계수를 측정하고, 낙구식점도계를 이용하여 낮은 전단율에서의 점성계수를 측정하면 점탄성유체의 특성이완시간을 결정할 수 있다.

유동 실험장치의 신뢰성을 확인하기 위하여 물을 이용한 실험을 수행하였다. 난류구역에서 마찰계수는 Blasius 식과 비교하였고 열전달실험 결과는 Dittus-Boelter⁹⁾, Petukhov¹⁰⁾ 및 Sleicher-Rouse¹¹⁾의 Nusselt 수와 비교하였다.

Blasius 식 :

$$f = 0.079 Re^{-0.25} \dots\dots\dots (1)$$

Prandtl 식 :

$$1/\sqrt{f} = 4.0 \log(Re_a \sqrt{f}) - 0.4 \dots\dots\dots (2)$$

Petukhov 식 :

$$Nu = \frac{Re Pr (f/2)}{1.07 + 12.7(Pr^{2/3} - 1)\sqrt{f/2}} \dots\dots\dots (3)$$

Sleicher-Rouse 식 :

$$Nu = 5 + 0.015 Re^a Pr^b \dots\dots\dots (4)$$

여기서, $a = 0.88 - 0.24/(4 + Pr)$

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

Dittus-Boelter 식 :

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \dots\dots\dots (5)$$

본 실험에서 물의 실험온도는 대략 20℃이어서 Prandtl 수는 6 내지 7이 되며 시험관의 정압공을 이용하여 측정된 압력차로 계산한 마찰계수와 열전달실험 결과에서 얻은 Nusselt 수는 Fig.4와 같다.

마찰계수를 Blasius 식과 비교할 때 최대편차는 ±5%이고 Nusselt 수는 Dittus-Boelter 식으로 계산한 값보다 크며 Petukhov 식과 Sleicher-Rouse 의 식으로 계산한 값과 거의 일치한다. 이러한 실험결과들로부터 만들어진 실험장치를 이용하여 폴리머용액의 유동과 열전달실험을 할 때 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

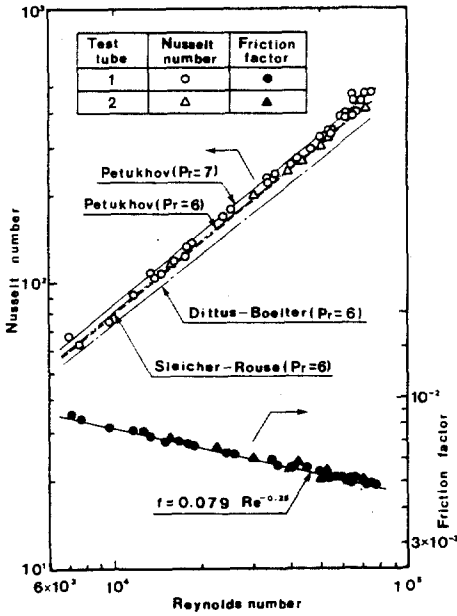


Fig. 4 The Nusselt numbers and friction factors versus Reynolds numbers for water.

3. 실험결과 및 검토

3.1 점탄성유체의 성질

비뉴턴유체의 전단응력과 전단율의 함수관계는 실용성을 고려할 때 2개의 상수를 이용하는 power law 모델이 많이 이용된다.¹²⁾

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \dots\dots\dots (6)$$

원형관속을 층류유동할 때 벽에서의 전단응력을 평균속도와 지름의 함수로 나타내면 식 (7)과 같이 된다.

$$\tau_w = K'(8V/D)^{n'} \dots\dots\dots (7)$$

식(6)과 (7)을 비교하면 식(8)과 (9)와 같이 된다.

$$n' = n \dots\dots\dots (8)$$

$$K' = K \left[\frac{(3n+1)}{4n} \right]^n \dots\dots\dots (9)$$

식(7)은 비뉴턴유체의 점성특성을 나타낼 때 이용되며 n은 log-log 좌표로 표시한 층류 유동곡선에서 전단응력과 전단율의 관계를 이용하여 구한다.

$$n = \frac{d(\ln \tau_w)}{d(\ln(8V/D))} \dots\dots\dots (10)$$

점탄성유체의 전단율이 영전단을 점성계수 (μ_0)와 무한전단을 점성계수(μ_∞)를 측정하면 특성이완시간(characteristic relaxation time)을 결정할 수 있다. 특성이완시간을 나타내는 여러 가지 모델이 발표되어 있으나 식(11)로 표시되는 Powell-Eyring 모델이 공학적으로 많이 이용된다.¹³⁾ 모세관점도계와 낙구식점도계를 이용하여 μ_0 , μ_∞ 및 μ 를 실험적으로 결정하면 Powell-Eyring 모델을 이용하여 특성이완시간(tr)을 결정할 수 있다.

$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \frac{\sin k^{-1}(tr \dot{\gamma})}{tr \dot{\gamma}} \dots\dots (11)$$

겉보기점도(apparent viscosity)는 주어진 전단율에서 전단응력과 전단율의 비로 정의한다.

$$\mu_a = \tau_w / \dot{\gamma}_w \dots\dots\dots (12)$$

겉보기점도를 이용하여 Reynolds수와 Prandtl 수를 각각 식(13)과 (14)와 같이 정의할 수 있다.

$$Re_a = \rho V D / \mu_a \dots\dots\dots (13)$$

$$Pr_a = C_p \mu_a / k \dots\dots\dots (14)$$

유체의 특성이완시간(tr)과 유동특성시간(D/V)을 이용하여 Weissenberg 수를 식(15)와 같이 정의한다.

$$Ws = \frac{tr V}{D} \dots\dots\dots (15)$$

3.2 폴리머용액의 실험결과

저항감소현상을 나타내는 점탄성유체의 최소마찰점근선을 Virk 등²⁹⁾은 속도분포식의 적분을 이용하여 식(16)과 같이 나타내고 Cho 등¹³⁾은 실험결과를 이용하여 식(17)과 같은 상관관계식을 발표하였다.

$$1/\sqrt{f} = 19.0 \log(Re_a \sqrt{f}) - 32.4 \dots\dots (16)$$

$$f = 0.20 Re_a^{-0.48} \dots\dots\dots (17)$$

무차원 시험관의 길이 (L/D) 1.100에서 측정된 폴리머용액의 마찰계수는 Fig.5와 같다.

폴리머 농도 300 내지 1,000 wppm 인 비교적 퇴화되지 않은 폴리머용액은 Virk 등의 최소마찰점근선보다 작은 값을 나타내며 대체적으로 Cho 등의 최소마찰점근선을 따르는 것을 볼 수 있고 황태성의 실험결과와도 같음을 알 수 있다. 마찰계수는 뉴튼유체에 비하여 최대 80% 정도 작게 나타나고 Reynolds 수 6,000 이상에서 70,000 정도까지 범위에서의 실험결과는 식(18)과 같이 나타낼 수 있다. 식(18)은 실험결과와 ± 10%의 오차 범위내에 있다.

$$f = 0.086 Re_a^{-0.4} \dots\dots\dots (18)$$

저항감소현상을 나타내는 폴리머용액이 원형관속을 유동할 때 마찰계수가 최소마찰점근선을 따르면 열전달계수도 또한 최소로 감소하므로 최소열전달점근선(minimum heat transfer asymptote)을 얻으려는 연구들이 이루어져 왔다. 최소열전달점근선을 Cho 등¹¹⁾은 폴리머농도 1,000 wppm 용액을 이용하여 무차원 시험관의 길이 430에서 구한 실험결과를 이용하여 식(19)와 같이 제시하였고, 황태성¹³⁾은 농도 300 wppm 이상인 용액을 이용하여 무차원 시험관의 길이 1,100에서 얻은 실험결

과를 이용하여 식(20)으로 제시하였으나 두 결과가 서로 다르다. 열적입구길이가 분명하게 규명되지 않은 상태에서 완전히 발달된 구역의 최소열전달점근선을 예측한 실험식들을 공학적으로 응용하면 신뢰성이 결여된다고 본다.

$$j_h = 0.03 Re_a^{-0.45} \dots\dots\dots (19)$$

$$j_h = 0.0084 Re_a^{-0.34} \dots\dots\dots (20)$$

본 실험적 연구에서 퇴화되지 않은 폴리머 농도 300 wppm 이상인 용액을 사용할 때 열적입구길이는 항상 1,100 이상이었으며 최소열전달점근선은 식(19)와 (20)보다 작은 값으로 나타났다.

무차원 시험관의 길이 1,100에서 구한 폴리머용액의 열전달계수를 폴리머의 농도와 Reynolds 수와의 관계로 나타낸 결과는 Fig.6 과 같다.

지금까지 연구발표된 시험관의 길이를 이용할 경우에는 열적으로 완전히 발달된 상태의 열전달 결과를 얻을 수가 없기 때문에 열적입구길이 영역에서의 최소열전달점근선을 표시하려고 시도하여 왔다. 입구역에서 무차원

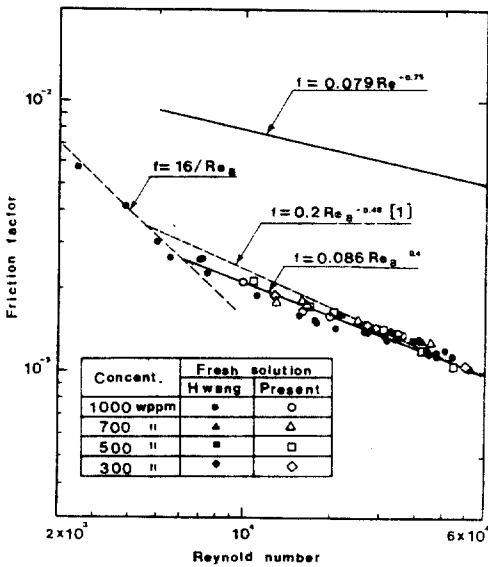


Fig.5 Friction factors versus Reynolds numbers for drag reducing polymer solutions at $x/D=1,100$.

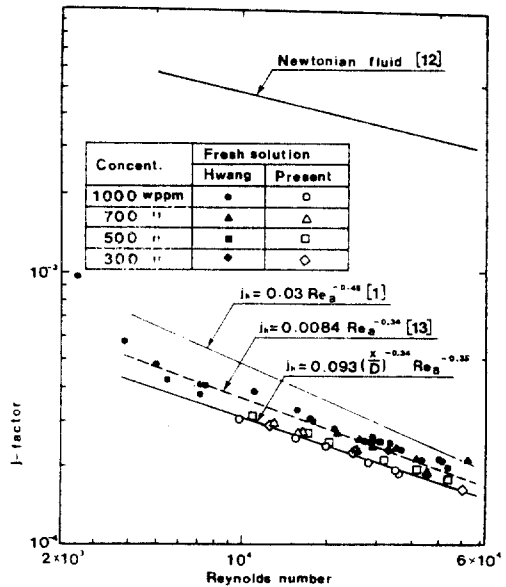


Fig.6 Heat transfer j -factors versus Reynolds numbers for drag reducing polymer solutions at $x/D=1,100$.

열전달계수는 무차원 시험관의 길이에 따라 식(21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$j_h = a(x/D)^b Re_a^c \dots\dots\dots (21)$$

폴리머농도 300에서 1,000 wppm까지의 용액을 사용하여 무차원 시험관의 길이 1.100의 범위에서 얻은 결과 중 퇴화의 영향이 거의 없다고 판단되는 실험결과들을 종합하여 보면 식(21)의 형태로 식(22)와 같이 나타낼 수 있으며 무차원 시험관의 길이(x/D) 1.100에서의 결과는 Fig.6의 하단의 실선과 같이 표시된다.

$$j_h = 0.093(x/D)^{-0.34} Re_a^{-0.36} \dots\dots\dots (22)$$

점탄성유체인 폴리머용액의 난류유동에서 난류생성이 가장 활발한 구역의 외류열확산계수는 동점성계수와 같은 크기의 위수(order of magnitude)임이 발표되었으며⁸⁾ 시험관 입구 길이 영역에서의 무차원 관벽온도의 분포는 Fig.7과 같다. 이 결과를 이용하여 결정된 입구구역에서의 Nusselt 수를 보면 무차원 시험관 길이의 증가에 따른 변화가 뉴튼유체의 층류운동 열전달에서 나타난 무차원 시험관 길이에 따른 Nusselt 수의 변화 결과와 유사한 점을 발견할 수 있다. 이러한 결과들로부터 점탄성유체의 입구역 열전달현상은 뉴튼유체의 층류 열전달에 이용하는 상관관계식의 형태로 표시해 보는 것도 의미 있는 것으로 판단된다.

Power law 유체의 층류유동 열전달에서 완전히 발달된 영역의 Nusselt 수는 식(23)과 같이

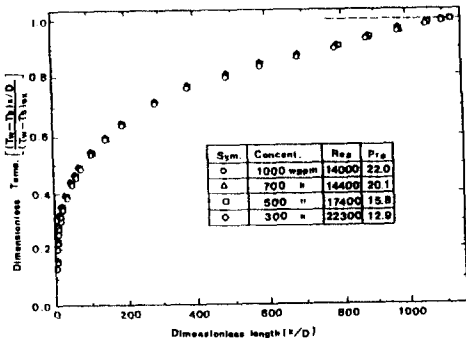


Fig.7 Wall temperature distribution along the dimensionless length for polymer solutions.

표시할 수 있다.

$$Nu_\infty = \frac{hD}{k} = \frac{8(3n+1)(5n+1)}{1+12n+31n^2} \dots\dots\dots (23)$$

뉴튼유체의 경우에는 유동실험 장치에서 Reynolds 수가 5,000 이상이면 난류상태가 확실하지만 폴리머용액은 Reynolds 수 5,000 이상에서도 뉴튼유체의 난류상태와는 너무나 판이한 결과를 나타내기 때문에 실험결과를 나타내기 위한 여러 가지 시도를 해 보았다. 뉴튼유체의 층류유동에서 정의된 Graetz 수만을 이용할 때는 폴리머용액의 실험결과를 간단하게 나타낼 수 없었으나 실험 결과들이 Graetz 수와 Reynolds 수가 결합된 형태의 함수관계를 나타내는 것을 발견하게 되었다. 따라서 Graetz 수를 수정한 새로운 무차원수를 정의할 필요성을 발견하였으며 특히 점탄성 유체의 특성을 나타내도록 Graetz 수를 수정한 점탄성 Graetz 수(viscoelastic Graetz number)를 식(24)와 같이 정의하고 이 무차원수를 이용하여 실험결과를 나타내었다.

$$Gz_v = Re^2 Pr \frac{D}{x} \dots\dots\dots (24)$$

점탄성 Graetz 수를 이용하면 열적입구길이 구역에서 국소 Nusselt 수는 Nu_∞ 와 Gz_v 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$Nu_x = Nu_\infty + a Gz_v^b \dots\dots\dots (25)$$

식(25)에서 Nu_∞ 는 식(23)을 이용하면 구할 수 있다. 본 연구에 사용된 폴리머농도 300, 500, 700 및 1,000 wppm인 용액에서 유동특성지수 n 은 0.5에서 1 범위에 있으며 n 의 값에 따르는 Nu_∞ 의 값은 Table 1과 같다.

Table 1. Nusselt number in the fully developed region for polymer solution.

| n | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nu_∞ | 4.745 | 4.628 | 4.538 | 4.467 | 4.410 | 4.364 |

폴리머농도가 300에서 1,000 wppm의 실험결과를 이용하여 a 와 b 를 산출하여 본 연구에서 얻은 결과는 식(26)과 같이 표시할 수 있다. 본 실험식을 시험관 1은 무차원 길이(x/D) 5 이상에서 600까지, 그리고 시험관 2는

5 이상에서 1,120 까지에서 얻은 실험결과들과 비교하면 최대편차는 $\pm 20\%$ 이하이다.

$$Nu_x = Nu_\infty + 0.04 Gz_v^{0.363} \dots \dots \dots (26)$$

농도범위 300 내지 1,000 wppm 의 실험결과를 점탄성 Graetz 수를 이용하여 나타내면 Fig.8과 같다. 시험관 1과 2에서 농도의 범위가 300 내지 1,000 wppm 이고 Reynolds 수의 범위가 8,000 내지 70,000 으로 비교적 넓은 범위에서 얻은 실험결과들인 것을 고려할 때 실험식(26)은 실험결과를 잘 나타내고 있음을 볼 수 있다.

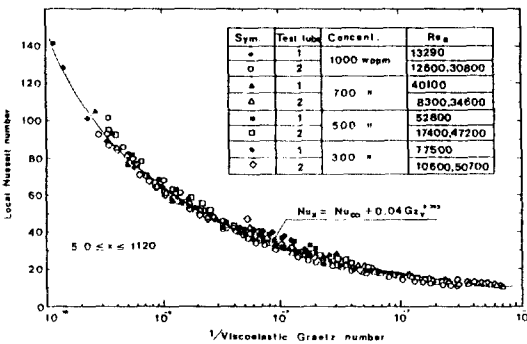


Fig.8 Local Nusselt numbers versus viscoelastic Graetz numbers in the entrance region for polymer solutions.

폴리머용액이 유동장치를 계속하여 재순환하면 퇴화되어 마찰계수와 열전달계수가 변하게 된다. 퇴화되지 않은 폴리머용액은 최소마찰점근선과 최소열전달점근선을 따르지만 퇴화가 진행되면 마찰계수와 열전달계수는 각각 최소마찰점근선과 최소열전달점근선으로부터 이탈하여 증가하게 된다.

폴리머농도 300 wppm 인 용액의 재순환되는 시간에 따른 관벽의 온도분포는 Fig.9와 같다. 농도 500, 700 및 1,000 wppm 인 용액도 같은 경향을 나타내지만 농도가 증가할수록 재순환 시간에 따른 퇴화의 정도는 감소한다.

본 실험에서 사용한 폴리머용액 중 농도가 높은 1,000 wppm 은 비교적 재순환 유동 초기에는 퇴화현상이 작은 것으로 발표되어 있으나¹²⁾ 이 용액에서도 순환과 동시에 온도분포

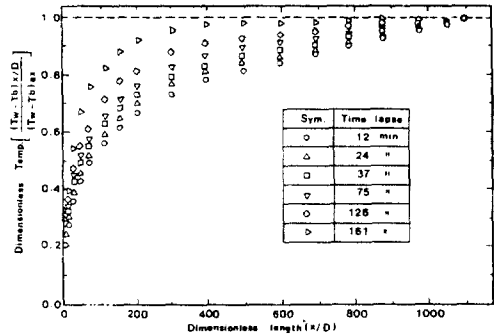


Fig.9 Dimensionless wall temperature distribution for 300 wppm polymer solutions.

가 Fig.9와 유사하게 변화됨을 볼 수 있었으며 재순환시간이 길어지면 계속하여 온도분포가 변화되어 열전달은 증진되고 있음을 알 수 있었다. 농도 300 wppm 인 용액의 Prandtl 수는 대략 20 이하이고 Reynolds 수 30,000 정도 일 때 순환시간이 2시간 이상되면 퇴화로 인한 열적입구길이가 1.100 정도로 감소하는 것을 볼 수 있다.

점탄성유체인 폴리머용액의 퇴화에 의한 유동특성과 열전달특성을 체계적으로 해석하기 위해서는 점탄성성질인 유체의 특성시간을 포함하는 무차원수를 필요로 한다.

점탄성유체의 퇴화로 인한 물리적 성질의 변화를 측정하기 위하여 폴리머용액을 장시간 재순환시키면서 낙구식점도계와 모세관점도계로 점성특성을 측정하여 Powell-Eyring 모델로부터 특성이완시간을 결정하였다. 또한 낙구식 점도계에서 점탄성유체는 처음 구를 떨어뜨린 후 일정한 시간 간격을 두고 다시 구를 떨어뜨리면 처음 구가 떨어질때의 종말속도보다 다음 구가 떨어질때의 종말속도는 크게 나타난다. 구를 떨어뜨리는 시간 간격이 짧을수록 종말속도는 크게 나타나고 시간 간격이 충분히 길면 처음 종말속도와 같다. 처음 떨어뜨린 구의 종말속도와 같은 속도에 도달하는 시간 간격을 측정하여 처음 떨어뜨린 구의 종말속도의 98%에 도달하는 시간 간격을 특성확산시간으로 결정하였다.

Powell-Eyring 모델을 이용하여 산출한 특성이완시간과 특성확산 시간의 퇴화로 인한 영향은 Table 2와 같다.

Table 2. Characteristic relaxation time(t_r , s) and diffusion time(t_d , s) of the degrading polymer solution

| Concent. | 300 wppm | | 700 wppm | | 1.000 wppm | |
|-----------|----------|-------|----------|-------|------------|--------|
| Time Hour | t_r | t_d | t_r | t_d | t_r | t_d |
| 0 | 0.166 | 12.20 | 0.260 | 72.35 | 0.780 | 150.42 |
| 1 | 0.155 | 9.37 | 0.202 | 67.54 | 0.445 | 125.43 |
| 3 | 0.101 | 8.03 | 0.130 | 55.73 | 0.352 | 100.68 |
| 5 | 0.033 | 7.54 | 0.065 | 45.65 | 0.260 | 90.34 |
| 8 | 0.021 | 6.43 | 0.044 | 39.65 | 0.160 | 82.64 |
| 12.5 | 0.018 | 6.03 | 0.021 | 30.52 | 0.085 | 77.18 |
| 23.5 | — | — | 0.020 | 29.89 | 0.060 | 72.83 |

퇴화가 진행될수록 특성이완시간과 특성확산시간은 계속 감소하며 시간이 지남에 따라 퇴화로 인한 특성이완시간의 감소는 특성확산시간보다 크게 나타난다.

시료실린더에 니들을 떨어뜨린 후 회수하여 1분, 3분, 5분, 10분 및 20분 간격으로 회수된 니들을 다시 시료실린더에 떨어뜨려 종말속도를 측정하였다. 측정된 종말속도는 니들의 밀도에 따라 결정되며 측정 시간 간격이 변하여도 종말속도는 거의 일정한 값을 알 수 있다. 이러한 실험결과는 구를 사용하면 점탄성유체의 특성확산시간을 측정할 수 있지만 니들을 사용하면 특성확산시간을 측정할 수 없다고 발표한 Park 등¹⁴⁾의 결과와도 잘 일치한다.

폴리머농도 1.000 wppm 용액에서 측정된 결과보기점도는 Fig. 10과 같다. 또한 재순환 유동시간에 따른 영전단을 점성계수와 무한전단을 점성계수의 변화는 Fig. 11과 같다. 재순환이 계속됨에 따라 퇴화가 이루어지고 퇴화가 진행될수록 점성계수가 감소되며 낮은 전단율에서는 점성계수의 감소율이 크게 나타나지만 높은 전단율에서는 감소율이 크지 않다.

영전단을 점성계수와 무한전단을 점성계수를 이용하여 Powell-Eyring 모델을 사용하여 결정된 특성이완시간을 경과된 시간에 따른 변화는 Fig. 12와 같다.

폴리머농도 700과 1.000 wppm 용액을 오랜 시간동안 재순환 시켰을 때 얻은 특성이완

시간을 이용하여 Reynolds 수 16,000, 25,000, 37,500, 42,000 부근에서 계산된 Weissenberg

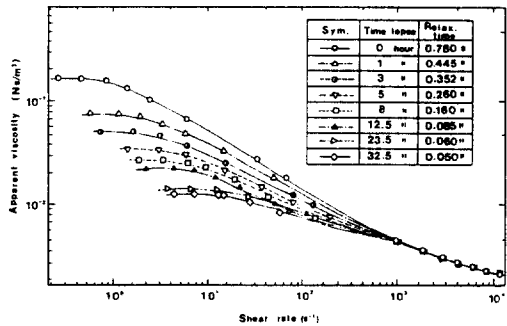


Fig. 10 Degradation effects on steady shear viscosity for 1,000 wppm polymer solutions.

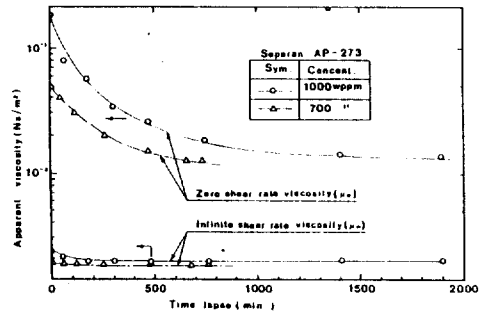


Fig. 11 Apparent viscosity versus the time lapse for recirculating polymer solutions.

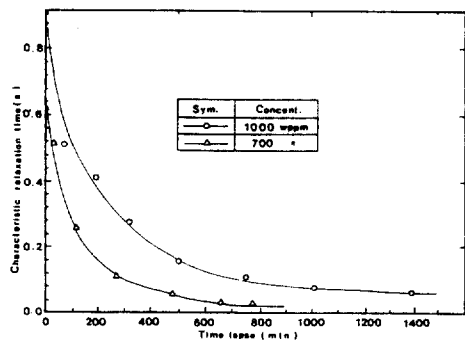


Fig. 12 Characteristic relaxation times of polymer solutions.

수에 따른 마찰계수와 무차원 열전달계수의 변화는 Fig. 13과 같다. 상당히 오랜 시간을 재

순환하여도 마찰계수는 Weissenberg 수에 무관하게 일정함을 알 수 있으며 Prandtl수가 20 정도이고 Reynolds 수가 16,000에서 42,000 범위일 때 마찰계수의 임계 Weissenberg 수는 20이하가 되며 열전달계수는 Weissenberg 수가 감소됨에 따라 계속적으로 증가되고 있음을 알 수 있으며 열전달계수의 임계 Weissenberg 수는 적어도 300 이상이 된다. 이 값은 Kwack 등¹⁵⁾이 발표한 200 내지 250보다 큰 값이며 이 값이 크다는 것은 열전달계수가 퇴화로 인하여 순환과 동시에 증가되고 있음을 나타낸다.

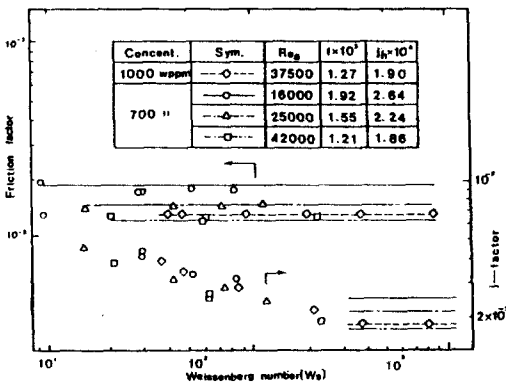


Fig.13 Friction factors and heat transfer j -factors versus Weissenberg numbers for polymer solutions.

4. 결 론

점탄성유체로서 Separan AP-273 300 내지 1,000 wppm 을 물에 용해한 폴리머용액을 이용하여 낙구식점도계와 모세관점도계에서 점성 특성과 특성이완시간 및 특성확산시간을 측정하고 관벽에서 일정한 열플럭스를 발생시켜 시험관의 입구로부터 유체역학적 경계층과 열적 경계층이 동시에 발달하는 경계조건 아래서 유동과 열전달 특성을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원형관속 유동에서 저항감소현상을 나타내는 점탄성유체의 최소마찰점근선은 Reynolds 수 6,000 내지 70,000에서 다음 식과 같

이 나타낼 수 있다.

$$f = 0.086 Re_a^{-0.4}$$

(2) 원형관속 유동에서 최소마찰점근선을 따르는 점탄성유체의 열적입구길이 영역에서 무차원 열전달계수는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

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

(3) 점탄성유체의 원형관속 입구영역 열전달에서 점탄성 Graetz 수(Gz_v)를 정의할 수 있으며 Power law 모델로 나타낼 수 있는 유체의 국소 Nusselt 수는 완전히 발달된 영역에서의 Nusselt 수(Nu_∞)와 점탄성 Graetz 수를 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Nu_x = Nu_\infty + 0.04 Gz_v^{0.353}$$

(4) 낮은 폴리머용액(300 wppm)도 특성이완 시간과 특성확산시간이 존재하며 농도가 증가 할수록 특성이완시간과 특성확산시간은 증가한다.

(5) 퇴화가 진행될수록 특성이완시간과 특성확산시간은 계속하여 감소하게 되며 시간경과에 따라 퇴화로 인한 특성이완시간의 감소는 특성확산시간보다 크게 나타나고 낙구식점도계에서 구를 사용하면 점탄성유체의 특성확산시간을 측정할 수 있으나 니들을 사용하면 특성확산시간을 측정할 수 없다.

참 고 문 헌

1. Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., "Non-Newtonian Fluids in Circular Pipe Flow", Advances in Heat Transfer (Ed. Hartnett, J.P. and Irvine, T.F., Jr.), Vol.15, Academic Press, New York, pp.59-141, 1982.
2. Virk, P.S., Mickley, H.S. and Smith, K.A., "The Ultimate Asymptote and Mean Flow Structure in Toms' Phenomenon" Trans. ASME, J. Applied Mechanics, Vol.37, pp.488-493, 1970.
3. Kwack, E.Y., Cho, Y.I. and Hartnett,

- J.P., "Heat Transfer to Polyacrylamide Solutions in Turbulent Pipe Flow: The Once-Through Mode", AIChE Symposium Series, Vol.77, No.208, pp.123-130, 1981.
4. Toh, K.H. and Ghajar, A.J., "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, 1988.
 5. Mattys, E.F., "An Experimental Study of Convective Heat Transfer, Friction, and Rheology for Non-Newtonian Fluids: Polymer Solutions, Suspensions of Fibers, and Suspensions of Particulates," Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1985.
 6. 엄정섭, 황태성, 유상진, "원형관속을 유동하는 점탄성 유체의 입구 영역 열전달 특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제13권, 제5호, pp.1032~1043, 1989.
 7. 엄정섭, "원관내 유동에서 점탄성 유체의 열전달 증진 방법에 관한 연구", 박사학위논문, 단국대학교 대학원, 1990.
 8. Ibele, W., Thermophysical Properties, Handbook of Heat Transfer (Ed. Rohsenow, W.M. and Hartnett, J.P.), McGraw-Hill, pp.2-1~2-50, 1973.
 9. Kays, W.M. and Crawford, M.E., Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York, 1980.
 10. Petukhov, B.S., "Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties", Advances in Heat Transfer (Ed. Hartnett, J.P. and Irvine, T.F., Jr.), Vol.6, Academic Press, New York, pp.503-564, 1970.
 11. Sleicher, C.A. and Rouse, M.W., "A Convenient Correlation for Heat Transfer to Constant and Variable Property Fluids in Turbulent Pipe Flow", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.18, pp.677-683, 1975.
 12. Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., Non-Newtonian Fluids, Handbook of Heat Transfer Applications (Ed. Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P. and Ganić, E.N.), McGraw-Hill, New York, pp.2-1~2-50, 1986.
 13. 황태성, "난류 상태로 유동하는 점탄성 유체의 열전달 현상에 관한 연구", 박사학위논문, 단국대학교 대학원, 1988.
 14. Park, N.A., Cho, Y.I. and Irvine, T.F., "Measuring Purely Viscous Properties of Viscoelastic Fluids with the Falling Needle Viscometer", J. of Non-Newtonian Fluids Mechanics, To be Published, 1989.
 15. Kwack, E.Y. and Hartnett, J.P., "Empirical Correlations of Turbulent Friction Factors and Heat Transfer Coefficients for Viscoelastic Fluids", Int. Comm. Heat and Mass Transfer, Vol.10, pp.451-461, 1983.