

粘彈性流體의 粘性에 關한 實驗的 研究

金 春 植* · 李 英 浩*

An Experimental Study on the Viscosity of Visco-elastic Fluids

Chunsik Kim, Yeongho Lee

Abstract

Viscosity, especially characteristic among various properties of visco-elastic fluids such as high polymer solutions, is affected mainly by temperature and concentration.

Hence, it is important for fluid engineering to express, by some equations, how the fluid characteristics vary with the change of temperature and concentration and to analyze them to obtain consistent viscous characteristics.

High polymer solutions, synthetic products of modern chemical industry, suggest many interesting investigations because they are typical visco-elastic materials.

Experimentation was made to derive some useful fluid characteristic equations of SEPARAN-NP10(polyacrylamide) expressed by n (flow behavior index) and K' (consistency index) when it is given temperature and concentration variation.

To measure viscosity, capillary viscometer was adopted and the range of experimentation is 0~2,000 P.P.M. in concentration and 15~55°C in temperature.

The experimental results are summarized as follows:

The flow behavior index n

- 1) has nearly constant results irrespective of temperature variation at same concentration and the results are shown in (Table.4-4-3)
- 2) has following equation, regardless of temperature, for the variation of concentration.

$$n = -1.0765 \times 10^{-4}P + 0.9915 \quad (P: \text{P.P.M.})$$

The consistency index K'

- 1) has different results for the variation of temperature at same concentration and the results are given in (Table.4-7-2)
- 2) has following equation for the variation of concentration at same temperature.

$$\log 10^4 K' = 6.4785 \times 10^{-4}P - 1.0529 \quad (P: \text{P.P.M.})$$

*正會員, 韓國海洋大學

List of Symbols

A	: Cross section area of capillary tube	cm^2
a	: Radius of capillary tube	cm
D	: Diameter of capillary tube	cm
d	: Diameter of material reservoir	cm
G	: Modulus of elasticity	kg/cm^2
g	: Gravity acceleration	cm/sec^2
H	: Total head	cm
h	: Head loss	cm
$\left. \begin{matrix} h_1, h_2 \\ h_3, h_4 \end{matrix} \right\}$: Head	cm
K, K'	: Consistency index or loss coefficient	—
L	: Length of capillary tube	cm
L_e	: Entrance length	cm
n, n'	: Flow behavior index	—
N_{Re}	: Generalized Reynolds number	—
P	: Concentration of solutions	P. P. M.
$\Delta P, P_{in}$: Pressure	kg/cm^2
Q	: Volume flow rate	cm^3/sec
R_e	: Reynolds number	—
T	: Temperature of solutions	$^{\circ}\text{C}$
u	: Flow velocity in a tube	cm/sec
V	: Mean velocity	cm/sec
α	: Kinematic energy correction factor	—
$\dot{\gamma}$: Shear strain rate	$1/\text{sec}$
γ_m	: Specific weight of material	kg/cm^3
γ_w	: Specific weight of water	kg/cm^3
η_c	: Dimensionless constant (Eq. 2.34)	—
λ	: Rigidity modulus (Eq. 2.5)	kg/cm^2
μ	: Absolute viscosity	$\text{kg}\cdot\text{sec/cm}^2$
μ_a	: Apparent viscosity	$\text{kg}\cdot\text{sec/cm}^2$

ν	: Kinematic viscosity	cm^2/sec
ρ	: Density	$\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$
τ	: Shear stress	kg/cm^2
τ_w	: Shear stress at wall	kg/cm^2

1. 序 論

流體 物性値中에서 粘度는 流體의 流動特性을 糾明 하는데 가장 重要한 要素이며 溶液의 溫度와 濃度에 따라 크게 影響을 받는다. 따라서 溫度와 濃度에 따른 流體의 粘性和 流動性的 變化關係를 數式으로 表示하고 이를 解析하여 一貫性 있는 粘度特性을 糾明하는 것은 工學上 重要한 意味를 갖는다.

從來, 流體工學分野에서 主로 取扱하여온 물이나 기름 등과 같은 뉴우톤 流體에서 溶液의 溫度와 濃度에 따른 粘度特性은 많은 研究에 依해 統一된 理論이 確立되어 있다.

그러나 近來에는 高分子 化學工業의 發達로 應用分野가 急增하고 있는 高分子 폴리머 溶液 (Polymer solutions)을 많이 取扱하게 되었으며 이 高分子 폴리머 溶液은 뉴우톤 流體와 달리 粘性和 彈性的 流動特性을 나타내는 粘彈性 流體이므로 뉴우톤 流體에서는 볼 수 없는 特異한 流動特性을 나타내고 있으나 아직까지 이에 關한 物性値 測定 및 流動特性에 關한 理論이 完全히 確立되지 않은 實情이며 現在 많은 研究가 進行되고 있다.¹⁾ 粘性에 關한 研究는 主로 常溫 附近의 溫度變化에 關한 發表가 있으나 統一되지 못하고 있다.

本 研究에서는 美國 Dow Chemical International 社製品인 SEPARAN NP-10(Polyacrylamide)을 試料로 하여 250P. P. M., 500P. P. M., 750 P. P. M., 1,000P. P. M., 1,250P. P. M., 1,500 P. P. M., 1,750P. P. M., 2,000 P. P. M., 水溶液의 8 段階濃度에 對하여 各各 15°C , 20°C , 25°C , 30°C , 35°C , 40°C , 45°C , 50°C , 55°C 까지 5°C 單位로 溫度를 變化시켜 粘彈性 流體의 廣範圍한 實驗을 通하여 溫度와 濃度에 對한 粘彈性 流體의 粘度特性에 關한 實驗式을 導出하였다.

粘度測定裝置로는 以前부터 主로 사용되어 왔던 毛細管粘度計를 擇하였고 實驗에 必要한 裝

置들을 設計製作하여 實驗을 行하였다.

實驗式은 주어진 基本理論式에 流動損失 및 粘彈性流體의 特性을 考慮하여 誘導되었고 얻어진 數值들을 電算處理하여 보다 正確한 流動特性式을 導出하였다.

2. 粘彈性 流體의 流動特性 理論

2.1. 粘彈性 流體(Visco-elastic Fluids)^{2),3)}

粘性係數란 流體가 剪斷을 받을 때 發生하는 抵抗의 原因이 되는 流體特性이고 뉴우톤의 粘性法則

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

에서 τ 는 剪斷應力, μ 는 粘性係數이고 $\frac{du}{dy}$ 는 速度勾配 또는 剪斷變形速度이다. 式 (2.1)에서 보던 一定한 變形速度에 對해 剪斷應力은 粘性係數에 比例한다.

Fig. 2-1 에서와 같이 剪斷應力和 變形速度와의 關係가 式 (2.1)을 따르는 流體를 뉴우톤 流體라 하며 普通의 壓力에서 粘性係數는 壓力과는 無關하고 溫度에 依해서만 影響을 받는다.

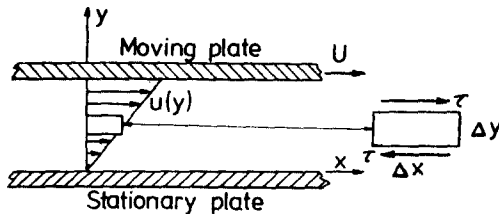


Fig. 2-1. Flow between parallel plates to illustrate viscosity.

물에 對한 粘性係數 μ 의 溫度變化에 따른 값이 Table. 4-1에 提示되어 있다.

뉴우톤 流體에 關한 式(2.1)에서의 剪斷應力和 剪斷變形速度와의 關係를 따르지 않는 流體들을 普通 非 뉴우톤 流體라고 한다.

Fig. 2-2는 非 뉴우톤 流體의 特性을 나타내고 있다.

그림에서 A는 Bingham 塑性(Plastics)으로서 剪斷應力 τ 는 $\tau = \tau_y + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$ 로 나타내며 τ_y 는 降伏應力을, μ_p 는 塑性粘度를 意味한다. 그리고 $\dot{\gamma}$ 는 du/dy 를 意味한다.

B는 擬塑性流體(Pseudoplastic Fluid)를, C는 Dilatant 流體를 表示하고 있다.

이러한 非 뉴우톤 流體들을 나타낼수 있는 關係式들이 多數 있으나 그 中 가장 簡單한 것이 指數法則式(Power Law Equation)으로서 Ostwald에 의해 提案되었다.⁴⁾ 即

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.2)$$

K 및 n은 特定한 非 뉴우톤 流體에 對한 常數이고 K는 流體의 粘性(Consistency)의 크기를, 指數인 n은 特定한 非 뉴우톤 流體가 뉴우톤 流體와 遊離되는 程度를 나타내고 있다.

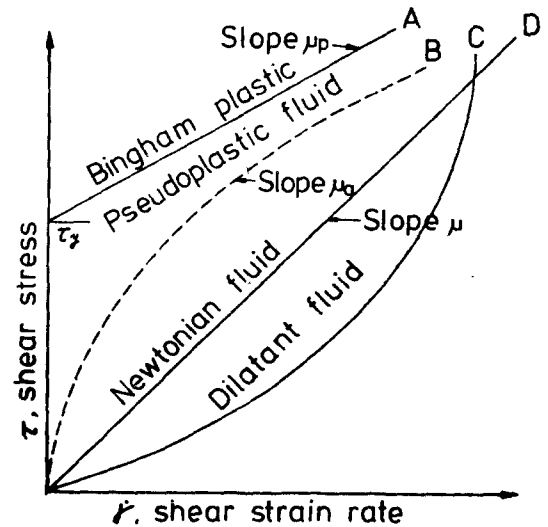


Fig. 2-2. Typical shear stress-strain rate relationships for Non-newtonian fluids.

$n > 1$ 일때를 Dilatant 流體, $n = 1$ 일때 뉴우톤 流體, $n < 1$ 일때를 Pseudoplastic 流體라고 한다.

겉보기 粘度(Apparent Viscosity)를

$$\mu_a = \tau / \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

로 定義하면 式 (2.2)에 依해

$$\mu_a = K \cdot \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (2.4)$$

가 된다. 또 다른 非 뉴우톤 流體는 粘彈性 流體(Visco-elastic Fluid)로서 彈性的인 性質과 粘性的인 性質을 同時에 가지고 있다. 가장 簡單한 型은 粘度로서는 뉴우톤 流體의 性質을, 彈性으로서는 Hook의 法則을 따르는 物質이다. 即

$$\dot{\gamma} = \tau / \mu_0 + \dot{\epsilon} / \lambda \quad (2.5)$$

여기서 λ 는 剛性係數이다.

Maxwell은 式 (2·5)를

$$\tau + (\mu_0/\lambda) = \dot{\tau} \mu_0^f \quad (2\cdot6)$$

로 變形하고 上記 法則을 따르는 流體들을 Maxwell 流體라고 불렀다.⁵⁾ 高分子 폴리머 溶液은 典型的인 粘彈性流體이고 産業적으로 廣範圍한 應用分野를 提供하고 있다. 이러한 流體의 레올로지의 舉動(Rheological Behavior)은 粘性 및 彈性的의 複合性質을 갖기때문에 뉴우톤 流體에서는 發見되지 않는 特殊한 現象(Weissenberg 効果, Siphon 効果, Barus 效果等) 들이 觀察된다.⁶⁾ 많은 Rheology 方程式이 提案되었으나 實際의 流動現象을 明確히 나타낼 수 있는 式을 求하는 것은 어려울 뿐 아니라 粘度計 內에서의 單純流動을 除外하면 Rheology 方程式은 大개 複雜하므로 解析的, 組織的인 理解가 어려운 實情이다.

2·2. 毛細管 粘度計(Capillary Viscosimeter)^{7), 8), 9), 10)}

粘度測定裝置는 構造나 操作方法에 따라 廻轉式, 落球式, 毛細管式 粘度計 등으로 區分된다.¹¹⁾

毛細管 粘度計에서 管内의 흐름은 層流 이어야 하며 亂流일 境遇에는 關係式이 成立하지 않는다.

毛細管 粘度計는 普通 긴 管으로 되어있어 流體가 管内를 흐를 때 發生하는 壓力降下 및 流出되는 體積流量을 測定하고 Hagen-Poiseuille 式을 適用하여 粘性係數를 求하는 裝置이다.

毛細管 內에서의 흐름은 單純剪斷流動이어야 하며 一定한 斷面을 가진 管內에서의 흐름은 定常狀態, 層流 그리고 等溫의 이어야 한다.

入口나 出口 近處에서는 흐름의 狀態가 달라진다. 이러한 端效果를 갖는 길이는 管 內經 및 力學的 變數의 函數로 表示된다. 例를 들어 뉴우톤 流體에서 完全히 展開된 單純剪斷 흐름을 얻기 爲한 入口길이는 Reynolds數의 影響을 받는다는 것이 實驗的으로 밝혀져 있다. 即

$$L_e/D = 0.035 \frac{VD\rho}{\mu} = 0.035 R_e \quad (2\cdot7)$$

여기서 D 는 管直徑이고 L_e 는 入口길이이다. 이러한 端效果를 줄이는 方法은 긴 毛細管을

使用하여 入口 近處에서의 壓力降下가 全길이에 걸친 壓力降下에 比하여 작게하는 것이다. L_e 이 全長이라면 L_e/L 의 값은 작아야 되고 대개 0.01 정도이다.¹²⁾ 이러한 制約으로 해서 實際로는 긴 管이 必要하다. 또 다른 考慮事項은 熱發生問題이다. 流體가 毛細管을 흐르면서 粘性 摩擦에 의한 發生熱이 放出될때는 必然的으로 溫度勾配가 생기고 流體의 溫度는 上昇한다.

이러한 熱로 因해서 높은 剪斷速度 높은 粘度 값, 또는 流動이 長時間 維持될 때에는 流動特性式을 決定하는데 制約要因이 되고 있다.

粘度는 溫度에 敏感하므로 溫度變化가 극히 작아야 한다.

같은 理由로 裝置의 溫度는 正確하게 測定되고 制御되어야 한다. 最大溫度 上昇값이 1°C 未滿일때는 熱發生의 影響에 依해 結果值를 修正할 必要가 없다고 判斷할 수 있다.¹⁴⁾

本 實驗은 熱發生 問題를 考慮하지 않고 實行되었으나 毛細管과 外部와의 溫度差에 依한 熱放出을 없애기 爲해 斷熱材로서 Glass Wool을 使用하여 斷熱을 行하였다.

粘度를 求하는데 適用되는 Hagen-Poiseuille 式이 成立하기 爲해서는 管의 흐름은 層流이어야 한다.

非 뉴우톤 流體에서는 亂流의 發生이 뉴우톤 流體의 境遇에 比해 多小 抑制되므로 Reynolds數가 普通 2,300以下에서는 層流의 흐름이 確實하다.

粘彈性 流體에서는 臨界 Reynolds數가 더 커진다는 것이 實驗的으로 밝혀져 있다.¹⁵⁾

2·3. 理論式 誘導 및 解析^{16), 17), 18), 19)}

1) Hagen-Poiseuille 式

圓管을 흐르는 定常, 非壓縮性, 層流流動에 있어서 Fig.2-3과 같이 圓筒形 無限小 Sleeve를 自由體로 잡으면 運動方程式이 l 方向으로 適用된다.

그림에서

$$\begin{aligned} & 2\pi r \delta r P - \left(2\pi r \delta r P + 2\pi r \delta r \frac{dP}{dl} \cdot \delta l \right) + 2\pi r \delta l \tau \\ & - \left[2\pi r \delta l \dot{\tau} + \frac{d}{dr} (2\pi r \delta l \tau) \delta r \right] + r 2\pi r \delta r \delta l \sin \theta \\ & = 0 \end{aligned} \quad (2\cdot8)$$

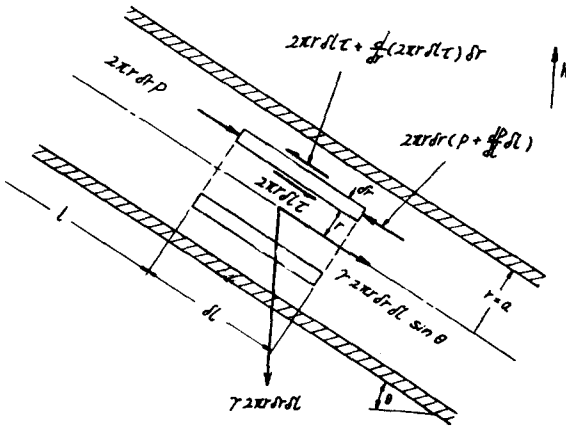


Fig. 2-3. Free-body diagram of cylindrical sleeve element for laminar flow.

$\sin \theta$ 를 $-dh/dl$ 로 바꾸고 自由體 體積 $2\pi r\delta r$ δl 로 나누면

$$\frac{d}{dl}(P+\tau h) + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(\tau r) = 0 \quad (2.9)$$

$d(P+\tau h)/dl$ 은 r 의 函數가 아니므로 式에 $r\delta r$ 을 곱한뒤 r 에 關해 積分하면

$$\frac{r^2}{2} \frac{d}{dl}(P+\tau h) + \tau r = A \quad (2.10)$$

여기서 A 는 積分常數이다.

圓形管에서 이 方程式은 $r=0$ 에서 滿足해야 하므로 $A=0$ 이 된다.

$$\tau = -\mu \frac{du}{dr}$$

를 式(2.10)에 代入하고 整理하면

$$du = \frac{1}{2\mu} \frac{d}{dl}(P+\tau h)r \cdot dr - \frac{A}{\mu} \frac{dr}{r}$$

한번 더 積分하면

$$u = \frac{r^2}{4\mu} \frac{d}{dl}(P+\tau h) - \frac{A}{\mu} \ln r + B \quad (2.11)$$

圓形管에서 $A=0$, $r=a$ 일때 $u=0$ 이므로 常數 B 를 求하여 整理하면

$$u = -\frac{a^2-r^2}{4\mu} \frac{d}{dl}(P+\tau h) \quad (2.12)$$

體積流量 $Q(\text{cm}^3/\text{s})$ 는 速度 u 를 圓形斷面積에 對해 積分해서 얻을 수 있다.

$$Q = \int_0^a 2\pi r u dr$$

垂直管에 對해서 $\frac{\Delta P}{L} = -\frac{d(P+\tau h)}{dl}$ 이고 直徑 D 를 代入하여 計算하면

$$Q = \frac{\pi D^4 \Delta P}{128 \mu L} \quad (2.13)$$

粘性係數 μ 에 對해 整理하면

$$\mu = \frac{\pi D^4 \Delta P}{128 Q L} \quad (2.14)$$

式(2.13)을 Hagen-Poiseuille 式²⁰⁾이라 하며 毛細管 粘度計의 粘度測定에서 基本的인 式이 된다.

2) Weissenberg 式

半徑 a 인 毛細管을 通過하는 層流定常狀態 流動에서 體積流量 Q 는 速度 u 에 關係하고 質量 平均速度 $[V]$ 를 利用하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = \int_a^0 2\pi r u dr = \pi a^2 V \quad (2.15)$$

式을 部分積分하면

$$Q = \left[\pi r^2 u \right]_a^0 - \int_a^0 \pi r^2 \frac{du}{dr} dr$$

$r=a$ 에서 $u=0$, 即

$$Q = -\int_0^a \pi r^2 \frac{du}{dr} dr \quad (2.16)$$

剪斷變形速度 및 剪斷應力關係를 函數式으로 表示하면 $r = \frac{du}{dr} = f(\tau)$ 가 되고 剪斷應力 τ 는 圓管에서 半徑에 對해 線形的이므로 $\pi r^2 \Delta P = 2\pi r \tau L$ 에서

$$\tau = C_0 r / 2 \quad (2.17)$$

여기서 C_0 는 $\Delta P/L$ 이며 流動을 일으키는 壓力 勾配이다.

壁面 剪斷應力 τ_w 는

$$\tau_w = a \Delta P / 2L \quad (2.18)$$

이 되고 式(2.17)에서

$$d\tau = C_0 dr / 2 \quad (2.19)$$

$$r^2 = 4\tau^2 / C_0^2 \quad (2.20)$$

式(2.18) (2.19) 및 (2.20)을 式(2.16)에 代入하면

$$\frac{4Q}{\pi a^3} = \phi(\tau_w) = \frac{4}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (2.21)$$

을 얻고 $\phi(\tau_w)$ 가 이 方程式에 依해 定義된다. 式(2.21)을 τ_w 에 關해 微分하면

$$\frac{d\phi}{d\tau_w} = -\frac{3\phi}{\tau_w} + \frac{4}{\tau_w} f(\tau_w)$$

가 되고

$f(\tau_w)$ 에 對해 整理하면

$$f(\tau_w) = \frac{3}{4}\phi + \frac{1}{4}\tau_w \frac{d\phi}{d\tau_w} \quad (2.22)$$

가 된다.

式 (2.22)를 Weissenberg-Rabinowitsch-Mooney 式이라 부른다.²¹⁾

ϕ 및 τ_w 는 測定可能하므로 流體의 剪斷學動이 式으로써 나타내진다. τ_w 에 對한 ϕ 의 값을 圖示하면 $d\phi/d\tau_w$ 를 求할 수 있고, 따라서 τ 에 對한 $f(\tau)$ 의 座標로부터 粘性係數 μ 를 剪斷變形速度 $\dot{\gamma}$ 의 函數로서 求할 수 있다.

$$\mu = \tau / \dot{\gamma} = \tau / f(\tau) \quad (2.23)$$

但, $\dot{\gamma} = f(\tau)$ 이다.

τ_w 에 對한 ϕ 의 값을 圖示한 座標를 指數法則 式으로 表示하면

$$\tau_w = K' \phi^{n'} \quad (2.24)$$

式 (2.22)로 부터

$$\dot{\gamma} = f(\tau) = \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \left(\frac{\tau}{K'} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.25)$$

式 (2.25)에서 指數法則 流體에 對해서는 $n=n'$ 이다

윗 式을 τ 에 關해 整理하면

$$\tau = \left(\frac{3n}{3n+1} \dot{\gamma} \right)^n \cdot K' \quad (2.26)$$

이 表現을 指數法則 式 (2.2)의 形態 $\tau = K \dot{\gamma}^n$ 로 바꾸면,

$$K = K' \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \quad (2.27)$$

가 된다.

2.4. 實驗式

壓力降下 ΔP 및 平均流速 V 가 測定되면 흐름에 對한 두가지 常數 K' , n' 는 다음의 關係式으로 定義된다.

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4L} = \tau_w = K' (8V/D)^{n'} \quad (2.28)$$

但, $\phi = \frac{4Q}{\pi a^3} = \frac{8V}{D}$ 이다.

윗 式에서 K' 는 粘性을 나타내는 物質常數 (Consistency Constant)이고 n' 는 流動學動指數 (Flow Behavior Index)를 意味하며 $8V/D$ 는 뉴우톤 流體의 Poiseuille 流動에 對한 壁面 剪斷變形速度를 나타낸다.

n' 는 $\log(8V/D)$ 對 $\log(\tau_w)$ 의 接線方向의 기

울기와 같고 K' 는 $\log(8V/D)=0$ 일때의 $\log(\tau_w)$ 의 값 即 切片의 값이 된다.

$$n' = \frac{d(\log \tau_w)}{d(\log 8V/D)} \quad (2.29)$$

앞에서 밝힌대로 指數法則 流體의 境遇에는 $n=n'$ 이고, 뉴우톤 流體의 境遇 $n=1$ 이므로 式 (2.1), (2.2) 및 (2.26)에서 다음 式이 成立한다.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = K \dot{\gamma}^n = \left(\frac{4n}{3n+1} \dot{\gamma} \right)^n K'$$

여기서 $K=K'=\mu$ 이므로 K 는 粘性係數인 것을 알 수 있다.

式 (2.28), (2.29)로 부터 다음과 같은 Rheology 常數에 關한 式을 얻을 수 있다.

$$n = \frac{d(\log \tau_w)}{d(\log 8V/D)} \quad (2.30)$$

$$K' = \tau_w (8V/D)^{-n} \quad (2.31)$$

式 (2.24)에서 알 수 있는 바와같이 同一溫度, 同一濃度下에서 最少限 두개의 서로 다른 ϕ 값에 對한 τ_w 의 값을 알면 聯立方程式의 解에 依해 n 및 K' 의 값을 求할 수 있다.

本 實驗에서는 約 8~10個의 ϕ 의 값과 이에 對應하는 τ_w 의 값을 兩對數 그래프에 記入하여 여기에서 얻어지는 直線의 기울기를 n , $\phi=\log 1=0$ 일때의 切片의 값을 K' 로하여 流動常數의 값을 얻었다.

直線의 式은 最小自乘法을 適用하여 電算處理를 거쳐 求해졌다.

다음으로 毛細管內의 흐름이 湍流인가를 確認하고 實驗裝置의 正確度 및 流動常數와의 關係를 알아보기 爲해 粘性係數 μ 를 求하는 實驗式을 誘導해 보면 式 (2.14)에서

$$\mu = \frac{\pi D^4 \Delta P}{128QL}$$

여기에서 ΔP 는 流體가 毛細管을 지나면서 摩擦結果로 發生한 壓力損失을 말하며 이를 水頭損失 h_L 로 表示하면

$$h_L = H - \alpha \frac{V^2}{2g} - K \frac{V^2}{2g} \quad (2.32)$$

여기에서 H =溶液貯藏筒內의 溶液表面에서의 全水頭 에너지 (cm·g/g)

$\alpha \frac{V^2}{2g}$ =毛細管內를 흐르는 流體의 單位重量當運動 에너지 (cm·g/g)

α =運動 에너지 修正係數, 層流에서 $\alpha=2$

$K \frac{V^2}{2g}$ = 毛細管入口에서 流動의 急激한 收縮으로 因한 損失에너지 (cm·g/g)
 K = 損失 係數이며 Square-edge의 境 遇는 $K=0.5$

全 水頭 H (cm·g/g)는 Fig. 2-4를 參照하여 다음과 같이 求해진다.

$$\text{但, } H = \frac{P_{in}}{\gamma_m} + h_4 + L - h_3 - \frac{1}{2}h_2 \quad (\text{cm} \cdot \text{g}/\text{g}) \quad (2.33)$$

P_{in} = 貯藏筒에 加해진 壓力 (g/cm²)

h_4 = 貯藏筒에 溶液을 채웠을 때의 높이 (cm)

L = 毛細管 길이 (cm)

$\frac{1}{2}h_2$ = N 回 流出時의 降下된 平均水頭

$$h_2 = \frac{4}{\gamma_m \pi d^2} \cdot G_N \quad (\text{cm})$$

h_3 = 溶液을 채운後 ($N-1$)回 流出시켰을 때 까지 降下된 水頭

$$h_3 = \frac{4}{\gamma_m \pi d^2} \cdot \sum_{i=1}^N G_{K-1} \quad (\text{cm})$$

G_K = 每回마다의 流出量 (g)

毛細管 入口部에서의 流動이 粘彈性 流體일

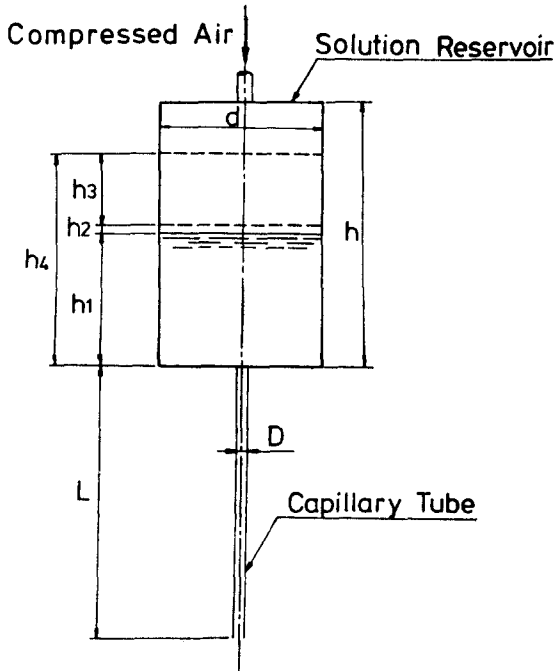


Fig. 2-4. Illustration of solution reservoir for calculation.

境遇에 入口 壓力降下에 適用되는 式은 Bagley 에 依해 求해진다.²²⁾

$$\Delta P_{ent}/\tau_w = 2\eta_c + \tau_w/G \quad (2.34)$$

但, ΔP_{ent} = 入口部의 壓力降下
 τ_w = 管壁에서의 剪斷應力
 η_c = 無次元 常數
 G = 彈性率

上記 式에 指數法則 式 (2.2)를 適用하면

$$\Delta P_{ent} = (2\eta_c K) \dot{r}^n + \left(\frac{K^2}{G} \right) \dot{r}^{2n} \quad (2.35)$$

그러나 式 (2.35)를 式 (2.32)에 適用시킬 境遇 式이 너무 複雜하게 되고 그 값은 微小함으로 本實驗에서는 考慮하지 않았다.

그러므로 式 (2.14)를 利用하여 粘性係數 μ 를 求하기 爲하여 式 (2.32), (2.33)만이 適用되어 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\pi D^4 \gamma_m}{128 Q L} \left(\frac{P_{in}}{\gamma_m} + h_4 + L - h_3 - \frac{1}{2}h_2 \right. \\ &\quad \left. - \alpha \frac{V^2}{2g} - K \frac{V^2}{2g} \right) \\ &= \frac{\pi D^4 \gamma_m t_N}{128 L G_N} \left[P_{in} + \gamma_m (h_4 + L) - \frac{4}{\pi d^2} \right. \\ &\quad \left. \left(\sum_{i=1}^N G_{N-1} + \frac{1}{2} G_N \right) - 2.5 \times \frac{\rho_m}{2} \left(\frac{G_N}{4 \gamma_m t_N} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.36)$$

但, γ_m = 該當溫度에서의 溶液 比重量 (g/cm³)

ρ_m = 溶液의 密度 (kg. sec²/m⁴)

t_N = N 回 流出時 걸린 時間 (sec)

P_{in} = 貯藏筒에 加해진 壓力 (kg/cm²)

D = 毛細管 直徑 (cm)

h_4 = 처음 溶液을 채웠을 때의 溶液의 높이 (cm)

h_2 = N 回 流出時 降下된 水頭 (cm)

h_3 = 溶液을 채운後 $N-1$ 回까지 流出시켰을 때 降下된 水頭 (cm)

A = 毛細管 斷面積 (cm²)

L = 毛細管 길이 (cm)

一定 溫度 및 一定濃度에서 求해진 粘性係數 μ 의 값을 利用하여 Reynolds 數를 求해서 이때의 흐름이 層流狀態를 維持하고 있는 가를 判斷한다.

3. 實驗裝置 및 實驗方法

3.1 實驗裝置

Fig. 3-1은 本 實驗裝置의 全略圖이고 Fig. 3-2는 溶液貯藏筒의 詳細圖이며 Fig. 3-3과 Fig. 3-4는 이들에 對한 各各의 寫眞을 나타내고 있다.

本 實驗裝置는 溶液貯藏筒을 中心으로 다음 5要素로 構成되어 있다.

1) 溶液貯藏筒 및 溶液의 流出毛細管系統

2) 供給壓力의 調節 및 測定系統

3) 溶液貯藏筒內의 高分子 溶液을 恒溫狀態로 維持하기 爲한 加熱 및 溫水循環系統

4) 溶液의 溫度測定系統

5) 流出溶液의 流量測定系統

實驗裝置의 概要는 다음과 같다.

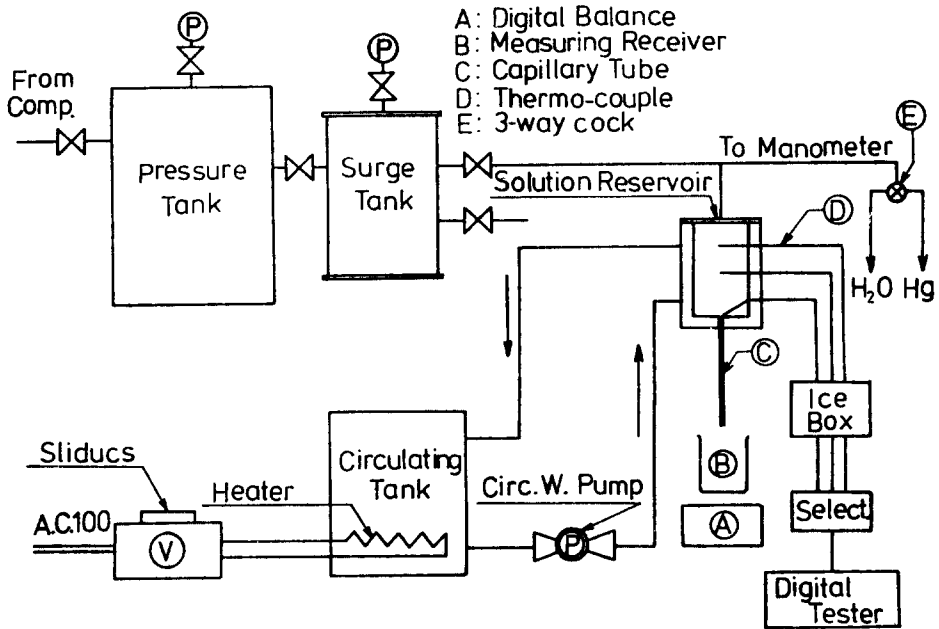


Fig. 3-1 Schematic diagram of experimental apparatus

壓縮機에서 壓縮된 空氣는 壓縮空氣 貯藏탱크와 서어지 (Surge Tank)를 거쳐서 溶液貯藏筒에 供給되고 이때 加해진 壓力을 測定하기 爲해 溶液筒의 上端이 水銀과 清水液柱計로 連結되어 있다.

溶液貯藏筒內에서 加壓된 溶液이 毛細管 C를 통해 流出되면 비커 B와 디지털 저울 A에 依해 그 重量이 測定된다.

한편 溶液貯藏筒의 外周에는 恒溫維持를 爲해 溫水자켓이 設置되어 一定한 溫度로 加熱된 循環水가 通하고 있으며 循環水 탱크內의 循環水는 코일型 電氣히터에 依해 加熱된다.

電氣히터에 供給되는 電壓은 슬라이다스에 依해 調整되며 加熱된 循環水는 循環水 펌프에 依해 자켓에 供給된다.

또한 溶液의 溫度를 正確히 測定하기 爲하여 3個의 熱電對(C-C)가 溶液貯藏筒側壁의 3個所에 設置되고 熱電對의 基準溫度(Reference Te-

mp. 0°C)를 一定히 維持하기 爲한 얼음상자, Selector 및 熱起電力을 mV로 表示할 수 있는 디지털 멀티테스터(Digital Multi-tester)가 連結되어 熱電對 溫度計를 構成하고 있다.

各 實驗裝置의 主要部分은 다음과 같다.

1) 溶液貯藏筒

實驗用 高分子용액 溶液을 貯藏하여 流出시키기 爲한 圓筒形 容器로서 外周에 恒溫維持를 爲한 溫水 자켓을 設置하였으며 內筒은 黃銅, 外筒은 스테인레스鋼으로 製作되어 있고 下面 中心部에 毛細管連結部가 加工되어 있다.

本 貯藏筒의 細部圖面과 規格은 Fig. 3-2에 表示되어 있다.

2) 毛細管

管壁의 摩擦로 因한 壓力損失을 測定하기 爲한 細管은 直徑 1.060mmφ, 길이 300mm인 스테인레스鋼管으로서 一端을 溶液貯藏筒下部에 連結할 수 있도록 加工되어 있고 內徑은 水銀을 使

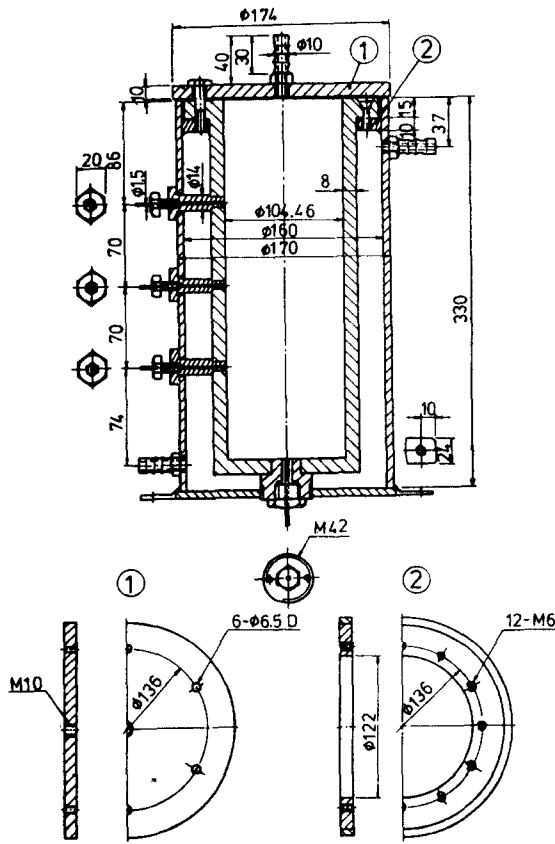


Fig. 3-2 Details of solution reservoir

用하여 精密測定하였다.

3) 壓縮機, 壓縮空氣 탱크 및 서어지(Surge) 탱크

貯藏筒內的 溶液에 壓縮空氣로 壓力을 加하고 이를 調節하기 爲한 裝置로서 溶液에 加해지는 空氣壓力은 貯藏탱크와 서어지 탱크 사이의 밸브로 調節된다.

空氣壓縮機 : 2.2kw, 220/440 Volts, 3phase,
60Hz, 1,730 R. P. M.,
Max. Press. : 10kg/cm²

壓縮空氣貯藏 탱크 : 750mmφ×1,800mmH
Max. Press. : 10kg/cm²

서어지 탱크 : 420mmφ×740mmH
Max. Press. : 10kg/cm²

4) 液柱計

溶液에 加해지는 壓力을 測定하기 爲한 U字管型으로 3方목을 附着하여 低壓의 境遇에는 清水液柱計를 高壓의 境遇에는 水銀液柱計(8.0mm

φ×2,000mmH)를 選擇使用하도록 2개가 設置되어 있다.

5) 熱電對

溶液의 溫度를 測定하기 爲한 電氣的 溫度計로 OMEGA, ENGINEERING, INC製인 C-C (Copper Constantan, 1.7mmφ)를 使用하였다.

6) 디지털 멀티테스터(Digital Multi-tester) 熱電對에 依해 發生한 直流起電力이 mV로 表示되는 테스터로서 美國 Fluke社 製品(0°C : 0.000mV, 100°C : 4.277mV, 約 0.04mV/°C)이다.

7) 循環水 펌프

循環水 탱크內에서 加熱된 溫水를 溶液貯藏筒의 자켓에 供給시키기 爲한 펌프로서 Volute型이며 最大揚程은 3.0m, 揚水量은 2,000l/h이다.

8) 電氣히터

溶液의 溫度를 變更해서 一定하게 維持하기 爲하여 循環水 탱크內에 設置된 코일型 히터

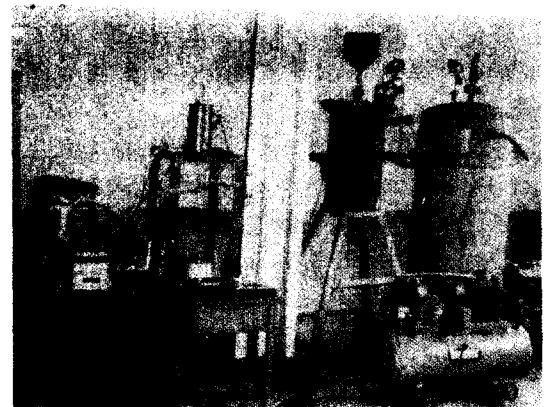


Fig. 3-3 Photo of experimental apparatus

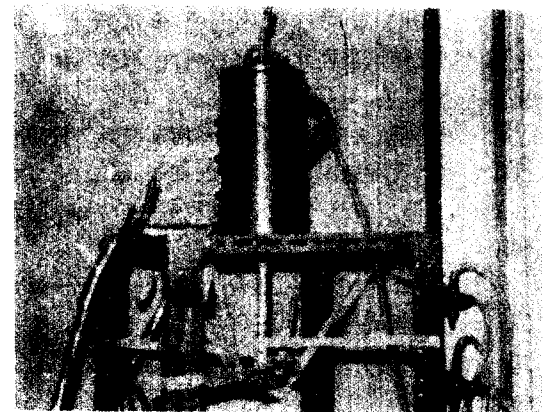


Fig. 3-4 Photo of solution reservoir

(A.C. 100V, 3kw)이며 여기에 供給되는 電壓은 슬라이더릭스(Input : A.C. 100V, Out put : A.C. 0~100V, Max. 5kw)에 의해 調節된다.

9) 디지털 저울(Digital Balance)

毛細管에서 流出된 溶液의 重量을 測定하기 爲한 저울로 日本 Chyo Balance 社 製品. (Max. : 2kg, Min. : 0.1g)이다.

3.2 實驗方法

本 實驗에서 使用한 試料 SEPARAN NP-10은 白色粉末이고 그 水溶液은 透明하며 中性이다.

平均分子量은 100萬 以上이며 0.5% 水溶液(25°C)에서 粘度는 0.2 Poise이다.

먼저 試料인 SEPARAN NP-10의 粉末을 물에 溶解하여 250 P. P. M., 500P. P. M., 1,000 P. P. M., 1,250P. P. M., 1,500P. P. M., 1,750 P. P. M., 2,000P. P. M.의 溶液을 만든다.

該當하는 濃度の 溶液을 溶液貯藏筒에 正確히 20cm높이로 넣은 다음 뚜껑을 볼트로 죄어 氣密을 維持한다.

空氣壓縮機를 運轉하여 空氣貯藏 탱크의 壓力이 約 2kg/cm²되게 하고 循環水 펌프를 起動한 다음 슬라이더릭스의 出力을 50~55 Volts로 定하여 循環水 탱크의 물을 加熱하기 始作한다. 常溫에서 부터 溫度는 차츰 增加하여 各 測定溫度(15°C, 20°C, 25°C, 35°C, 30°C, 40°C, 45°C, 50°C, 55°C)에 이르면 毛細管 끝을 막고 있는 Stopper를 開放하여 溶液을 流出하고 同時에 流出時間을 秒時計로 測定한다. 流出된 溶液은 비이커에 담겨지고 디지털 저울에 의해 무게가 測定되며 同時에 液柱計에 依하여 溶液에 加해진 壓力을 求한다.

同一한 要領으로 壓力만을 增加시켜 實驗을 反復한다. 實驗途中 溶液의 溫度는 繼續 上昇하므로 同一溫度에서 實驗을 反復하는 데는 時間制限이 있다.

슬라이더릭스의 出力電壓을 50V로 했을 때에 0.01mV 上昇하는데 50~60秒가 걸리므로 實際로는 測定溫度마다 2~3回 程度의 實驗을 行할 수 있었다.

同一溫度의 溶液에 對하여 常溫에서 55°C까지

實驗을 行하는데 約 2時間 30分 程度의 時間이 걸렸다.

實驗初期에는 內徑 0.727mmφ, 1.060mmφ, 1.608mmφ의 세 種類의 毛細管을 使用하여 測定한 結果, 0.727mmφ의 境遇에는 管徑이 너무 작아 相對적으로 높은 壓力을 要하였으며 1.608 mmφ의 境遇에는 低 濃度, 高溫에서 Reynolds 數가 커져 흐름이 亂流로 바뀌므로 本 實驗에서는 中間크기인 內徑 1.060mmφ의 毛細管을 使用하였다.

實驗中 發生 할수 있는 操作誤差를 줄이기 爲해서 正確하고 迅速한 動作을 要하나 다음과 같은 誤差는 不可避한 것으로 推定하였다.

- a) 同一溫度의 維持範圍 : ±0.01mV (±0.25°C)
- b) 液柱計를 읽을 때의 判斷誤差 : ±1.0mm Aq
- c) 流出流量의 測定誤差 : ±0.1g
- d) 流出時間의 測定誤差 : ±0.1 秒

4. 實驗結果 및 考察

이 章에서는 먼저 粘度特性의 가장 重要한 變數인 溫度를 測定하기 爲한 熱電對의 檢定方法 및 그 結果를 論할뒤에 實驗裝置의 正確性 如否를 檢討하기 爲하여 물에 대한 粘性係數값을 測定하고 이 값과 標準粘性係數와의 誤差를 求하여 裝置의 信賴性을 알아본다.

다음에 實際로 試料인 SEPARAN NP-10 溶液을 使用하여 實驗值를 求하고 이 값들을 圖示化하여 有用한 關係式을 얻고 이에 對한 考察을 行한다.

4.1 熱電對 檢定^{23), 24)}

本 實驗에서 알아보고자 하는 粘度特性은 溫度에 敏感하므로 溶液의 溫度를 正確하게 測定하는 것은 매우 重要하다.

여러 種類의 熱電對 中에서 C-C(Copper-Costantan)를 使用하였고 補助裝置로는 基準溫度(0°C)를 維持하기 爲한 얼음상자, 起電力을 數值(mV)로 表示 할 수 있는 디지털 멀티메터, 그리고 溶液의 溫度測定 場所를 3個所로 定하였으므로 이를 멀티메터와 連結시키기 爲한

Selector가 있다.

製作社側에서 提示한 熱起電力값은 아주 精密한 裝置들을 使用하여 얻어진 값이고 本 實驗에 있어서는 각 裝置들의 固有한 特性으로 因하여 어느 程度의 一定한 誤差가 있을 수 있다. 그러므로 正確한 溫度를 測定하기 爲해서는 반드시 檢定이 必要하다.

檢定方法은 먼저 얼음을 잘게 부수어 얼음상자에 채워넣고 適當한 容器에 물을 넣어 끓인 다음 0.1°C까지 읽을 수 있는 標準溫度計를 熱電對의 끝과 一致시켜 물속에 넣는다.

물의 溫度가 내려가면 이에 該當하는 熱起電力값이 멀티테스터에 直流電壓[mV]으로 나타난다. 이 값들을 標準溫度計의 溫度와 비교하면 直流電壓[mV]과 溫度[°C]와의 關係를 알 수 있다.

4.2 물의粘性 係數測定

本 實驗에서 採擇한 여러가지 實驗裝置들이 實驗을 行하는데 適當한가 또는 實驗值들을 信賴할 수 있는가를 알아보는 方法으로서 蒸溜水의 粘性係數를 測定하였고 이값을 既存의 標準粘性係數와 比較하여 그 系統誤差(Systematic Error)를 求하였다. Table 4-1 을 보면 溫度가 增加할수록 誤差는 커짐을 알 수 있다. 처음에는 100°C까지의 溫度範圍에 걸쳐 實驗을 할려고 했으나 60°C 以上에서는 一定時間내에 一定溫度를 維持하기가 困難하므로 55°C까지만 實驗을 行하였다.

勿論 溶液의 濃度가 增加할수록 Reynolds數는 減少하나 粘度誤差는 커진다. 豫備實驗에서는 3個의 毛細管(1.608mmφ, 1.000mmφ, 0.727mmφ)에 對하여 溫度는 100°C, 濃度는 5,000P. P. M. 까지 實驗을 行하였으나 諸般誤差를 考慮하여 毛細管은 1.060mmφ, 溫度는 55°C, 濃度는 2,000P. P. M. 까지의 範圍에서 實驗值를 求하였다.

4.3 實驗結果

Fig. 4-1~Fig. 4-9는 同一濃度의 溶液에 溫度變化(5°C~55°C)를 加했을 때 φ와 τ_w와의 關係를 兩對數 그래프에 圖示한 것이다. 前章(2.3)

의 理論式 誘導 및 解析에서 說明한 바와 같이 直線의 기울기는 $n(=n')$ 이고 $\phi = \log 1 = 0$ 일 때의 切片의 값의 K' 가 된다. 各 溫度에 對하여 約 8~10個의 實驗值를 求하였고 이 값들에 最小 自乘法(Method of Least Square)을 適用해서 電算處理하여 直線의 式을 求하여 正確한 n 및 K' 의 값을 얻었다.

Fig. 4-10~Fig. 4-18까지는 同一溫度에서 濃度變化에 따른 φ와 τ_w의 값을 圖示한 것이다.

Table 4-2는 Fig. 4-1~Fig. 4-9의 直線의 기울기인 n 의 값을 溫度變化에 따라 整理한 것이고 Table 4-3은 Fig. 4-10~Fig. 4-18에서 濃度變化에 따른 n 의 값을 整理한 것이다.

Fig. 4-1~Fig. 4-9와 Table 4-2에서 보면 同一濃度에서는 溫度變化에 따라 直線의 기울기인 n 의 값은 거의 一定하므로 各 濃度에 對한 n 의 平均値를 求하면 Table 4-4-3과 같이 되고 이를 圖示하면 Fig. 4-19 및 Fig. 4-21과 같이 된다. Fig. 4-21의 直線의 式을 最小自乘法에 依해 求해 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = -1.0765 \times 10^{-4} P + 0.9915 \quad (4.1)$$

여기서 P 는 SEPARAN NP-10 溶液의 濃度인 P. P. M. 이다.

Fig. 4-10~Fig. 4-18 및 Table 4-3을 檢討해 보면 n 은 濃度가 增加할수록 減少함을 알 수 있다.

Table 4-4-1은 同一溫度에서 濃度變化에 따른 n 의 式을 보여준다. n 의 값을 Fig. 4-20과 같이 圖示해 보면 溫度變化에 無關하게 하나의 直線으로 나타낼 수 있음을 알 수 있고 이 直線의 式은 Fig. 4-21 및 式(4.1)과 같게 된다.

Table 4-5는 Fig. 4-1~Fig. 4-9에서의 K' 의 값을 溫度變化에 따라 整理한 것이고, Table 4-6은 Fig. 4-10~Fig. 4-19에서의 K' 의 값을 溫度變化에 따라 整理한 것이다. Table 4-7-2는 各各의 濃度에 對하여 溫度變化에 따른 式을 求한 것이다.

Fig. 4-1~Fig. 4-9, Table 4-5 및 Table 4-7-2에서 보면 K' 의 값은 溫度가 增加할수록 작아짐을 알 수 있다. 各濃度에서 K' 의 平均値를 取하고 이값들을 圖示하여 直線으로 나타내보면 Table 4-7-3, Fig. 4-22 및 Fig. 4-24와 같이 되고 이 直線의 式은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$\log 10^4 K' = 6.4785 \times 10^{-4} P - 1.0529 \quad (4.2)$$

여기서 P 는 SEPARAN NP-10 溶液의 濃度인 P.P.M.이다.

Table 4-6은 Fig. 4-10~Fig. 4-18에서의 K' 의 값을 數表로 나타 낸 것이고 이값들을 濃度變化에 따른 式으로 나타낸 것이 Table 4-7-1이다. Table 4-6을 圖示해보면 Fig. 4-23과 같이 되고 이 그림에서 代表的인 直線의 式을 求할 수 있다. 各各의 濃度에서 溫度變化에 따른 K' 의 平均値를 求하면 Table 4-7-3과 같이 되고 이를 圖示하면 Fig. 4-24가 된다.

直線의 式은 最小自乘法에 依해

$$\log 10^4 K' = 6.4785 \times 10^{-4} P - 1.0529 \quad (4.3)$$

即 溫度變化에 따른 式 (4.2)와 濃度變化에 따른 式 (4.3)은 同一한 結果式임을 알 수가 있다.

4.4 考察

式(4.1)의 結果로부터 粘彈性流體인 SEPARAN NP-10의 溶液은 15°C~55°C, 0~2,000 P.P.M.의 範圍에서 流動舉動指數(Flow Behavior Index) n 은 溫度變化에 依해서만 一定한 比率로 變化함을 알 수 있다.

式 (4.2) 및 (4.3)의 結果로부터 粘性을 나타내는 物質常數(Consistency Constant) K' 는 濃度가 增加할수록 크게 됨을 알 수 있다.

本 實驗에서 恒溫維持를 爲해서 精密한 恒溫槽를 使用했다면 55°C 이상의 溫度 變化와 2,000 P.P.M. 이상의 濃度變化에 對한 流動特性式을 導出할 수 있었을 것이다.

또한 式(4.1)을 誘導하는 過程에서 溫度變化에 따른 n 의 값은 거의 一定하다고 推定하였으나 이에 關한 正確한 實驗式도 求할 수 있었을 것이다.

한편 물은 뉴우톤 流體이므로 溫度變化에 關係없이 恒常 1의 값을 갖는다고 알려져 있으나 Fig. 4-1과 Table 4-4-2에서 보면 蒸溜水(0 P.P.M.)를 使用했을 때의 流動舉動指數 n 이 溫度變化에 따른 式으로 表示되어 있다.

이러한 結果는 다른 濃度의 高分子 폴리머 溶液에서의 實驗式과 同一한 要領으로 計算되었기 때문이며 이것은 어느 程度의 測定 및 實驗裝置의 精密度에 따른 誤差로 因한 結果로 推定된다.

Table 4-4-1, 4-4-2, 4-7-1, 4-7-2, 와 Fig. 4-1~4-18에 表示된 實驗式들은 最小自乘法에 依해 計算된 式들이므로 이 式들에 溫度 및 濃度의 값을 代入하여 얻은 結果値는 Table 4-2와 4-3 및 Table 4-5와 4-6의 값과 약간씩 다를 수 있다.

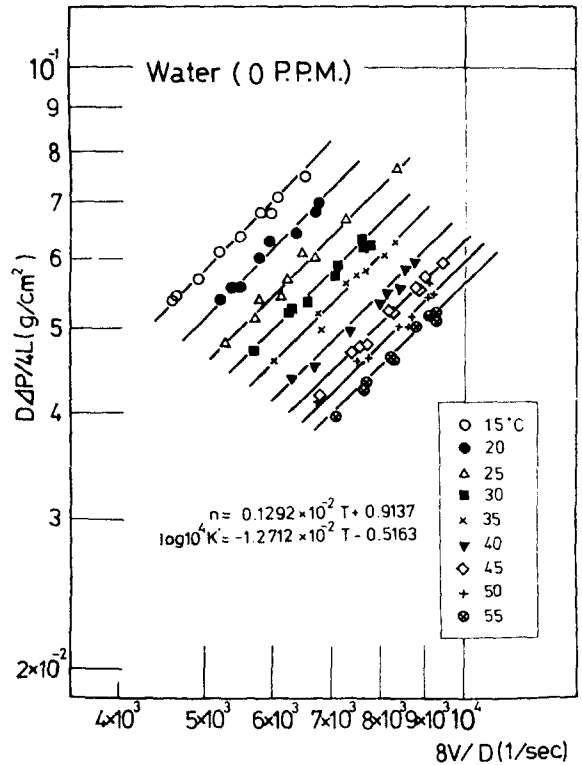


Fig. 4-1 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for Water

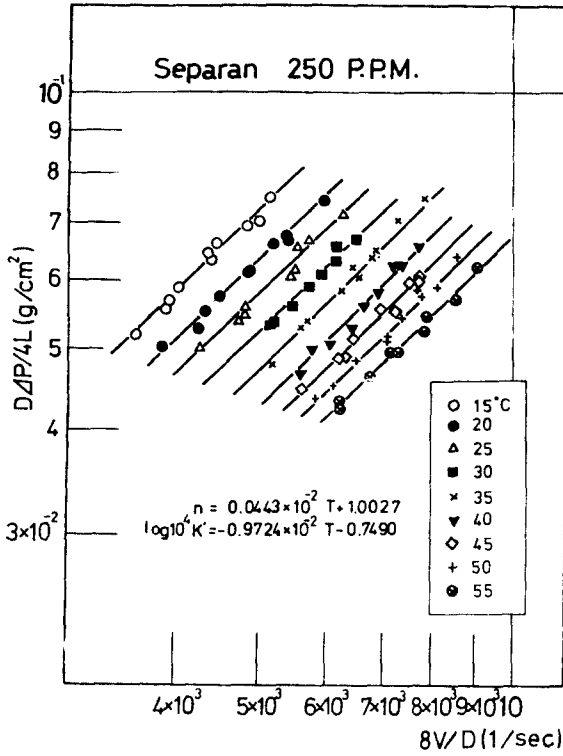


Fig. 4-2 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 250 P.P.M.

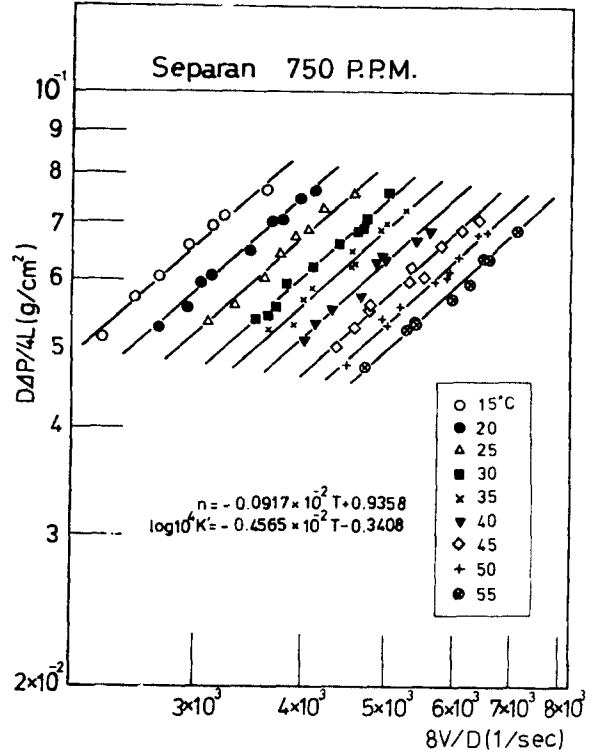


Fig. 4-4 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 750 P.P.M.

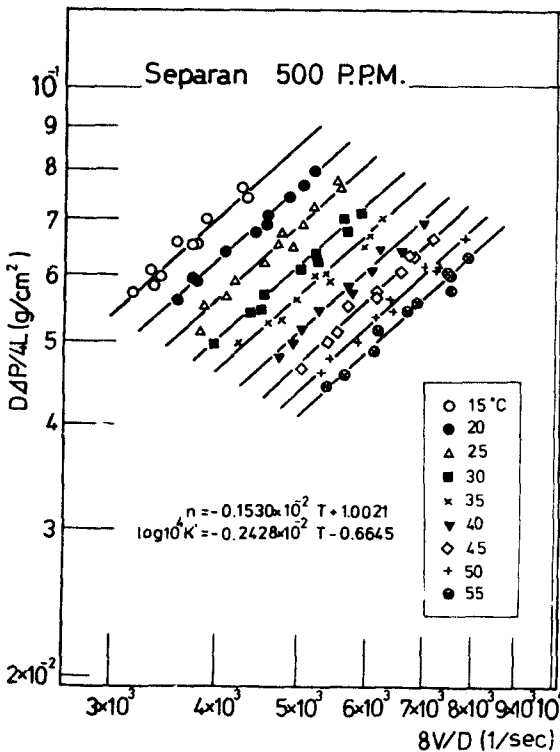


Fig. 4-3 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 500 P.P.M.

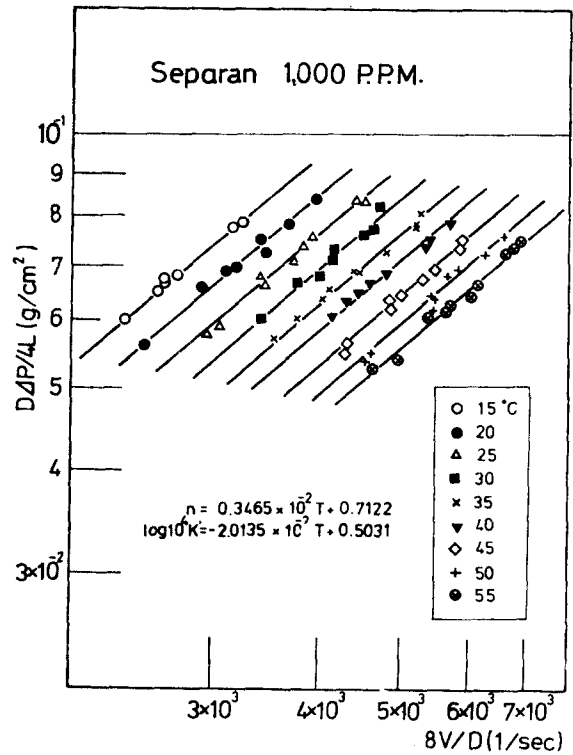


Fig. 4-5 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 1,000 P.P.M.

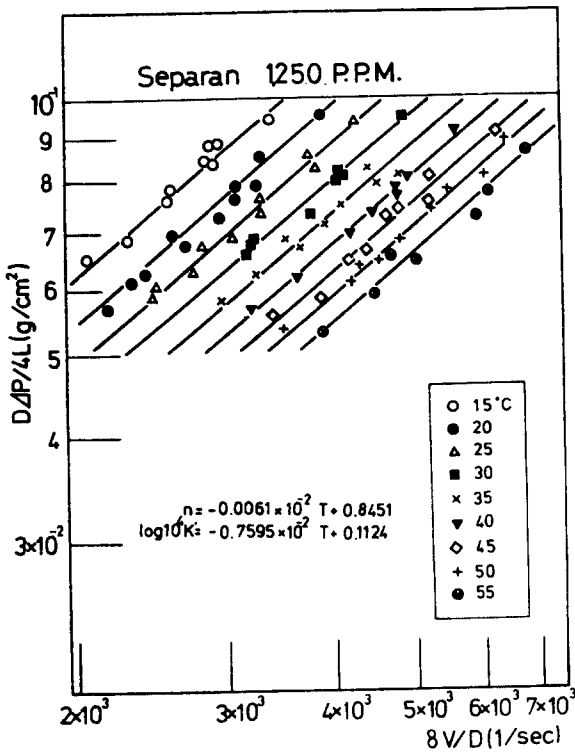


Fig. 4-6 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 1,250 P.P.M.

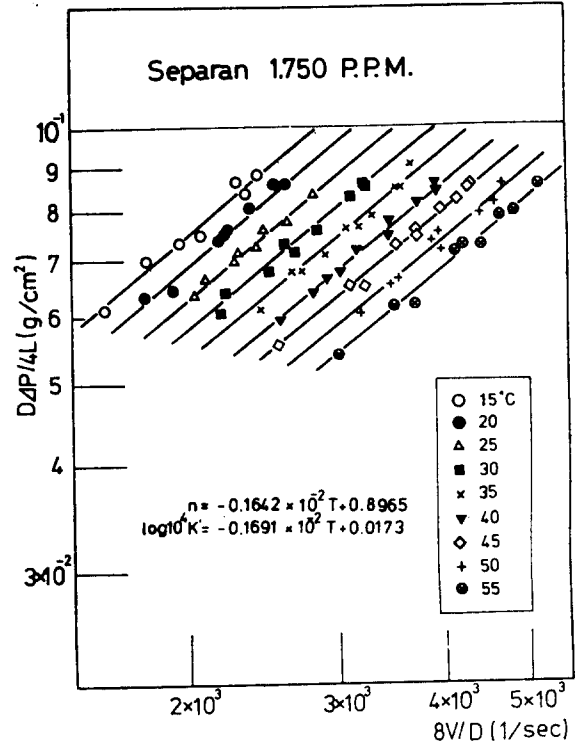


Fig. 4-8 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 1,750 P.P.M.

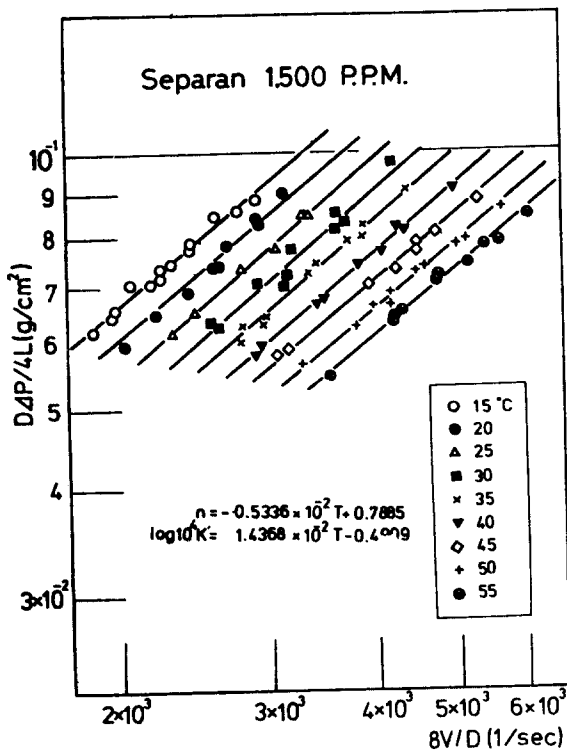


Fig. 4-7 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 1,500 P.P.M.

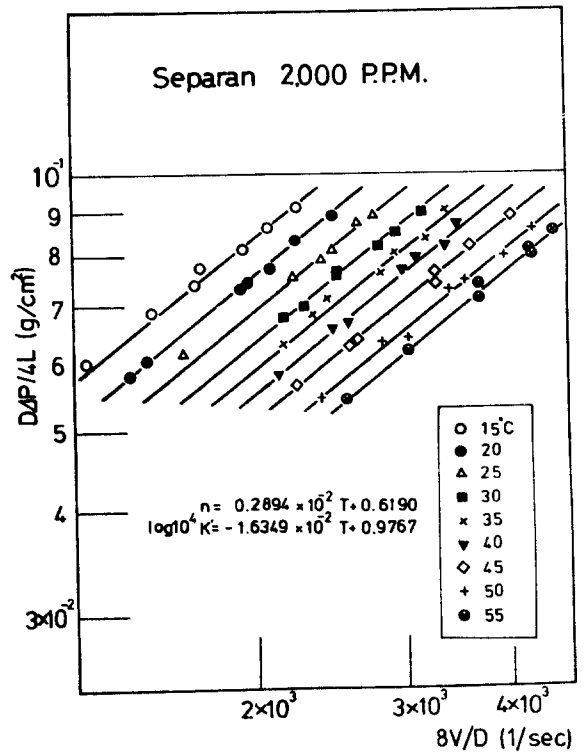


Fig. 4-9 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 2,000 P.P.M.

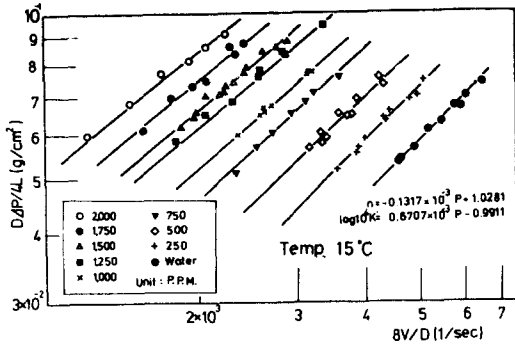


Fig. 4-10 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 15°C

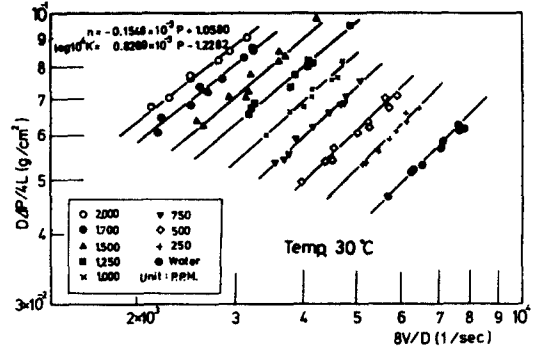


Fig. 4-13 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 30°C

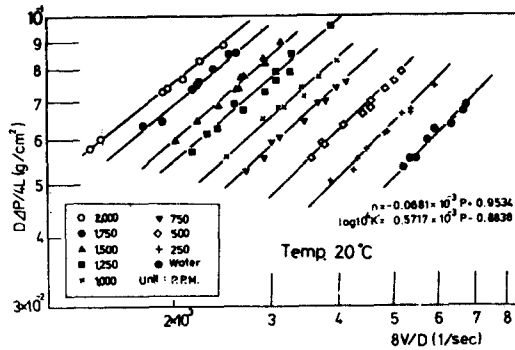


Fig. 4-11 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 20°C

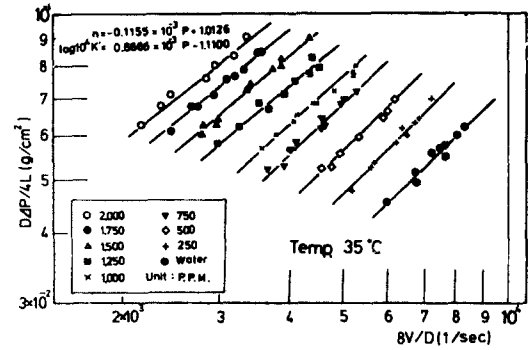


Fig. 4-14 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 35°C

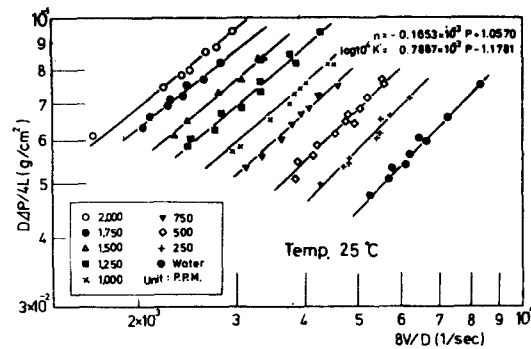


Fig. 4-12 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 25°C

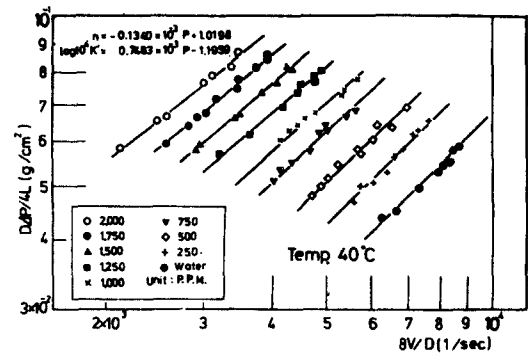


Fig. 4-15 8V/D vs. $D\Delta P/4L$ for 40°C

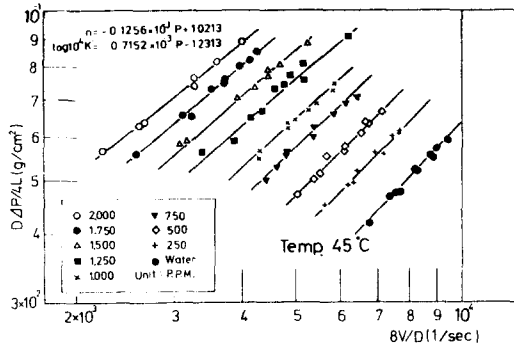


Fig. 4-16 8V/D vs. DΔP/4L for 45°C

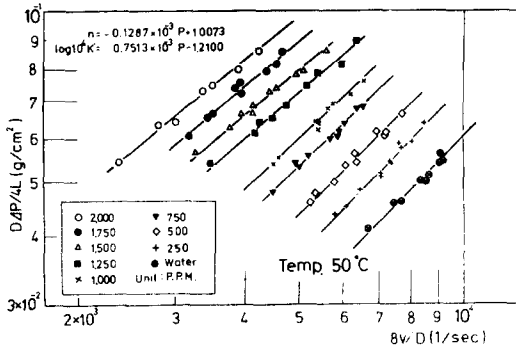


Fig. 4-17 8V/D vs. DΔP/4L for 50°C

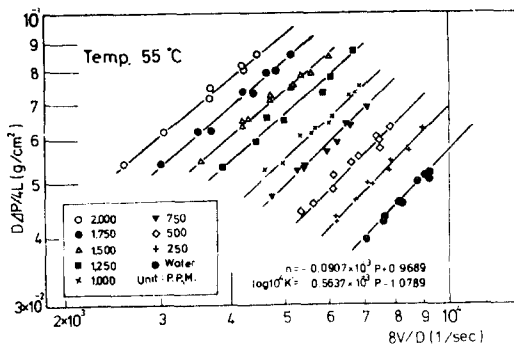


Fig. 4-18 8V/D vs. DΔP/4L for 55°C

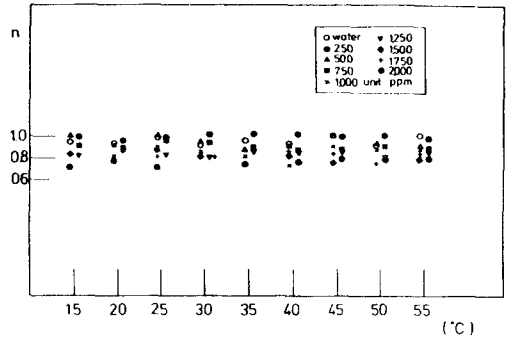


Fig. 4-19 Diagram of n for the variation of temp. at constant conc.

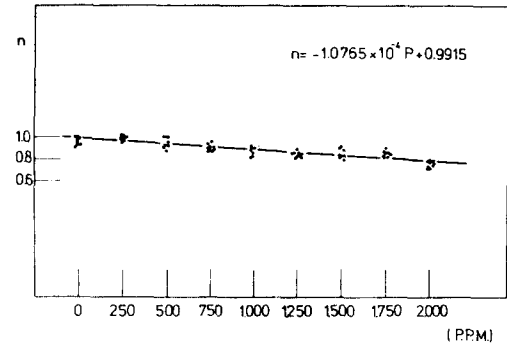


Fig. 4-20 Diagram of n for the variation of conc. at constant temp.

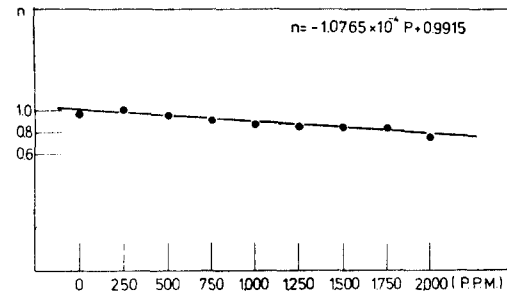


Fig. 4-21 Diagram of mean value of n for the variation of conc. at constant temp.

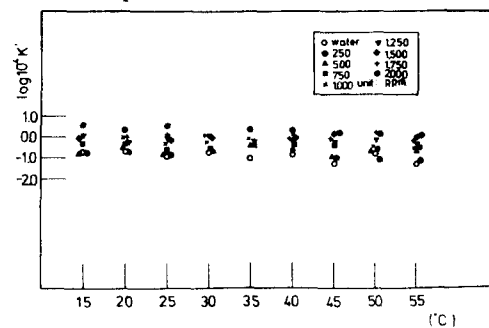


Fig. 4-22 Diagram of $\log_{10} K'$ for the variation of temp. at constant conc.

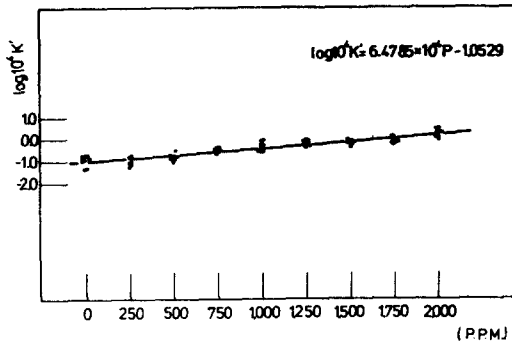


Fig. 4-23. Diagram of $\log 10^4 K'$ for the variation of conc. at constant temp.

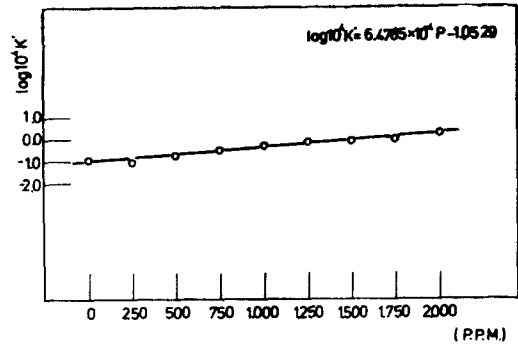


Fig. 4-24. Diagram of mean value of $\log 10^4 K'$.

Table 4-1 Systematic error of viscosity

μ_0 : standard viscosity of water in gravity unit

μ : viscosity obtained from experimentation

No.	Temp. (°C)	$10^5 \times \mu_0 =$ (g. s/cm ²)	$10^5 \times \mu =$ (g. s/cm ²)	$\frac{\mu - \mu_0}{\mu_0} \times 100$ (%)
1	15	1.163	1.169	0.50
			1.173	0.86
			1.132	-2.67
2	20	1.026	1.034	0.78
			1.043	1.65
			0.995	-3.02
3	25	0.912	0.987	-1.64
			0.913	0.11
			0.891	-2.27
4	30	0.817	0.833	1.90
			0.810	-0.85
			0.803	-1.70
5	35	0.738	0.730	-1.00
			0.775	5.01
			0.754	2.16
6	40	0.669	0.677	1.19
			0.669	0.00
			0.685	2.39
7	45	0.611	0.636	4.09
			0.638	4.40
			0.630	2.60
8	50	0.560	0.597	6.60
			0.582	3.90
			0.601	7.30
9	55	0.516	0.557	7.94
			0.564	9.30
			0.551	6.78

Table 4-2 Flow behavior index n for the variation of temperature at constant concentration

Conc. (P. P. M.)	Temp. (°C)	n	Conc. (P. P. M.)	Temp. (°C)	n	Conc. (P. P. M.)	Temp. (°C)	n
0	15	0.9432	250	15	0.9884	500	15	1.0197
	20	0.9270		20	0.9531		20	0.9222
	25	0.9752		25	0.9816		25	1.0085
	30	0.9089		30	1.0684		30	0.9474
	35	0.9858		35	1.0967		35	0.8737
	40	0.9291		40	1.1116		40	0.9239
	45	1.0329		45	0.9888		45	1.0069
	50	0.9081		50	1.0027		50	0.9261
55	1.0204	55	0.9693	55	0.9087			
750	15	0.9101	1,000	15	0.6715	1,250	15	0.8216
	20	0.8877		20	0.8159		20	0.8894
	25	0.9619		25	0.8966		25	0.8309
	30	0.9353		30	0.8610		30	0.8038
	35	0.8997		35	0.8115		35	0.8628
	40	0.8707		40	0.7443		40	0.8599
	45	0.8772		45	0.9179		45	0.8586
	50	0.9057		50	0.8836		50	0.8192
55	0.8854	55	0.8991	55	0.8463			
1,500	15	0.8308	1,750	15	0.9086	2,000	15	0.7106
	20	0.9144		20	0.8601		20	0.7711
	25	0.8771		25	0.8089		25	0.7057
	30	0.8079		30	0.8132		30	0.4262
	35	0.9017		35	0.8737		35	0.7420
	40	0.8245		40	0.8575		40	0.7603
	45	0.7621		45	0.8371		45	0.7912
	50	0.5090		50	0.7465		50	0.7835
55	0.7880	55	0.8455	55	0.7921			

Table 4-3 Flow behavior index n for the variation of concentration at constant temperature

Temp. (°C)	Conc. (P. P. M.)	n	Temp. (°C)	Conc. (P. P. M.)	n	Temp. (°C)	Conc. (P. P. M.)	n
15	0	0.9432	20	0	0.9270	25	0	0.9752
	250	0.9883		250	0.9531		250	0.9816
	500	1.0197		500	0.9222		500	1.0085
	750	0.9101		750	0.8877		750	0.9619
	1,000	0.8500		1,000	0.8159		1,000	0.8966
	1,250	0.8216		1,250	0.8894		1,250	0.8309
	1,500	0.8308		1,500	0.9144		1,500	0.8771
	1,750	0.9086		1,750	0.8601		1,750	0.8087
2,000	0.7106	2,000	0.7711	2,000	0.7057			
30	0	0.9089	35	0	0.9858	40	0	0.9291
	250	1.0684		250	1.0966		250	1.1115
	500	0.9474		500	0.8737		500	0.9239
	750	0.9353		750	0.8997		750	0.8707
	1,000	0.8610		1,000	0.8115		1,000	0.7443
	1,250	0.8038		1,250	0.8628		1,250	0.8599
	1,500	0.8078		1,500	0.9017		1,500	0.8245
	1,750	0.8131		1,750	0.8737		1,750	0.8575
2,000	0.7312	2,000	0.7420	2,000	0.7603			
45	0	1.0329	50	0	0.9081	55	0	1.0204
	250	0.9888		250	1.0027		250	0.9696
	500	1.0070		500	0.9261		500	0.9088
	750	0.8772		750	0.9057		750	0.8854
	1,000	0.9179		1,000	0.8836		1,000	0.8991
	1,250	0.8586		1,250	0.8132		1,250	0.8463
	1,500	0.7621		1,500	0.8391		1,500	0.7880
	1,750	0.8371		1,750	0.7465		1,750	0.8455
2,000	0.7912	2,000	0.7835	2,000	0.7921			

Table 4-4 Linear equation of n for P and T and mean value of n for concentration (4-4-1)

Temp. (°C)	Linear equation of n	P:P.P.M.	Temp. (°C)	Linear equation of n	P:P.M.
15	$-0.1317 \times 10^{-3}P + 1.0281$		40	$-0.1340 \times 10^{-3}P + 1.0198$	
20	$-0.0681 \times 10^{-3}P + 0.9534$		45	$-0.1256 \times 10^{-3}P + 1.0213$	
25	$-0.1548 \times 10^{-3}P + 1.0580$		50	$-0.1287 \times 10^{-3}P + 1.0073$	
30	$-0.1653 \times 10^{-3}P + 1.0570$		55	$-0.0907 \times 10^{-3}P + 0.9689$	
35	$-0.1155 \times 10^{-3}P + 1.0126$				

(4-4-2)

Conc. (P.P.M.)	Linear equation of n	T: °C	Conc. (P.P.M.)	Linear equation of n	T: °C
0	$0.1292 \times 10^{-2}T + 0.9137$		1,250	$-0.0061 \times 10^{-2}T + 0.8451$	
250	$0.0433 \times 10^{-2}T + 1.0027$		1,500	$-0.5336 \times 10^{-2}T + 0.7885$	
500	$-0.1530 \times 10^{-2}T + 1.0021$		1,750	$-0.1642 \times 10^{-2}T + 0.8965$	
750	$-0.0917 \times 10^{-2}T + 0.9358$		2,000	$0.2894 \times 10^{-2}T + 0.6190$	
1,000	$0.3465 \times 10^{-2}T + 0.7122$				

(4-4-3)

Conc. (P.P.M.)	Mean value of n	Conc. (P.P.M.)	Mean value of n
0	0.9590	1,250	0.8429
250	1.0056	1,500	0.8383
500	0.9486	1,750	0.8303
750	0.9037	2,000	0.7571
1,000	0.8694		

Table 4-5 Consistency index K' for the variation of temperature at constant concentration

Conc. (P.P.M.)	Temp. (°C)	$\log 10^4 K'$	Conc. (P.P.M.)	Temp. (°C)	$\log 10^4 K'$	Conc. (P.P.M.)	Temp. (°C)	$\log 10^4 K'$
0	15	-0.7300	250	15	-0.7945	500	15	-0.8332
	20	-0.7180		20	-0.7216		20	-0.5299
	25	-0.9471		25	-0.8804		25	-0.8903
	30	-0.7459		30	-1.2430		30	-0.7169
	35	-1.0716		35	-1.3908		35	-0.4801
	40	-0.8971		40	-1.5159		40	-0.7082
	45	-1.3359		45	-1.0689		45	-1.0609
	50	-0.8632		50	-1.1463		50	-0.7843
55	-1.3423	55	-1.0428	55	-0.7414			
750	15	-0.3468	1,000	15	0.5308	1,250	15	0.0859
	20	-0.3238		20	-0.0205		20	-0.2103
	25	-0.6344		25	-0.3505		25	-0.0486
	30	-0.5902		30	-0.2619		30	0.0647
	35	-0.4897		35	-0.1236		35	-0.2359
	40	-0.4312		40	0.0936		40	-0.2674
	45	-0.4903		45	-0.5943		45	-0.2952
	50	-0.6214		50	-0.5068		50	-0.1554
55	-0.5778	55	-0.5816	55	-0.3186			
1,500	15	-0.0757	1,750	15	0.1219	2,000	15	0.5755
	20	-0.2504		20	-0.005		20	0.3304
	25	-0.1627		25	0.1257		25	0.5147
	30	-0.0404		30	0.0791		30	1.4289
	35	0.3223		35	0.1690		35	0.3310
	40	-0.0868		40	-0.1517		40	0.2355
	45	0.1079		45	-0.1104		45	0.0987
	50	0.9896		50	0.1818		50	0.0905
55	-0.0518	55	-0.2097	55	0.0356			

Table 4-6 Consistency index K' for the variation of concentration at constant temperature

Temp. (°C)	Conc. (P. P. M.)	log 10 ⁴ K'	Temp. (°C)	Conc. (P. P. M.)	log 10 ⁴ K'	Temp. (°C)	Conc. (P. P. M.)	log 10 ⁴ K'
15	0	-0.7300	20	0	-0.7180	25	0	-0.9471
	250	-0.7945		250	-0.7216		250	-0.8804
	500	-0.8332		500	-0.8903		500	-0.8903
	750	-0.3468		750	-0.3238		750	-0.6344
	1,000	-0.2103		1,000	-0.0205		1,000	-0.3505
	1,250	-0.0850		1,250	-0.0486		1,250	-0.0486
	1,500	-0.0757		1,500	-0.2504		1,500	-0.1627
	1,750	-0.1219		1,750	-0.0005		1,750	0.1257
2,000	0.5755	2,000	0.3304	2,000	0.5147			
30	0	-0.7459	35	0	-0.1716	40	0	-0.8971
	250	-1.2429		250	-1.3903		250	-1.5159
	500	-0.7169		500	-0.4801		500	-0.7082
	750	-0.5902		750	-0.4897		750	-0.4312
	1,000	-0.2619		1,000	-0.1236		1,000	0.0936
	1,250	0.0065		1,250	-0.2359		1,250	-0.2674
	1,500	-0.0404		1,500	-0.3223		1,500	-0.0368
	1,750	0.0791		1,750	-0.1690		1,750	-0.1517
2,000	0.4012	2,000	0.3311	2,000	0.2355			
45	0	-1.3359	50	0	-0.8632	55	0	-1.3423
	250	-1.0689		250	-1.1463		250	-1.0428
	500	-1.0609		500	-0.7843		500	-0.7413
	750	-0.4902		750	-0.6214		750	-0.5778
	1,000	-0.5943		1,000	-0.5058		1,000	-0.5816
	1,250	-0.2952		1,250	-0.1554		1,250	-0.3186
	1,500	0.1079		1,500	0.0245		1,500	-0.1219
	1,750	-0.1104		1,750	0.1818		1,750	-0.2097
2,000	0.0987	2,000	0.0905	2,000	0.0356			

Table 4-7 Linear equation of log 10⁴K' for P and T and mean value of log 10⁴K' for concentration

(4-7-1)

Temp. (°C)	Linear equation of log 10 ⁴ K'	P:P.P.M.	Temp. (°C)	Linear equation of log 10 ⁴ K'	P:PP.M.
15	$0.6707 \times 10^{-3}P - 0.0011$		40	$0.7483 \times 10^{-3}P - 1.1959$	
20	$0.5717 \times 10^{-3}P - 0.8838$		45	$0.7152 \times 10^{-3}P - 1.2313$	
25	$0.7887 \times 10^{-3}P - 1.1781$		50	$0.7513 \times 10^{-3}P - 1.2099$	
30	$0.8289 \times 10^{-3}P - 1.2282$		55	$0.5637 \times 10^{-3}P - 1.0789$	
35	$0.6666 \times 10^{-3}P - 1.1099$				

(4-7-2)

Conc. (P. P. M.)	Linear equation of log 10 ⁴ K'	P:P. P. M.	Conc. (P. P. M.)	Linear equation of log 10 ⁴ K'	P:P. P. M.
0	$-1.2712 \times 10^{-2}T - 0.5163$		1,250	$-0.7595 \times 10^{-2}T + 0.1124$	
250	$-0.9724 \times 10^{-2}T - 0.7490$		1,500	$1.4368 \times 10^{-2}T - 0.4909$	
500	$-0.2428 \times 10^{-2}T - 0.6645$		1,750	$-0.1691 \times 10^{-2}T + 0.1734$	
750	$-0.4565 \times 10^{-2}T - 0.3408$		2,000	$-1.6349 \times 10^{-2}T + 0.9767$	
1,000	$-2.0135 \times 10^{-2}T + 0.5031$				

(4-7-3)

Conc. (P. P. M.)	Mean value of log 10 ⁴ K'	Conc. (P. P. M.)	Mean value of log 10 ⁴ K'
0	-0.9613	1,250	-0.1534
250	-1.0893	1,500	-0.1103
500	-0.7495	1,750	-0.0419
750	-0.5006	2,000	0.2765
1,000	-0.3166		

5. 結 論

粘彈性 物質의 流動特性을 알아보기 爲하여 SEPARAN NP-10을 試料로 하여 만든 高分子 폴리머 溶液에 15°C부터 55°C까지의 溫度變化와 0~2,000 P.P.M의 濃度變化를 加하여 實驗을 行한 果結 다음과 같은 流動特性式을 導出할 수 있다.

流動舉動指數(Flow Behavior Index) n 은

1) 同一濃度에서는 溫度變化에 크게 影響받지 않으며 一定한 값을 갖는다.(Table 4-4-3)

2) 同一溫度에서는 濃度の 變化에 對하여 다음과 같은 式으로 求할 수 있다.

$$n = -1.0765 \times 10^4 P + 0.9915$$

여기서 P 는 SEPARAN NP-10 溶液의 濃度인 P.P.M이다. 粘性을 나타내는 物質常數(Consistency Constant) K' 는

1) 同一濃度에서는 溫度變化에 따라 값이 달라진다(Table 4-7-2).

2) 同一溫度에서는 濃度變化에 따라 다음의 式으로 求할 수 있다.

$$\log 10^4 K' = 6.4785 \times 10^{-4} P - 1.0529$$

本實驗에서 恆溫維持를 하기 爲해서 精密하게 溫度를 調節할 수 있는 恆溫裝置를 利用했다면 좀더 넓은 範圍의 溫度와 濃도에 對하여 正確한 實驗値와 溫度變化에 對한 關係式을 얻을 수 있었을 것이다.

따라서 廣範圍한 溫度變化에 對한 精密한 關係式과 全般的으로 適用될 수 있는 一般式의 誘導, 그리고 다른 種類의 試料에 對한 實驗은 다음의 研究課題로 남겨둔다.

參考文獻

- 1) 金春植: 粘彈性流體의 靜壓孔에 依한 壓力測定 誤差에 關한 研究, 博士學位論文, 韓國海洋大學 大學院, pp.7-9, (1981).
- 2) L.E. Nielsen: Mechanical Properties of Polymers, Trans. 小野本重治, 化學同人, 日本, pp.1-10, (1972).
- 3) 中川鶴太郎: 레오로지, 岩波全書, 日本, pp.70-78, pp.90-99, (1972).
- 4) 機械工學便覽, 水力學および流體力學, 日本機械學會, pp.68-70, (昭和51年).
- 5) W.H. Hughes and J.A. Brighton: Fluid Dynamics, Mcgraw-hill Book Company, N.Y., pp.230-240, (1967).
- 6) 富田幸雄: 레오로지, コロナ社, 東京, pp.161-173, (昭和50年).
- 7) 富澤裕: 計測工學(Ⅲ), 森北出版社, 日本, pp.98-110, (1972).
- 8) 川田裕郎: 細管法による 流動性の測定, 季刊レオロジ, Vol.1, No.3, pp.97-101, (1972).
- 9) 谷口修: 機械計測, 養賢堂, 東京, pp.266-271, (1972).
- 10) G.W. Scott Blair: Elementary Rheology, 譯剛小天, 東健彦, 朝倉書店, 東京, pp.125-127, (1970).
- 11) J.K. Vennard: Elementary Fluid Mechanics, John Wiley & Sons Inc., N.Y., pp.393-399, (1965).
- 12) S. Middleman: The Flow of High Polymers, Interscience Publishers, N.Y., p.15, (1968).
- 13) 前掲書, 12), p.15.
- 14) 前掲書, 12), pp.28-35.
- 15) T.T. Tung, K.S. Ng and J.P. Hartnett: Friction Loss of Concentrated Drag Reducing Polyacrylamide Solutions, Energy Resources Center, University of Illinois, U.S.A., pp.3-6, (1976).
- 16) 前掲書, 5), pp.237-238.
- 17) B.D. Coleman, H. Markovitz and W. Noll: Viscometric Flows of Non-Newtonian Fluids, Springer-Verlag Inc., N.Y., pp.68-71, (1966).
- 18) 平山直道: 流體力學, 森北出版社, 東京, pp.137-139, (昭和43年).
- 19) 岩柳茂夫: 레오로지, 朝倉書店, 東京, pp.50-59, (1971).
- 20) V.L. Streeter and E.B. Wylie: Fluid Mechanics, Mcgraw-hill Kogakusha LTD., Tokyo, pp.190-193, pp.243-244, (1979).
- 21) 前掲書, 12), p.15.
- 22) D.C. Borgue and J.L. White: Engineering Analysis of Non-Newtonian Fluids, 譯三石信雄, 山中彰宏, 工業調査會, 東京, pp.1-9, pp.15-19, pp.125-138, (1972).
- 23) 安藤常世外9人: 機械工學實驗法, 日刊工學新聞社, 東京, pp.86-88, (昭和45年)
- 24) 谷口修: 機械計測, 養賢堂, 東京, pp.266-271, (1972).