

넓은 環狀間隙을 가진 同心圓筒속의 Couette 흐름에서
 高分子收容液의 流動現象

A Flow phenomenon of Aqueous Polymer Solution in Couette Flow of Concentric Cylinder with Wide Circular gap

權 赫 七*, 李 盛 魯**, 富田侑嗣***, 鄭 鎮 度****
 H. C. Kwon, S. N. Lee, Yuji Tomita, J. D. Jung

ABSTRACT

This report describes the experimental research on the flow phenomena of the aqueous polymer solution within the Couette flow of the concentric, cylinders type with a wide circular gap. We have investigated the phenomena of the fluid flow through torque measuring in the system that the inner cylinder is stationary and the outer one is rotating. Geometrical parameters of the system are the gap ratio of $t/R_o=0.2$ and Aspect ratio of $\ell/t=100$. The torque increases considerably in about 420~480 RPM, So, it is considered a turbulent transition boundary. In that boundary, the higher polymer concentration is, the lower torque value is and the higher transition Reynolds number is. In each of the polymer concentration, the unstable boundary of torque, that is, idiosyncrasies of torque is observed around 220~280RPM. and the boundary is looked upon as a resonant vibration which is caused by the inner cylinder and torsional vibration of torque sensor.

주요기술용어 : Couette Flow(쿠에트 유동), Aspect Ratio(외판비), The Gap Ratio(틈비), Polymer concentration(고분자 농도), Turbulent Transition(난류전이), Resonant Vibration(공진)

기 호 설 명

1. 서 론

R_i, R_o : 내외원통의 반경(m)
 $\delta(t)$: $R_o - R_i$, 틈(m)
 τ : 점성전단응력(kgfd/cm²)
 U : 외통의 접선속도(m/s)
 ℓ : 내외원통의 길이(m)
 ρ : 밀도(kg · s²/m⁴)

중화학공업이 크게 발전하고 있는 오늘날 점탄성적 성질을 갖는 물질의 사용이 점차 증가하고 있으며, 그 유동현상을 다루는 고분자 유체공학에 대한 관심이 제고되고 있다. 고분자 유체(Polymer)의 유동현상을 다루기 위해서는 유체의 응력과 변형속도와의 관계를 나타내는

* 정회원, 부산전문대
 ** 정회원, 충남대학교
 *** 구주공업대
 **** 한전기술연구원

구성방정식을 세우고, 이에 알맞은 경계조건을 설정한 후, 이 구성방정식과 운동 방정식과의 해를 구하여야 한다. 점탄성유체의 구성방정식은 지금까지 기초과학분야로서 수많은 발표되어 왔고 지금도 많이 발표되고 있으며 그 중에서 고분자 유체공학의 한 분야로서 회전하는 두 원통사이의 유체유동, 즉, 동심회전원통속의 쿠에트(Couette) 유동에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.¹⁾ 이러한 유체유동현상의 실용적인 면을 관찰해 볼 때, 베어링의 유체마찰, 터보기계, 축류의 정체부분과 회전부분사이의 흐름, 섬유산업, 박판성형 및 필선의 피악형성, 유리산업들에 응용되며²⁾, 특히 신소재 개발에 널리 응용되고 있다. 또한 혈액, 단백질, 점토, 인쇄용 페인트 등과 같은 콜로이드 물질 및 고무, 고분자 용액등의 이용이 급증함에 따라 이들과 관련된 연속체적 변형에 관한 역학적 거동의 해명이 필요하게 되었다.³⁴⁾ 동심원통속의 쿠에트(Couette) 유동은 29세기말 점성용력의 규명을 위하여 연구가 시작된 이래 1923년 테일러(Taylor)의 연구⁵⁾를 비롯하여 내통이 회전하는 경우⁶⁾와 외통이 회전하는 경우⁷⁾의 테일러 와동(Taylor Vortex)과 흐름 특성과의 관계가 발표되었다.

먼저 내통만이 회전하는 경우, Davey⁸⁾는 내통의 회전속도가 증가함에 따라 제2의 임계치가 존재하고 이 값을 넘으면 테일러 와동(Taylor Vortex)은 불안정으로 되고 원주방향으로 진행하는 파동을 동반하는 파동 테일러 와동(Wave Taylor Vortex)로 됨을 보고 한 바 있다. 파동 테일러 와동(Wave Taylor Vortex)는 알루미늄 분말법에 의한 가시화로 Coles⁹⁾등에 의해서 확인 연구되었다.

또한 외통만이 회전하는 경우는 흐름은 안정하고 이론적으로는 회전수를 증가시켜도 난류로 천이하지 않는 특징을 갖는다. 그러나 Taylor¹⁰⁾가 실험적으로 연구한 결과 이때의 임계 레이놀즈수(Critical Reynolds Number)가 현저하게 높아지는 것을 지적하였고, 그 점에서 와선난류(Spiral Turbulence)가 발생한다고 발표하였으며, 山田豊⁷⁾, Andereck¹¹⁾는 천이레이놀즈수(Turbulent Transition Reynolds Number)는 현저한 자기이

력(Hysteresis)성을 가지고 있음을 보고하였다.

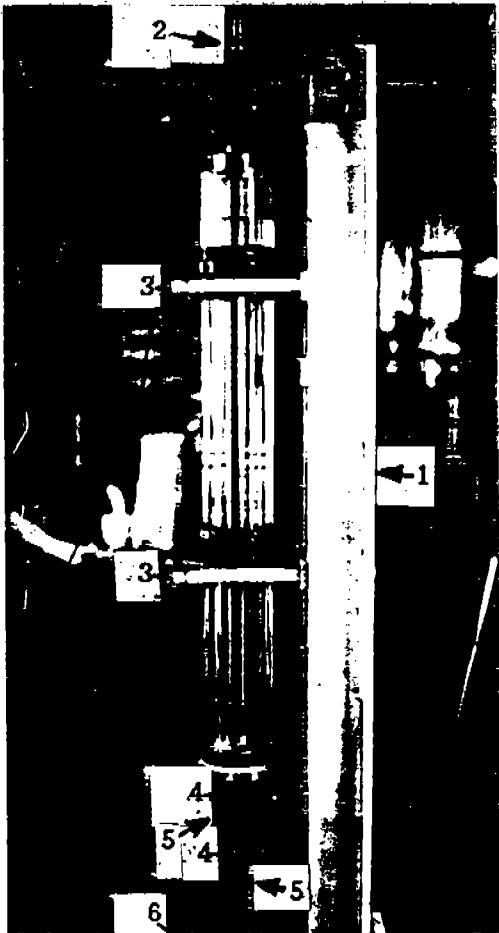
외통회전형은 제작 및 측정상의 어려움 있으나 본 연구에서는 스토머(Stormer)점도계의 원리를 이용하여 외관비(aspect ration, $\lambda = \ell/t$, 두 실린더의 간극 t 와 작동유체의 높이 ℓ 의 비)를 100으로, 틸비(gap ratio, $\Gamma = t/R_c$)를 0.2로 한 외통회전 내통정지형의 실험장치를 제작하고 그 사이에 비뉴턴 유체로서 폴리에틸렌옥시드(Polyethylene Oxide)수용액을 넣고 외통회전속도에 따른 고분자유체(Polymer)의 유동현상을, 토크변화를 측정하여 조사하였다. 데이터의 유효성과 무효성을 판단하기 위하여 평균값과 중앙값을 나타내고 유효한 것만 취하여 폴리머의 농도에 따른 난류천이 효과를 조사하여 유체의 유동특성을 규명하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치는 내통은 정지하고 외통이 회전하는 동심원통으로 하였으며, 실험장치의 사진은 Fig.1과 같다. 내통의 외경은 80 mm이고, 외통의 내경은 100mm인 아크릴 레진 파이프(Arcylic resin pipe)이고 두께는 10mm이다. 외통하부는 알루미늄제인 회전 테이블을 커플링으로서 유도전동기와 직결하고 인버터(Inverter)로 회전속도를 제어하였다. 외통을 회전 테이블에 부착할 때는 중심에서의 편심이 0.1 mm이하로 되도록 하였으며, 외통과 내통사이의 20mm의 틸(Gap)에 시험유체를 채우고 외통을 일정회전속도로 회전시켜 점성에 의해서 발생하는 점성토크값을 내통의 중심축에 토크센서를 연결하여 측정하였다. 실험장치 상부의 토크 측정장치는 Fig.2와 같으며, 미소 토크미터의 축에 내통을 커플링으로 연결하였다.

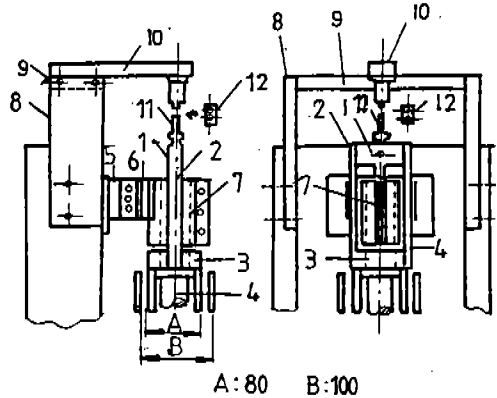
회전속도는 디지털 회전계로 측정하였으며, 외통의 회전속도는 40rpm~70rpm까지 일정간격으로 인버터(Inverter)로 회전속도를 변화시켰다. 실험에 사용한 뉴턴유체로서는 증류수를 사용하였고, 비 뉴턴 유체로서는 점탄성 유체의 성질을 갖는¹²⁾ 폴리에틸렌옥시드(Polyethy-



1) System body. 2) Torque Sensor.
3) Cylinder Stopper. 4) Pillow block.
5) Coupling. 6) Electric Motor.

Fig.1 View of Experimental System.

lene Oxide)용액을 사용하였다. 폴리에틸렌옥시드(Polyethylene Oxide)의 용해액은 증류수 20ℓ에 안정제(상품명 : Sandex)50 wppm(1.00g)을 먼저 넣고 다음에 폴리에틸렌옥시드(Polyethylene Oxide)분말을 수면에 고르게 뿌리고 일정 시간 방치한 후 막대로 저어서 미용해 덩어리가 생기지 않도록 하였다. 수용액의 농도는 중량 농도이고 물, 1wppm, 3wppm, 5wppm의 용액을 만들었다. 폴리에틸렌옥시드(Polyethelene Oxide)용액은 전자 저울로 계측하고 각각 20 Kg의 용액을 만들었다. 실험에서 토크(Torque)



A: 80 B: 100
1), 2) Inner cylinder stay parts.
3) Inner cylinder upper cover.
4) Inner cylinder stay shaft.
5), 6), 7) Shaft stay parts.
8), 9), 10) Sensor stopper parts.
11) Inner cylinder upper stay pin.
12) Coupling.

Fig.2 Experimental system upper parts specification diagram.

를 측정하여 데이터 처리장치에 입력하고, 그 측정된 데이터를 중심으로 해서 평균치와 중앙치를 나타내어 유효한 것만 골라서 데이터 처리장치에 기억시켰다.

2.2 실험방법

실험은 동심원통사이의 유체가 회전속도의 변화에 따른 유동형태의 변화를 분석하기 위한 것으로 단면의 영향을 무시하고, 유체의 점도는 온도에 민감하므로 실험중의 유체의 온도를 일정하게 유지하면서 실험을 하였다.

실험은 다음의 순서로 하였다.

실험용액을 실험 25시간전에 만들어 완전히 용해시킨다음 그 용액을 장치에 넣어서 초기 온도를 측정한 후 설정된 회전수로서 외통을 회전시킨다. 이 때 각각 설정된 회전속도에서 토크와 온도를 측정하고 측정된 자료를 기준으로 평균치와 중앙치를 나타내고 유효한 데이터를 선정, 레이놀즈(Reynolds)수 $\tau/\rho U^2$ 그래프 상에 옮겨서, 데이터 처리장치에 기록하여 유동 특성을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig.3은 뉴턴(Newton)유체에 관한 천이 레이놀즈(Turbulent Transition Reynolds)수를 테일러(Taylor)¹⁰의 이론과 비교한 것이다. 여기서 세로축은 레이놀즈(Reynolds)수이고, 가로축은 장치형상에 의한 원통 간극비(Circular gap ratio)이다.

쿠에트(Couette)의 실험 기구는 최초로 점성 측정용을 위하여 설계되었으나, 그는 난류를 발생하는 속도인 임계속도(Critical Velocity)를 측정하였다.¹⁰⁾

외통회전의 경우 쿠에트(Couette) 유동실험에 있어서 장치의한계는 실선부분인 $-1.77 < \log(t/R_o) < -0.6$ 의 구간이며, $\log(t/R_o)$ 의 값이 -1.3 까지는 장치형상에 따라서 임계레이놀즈(Reynolds)값이 급격한 변화를 보이며, 그 보다 낮은 값에서는 완만한 변화를 보였다. 그래프상의 미세한 수직실선은 내통 외통의 형상변화에 따라 변할 수 있는 상태의 범위를 표시하기 위하여 연결하였다. 본 실험에서는 간극을 $t=R_o-R_i$ 라고 하고, 이것에 이용한 장치는 $R_i=40, R_o=50$ 이므로

$$\log\left(\frac{t}{R_o}\right) = -0.7$$

여기에 해당하는 점이 외통회전의 경우 F점이며 천이 레이놀즈(Turbulent Transition Reynolds)수를 Fig.3에서 구하면 레이놀즈(Reynolds)수=20000이며, 이것은 문헌(10)의 실험결과와 일치한다. 본 실험의 경우 층류역에 있어서 회전속도의 증가와 함께 토크값이 이론치보다 높게되는 경향이 확인되었다. 토크값의 측정을 위해서 장치상부의 내통 중심축에 부착된 토크 센서에 입력된 유체점성 토크값을 A/D변환하고, 증폭, 데이터 처리장치에 입력되게하는 프로그램을 작성하였다. 여기에 입력된 데이터로서 유체유동현상을 분석하는 프로그램을 만들어 본 실험에 이용하였다.

Fig.4~5는 5wppm의 고분자 용액과 물의 토크

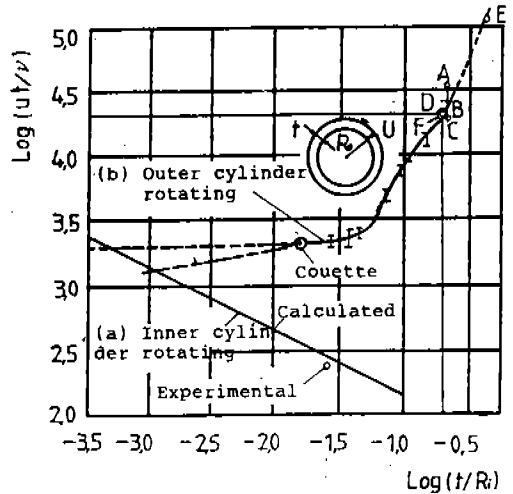


Fig.3 Critical Speeds from reference.

변동의 데이터 채취회수에 따른 변화를 회전수에 따라 나타낸 것이다. 가로축은 데이터를 얻어낸 회수이지만, 입력한 시간으로 볼 수 있고 전폭이 28초간이며, 세로축은 토크의 값(gf·cm)을 나타낸 것이다. 실험은 40rpm 이하에서는 기계가 작동하지 않아 할 수 없어, 40rpm부터 매 10rpm씩 증가시켜가면서 행하였다. 여기에 나타낸 것은 5wppm의 고분자 용액과 물의 실험중 토크변화의 폭을 3등분하여 대표적인 것을 토크값의 비교를 위하여 나타낸 것이다.

이론선에 잘 따르는 안정한 영역과 이상변동(Abnormal Condition Appearance)이 나타나는 영역, 이론선에 벗어나서 도약을 시작하는 영역, 안정하지만 이론선에서 완전히 벗어나서 토크의 구배가 크게 나타나는 영역으로 구분하여 설명할 수 있다.

Fig.4에서 보는 바와 같이 40rpm에 있어서는 토크의 폭이 좁으며 토크의 값도 0에 근접해 있으며, 사람의 눈으로는 그 값을 해석하기 힘들다. 200rpm에서는 폭은 조금 넓어졌고, 0점에서 조금 도약해 있다. 200rpm과 240rpm을 비교해 볼 때 폭의 변화는 크게 나타났으며 240rpm과 280rpm을 비교해 볼 때 280rpm은 아주 폭이 넓어져 있음을 알 수 있다. 280rpm과 420rpm에서 420rpm이 좁으며 420~500rpm에서는 500rpm쪽

이 좁아졌다. 5wppm의 폴리머의 경우 저회전 속도영역인 40rpm에서는 토크의 폭이 좁으며, 그 값도 아주 작은 것을 알 수 있고, 200rpm까지는 그 폭이 좁게 나타나 있으며, 회전속도가 증가하면서 토크값이 약간씩 변동하다가 240 rpm에서는 그 폭이 넓으며, 280rpm에서는 매우 넓어지는 경향을 보였다. 그 이후 좁아져 가다가 420rpm을 넘으면서 다시 넓어지기는 하였으나

280rpm에서와 같은 경향은 나타나지 않았으며 그 현상은 480rpm까지 계속된 500rpm이 넘으면서 좁게 나타났다.

Fig.4와 Fig.5를 비교하여 볼 때, 280rpm까지는 거의 유사하였으나 420rpm이 넘으면서 물의 토크 도약이 5wppm의 것보다 점차 크게 나타났다. 토크의 분포폭이 좁은 것은 그 빛이 안정되어 있는 것을 의미하며, 그 폭이 넓은 것은 불안정한

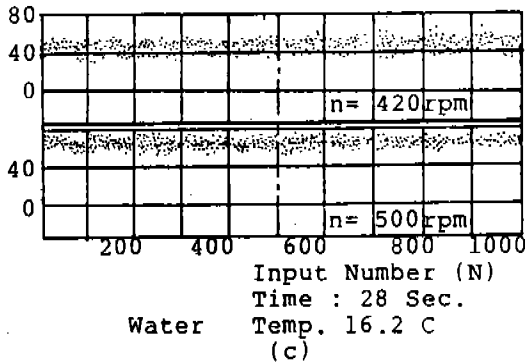
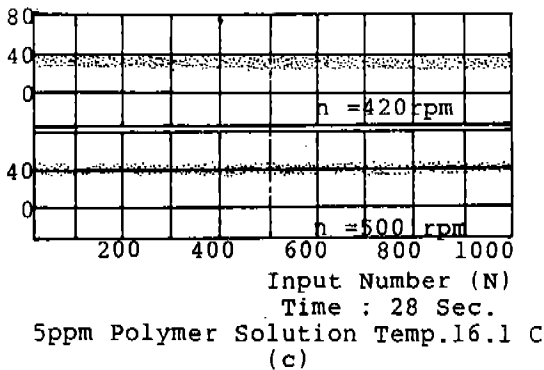
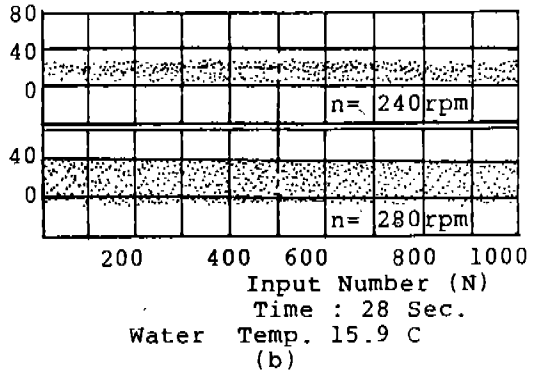
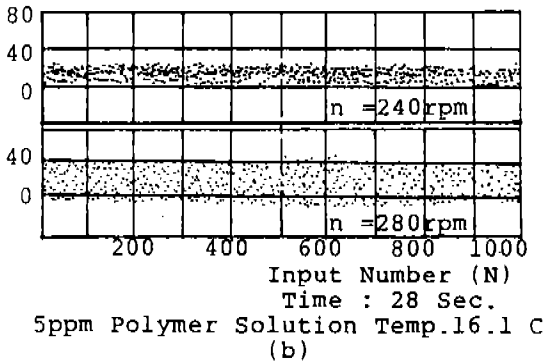
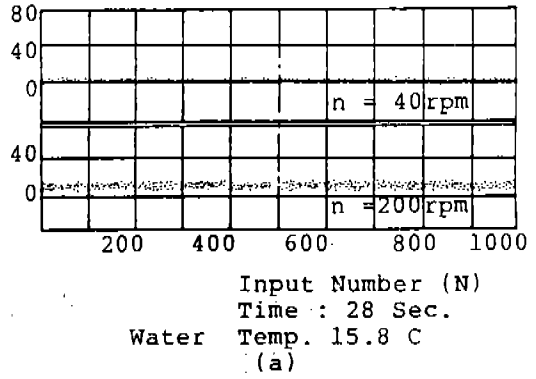
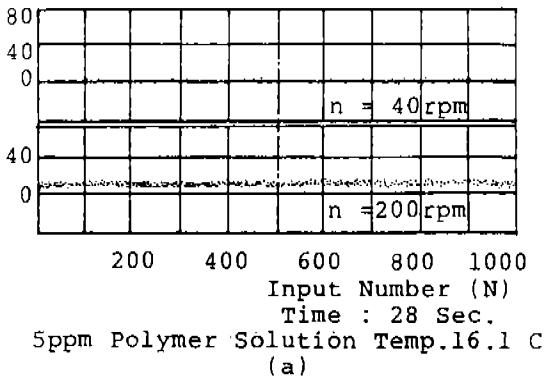


Fig.4 Torque Distribution of Polymer Solution.

Fig.5 Torque Distribution of Water.

값을 의미하는 것이다. 그 값의 변화의 상태로서 유동을 해석하여야 하므로 다음에는 본 데이터로서 평균값과 중앙값을 나타내고 그 분포영역의 변화를 보았다.

Fig. 6, 7은 위의 2용액에 대한 토크 분포영역의 변동을 나타낸 것중 안정(Stability) 영역과 이상변동(Abnormal Condition Appearance)영역, 난류전이(Turbulent Transition)영역과 난류(Turbulent)영역에 있어서의 대표적인 것을 나타낸 것이다. 가로축은 토크값을, 세로축은 빈도수(Frequency)를 나타내었다.

Fig.6에서 보는 바와 같이 (a) 40rpm에 해당되는 것이며, 토크의 변동폭이 좁고 빈도수(Frequency)가 높게 나타났다. 이와같은 영역을 층류(Laminar Flow)영역이라 하고 이와같은 현상은 토크의 크기와 빈도수에는 차이가 있으나 200

rpm까지는 유사하였다. (b)의 경우는 280rpm에 해당되며 토크의 분포폭이 아주 넓게 나타났으며 이때에는 평균값과 중앙값의 차이도 크게 나타났다. 이러한 영역을 이상변동(Abnormal Condition Appearance)영역으로 일시적인 현상이며 거의가 280rpm에서 가장 크게 나타났다. 이 점은 외통과 토크 센서의 비틀림 진동에 의한 공진(Resonant Vibration)영역으로 생각하였다. (c)는 420rpm에 해당하는 것으로 토크의 분포폭이 불규칙하며 이러한 영역을 전이(Turbulent Transition)영역이라 하였다. (d)는 500rpm에 속하는 것으로 산모양을 하고 있으며 난류(Turbulent)영역에 해당된다.

Fig.7은 물에 대한 토크의 분포를 나타낸 것으로 물과 5wppm의 용액을 비교해 볼 때 전이영역과 난류영역에서 물의 쪽이 높게 나타났다.

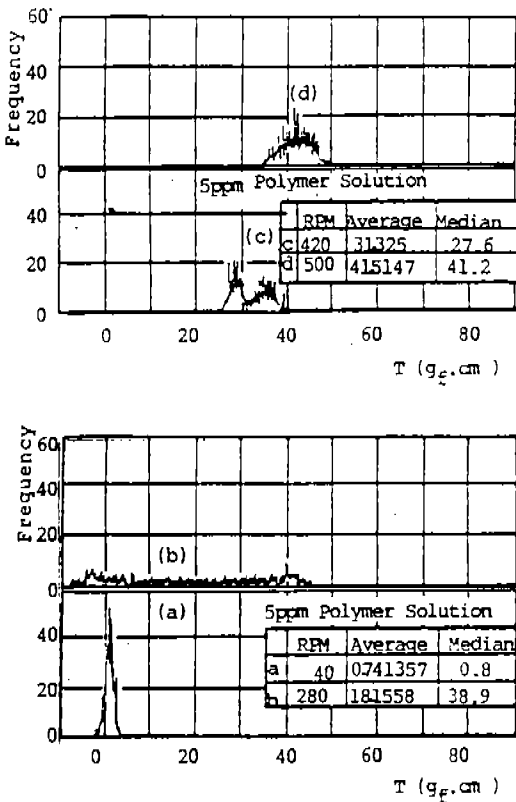


Fig.6 Distribution Diagram of Torque Value in Polymer Solution.

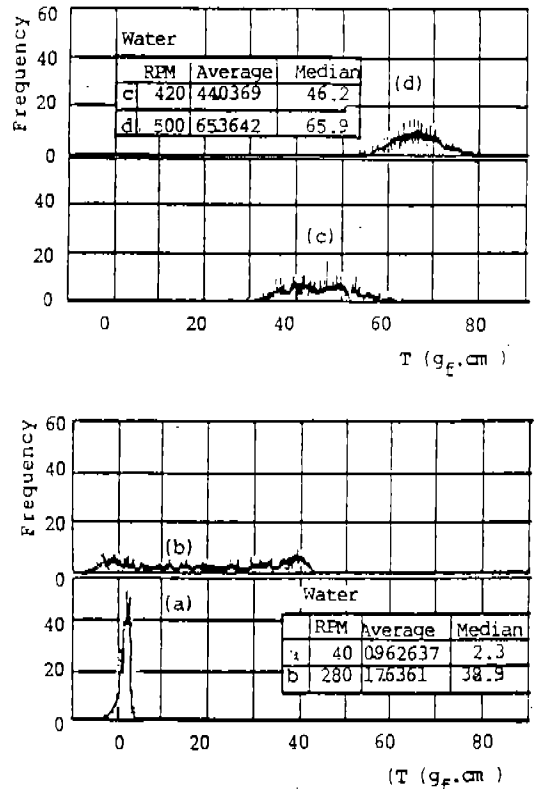


Fig.7 Distribution Diagram of Torque Value in Water.

이 선도에서 보는 바와 같이 물의 경우는 5 wppm의 폴리머 용액에 비하여 토크 변동이 전체적으로 크게 나타났다. 천이영역에서는 토크치의 폭이 넓게 분포되어 있으며, 난류영역으로 되면서 토크치의 폭이 점차 좁아져가는 경향을 나타내었다. (c)는 천이영역이 시작하는 것으로 그 분포는 불규칙한 변화를 보이기도 하였다. (d)는 난류영역으로 5wppm의 경우보다 토크의 분포폭도 넓고 그 값도 크게 나타나지만 안정되어 가는 형태는 동일하였다.

Fig.8은 물과 고분자수용액의 토크와 회전속도와의 관계를 나타낸 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 순수한 물과 1wppm, 5wppm용액에 대하여 실험한 결과, 토크의 도약면에서 볼 때, 각각 조금의 차이는 있으나, 회전속도가 220~280rpm 부근에서 일시적인 토크 도약이 있으며, 420~480rpm부근에서 크게 도약하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 저회전역에서는 이론선에 잘 따르는 상태안 220~280rpm에서 일시적으로 토크가 도약하는 현상은 외통과 토크센서사이의 공진(Resonant Vibration)에 의해서 발생하는 것으로 추정하였다. 420rpm까지는 이론선에 일치되어가고 그 이후에는 이론선에서 완전히 떨어져 회전수 변화에 따라서 토크의 구배가 갑자기 크게 되었다. 따라서 이 부근을 천이영역으로 추정하였다. 천이영역이후는 이론선에 완전히 이탈한 영역을 난류영역이라 한다.

좀 더 천이영역을 구체화 하기 위해서 토크(torque)-회전속도를 무차원화하여 정리한 것이 Fig.9이다. 저회전역에서는 물의 이론직선과 잘 일치하지만 고회전역이 됨에 따라서 이론선에서 떨어져가는 경향이 있으며, 각 농도 공히 어떤 회전역에서 토크값이 급히 증가하고 있으며, 이것은 천이에 의한 것이라고 생각된다. 천이시의 토크의 상승은 고농도로 될수록 작게 되고 레이놀즈(Reynolds)수는 증가되며, 천이후의 토크의 상승율도 고농도로 될수록 작게 되고 있다. 도에서 물은 레이놀즈(Reynolds)수가 $10^{4.31} = 20000$ 부근에서 토크값이 크게 도약하고 있다. 결국 물은 레이놀즈(Reynolds)수=20000부근에서 천이하고 있다고 생각되어진다. 1wppm의 경

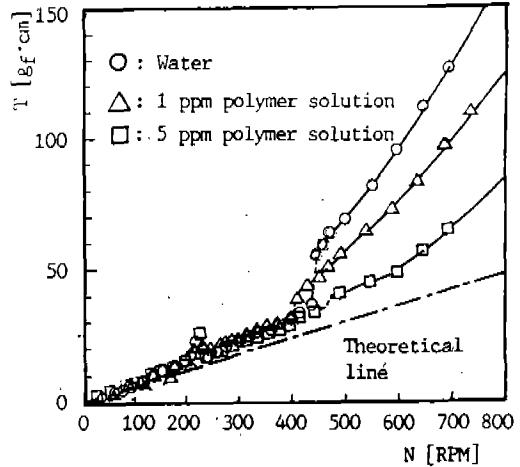


Fig.8 The Relation Between Torque and Out Cylinder Rotating Speed.

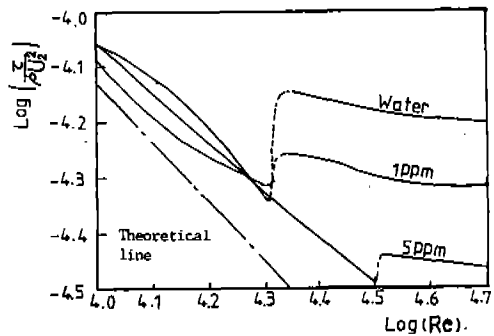


Fig.9 The Relation Between Dimensionless Torque and Reynold's Number

우도 레이놀즈(Reynolds)수=20000부근에서 천이하고 있다고 생각되어 지지만 천이후의 토크값은 물보다 낮게되고 있다. 5wppm의 경우도 같은 경향을 표시하고 천이 레이놀즈(Reynolds)수는 $10^{4.48} - 10^{5.51}$ 결국 30000~32000정도이고, 천이 후의 토크값도 3wppm의 경우보다도 작다. 전체로서 고분자 화합물의 첨가농도의 증가와 함께 천이 레이놀즈(Reynolds)수는 높게되고, 천이후의 토크값은 감소해 가는 경향이 있다. 결국, 첨가농도의 증가는 난류역체효과가 있다고 말할 수 있다.

4. 결 론

넓은 환상간극(Wide Circular Gap)을 가진 동심원통속의 쿠에트(Couette) 흐름에서 미량의 고분자(Polymer)수용액에 대한 유동현상을 실험적으로 구한 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 동심원통속에서 유체의 점성에 의해서 발생하는 토크를 측정하여 유동특성을 실험적으로 규명하는 데이터 처리 프로그램을 작성하였다.
- (2) 실험결과 토크의 도약이 크게 나타나는 천이(Turbulent Transition)영역은 420~480rpm 이었고, 천이상태에서는 폴리머 수용액의 농도가 높아질수록 토크값은 작아지고 레이놀즈수는 증가하는 경향을 보였다.
- (3) 천이영역을 경과한 후의 토크 상승율도 고분자물질의 농도가 높아질수록 토크값은 작게 되고, 천이 레이놀즈수(Turbulent Transition Reynolds Number)는 증가하는 경향을 보였다.
- (4) 회전속도가 증가함에 따른 토크 변동을 이론선과 비교한 결과 220~280rpm 부근에서 특이한 토크 변동이 발생하며 이는 외통과 토크센서의 비틀림진동에 의한 공진(Resonant Vibration)현상으로 지적할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 富田侑嗣, 船律勝也 “クエット流れにおける非ニュートン流體の速度分布” 日本機械學會九州支部 講演會概要 898~2, p.59, 1988.
2. Molton M.Denn “Continuous Drawing of Liquids to Form Fibers” Ann. REv. Fluid Mech., Vol.365, No.87, p.12, 1980.
3. Richard W.Hanks “Couette Viscometry of Casson Fluids” The Society of Rheology(USA), Vol.27, No.1, p1~6, 1983.
4. 富田幸雄著 “Rheology” コロナ社, p.1~28, 1975.
5. G.I.Taylor F.R.S “Distribution of Velocity and Temperature Between Concentric Rotating Cylinders” Proc. Roy. Soc. London A.151, p. 494~512(1935).
6. B.J.Bailey, “Behaviour of the Critical Taylor Number in Dilute Polymer Solutions” Nature, 222, ap., p.26, 1969.
7. 山田 豊, 渡邊 智, “外管が回轉する同心2重管内流れの 摩擦モーメントと損失水頭” 日本機械學會論文集 Vol.38, No.311, p.1773, 1972.
8. Davey, A., “The growth of Taylor Vortices in flow between rotating cylinders” J.Fluid Mech., Vol.14, No.3, p.336, 1962.
9. Coles, D., “Transition in circular couette flow” J.Fluid Mech., Vol.21, No.3, p.385, 1965.
10. G.I.Taylor, F.R.s “Fluid Friction Between Rotating Cylinders. 1-Torque measurements” Proc.R.Soc.London A. 157 p.550~562, 1923.
11. C.David Andereck, S.S Liu and Harry L.Swinney “Flow regimes in a circular Couette System with independently rotating cylinders” J.Fluid Mech. Vol.164, p.155~183, 1986.
12. 富田侑嗣, 上龍具貞 “伸張粘性と同心回轉圓筒間 流れの安定性” 日本機械學會論文集, Vol.44, No.376, p.4557~4562, 1977~12.