同心圓筒속의 Couette Flow에 있어서 非 Newton 流體의 流動特性

A Flow Characteristic of Non-Newtonian Fluid in Couette Flow of Concentric Cylinder

權 赫 七*, 李 盛 魯**, 富田侑嗣***
H.C. Kwon, S. N. Lee, Yuji Tomita

Keyword : Couette flow (쿠에트 유동) Concentric cylinders (동심원통) Laminar region (층류영역) Polymer additives (고분자 첨가제) Turbulent region (난류영역) Turbulent transition (난류천이)

ABSTRACT

The purpose of this study is to experimentally research the effects of polymer additives on turbulent transition of Couette flow between concentric cylinders when outer one is rotating and inner one is at rest ; the diameter ratio being 0.2. Aqueous polymer solution generate the degradation phenomena in machine forming work, but this is not effected in about 10 minute at 5 ppm. aqueous polymer solution testing. The Reynolds number, referred to the gap distance and rotation velocity of the outer cylinder, of turbulent transition is about 20000 for water flow. In the laminer region, the torque value is as same as theoretical one in the region of low Reynolds number, but becomes high with an increase in the Reynolds number. The polymer additives reduce the Reynolds number for turbulent transtition. In the turbulent region, the torqu is remarkably reduced by the polymer additives, soluble polymer take down effect of turbulent transition boundary torque.

1. 序 論

우리들이 取扱하는 여러가지 物質 중에는 複雜한 力學的 擧動을 나타내는 것이 많고, 科學技術의 進步와 그 硏究對象의 擴大에 따라서 점점 이러한 傾向이 增加하고 있다. 特히 新素材開發에 同伴해서 各種 Colloid 物質 및 Rubber, 高分子溶液等 非 Newton 流體로 생각되어지는 많은 物質의 需要와 供給이 擴大되고, 폭넓게 産業界로 浸透해 감에 따라서 그들의 連續體的 變形에 關한 力學的 擧動의 정확한 解明이 要求되고 있다. 流動에 있어서

* 정회원, 부산전문대
** 정회원, 충남대
*** 구주공업대

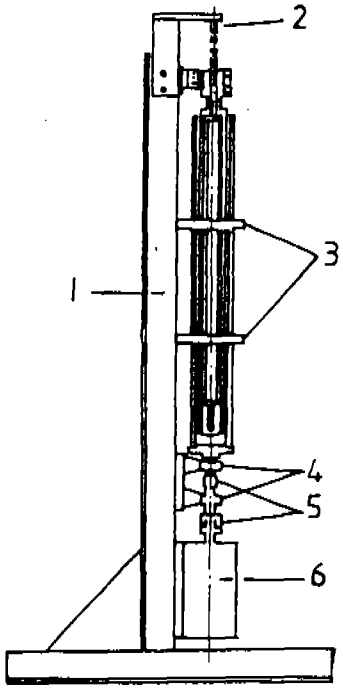
構成方程式, 즉 物質의 應力과 變形의 關係는 速度에 의한 流動形態를 考察하는데 重要한 要素이기 때문에 非 Newton流體의 構成方程式을 밝히는 것은 工業的으로 重要한 問題이므로 매우 活潑히 硏究가 되고 있다. 한편, 多樣한 流動에 있어서 非 Newton流體의 擧動을 밝히는 것은 構成方程式의 檢證이라고 하는 觀點에서도 매우 重要하다. 그런데, 同心狀態에서 回轉하는 2重圓筒間의 流動은 Couette Flow[1-3]로서 알려지고 있지만 實用面에 있어서는 軸受의 流體摩擦等과 關聯해서 重要하다. 여기에 關한 硏究는 理論的인 硏究가 많고, 이들의 大部分은 應用數學 및 物理學 分野의 硏究者에 의해서 行하여져 왔다.

計測方法 및 그 處理方法의 進步에 의해서 工學을 專攻하는 硏究者에 의한 實驗的인 硏究도 增加하고 있다. 이 流動은 內外 어느쪽의 圓筒이 回轉하는가에 의해서 전혀 다르게 된다.[4] 內筒만이 回轉하는 경우, 流動이 不安定하게 되는데 對해서, 外筒만이 回轉하는 경우, 外筒 가까운 쪽의 流動은 內筒 가까운 쪽의 流動보다 速度가 빠르므로, 流動은 安定하게 된다. 더우기, 兩圓筒이 함께 回轉하는 경우, 軸流가 있는 경우 等에서 달라지게 된다. 이들중 內筒만이 回轉하는 경우의 硏究가 大部分이고[5], 外筒만이 回轉하는 경우의 硏究에 關해서는 流動의 安定性에 關한 問題[6], 回轉數의 增加에 의한 流動의 觀察[7], Torque 測定[8], 可視化 觀察[9] 等이 있다. 이들은 주로 水, Newton 流體를 對象으로서 行하여져 온 實情이다. 本 硏究는 水와 非 Newton 流體로서 Polyethylene Oxide 溶液을 使用하고, 內筒靜止 外筒回轉型 Couette Flow의 實驗裝置를 製作해서 各 濃度別로 Torque와 回轉數를 測定하므로서 非 Newton 流體의 流動 現象을 究明하고자 한다.

2. 實驗裝置 및 方法

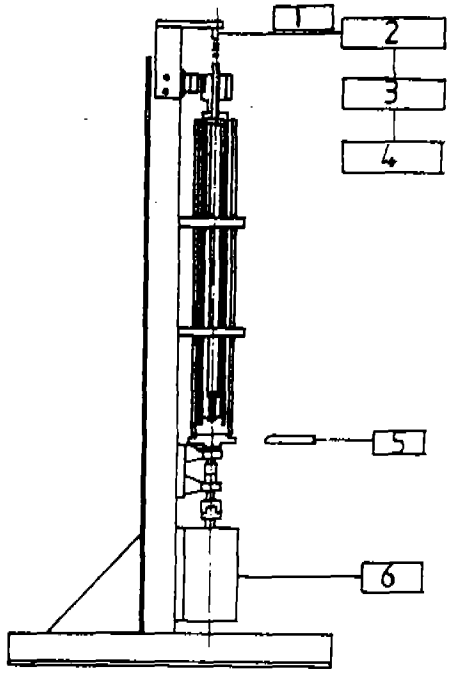
2.1 實驗裝置

本 硏究에 使用한 實驗裝置의 槪略圖는 Fig. 1과 같다. 이 裝置를 利用해서 外筒을 一定回轉數로서 回轉시키고, 粘性에 의해서 發生하는 Torque(以下 T)를 測定한다. T는 動的 Strain 測定裝置가 付着되어 있는 Micro torque Sensor로서 電壓으로 變換되고 AD 變換 Board를 거쳐서 컴퓨터에 연결되고, (g_f. cm) 單位로 變換되어, 表示 記憶된다. 이 裝置의 系統圖는 Fig. 2와 같다. 內筒은 外徑 $d_2 = 80$ mm, 外筒은 內徑 $d_1 = 100$ mm, 길이 約 1 m의 Acrylic resin pipe이고, 어느곳도 두께 10 mm이다. 間隔比 $(r_1 - r_2)/r_1$는 0.2이다. 外筒은 下部의 Aluminum製品인 Turntable을 Coupling으로서 Induction Motor와 直結하고 Inverter에 의해서 制御해가면서 回轉시켰다. 內筒은 上部에 Stay를 넣어서 鐵製의 Frame 外廓에 固定시켰다. 外筒을 Turn Table에 固定할 때는 Dial Gauge에 의해서 中心을 내어서, 檢査面에 있어서의 偏心이 0.1 mm 以下로 되도록 했다. 또 內筒下部는 斷面의 影響을 적게 하기 위하여 Tapper를 주었다. 試驗流體는 內筒, 外筒間의 10 mm의 Gap사이에 自由表面을 만들지 않도록 유체를 채웠다. 回轉數는 Digital Hand Tachometer에 의해서 測定했다. 外筒의 回轉速度는 40 rpm~500 rpm까지 一定間隔으로 Inverter로서 制御해 가면서 變化시켰다. 本 實驗에 利用한 試驗 流體는 靜水器에 의해서 濾過된 水 및 polyethylen Oxide 溶液이다. 이 溶液은 粘性 以外에 彈性의 性質을 가지는 粘彈性流體이다. Polyethylen Oxide 溶液의 溶解法에는 安定劑(Sandex) 50ppm을 20 ℓ의 水에 먼저 넣고 다음에 Polyethylen Oxide 粉末을 水面에 霧狀으로 添加했다. 그 후 一定時間 放置한 후 試驗했다. 注意할 點은 未溶解 덩어리가 생기지 않도록 해야 하는 것이다. 水溶液의 濃度는 重量濃度이고, 水, 1 ppm, 3 ppm, 5 ppm의 溶液을 만들었다. 그때 Polyethylen Oxide 粉末은 直示 電子저울로서 計測하고, 水는 比重量 1 gf/cm³로 해서 各各 합쳐서 20 kg의 溶液을 얻었다. 本 實驗은 위의 實驗裝



1. System body
2. Torque sensor
3. Out cylinder chattering stopper
4. Pillow block
5. Coupling
6. Electric motor

Fig. 1 Experimental system outline diagram



1. Micro torque sensor
2. Dynamic strain measuring device
3. A/D transfer board
4. Personal computor
5. Tachometer
6. Inverter

Fig. 2 Experimental system diagram

罠를 利用해서 實驗溶液을 채워서 外筒을 一定回轉數로서 回轉시키고 T를 測定했다. 粘彈性 流體에서 보여지는 Toms 效果[10]는 流體摩擦抵抗의 制御의 可能性을 나타내기 때문에, 工學的으로 有用하다고 생각되어진다. 이 效果의 實用化를 위해서는 添加劑의 劣化, 壽命에 對한 信賴性이 問題로 된다. 劣化에는 機械的 劣化와 化學的 劣化가 있다. 化學的 劣化는 化學變化에 의한 溶液의 劣化現象이고, 機械的 劣化는 應力에 의한 劣化現象으로서 說明될 수 있다. 劣化에 對한 具體的인 硏究는 다음에 論하기로 하고, 本 論文에서는 그 槪要에 對해서만 論하기로 한다.

2.2 實驗方法

本 實驗의 目的은 同心圓筒사이의 流體가 어느정도의 回轉數에서 遷移하는가를 調査하고 流動現象을 觀察하는 것으로 1) 斷面의 影響을 無視하고, 2) 流體의 粘度는 溫度에 敏感하므로, 實驗中에 流體의 溫度를 一定하게 維持시키면서 實驗을 行하였다.

實驗의 順序는 다음과 같다.

(1) 實驗溶液을 24時間 前에 만들고 完全히 溶解시킨다.

(2) Polyethylen Oxide 溶液을 裝置에 넣어서 溫度를 計測한다.

(3) 設定된 回轉數로서 外筒을 回轉시킨다.
(4) 各各 設定된 回轉數에서 T를 測定하고, Computer에 입력한다.
(5) 實驗終了時의 液體溫度를 測定한다.
(6) Data를 整理한다.

3. 實驗結果 및 考察

Polymer는 成形加工時 流體流動에 의한 機械的 劣化現象이 發生하며[10], 그 現象이 發生하지 않는 範圍를 찾는 것은 重要하므로 本 實驗에 앞서서 劣化現象을 調査[9]하였다. 一定 濃度 5ppm의 溶液으로서, 回轉數를 748 rpm으로 固定하여 連續回轉시키면서 8時間동안 계속하였으며, 2時間 동안은 每10分마다, 그 以後는 每 30分마다 T를 測定하였으며, 그 T 測定의 結果를 나타낸 것이 Fig.3 이다. Fig.3에서 보면, 實驗의 초기부터 約 2時間 사이에서는 溶液을 만든 즉시 實驗한 것이 10〔gr·cm〕 程度 낮게 나타났다. 또 1時間까지는 變化가 크고, 3時間 以後는 거의 一定하게 되었다. 10分間의 變化는 緩慢하고, 10分 以後 2時間까지는 傾斜가 급한 것으로 보아서 10分 以後는 劣化의 影響이 있다고 생각되어지므로 1回의 實驗時間은 10分 以內에서 行하였다.

다음에 T測定의 結果를 Fig.4에 나타낸다. 各 濃度마다 T를 回轉數에 對해서 나타내고 있다. 圖中의 直線은 물에 관한 理論的 線圖이다. 이 圖에서 低回轉域에서는 물의 理論線과 잘 一致하지만, 高回轉으로 되는데 따라서 점차로 理論線에서 떨어져 가는 傾向이 있다고 말할 수 있다. 各 濃度마다 똑같이, 어느 回轉數에서 T값이 急激히 增加하고 있지만, 이것은 層流에서 亂流로의 遷移에 의한 것이라고 생각되어진다. 또 遷移時의 T의 上昇은 高濃度로 될수록 적게 되고, 遷移後의 T의 上昇率도 高濃度로 될수록 적게 되고 있다. 그런데, 이와 같은 傾向은 얻어졌지만, 各 圖는 各種의 溫度에 의한 것이고, 一般的 比較를 위해서는 便利하지 않다. 그래서 實驗에

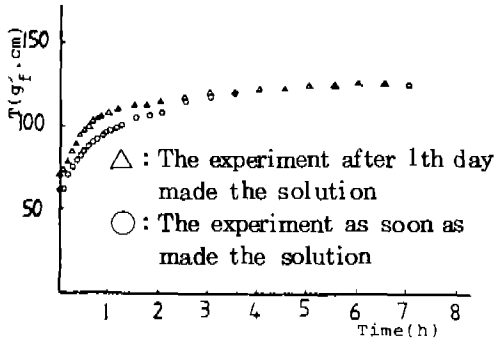


Fig. 3 The deterioration phenomena specification of polymer solution

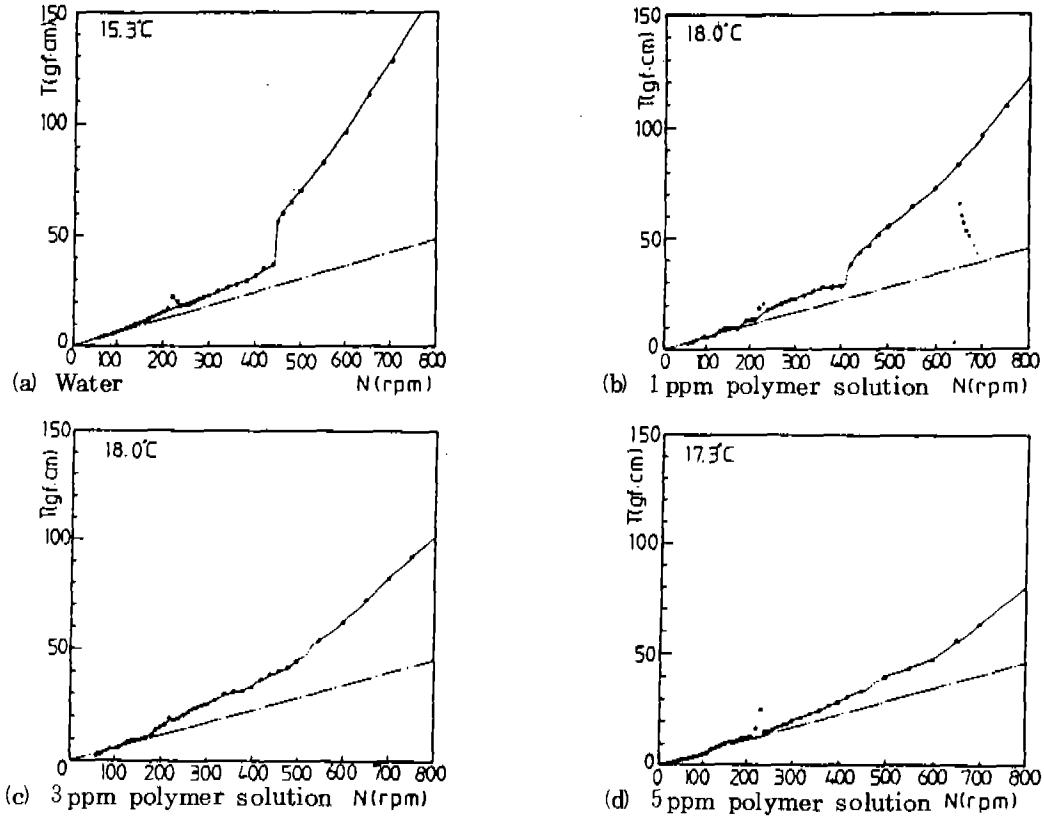
서 얻어진 回轉數 T의 關係를 無次元化 해서 본다. 回轉數는 Re數, T (gf.cm)는 $\tau/\rho\, U^2$로 無次元化 시켰다. 計算할 때에 必要한 動粘度, 密度等의 物性値는 序論에서 나타낸 바와 같이 高分子水溶液의 경우도 그 溫度에 있어서 물의 값을 利用하기로 한다. 따라서 計算式은 물, 高分子水溶液 똑같이 다음과 같이 된다.

$$Re = \frac{r_1(r_1-r_2)\omega_1}{\nu} = \frac{\pi r_1(r_1-r_2)N}{30\nu}$$

$$\frac{\tau}{\rho U^2} = \frac{1}{\rho(r_1\omega_1)^2} \times \frac{9.8\times10^{-5}\times T}{2\pi r_2^2 h}$$

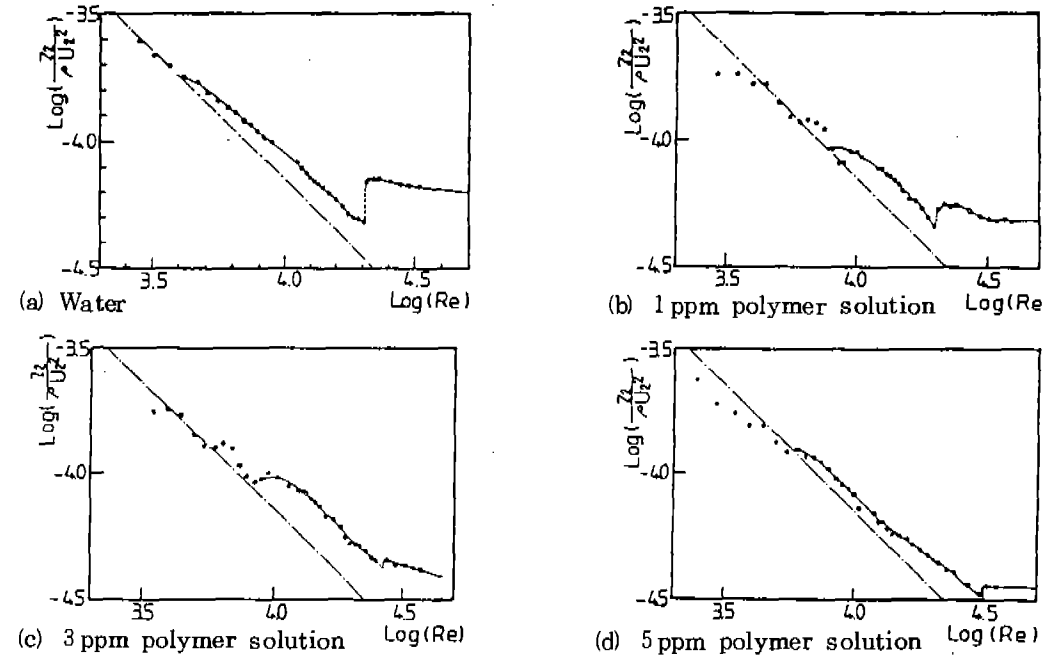
$$= \frac{0.0882\,T}{2\pi^3 \rho h r_1^2 r_2^2 N}$$

以上의 計算에 의해서 無次元化한 圖가 Fig. 5이다. Fig.5에 의하면, 물은 Re數가 20000附近에서 無次元 T의 값이 크게 增加하고 있다. 결국, 물은 Re = 20000 附近에서 遷移하고 있다고 생각되어진다. 이들은 Taylor[7]가 實驗한 것과 거의 一致한다. 1ppm의 경우도 水와 같이 Re = 20000 附近에서 遷移하고 있다고 생각되어지지만, 遷移後의 無次元化 T는 물과 比較해서 낮게 되어 있는 것이 特徵이다. 3ppm의 경우의 遷移 Re數는 25000~27000附近이라고 생각되어지고, 물의 경우보다 크다. 또 遷移後의 無次元 T의 上昇은 작



(a) Water (b) 1 ppm polymer solution (c) 3 ppm polymer solution (d) 5 ppm polymer solution

Fig. 4 Torque ····· rpm



(a) Water (b) 1 ppm polymer solution (c) 3 ppm polymer solution (d) 5 ppm polymer solution

Fig. 5 Dimensionless graph

고, 그 값도 1 ppm의 경우보다 낮다. 더우기 5ppm의 경우도 같은 모양의 傾向을 나타내고, 遷移 Re 數는 30000～32000 程度이고, 遷移後의 無次元 T 값도 작다. 全體로서 高分子化合物의 添加濃度의 增加와 함께 遷移 Re 數는 높게되고, 遷移後의 T의 上昇은 減少해 가는 傾向이 있다. 결국, 高分子化合物의 添加濃度는 亂流의 抑制效果가 있다고 말할 수 있다. 또, 層流域에 있어서 回轉數의 增加와 함께 理論線보다 T 값이 높게 되는 傾向이 있었지만, Taylor의 實驗에서도 間隔比가 클수록 理論線보다 높게되는 傾向이 認定되었다.

4. 結 論

間隔比 0.2의 外筒回轉 內筒靜止型 Couette Flow의 水와 微量의 高分子를 添加한 경우의 亂流遷移와 遷移現象에 關하여 實驗을 行한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 高分子 水溶液은 機械成形時 劣化現象이 發生하며, 5 ppm의 polyethelen Oxide溶液으로 試驗한 結果 10分 以內에서는 거의 影響을 받지 않는다.

2) 稀薄高分子水溶液은 亂流로의 遷移를 抑制하는 效果가 있다.

3) 稀薄高分子 水溶液은 亂流域의 Torque를 低減시키는 效果가 있다.

4) 水의 臨界 Re數는 約 20000이다.

5) 層流域에 있어서, 低 Re 數에서는 Torque 값은 理論値와 거의같고, 高 Re 數로 되면 Torque 값은 理論値를 上廻한다.

參 考 文 獻

1. William R. Schowalter "Mechanics of Non-Newtonian Fluids" Printed in Great Britain by William Clowes & Sons Limited London, 85 (1978)
2. 富田幸雄著 "Rheology" コロナ社 1－28
3. 富田侑嗣 "Couette flow における非 Newton 流體の速度分布" 日機學會 九州支部 講演會 概要 898 [2] (1988)
4. 山田 豊, 令尾茂樹 "回轉2重圓筒間の流れと流體摩擦" 日機論(B)52[484] 1986－12 3827－2834
5. E.Bilgen R.Boulos "Functional Dependence of Torque Coefficienct of Coaxial Cylinders on Gap Width And Reynolders Numbers" An ASME Publication Peper No 72－WA.Fe－1 (ASME Journal of Basic Engineering) 1－5 (1973. 1. 2)
6. Randall Tagg 外 3名 "Non-linear standing waves in Couette-Taylor Flow" Physical Review Part a(USA) 39 [7] 3734－3737 (1989)
7. G.I.Taylor, F.R.S "Fluid Friction Between Rotating Cylinders I－Torque Measurements, II － Distribution of Velocity Between Concentric Cylinders When Outer One is Rotating and Inner One is at Rest" Prog. Roy. Soc. London A 157 (550－562) (575)
8. C.Divid. Andereck. 外 2名 "Flow regimes in a Circular Couette System with independently rotating cylinders" J.Fluid Mech. 164, 155－183 (1986)
9. Willam R.Sears, Milton Van Dyke, "Annual Review of Fluid Mechanics" Annual Reviews Ins, Vol.1 367－383
10. 富田侑嗣 "稀薄 高分子 溶液の管內. 第2報, 速度分布と管摩擦係數" 日機論 第2報 35 (279) 1969－1 2251－58