

## 고분자 첨가물에 의한 유동마찰의 감소효과

예 병 한 · 박 형 상 · 이 기 준

서울대학교 화학공학과  
(접수 1978. 3. 7)

## Reduction of Turbulent Drag by Dilute Polymer Solutions

Byung Han Ye, Hyung Sang Park and Ki Jun Lee

*Department of Chemical Engineering, College of Engineering,  
Seoul National University, Seoul 130-02, Korea*

(Received March 7, 1978)

### 要 約

亂流條件에서의 流動摩擦係數 減少效果에 관한 연구의 一環으로서 두 종류의 極少量의 高分子物質의 첨가에 의한 實驗的 研究가 pipe flow의 경우에 관하여 시도되었다. 流動摩擦 減少現象이 시작되는 壁剪斷應力은 管의 內徑과 고분자 溶液의 濃度の 증가에 따라 감소하였으며 이러한 現象은 Reynolds 數의 효과로 해석되었다. 또한 一定濃度 以上에서는 層流에서 亂流로 轉移할 때 나타나는 불규칙적인 轉換現象이 관찰될 수 없었다. 유동마찰 감소효과는 同一한 管流에 대해서 용액의 濃도와 流量의 증가에 따라서 증가하였고 同一한 Reynolds 數의 流體에 관해서는 管의 內徑의 증가에 대하여 감소하는 傾向을 보였다. 最大 流動摩擦減少는 polyethylene oxide 용액에서는 88.9%, polyacrylamide 용액에서는 84.5%의 값에 이르렀으며 마찰감소 현상의 結果를 現象學的인 解析에 의하여 壁剪斷率比의 함수로 표시하면 대체로 하나의 曲線上에 놓이게 할 수 있었다. 또한 polyacrylamide가 polyethylene oxide에 比하여 退化에 대한 批抗性이 크다는 사실을 알았으며 이 결과는 分子構造上的 차이로 해석되었다.

### Abstract

An experimental study was carried out on drag reduction phenomena in turbulent pipe flow. Polyethylene oxide and polyacrylamide were extensively used as the drag reducing polymer additives. The onset wall stress at which the drag reduction begins decreased as pipe diameter and additive concentrations increased, showing a Reynolds number effect. Meanwhile, the

laminar-to-turbulent transition was delayed and smoothed above a certain polymer concentration. The drag reduction increased with concentration and flow rate approaching asymptotic values, and decreased with pipe diameter for the same Reynolds number flow. The maximum drag reductions obtained were 88.9% for polyethylene oxide and 84.5% for polyacrylamide, respectively. These results were correlated by a phenomenological analysis to yield a single band curve. In respect to polymer degradation, the polyacrylamide showed better shear stability than the polyethylene oxide and thus the former expected to have a sharper molecular weight distribution which could not be proved by available GPC's.

## 1. 緒 論

高分子添加物에 의한 난류조건에서의流動摩擦係數 減少效果에 관한 연구가 상당히 진행되고 있는바, 이는亂流狀態의 流體輸送量을 현저하게 증가시킬 수 있다는 점 등의 應用例가 많아 관심을 끌고 있다.

고분자 물질의 溶液에 의해 드랙(drag) 감소 현상에 관해서는 大別하여 流量變化에 따른 壓力降下測定, 平均流速分布 및 亂流性的 構造究明에 관한 세가지 영역으로 취급되어 왔다.

壓力降下에 관한 Savins<sup>9)</sup> 및 Van Driest<sup>12)</sup> 등의 연구는 유량의 증가에 따라 난류에서 3개의 領域이 존재함을 立證하였다. 즉 i) 고분자 용액이 溶媒와 같은 행동양식을 보임으로써 드랙 감소가 없는 영역, ii) 고분자의 特性에 따라 드랙 감소가 일어나기 시작하는 영역, iii) 最大 드랙 감소가 얻어지는 영역으로서 i)과 ii)의 境界點은 드랙감소의 onset로 불려진다.

Huang<sup>5)</sup> 및 Rollin과 Seyer<sup>7)</sup> 등에 의해서 연구된 流速分布는 드랙감소가 비교적 낮은 영역에서 測定되었는데 드랙 감소가 생길 때는 外部境界層 內에 相互作用層이 存在하며, 난류 경계층에서의 平均流速 분포는 粘性流層, Von Karman 常數값이 작은 지역인 强相互作用層, 流速分布曲線이 上部方向으로 移動되는 弱相互作用層 및 外部 過流地域으로 나누어짐을 보여 주었다.

드랙 감소현상에 관한 亂流性的 構造는 Fortuna와 Hanratty<sup>3)</sup> 및 Chung과 Graebel<sup>1)</sup> 등에 의

해서 究明되어 왔으며 주어진 中央線流速에 대하여 軸방향의 亂流性이 감소됨을 示唆하였다. 한편 Rudd<sup>8)</sup>는 관벽부근에서는 軸方向速度의 動搖가 현저하게 증가하는 반면 橫斷流速의 動搖는 크게 줄어든다고 밝혔다.

드랙 감소 효과가 시작되는 壁剪斷應力에 관해서 아직까지 明確한 설명이 없는 바, 본 연구에서는 이를 究明하기 위하여 두 種類의 고분자 물질을 使用하여 實驗을 하여 管의 直徑과 고분자 용액의 濃度가 드랙 감소 효과에 미치는 影響을 조사하고 드랙 감소를 極大化 시키는 농도를 찾아 實驗式과 相關 시키고자 시도하였다. 또한 실험에서 고분자 물질을 繼續 使用하는 경우 退化가 일어나므로 이의 退化現象에 관한 조사를 시도하였다.

## 2. 實驗式的 誘導

### a. 드랙감소의 始作

Seyer와 Metzner<sup>10)</sup>에 의하면 묽은 고분자 용액의 管流에 있어서 벽의 剪斷應力은 다음과 같은 함수관계에 있다. 즉

$$\tau_w = \phi(\rho, \eta, D, u, \lambda) \quad (1)$$

(Buckingham의  $\pi$ 理論을) 次元解析을 적용시키면 式 (1)은

$$\frac{\tau_w^* \lambda}{\eta} = \phi' \left( \frac{\rho u^* D}{\eta} \right) \quad (2)$$

$$\text{또는 } \frac{\lambda}{\frac{\eta}{\tau_w^*} \phi'(Re^*)} = 1 \quad (3)$$

로歸結되는바, 여기서 \*는 始作條件을 나타낸다. 式 (3)이 가지는 의미는 弛緩時間  $\lambda$ 가  $\frac{\eta}{\tau_w^*} \phi'(Re^*)$ 로 표시되는 特性時間  $T$ 와 같을 때 드랙감소가 시작된다는 것이며  $T$ 와  $\lambda$ 의 重要性에 관해서는 Fabula와 Lumley<sup>2)</sup>에 의해서 논의된바 있다.

### b. 드랙감소의 强度

壓力降下に 근거를 둔 드랙감소  $(DR)_p$ 와 摩擦係數에 근거를 둔 드랙감소  $(DR)_f$ 는 각각 다음과 같이 定義되며

$$(DR)_p = \left[ 1 - \frac{\Delta p_p}{\Delta p_s} \right]_Q \times 100$$

$$(DR)_f = \left[ 1 - \frac{f_p}{f_s} \right]_{Re} \times 100$$

下添字  $p$ 와  $s$ 는 고분자 용액과 용매를 각각 나타낸다. 또한 特生固有濃度는 다음과 같이 정의되고

$$[c] = \frac{(DR)_{f, \max}}{\lim_{c \rightarrow 0} \frac{(DR)_f}{c}} \quad (4)$$

고유농도의 개념으로부터 다음과 같은 經驗式<sup>6)</sup>이 제안되었다.

$$\frac{(DR)_f}{(DR)_{f, \max}} = \frac{c}{c + [c]} \quad (5)$$

式 (5)를 정리하면

$$\frac{c}{(DR)_f} = \frac{[c]}{(DR)_{f, \max}} + \frac{c}{(DR)_{f, \max}} \quad (6)$$

로 귀착되는바,  $c/(DR)_f$ 와  $c$ 사이에는 線形關係가 존재하며 式(6)의 기울기로부터  $1/(DR)_{f, \max}$ 를 구하고 절편으로부터  $[c]/(DR)_{f, \max}$ 를 구하여  $[c]$ 를 얻는다.  $c/[c]$  값이 0.01에 接近할 때는 Henry의 法則이 적용된다.

### c. 現象學的 相關

벽 부근의 剪斷應力에 관한 Blasius의 經驗式과 벽전단율에 관한 式을 結合하면

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_w &= 0.0395 \frac{U}{D} Re^{0.75} \\ &= 0.0395 \alpha \end{aligned} \quad (7)$$

가 얻어진다. 여기서 일정한 Reynolds數에서의 드랙감소비  $\beta$ 를 다음과 같이 정의하면

$$\beta = \left( \frac{f_p}{f_s} \right) Re \quad (8)$$

$\beta$ 의 값은 1(溶媒의 경우)과  $f_L/f_s$  사이에 놓이게 되며  $f_L$ 은 Poiseuille 式  $f_L = 16/Re$ 로 정의된다.  $\beta$ 가 Deborah數에 의해서만 결정된다고假定하면  $\beta = f(\alpha T)$ 로 표시가 되고 特性時間  $T$ 는 같은 드랙감소 유체에서 一定한 값을 가지므로  $\beta$ 는  $\alpha$ 만의 함수이다.  $\alpha_p$ 를 드랙감소율이  $p$ 일 때 ( $0 < p < 1$ )의 주파수라 하고 式 (8)을 정리하면

$$\begin{aligned} \beta &= f\left(\frac{\alpha}{\alpha_p}\right) \\ &= f\left(\frac{\dot{\gamma}_w}{\dot{\gamma}_{w,p}}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

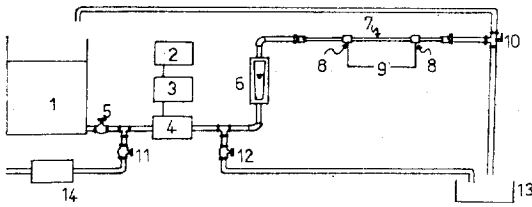
가 되어 壁剪斷率의 비로 표시가 되며 드랙감소율이  $p$ 일 때의 벽전단율  $\dot{\gamma}_{w,p}$ 는 측정된 實驗値로부터 算出될 수 있다. 式 (9)는 溶液의 濃도와 管의 直徑에 관계없이  $\beta$ 를  $\dot{\gamma}_w/\dot{\gamma}_{w,p}$ 만의 함수로 나타낼 수 있음을 의미한다.

## 3. 實 驗

### a. 實驗裝置 및 實驗過程

Fig. 1에 실험장치를 圖示하였다. 貯藏用器의 용량은 200 l이며 高分子物質의 退化를 極少化하기 위하여 로타리펌프를 사용하였고 流體의 Reynolds數는 120에서  $10^5$ 의 영역을 가지도록 하였다. Test pipe로는 內徑이 0.45 cm에서 2.10 cm에 이르는 다섯가지 黃銅管을 사용하였다(Table 1).

정확한 壓力差를 측정하기 위한 方便으로서各 pipe에 두 개의 pressure station을 설치하여 여기에 pressure tap을 부착하였고 두 tap 사이의 壓力差는 manometer를 써서 測定하였다. Test pipe를 1次 통과한 高分子溶液은 退化의 영향을 받으므로 廢棄했으며, 退化現象을 조사하기 위한 別途의 실험에서는 사용한 용액을 저장용기로 循環시켰다. 또한 1회의 실험후에는 물로 전체 시스템을 洗滌함으로써 고분자물질의 管壁에의 沈澱을 排除하였다.



1. circular tank
2. DC generator
3. DC motor
4. rotary pump
5. tank cut-off valve
6. rotameter
7. test section
8. pressure stations
9. manometer
10. three way valve
11. system blow down valve
12. flow rate regulating valve
13. weighing tank
14. system blow down pump

Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus

Table 1. Dimensions of Test Pipes

	inside diameter, (D) cm	total length, cm	distance btwn taps, (Lte) cm	$\frac{*Lte}{D}$
pipe 1	0.45	95	49.7	110
2	0.65	136	80.4	124
3	1.07	300	161.0	151
4	1.65	300	161.0	97
5	2.10	300	161.0	77

\* For pipes 1, 2, 3  $Lte/D$  increases with increasing pipe diameter while pipes 3, 4, 5 have the same test length and  $Lte/D$  decreases with increasing pipe diameter.

#### b. 高分子 溶液

粉末形態인 polyethylene oxide(PEO)와 polyacrylamide(PAM)를 드랙減少製로 사용하였다. 이 두 고분자물질은 드랙 감소 효과가優秀하고 取扱이 용이하다는 利點을 가지고 있는 바 Table 2에 그 特性을 나타내었다. 드랙 감소 효과는 고분자용액의 製造方法에 따라 달라질 수 있으므로 용액제조의 一貫性을 期하고 실험의 再現性을 얻기 위하여 용매의 表面에 고분자 물질의 粉末을 뿌린 후 일정시간 동안 방치하여 擴散에 의해 溶解시키는 方法을 썼으며 實驗期間中 고분자용액의 溫度는  $19.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 를 유지하

도록 하였다. Table 3에 Oswald-Fenske 점도로 측정한 고분자용액의 相對粉度를 표시하였다.

Table 2. Characterization of Samples

Polymer	$[\eta]$ dl/g	$M_w \times 10^{-6}$	$(DR)_{f, \max}$	$[c]$ , wppm
Polyethylene oxide	16.9	3.8	88.9	1.6
Polyacrylamide	5.4	2.0	84.5	8.2

Table 3. Relative Viscosities of Sample Solutions at  $19^\circ\text{C}$

Conc'n, wppm	PEO	PAM	Conc'n, wppm	PEO	PAM
3	1.068	1.060	80	1.224	1.270
5	1.071	1.067	100	1.263	1.322
10	1.080	1.078	160	—	1.490
20	1.102	1.105	200	1.431	1.661
30	1.121	1.128	300	1.641	2.033
40	1.143	1.158	400	—	2.467
50	1.161	1.186	500	2.030	2.991
60	1.182	1.213	1000	3.421	6.793
70	1.202	1.240			

## 4. 結果 및 檢討

### a. 摩擦減少効果

流體의 體積平均流速에 대한 壓力降下の 典型的인 실험결과를 Fig. 2에 나타내었는데 그림에서 壓力降下는 고분자농도의 증가에 따라 감소하여 어떤 농도에서 極少値를 가짐을 알수 있다.

Table 4에 PEO의 용액에 대한 onset 벽전단 응력( $\tau_w^*$ )을 表示한 바, 어떤 농도 이상에서는  $\tau_w^*$ 를 結定할 수는 없는데 이는 Fig. 3에서 明白해진다.  $\tau_w^*$ 는 同一한 농도에서는 관의 內徑이 증가할수록, 同一한 管에 대해서는 농도가 증가할수록 감소하였으며 이는 Hansen과 Little<sup>11</sup>의 관찰과도 符合된다.

濃度の 증가는  $\tau_w^*$ 뿐만 아니라 onset Reynolds數( $Re^*$ )도 감소시키는 결과를 가져왔다. 例로서 內徑 1.65 cm 管의 경우 PEO 용액에서 20 ppm

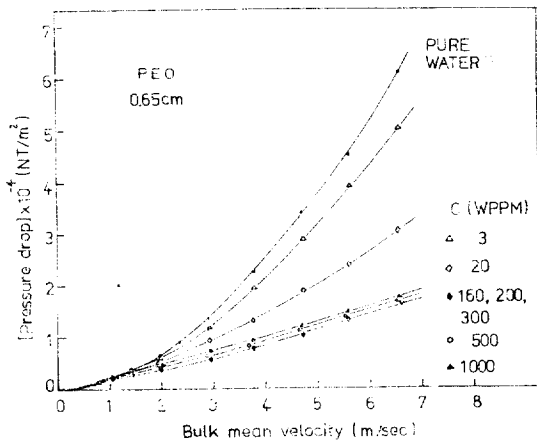


Fig. 2. Experimental Results with Polyethylene Oxide in a 0.65 cm Inside Diameter Pipe

Table 4. Onset Wall Shear Stress for PEO  
(unit : dyne/cm<sup>2</sup>)

diameter,	concentration, ppm				
cm	3	10	20	80	100
0.45	120(10)	80(5)	55(5)	*	*
0.65	30(3)	22(2)	16(2)	*	*
1.07	24(2)	19(2)	14(2)	9(1)	*
1.65	19(2)	12(1)	8(0.4)	4(0.3)	2.8(0.2)
2.10	16(2)	9(0.5)	7(0.4)	2.7(0.2)	1.4(0.1)

- i) numbers in parentheses denote probable errors ( $\pm$  sign was omitted for simplicity)  
 ii) onset points not in fully turbulent regime

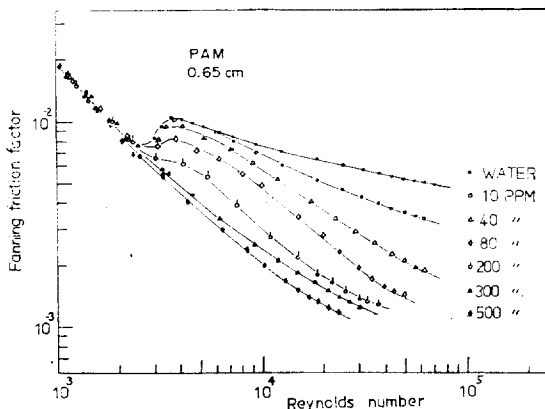


Fig. 3. Friction Factor-Reynolds Number Curves Depicting Concentration Effects

용액에 대한 3ppm 용액의  $Re^*$ 는 1.3 배가 된다. 식 (3)에서  $\phi'(Re^*)$ 은  $Re^*$ 의 증가에 따라서 감소하므로 농도가 감소함에 따라  $\tau_w^*$ 가 증가한다는 사실은  $\lambda$  값이 相當量 줄어든다는 설명이 된다.

드랙감소의 強度는 同一한 管流의 경우 용액의 濃度와 流體의 Reynolds 數에 따라 증가하였고 同一한 Reynolds 數의 流體에 관해서는 管內徑의 증가에 대해서 감소하였다. 본 실험에서는 濃度가 3 ppm 에서 1000 ppm 에 이르는 고분자 용액을 사용하였는 바, 이 濃度範圍에서 PEO 용액의 경우  $(DR)_p$  와  $(DR)_f$  가 농도와 더불어 증가함을 보였다. 그러나 PAM 용액의 경우  $(DR)_p$  는 일정한 농도에서 極大值를 갖는데 이는 相對的으로 큰 粘度에 起因한 摩擦力의 증가로 설명이 된다. 그러므로 실제 pumping system 에 있어서 pumping cost 를 줄일 目的으로 이러한 드랙감소제를 投入하여 사용할 때는 friction factor 와 비교하여 求한  $(DR)_f$  를 찾기보다는 pressure drop 이 最少로 되는  $(DR)_p$  값과 그대의 고분자 용액농도를 아는 것이 바람직하다 하겠다. 어떤 농도 以上에서는 層流에서 亂流로 轉移現象을 볼 수 없었으며 (Fig. 3), 따라서 마찰계수 曲線은 層流영역을 延長한 緩慢한 曲線의 형태를 보였다.

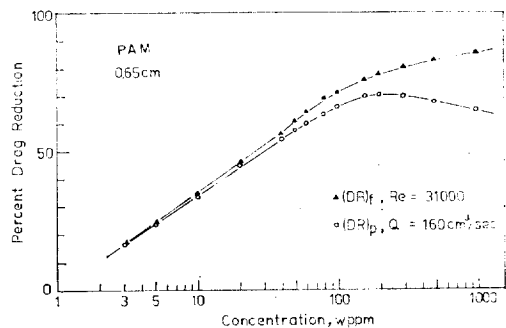


Fig. 4. Comparison of Percent Drag Reduction: Based on Pressure Drop and Friction Factor

最大摩撻減少는 PEO 의 경우  $(DR)_p$  로서 85.9 %,  $(DR)_f$  로서 88.9%, 그리고 PAM 의 경우  $(DR)_p$  로서 75.2%,  $(DR)_f$  로서 84.5%의 값이 얻어졌다 (Fig. 4). Fig. 5에  $\log Re \sqrt{f}$ 에 대한

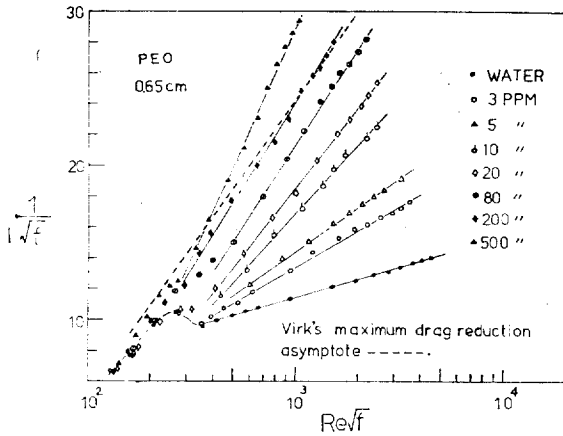


Fig. 5. Aspects of Polymeric Regime: Effect of Concentration.

$1/\sqrt{f}$ 의 Prandtl-Karman 그림을 Virk<sup>13)</sup>의 최대드레이크 감소의 漸近線과 함께 圖示하였다. 드레이크 감소영역에서

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = (4.0 + \delta) \log Re \sqrt{f} - 0.4 - \delta \log(\sqrt{2} DW^*) \quad (10)$$

로 表示되는 P-K 式은 PEO에 있어서 농도가 증가할수록 그 기울기는 점차 增加하여 최대드레이크 감소가 얻어진 500 ppm에서

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 29.2 \log Re \sqrt{f} - 58.9 \quad (11)$$

로서 Virk의 점근선  $1/\sqrt{f} = 19.0 \log Re \sqrt{f} - 32.4$ 와 비교하여 더 큰 기울기와 相對적으로 작은 절편값을 얻었는데 이것은 data 群으로부터 算出된 實驗式과 特定한 實驗值間의 차이에 기인한다고 보며 部分的으로는 더 큰 드레이크 감소를 얻을 수 있다는 사실을 意味한다.

Fig. 6은 濃도에 대한  $c/(DR)_f$ 의 결과를 일정한  $Re$  수의 값에 대해서 나타낸 것으로서 두 媒介變數 사이의 直線的 聯關性을 입증한다. 그림으로부터 算出된  $(DR)_{f, \max}$ 는 65.0로서 실험에서 얻은 값과 근사하나,  $Re$  수의 증가에 따라서 이 값도 증가하였다. 式 (5)는 최대드레이크 감소에 達하기 前의 濃度領域에서만 의미를 가지며 粘度가 현저히 커지는 高濃度에서는 적용할 수가 없게된다.

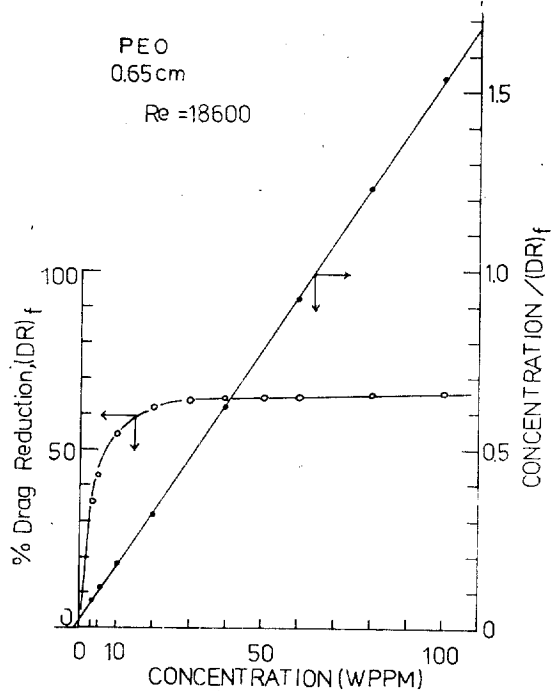


Fig. 6. Concentration Dependence of Drag Reduction for Polyethylene Oxide. A Linear Relationship Exists between  $C/DR$  and  $C$

式 (9)에서 提案된 형태에 따라 드레이크 감소를 50% ( $P=0.5$ )인 경우에 관하여 Fig. 7과 Fig. 8을 얻었으며 Fig. 7은 同一한 管에서의 여러 농도에 대해서, Fig. 8은 同一한 濃度에서의 여러 管에 관해서  $\dot{\gamma}_w/\dot{\gamma}_{w,0.5}$ 에 대한  $\beta$  값을 각각 나타낸 것으로서 두 경우 共히 實驗值들이 한 band로 묶어짐으로서 앞서의 假定이 타당함을 보인다. 즉 式 (9)는 Fig. 7과 Fig. 8의 결과로부터

$$\beta = f \left[ \ln \left( \frac{\dot{\gamma}_w}{\dot{\gamma}_{w,p}} \right) \right] \quad (12)$$

의 形態로 주어지는 바,  $r = \ln(\dot{\gamma}_w/\dot{\gamma}_{w,p})$ 로 두고 最少自乘法로 구한 曲線의 式은

$$\beta = 0.514 - 0.218r + 0.0477r^2 \quad (13)$$

for  $-1.64 < r < 2.29$

가 된다.  $p$  값이 변할 경우 ( $0 < p < 1$ )에 대한 精確한 關係式을 얻기 위해서는 좀더 嚴密한 측정기 要求되며 巨視的인 見地에서 이런 方畧의 試圖는 앞으로 필요한 課題로 보여진다.

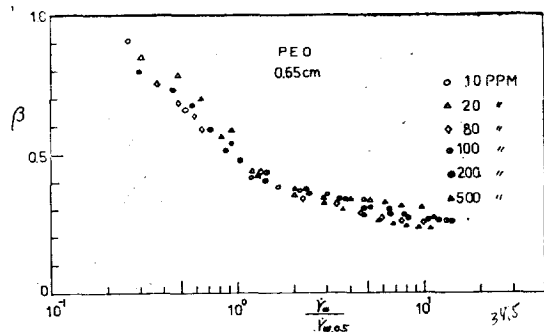


Fig. 7. Correlation of  $\beta$ , Drag Reduction Ratio versus  $\dot{\gamma}_w/\dot{\gamma}_{w,0.5}$  for Sample Data from Different Concentrations

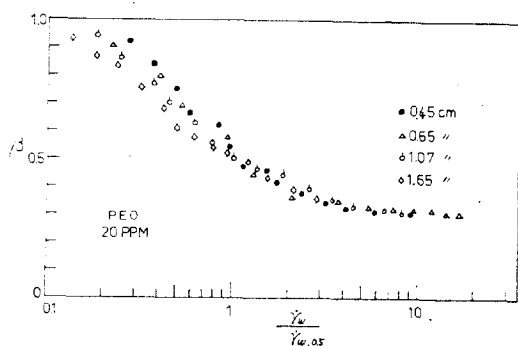


Fig. 8. Correlation of Drag Reduction Ratio versus  $\dot{\gamma}_w/\dot{\gamma}_{w,0.5}$  for Sample Data from Different Pipe Diameters

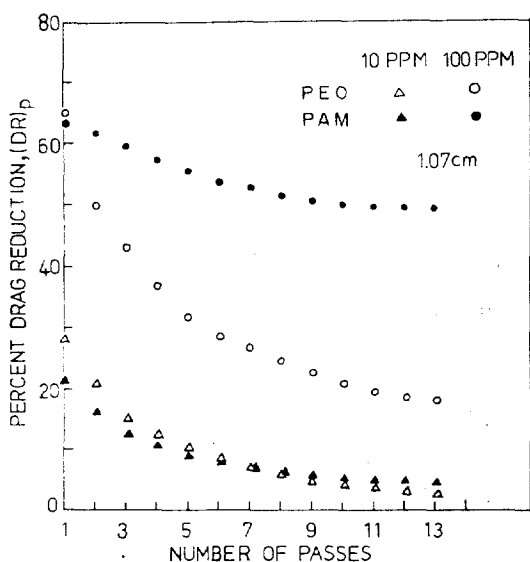


Fig. 9. Degradation Behaviors of Polyethylene Oxide and Polyacryl Amide

## b. 高分子物質의退化現象

드랙 감소제에 관한 문제점의 하나는流動中에 발생하는分子連鎖의崩壊로서 이는 드랙 감소의 효율에 직접影響을 미치게 된다. Test system에서의 1回 run을 한 pass로 하여 Fig. 9에 두 고분자물질의退化現象을 나타내었는데 처음 몇回的 pass에서 10% 이상의 심한退化가 일어나며 또한 PAM이 PEO에 비하여 퇴화에 대한抵抗이 큼을 보여준다. 高速攪拌에 의한 연구결과<sup>11)</sup>에 의하면退化는應力水準, 溫度, 高分子物質의種類, 分子量, 分子量分布 및 고분자와溶媒間の相互作用의 여섯가지 요소에 의하여支配받는 것으로 알려져 있는데 본 연구에서 사용한 고분자물질의 경우, 1回的 실험기간 동안의化學的 및 熱的退化는無視할 수 있으므로 shear에 의한 퇴화만이 문제가 되고 分子量分布, 즉 polydispersity ( $M_w/M_n$ )에 따라서退化樣式이 좌우된다 하겠다.

매우平坦한 分子量分布, 즉 큰 polydispersity를 갖는 고분자물질의 경우 分子量變化에 따른成分의 변화가 심하지 않음으로 드랙 감소의樣式은 分子量이 큰 高分子, 즉 分布曲線상의 tail end부분에 의하여 크게 영향을 받으며 이 부분의 fraction이 작아 쉽게退化가 되는바, 드랙 감소의效率은 급격히 떨어지게 된다. 한편, 좁은 分子量分布, 즉 작은 polydispersity를 보이는 고분자물질일 경우에는 分子量의 변화에 따른成分의 변화가 심하여 分布曲線상 中央部分이 차지하는 fraction이 크고 따라서 드랙 감소에 參與하게 되는 分子의數도 相對적으로 많아 分子量이 큰 분자가 퇴화하더라도 작은 分子가 드랙 감소效率은 쉽게 줄어들지 않은 것으로 이해된다. 본 연구에 사용한 고분자물질은 GPC 등 통상적인 方法에 의한 分子量分布測定이 불가능하여 그 polydispersity의 精確한 값을 알 수 없으나 고분자의退化樣式으로부터 PAM이 PEO에 비하여 작은 polydispersity를 가지는 것으로 기대된다.

## 5. 結 論

流動摩撥減少現象이 시작되는 壁剪斷態력과 onset Reynolds 數는 管의 直徑과 고분자용액의 濃度에 역비례함이 確認되었으며, 드랙 감소의 程度는 濃度和 流量이 증가할수록, 管의 직경이 감소할수록 증가하여 漸近値에 접근하였다. 그리고 最大 드랙 감소는 PEO에서 88.9%, PAM에서 84.5%의 값에 이르렀다. 또한 一定濃度以上の 고분자용액에서는 層流에서 亂流로 轉移할 때 나타나는 不規則性을 관찰할 수 없었으며 드랙 감소의 결과를 管의 直徑이나 용액의 濃度의 影響과 無關한 壁剪斷率比의 함수로 표시하여 하나의 曲線으로 相關시킬 수 있었다.

polyacrylamide polyethylene oxide에 比하여 分子構造上으로 退化現象에 대한 抵抗性이 크다는 사실을 알았으며 分子量分布測定을 통하여 定量的인 解析에 의한 確認이 요구된다 하겠다.

## 6. 使用 記號

$c$  高分子溶液濃度(ppm)  
 $[c]$  固有濃度(ppm)  
 $D$  管의 內徑(cm)  
 $f$  摩擦係數  
 $Mn, Mw$  數平均 및 重量平均分子量  
 $Q$  流量( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )  
 $Re$  Reynolds 數  
 $T$  特性時間(sec)  
 $U$  平均速度( $\text{cm}/\text{sec}$ )

## 희랍 문자

$\alpha$  特性周波數  
 $\beta$  드랙 감소比  
 $\dot{\gamma}_w$  壁剪斷率( $\text{sec}^{-1}$ )

$\delta$  기울기 증가량  
 $\eta$  粘度( $\text{g}/\text{cm}\cdot\text{sec}$ )  
 $\rho$  密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 $\tau_w$  壁剪斷應力( $\text{dyne}/\text{cm}^2$ )  
 $\lambda$  弛緩時間(sec)

## 7. References

- 1) J. S. Chung and W. P. Graebel, *Phys. Fluids*, **15**(1972), 546.
- 2) A. G. Fabula, J. L. Lumley and W. D. Taylor, "Modern developments in the Mechanics of Continua," Academic Press, New York, (1966).
- 3) G. Fortuna and T. J. Hanratty, *J. Fluid Mech.*, **53**(1972), 575.
- 4) R. J. Hansen and R. C. Little, *Chem. Eng. Progr. Symp. Ser.*, No. 111, **67** (1971), 93.
- 5) T. T. Huang, *Phys. Fluids*, **17**(1974), 298.
- 6) R. W. Patterson, Ph. D. Thesis, Harvard University, (1969).
- 7) A. Rollin and F. A. Seyer, *Can. J. Chem. Eng.*, **50**(1972), 714.
- 8) M. J. Rudd, *J. Chem. Eng. Progr. Symp. Ser.*, No. 111, **67**(1971), 21.
- 9) J. G. Savins, *J. Soc. Petrol. Eng.*, **4**(1964), 203.
- 10) F. A. Seyer and A. B. Metzner, *Can. J. Chem. Eng.*, **45**(1967), 121.
- 11) A. R. Taylor and S. Middleman, *AIChE J.*, **20**(1974), 454.
- 12) E. R. Van Driest, *J. Hydronautics*, **4**(1970), 120.
- 13) P. S. Virk, E. W. Merrill, H. S. Mickley, K. A. Smith, and E. L. Mollochriestensen, *J. Fluid Mech.*, **30**(1967), 305.