◎ 研究 論文

粘彈性流体의 壓力測定用 壁孔附近의 流動模様에 關한 實驗的 硏究

金 春 植*

An Experimental Study on the Flow Pattern in the Vicinity of Pressure Measuring Hole of the Viscoelastic Fluids

Chunsik Kim

Abstract

The fluid static pressure has been generally measured by means of a small hole leading to a measuring instrument. In case of viscoelastic fluids, however, it has been shown experimentally that a systematic error exists in measuring the static pressure by means of the small hole because viscoelastic fluids have many properties that can not be observed in Newtonian fluids.

In this paper, in order to examine the mechanism of the errors in measuring the static pressure of viscoelastic fluids, flow patterns in the vicinity of static pressure measuring hole were photographically taken and observed graphically. The experiments to take photographs of flow patterns were performed by a parallel plate channel with the steady two-dimensional shear flow of viscoelastic fluids.

Results of the experiment are classified as following three regions;

(1) Arched symmetrical flow pattern region.

(2) Asymmetrical flow pattern region.

(3) Rectilinear symmetrical flow pattern region.

1. 序 論

流動流体의 靜壓을 測定하는 方法으로는 主로 靜壓孔에 의한 方法이 採用되고 있다.

靜壓孔에 의한 靜壓測定은 아주 簡單한 方法으로서, 뉴우톤流体에 對해서는 靜壓孔에 의한 示壓과 眞의 靜壓이 一致함이 實驗的으로 確認되어 있으나 粘彈性流体의 境遇에는 뉴우톤流体에서 볼 수 없는 여러가지 特異한 現象들[1]에 依해서 靜壓孔 附近의 흐름에 影響을 받기 때문에 靜壓孔을 通한 靜壓의 測定値는 眞의 靜壓과 比較하여 無視할 수 없을 程度의 測定誤差가 發生

* 正會員, 韓國海洋大學

한다는 報告가 있었다.

즉, Kaye等은 壁孔에 依한 靜壓의 測定値가 眞의 靜壓보다 낮다고 發表하였고[2),3)], Prichard는 壁孔의 幾何學的 形狀의 相違는 큰 影響을 주지 않는다고 結論지었으며[4)], Tanner와 Pipkine[5)], Higashitani 等[6)]에 依해서 類似한 硏究가 相當히 進行되고 있다.

그러나 靜壓測定用 壁孔附近의 流動模樣에 對한 實驗과 硏究는 거의 行해지지 않고 있다. 本 硏究에서는, 簡單한 平行平板型의 Channel을 使用해서 行한 粘彈性流体의 壓力測定에 關한 硏究[7),8)]와 關聯하여, 壁孔에 該當하는 凹部를 設置한 Channel을 使用해서 流路壁으로부터 染料를 흘러 보내면서 壁孔附近의 流動模樣을 實驗的으로 考察하여 靜壓孔에 依한 示壓誤差 發生의 機構를 糾明하는데 必要한 資料의 一部를 提供코자 한다.

2. 一般 Reynolds數의 計算方法

粘彈性流体의 흐름이 平行平板間의 2次元 흐름이라 看做해서 Fig.1과 같이 直角座標系 (x, y, z)를 取하고 對應하는 速度成分을 (u, v, w)라 하면

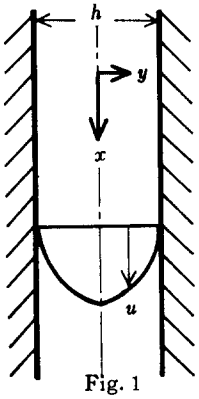


Fig. 1

$$u=u(y),\quad v=w=0 \tag{1}$$

여기서 應力 tensor T_{ij}를 다음과 같이 表示할 수 있다[9),10)].

$$T_{ij}=\begin{pmatrix}-\overline{P} & 0 & 0\\ 0 & -\overline{P} & 0\\ 0 & 0 & -\overline{P}\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\tau_{xx} & \tau_{xy} & 0\\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & 0\\ 0 & 0 & \tau_{zz}\end{pmatrix} \tag{2}$$

但 τ_{xx}, τ_{yy}, τ_{zz}는 偏差法線應力이며, τ_{xy}는 剪斷應力이고, $-\overline{P}$는 法線應力의 平均値이며

$$-\overline{P}=\frac{1}{3}T_{ii} \tag{3}$$

이다. 또한 偏差成分에는 다음과 같은 關係가 있다.

$$\tau_{xx}+\tau_{yy}+\tau_{zz}=0 \tag{4}$$

τ_{xx}, τ_{yy}, τ_{zz}는 剪斷速度만의 函數이므로 y만의 函數이다. Cauchy의 運動方程式

$$\rho\frac{Dv_i}{Dt}=\rho K_i+\frac{\partial T_{ji}}{\partial x_j} \tag{5}$$

를 $i=1$, 즉 x方向에 對하여 考慮하면

$$0=-\frac{\partial p}{\partial x}+\rho g+\frac{\partial T_{yx}}{\partial y} \tag{6}$$

但, p는 等方性壓力이다. 따라서 (2)式과 (6)式으로 부터

$$0=-\frac{\partial p}{\partial x}+\rho g+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \tag{7}$$

을 얻는다. 또한 上式을 積分하면

$$\tau_{xy}=\left(\frac{\partial p}{\partial x}-\rho g\right)y \tag{8}$$

故로

$$\tau_w=(\tau_{xy})_{y=-\frac{h}{2}}=\left(\frac{\partial p}{\partial x}-\rho g\right)\cdot\frac{h}{2}=\frac{h}{2}\cdot\frac{\Delta P}{\Delta L} \tag{9}$$

但, τ_w는 壁面剪斷應力이고 h는 流路의 두께이며 $\Delta P/\Delta L$는 壓力勾配이다. 故로 h를 알고 壓力勾配를 求하면 τ_w가 求하여진다.

2次元흐름에 있어서의 一般 Reynolds數(R_e*)는

$$R_e^*=\frac{6\cdot\rho\cdot V^2}{\tau_w} \tag{10}$$

이므로 (9)式으로 부터 R_e*가 求하여진다.

3. 使用溶液

本實驗에 使用한 粘彈性流体는 水溶性樹脂인 PEO—18N(Pollyethylene Oxide)의 0.07%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.5%, 0.7%인 各 水溶液이다. 溶解方法은 常溫의 水道물을 넣은 통에 PEO 粉末을 撒布하여 24時間程度 後에 서서히 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에는 아주 서서히 攪拌해야 한다. 또한 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.

4. 實驗裝置 및 方法

實驗裝置의 全略圖와 寫眞을 Fig. 2와 Fig. 3에, Channel의 詳細圖와 寫眞을 Fig. 4와 Fig. 5에 各各 圖示하고 있다. 本實驗裝置의 主要部는 Channel部로서 本体는 Acrylite板으로 만들어 Reservoir의 下面에 附着하였으며, 側面은 幅 20mm, 두께 8mm의 Acrylite板을 挿入하여 固定시켜서 側面에서 觀察 可能케 하였고, 流路의 斷面은 長方形으로 2次元의 流動 Channel로 되어있다. 試料供給탱크로부터 溶液을 Reservoir에 供給한 後 壓力탱크로부터 加해진 壓力에 依해서 Channel內部로 溶液이 흐른다. 이 Channel의 壁孔附近의 흐름을 觀察하기 위하여 視覺

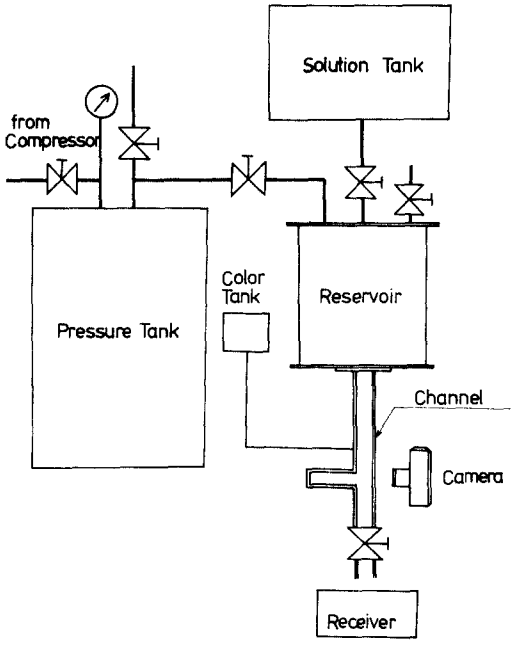


Fig. 2. Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

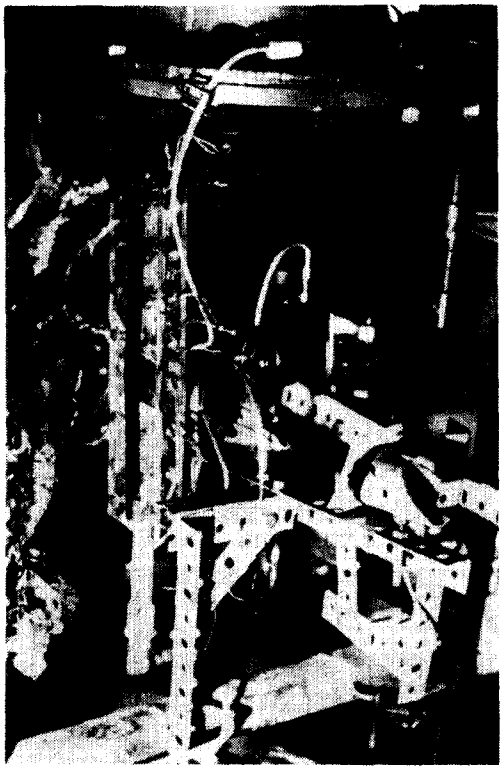


Fig. 3. Photo. of Experimental Apparatus

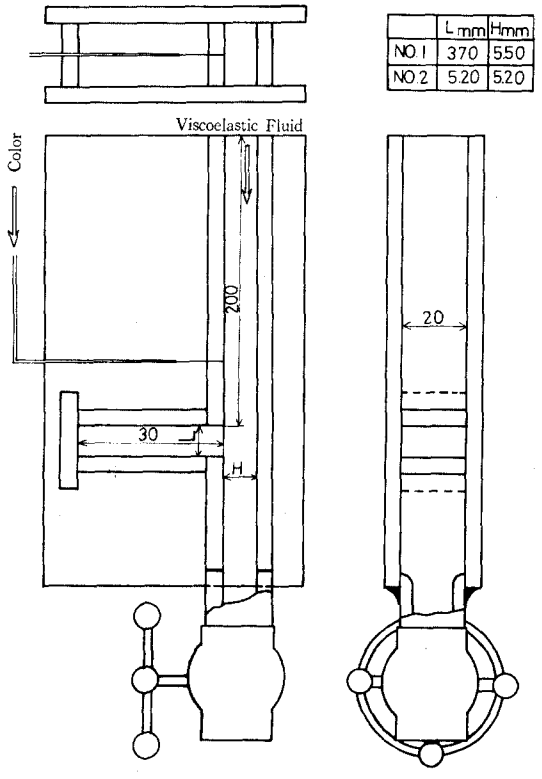


Fig. 4. Schematic Diagram of Channel

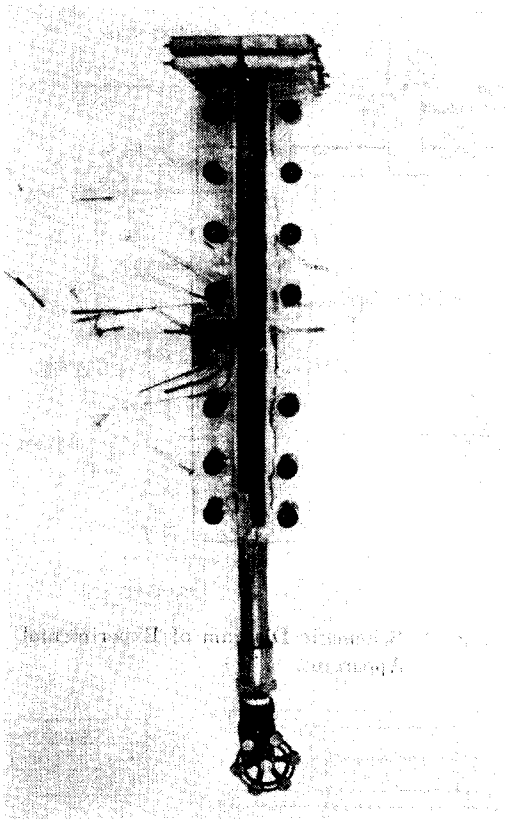


Fig. 5. Photo. of Channel

觀察이 될만큼 큰 凹部를 Channel側面에 設置하였다. 이 凹部化된 壁孔은 얕으면 흐름의 觀察이 困難할 것으로 豫想되어 充分히 깊게 製作하였으며 各部의 치수는 Fig.4에 表示하였다. 또한 凹部의 上部側壁에는 작은 空氣抽出孔이 있어 凹部에 試料가 充滿된 狀態, 即, 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 0.5mm의 孔을 뚫어 染料탱크에 連結해서 그 탱크로부터 染料를 Channel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 剪斷速度와 溶液의 濃度를 變更시켜가며 凹部 入口에서의 流体 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 觀察하기 위하여 凹部의 開口部가 5.2mm와 3.7mm인 두種類로 實驗을 行하여 觀察하였다.

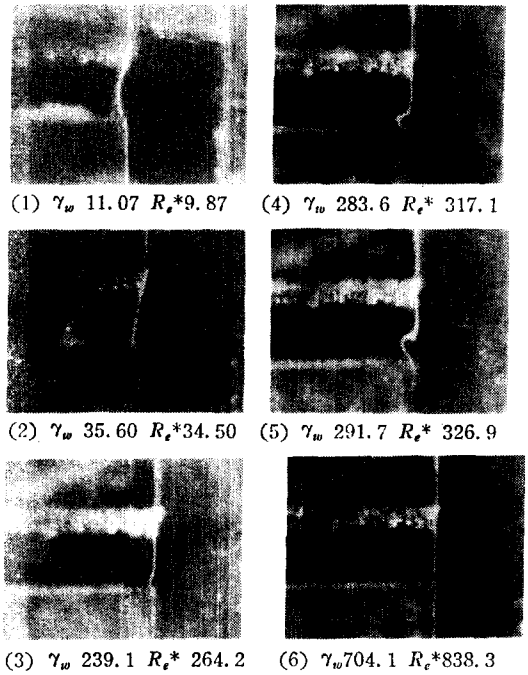
5. 實驗結果 및 考察

(1) 實驗結果

實驗裝置의 Channel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.6~Fig.15에 寫眞으로 나타내고 있으며, 여기서 γ_w는 壁面剪斷速度이고 R_e*는 一般 Reynolds數를 뜻한다. 이 寫眞들에 依하여 考察해 보면 溶液의 各 濃度와 剪斷速度에 따라서 各各 特徵이 있음을 알 수 있다.

(2) 考 察

Fig.16~Fig.21은 寫眞에 나타난 流動模樣을 圖示化한 것이다. Fig.16에 圖示한 模樣은 各 濃度別 溶液이 느린 流動速度에서는 다같이 凹部 入口의 中心線에 對해서 對稱이며 弓形으로 나타나고 있으며, 이것은 지금까지 孔 中心線에 關해서 흐름의 模樣이 對稱이라고 생각한 結果와 一致함을 보여주고 있다. Fig.17은 相當히

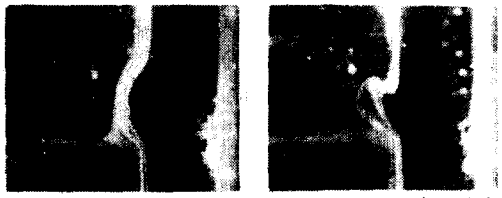


(1) γ_w 11.07 R_e*9.87 (4) γ_w 283.6 R_e* 317.1

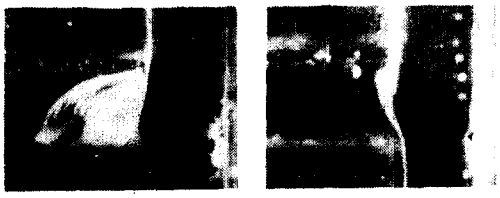
(2) γ_w 35.60 R_e*34.50 (5) γ_w 291.7 R_e* 326.9

(3) γ_w 239.1 R_e* 264.2 (6) γ_w704.1 R_e*838.3

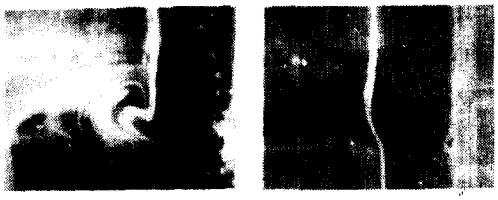
Fig. 6. PEO—0.07%, L=3.7mm



(1) γ_w 1.02 R_e* 0.69 (4) γ_w 699.2 R_e* 434.9

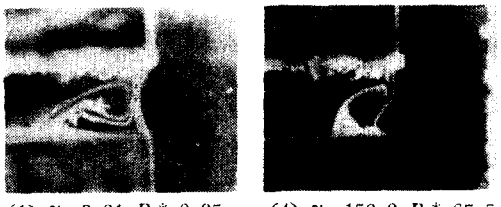


(2) γ_w 65.4 R_e* 59.1 (5) γ_w 803.1 R_e* 862.5



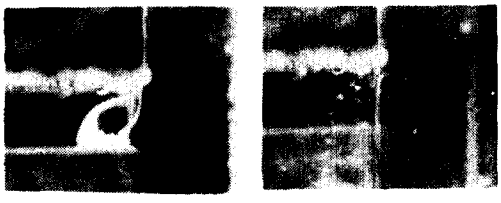
(3) γ_w 308.2 R_e* 309.9 (6) γ_w 1,075 R_e* 1,179

Fig. 7. PEO—0.07%, L=5.2mm



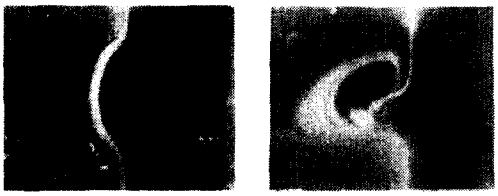
(1) γ_w 3.81 R_e* 0.95 (4) γ_w 158.0 R_e* 65.5

(2) γ_w 29.7 R_e* 9.79 (5) γ_w 779.4 R_e* 401.4

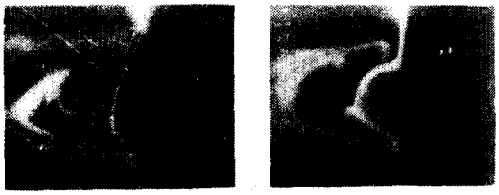


(3) γ_w 129.4 R_e* 52.2 (6) γ_w 1,017 R_e* 543

Fig. 8. PEO—0.1% L=3.7mm

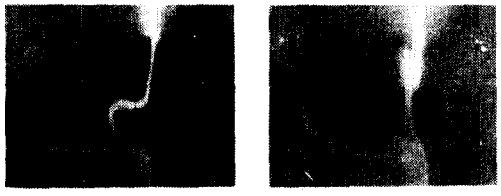


(1) γ_w 6.10 R_e* 1.45 (5) γ_w 107.0 R_e* 37.6



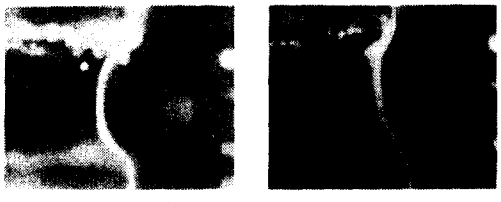
(2) γ_w 21.7 R_e* 6.15 (6) γ_w 188.0 R_e* 71.3

(3) γ_w 63.2 R_e* 20.7 (7) γ_w 265.8 R_e* 105.7

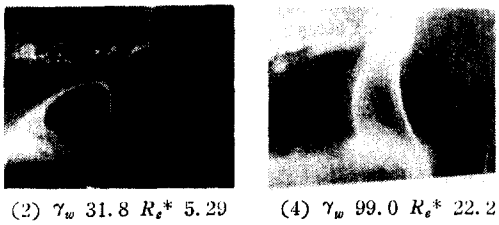


(4) γ_w 75.8 R_e* 25.4 (8) γ_w 373.0 R_e* 155.3

Fig. 9. PEO—0.1%, L=5.2mm

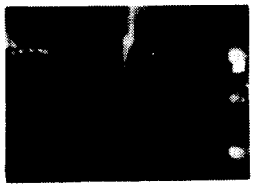


(1) γ_w 1.67 R_e* 0.13 (3) γ_w 54.9 R_e* 10.6



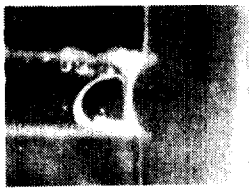
(2) γ_w 31.8 R_e* 5.29 (4) γ_w 99.0 R_e* 22.2

(5) γ_w 184.0 R_e^* 48.6 (7) γ_w 353.4 R_e^* 110.9

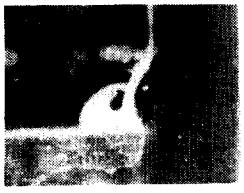


(6) γ_w 184.0 R_e^* 48.6 (8) γ_w 471.6 R_e^* 159.6

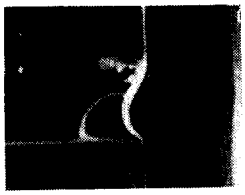
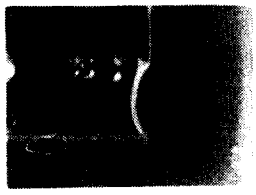
Fig. 10. PEO—0.2%, L=5.2mm



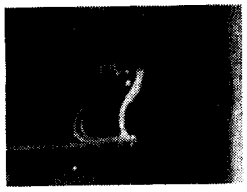
(1) γ_w 9.63 R_e^* 1.31 (1) γ_w 17.4 R_e^* 1.13



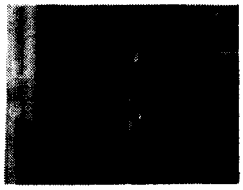
(2) γ_w 55.8 R_e^* 12.1 (2) γ_w 73.7 R_e^* 7.86

(3) γ_w 105.4 R_e^* 26.9 (3) γ_w 221.5 R_e^* 34.6

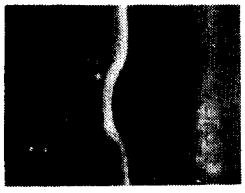
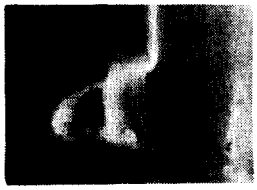


(4) γ_w 342.0 R_e^* 118.9 (4) γ_w 638.9 R_e^* 144.2

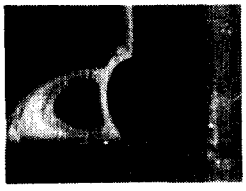


(5) γ_w 957.4 R_e^* 436.7 (5) γ_w 868.3 R_e^* 217.9

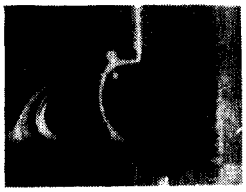
Fig. 11. PEO—0.2%, L=3.7mm **Fig. 12. PEO—0.3%, L=3.7mm**

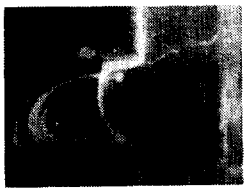
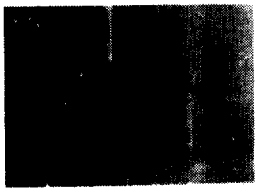
(1) γ_w 5.24 R_e^* 0.20 (5) γ_w 234.6 R_e^* 33.4



(2) γ_w 25.9 R_e^* 1.72 (6) γ_w 300.4 R_e^* 46.6

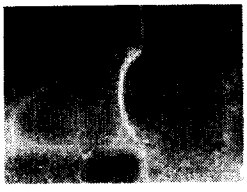
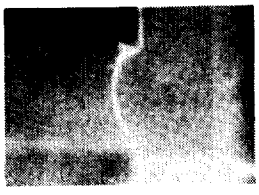


(3) γ_w 74.1 R_e^* 7.08 (7) γ_w 872.0 R_e^* 196.5

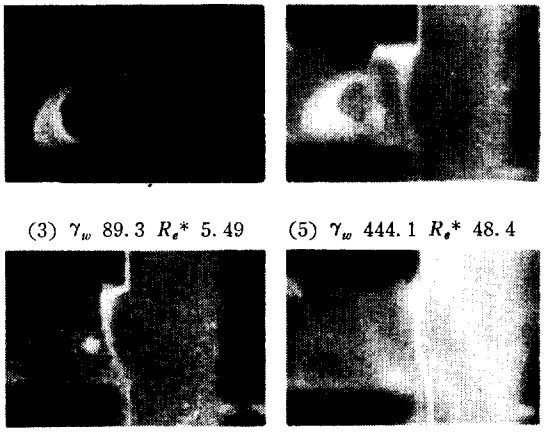



(4) γ_w 137 R_e^* 16.2 (8) γ_w 1,445 R_e^* 387.0

Fig. 13. PEO—0.3%, L=5.2mm

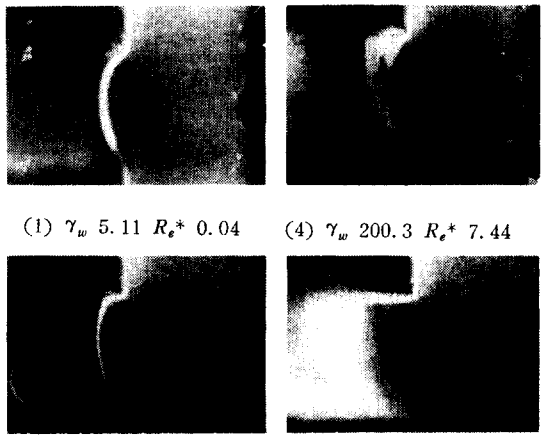
(1) γ_w3.7 R_e^* 0.07 (2) γ_w 19.9 R_e^* 0.71



(3) γ_w 89.3 R_e* 5.49 (5) γ_w 444.1 R_e* 48.4

(4) γ_w 180.9 R_e* 14.3 (6) γ_w 657.4 R_e* 82.4

Fig. 14. PEO—0.5%, L=5.2mm



(1) γ_w 5.11 R_e* 0.04 (4) γ_w 200.3 R_e* 7.44

(2) γ_w 22.9 R_e* 0.35 (5) γ_w 369.5 R_e* 17.7

(3) γ_w 169.7 R_e* 5.89 (6) γ_w 450.8 R_e* 23.4

Fig. 15. PEO—0.7%, L=5.2mm

빠른 흐름의 경우로서 各 溶液이 入口에서 直線的인 同一한 模様으로 흐르고 있음을 나타내고 있다. 그러나 Fig.16에서 Fig.17의 模様으로 變化되는 中間 流動速度에서는 一般的으로 豫想되는 模様과는 相異한 結果가 觀察되었다. 即, 凹部 入口의 흐름이 入口 中心線에 對해서 非對稱

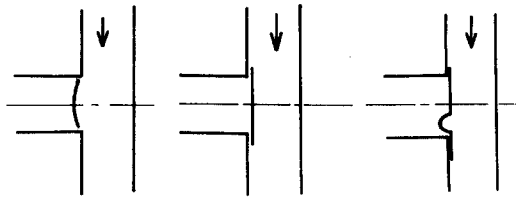


Fig. 16. Fig. 17. Fig. 18.

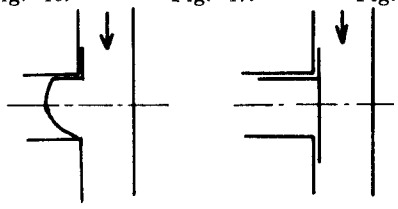


Fig. 19. Fig. 20.

形으로 되며 그 模様을 Fig.18, Fig.19, Fig.20에 圖示하였다. 이와 같이 非對稱形이 되는 흐름의 模様은 溶液의 各 濃度와 剪斷速度別로 相異하게 變化하며, Fig.17의 直線的인 模様으로 되기까지의 過渡的 段階의 範圍에서는 入口 附近이 極히 不安定한 狀態가 된다. 即, PEO 0.07%, 0.1%, 0.2%의 各 溶液은 Fig.18과 같이 同一한 模様이며, 0.3%, 0.5%의 溶液은 Fig.19와 같은 模様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.19와 같은 安定된 흐름뒤에는 比較的 廣範圍한 不安定性이 나타 난다. 또한 Fig.17과 같은 흐름이 始作되는 初期 剪斷速度에서도 直線形의 流動狀態로부터 Fig.20과 같이 가끔 凹部上壁에 따라 흘러 들어 간다. 上記한 바와 같은 模様의 變化를 그림21에 系統的으로 圖示하였다. 溶液의 濃度에 따라 Ⅰ. Ⅱ. Ⅲ의 3群으로 分類하였으며 剪斷速度에 따른 模様의 形態別로 (1)부터 (5)까지로 區分하였다.

1) Ⅰ群. Ⅰ群에서는 對稱形인 Ⅰ—(1)形에서 Ⅰ—(2)形과 같이 약간 들어지는 過程을 거쳐 中間形인 Ⅰ—(3)形이 되는데 Ⅰ—(2)形은 Ⅰ—(3)形으로 되는 遷移域의 形態라 볼 수 있다. 0.2% 溶液은 이 過程을 지나는 剪斷速度의 範圍가 적으나, 0.07%의 境遇는 範圍가 相當히 크다. Ⅰ—(4)形은 Ⅰ—(3)形으로부터 剪斷速度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 지

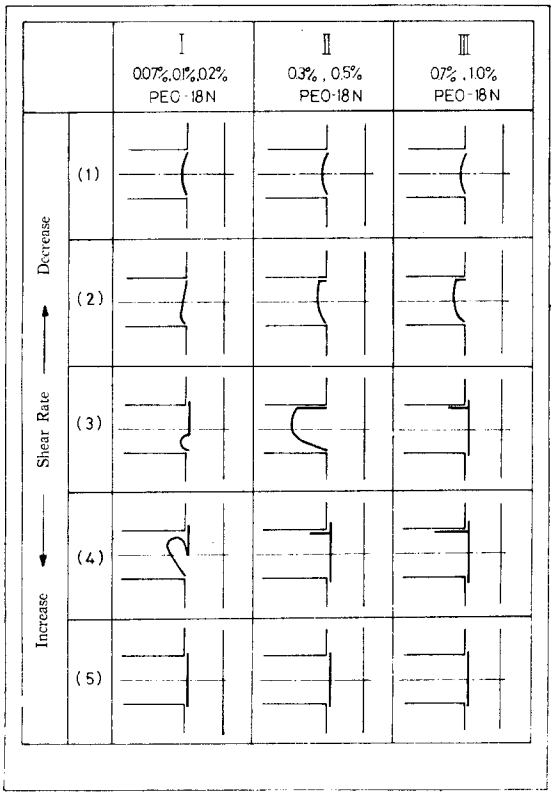


Fig. 21. Schematic Diagram of Flow Patterns.

면서 極히 짧은 範圍에서 不安定狀態가 發生하나 剪斷速度의 增加에 따라 Ⅰ—(5)形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)形은 剪斷速度의 增加에 따라 凹部上壁에 沿해서 直角으로 變하기 始作하는 Ⅱ—(2)形으로부터 非對稱形인 Ⅱ—(3)形으로 된다. Ⅱ—(3)形의 限界를 넘으면 (Ⅰ)群에 比해서 相當히 큰 剪斷速度의 範圍에서 不安定狀態가 나타나는 Ⅱ—(4)形이 된다. 더욱 增加 함에 따라 直線形인 Ⅱ—(5)形이 되면서 流動模樣이 安定된다.

3) Ⅲ群. 剪斷速度의 增加에 따라 Ⅱ群에서와 같이 對稱形인 Ⅲ—(1)에서 Ⅲ—(2)形의 흐름이 되지만 直線形의 Ⅲ—(5)가 되기 까지, Ⅱ群에서 보다도 더 넓은 範圍에 걸쳐서 Ⅲ—(3)形과 같이 瞬間的으로 凹部入口의 上壁에 沿해 빨려 들어가는 흐름이 不規則的으로 反復되는 不安定性이 強하게 나타난다. 剪斷速度의 增加에 따라 結局은 Ⅲ—(5)形의 模樣에서 安定된다.

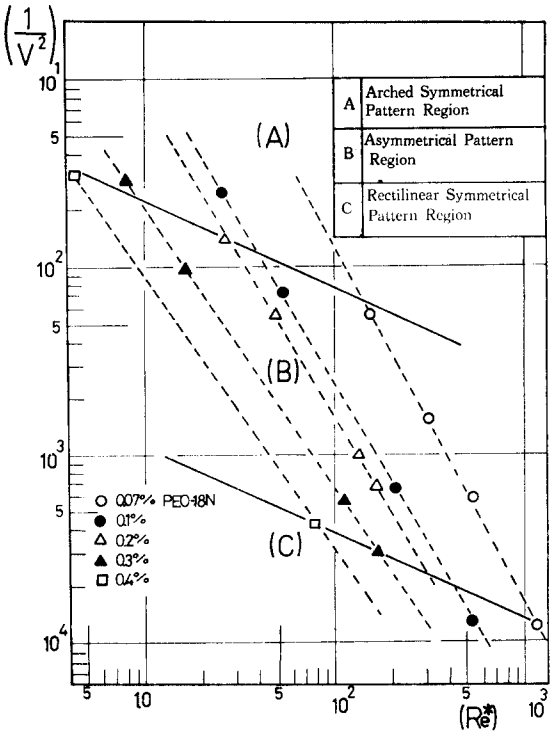


Fig. 22. $\frac{1}{V^2}$ versus Re*

上記한 1), 2), 3)項에서 考察한 바와 같은 이들 凹部(壁孔)入口에서의 流動樣樣의 變化를 整理하기 위해서 Ⅰ—(3), Ⅱ—(2), Ⅲ—(2)形의 模樣이 나타나는 遷移点과 Ⅰ—(5), Ⅱ—(5), Ⅲ—(5)形이 나타나는 各 遷移点의 資料를 取해서 圖示化한 것이 Fig.22이다. 이 圖面에서 孔入口 流動模樣이 3個 領域으로 區分됨을 알 수 있다. 또한 本 實驗에서 壁孔徑의 크기에 따른 影響을 考察하기 위해서 凹部 開口幅이 5.2mm와 3.7mm인 두 種類에 對해서 觀察하였으나 基本的 模樣에는 아무런 影響이 없음을 보여주고 있다.

6. 結　　論

Fig.21의 (1)에서 (3)의 模樣으로 遷移할때와 그로부터 (5)의 模樣으로 遷移하는 時点을 알기 위하여 變化 過程을 一般Reynolds 數에 따라 圖示化한 圖面이 Fig.22이다. 이 圖面으로부터

2個의 同一한 勾配를 갖는 直線에 依해 (A), (B), (C)로 나누어지는 다음 3個 領域으로 區分됨을 알 수 있다.

(1) 弓形 對稱流動模様 領域
(2) 非對稱流動模様 領域
(3) 直線形 對稱流動模様 領域

參 考 文 献

1. 富田幸雄, "流体力學序說", 養賢堂, (1971) pp. 12～13.
2. 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.
3. J.M. Boradbent, A. Kaye, A.S. Lodge and D. G. Vale, "Possible Systematic Errors in the Measurement of Normal Stress Differences in Polymer Solutions in Steady Shear Flow", Nature, Vol. 217 (1968) pp. 55～56.
4. W.G. Pritchard, "The Measurement of Normal Stresses by Means of Liquid-Filled Holes in a Surface", Rheologica Acta, 9 (1970), pp. 200～207.
5. R.I. Tanner and A.C. Pipkin, "Intrinsic Errors in Pressure-Hole Measurement", Trans. of the Society of Rheology, 13 (1969), pp. 471～484.
6. K. Higashitani and W.G. Pritcherd, "A Kinematic Calculation of Intrinsic Errors in Pressure Measurements made with Holes", Unpublished. (1972)
7. 富田, 長谷川, 金春植, 二見, "粘彈性流体の壓力測定用壁孔の示壓に及ぼす影響 (第1報)" 日本機械學會講演論文集 720—17(1972) pp. 127～130.
8. 金春植, "粘彈性流体의 壓力測定에 關한 硏究", 韓國海洋大學論文集 第10輯 (1975) pp. 143～155.
9. B.D.a Colemn, H. Markovitz and W. Noll, "Viscometric Flows of Non-Newtonian Fluids", Springer-Verlag New York Inc. (1966) pp. 23～26.
10. Stanly Middleman, "The Flow of High Polymers", Interscience Publishers, (1968) pp. 95.