

粘彈性流體의 靜壓孔에 依한 壓力測定 誤差에 關한 研究

金 春 植

A Study on Measuring Errors in Pressure Measurements of
Viscoelastic Fluids by the Static Pressure Hole

Kim Chunsik

<目 次>

第1章	序 論
第2章	法線應力の 測定
2.1	法線應力の 測定原理
2.2	法線應力測定用 實驗裝置 및 實驗方法
2.3	法線應力測定の 實驗結果 및 考察
第3章	示壓誤差의 測定
3.1	示壓誤差測定の 實驗方法 및 理論
3.2	示壓誤差의 測定原理
3.3	示壓誤差測定の 實驗裝置
3.4	示壓誤差測定の 實驗結果 및 考察
第4章	示壓誤差에 미치는 影響
4.1	示壓誤差와 法線應力에 關한 考察
4.2	示壓誤差와 一般레이놀즈數에 關한 考察
第5章	壓力測定用 壁孔附近의 流動模樣
5.1	流動模樣의 實驗方法 및 實驗裝置
5.2	流動模樣의 實驗結果
5.3	流動模樣의 考察
第6章	結 論
	參考文獻

ABSTRACT

Viscoelastic fluids such as dilute polymer solutions show anomalous phenomena that can not be observed in Newtonian fluids. The normal stress effect among these phenomena and the measurement of the static pressure are fundamentally important from an engineering view point.

The normal stresses of viscoelastic fluids have been measured mainly by a Rheogoniometer.

However, as there lies a measuring limitation in case of Rheogoniometer, it is difficult to measure the normal stresses when the normal stress differences in dilute polymer solutions are very small or the shear rates of the solutions are considerably high.

In measuring the static pressure on a fluid-immersed surface, it is a convenient way to make use of a small pressure hole leading to the measuring instrument. But because viscoelastic fluids exhibit normal stress effects, it has been shown experimentally that a systematic error exists in measuring the static pressure by the hole. A certain disturbance of the viscoelastic fluid flow occurs due to the hole and therefore, in order to measure the undisturbed original pressure, the error must be clarified.

In this paper, the normal stresses are measured by using a new device which is designed to measure them by means of the reaction thrust of cylindrical jet formed at the exit of a horizontal capillary tubes. In order to examine the relations between the error in the static pressure measurement by the hole and the normal stress, and between the error and generalized Reynolds number, the experiments are performed by a parallel plate channel with the steady two-dimensional shear flow of viscoelastic fluids such as Separan-NP10 and PEO-18N. Also, in order to examine the mechanism of the errors, the flow patterns in the vicinity of static pressure hole are photographically taken and observed graphically.

Results of the experiments can be summarized as follows;

- (1) The errors in measuring the static pressure of polymer solutions are not influenced by the pressure hole size.
- (2) The errors in measuring the static pressure increase with concentration of polymer solutions and shear rates.
- (3) The relation between the normal stress ($\tau_{zz} - \tau_{rr}$) and the error (Δp) in case of Separan-NP10 and PEO-18N solution can be approximately represented as follows;

$$-\Delta P = 0.14(\tau_{zz} - \tau_{rr})_w$$

- (4) The relation between the error and generalized Reynolds number (R_*) can be approximately represented as follows;

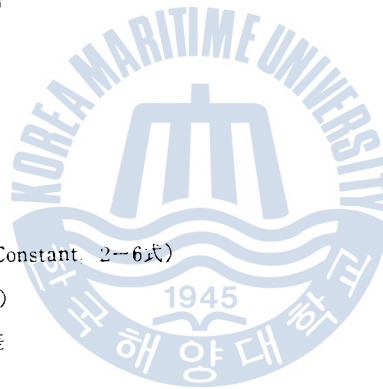
$$\text{Separan-NP10; } -\Delta p = 40.5 \rho V^2 R_*^{*(-0.87)}$$

$$\text{PEO-18N; } -\Delta P = 477 \rho V^2 R_*^{*(-1.11)}$$

- (5) The flow patterns in the vicinity of the pressure measuring hole can be classified as next three regions.
 - 1) Arched symmetrical flow pattern region.
 - 2) Asymmetrical flow pattern region.
 - 3) Rectilinear symmetrical flow pattern region.

記 號 說 明

a : 定數(3-3式)	[—]
B : 流路의 幅	[cm]
C : 定數(4-3式)	[—]
D : 管內徑	[cm]
f : 表面張力에 依한 힘	[dyne]
g : 重力加速度	[cm/sec ²]
h : 물 흐름의 두께	[cm]
h_1 : 비닐薄膜(Vinyl Film)의 두께	[cm]
h_2 : 粘彈性流體의 흐름의 두께	[cm]
H : 채널(Channel)의 두께	[cm]
k : 기울기(2-26式)	[—]
K : 定數(2-19式)	[—]
l : 距離(2-19式)	[cm]
L : 距離(2-19式)	[cm]
m : 리올러지定數(Rheology Constant, 2-6式)	[—]
m_0 : 係數(裝置定數, 2-23式)	[—]
ΔM : 스케일(Scale)의 눈금差	[cm]
n : 指數(Power Exponent)	[—]
p : 壓力	[dyne/cm ²]
\bar{P} : 法線應力의 平均値	[dyne/cm ²]
ΔP : 靜壓孔에 依한 示壓誤差	[dyne/cm ²]
q : 기울기(4-1式)	[—]
Q : 體積流量	[cm ³ /sec]
R : 管半徑	[cm]
R_s : 레이놀즈數(Reynolds Number)	[—]
R_{s*} : 一般레이놀즈數(Generalized Reynolds Number, 3-21式)	[—]
T : 運動量	[dyne·sec]
T_{ij} : 應力텐서(Stress Tensor)	[—]
T_M : 反力	[dyne]
v : 管內流速	[cm/sec]
V : 平均流速	[cm/sec]



α : 기울기 (4-7式)	[-]
β : 기울기 (4-7式)	[-]
$\dot{\gamma}$: 剪斷變形率 (Shear Rate)	[1/sec]
Γ : 겉보기剪斷變形率 (Apparent Shear Rate)	[1/sec]
δ : 標準偏差	[-]
η : 粘度	[g/cm·sec]
ν : 動粘度	[cm ² /sec]
ρ : 密度	[g/cm ³]
σ : 表面張力の 크기	[dyne/cm]
τ_{rz}, τ_{xy} : 剪斷應力	[dyne/cm ²]
$\left. \begin{matrix} \tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz} \\ \tau_{rr}, \tau_{zz}, \tau_{\theta\theta} \end{matrix} \right\}$: 偏差法線應力	[dyne/cm ²]
τ_w : 壁面剪斷應力 [= $(\tau_{rz})_w = (\tau_{rz})_{r=R}$]	[dyne/cm ²]

(添字記號)

T: 全量

V: 粘彈性流體

W: 물

w: 流路壁



第 1 章 序 論

流體工学에서 取扱되던 流體는 主로 水, 空氣, 기름 等과 같은 非유동流體가 大部分이었으나 科學技術의 進歩에 따라 最近에는 剪斷變形率과 應力의 關係가 非線形性을 나타내는 非유동流體인 次러가져 高分子폴리머溶液(Polymer Solution)의 흐름을 다루는 일이 많아졌다. 高分子폴리머溶液의 흐름은 粘性的 性質以外에 彈性的 性質을 갖는 粘彈性流體(Viscoelastic Fluid)로서 이 流體는 純粘性 流體와는 달리 그 剪斷力을 除去하면 약간 彈性的인 變形回復現象 즉, 彈性反跳現象(Elastic Recoil or Strain Recovery)이 나타난다. 이와 같이 粘彈性流體는 流動을 일으키기 위하여 加해진 일이 彈性體의 일이 完全히 保存되지 않으며 또한 純粘性流體와 같이 完全히 消散되지도 않는 流體이다. 따라서 非유동流體에서는 볼 수 없는 다음과 같은 여러가지 特異한 現象을 나타내고 있다. 즉 法線應力效果(Weissenberg效果), 사이펀(Siphon)效果, 파라스(Barus)效果(또는 Merrington效果) 및 不安定 흐름, 크나고 稀薄高分子폴리머溶液이 亂流狀態로 管内를 흐를 때의 管摩擦損失이 同一流速으로 흐르는 粘媒인 水를 흐르게 할 때의 管摩擦損失보다도 遠저히 減少되는 톰스(Toms)效果 등이 있다.

그러나 이러한 異常現象들은 發表된지 얼마되지 않으며 이들 流體의 物質定數 測定이 困難하고 또한 高分子쇄인(Chain)이 化學的, 機械的으로 退化되기 쉬우므로 實驗으로나 理論적으로 統一된 見解가 얻어지지 못하고 있다. 이들 非유동流體인 稀薄高分子폴리머溶液의 粘彈性的 特性中에서 粘性을 求하는 粘度測定法은 比較的 簡單하며 測定方法도 一般的으로 確立되어 있다고 말할 수 있다.

粘彈性流體의 法線應力測定은 流動特性을 究明하는데 重要하다 主로 리오고니오 미터(Rheogoniometer)나 流動複屈折裝置(Flow-Birefringence Apparatus)를 使用하여 測定되고 있다¹⁾. 그러나 이러한 裝置들에는 測定限界가 있으므로 剪斷變形率이 상당히 큰 境遇이거나 稀薄高分子폴리머溶液 等과 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폴리머溶液의 剪斷變形率이 比較的 큰 範圍에서는 噴射流(Jet)의 推力을 利用해서 法線應力差를 測定하는 方法이 採用되고 있다²⁾. 다만 이 方法에 있어서는 稀薄高分子폴리머溶液의 法線應力差가 적은 뿐만 아니라 噴射流은 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 資料는 均一하지 못하고 分散하는 傾向이 있다. 더구나 매우 稀薄한 溶液의 法線應力差는 容易하게 測定되지 못하고 있다.

流體의 壓力測定은 流體를 取扱하는데 있어서 가장 基本的인 事項이며 重要하다. 非유동流體의 靜壓은 主로 靜壓孔을 通해서 測定되고 있으며 粘彈性流體에 對해서도 同一하게 測定하는 것이 普通이였으나 近來에는 上記한 特異現象들의 影響을 받기 때문에 靜壓孔을 通한 粘彈性流體의 測定値는 참 靜壓과 比較하여 無視할 수 없을 程度의 誤差가 發生한다는 報告가 있었다^{3), 8), 10), 11)}.

지금까지의 이 方面에 關한 研究를 檢討하여 보면 Kaye, Lodge, Vale 等³⁾과 Broadbent, Kaye, Lodge, Vale 等⁸⁾은 리오고니오미터나 流動複屈折法으로 法線應力을 測定하여⁸⁾ 그것들을 比較 檢討함으로써 粘彈性流體에 對해서는 壁孔에 依한 靜壓의 測定値가 참 靜壓보다 낮다고 報告하였다.

그들에 의하면 壁孔에 의한 靜壓의 測定誤差 ΔP dyne/cm² 는 다음 式으로 주어진다.

$$\Delta P = -3.07 \tau_w + 414$$

但, τ_w 는 壁面剪斷應力이며, $500 > \tau_w > 200$ dyne/cm²

Pritchard¹⁰⁾는 壁孔의 形狀이나 길이 및 流動速度의 差異가 示壓誤差에 미치는 影響을 次元解析의 으로 考察하고 한편으로는 實驗的으로 圓錐~平板型 리오그니오 미터로서 그의 影響을 考察한 結果 壁孔의 幾何學的 形狀의 差異는 큰 影響을 주지 않는다고 結論지었다.

Tanner 와 Pipkine¹¹⁾은 開水路에서 直徑 1/32 in.로부터 1/4 in.의 壁孔 및 1/8 in.의 홈(Slot)에 對하여 實驗한 結果 測定한 誤差는 壁孔의 크기나 壁孔과 홈의 差異에 따른 影響을 거의 받지 않으며 그 값은 負(-)이고, 絶對値는 第1法線應力差의 約 25%가 된다고 報告하였다. 또한 그들은 흐름이 壁孔의 中心軸에 對하여 對稱이라 假定하고 流體의 모델(Model)로서 2次元流體를 擇해서 理論解析을 하여 實驗値와 거의 一致하는 結果를 얻었다.

Higashitani 와 Pritchard¹²⁾는 上記한 Tanner 等の 解析方法을 擴張해서 一般的으로 $\tau_{xx} - \tau_{yy} \propto \tau_{yz}$, $\tau_{yy} - \tau_{zz} \propto \tau_{xz}$ 로 되는 流體에 對해 靜壓測定用 壁孔에 의한 示壓誤差 ΔP 는 다음 式으로 주어짐을 報告하였다.

$$\Delta P = -\frac{1}{3} \left(\frac{\tau_{xx} - \tau_{yy}}{\alpha} - \frac{\tau_{yy} - \tau_{zz}}{\beta} \right)$$

여기서 $\tau_{xx} - \tau_{yy}$, $\tau_{yy} - \tau_{zz}$, τ_{yz} 는 各各 第1, 第2法線應力差 및 剪斷應力이다.

本研究에서는 從來 測定이 大端히 困難하였던 比較的 稀薄한 高分子폴리머溶液의 法線應力을 細管으로부터 流出되는 噴射流가 細管에 미치는 反力을 利用해서 測定하는 方法 및 裝置를 開發해서 여러 溶液의 法線應力을 求하였다¹³⁾. 또한 簡單한 平行平板型의 채널(Channel)을 使用하여 剪斷變形率이 큰 領域을 中心으로 壓力測定用 壁孔에 의한 粘彈性流體의 示壓과 참 靜壓과의 誤差를 測定해서 그 誤差와 法線應力 및 一般레이놀즈數(Generalized Reynolds Number)와의 關係를 考察함으로써 粘彈性流體가 靜壓孔의 示壓誤差에 미치는 影響을 究明코자 한다. 한편 壓力測定用 壁孔入口 附近의 粘彈性流體의 流動模樣에 關한 實驗의 觀察을 通하여 流動模樣을 考察해서 靜壓孔에 의한 示壓誤差의 發生機構를 究明하는 基本資料를 提供하고자 한다.

本實驗에서 使用한 粘彈性流體는 美國 Dow Chemical International LTD 社 製品인 Separan NP-10 (Polyacrylamide)의 0.05%, 0.1%, 0.5%의 水溶液과 日本製鐵化學工業株式會社製品인 PEO-18 N (Polyethylene Oxide)의 0.1%, 0.5%, 1.0%의 各 水溶液이다. 水溶液의 比重은 거의 물과 같으며, 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 폴리머(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 退化가 發生하지 않는다. 또한 거의 非腐蝕性이므로 取扱이 容易한 溶液이다. PEO의 境遇는 水道물에 PEO 粉末을 撒布하여 24時間程度 經過後에 서서히 攪拌한다. PEO溶液은 강한 剪斷應力을 받으면 高分子체인이 切斷되어 永久的으로 退化되므로 PEO溶液 製造時는 아주 서서히 攪拌해야 된다. 또한 容器 등으로부터 나타나는 鐵이온(Ion)에 의해 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.

各 溶液의 特性은 다음 表와 같다.

種 類	Separan NP-10	PEO-18N
平均分子量	100萬以上	400萬以上
粘 度	0.5%水溶液(25℃) 0.2 Poise	0.5%水溶液(25℃) 2.2 Poise
外 觀	白色粉末	白色粉末
水 溶 液	中性, 透明	中性, 透明



第2章 法線應力の測定

2.1 法線應力の測定原理

Fig. 2.1 과 같이 容器에 裝置된 水平細管으로부터 粘彈性流體가 제트(Jet)로 噴出되는 境廻를 考慮한다. 圓筒座標系(r, θ, z)를 Fig. 2.1 에서의 같이 定하고 點線과 같은 檢査面을 取해서 z 方向의 運動量平衡을 考慮한다. 그 때의 流出 噴射流는 管出口에서 完全히 發達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.

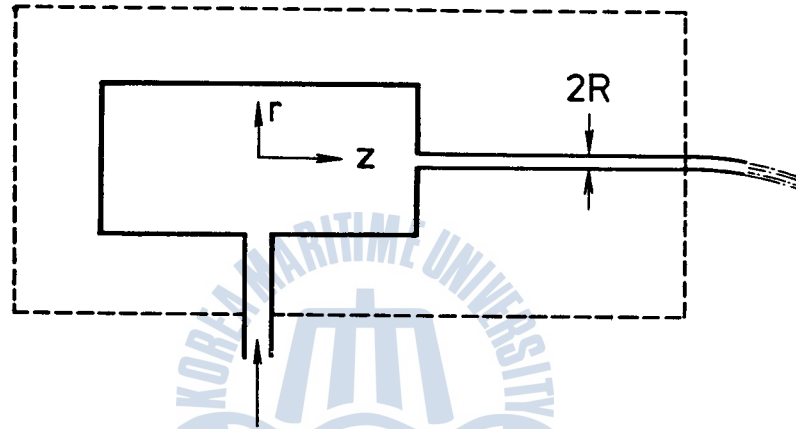


Fig. 2.1 Control Surface of Jet

單位時間에 檢査面으로부터의 運動量 變化量;

$$\int_0^R (\rho v 2\pi r \cdot dr) v$$

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

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

따라서

$$\int_0^R T_{zz} 2\pi r \cdot dr = T - T_M - f \quad (2-2)$$

但,

$$T = 2\pi \rho \int_0^R v^2 r \cdot dr \quad (2-3)$$

(2-2)式의 積分變數 r 를 $\tau_{rz} = \frac{r}{R}$ 의 關係로부터 剪斷應力 τ_{rz} 로 變換하면,

$$\frac{2\pi R^2}{\tau_w} \int_0^w T_{zz} \cdot \tau_{rz} \cdot d\tau_{rz} = T - T_M - f \quad (2-4)$$

兩邊을 壁面剪斷應力 τ_w 로써 微分하면 다음 式을 얻는다.

$$(T_{zz})_w = \frac{1}{2\pi R} \left[2(T - T_M - f) + \tau_w \frac{d(T - T_M - f)}{d\tau_w} \right] \quad (2-5)$$

單純剪斷流에 對하여 指數法則(Power Law)^{11,12)},

$$\tau_{rz} = m \left(\frac{dv}{dr} \right)^{n-1} \quad (2-6)$$

(2-6)式을 適用하면,

$$\tau_w = m \left(\frac{3n+1}{4n} \Gamma \right)^n \quad (2-7)$$

여기서 Γ 는 겉보기 剪斷變形率(Apparent Shear Rate)이며 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{8V}{D} \quad (2-8)$$

(2-3)式과 (2-7)式 및 (2-8)式으로부터

$$T = \rho \pi \frac{3n+1}{2n+1} V \frac{D}{4} \quad (2-9)$$

으로 된다. 但 D 는 管直徑이고 V 는 平均流速이다. (2-7)式을 (2-5)式에 代入하면 $(T_{zz})_w$ 는 다음 (2-10)式으로 表示된다.

$$(T_{zz})_w = \frac{1}{2\pi R} \left[2(T - T_M - f) + \frac{1}{n} (T - T_M - f) \frac{d \log(T - T_M - f)}{d \log \Gamma} \right] \quad (2-10)$$

따라서 指數 n 및 流量 Q 를 測定하면 (2-9)式으로부터 T 를 求할 수 있고 또한 反力 T_M 을 測定하면 (2-10)式에 依해서 $(T_{zz})_w$ 가 計算된다. 다음으로 이것을 第1法線應力差 $(\tau_{zz} - \tau_{rr})_w$ 와 聯關시키기 위해서는 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(Isotropic Component, 壓力 p 와 크기가 같고 符號가 反對임)과 偏差成分(Deviatoric Component)으로 分離하면¹⁴⁾,

$$(T_{zz})_w = (-p + \tau_{zz})_w \quad (2-11)$$

이 된다. 圓筒座標系에서 r 方向의 Cauchy의 運動方程式은,

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} \right) \\ & = \rho K_r + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} \end{aligned} \quad (2-12)$$

여기서 K_r 는 外力 및 壓力勾配의 項이다. 管出口에서 完全히 發達된 圓管内 定常層流의 速度分布라고 假定하고 있으므로, $v_\theta = 0$, $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$, $v_r = 0$ 인 關係를 考慮하면 (2-12)式은 다음과 같이 된다¹⁵⁾.

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} \quad (2-13)$$

이것을 $0 \sim R$ 까지 積分하면,

$$p(R) = p(0) + (\tau_{rr})_w + \int_0^R \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} dr \quad (2-14)$$

한편 管中心에서 大氣壓과 같다고 假定하면,

$$p(0) = 0 \quad (2-15)$$

또한 Weissenberg 의 假定^{13), 14)}을 適用하면,

$$\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta} = 0 \quad (2-16)$$

따라서 (2-14)式은

$$p(R) = p_w = (\tau_{rr})_w \quad (2-17)$$

(2-11)式과 (2-17)式으로부터 (2-18)式을 얻을 수 있다.

$$(T_{xx})_w = (\tau_{xx} - \tau_{rr})_w \quad (2-18)$$

따라서 壁面에 있어서의 法線應力 $(T_{xx})_w$ 는 第1法線應力差와 같게 된다.

2.2 法線應力測定用 實驗裝置 및 實驗方法

Fig. 2.2, Fig. 2.3 및 Fig. 2.4 에 全實驗裝置의 略圖와 粘彈性流體의 噴出裝置 및 噴出管 詳細圖를 表示하였고 各各의 寫眞을 Fig. 2.5 와 Fig. 2.6 및 Fig. 2.7 에 보이고 있다. 本裝置는 피아노線의 비틀림角을 測定하여 제트의 反力を 求할 수 있도록 한 것이다. 즉, 上下 2.96 m 사이에 팽팽히 당겨진 피아노線(直徑 1.2 mm 인 Stainless Steel 製)의 途中에 제트噴出裝置가 그의 上下에 附着된 척(Chuck)에 依해서 固定되어 있다. 噴出裝置로부터는 內徑 3.3 mm 인 4 個의 黃銅管이 半徑方向에 各各 90°의 間격으로 設置되고 그의 先端에는 스테인레스鋼製의 噴出管이 直角으로 裝置되어 있다. 또한 黃銅管은 直徑이 다른 噴出管으로 交換될 수 있도록 製作하였으며 Fig. 2.4 에 5 種類의 噴出管의 寸수를 表示하였다. 溶液은 供給탱크에 貯藏된 後 容器에 移送되어 그곳에서 큰 壓力調整탱크에 依해 壓力이 調整된 다음 밑으로부터 비닐관을 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 통해서 噴出管으로부터 噴出되면 그의 反力에 相當하게

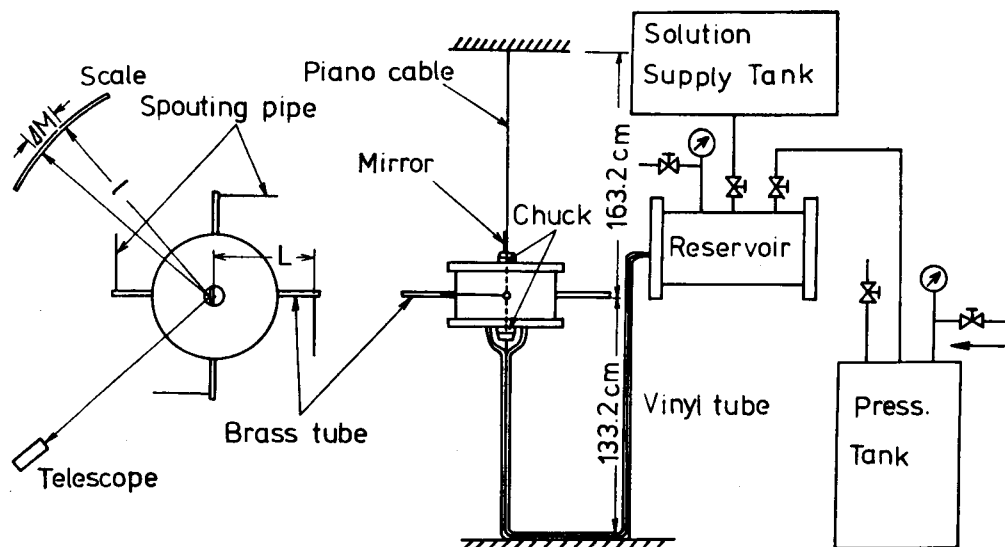


Fig. 2.2 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

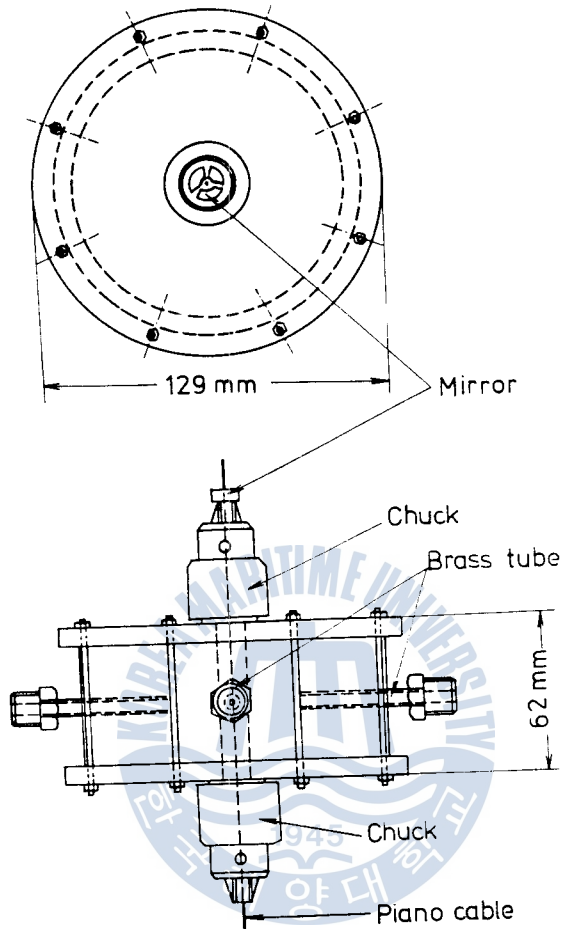


Fig. 2-3 Details of Spouting Apparatus

피아노선이 비틀린다. 그 비틀림角은 피아노線上에 附着된 小鏡에 비치는 스케일 (Scale)의 눈금을 望遠鏡으로 읽음으로써 알 수 있다. 또한 流量은 噴射流의 下方에 位置한 容器에 依해서 重量法으로 測定된다.

피아노線の 비틀림角度 $\theta = \Delta M / \ell$ 와 噴射流反力에 依한 토크(Torque) $T_M \cdot L$ 은 θ 가 微小한 範圍內에서는 比例한다고 看做할 수 있으므로

$$\Delta M / \ell = K \cdot L \cdot T_M \quad (2-19)$$

여기서 ΔM 은 스케일 눈금의 차이이며 ℓ 는 小鏡으로부터 스케일까지의 距離, L 는 피아노線으로부터 噴出管까지의 距離이고, K 는 比例定數인데 피아노線の 剛性率에 依하여 決定된다.

물의 境遇에는 $(T_M)_0 = 0$ 이고 指數 n 은 1인故로 (2-2)式으로부터 T_M 은 다음과 같이 된다.

$$T_M = T - f \quad (2-20)$$

또한 (2-9)式으로부터 T 는

$$T = \rho \pi \frac{4}{3} V^2 \frac{D^2}{4} = \frac{16 \rho}{3 \pi} \cdot \frac{Q^2}{D^2} \quad (2-21)$$

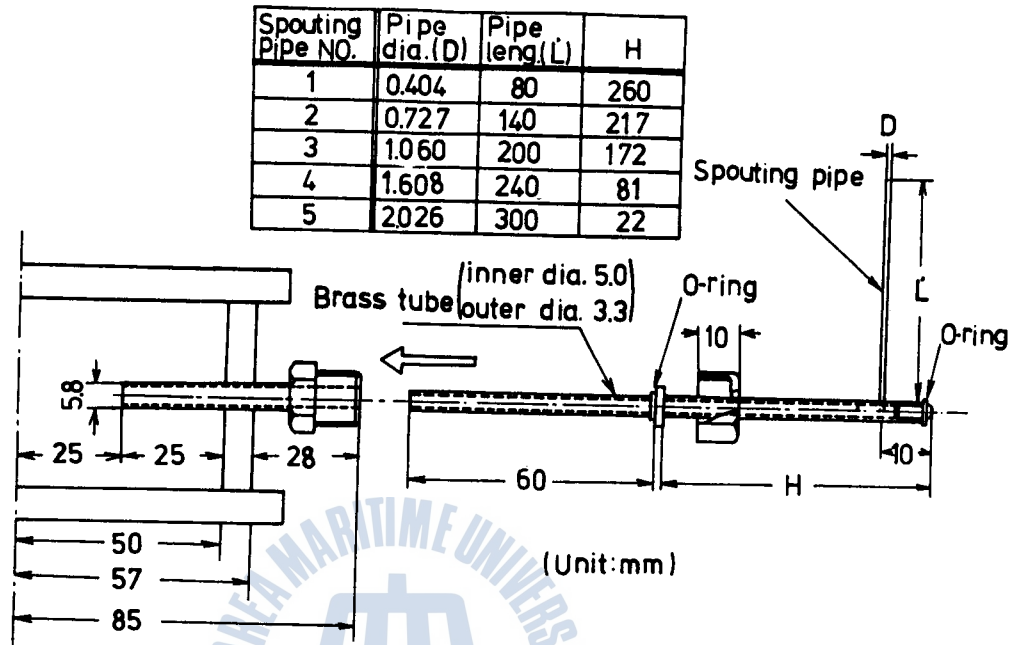


Fig. 2-4 Details of Spouting Pipe

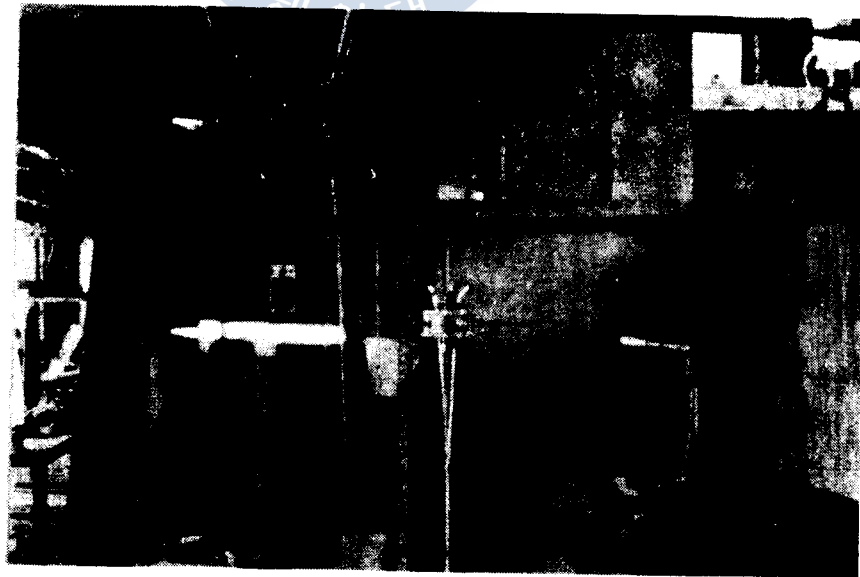


Fig. 2-5 Photo of Experimental Apparatus

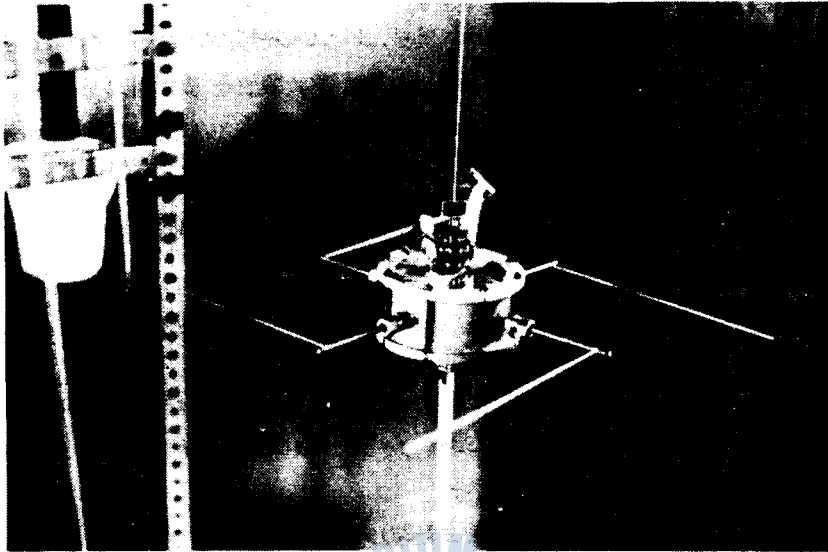


Fig. 2-6 Photo of Spouting Apparatus

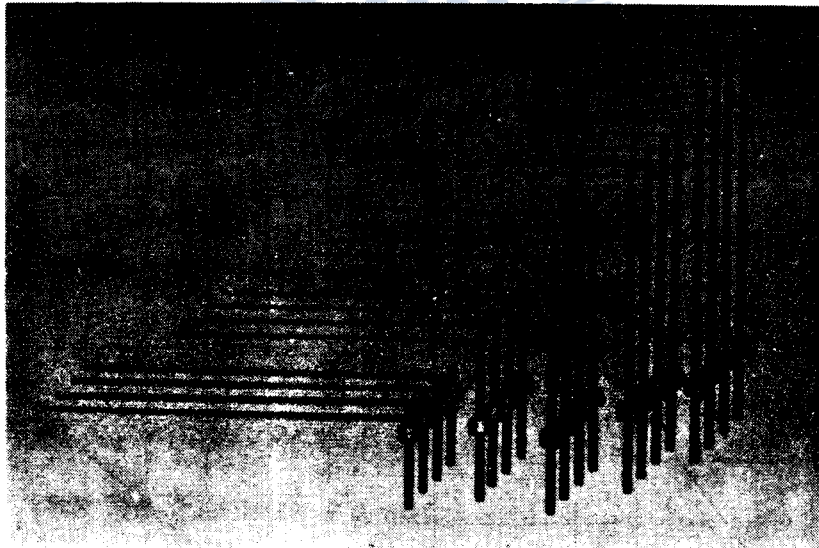


Fig. 2-7 Photo of Spouting Pipes

(2-19)式, (2-20)式 및 (2-21)式으로부터

$$\begin{aligned} \Delta M &= K \cdot \ell \cdot L \cdot T_M = K \cdot \ell \cdot L \left(\frac{16\rho}{3\pi} \cdot \frac{Q^2}{D^3} - f \right) \\ &= m_o Q^2 - \frac{3\pi D^3}{16\rho} \cdot m_o f \end{aligned} \quad (2-22)$$

여기서

$$m_o = K \cdot \ell \cdot L \cdot \frac{16\rho}{3\pi D^3} \quad (2-23)$$

물의 境遇, ΔM 와 Q^2 間에는 線形關係가 成立된다. 따라서 물의 實驗值로부터 $\Delta M \sim Q^2$ 의 그래프를 그리면 그의 기울기는 (2-22)式의 m_0 값이 된다. Fig. 2·8~Fig. 2·12는 물의 境遇에 있어서 5種類의 各 噴出管에 對해 求한 ΔM 와 Q^2 間의 關係를 보이는 實驗值를 表示하고 있는데, (2-22)式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 無關係한 裝置의 定數이다. m_0 의 값을 알면 Fig. 2·8~Fig. 2·12의 切片 $\frac{3\pi D^2}{16\rho} m_0 f$ 를 읽음으로써 表面張力에 依한 힘 f 를 알 수 있다. Fig. 2·13은 f 를 縱軸에, 管徑 D 를 橫軸에 取하여 만든 兩對數그래프이다. 기울기는 거의 1이고 $f \propto D$ 임을 알 수 있으며 切片으로부터 比例定數를 求하면,

$$f = 0.683 \pi D \sigma \quad (2-24)$$

但 σ 는 表面張力의 크기로서 本實驗에서 使用한 水道물에 있어서는 $\sigma = 72.5$ dyne/cm 이다. 從來 表面張力의 補正에는 여러가지로 論議가 있었으며, $f = \frac{\pi D}{2} \cdot \sigma$ 또는 $\pi D \sigma$ 등으로 表示하여 왔었으나^{4), 5)} 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 (2-19)式과 (2-23)式으로부터,

$$T_M = \frac{\Delta M}{K \cdot l \cdot L} = \frac{16\rho}{3\pi D^2} \cdot \frac{\Delta M}{m_0} \quad (2-25)$$

따라서 m_0 를 알면 T_M 이 求하여지며 (2-10)式으로부터 法線應力 (T_{\perp})₀가 求해진다.

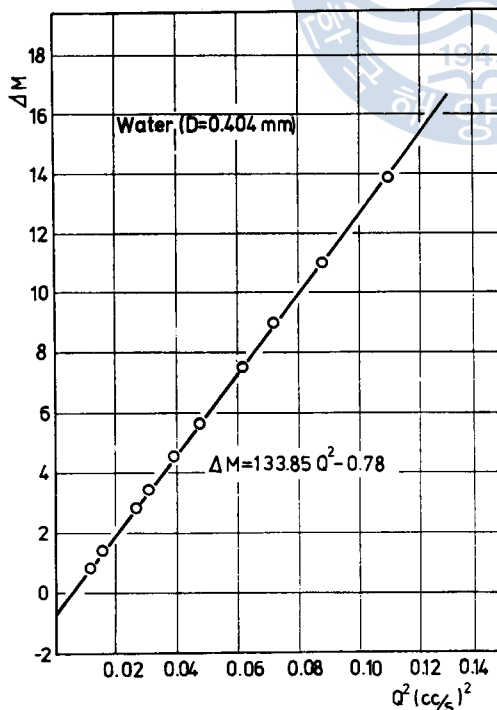


Fig. 2-8 ΔM versus Q^2 in Case of 0.404mm ϕ

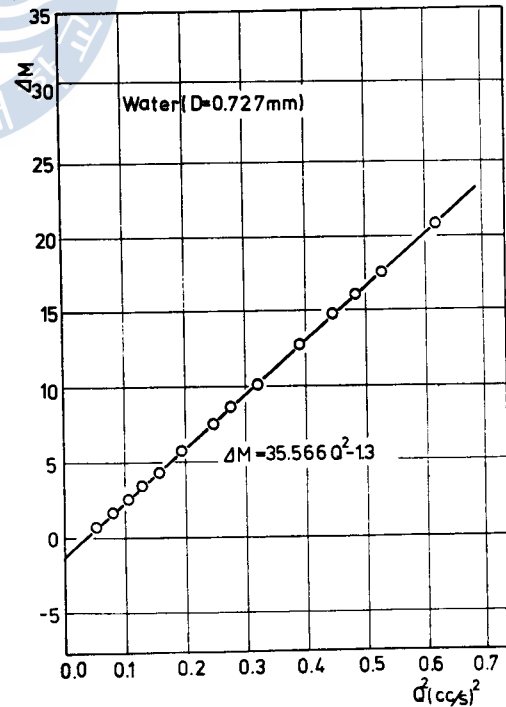


Fig. 2-9 ΔM versus Q^2 in Case of 0.727 mm ϕ

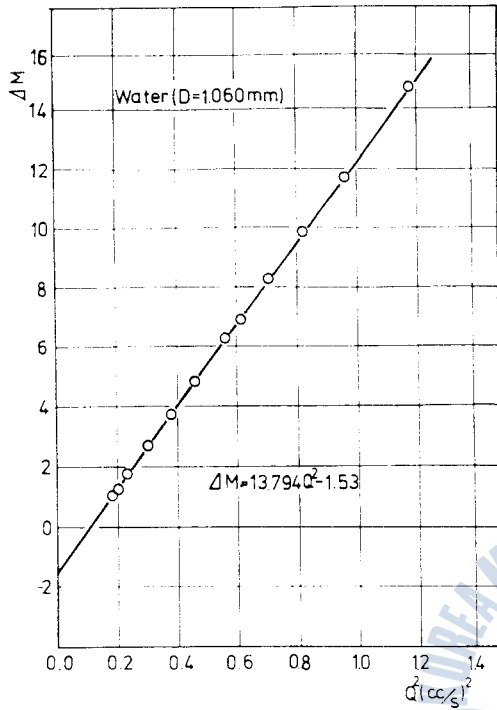


Fig. 2·10 ΔM versus Q^2 in Case of 1.060 mm ϕ

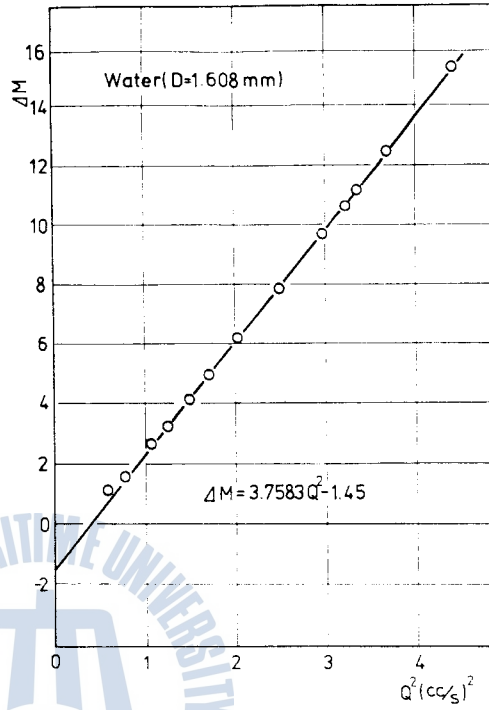


Fig. 2·11 ΔM versus Q^2 in Case of 1.608 mm ϕ

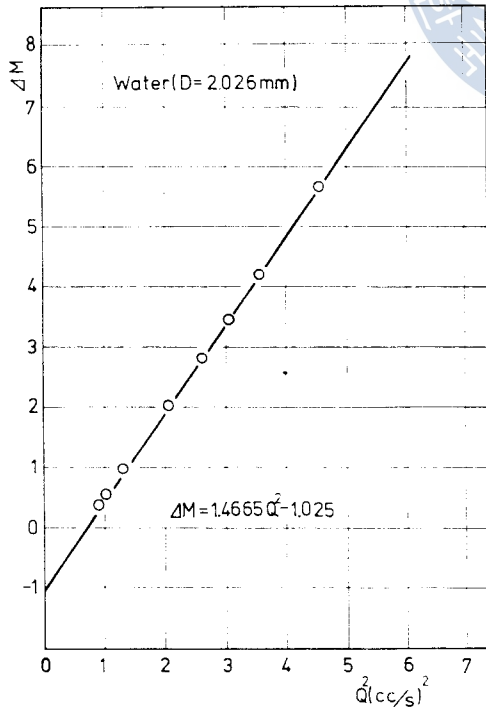


Fig. 2·12 ΔM versus Q^2 in Case of 2.026 mm ϕ

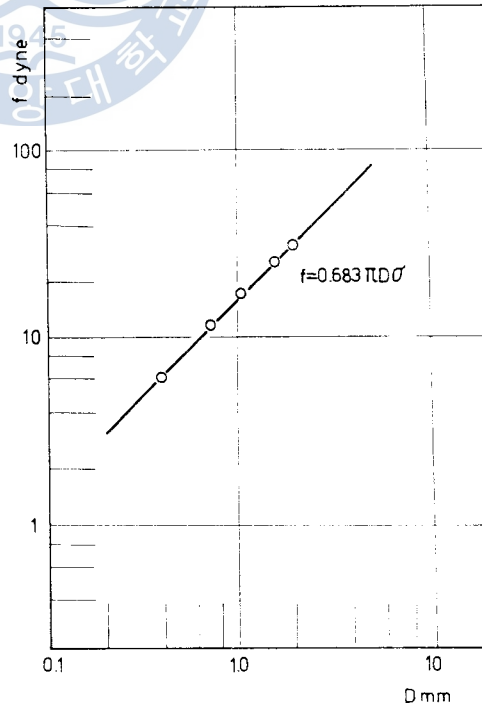


Fig. 2·13 Force f by Surface Tension versus Dia. D

2.3 法線應力測定の實驗結果 및 考察^(1), 13)

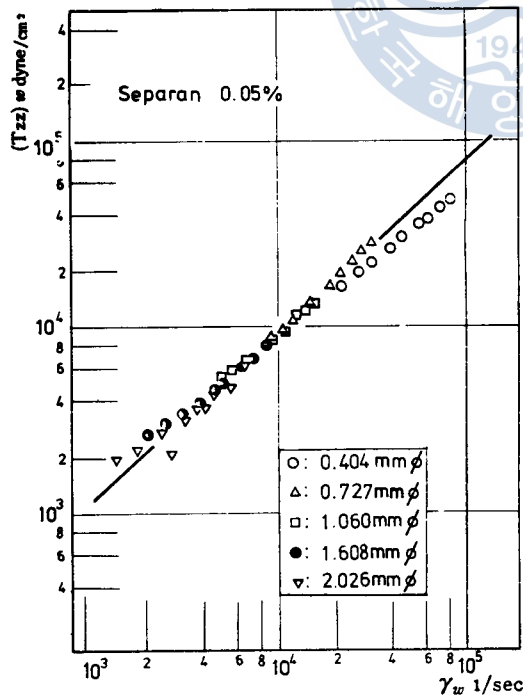
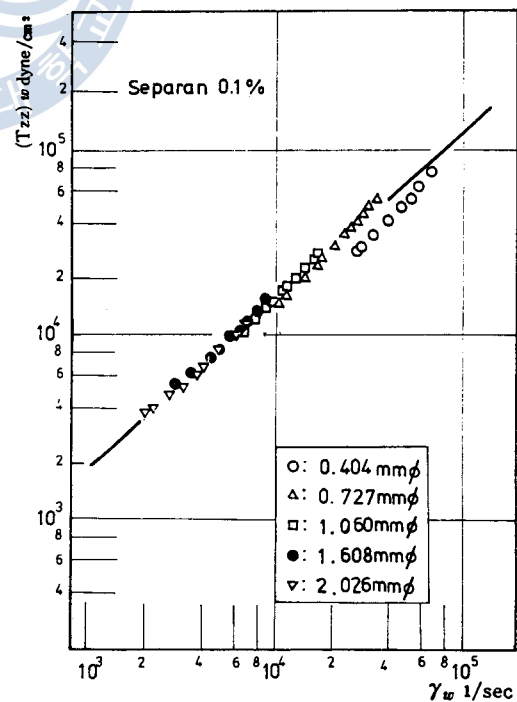
Fig. 2.14~Fig. 2.19는 法線應力(T_{zz})_w對 剪斷變形率 $\dot{\gamma}_w$ 를 兩對數그래프에 圖示한 實驗結果이다. 이 圖面에 依해 考察하여 보면 Separan과 PEO의 各濃度別 溶液에 對해서 어느 것이나 測定値는 噴出 管의 管徑에 關係없이 一直線上에 있는 것으로 看做되어서 直線을 그었다. 따라서 이 그래프들로부터 다음과 같은 關係가 成立됨을 알 수 있다^(1), 13).

$$(T_{zz})_w \propto \dot{\gamma}_w^k, \quad (k > 0) \quad (2-26)$$

各 그래프의 直線 기울기로부터 k 의 값을 Table 2.1과 같이 求할 수 있다.

Table 2-1 Data of k

Polymer and Concentration		$k: [(T_{zz})_w \propto \dot{\gamma}_w^k]$
Separan	0.05%	0.906
Separan	0.1%	0.909
Separan	0.5%	0.911
PEO	0.1%	1.042
PEO	0.5%	1.144
PEO	1.0%	1.224

Fig. 2-14 T_{zz} versus $\dot{\gamma}_w$ of Separan 0.05%Fig. 2-15 T_{zz} versus $\dot{\gamma}_w$ of Separan 0.1%

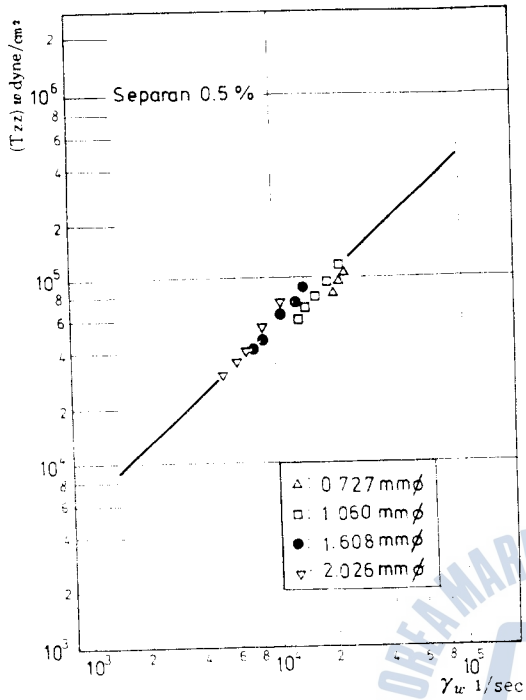


Fig. 2-16 T_{zz} versus γ_w of Separan 0.5%

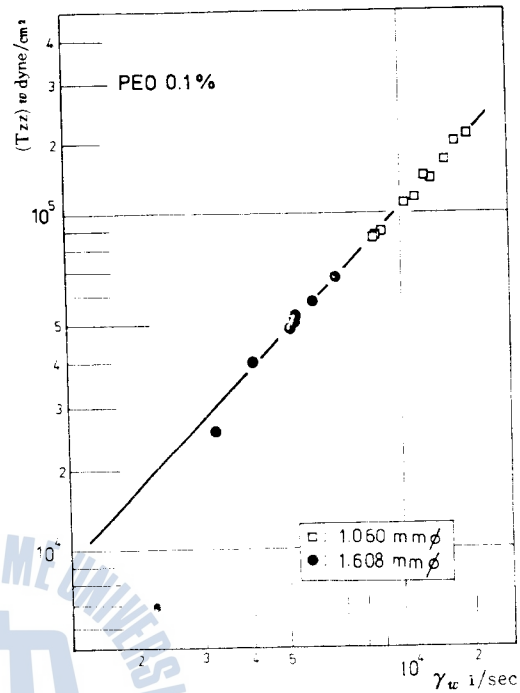


Fig. 2-17 T_{zz} versus γ_w of PEO 0.1%

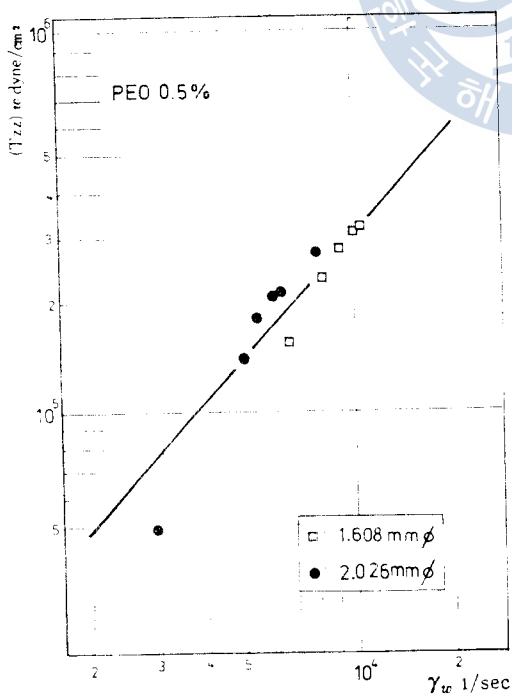


Fig. 2-18 T_{zz} versus γ_w of PEO 0.5%

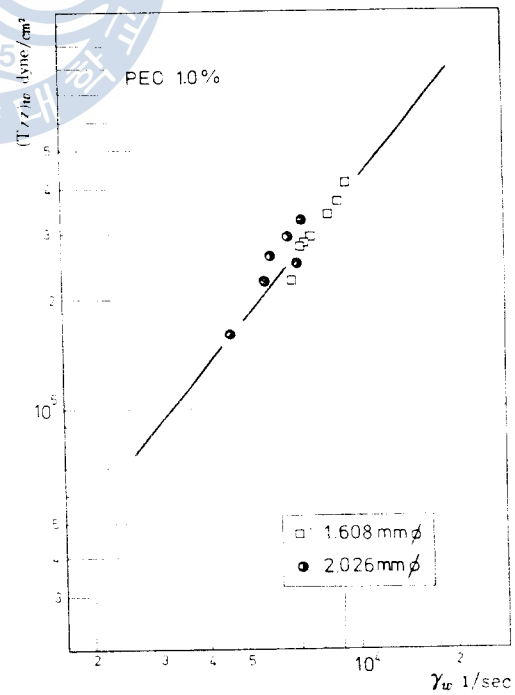


Fig. 2-19 T_{zz} versus γ_w of PEO 1.0%

本實驗에서는 管出口에서의 흐름이 포아스유(Poiseuille) 흐름이라는 假定下에 行하여 졌으므로, 管出口에서 實際 速度分布를 測定하여 確認해야 하나 管徑이 적으므로 大端히 困難하다. 그러나 實驗을 行한 範圍는 레이놀즈(Reynolds)數 1,000 以下이므로 充分히 層流領域이며 또한 管長은 管徑의 約 150 倍 程度인 故로 下流의 管内 및 管出口의 흐름은 포아스유 흐름이라고 看做할 수 있다¹⁶⁾. 本裝置에 依한 測定結果의 信賴性을 確認하기 爲해서는 리오고니오 미터나 流動複屈折法에 依한 結果와 比較해야 하나 이 裝置들은 溶液의 濃도가 높고 剪斷變形率이 낮은 境遇에 有効하므로 適當치 못하다. 本 測定値는 Oliver-McSparran¹⁷⁾ 및 長谷川¹⁸⁾의 實驗結果와 거의 一致하고 있으나, 溶液을 供給하는 비닐管의 影響 및 溶液中의 高分子제인의 機械的 退化가 管徑에 따라 다르게 되는 影響等에 依해 근소한 差異가 豫測된다.



第3章 示壓誤差의 測定

3·1 示壓誤差測定の 實驗方法 및 理論

粘彈性流體의 壁孔에 依한 壓力測定值의 誤差를 求하기 爲해서는 참 靜壓이 正確하게 把握되어야

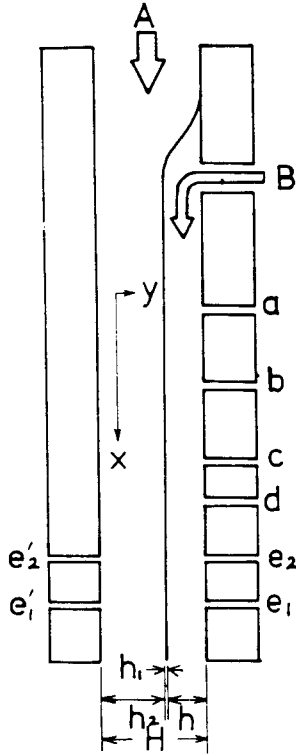


Fig. 3·1 Schematic Diagram of Channel

한다. 한편 流動場이 複雜하게 되면 剝離와 渦動이 發生하여 이
 로 因하여 뉴우톤流體의 境遇, 壓力損失이 發生하게 되는데 마찬
 가지로 粘彈性流體의 流動時에도 이와 같은 副次的 壓力損失의 發
 生이 豫測되므로 이러한 流動場에서 測定된 靜壓值은 靜壓孔의 影
 響에 依한 것과 앞서 言及한 副次的 壓力損失이 包含되어 本實驗
 의 目的인 壁孔에 依한 影響에 따른 靜壓損失만을 區別해서 測定
 하기가 困難하게 된다. 이와 같은 理由로 本實驗에서는 簡單한 流
 動場을 얻기 爲하여 Fig. 3·1과 같은 平行平板型의 채널(Channel)
 을 使用하여 實驗을 行하였다. 이 채널은 中間에 剛性이 無視되
 는 薄膜으로 된 아주 얇은 薄膜을 붙여서 2種의 流體가 2個의 領
 域으로 同時에 흐르게 되어 있다. 따라서 한쪽 領域에는 學動이
 確實한 물이 흐르게 하고 다른 쪽에는 粘彈性流體가 흐르게 하여
 그의 學動을 觀察하였다.

Fig. 3·1에서 A方向으로부터는 平行平板型粘度計에서와 같이
 粘彈性流體가 壓送되어 薄膜에 의해 分離된 채널內의 한쪽 領域
 으로 흐르게 된다. 反面에 다른 쪽의 領域에는 B方向으로부터 물
 이 壓送되어 흐른다. 뉴우톤流體의 壓力은 靜壓孔을 通하여 測定
 하더라도 正確한 靜壓을 나타내므로 물이 通하는 領域에 있어서의
 흐름의 狀態는 壁孔을 통해서 液柱計(Manometer)에 依해 正確히 把握할 수 있다. 물側의 靜壓孔 a, b, c, d는 各各 水銀液柱計에 接續되어서 a—b, b—c, c—d間의 各各의 差壓이 測定되므로 a~d間의 壓力勾配 分布를 알 수 있다. e₁과 e₁'는 0.5mm徑, e₂와 e₂'는 1.0mm徑의 壁孔으로서 各各 半導體 小型壓力變換器에 接續되어서 增幅器와 電壓計에 依해 e₁과 e₁' 및 e₂와 e₂'의 差壓이 測定된다. 여기서 徑이 다른 두 種類의 壁孔을 設置한 것은 壁孔의 크기에 따른 影響도 함께 觀察코자 함이다.

本實驗의 原理는 물側의 壓力勾配와 流量으로 물이 흐르는 狀態를 調査함으로써 粘彈性流體의 流動狀態를 알 수 있도록 하는 것이다. 즉 e₁과 e₁' 및 e₂와 e₂'의 各各의 參 靜壓은 같아야 할 것이다. 따라서 e₁과 e₁' 및 e₂와 e₂'에 對한 靜壓의 測定值가 相違하다면 그 各各의 差壓은 粘彈性流體側의 壁孔(e₁', e₂')에 依한 影響에 起因한 結果라고 할 수 있다. 즉 물側의 壁孔(e₁, e₂)에 依한 測定值는 그와 對應位置에 對한 粘彈性流體의 參 靜壓을 나타내고 있다. 上記한 本實驗의 概要를 물과

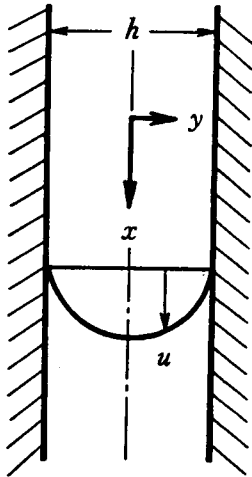


Fig. 3-2 Flow Pattern of Water

粘彈性流體의 順으로 詳細히 論하기로 한다.

물의 흐름은 Fig. 3-2 와 같은 平行平板間의 흐름이라고 看做한다. 한쪽은 채널의 側面이고 다른쪽은 薄膜으로서 壁面에 該當한다. 이 채널에 있어서 粘彈性流體와 물의 入口로부터 壁孔 e_2, e_2' 까지의 길이는 流路두께의 100 倍 以上이고, 兩側 壁孔 e_2, e_2' 의 上流側 水力勾配線이 直線의이며, 流路두께에 對한 流路幅 B는 溶液側에서 約 60 倍이고 물側에서는 200 倍 程度일뿐 아니라 層流인 點等으로 보아 이 흐름은 2次元 포아스유의 흐름이라고 할 수 있다. Fig. 3-2 에서와 같이 直角座標系 (x, y, z) 를 取해서 各의 速度成分을 (u, v, w) 라 하면,

$$u = u(y), \quad v = w = 0 \quad (3-1)$$

따라서 Navier-Stokes 方程式은 다음과 같이 된다.

$$0 = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{dp}{dx} + \rho g \right) + \nu \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (3-2)$$

그런데 充分히 發達된 흐름에 對하여 $\frac{dp}{dx}$ 는 一定值이므로 (3-2) 式을 積分하여 $y = \pm \frac{h}{2}$ 에서 $u = 0$ 인 境界條件을 適用하면

$$\begin{aligned} u &= -\frac{a}{2\nu} y^2 + \frac{ah^2}{8\nu} \\ &= \frac{1}{2\eta} \left(-\frac{dp}{dx} + \rho g \right) \left\{ -y^2 + \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right\} \\ \text{但 } a &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + g \end{aligned} \quad (3-3)$$

여기서 η 는 粘性係數이고 ν 는 動粘性係數이다. (3-3) 式에서 알 수 있는 바와 같이 速度分布는 拋物線狀이 된다. 또한 (3-3) 式을 積分해서 單位幅當의 流量 Q_w/B 를 求하면,

$$\frac{Q_w}{B} = 2 \int_0^{h/2} u \cdot dy = \left(-\frac{dp}{dx} + \rho g \right) \frac{h^3}{12\eta} \quad (3-4)$$

따라서 물의 流量 Q_w 및 壓力勾配 $\left(-\frac{dp}{dx} + \rho g \right)$ 를 測定하면 (3-4) 式으로부터 물의 流路두께 h 를 求할 수 있다.

다음으로 粘彈性流體의 흐름에 對하여 考察함에 있어 이 溶液도 물의 境遇와 같이 平行平板間의 흐름이라 看做한다. Fig. 3-3 과 같이 直角座標系를 取하면, 물의 境遇에서와 같이 $u = u(y), v = w = 0$ 이다. 여기서 應力 텐서 (Tensor) T_{ij} 를 다음과 같이 表示할 수 있다^{(7), (11)}.

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} \bar{P} & 0 & 0 \\ 0 & -\bar{P} & 0 \\ 0 & 0 & -\bar{P} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

$$\text{(但, } T_{ii} = -3\bar{P} + \tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz} \text{)}$$

여기서 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$ 는 偏差法線應力이며 τ_{xy} 는 剪斷應力이다. $-\bar{P}$ 는 法線應力의 平均値이며 (3-6) 式이 된다.

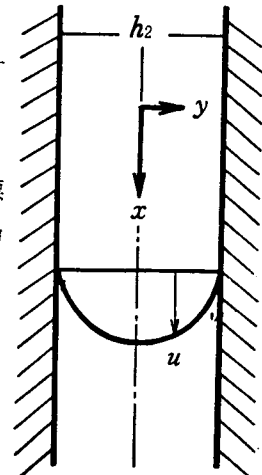


Fig. 3-3 Flow Pattern of Viscoelastic Fluid

$$-\bar{p} = \frac{1}{3} T_{ii} = \frac{1}{3} (T_{xx} + T_{yy} + T_{zz}) \quad (3-6)$$

또한 偏差成分에는 다음과 같은 關係가 있다.

$$\tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz} = 0 \quad (3-7)$$

Cauchy의 運動方程式은

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = \rho K_i + \frac{\partial T_{ji}}{\partial x_j} \quad (3-8)$$

여기서 $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$ 이고 K_i 는 外力 및 壓力勾配의 項이다.

$i=1$ 즉 x 方向에 對한 式은

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho K_x + \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} \quad (3-9)$$

그런데 流體의 흐름이 2次元 定常流이므로 (3-9)式은 다음과 같이 된다.

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} \quad (3-10)$$

但 p 는 等方性壓力(靜壓)이다. 따라서 (3-5)式과 (3-10)式으로부터

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (3-11)$$

上式을 積分하면,

$$\tau_{xy} = \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho g \right) y = \frac{y}{h/2} \cdot \tau_w \quad (3-12)$$

따라서

$$\tau_x = (\tau_{xy})_{y=h/2} = \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho g \right) \frac{h}{2} = \frac{h}{2} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta L} \quad (3-13)$$

但 h 는 粘彈性流體의 流路두께이며 $\Delta p / \Delta L$ 는 壓力勾配이다. 여기서 粘彈性流體의 流量을 Q_v 라 하면 單位幅當의 流量 Q_v/B 는,

$$\frac{Q_v}{B} = 2 \int_0^{h/2} u \cdot dy \quad (3-14)$$

(3-14)式을 邊界條件 $y=h/2$ 에서 $u=0$ 임을 適用하여 部分積分해서 (3-12)式을 代入하여 變數를 y 로 하여 τ_{xy} 로 變換하면 다음式이 된다.

$$\frac{Q_v}{B} = -\frac{h^2}{2} \left[\frac{\tau_w}{\tau_w} \right]_0^{\tau_w} \tau_{xy} \left[\frac{du}{dy} \right]_y \cdot d\tau_{xy} \quad (3-15)$$

(3-15)式에 $Q_v = BhV$ (V 는 平均流速임)의 關係를 代入해서 兩邊을 τ_w 로 微分하면,

$$\frac{2\tau_w}{h} \cdot \frac{dV}{d\tau_w} + 4 \frac{V}{h} = - \left(\frac{du}{dy} \right)_{h/2} \quad (3-16)$$

여기서 指數法則(Power Law)이 成立한다고 하면^{1),10)},

$$\tau_{xy} = m \left| \frac{du}{dy} \right| \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \quad (3-17)$$

그러므로

$$\tau_w = m\gamma_w^n \quad (3-18)$$

上式에서 m 는 리올러지定數(Rheology Constant)이며 γ_w 는 참 剪斷變形率이다. 또한 壁面에 있어서의 겉보기剪斷變形率(Apparent Shear Rate) Γ_w 는 (3-3)式을 y 로 微分해서 $y=h_2/2$ 를 代入하면,

$$\Gamma_w = \frac{6V}{h_2} \quad (3-19)$$

이 되므로 (3-18)式의 關係를 (3-16)式에 代入하면 壁面에 있어서의 참 剪斷變形率 γ_w 는

$$\gamma_w = \frac{2n+1}{3n} \cdot \frac{6V}{h_2} = \frac{2n+1}{3n} \Gamma_w \quad (3-20)$$

2次元 흐름에 있어서의 一般레이놀즈數(Generalized Reynolds Number) R_*^* 는

$$R_*^* = \frac{6 \cdot \rho \cdot V^2}{\tau_w} \quad (3-21)$$

이므로 (3-13)式과 (3-21)式으로부터 R_*^* 가 求하여진다.

本實驗에서 採用한 流路는 以上과 같이 물과 高分子폴리머溶液이 隣接하여 同時に 흐르기 때문에 兩者間에는 다음과 같은 關係가 成立한다.

$$h + h_1 + h_2 = H \quad (3-22)$$

$$Q_w + Q_v = Q_T \quad (3-23)$$

但 h_1 은 薄膜의 두께로서 本實驗裝置에서는 1/100 mm이며 H 는 채널의 全두께로서 1.0 mm이다. Q_T 는 全流量으로서 重量流量法에 依해 測定된다.

上記한 理論을 整理하여 보면 (3-13)式으로부터 τ_w , (3-19)式에서 Γ_w 를 求할 수 있으며 (3-18)式에서 알 수 있듯이 $\log \tau_w$ 對 $\log \Gamma_w$ 의 그래프를 그리면 그 勾配로부터 指數 n 을 求할 수 있고 또한 (3-20)式으로부터 γ_w 를 알 수 있다. 이와 같이 해서 물 및 粘彈性流體의 흐름狀態를 把握할 수 있다.

3.2 示壓誤差의 測定原理

流路內의 薄膜은 두께 1/100 mm의 極히 얇은 비닐薄膜으로서 그의 剛性에 依한 影響은 無視할 수 있다고 看做된다. 물側 및 粘彈性流體側의 채널側面의 對應한 位置에 設置된 壁孔 e_1 과 e_1' 및 e_2 와 e_2' 에 있어서 側面에 垂直한 方向의 應力에 對해서 考慮한다.

Cauchy의 運動方程式 (3-8)式에서 $i=2$, 즉 y 方向에 對해서 생각하면 運動方程式은,

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho K_y + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} \quad (3-24)$$

流體의 흐름은 x 方向의 發達된 2次元 定常流라 할 수 있고, 또한 y 方向에 外力이 作用하지 않는다면 $K_y=0$ 이 된다. 따라서 (3-24)式은

$$\frac{\partial T_{yy}}{\partial y} = 0 \quad (3-25)$$

그러므로

$$[T_{yy}]_x = \text{const.} \quad (3-26)$$

(3-26)式은 2次元 定常流에 있어서 어떤 固定位置 x 를 取하면 그곳에 있어서의 y 方向의 應力은 一

定值가 變을 나타내고 있다. 換言하면 膜을 中間에 끼우고 向해 있는 壁面의 靜壓孔 e_1 과 e'_1 및 e_2 와 e'_2 에 實際로는 各各 同一한 크기의 應力이 加해지고 있다. 즉 x 값이 같은 位置에 設置된 各壁孔 e_1 과 e'_1 그리고 e_2 와 e'_2 에 있어서의 差 靜壓은 各各 同一值가 된다.

이러한 壁孔들로부터 應答이 빠른 半導體 小型壓力變換器로써 그곳의 各 靜壓을 測定한다. 壁孔의 狀態는 兩方의 流路에 물을 通했을 때 e 側과 e' 側에서 測定한 靜壓에 差가 전혀 나타나지 않았던 結果로 因해서 正確한 測定을 行할 수 있는 狀態에 있음을 確認할 수 있다. 따라서 물側과 粘彈性流體 側에서 測定한 靜壓值에 差異가 있다면 그것은 粘彈性流體에 對한 壁孔의 影響에 起因한 壓力測定 值의 誤差라고 할 수 있다.

3.3 示壓誤差測定의 實驗裝置

實驗裝置 全體의 略圖와 寫眞을 Fig. 3.4 와 Fig. 3.5 에, 채널의 寫眞 및 詳細圖를 Fig. 3.6 과 Fig.

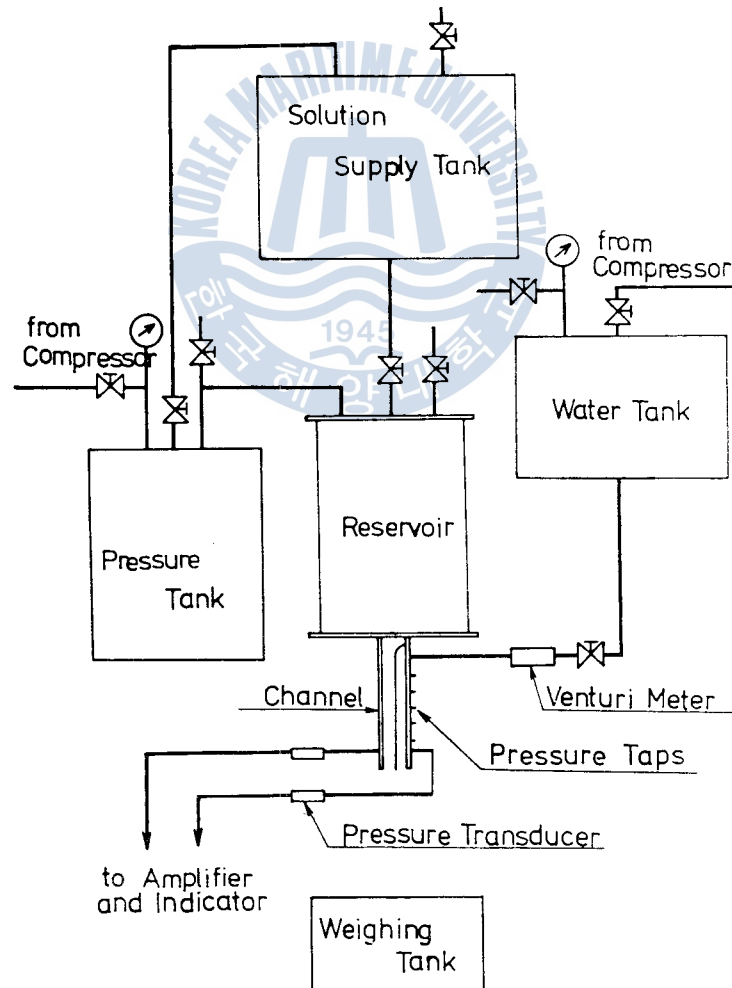


Fig. 3.4 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

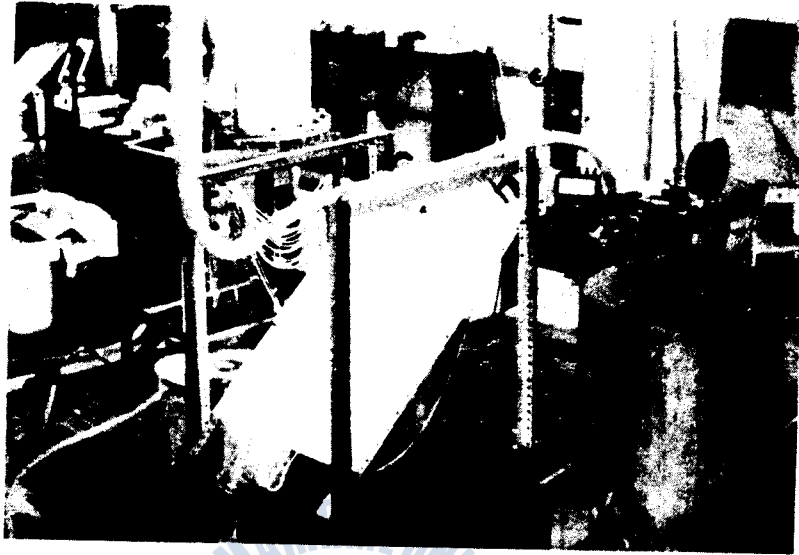


Fig. 3·5 Photo of Experimental Apparatus

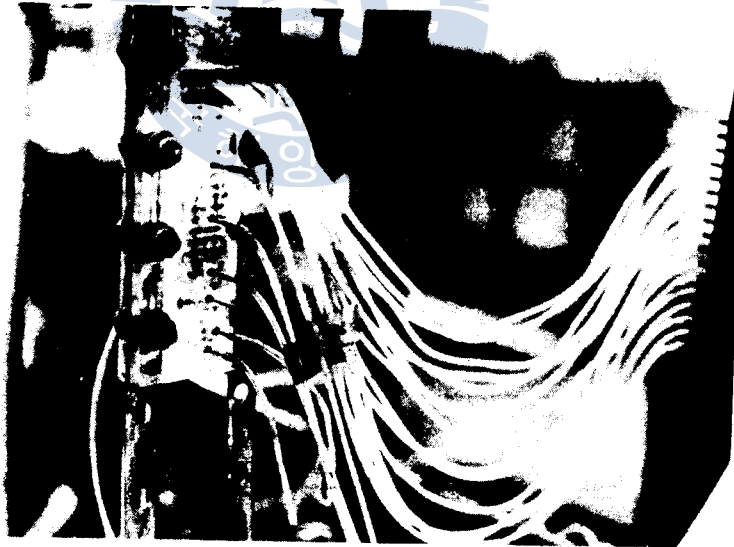


Fig. 3·6 Photo of Channel

3·7에 各各 圖示하였다. 이 裝置는 壓力調整탱크, 容器(Reservoir), 채널, 벤츄리計(Venturi Meter), 全流量測定器, 傾斜型 水銀差壓式液柱計, 물의 壓送탱크 및 試料供給탱크로 構成되어 있다.

容器는 圓筒型으로서 그의 下面에 채널이 設置되어 있다. 裝置의 主要部는 채널部로서 이곳으로 물과 粘彈性流體가 供給된다. 물은 一但 물壓送탱크에 貯藏되어 所定の 壓力으로 調整된 後에 벤츄-

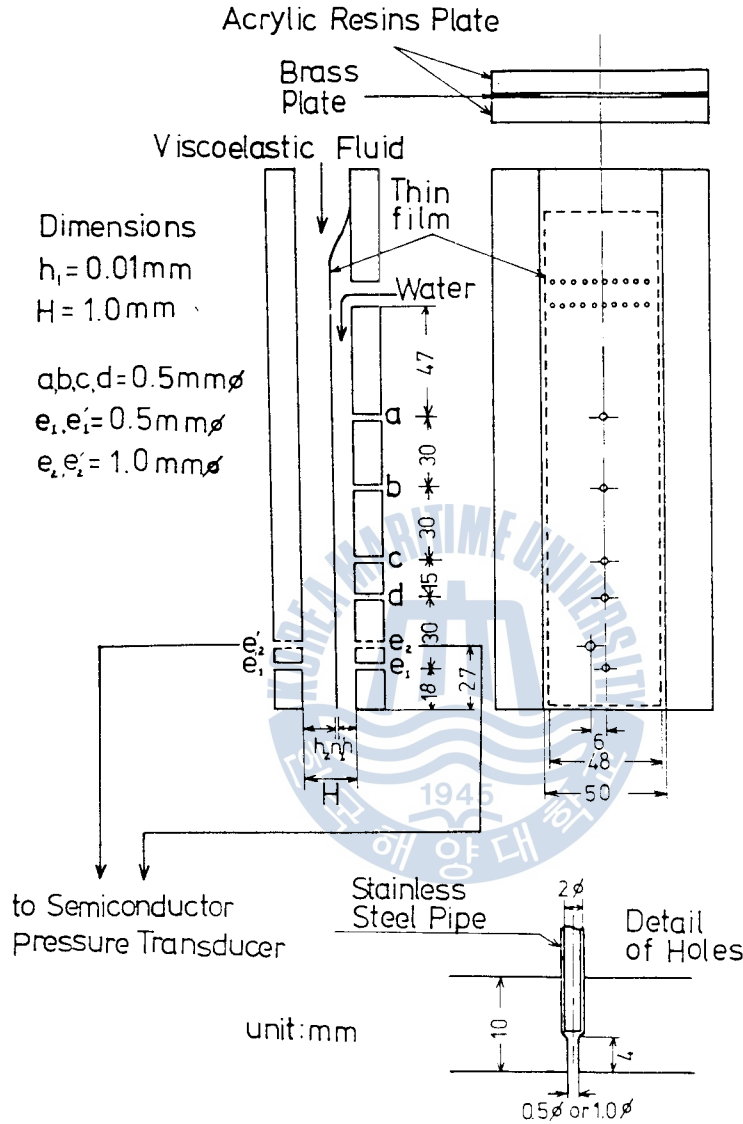


Fig. 3.7 Details of Channel

리計를 통해서 채널內의 한쪽으로 흐른다. 이때 벤튜리計에 依해서 물의 流量 Q_w 가 測定된다.

한편 粘彈性流體는 充分히 溶解된 後에 試料供給탱크에 貯藏되었다가 容器內로 供給된 後 그곳에서 適當히 加壓되어서 그의 下部에 設置되어 있는 채널內의 다른 쪽으로 흐르게 된다.

채널內部에는 薄膜이 붙어 있어서 물과 溶液은 分離되어 흐른다. 그래서 채널을 흘러나오는 물과 溶液은 그 밑에 位置한 流量測定用的 容器와 重量計에 依해서 全流量 Q_r 가 測定된다. 壓力調整탱크는 充分히 큰 것을 使用해서 實驗中の 壓力降下를 防止했다.

채널은 平行平板型으로서 流動狀態가 觀察되도록 本體는 長方形인 2枚의 透明한 아크릴板을 使用

하였으며 兩側端에는 두께 1mm인 黃銅板을 사이에 끼우고 보울트와 너트로 固定해서 製作한 것이다. 따라서 流路의 斷面形狀은 長方形으로서 두께(H)는 1mm, 幅(B)는 50mm이다. 또한 채널內部에는 그의 上端이 固定된 薄膜이 있어서 채널內에서 물과 溶液이 이 膜의 兩側에 各各 區分되어서 同時에 흐르도록 되어 있다. 물側의 채널側面 中心線에 4개의 靜壓孔(0.5mm ϕ)이 뚫려 있으며 各各 水銀液柱計에 接續되어 있는데 이것에 依해서 流動方向의 壓力勾配를 알 수가 있다. 또한 그 下方에는 直徑 0.5mm 및 1.0mm의 靜壓孔(e_1, e_2)이 있으며 溶液側에도 그것들과 對應한 位置에 同一徑의 靜壓孔(e'_1, e'_2)이 뚫려 있는데 半導體 小型 壓力變換器에 各各 接續되어서 增幅器를 통하여 靜壓이 測定되도록 되어 있다.

3.4 示壓誤差測定の 實驗結果 및 考察

Fig. 3-8 과 Fig. 3-9는 Separan 溶液과 PEO 溶液이 채널內를 흐를 때의 各流動狀態를 4개의 靜壓孔 a, b, c, d 에서 測定한 것으로서 壓力勾配는 同一하게 直線임을 알 수 있다. 여기에서 直線이 區分되어 있는 것은 流速들을 媒介로 하여 4個와 5個의 境遇에 對해서 나타내고 있기 때문이다. Fig. 3-8은 Separan 0.5%의 境遇로서 0.1%, 0.05%의 境遇에도 同一하기 때문에 省略했고, Fig. 3-9는 PEO 0.1%의 測定值인데 0.5%, 1.0%의 境遇도 同一하다. 이 그래프에 있어서 壓力勾配($-\frac{dp}{dx} + \rho g$)가 直線으로 나타나고 있음은 位置 x 에 關係없이 壓力勾配가 一定值로 되는 것을 보여주고 있으므로 薄膜과 壁面이 平行임을 確認시켜 준다. 따라서 (3-4)式으로부터 물흐름의 두께 h 가 求해진다. 즉

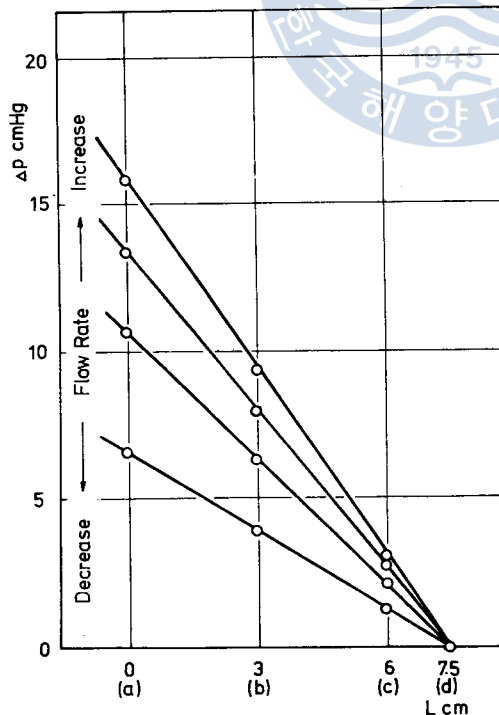


Fig. 3-8 Hydraulic Grade Line in Case of Separan

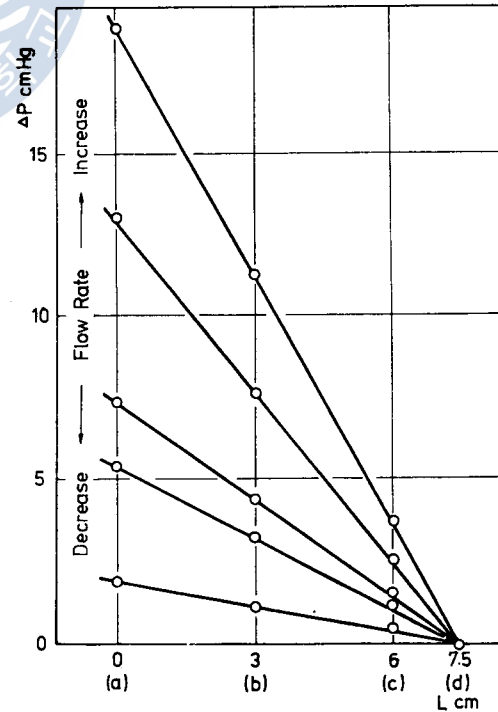


Fig. 3-9 Hydraulic Grade Line in Case of PEO

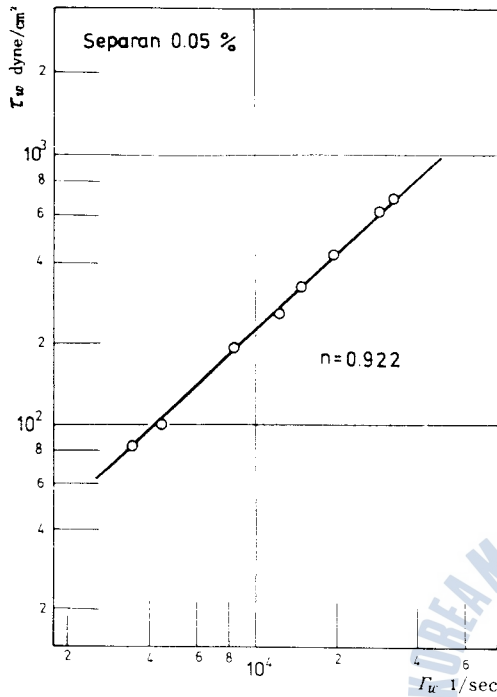


Fig. 3·10 τ_w versus $\dot{\Gamma}_w$ for Separan 0.05%

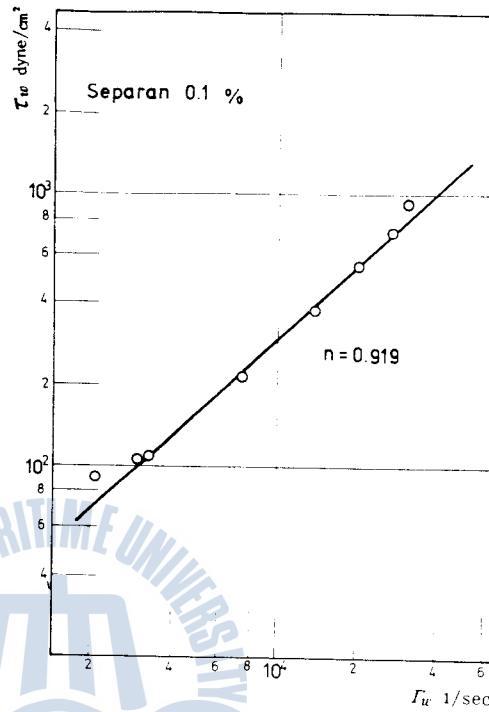


Fig. 3·11 τ_w versus $\dot{\Gamma}_w$ for Separan 0.1%

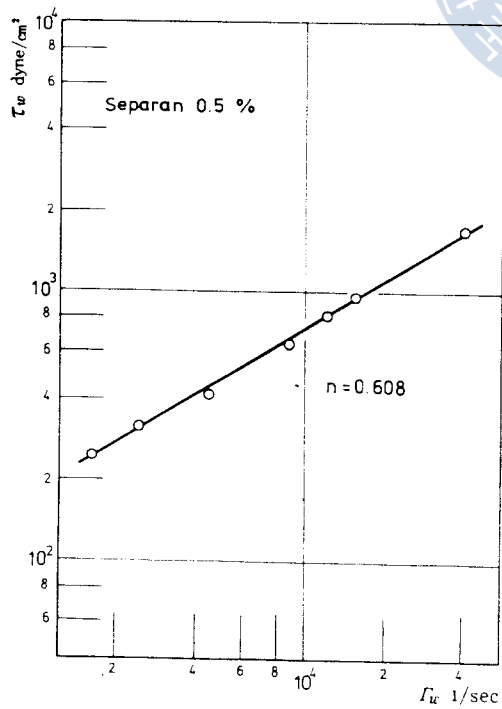


Fig. 3·12 τ_w versus $\dot{\Gamma}_w$ for Separan 0.5%

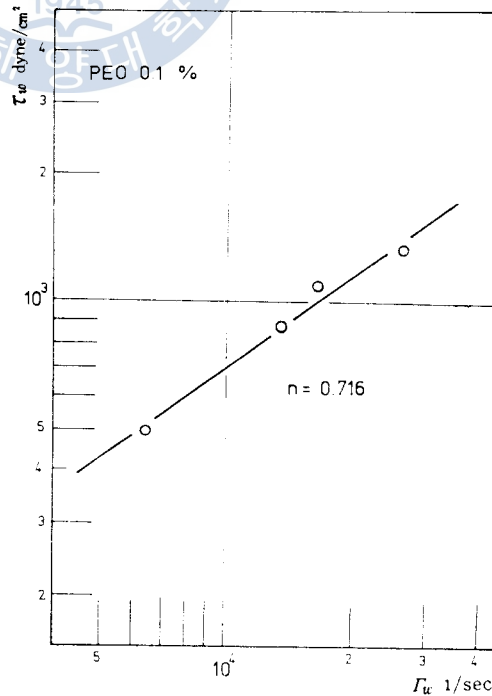


Fig. 3·13 τ_w versus $\dot{\Gamma}_w$ for PEO 0.1%

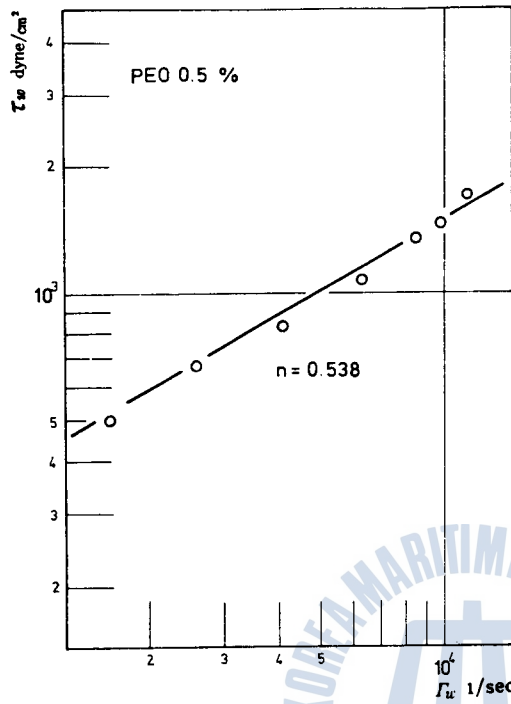


Fig. 3-14 τ_w versus Γ_w for PEO 0.5%

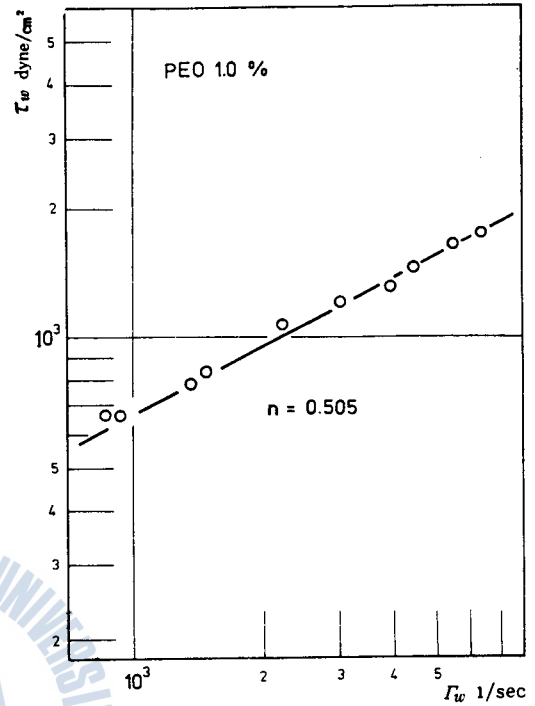


Fig. 3-15 τ_w versus Γ_w for PEO 1.0%

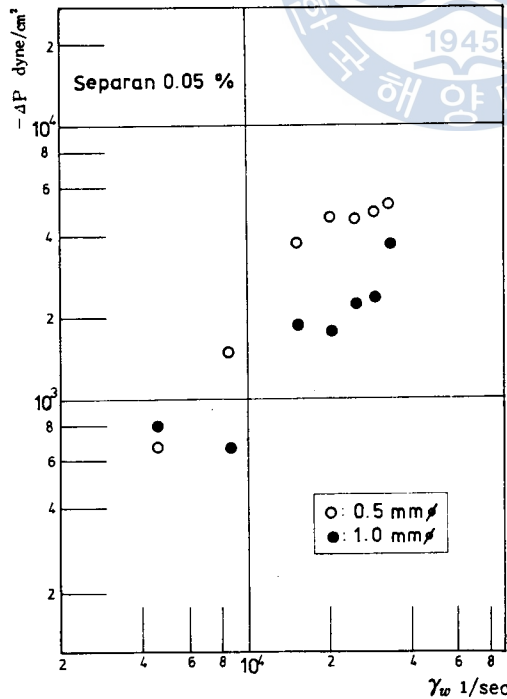


Fig. 3-16 $-\Delta P$ versus Γ_w for Separan 0.05%

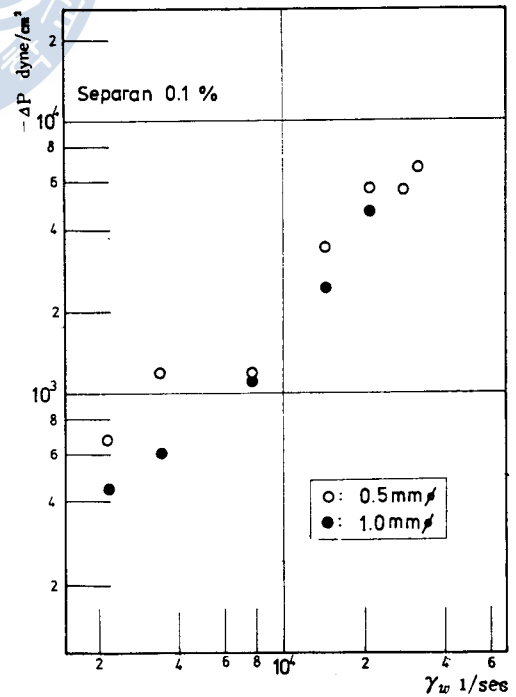


Fig. 3-17 $-\Delta P$ versus Γ_w for Separan 0.1%

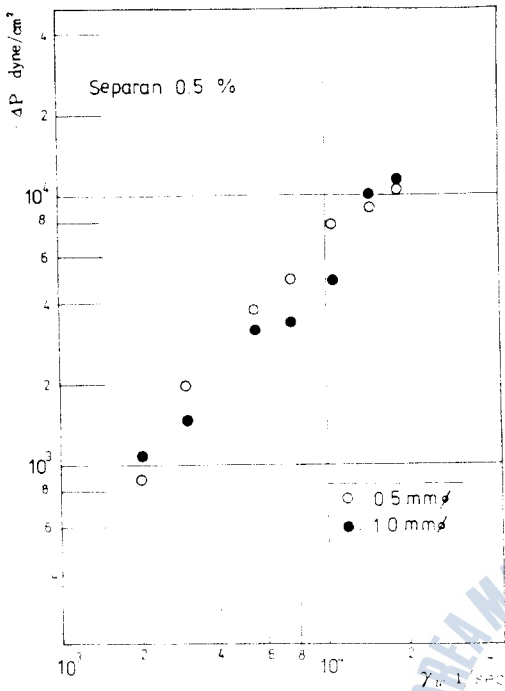


Fig. 3-18 $-\Delta P$ versus γ_w for Separan 0.5%

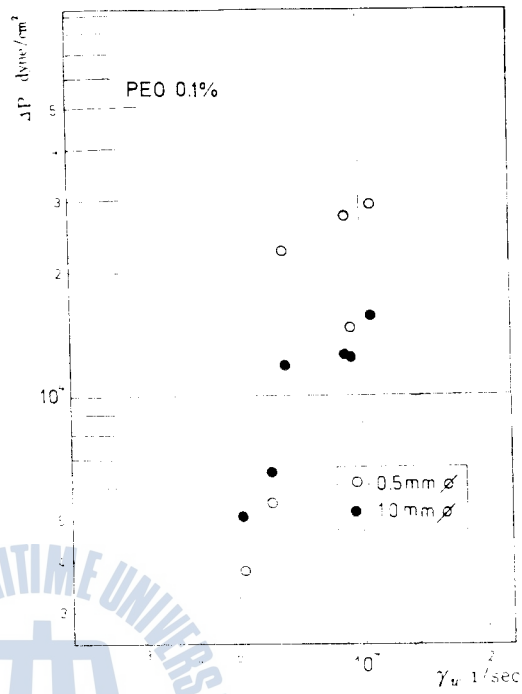


Fig. 3-19 $-\Delta P$ versus γ_w for PEO 0.1%

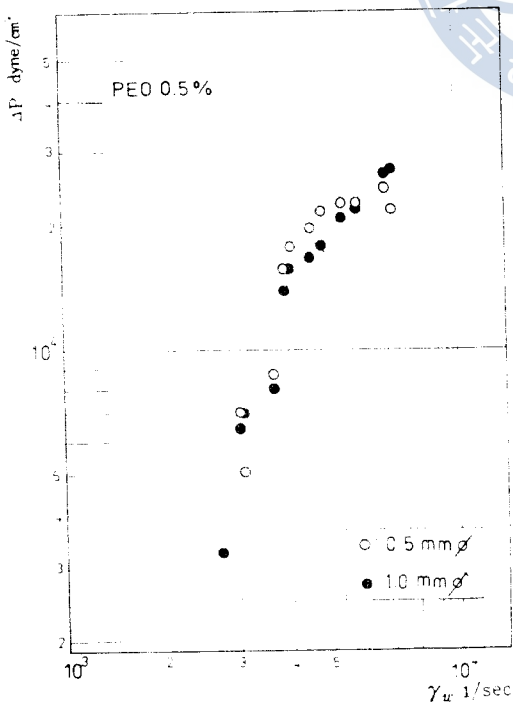


Fig. 3-20 $-\Delta P$ versus γ_w for PEO 0.5%

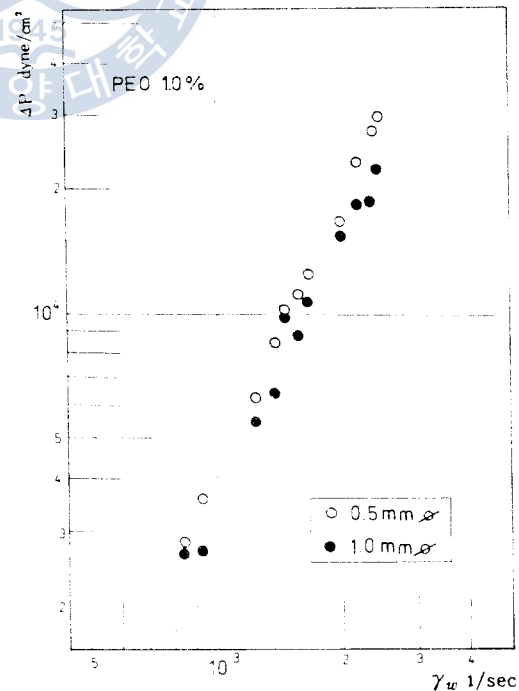


Fig. 3-21 $-\Delta P$ versus γ_w for PEO 1.0%

(3-4)式으로부터 다음 式이 誘導된다.

$$h = \left(\frac{12 \eta Q_w}{B} \cdot \frac{1}{\left(-\frac{dp}{dx}\right) + \rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-27)$$

(3-27)式에 依하면 h 가 位置 x 에 關係없이 一定値가 된다는 것을 알 수 있다. 즉 흐름이 平行平板 흐름이라고 假定하였던 事實을 滿足시키고 있다.

Fig. 3·10~Fig. 3·15는 Separan과 PEO 溶液의 濃度別 Γ_w 對 τ_w 의 關係를 兩對數그래프에 圖示한 것이다. (3-18)式的 指數法則 및 (3-20)式으로부터

$$\tau_w = m \gamma_w^n = m \left(\frac{2n+1}{3n} \right)^n \cdot \Gamma_w^n \quad (3-28)$$

이 되므로 이 式으로부터 알 수 있는 바와 같이 兩對數그래프의 直線기울기는 指數 n 을 表示하는 것으로 된다. 따라서 Fig. 3·10~Fig. 3·15에서 그래프의 기울기로부터 求한 各濃度別 n 의 값은 Table 3·1과 같다.

Table 3·1 Data of n

Polymer and Concentration		Power Exponent(n)
Separan	0.05 %	0.922
Separan	0.1 %	0.919
Separan	0.5 %	0.608
PEO	0.1 %	0.716
PEO	0.5 %	0.538
PEO	1.0 %	0.505

Fig. 3·16~Fig. 3·21은 橫軸에 壁面剪斷變形率 γ_w , 縱軸에 壁孔에 依한 測定差壓 즉 ΔP 를 溶液別로 兩對數 그래프에 圖示한 것이다. 한편 ΔP 는 다음과 같이 定義된다.

$$\Delta P = (\text{粘彈性流體側에서 測定된 靜壓值}) - (\text{참 靜壓值})$$

참 靜壓值 = 물側에서 測定된 靜壓值

따라서 $-\Delta P$ 는 壁孔에 依한 影響에 起因한 靜壓測定值의 誤差이다.

이와 같은 實驗結果를 Fig. 3·16~Fig. 3·21에서 考察하여 보면 靜壓孔에 依한 示壓의 誤差 $-\Delta P$ 는 높은 濃度の 溶液쪽이 크며 剪斷變形率 γ_w 가 클수록 增加함을 알 수 있다. 또한 直徑 0.5 mm인 壁孔側이 1.0 mm인 境廻보다 약간 큰 값을 나타내고 있긴 하나 근소하므로 壁孔의 크기에 依한 影響은 거의 無視할 수 있다고 본다.

第4章 示壓誤差에 미치는 影響

4.1 示壓誤差와 法線應力에 關한 考察^{19), 20)}

第3章에서 求한 示壓誤差와 第2章의 法線應力과의 關係를 考察코자 한다. 示壓誤差 $-\Delta P$ 의 測定値는 약간 遜어져 있긴 하나 γ_w 의 增加와 同時에 直線的으로 增加하고 있으므로 測定點이 一直線上에 있다고 看做되어 Fig. 4.1~Fig. 4.6 과 같이 直線으로 表示하였으며 이 그래프로부터 다음의 關係를 알 수 있다.

$$-\Delta P \propto \gamma_w^q, \quad (q > 0) \tag{4-1}$$

(4-1)式的 기울기 q 는 (2-26)式的 기울기 k 의 값과 大端히 가까운 값을 나타내고 있다. 즉 (2-18)式과 (2-26)式에서

$$(T_{zz})_w = (\tau_{zz} - \tau_{rr})_w \propto \gamma_w^k \tag{4-2}$$

그래프에서 兩기울기가 같다고 看做하여 ($k=q$), (4-1)式과 (4-2)式으로부터 다음과 같은 關係가 成立한다.

$$-\Delta P = C(\tau_{zz} - \tau_{rr})_w \tag{4-3}$$

但 C 는 比例常數이며, 靜壓孔의 影響에 依한 示壓의 誤差 ΔP 는 第1法線應力差 $(\tau_{zz} - \tau_{rr})_w$ 에 比例한다. 各 溶液에 對한 比例常數 C 의 값을 算出하면 Table 4.1 과 같다.

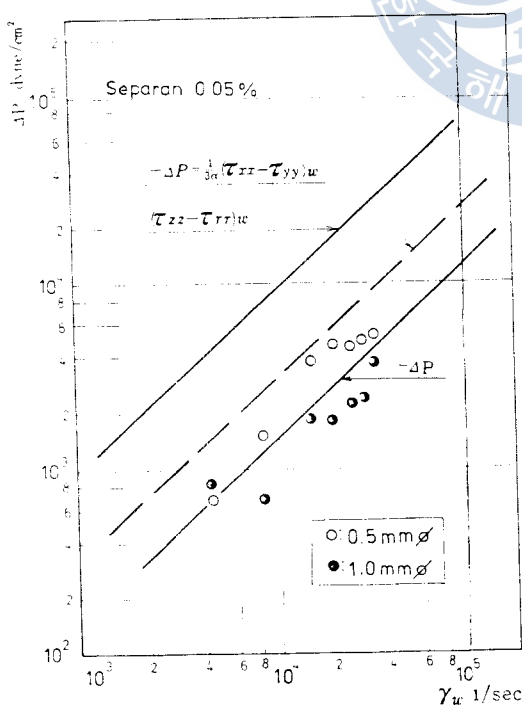


Fig. 4.1 $-\Delta P$ versus γ_w for Separan 0.05%

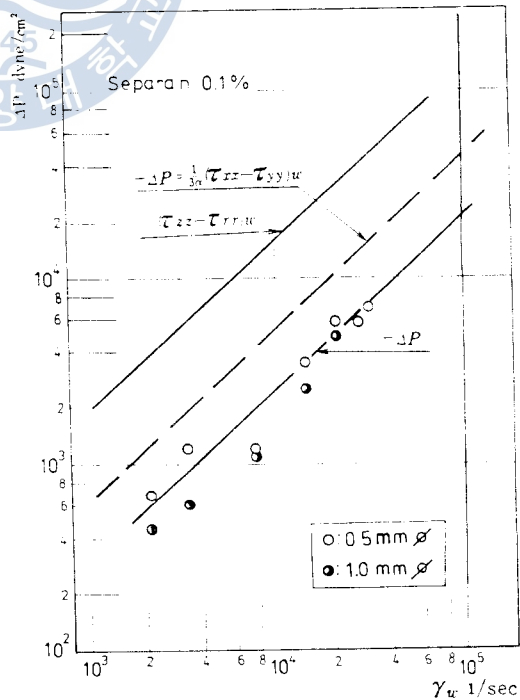


Fig. 4.2 $-\Delta P$ versus γ_w for Separan 0.1%

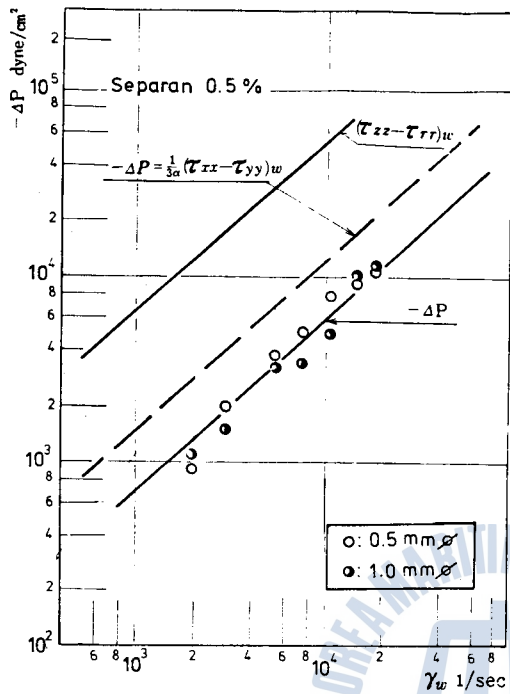
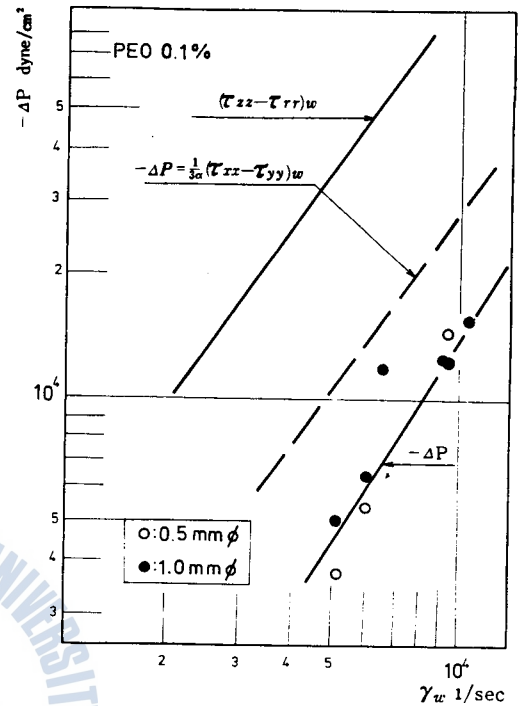
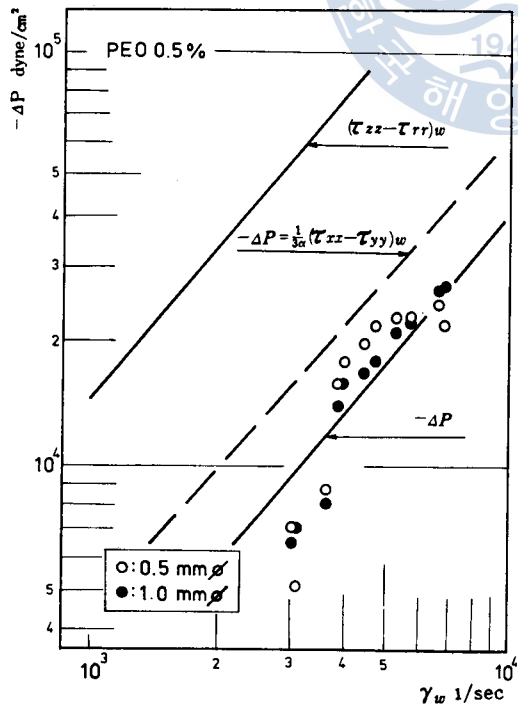
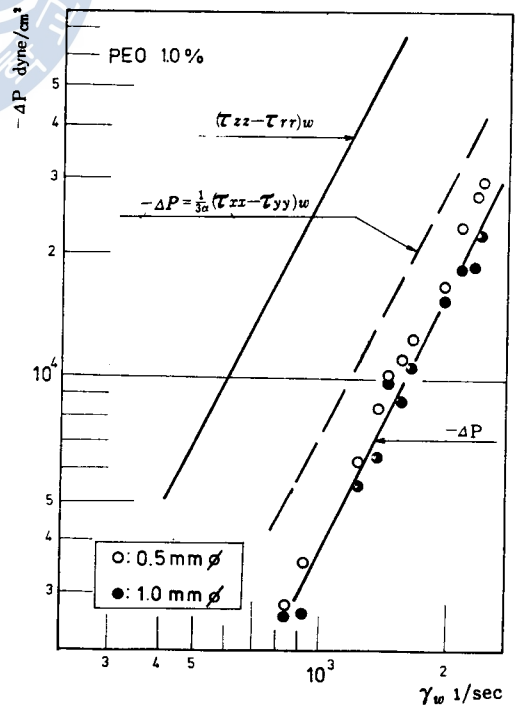
Fig. 4.3 $-\Delta P$ versus γ_w for Separan 0.5%Fig. 4.4 $-\Delta P$ versus γ_w for PEO 0.1%Fig. 4.5 $-\Delta P$ versus γ_w for PEO 0.5%Fig. 4.6 $-\Delta P$ versus γ_w for PEO 1.0%

Table 4·1 Data of C

Polymer and Concentration		Proportional Constant(C)
Separan	0.05%	0.16
Separan	0.1 %	0.15
Separan	0.5 %	0.12
PEO	0.1 %	0.13
PEO	0.5 %	0.14
PEO	1.0 %	0.14

Table 4·1에서 보는 바와 같이 比例常數 C의 값은 매우 비슷한 값으로 나타난다. 比例常數 C의 平均値를 \bar{C} 라 하고 標準偏差를 δ 라 하면 다음과 같이 된다.

$$\bar{C} = 0.14 \tag{4-4}$$

$$\delta = 0.0129 \tag{4-5}$$

여기서 標準偏差 δ 는 大端히 微少하므로 Separan과 PEO溶液에 對해서는 다음과 같이 成立한다고 할 수 있다.

$$-\Delta P = 0.14(\tau_{xx} - \tau_{yy})_w \tag{4-6}$$

여기서 從來의 研究結果인 Higashitani¹²⁾의 理論解析 結果와 比較 檢討하여 본다. Higashitani에 의한 理論의 要旨는 다음과 같다. 靜壓孔에 있어서의 흐름이 球面狀으로 흘러 들어가는 흐름이라고 假定해서 運動方程式을 풀어서 다음의 式을 誘導하였다¹²⁾.

$$\Delta P = -\frac{1}{3} \left(\frac{\tau_{xx} - \tau_{yy}}{\alpha} - \frac{\tau_{yy} - \tau_{zz}}{\beta} \right)_w \tag{4-7}$$

但 α 와 β 는 다음 式으로 定義된다.

$$\tau_{xx} - \tau_{yy} \propto \tau_{yx}^a, \quad \tau_{yy} - \tau_{zz} \propto \tau_{yx}^b$$

여기서 直角座標系(x, y, z)와 本實驗의 細管에 의한 法線應力의 測定에서 表示한 圓筒座標系(r, θ , z)와의 關係는 다음과 같다. x는 z, y는 r, z는 θ 의 方向에 各各 對應한다. 즉 $\tau_{rx} = \tau_{rz}$, $\tau_{xx} = \tau_{zz}$, $\tau_{yy} = \tau_{rr}$, $\tau_{zz} = \tau_{\theta\theta}$ 이다. 第2法線應力差($\tau_{yy} - \tau_{zz}$)는 第1法線應力差($\tau_{xx} - \tau_{yy}$)와 比較하면 極히 微少하므로 그것을 無視하면 Higashitani의 (4-7)式은 다음과 같이 된다.

$$\Delta P = -\frac{1}{3\alpha} (\tau_{xx} - \tau_{yy})_w \tag{4-8}$$

즉 本實驗結果로부터 誘導한 (4-3)式의 比例常數 C가 (4-8)式의 $\frac{1}{3\alpha}$ 에 相當한다. 또한 α 는 (3-18)式과 (4-2)式의 關係로부터 다음과 같이 해서 求할 수 있다.

$$(\tau_{xx} - \tau_{yy})_w \propto \tau_w^{k/n} \tag{4-9}$$

$$\alpha = \frac{k}{n} \tag{4-10}$$

k는 Table 2·1에, n는 Table 3·1에 各各 表示되어 있으므로 (4-10)式으로부터 計算하면 α 의 값은 Table 4·2와 같다.

Table 4.2 Data of α

Polymer and Concentration		k	n	α	$\frac{1}{3\alpha}$
Separan	0.05%	0.906	0.922	0.983	0.339
Separan	0.1%	0.909	0.919	0.989	0.337
Separan	0.5%	0.911	0.608	1.498	0.222
PEO	0.1%	1.042	0.716	1.455	0.485
PEO	0.5%	1.144	0.538	2.126	0.157
PEO	1.0%	1.224	0.505	2.423	0.138

上記한 α 의 값을 (4-8)式에 代入해서 求한 ΔP 를 點線으로써 Fig. 4.1~Fig. 4.6에 同時に 表示하였다. 즉 Higashitani의 式에 依한 結果는 各 濃度에 對해서 어느 것에서나 $-\Delta P$ 의 값이 本實驗에서 求한 差壓 $-\Delta P$ 보다도 약간 크게 나타나고 있으며 그 對數值的 差異는 γ_w 에 關係없이 溶液의 種類와 濃度에 따라 一定하다. $\gamma_w = 10^4$ (1/sec)일 때의 示壓誤差의 差異와 그 對數值的 差異를 나타내면 Table 4.3과 같다.

Table 4.3 Data of Differences

Polymer and Concentration		Difference of $-\Delta P$ at $\gamma_w = 10^4$ (1/sec)		Difference of Logarithmic Value
Separan	0.05%	1,600	dyne/cm ²	2.07
Separan	0.1%	2,600	dyne/cm ²	2.0
Separan	0.5%	6,000	dyne/cm ²	2.0
PEO	0.1%	14,000	dyne/cm ²	1.93
PEO	0.5%	21,000	dyne/cm ²	1.53
PEO	1.0%	22,000	dyne/cm ²	1.64

4.2 示壓誤差와 一般레이놀즈數에 關한 考察

Fig. 3.16~Fig. 3.21에 表示된 示壓誤差 $-\Delta P$ 를 無次元化하기 위하여 流體의 動壓인 $\frac{1}{2}\rho V^2$ 으로 나눈 無次元數($-\Delta P / \frac{1}{2}\rho V^2$)를 取해서 그 結果를 Fig. 4.7~Fig. 4.12의 그래프에 表示하였다. 이 그래프를 考察하면 各 溶液의 濃度別 그래프에서는 直線으로 되지만 Fig. 4.13과 Fig. 4.14에서와 같이 같은 種類의 溶液이라도 濃度가 다르면 同一直線上에 表示되지 않으므로 濃度와 關係없는 一般式을 求할 수 없다.

本項에서는 示壓誤差와 一般레이놀즈數의 關係를 考察하기 위하여 無次元數($-\Delta P / \frac{1}{2}\rho V^2$)對 一般레이놀즈數 R_e^* 를 兩對數 그래프에 Fig. 4.15와 Fig. 4.16과 같이 나타낼 수 있다. 즉 Fig. 4.15와 Fig. 4.16에 依하면 Separan과 PEO 溶液의 濃度에 關係없이 種類가 同一하면 거의 直線上에 表示되므로 $\log(-\Delta P / \frac{1}{2}\rho V^2)$ 對 $\log R_e^*$ 의 그래프로부터 그의 기울기와 切片을 求하면 다음과 같은 實驗式이 本實驗 範圍內에서 成立된다고 할 수 있다.

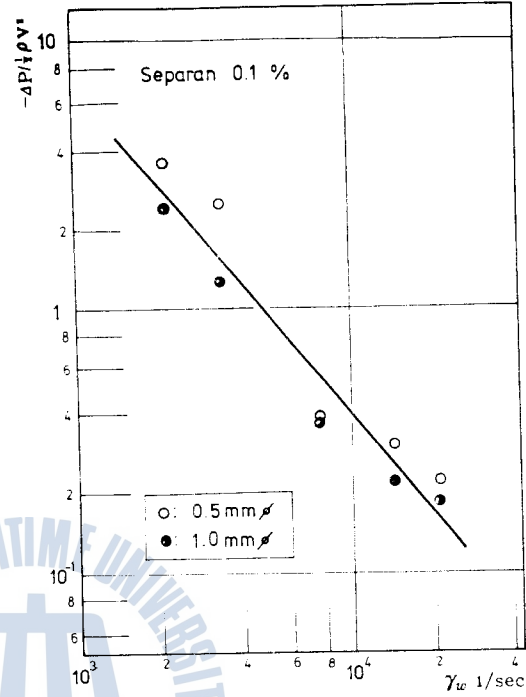
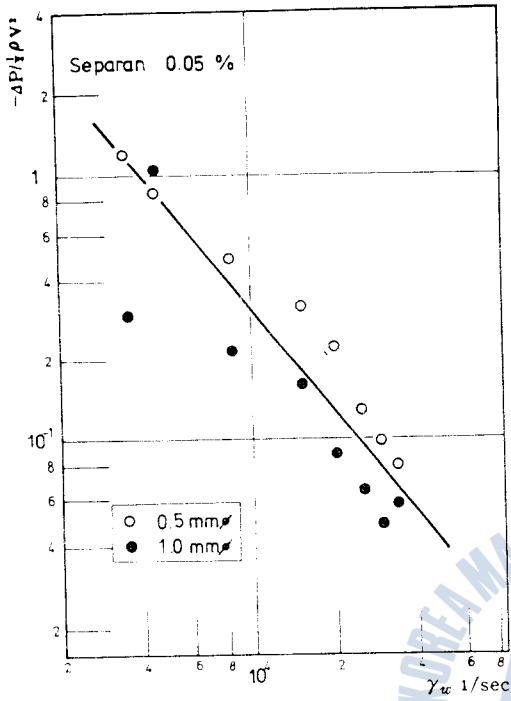


Fig. 4.7 $-\Delta P / \frac{1}{2} \rho V^2$ versus γ_w for Separan 0.05% Fig. 4.8 $-\Delta P / \frac{1}{2} \rho V^2$ versus γ_w for Separan 0.1%

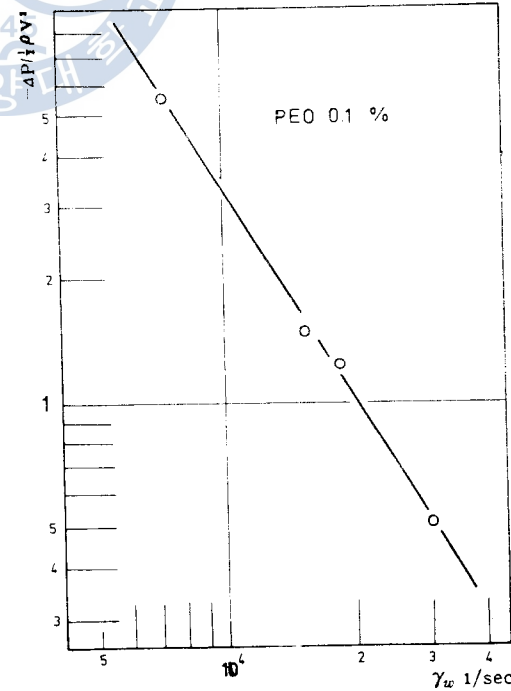
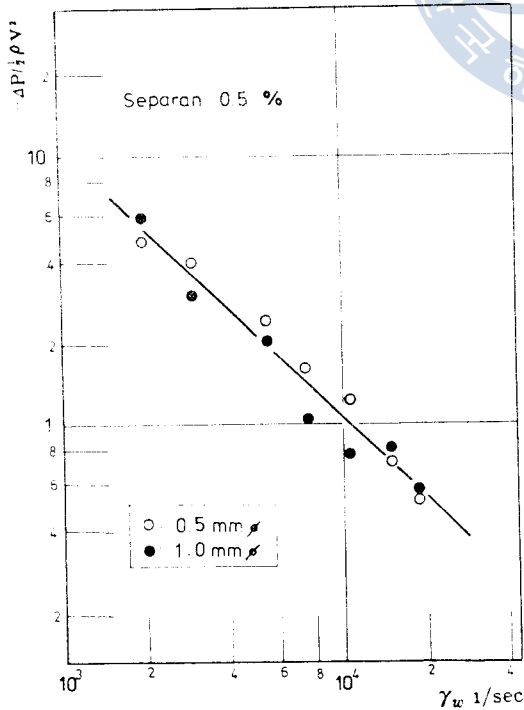


Fig. 4.9 $-\Delta P / \frac{1}{2} \rho V^2$ versus γ_w for Separan 0.5%

Fig. 4.10 $-\Delta P / \frac{1}{2} \rho V^2$ versus γ_w for PEO 0.1%

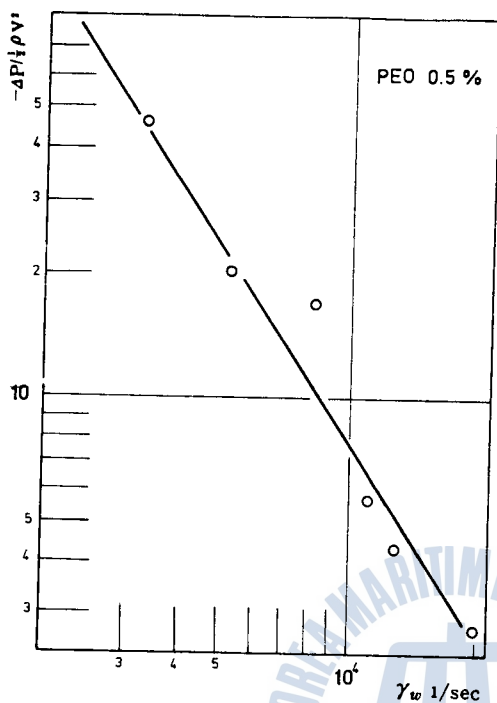


Fig. 4.11 $-\Delta P / \frac{1}{2} \rho V^2$ versus γ_w for PEO 0.5%

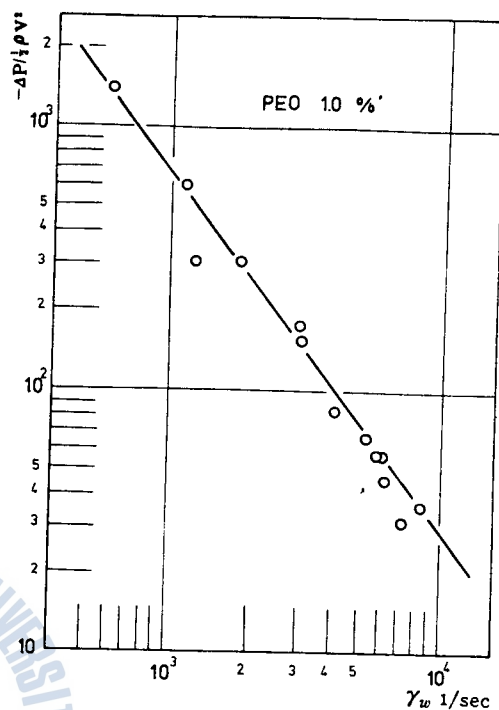


Fig. 4.12 $-\Delta P / \frac{1}{2} \rho V^2$ versus γ_w for PEO 1.0%

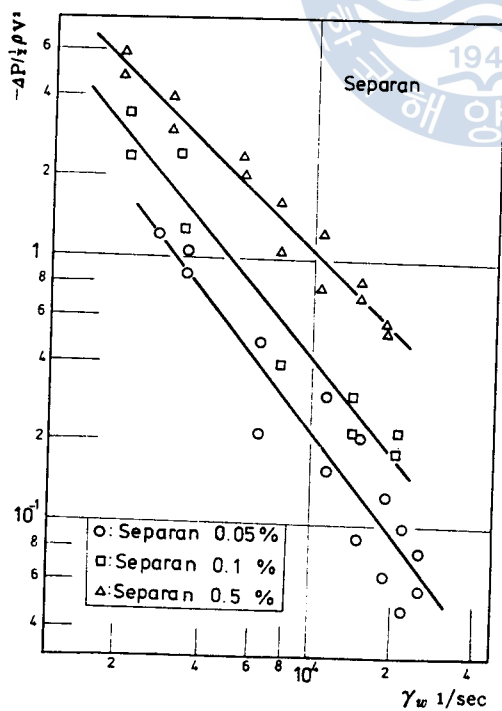


Fig. 4.13 $-\Delta P / \frac{1}{2} \rho V^2$ versus γ_w for Separan

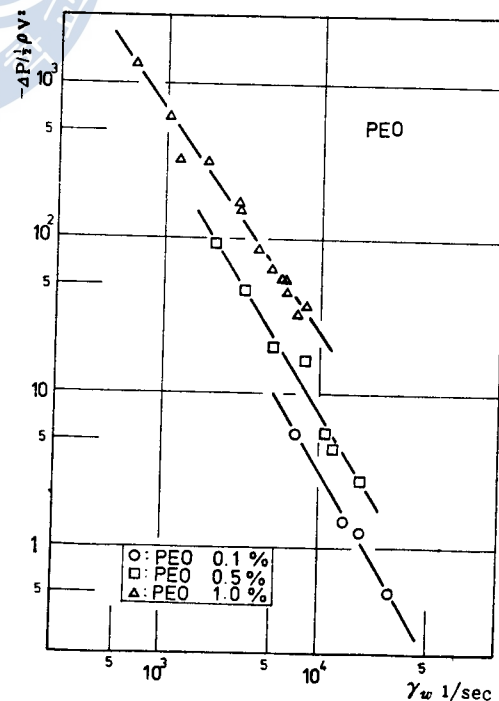


Fig. 4.14 $-\Delta P / \frac{1}{2} \rho V^2$ versus γ_w for PEO

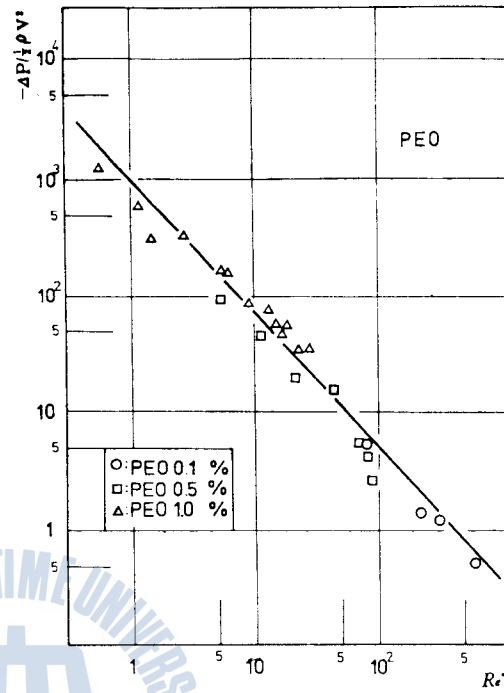
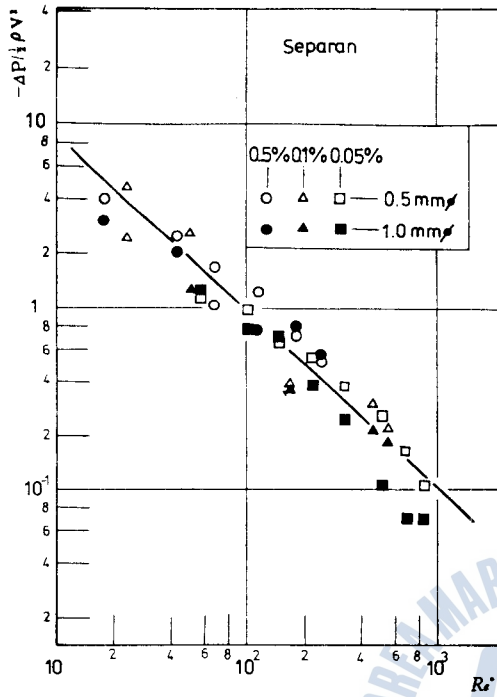


Fig. 4-15 $-\Delta P / \frac{1}{2} \rho V^2$ versus Re^* for Separan

Fig. 4-16 $-\Delta P / \frac{1}{2} \rho V^2$ versus Re^* for PEO

$$\text{Separan; } \log \frac{-\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} = -0.97 \log Re^* + \log 81 \quad (4-11)$$

$$\text{PEO; } \log \frac{-\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} = -1.144 \log Re^* + \log 950 \quad (4-12)$$

(4-11)式과 (4-12)式을 示壓誤差($-\Delta P$)에 對하여 整理하면 Separan 과 PEO 溶液에 關하여 다음과 같은 式을 얻을 수 있다.

$$\text{Separan; } -\Delta P = 40.5 \rho V^2 Re^{*(-0.97)} \quad (4-13)$$

$$\text{PEO; } -\Delta P = 477 \rho V^2 Re^{*(-1.144)} \quad (4-14)$$

第5章 壓力測定用 壁孔附近的 流動模樣

5.1 流動模樣的 實驗方法 및 實驗裝置

靜壓測定用 壁孔附近的 流動模樣은 孔中心에 關係서 對稱이라고 看做되어 왔으나 粘彈性流體에 對해서는 壁孔附近的 流動模樣에 關한 研究가 거의 없다. 本研究에서는 壁孔에 依한 示壓誤差의 測定에 사용된 Fig.3.4 와 같이 簡單한 平行平板型의 채널에, 壁孔에 該當하는 凹部를 設置해서 流路壁으로부터 染料를 흘러 보내면서 壁孔附近的 流動模樣을 實驗的으로 考察하여 示壓誤差의 發生機構를 究明하는데 必要한 資料를 提供코자 한다.

實驗裝置의 全 略圖와 채널의 詳細圖을 Fig.5.1 과 Fig.5.2 에, 各 寫眞을 Fig.5.3 과 Fig.5.4 에 各 各 表示하고 있다. 本實驗裝置의 채널部는 아크릴板으로 만들어 容器의 下面에 附着하였으며 側面은 幅 20 mm, 두께 8 mm 의 아크릴板을 插入하여 固定시켜서 側面에서 觀察可能케 하였고, 流路의

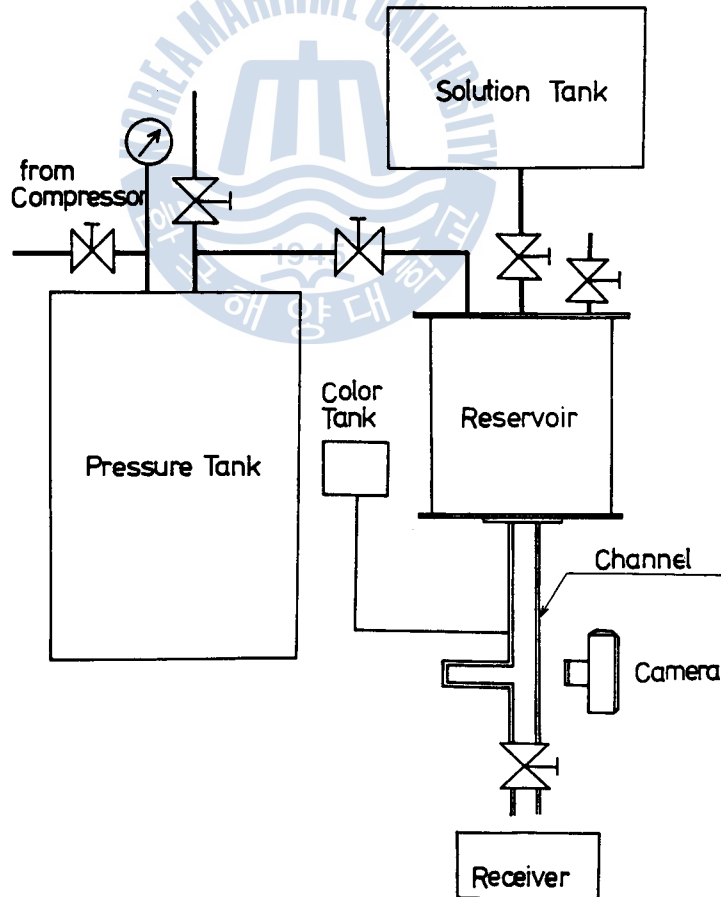


Fig. 5.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

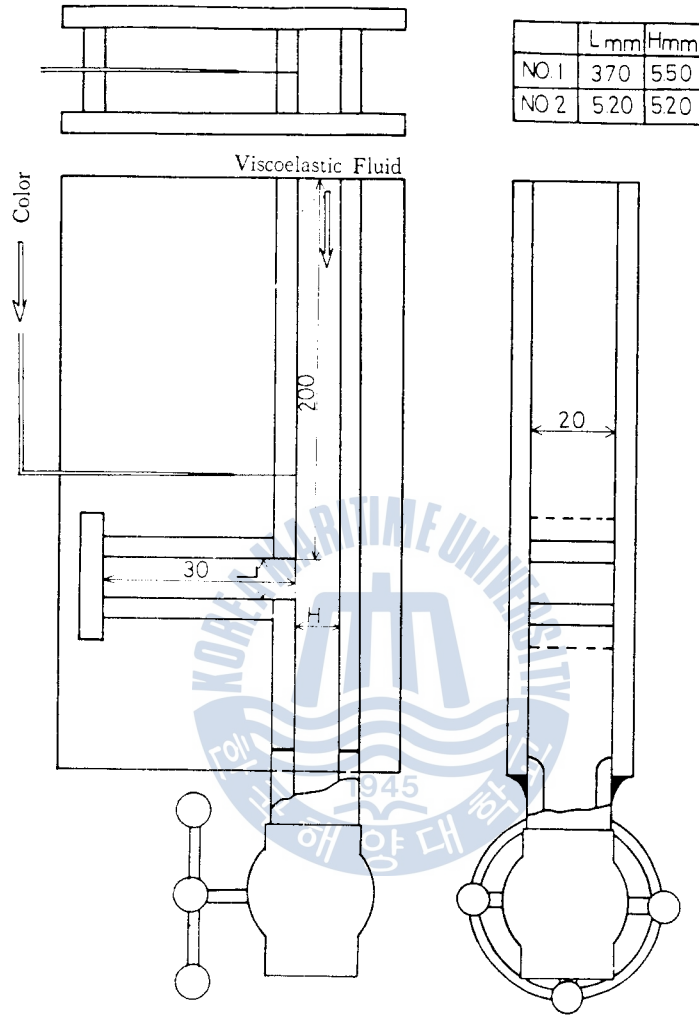


Fig. 5-2 Details of Channel

斷面은 長方形으로 2次元흐름의 채널로 되어 있다.

試料供給탱크로부터 溶液을 容器에 供給한 後 壓力탱크로부터 加해진 壓力에 依해서 채널內部로 溶液이 흐른다. 이 채널 壁孔附近의 흐름이 肉眼으로도 觀察될 만큼 큰 凹部를 設置하였다. 이 凹部化된 壁孔은 앞면 흐름의 觀察이 困難할 것으로 豫想되어 充分히 깊게 製作하였다. 또한 凹部の 上部側壁에는 작은 空氣抽出孔이 있어 凹部に 試料가 充滿된 狀態 즉 靜壓孔에 依한 測定時와 同一한 狀態가 되도록 하였다. 흐름의 可視化를 위하여 凹部로부터 약간 上部의 同一側에 直徑 0.5 mm의 孔을 뚫어 染料탱크에 連結해서 그 탱크로부터 染料를 채널內에 適當히 流入시켜 凹部 附近의 流動模樣을 觀察할 수 있도록 하였다. 이와 같은 實驗裝置에 依해서 流動速度와 溶液의 濃度を 變更시켜 가며 凹部 入口에서의 流動模樣을 寫眞撮影하였다. 流動流量은 下部의 밸브에 依해 調節

되며 重量法에 依해 測定하였다. 한편 壁孔의 直徑 크기에 따른 影響을 考察하기 위하여 凹部의 開口가 5.2 mm 와 3.7 mm 인 두 種類로 實驗을 行하여 觀察하였다.



Fig. 5-3 Photo of Experimental Apparatus

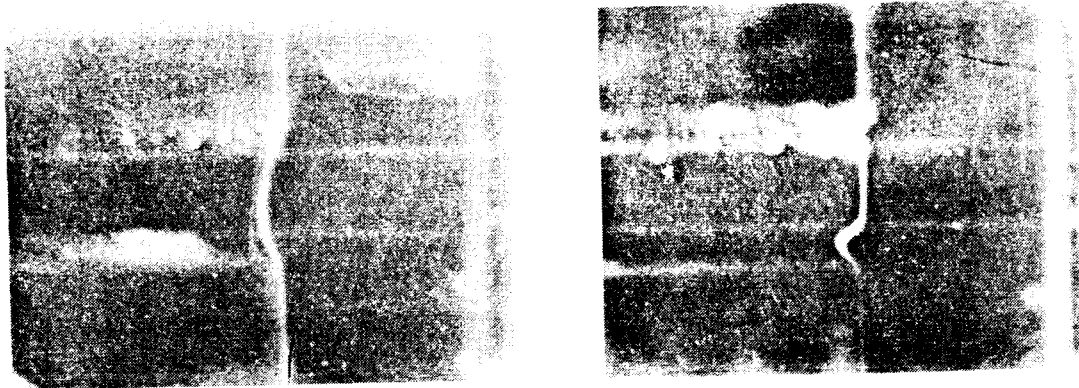


Fig. 5-4 Photo of Channel

5-2 流動模様の 實驗結果^{2,3)}

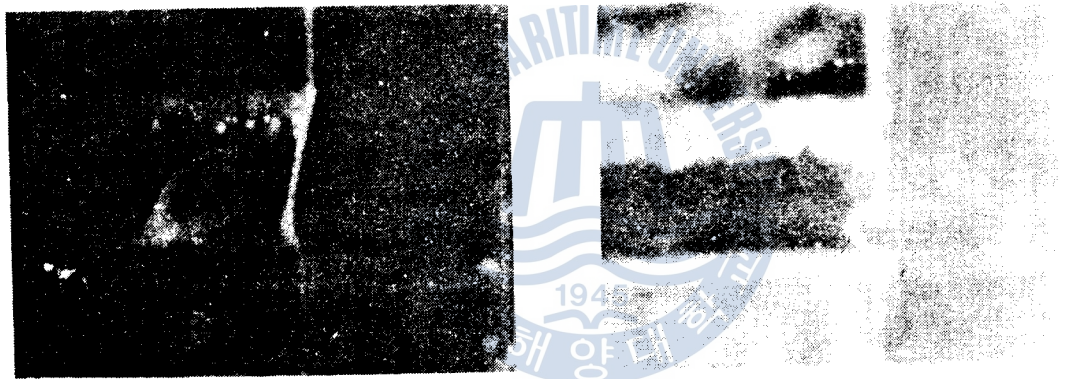
實驗裝置의 채널內에 PEO 溶液을 흐르게 하여 側面 凹部 入口의 流動模樣을 觀察하면서 撮影한 結果를 Fig. 5-5~Fig. 5-14에 보인다. 이 寫眞에 依하여 觀察해 보면 溶液의 各 濃度와 剪斷變形率에 따라서 各各 特徵이 있음을 알 수 있다.

Fig. 5-15~Fig. 5-20은 寫眞에 나타난 流動模樣을 圖示化한 것이다. Fig. 5-15에 圖示한 模樣은 各 濃度別 溶液이 느린 流動速度에서는 各 凹部入口의 中心線에 對해서 對稱이며 弓形으로 나타나고 있다. 이것은 지금까지 壁孔 中心線에 關해서 흐름의 模樣이 對稱이라고 生覺한 結果와 一致함을 보여주고 있다. Fig. 5-19는 相當히 빠른 흐름의 경우로서 各 溶液이 入口에서 直線的이며 同一한 模樣으로 흐르고 있음을 나타내고 있다. 그러나 Fig. 5-15에서 Fig. 5-19의 模樣으로 變化되는 中間 流動速度에서는 一般的으로 豫想되는 模樣과는 相異한 結果가 觀察되었다. 즉 凹部入口의 흐름이 入



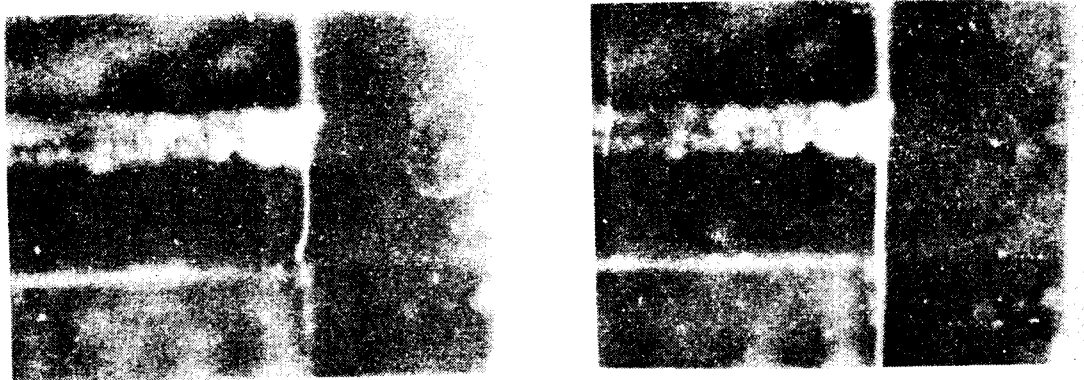
(a) γ_w 11.07 Re^* 9.87

(d) γ_w 283.6 Re^* 317.1



(b) γ_w 35.6 Re^* 34.5

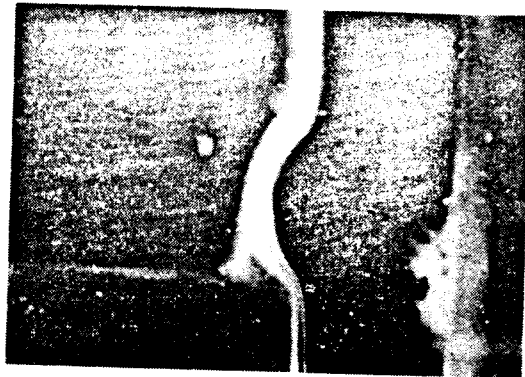
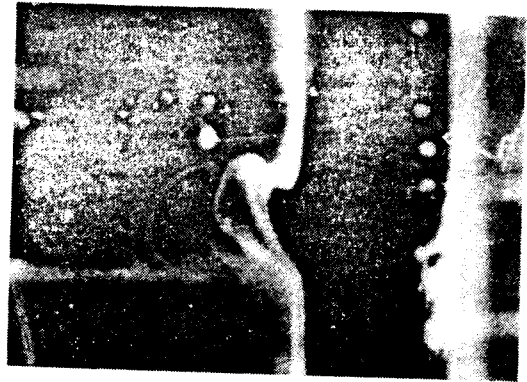
(e) γ_w 291.7 Re^* 326.9



(c) γ_w 239.1 Re^* 264.2

(f) γ_w 704.1 Re^* 838.3

Fig. 5.5 PEO 0.07%, $L=3.7$ mm

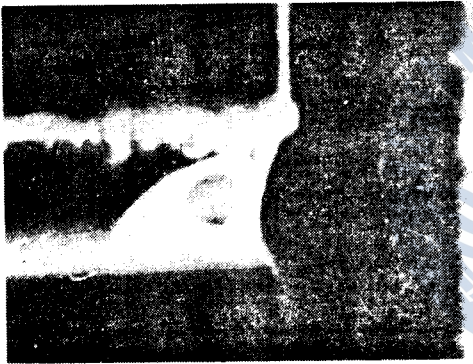
(a) $T_w = 1.02$ $Re^* = 0.69$ (d) $T_w = 699.2$ $Re^* = 434.9$ (b) $T_w = 65.4$ $Re^* = 39.1$ (e) $T_w = 803.1$ $Re^* = 862.5$ (c) $T_w = 308.2$ $Re^* = 309.9$ (f) $T_w = 1,075.0$ $Re^* = 1,179.0$ Fig. 5-6 PEO 0.07%, $L=5.2$ mm



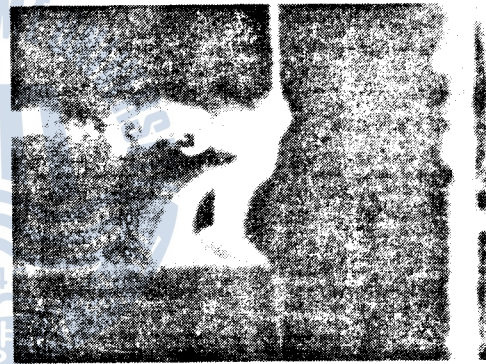
(a) $\gamma_w 3.81 Re^* 0.95$



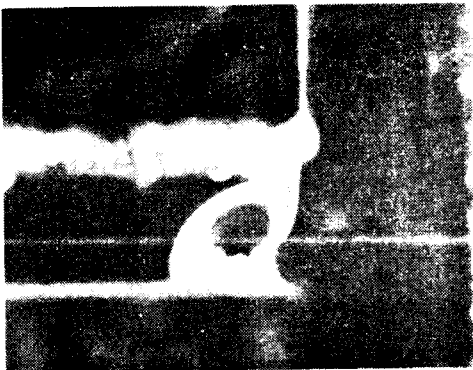
(d) $\gamma_w 158.0 Re^* 65.9$



(b) $\gamma_w 29.7 Re^* 9.79$



(e) $\gamma_w 779.4 Re^* 401.4$

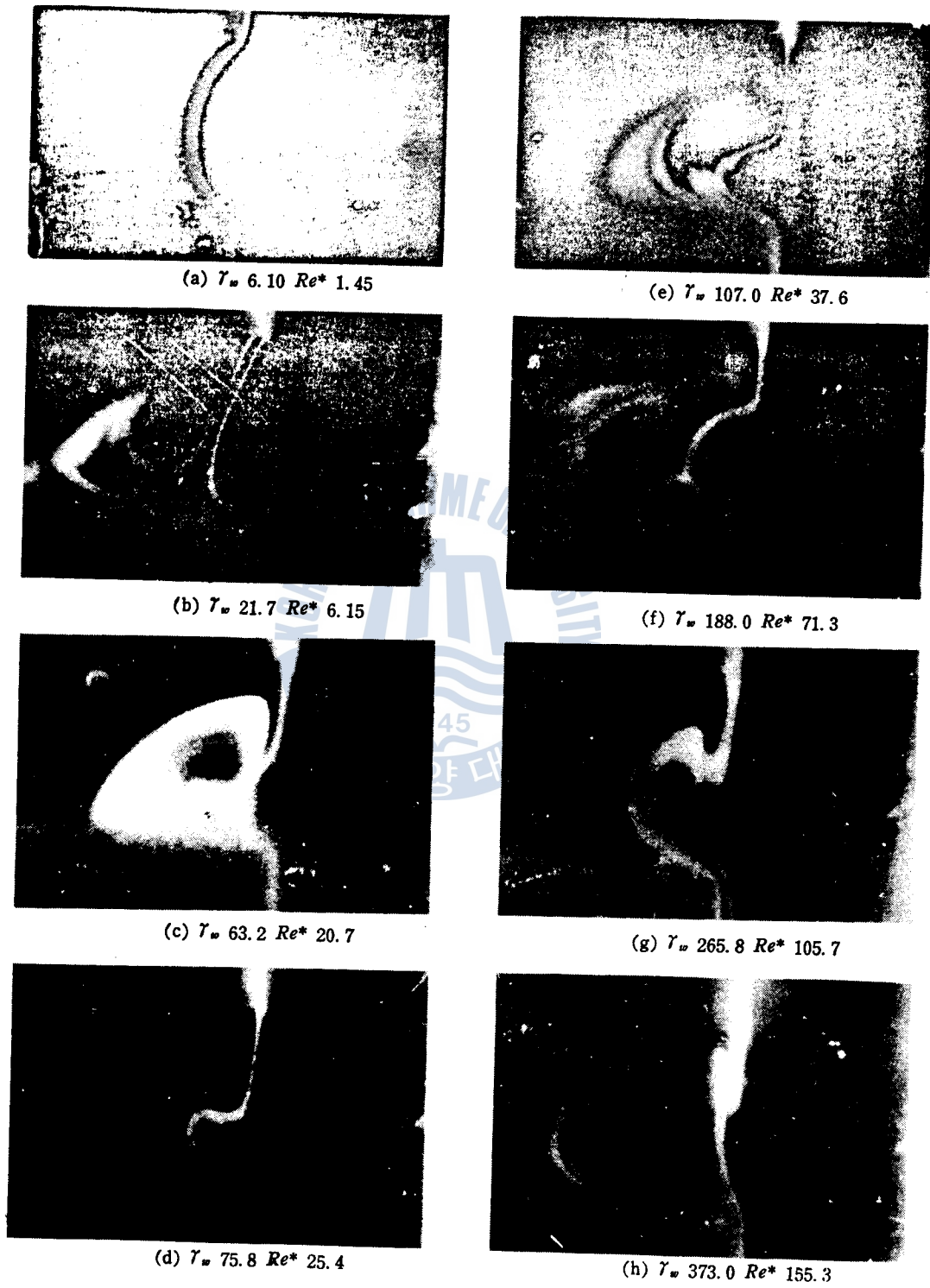


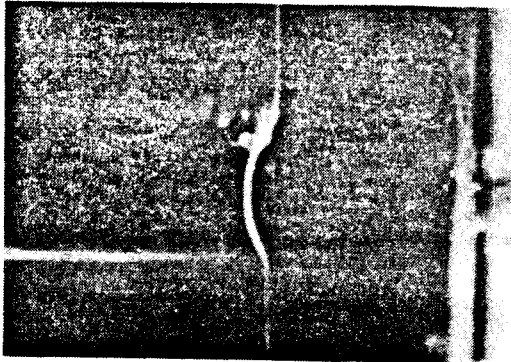
(c) $\gamma_w 129.4 Re^* 52.2$



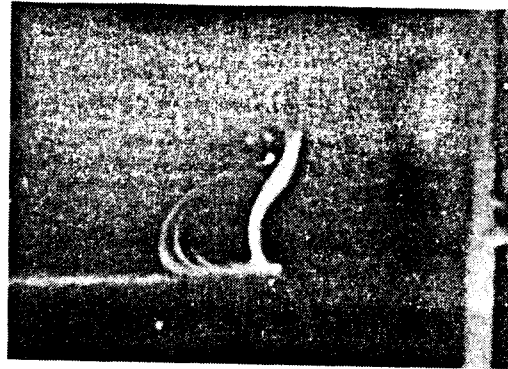
(f) $\gamma_w 1,017.0 Re^* 543.0$

Fig. 5·7 PEO 0.1%, $L=3.7$ mm

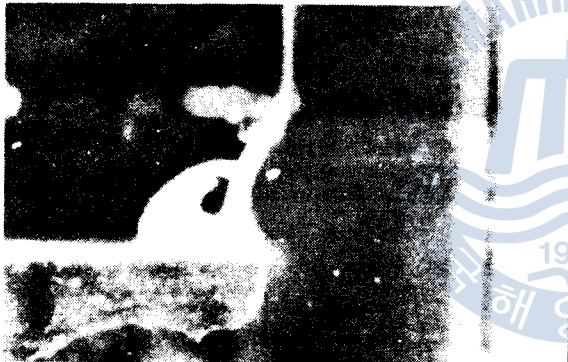
Fig. 5-8 PEO 0.1%, $L=5.2$ mm



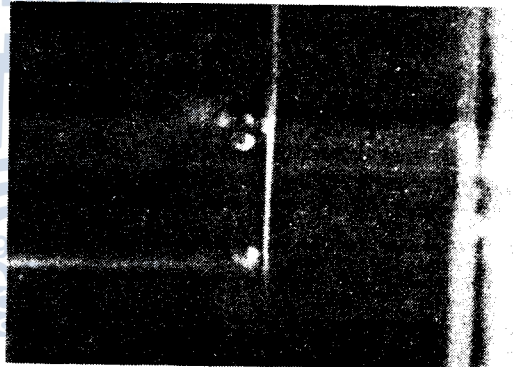
(a) γ_w 9.65 Re^* 1.31



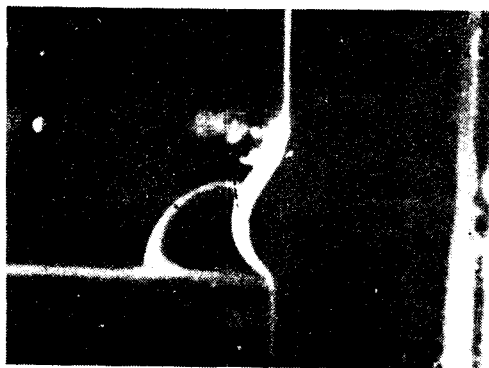
(d) γ_w 342.0 Re^* 118.9



(b) γ_w 55.8 Re^* 12.1

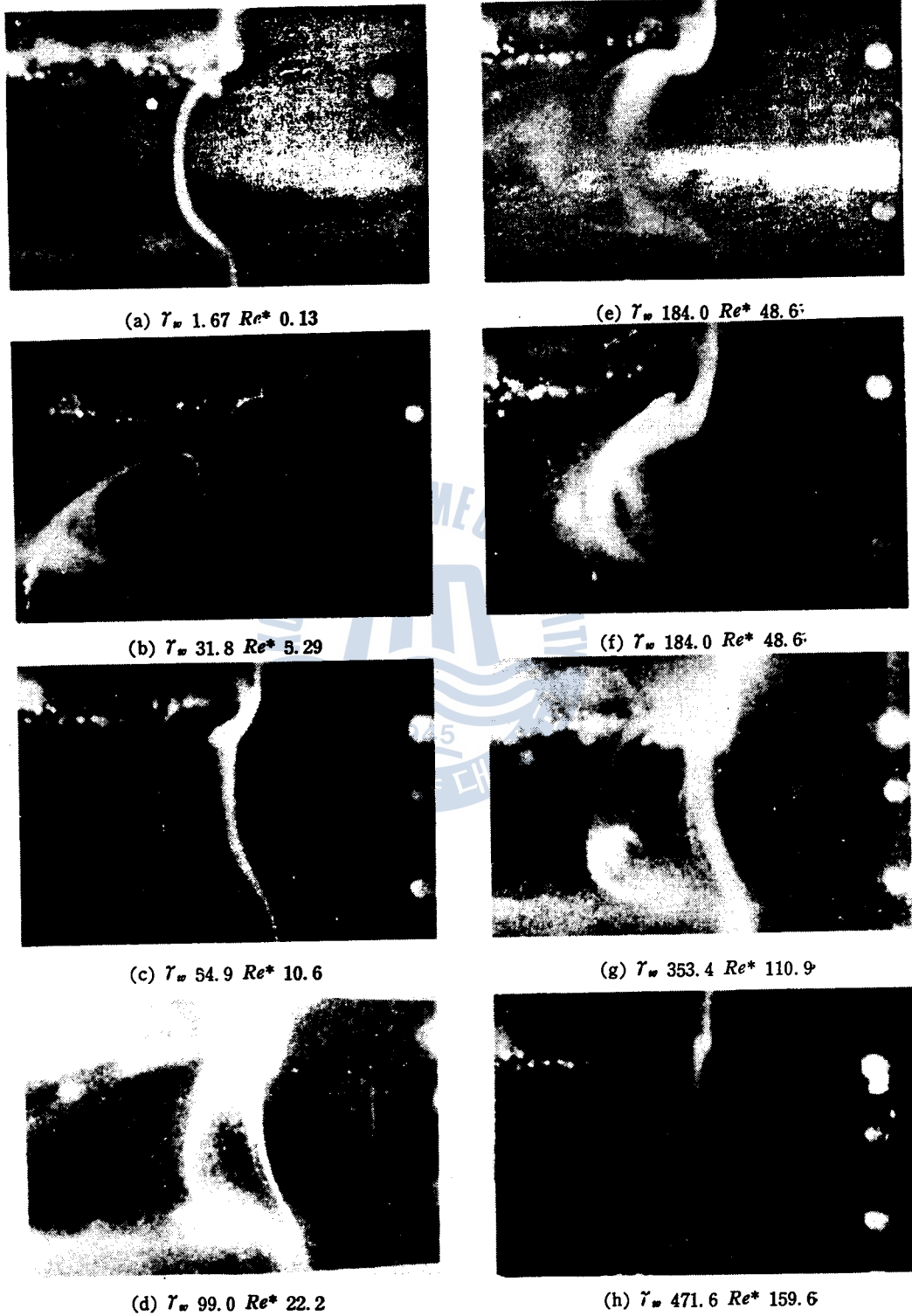


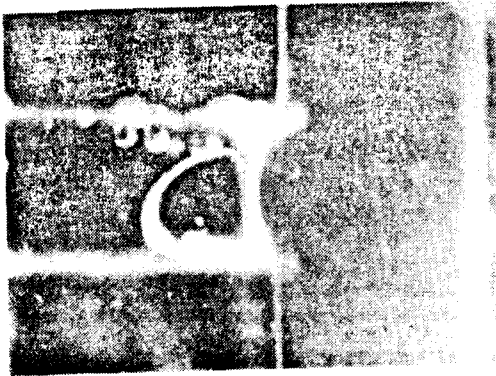
(e) γ_w 957.4 Re^* 436.7



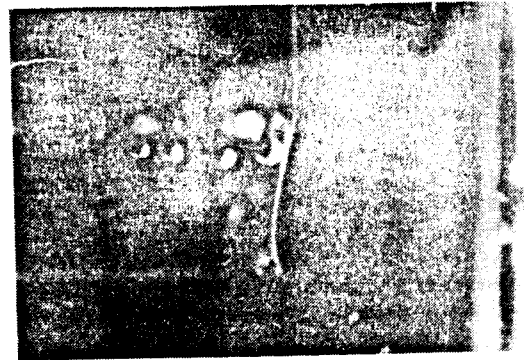
(c) γ_w 105.4 Re^* 26.9

Fig. 5-9 PEO 0.2%, L=3.7 mm

Fig. 5.10 PEO 0.2%, $L=5.2$ mm



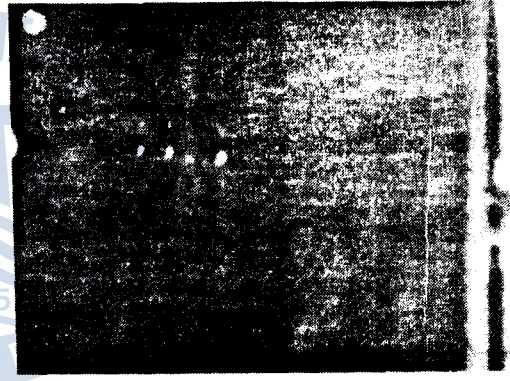
(a) γ_w 17.4 Re^* 1.13



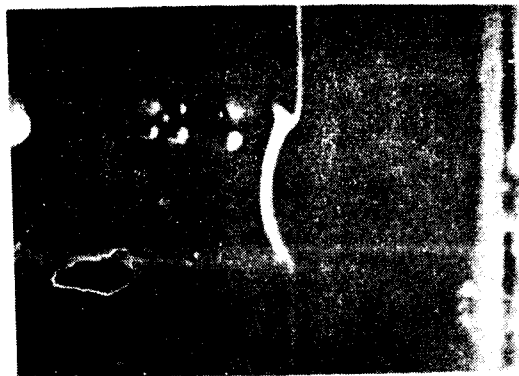
(d) γ_w 638.9 Re^* 144.2



(b) γ_w 73.7 Re^* 7.86

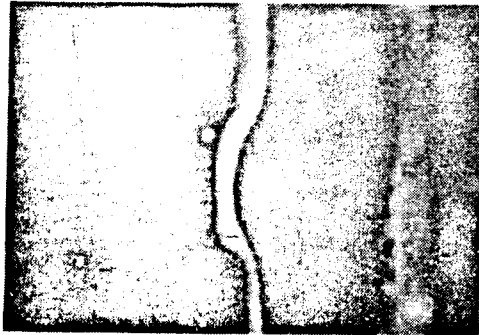
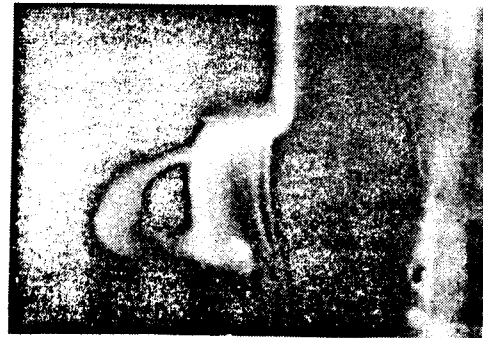
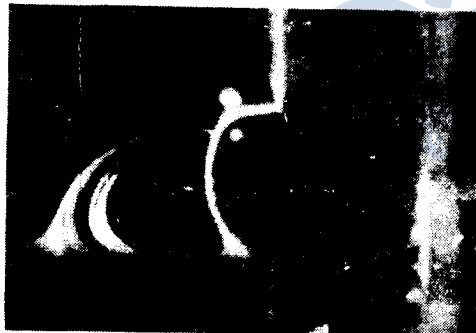
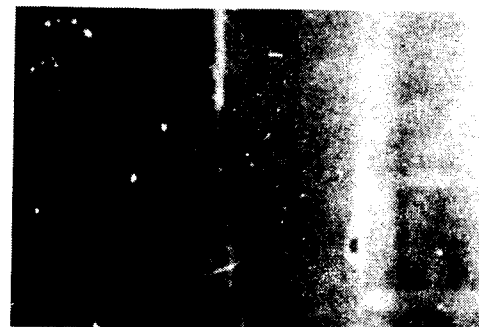


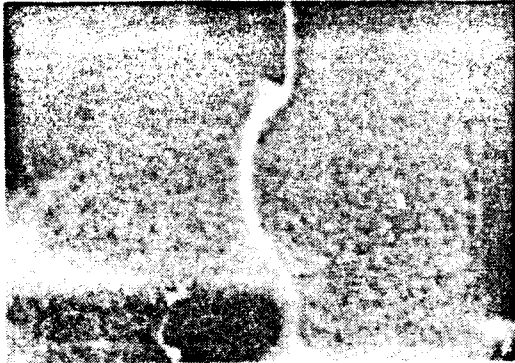
(e) γ_w 868.3 Re^* 217.9



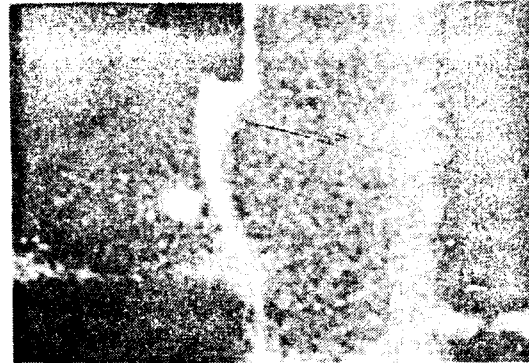
(c) γ_w 221.5 Re^* 34.6

Fig. 5-11 PEO 0.3%, $L=3.7$ mm

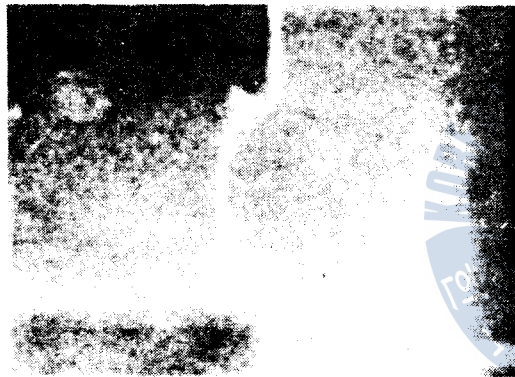
(a) γ_w 5.24 Re^* 0.20(e) γ_w 234.6 Re^* 33.4(b) γ_w 25.9 Re^* 1.72(f) γ_w 300.4 Re^* 46.6(c) γ_w 74.1 Re^* 7.08(g) γ_w 872.0 Re^* 196.5(d) γ_w 137.0 Re^* 16.2(h) γ_w 1,445.0 Re^* 387.0Fig. 5-12 PEO 0.3%, $L=5.2$ mm



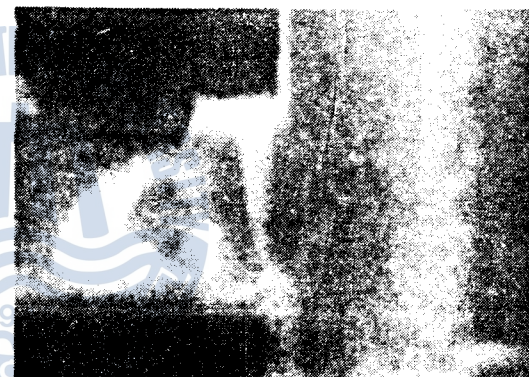
(a) γ_w 3.7 Re^* 0.07



(d) γ_w 180.9 Re^* 14.3



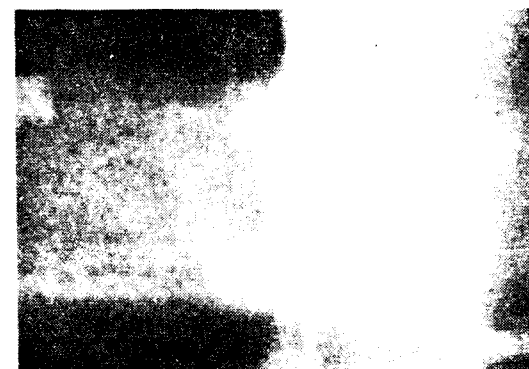
(b) γ_w 19.9 Re^* 0.71



(e) γ_w 444.1 Re^* 48.4

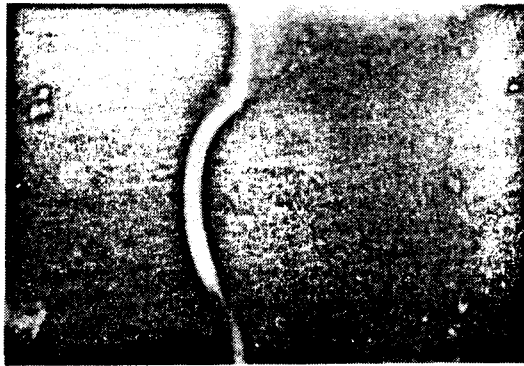
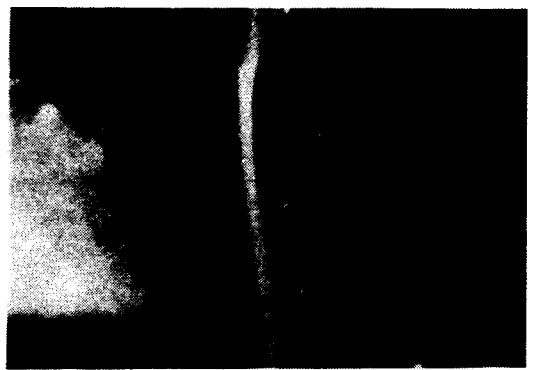


(c) γ_w 89.3 Re^* 5.49

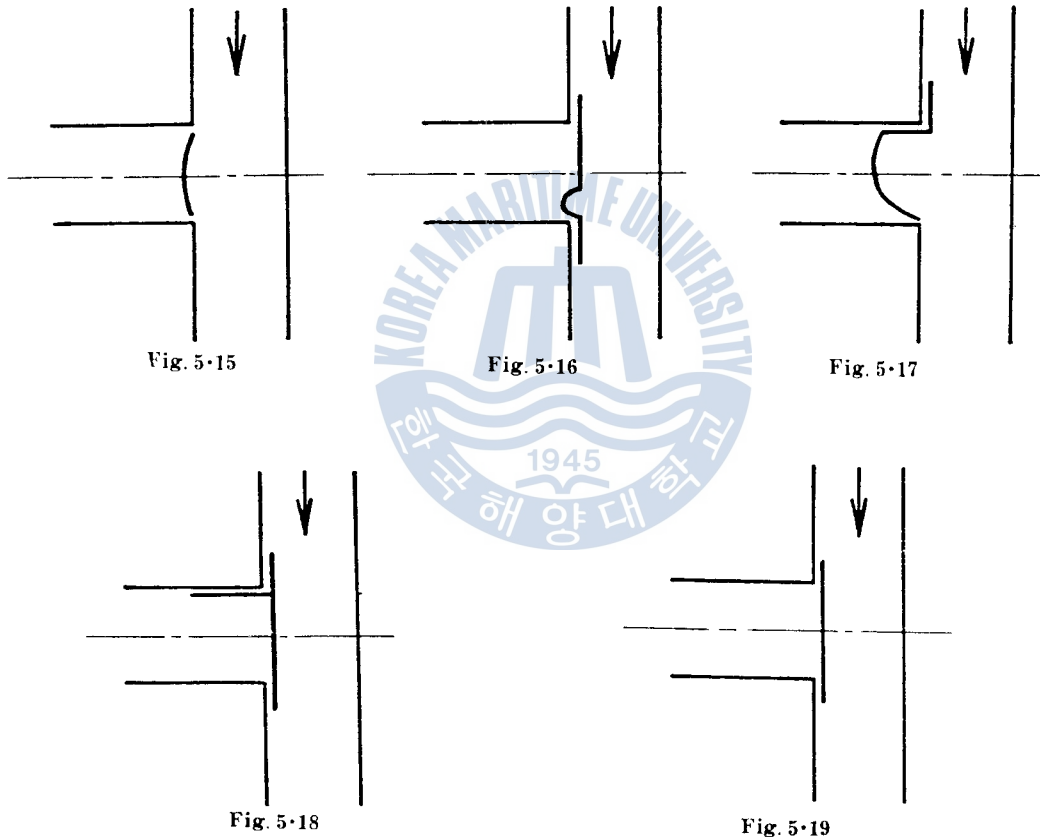


(f) γ_w 657.4 Re^* 82.4

Fig. 5-13 PEO 0.5%, $L=5.2$ mm

(a) $\gamma_w = 5.11 \cdot Re^* = 0.04$ (d) $\gamma_w = 200.3 \cdot Re^* = 7.44$ (b) $\gamma_w = 22.9 \cdot Re^* = 0.35$ (e) $\gamma_w = 369.5 \cdot Re^* = 17.7$ (c) $\gamma_w = 169.7 \cdot Re^* = 5.89$ (f) $\gamma_w = 450.8 \cdot Re^* = 23.4$ Fig. 5-14 -PEO-0.7%, $L=5.2\text{mm}$

口 中心線에 對해서 非對稱形으로 되며 그 模樣은 Fig.5·16~Fig.5·18에 圖示한 바와 같다. 이와 같이 非對稱形이 되는 흐름의 模樣은 溶液의 各 濃度와 剪斷變形率別로 相異하게 變化하며, Fig.5·19의 直線의인 模樣으로 되기까지의 過渡의 段階의 範圍에서는 入口附近이 極히 不安定한 狀態가 된다. 즉 PEO 0.07%, 0.1%, 0.2%의 各 溶液은 Fig.5·16과 同一한 模樣이며, 0.3%, 0.5%의 溶液은 Fig.5·17과 같은 模樣이다. 0.7%, 1.0%의 溶液은 他 溶液과 比較해서 不安定性이 特히 甚하며 Fig.5·17과 같은 安定된 흐름위에는 比較的 廣範圍한 不安定性이 나타난다. 또한 Fig.5·19와 같은 흐름이 始作되는 初期 剪斷變形率에서도 直線形의 流動狀態로부터 Fig.5·18과 같이 各層 四部上壁에 따라 流體가 흘러 들어간다.



5·3 流動模樣的 考察

壁孔附近의 流動模樣的 變化를 Fig.5·20에 系統的으로 圖示하였다. 溶液의 濃度에 따라 I, II, III의 3群으로 分類하였으며 剪斷變形率에 따른 模樣的 形態別로 (1)부터 (5)까지 區分하였다.

1) I群

I群에서는 對稱形인 I-(1)型에서 I-(2)型과 같이 약간 틀어지는 過程을 거쳐 中間型인 I-(3)型이 되는데 I-(2)型은 I-(3)型으로 되는 遷移域의 形態라 볼 수 있다. 0.2% 溶液은 이 過

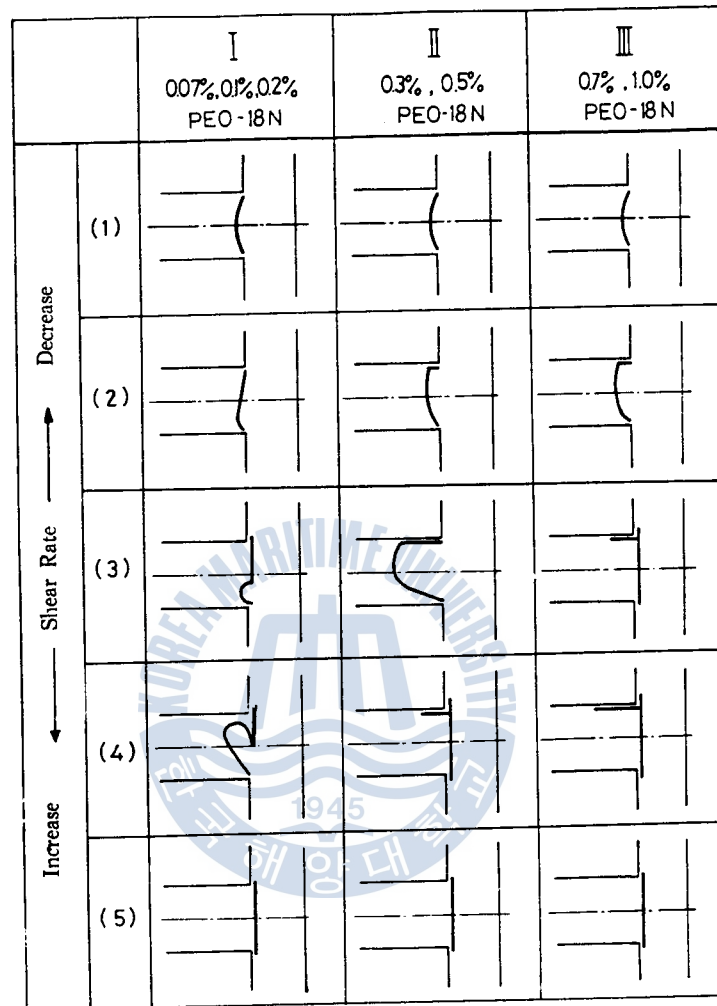


Fig. 5-20 Schematic Diagram of Flow Pattern

程을 지나는 剪斷變形率의 範圍가 적으나, 0.07%의 境遇는 範圍가 相當히 크다. I-(4)型은 I-(3)型으로부터 剪斷變形率의 增加에 따라 고리形이 漸次 커지다가 고리形의 上部가 入口 上部附近의 直線部分에 가까워 지면서 極히 짧은 範圍에서 不安定狀態가 發生하나 剪斷變形率의 增加에 따라 I-(5)型의 模樣으로 바로 變한다.

2) II群

凹部 入口의 中心線에 對하여 對稱인 II-(1)型은 剪斷變形率의 增加에 따라 凹部 上壁에 沿해서 直角으로 變하기 始作하는 II-(2)型으로부터 非對稱形인 II-(3)型으로 된다. II-(3)型의 限界를 넘으면 I群에 比해서 相當히 큰 剪斷變形率의 範圍에서 不安定狀態가 나타나는 II-(4)型이 된다. 더욱 增加함에 따라 直線形인 II-(5)型이 되면서 流動模樣이 安定된다.

3) III群

剪斷變形率의 增加에 따라 II群에서와 같이 對稱形인 III-(1)에서 III-(2)型의 흐름이 되지만 直線形의 III-(5)型이 되기까지 II群에서 보다도 더 넓은 範圍에 걸쳐서 III-(3)型과 같이 瞬間的으로 凹部 入口의 上壁에 沿해 팔려 들어가는 흐름이 不規則的으로 反復되는 不安定性이 強하게 나타난다. 剪斷變形率의 增加에 따라 結局은 III-(5)型의 模樣에서 安定된다. 上記한 1), 2), 3)項에서 考察한 바와 같은 이들 凹部(壁孔)入口에서의 流動模樣의 變化를 整理하면 I-(3), II-(2), III-(2)型의 模樣이 나타나는 遷移點과 I-(5), II-(5), III-(5)型이 나타나는 各 遷移點을 限界로 해서 壁孔入口에서의 流動模樣이 다음 3個領域으로 區分됨을 알 수 있다.

1. 弓形對稱 流動模樣 領域
2. 非對稱 流動模樣 領域
3. 直線形對稱 流動模樣 領域

한편 本實驗에서 壁孔크기에 따른 影響을 考察하기 위해서 凹部 開口幅이 다른 두 種類에 對해서 觀察하였으나 基本的 模樣에는 아무런 影響이 없음을 보여주고 있다. 그러나 非對稱 流動模樣은 어떤 物性值에 關係되고 어떠한 原因으로 發生하며 이러한 流動模樣이 壁孔에 의한 示壓誤差에 어떤 影響을 주는가를 究明하기에는 많은 研究가 必要하다고 生覺된다. 特히 I-(3)과 I-(4) 模樣의 發生原因은 慣性力과 粘彈性力의 相互作用에 基因한 結果라고 推測된다.



第6章 結 論

粘彈性流體의 種類와 靜壓孔의 크기가 測定壓力의 示壓에 미치는 影響에 關하여 Separan NP-10 의 0.05%, 0.1%, 0.5% 및 PEO-18N의 0.1%, 0.5%, 1.0%인 高分子폴리머溶液을 2次元 平行 平板型의 채널을 使用하여 各 剪斷變形率에 따른 示壓誤차를 測定해서 그들의 實驗値를 檢討한 本研 究의 結果, 다음과 같이 結論지을 수 있다.

1. Separan NP-10 과 PEO-18N의 稀薄高分子폴리머溶液에 있어서 靜壓孔에 依한 示壓誤差 ΔP 는 그 壁孔의 크기에 影響받지 않는다.
2. Separan NP-10 과 PEO-18N의 稀薄高分子폴리머溶液에 對하여 靜壓孔에 依한 示壓誤差 ΔP 는 溶液의 濃度와 剪斷變形率이 커지면 增加한다.
3. 靜壓孔에 依한 示壓誤差 ΔP 는 Separan NP-10 과 PEO-18N의 稀薄高分子폴리머溶液에 있어 서 法線應力과 다음의 關係가 成立한다.

$$-\Delta P = 0.14(\tau_{xx} - \tau_{yy})$$

但, $\Delta P = (\text{壁孔에 依한 靜壓測定値}) - (\text{참 靜壓})$

4. 靜壓孔에 依한 示壓誤差 ΔP 는 一般레이놀즈數 R_* 와 다음의 關係가 成立된다.

$$\text{Separan; } -\Delta P = 40.5 \rho V^2 R_*^{*(-0.97)}$$

$$\text{PEO; } -\Delta P = 477 \rho V^2 R_*^{*(-1.14)}$$

5. 壁孔入口에서 稀薄高分子폴리머溶液의 流動模樣은 다음과 같은 3個領域으로 分類된다.

- 1) 弓形對稱 流動模樣 領域
- 2) 非對稱 流動模樣 領域
- 3) 直線形對稱 流動模樣 領域

上記와 같은 研究結果는 高分子폴리머溶液의 流動時 舉動을 把握하는데 重要な 資料를 提示하고 있 으므로 高分子合成物質의 用途와 應用이 急增加하고 있는 趨勢에 비추어 高分子合成物質産業에 있어 크게 도움이 될것으로 본다.

그러나 高分子폴리머溶液의 種類에 關係없이 適用되는 示壓誤차에 關한 一般式의 導出 및 壁孔入 口에서 流動模樣의 非對稱性이 靜壓測定値에 미치는 影響이 앞으로 檢討되어야 할 것이다.

參 考 文 獻

- 1) 富田幸雄：“レオロジー”，コロナ社(1975)，pp.171~172, pp.407~424.
- 2) 柳高新，金春植：“非正交系流體의 管內流의 流動抵抗에 關한 研究”，大韓機械學會論文集，3~4(1979)，pp.151~157.
- 3) B. D. Coleman, H. Markovitz and W. Noll, “Viscometric Flows of Non-Newtonian Fluids”, Springer-Verlag New York Inc. (1963), pp.56~83, pp.23~26.
- 4) D. R. Oliver, “The Expansion and Contraction Behavior of Laminar Liquid Jets”, Canadian J. Chemical Engineering, April 1966, pp.100~107.
- 5) 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.
- 6) 富田，長谷川，金春植，“高分子溶液の管內流の z 軸方向法線應力の測定”，日本機械學會講演論文集，730—6(1973)，pp.171~174.
- 7) A. Kaye, A. S. Lodge and D. G. Vale, “Determination of Normal Stress Differences in Steady Shear Flow”, Rheologica Acta, 7(1968), pp.368~379.
- 8) J. M. Borabent, A. Kaye, A. S. Lodge and Vale, “Possible Systematic Errors in the Measurement of Normal Stress Differences in Polymer Solutions in Steady Shear Flow”, Nature, Vol. 217, Jan. (1968), pp.55~56.
- 9) D. C. Bogue and J. L. White, “Engineering Analysis of Non-Newtonian Fluids”, Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd. Tokyo(1972), p.29, p.129.
- 10) W. G. Pritchard, “The measurement of normal stresses by means of liquid filled holes in a surface”, Rheologica Acta, 9(1970), pp.200~207.
- 11) R. I. Tanner and A. C. Pipkin, “Intrinsic Errors in Pressure-Hole Measurement”, Trans. of the Society of Rheology, 13(1969), pp.471~484.
- 12) K. Higashimura and W. G. Pritchard, “A kinematic calculation of intrinsic errors in pressure measurements made with holes”, Trans. of the Society of Rheology, 19(1972), pp.687.
- 13) 長谷川富田：“稀薄高分子，管內流の z 軸方向法線應力の測定に關する研究”，博士學位論文，東京工業大學，1971，p.28, p.46, p.72.
- 14) Stanly Middleman, “The Flow of High Polymers”, Interscience Publishers, 1968, pp.41~50, p.37.
- 15) 金春植：“粘彈性流體の法線應力の測定の關する研究”，韓國海洋大學論文集，第10輯(1975)，pp.142~157.
- 16) 長谷川富田：“高分子系稀薄高分子溶液の z 軸方向法線應力の測定”，日本機械學會論文集，44~36(1978)，pp.1606~1615.
- 17) J. R. Oliver and W. C. McSparran, “Determination and Flow in Film Polymer Systems”, Proc. Brit. Soc. Rheol. (1968), p.199.
- 18) 藤本武助：“改著流體力學”，養賢堂(1973)，p.23.
- 19) 富田，長谷川，金春植：“粘彈性流體の壓力測定用壁孔，示壓口及法線影響(第2報)”，日本機械學會講演論文集，734—5(1973)，pp.58~60.
- 20) 金春植，“粘彈性流體の壓力測定에 關한 研究”，韓國海洋大學論文集，第10輯(1975)，pp.157~168.
- 21) 富田，長谷川，金春植，二見：“粘彈性流體の壓力測定用壁孔の示壓口及法線影響(第1報)”，日本機械學會講演論文集，720—17(1972)，pp.127~130.
- 22) 金春植，“稀薄高分子溶液의 壁孔에 의한 壓力測定誤差에 關한 研究”，韓國船用機關學會誌，第4卷2號

(1980), pp. 36~48.

- 23) 金春植, “粘彈性流體의 壓力測定用 壁孔附近의 流動模樣에 關한 實驗的 研究”, 韓國船舶機關學會誌, 第4卷1號(1980), pp. 23~31.

