

粘彈性流體의 法線應力 測定에 關한 研究

金 春 植

A Study on the Measurement of the Normal Stress of the Viscoelastic Fluids

KIM Chun - Sik

目 次

- | | |
|------------------|---------------|
| I. 序 論 | (2) 實驗裝置 |
| II. 測定原理 | IV. 實驗方法 및 考察 |
| III. 使用溶液 및 實驗裝置 | V. 結 論 |
| (1) 使用溶液 | 參 考 文 獻 |

Abstract

Viscoelastic fluids have many properties that can not be observed in Newtonian fluids. Among these properties, the non-Newtonian viscosity, the normal stress effect and the measurement of the static pressure are particularly important from an engineering view point.

The normal stress of the viscoelastic fluids have been measured mainly by a Rheogoniometer. As there lies a measuring limitation in case of Rheogoniometer, however, it is nearly impossible to measure the normal stresses in case that the normal stress differences in dilute high polymer solutions are very small or the shear rates of the solutions are considerably high.

In this paper, the normal stresses that have been hard to measure by means of a Rheogoniometer, are measured using a new device which is designed to measure by means of the thrust of cylindrical jet formed at the exit of a horizontal capillary tubes.

In the measurement of the normal stress by the new device, the results are in good coincidence with a little dense polymer solutions, except in case of dilute polymer solutions of ppm order.

I. 序 論

從來, 流體力學에서取扱되어 온 流体는 물, 空氣, 기름 등과 같이 所謂 Newton 流体가 大部分이었으나, 最近 非 Newton 流体라 불리는 여러 高分子溶液의 흐름을取扱하는 일이 많아졌다. 이와 같은 高分子溶液의 흐름은 粘性的 性質 以外에 彈性的 性質을 갖는 粘彈性 流体로서 Newton 流体에서는 볼 수 없는 여러가지 特異한 現象을 나타내고 있다.¹⁾ 즉 法線應力效果(또는 Weissenberg 效果), 應力緩和, Barus 效果(또는 Merrington 效果) 및 不安定現象, 그리고 稀薄 高分子溶液이 亂流狀態로 管内를 흐를 때의 管摩擦損失이 同一 流速으로 溶媒를 흐르게 할 때의 管摩擦損失보다도 顯著히 減少되는 Toms 效果 等이다. 그러나 이러한 異常現象이 알려진 지가 얼마 되지 않았으며, 그 溶液의 物質定數 測定이 困難하고 또한 高分子가 化學的, 機械的으로 劣化되기 쉬우므로, 實驗的으로나 理論的으로 統一된 見解가 얻어지지 못하고 있는 狀態이다.

粘彈性 流体의 法線應力差는 流体의 性質을 아는데 重要하며, 주로 Rheogoniometer나 流動 複屈折裝置를 使用하여 測定되고 있다.²⁾ 그러나 이러한 裝置들에는 測定限界가 있으므로, 剪斷速度가 상당히 큰 境遇이거나 稀薄 高分子溶液 등과 같이 法線應力差가 적은 境遇에는 測定하기가 大端히 困難하다. 또한 稀薄 高分子溶液의 剪斷速度가 比較的 큰 範圍에서는 Jet의 推力를 利用해서 法線應力差를 測定하는 方法이 採用되고 있다.^{3), 4)} 그러나 이 方法에 있어서는 稀薄 高分子溶液의 法線應力差가 적을 뿐만 아니라 Jet는 細管으로부터 流出된 후에 더욱 不安定하게 되므로 이 方法에 依해서 求한 法線應力差의 Data는 一樣치 못하고 亂在하는 結果가 된다. 더구나 極히 稀薄한 溶液의 法線應力差는 現在까지는 거의 測定되지 못하고 있다.

本 研究에서는 從來 測定이 大端히 困難하였던 比較的 稀薄한 高分子溶液의 法線應力差를 細管으로부터 流出되는 Jet가 細管에 미치는 反力를 利用해서 測定할 수 있는 實驗方法 및 實驗裝置를 開發해서, 여러 溶液에 對하여 測定하였다.⁵⁾

II. 測定原理

그림 1과 같이 Reservoir에 取付된 細管(半徑 R)으로부터 粘彈性 流体가 Jet로 噴出되는 境遇를 考慮한다.

圓筒座標系(r, θ, z)를 그림 1에서와 같이 定하고 點線과 같은 檢査面을 取해서 z 方向의 運動量의 平衡을 考慮한다. 그때의 流出 Jet는 管出口에서 完全히 發達

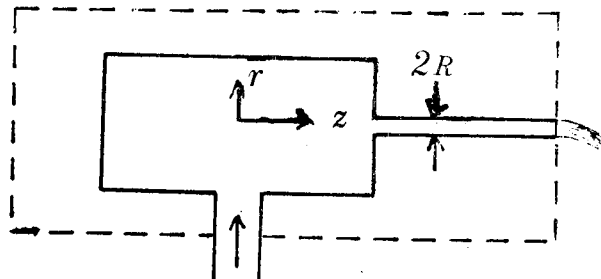


그림 1

된 速度分布의 形態로 된다고 假定한다. 여기서 R 는 管半徑, v 는 管内流速, T_{zz} 는 z 方向의 法線應力, f 는 表面張力에 依한 힘이다.

單位時間에 檢査面으로부터의 運動量; $\int_0^R (\rho v 2\pi r \cdot dr) v$
 檢査面上(管出口)에서 流體가 받는 힘; $\int_0^R T_{zz} 2\pi r \cdot dr + f$
 細管이 받는 힘; $-T_M$

以上을 運動量의 法則에 適用시키면

$$-T_M = - \int_0^R (\rho v 2\pi r \cdot dr) v + \int_0^R T_{zz} 2\pi r \cdot dr + f \dots\dots\dots(1)$$

따라서

$$\int_0^R T_{zz} 2\pi r \cdot dr = T - T_M - f \dots\dots\dots(1)'$$

但, $T = 2\pi\rho \int_0^R v^2 r \cdot dr \dots\dots\dots(2)$

또한 式(1)'의 積分變數 r 를 $r = \frac{\tau_{rz}}{\tau_w} \cdot R$ 의 關係로부터 剪斷應力 τ_{rz} (τ_w 는 壁面剪斷應力)로 變換해서 兩邊을 τ_w 로서 微分하면 다음 式을 얻는다. 但 添字 w 는 壁面に 있어서의 값을 表示한다.

$$\frac{2\pi R^2}{\tau_w^2} \int_0^{\tau_w} T_{zz} \cdot \tau_{rz} \cdot d\tau_{rz} = T - T_M - f$$

$$\therefore (T_{zz})_w = \frac{1}{2\pi R^2} \left[2(T - T_M - f) + \tau_w \frac{d(T - T_M - f)}{d\tau_w} \right] \dots\dots\dots(3)$$

單純剪斷流에 對하여 冪乘則⁽⁶⁾

$$\tau_{rz} = m \frac{dv}{dr} \left| \frac{dv}{dr} \right|^{n-1} \dots\dots\dots(4)$$

를 適用하면

$$\tau_w = m \left(\frac{3n+1}{4n} \Gamma \right)^n, \Gamma = \frac{8V}{D} \dots\dots\dots(5)$$

가 된다. 또한 式(2)와 式(5)로부터 T 는

$$T = \rho\pi \frac{3n+1}{2n+1} V^2 \frac{D^2}{4} \dots\dots\dots(6)$$

으로 된다. 但 D 는 管直徑, V 는 平均流速인.

式(5)를 式(3)에 代入하면 $(T_{zz})_w$ 는 다음과 같이 式(7)로 表示된다.

$$(T_{zz})_w = \frac{1}{2\pi R^2} \left[2(T - T_M - f) + \frac{1}{n} (T - T_M - f) \frac{d \log(T - T_M - f)}{d \log \Gamma} \right] \dots\dots\dots(7)$$

따라서, 流量을 測定하면 式(6)으로부터 T 를 求할 수 있고 또한 反力 T_M 을 測定하면 式(7)에 依해서 $(T_{zz})_w$ 가 計算된다. 이것을 第1 法線應力差 $(\tau_{zz} - \tau_{rr})_w$ 와 聯關시키기 위해서는 다음과 같이 r 方向의 運動方程式을 考慮할 必要가 있다. 즉 法線應力 T_{zz} 를 等方成分과 偏差成分으로 分離



하면⁷⁾

$$(T_{zz})_w = (-P + \tau_{zz})_w \dots\dots\dots(8)$$

이 된다. 管出口에서 完全히 發達된 速度成分의 形態라고 假定하고 있으므로 管出口에 있어서 r 方向의 運動方程式은 式(9)와 같이 된다.

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} \dots\dots\dots(9)$$

이것을 $0 \sim R$ 까지 積分하면

$$P(R) = P(O) + (\tau_{rr})_w + \int_0^R \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} dr \dots\dots\dots(10)$$

이 된다. 한편 管中心에서 大氣壓과 같다고 假定하면

$$P(O) = 0 \dots\dots\dots(11)$$

또한 Weissenberg의 假定을 適用하면⁷⁾

$$\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta} = 0 \dots\dots\dots(12)$$

가 된다. 따라서 式(10)은

$$P(R) = P_w = (\tau_{rr})_w \dots\dots\dots(13)$$

로 된다. 따라서 式(8)과 式(13)으로부터,

$$(T_{zz})_w = (\tau_{zz} - \tau_{rr})_w \dots\dots\dots(14)$$

가 되어 $(T_{zz})_w$ 는 第1 法線應力差와 같게 된다.

Ⅲ. 使用溶液 및 實驗裝置

(1) 使用 溶液

本 實驗에서 使用된 流体는 Cellosize Hydroxyethyl Cellulose (HEC WP-4400)와 Polyethylene oxide (PEO-18N) 및 Polyacrylamide (Separan NP-10)의 各 水溶液이다. 水溶液의 比重은 거의 물과 같으며, 溶解方法에 있어서 HEC의 境遇, 溶器에 채운 水道水에 HEC의 粉末을 徐徐히 混入해서 充分히 攪拌하면서 溶解시킨다. HEC의 溶液은 數回의 實驗에 使用 可能하며 相違한 溶解方法에 對해서도 거의 差異가 없으나 長時間 放置하여 두면 水中의 Bacteria等에 依한 腐敗로 因하여 粘度가 低下된다. 이 溶液에 依한 實驗은 溶解後 24時間이 經過한 다음 부터 2 週間 使用할 수 있었다.

PEO의 境遇는, 100 ppm의 安定劑를 넣는 水道水에 PEO 粉末을 撒布하여 24時間程度 後에 徐徐히 攪拌한다. PEO 溶液은 強한 剪斷應力을 받으면 高分子鎖가 切斷되어 永久的으로 劣化되므로 PEO 溶液 製造時는 아주 徐徐히 攪拌해야 된다. 또한 PEO 容器等 으로부터 나타나는 鐵 Ion에 依해 그의 特性이 變化하므로 製造된 溶液은 4日 以內에 實驗을 完了하도록 하였다.

Separan의 境遇는 물에 對한 溶解性이 大端히 좋아서 溶液 製造가 容易하다. Separan은 過激

히 攪拌하거나 大端히 큰 剪斷應力을 加하면 Polymer 結合이 切斷되어 粘度가 低下하는 境遇가 있으나 普通의 實驗에서는 粘度의 劣化가 發生하지 않는다. 또한 거의 非腐蝕性이므로 取扱이 容易한 溶液이다.

따라서 本 實驗에서는 主로 Separan 溶液을 使用하였다. 그러나 法線應力의 測定實驗에 있어서는 他 溶液의 狀態를 參考로 하기 위하여 HEC 및 PEO 溶液으로도 實驗을 行하였다.

(2) 實驗 裝置

裝置全體의 略圖 및 寫眞을 그림 2(A)와 2(B)에, Jet 噴出裝置를 그림 3(A)와 3(B)에 表示하였으며, 그림 4(A)와 4(B)는 Jet 噴出管을 나타내고 있다. 裝置의 原理는 Piano線의 비틀림角을 測定하여 Jet의 反力을 求할 수 있도록 한 것이다. 즉, 上下 2.29m 사이에 팽팽히 당겨진 Piano線(徑 1.2mm인 stainless 製品)의 途中에 Jet 噴出裝置가, 그의 上下에 取付된 Chuck에 依해서, Piano線上에 設置되어 있다. 噴出裝置로부터는 內徑 3.3mm의 4個의 黃銅管이 半徑方向에 設置되어 그의 先端에는 stainless製의 噴出管이 그에 直角으로 取付되어 있다. 또한 黃銅管은 徑이 다른 噴出管으로 交換될 수 있게 하였으며 그림 4(A)에 5種類의 噴出管의 管徑 및 管長을 表示하였다. 溶液은 供給 Tank에 貯藏된 後 Reservoir에 移送되어 그곳에서 壓力이 調整된 다음, 밑으로부터 Vinyl管을 통해서 噴出裝置에 供給된다. 噴出裝置에 供給된 溶液이 4方向으로 向해 있는 4個의 黃銅管을 通

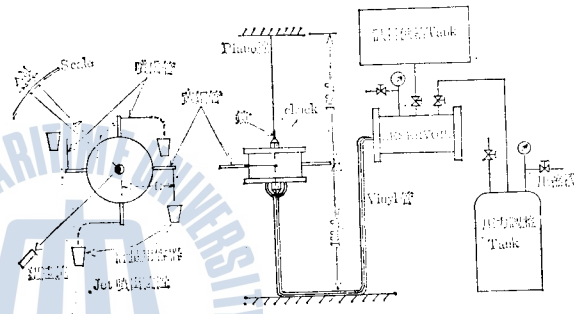


그림 2(A) 實驗裝置 略圖

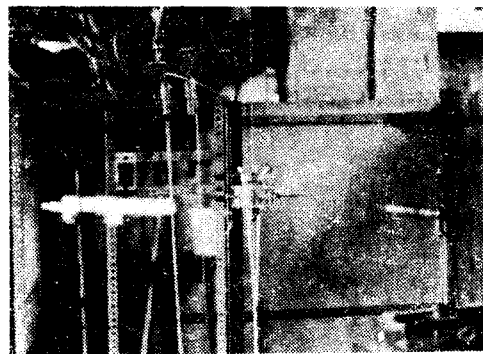


그림 2(B) 實驗裝置

해서 噴出管으로부터 Jet가 되어 噴出되면 그의 反力에 相當하게 Piano線이 비틀린다. 그 비틀림角은 Piano線上에 取付된 小鏡에 비치는 scale의 눈금을 望遠鏡으로 읽음으로써 알 수가 있다. 또한 流量은 Jet의 下方에 位置한 容器에 依해서 重量法으로 測定된다.

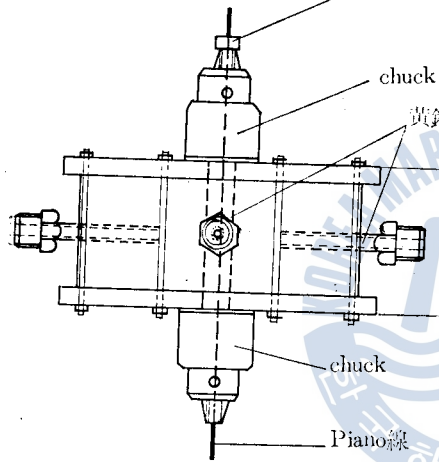
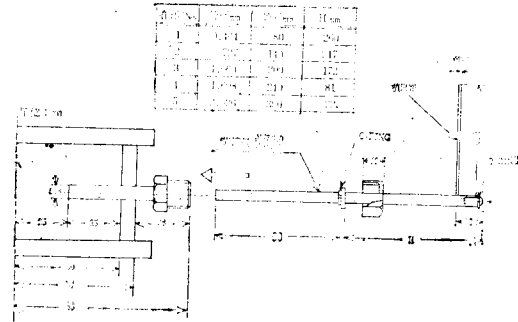
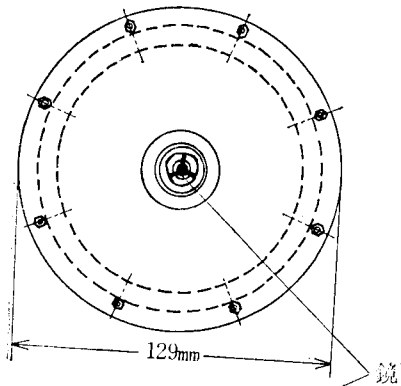


그림 3(A) Jet 噴出裝置圖

그림 4(A) 噴出管詳細圖

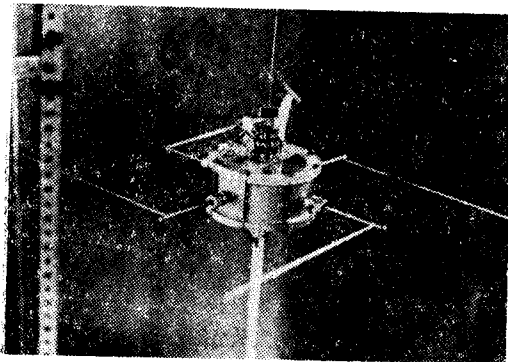
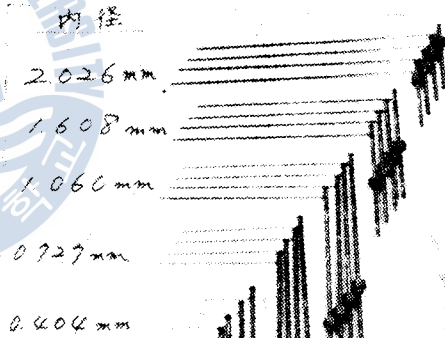


그림 3(B) Jet 噴出裝置

그림 4(B) Jet 噴出管

IV. 實驗方法 및 考察

Piano線의 비틀림 角度 $\theta = \Delta M/l$ 와 Jet反力에 依한 Torque $T_M \cdot l$ 은 θ 가 微小한 範圍內에서 比例한다고 看做할 수 있으므로

$$\Delta M/l = K \cdot L \cdot T_M \dots\dots\dots(15)$$

가 成立한다. 但 ΔM 은 scale 눈금의 差이며 l 은 小鏡으로부터 scale까지의 距離, L 는 Piano線으로부터 噴出管까지의 距離이고, K 는 比例定數인데 Piano線의 剛性率에 依하여 決定된다.

한편 물의 境遇에는 $(T_{zz})_w = 0$ 이고 冪指數 n 은 1인 故로 式(1)'로부터 T_M 은,

$$T_M = T - f \dots\dots\dots(16)$$

이므로, 式(6)으로부터 다음 式(17)이 된다.

$$T = \rho\pi \frac{4}{3} V^2 \cdot \frac{D^2}{4} = \frac{16\rho}{3\pi} \cdot \frac{Q^2}{D^2} \dots\dots\dots(17)$$

式 (15), (16) 및 (17)로부터

$$\Delta M = K \cdot l \cdot L \cdot T_M = K \cdot l \cdot L \left(\frac{16\rho}{3\pi} \cdot \frac{Q^2}{D^2} - f \right) = m_0 Q^2 - \frac{3\pi D^2}{16\rho} \cdot m_0 f \dots\dots (18)$$

$$\text{但 } m_0 = K \cdot l \cdot L \frac{16\rho}{3\pi D^2} \dots\dots\dots(18)'$$

물의 境遇 ΔM 와 Q^2 間에는 線形關係가 成立된다. 따라서 물의 實驗值로부터 $\Delta M - Q^2$ 의 Graph를 그리면 그의 기울기는 式(18)의 m_0 값이 된다.

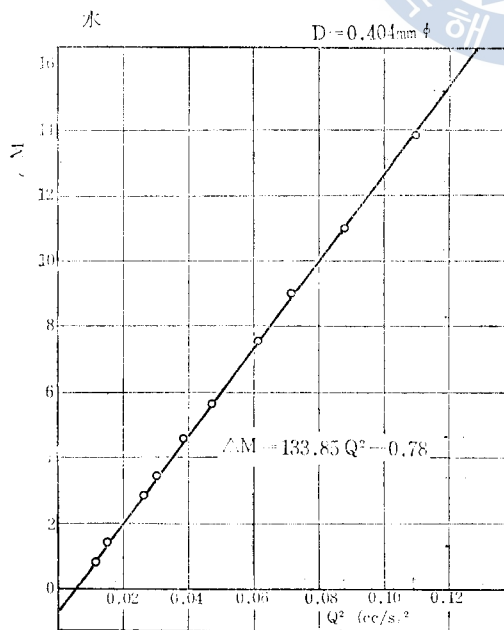


그림 5 D=0.404mmφ

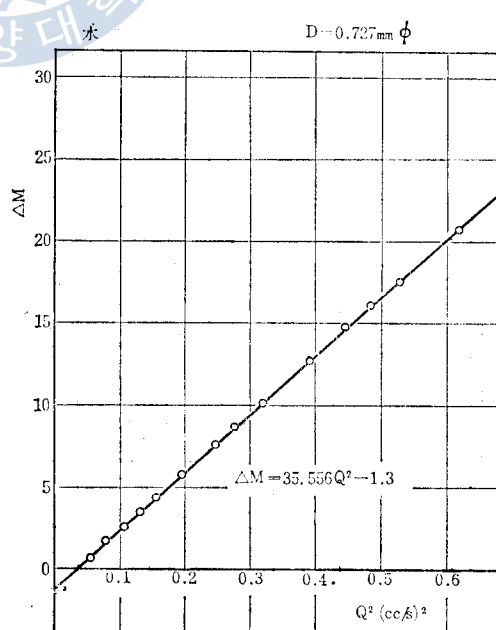
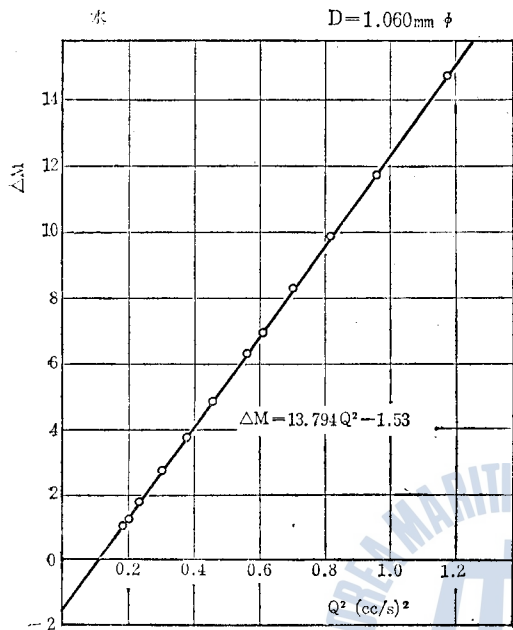
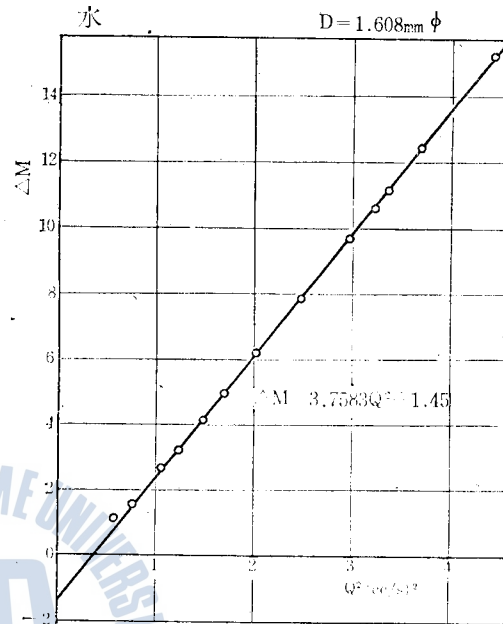


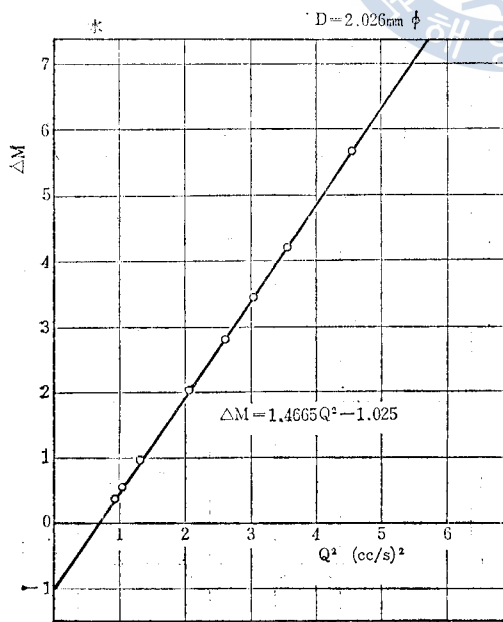
그림 6 D=0.727mmφ



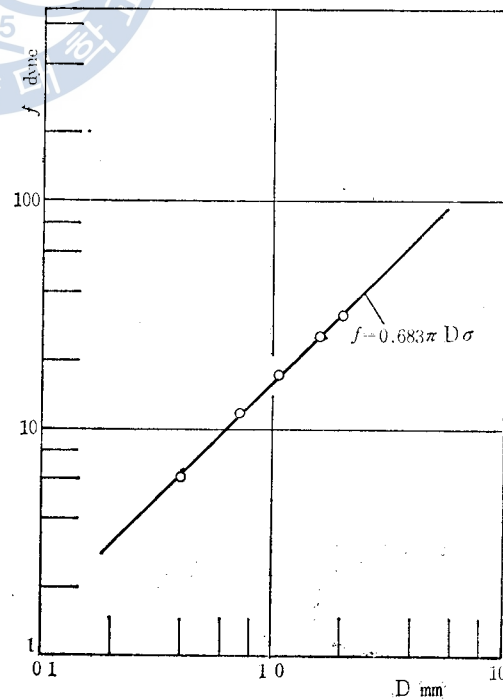
그 립 7 D=1.060mmφ



그 립 8 D=1.608mmφ



그 립 9 D=2.026mmφ



그 립 10

그림 5~그림 9는 물의 境遇에 있어서 5種類의 各 噴出管에 對해 求한 ΔM 와 Q^2 의 實驗值를 表示하고 있는데, 式(18)의 關係와 一致함을 나타내고 있다. m_0 의 값은 本 實驗에서와 같이 溶液의 比重이 물과 거의 같을 때는 溶液種類와는 無關한 裝置의 定數이다. m_0 의 값을 알면 그림 5~그림 9의 切片 $\frac{3\pi D^2}{16 \cdot \rho} m_0 f$ 를 읽음으로써 表面張力에 依한 힘 f 를 알 수 있다.

그림 10은 그와 같이 求한 f 를 縱軸에, 管徑 D 를 橫軸에 取하여 만든 Graph이다. 기울기는 거의 1이고 $f \propto D$ 임을 알 수 있으며, 切片으로부터 比例定數를 求하면

$$f = 0.683 \pi D \sigma \dots\dots\dots(19)$$

가 된다. 但 σ 는 表面張力으로서 本 實驗에서 使用한 水道水에 있어서는 $\sigma = 72.5$ dyne/cm (Jolly의 表面張力計로 測定)이다. 從來 表面張力の 補正에는 여러가지로 論議가 있었으며, $f = \frac{\pi D}{2} \cdot \sigma$ 또는 $\pi D \sigma$ 라고 하여 왔었으나, 本 實驗에 依하면 이들의 中間值로 測定되었다.

한편, 粘彈性流體의 反力 T_M 은 式 (18)로부터

$$T_M = \frac{\Delta M}{K \cdot L \cdot L} = \frac{16 \cdot \rho}{3\pi D^2} \cdot \frac{\Delta M}{m_0} \dots\dots\dots(20)$$

이 되므로 m_0 를 알면 T_M 이 求하여 지며, 式(7)로부터 $(T_{zz})_w$ 가 求하여진다.

그림 11~그림 20은 法線應力 $(T_{zz})_w$ 對 剪斷速度(Γ_w 및 γ_w)를 兩對數 Graph에 表示한 것이다. 그림 18~그림 20에 關해서 考察하여 보면, 各 濃度에 對해서 어느 것이나 測定點은 噴出管의 管徑에 無關하게 一直線上에 있는 것으로 看做되어서 直線을 그었다. 즉 이들 Graph로부터

$$(T_{zz})_w \propto \gamma_w^k, (k > 0) \dots\dots\dots(21)$$

이 되는 것을 알 수 있다. 各 直線으로부터 그의 기울기 k 의 값을 표 1과 같이 얻을 수 있다.

溶液 및 濃度	$k : [(T_{zz})_w \propto \gamma_w^k]$
Separan 0.05%	0.909
Separan 0.1%	0.906
Separan 0.5%	0.911

표 1

0.05%, 0.1% 및 0.5%의 Separan 溶液의 境遇, 法線應力の 測定值에 對한 管徑의 影響은 거의 나타나지 않으며, 測定上의 問題點은 없다고 看做된다.

한편 極히 稀薄한 溶液(ppm order)의 境遇에는 그림 12~그림 17에 圖示된 바와 같이

管徑에 따른 各 Data에 약간의 差異點이 나타나므로 法線應力差를 求하기 困難하다. 그와 같은 原因으로서는, Reservoir로부터 噴出裝置에 溶液을 供給하는 Vinyl管의 影響, 또는 噴出管出口에 있어서의 Jet의 不安定의 影響 및 溶液中의 高分子의 機械的 劣化가 管徑에 따라 다르게 되는 影響 등이 考慮될 수 있으나, 現段階에서는 明確하게 結論지을 수 없으므로 이러한 問題는 今後 檢討되어야 할 것이다.

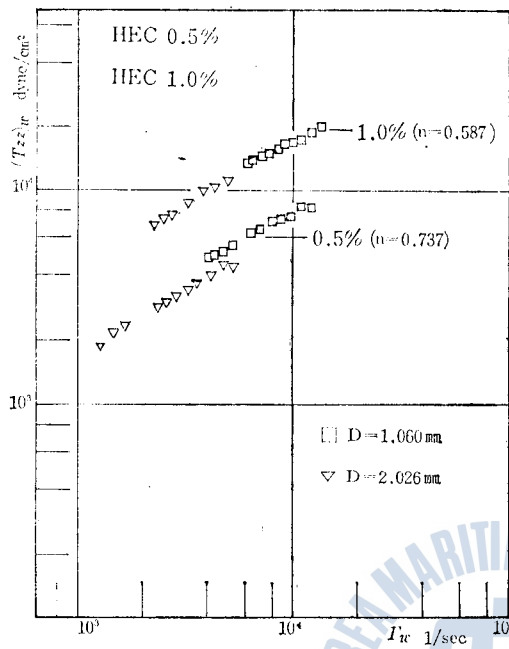


그림 11 HEC 0.5%, 1.0%

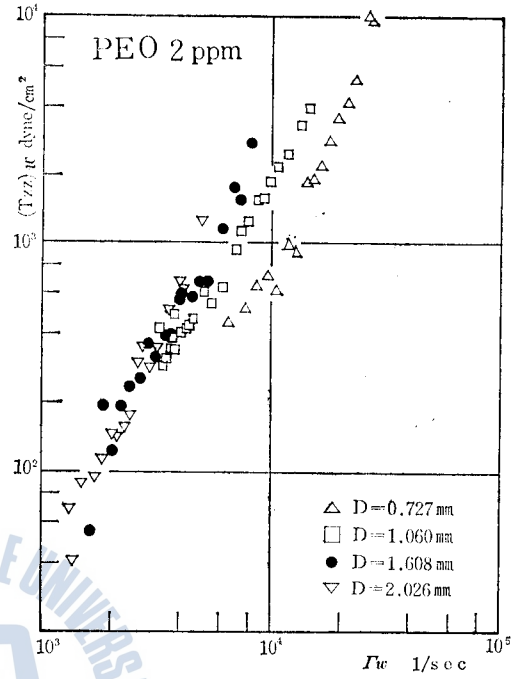


그림 12 PEO 2 ppm

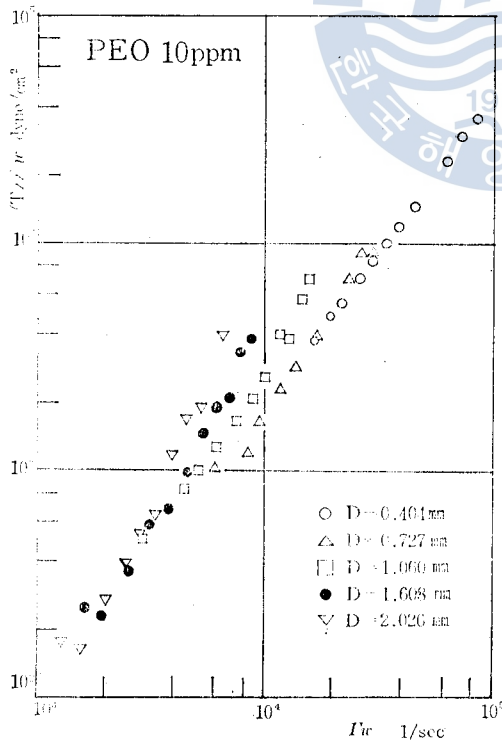


그림 13 PEO 10 ppm

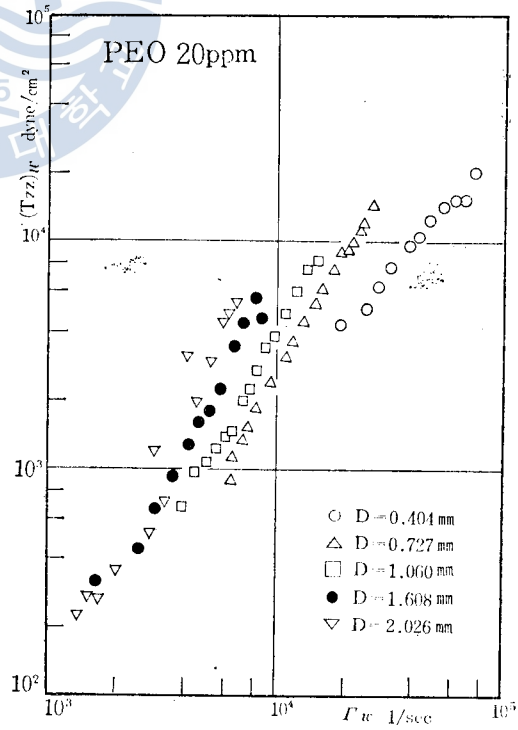


그림 14 PEO 20 ppm

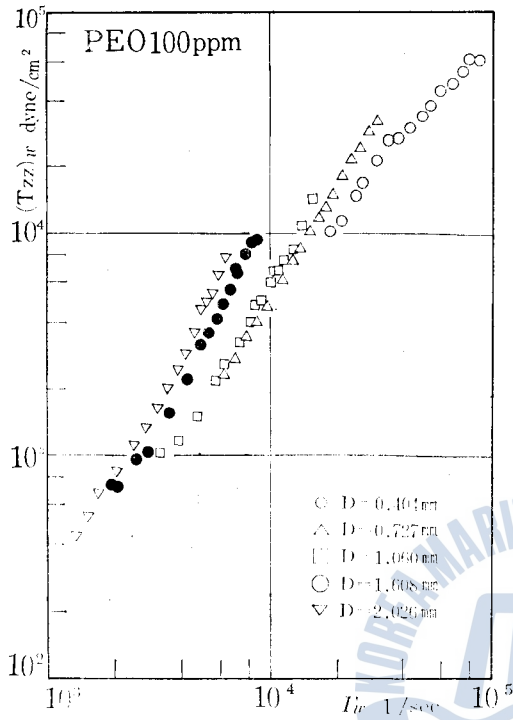


그림 15 PEO 100 ppm

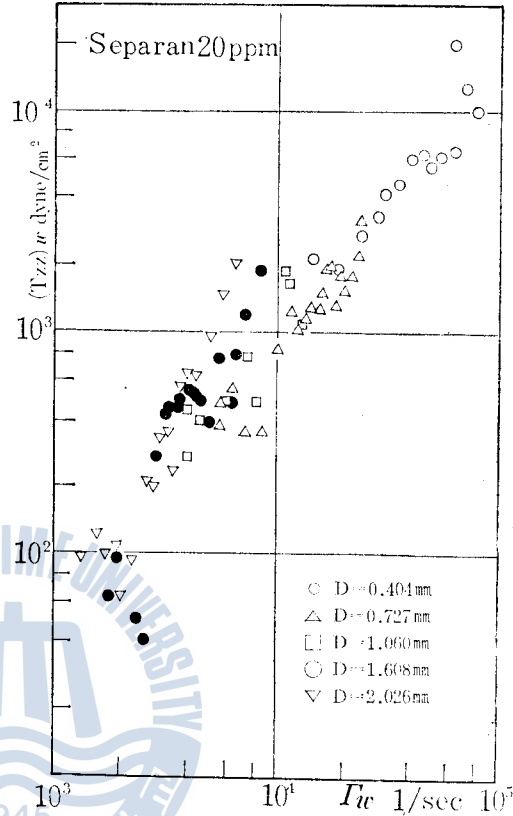


그림 16 Separan 20 ppm

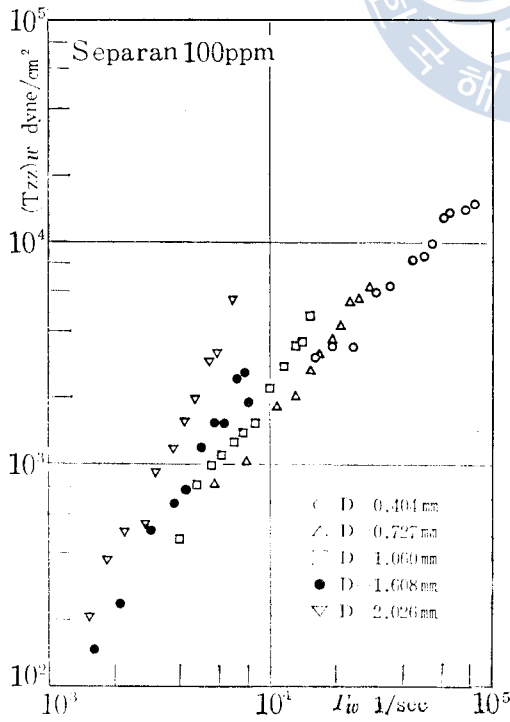


그림 17 Separan 100 ppm

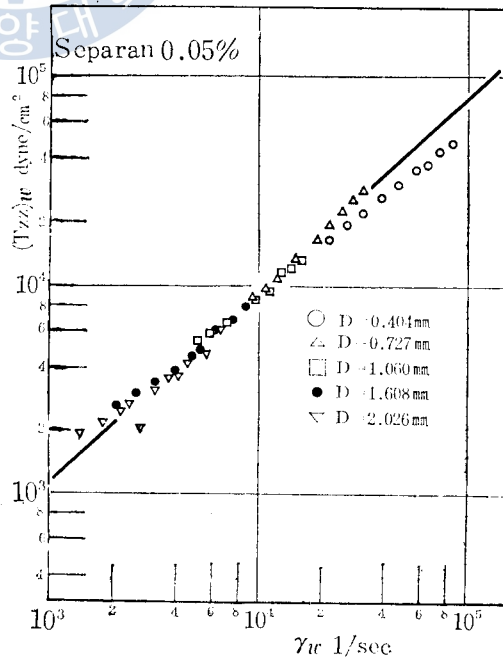


그림 18 Separan 0.05%

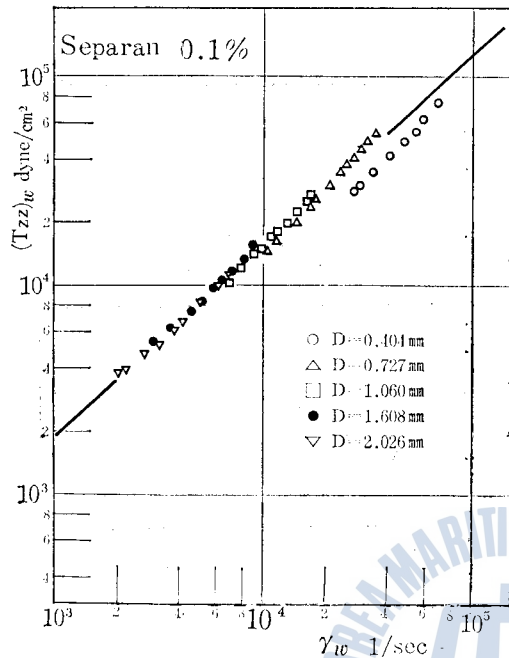


그림 19 Separan 0.1%

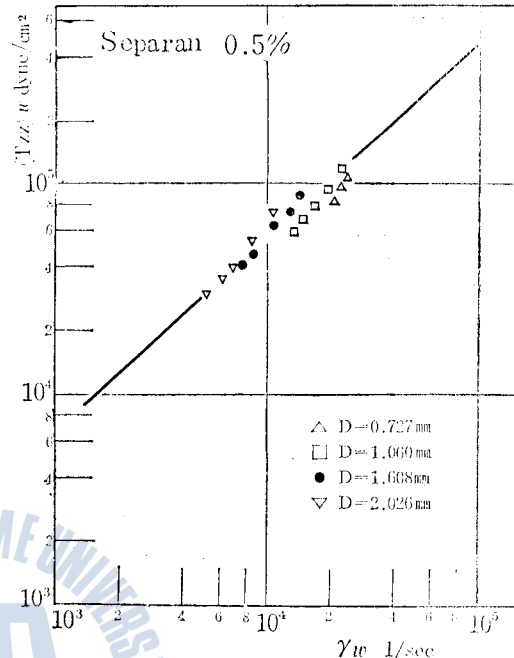


그림 20 Separan 0.5%

V. 結 論

粘彈性流體의 法線應力 測定用의 새로운 裝置를 考案, 開發하여 그 裝置에 依해서 여러 種類의 高分子溶液의 法線應力을 測定하였다. 그 結果, 약간 높은 濃度의 稀薄高分子溶液에 對해서는 法線應力이 別 問題없이 測定되었으나, ppm order인 大端히 稀薄한 溶液의 境遇에는 管徑의 差異에 따라서 實驗值가 相違하게 되는 異常現象이 나타났다. 이러한 現象의 原因은 現 段階로서는 明確하게 糾明하기 困難하나 今後 檢討하고자 한다.

參 考 文 獻

- 1) 富田幸雄, "流體力學序說", 養賢堂, (1971) pp.12~13
- 2) B. D. Coleman, H. Markovitz and W. Noll, "Viscometric Flows of Non-Newtonian Fluids," Springer-Verlag New York Inc. (1966), pp.56~83
- 3) D. R. Oliver, "The Expansion and Contraction Behavior of Laminar Liquid Jets", Canadian J. Chemical Engineering, April (1966), pp.100~107
- 4) J. C. Slattery and W. R. Schowalter, "Effect of Surface Tension in the Measurement of the Average Normal Stress at the Exit of a Capillary Tube through an Analysis of the Capillary Jet", J. Applied Polymer science, Vol.8 (1964), pp.1941~1947

- 5) 富田, 長谷川, 金春植, “高分子溶液の管内流れにおける軸方向法線応力の測定”, 日本機械學會講演論文集, 730-6 (1973) pp.171~174
- 6) 長谷川富市, “稀薄高分子溶液の管内流れにおける異常現象に関する研究”, 博士學位論文, 東京工學大學, (1971) pp. 46
- 7) Stanly Middleman, “The Flow of High polymers”, Interscience Publishers (1968) pp. 43~56



