

# 高分子溶液에 의한 流體輸送管壁의 抵抗減少\*\*\*

## — II. 난류흐름에서 국소저항감소—

### Drag Reduction of Pipe Wall For Fluid Flow due to Injected Polymer Solution

#### — II. Local Drag Reduction in Turbulent Flow—

秋 樂 俊\* · 柳 慶 玉\*\*  
Choo, Nak Joon Ryu, Kyong Ok

.....  
**Abstract**

Dilute polymer solutions were injected into turbulent pipe flow of a Newtonian fluid. The local drag reduction for injection of polymer solution at the pipe wall was larger than that at centerline. From the above result we may conclude that the polymer additives were found to influence the flow in the neighborhood of the wall. The effects of the injection apparatus on the local drag reduction are small compared to the drag-reducing effects. The extent of drag reduction increased with polymer concentration and injection flow rate, and the maximum drag reduction obtained were 47% for Polyox Coagulant and 35% for Separan AP-273. In respect to polymer degradation, the polyacrylamide showed better shear stability than the polyethyleneoxide and thus the former expected to have a sharper molecular weight distribution.

.....

### I. 서론

유체가 난류상태로 관속을 흐를때, 반경방향으로 열이나 물질이동이 일어나는 현상은 산업공정에 유용하게 이용하고 있다. 그러나 열 혹은 물질 이동은 동시에 많은 에너지의 낭비를 동반한다. 따라서, 이런 에너지를 감소시킬 수 있는 분야에

대한 연구는<sup>1~5)</sup> 흥미로운 분야라고 할 수 있다. 긴 chain을 가진 수용성 고분자의 출현은 이 분야의 연구를 가능하게 했다. Toms는<sup>6)</sup> 고분자물질이 용해된 유체가 난류상태로 관속을 유동할때 순수유체와는 달리 저항감소현상이 일어나는 사실을 발견했고 Ram과 Brennen등은<sup>7~8)</sup> 원유 채유과정에서 고압의 sand suspension을 oil-bearing rock에 분사시킬 때 고분자물질을 첨가하면 저항감소현상이 일어나 동력비가 절감된다고 보고하였다. 초기에는 이러한 난류현상의 특성을 실험

\* 斗山研究所 研究員  
\*\* 漢陽大 化工科教授·工博, 本學會 副會長  
\*\*\* "I 자유진동 흐름의 감쇄특성"은 한양대학교 산업과학 논문집 32, 45(1991) 참조

## II. 난류흐름에서 국소저항 감소

의 오차로 취급하였으나 같은 현상이 계속나타나므로, 1960년대 이후 본격적인 연구가 진행되어 왔다.

그러나 펌프의 기계적인 일, 관벽과의 마찰, 유체-유체간의 마찰등으로 인하여 고분자의 chain이 파괴되어 退化現象이 일어난다. 이러한 퇴화현상으로<sup>9-10)</sup> 저항감소효과가 감소하고 고분자물질 교체로 인하여 運轉費가 증가하게 된다. 따라서, 보다 shear resistance에 안정한 물질에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 이제까지 저항감소 연구방법으로는 저장용기에 담겨져있는 고분자 수용액을 관속으로 유입시키는 방법과, Newton유체를 관속으로 유동시킨후 완전한 난류가 형성되었다고 생각되는 곳에 고분자 수용액을 주입하는 방법으로 나눌 수 있다.

전자는 균일한 용액의 성질을 갖으며, 대부분 저항감소연구의 주류를 이룬다. 이것은 난류흐름 조건에서 운전되는 석유정제장치, 장거리 원유수송system, 소방호스 및 선박등 여러분야에서 광범위하게 응용될수있기 때문이다. 후자의 주입 방법은 저항감소현상이 필요한 위치에 용액을 주입하므로 運轉費의 절감과 난류와 고분자용액의 상호작용을 연구할 수 있다. 이러한 유리한점 때문에 최근에 와서는 고분자용액 주입에 의한 연구가 많이 진행되어 왔다.

Wells와 Spangler등은<sup>11)</sup> 저항감소현상이 일어나는 위치를 밝히기 위해 PEO수용액을 관중앙에 주입하여 난류의 구조적 변형을 연구하였다. Latta 와 Shen등은<sup>12)</sup> 사각형 관에서 viscous sublayer로 추측되는 점에 고분자용액을 주입하여 저항감소효과가 나타남을 확인하였다. 또한 Rabie는<sup>13)</sup> 난류의 강도를 측정하였는데 LDA 농도가 증가함에 따라 난류의 강도가 감소함을 알 수 있었다.

McComb과 Rabie등은<sup>14)</sup> 원관내의 흐름에서 난류의 강도와 에너지스펙트럼을 측정하여 고분자물질의 농도변화에 따른 저항감소효과를 연구하였다. 이러한 연구결과로 저항감소현상에 대한 많은 메카니즘이<sup>15-18)</sup> 제안되었으나, 아직도 확실한 메카니즘은 밝혀지지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 주입할 고분자물질의 농도와 주입량에 따른 저항감소효과, injector의

형태에 따른 저항감소효과 및 최적주입양을 결정하고 사용한 고분자물질의 퇴화현상에 관해 연구하였다.

## II. 이론적 고찰

### II-1. 유량특성 곡선

난류상태하에서 저항감소현상의 연구는 주로 관내면이 매끈한 관을 대상으로 하였다. 여러 연구결과를 종합해 보면 유동저항의 감소에는 어느 한계가 있다. 물에 미소량의 고분자물질을 용해시키면 수용액의 점성은 거의 변화되지 않으나 난류상태에 따라 유동특성은 크게 변한다. Fig. 1에 보인 바와 같이 Reynold수 2,000이하에서 Newton유체의 마찰계수  $f$ 는

$$f = \frac{16}{N_{Re}} \quad (1)$$

로 표시되며, Reynold수가 2,000내지 4,000범위에서 전이영역을 나타내며 그 이상에서는 Prandtl 식으로 알려진 다음식을 만족한다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.0 \log_{10}(N_{Re}\sqrt{f}) - 0.4 \quad (2)$$

그러나, 고분자용액은 층류에서 난류로 변하는 전이영역이 뚜렷하지 않고 Reynold수 2,000정도면 층류식 (1)로부터 서서히 벗어나기 시작한다. 고분자용액이 형성하는 이 마찰계수곡선을 최대저항감소곡선(Maximum drag reduction asymptote)이라

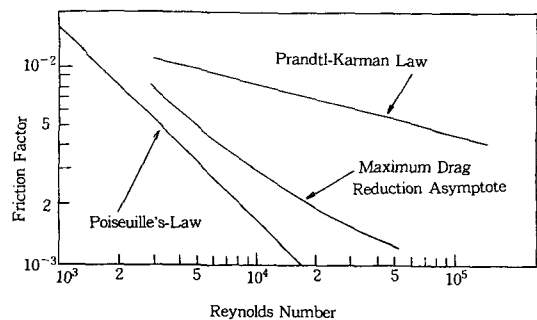


Fig. 1. Friction factor asymptotes corresponding to no drag reduction (Prandtl-Karman law), and maximum drag reduction

하는데 실험적으로 Reynold수 약 10,000까지 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 19.0 \log_{10}(N_{Re}\sqrt{f}) - 32.4 \quad (3)$$

미소량(수 ppm내지 수백 ppm)의 고분자용액의 난류현상은 Newton유체의 난류현상과는 판이하며 현존하는 유체역학의 개념으로 볼때 층류도 난류도 아닌 또 하나의 유동영역이 존재함을 나타낸다.

## II-2. 저항감소 메카니즘

아직까지 저항감소현상을 나타내는 물질, 유동특성 및 메카니즘은 확실하지않으나, 몇가지 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

### 1) 저항감소를 나타내는 물질 및 유동특성

- ① 분자량이 수십만 이상인 물질이어야 한다.
- ② 분자구조가 구상이 아니며, 퍼짐성이 큰 random-coil상태의 물질이 유리하다.
- ③ 난류억제제는 경계층에서 주로 저항감소효과를 나타낸다.
- ④ 난류흐름 상태에서 감소현상 잘 일어난다.

### 2) 저항감소 메카니즘

많은 결과에서 다양한 저항감소 기구가 제안되었으나, 가장 타당성이 있는 것으로 알려진 energy storage<sup>18)</sup> 이론을 설명하면 다음과 같다.

속도가 매우 빠를때 경계층의 바깥쪽 흐름에서 경계층 혹은 점성저층으로 들어오는 에너지를 고분자물질이 흡수하는 형태에 따라 크게 두가지 이론으로 구분한다.

#### ① 절단설(scission theory)

고분자가 에너지를 흡수하는데 있어서 고분자의 마디가 에너지를 흡수한다는 이론이다.

#### ② 완화설(relaxation theory)

고분자의 구조적변형에 의해 에너지를 흡수한다는 이론으로, 관벽면에서 고분자용액의 거시적인 점탄성 변형이라고 하는 경우와 쇄상분자속에 있는 random-coil의 미시적인 점탄성 변형이라고 하는 두가지 이론이 있다.

고분자물질의 절단현상은<sup>19)</sup> 층류에서도 가능하기 때문에 절단설로 저항감소 기구를 설명할 수 있으나, 이것 보다는 고분자의 구조적 변형에 입각한 완화설, 그 중에서도 쇄상 고분자용액의 점탄성에 대한 분자론적 이론에 기본을 두어 설명할 수 있다.

층류에서 전단응력은 주로 운동량확산에 의해 기인되는데, 이때 유체의 운동에너지의 일부가 마찰열로 소멸된다. 한편, 속도가 커지면 위와같은 분자적인 기구만으로는 에너지소멸 원인을 설명할 수 없다. 이때는 eddy가 생성하여 운동량 이동이 커지고, 이에따라 에너지의 소비가 커지게 된다. 만약 경계층 내에 random-coil을 가진 고분자가 존재한다면 random-coil이 일종의 부가적인 에너지를 빨아들이는 매개체의 역할을 한다. 점성저층에서 eddy가 형성되어 많은 운동에너지를 소멸시키나 주입된 고분자물질이 이 에너지를 대신 흡수하게 된다. 결과적으로 흐름은 안정화되고, 난류혼합에 의한 에너지 소실은 완화적 변형에 의한 것보다 적어진다.

고분자의 에너지 흡수는 전단속도가 가장 큰 곳인 벽면에서 시작된다. 즉 고분자의 저항감소효과는 벽면에서 최고값을 가지게 되며 난류의 발달을 억제할 수 있다. 이런 현상에 의해서 변형된 고분자는 다른 곳에서 원상으로 회복하고, 벽면으로 복귀되어 억제작용을 계속한다.

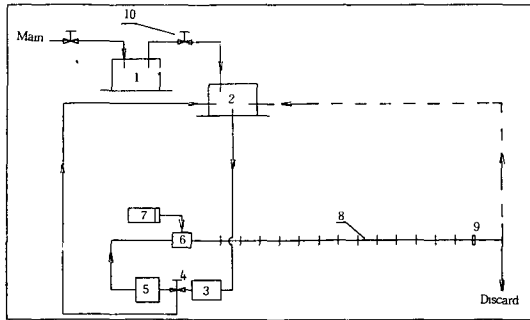
## III. 실험

### III-1. 실험 장치

실험장치는 유체순환부와 고분자용액 주입부로 이루어져 있다. Fig. 2에 표시된 바와 같이 유체순환부는 두개의 물탱크 펌프 및 압력측정부로 구성된다. 압력측정위치에서 난류조건을 유동속도를 얻기 위해 한일원심펌프(Model PD-230, 1/3hp)를 사용 하였고 실험중 측정위치의 유동변화(Flow fluctuation)를 억제하기 위하여 펌프출구에 settling chamber를 설치 하였다.

압력측정위치의 흐름이 완전한 난류가 되게 하기 위하여 pump와 측정위치 사이에는 충분한 긴 entrance tube를 설치하였다.

## II. 난류흐름에서 국소저항 감소



1. Constant level overflow tank
2. Supply tank
3. Pump
4. Bypass valve
5. Settling chamber
6. Polymer injector
7. Polymer injection pump
8. Test section
9. Orifice meter

Fig. 2. Flow diagram of the experimental system

첫번째 압력 tap은 injector에서 5 cm 떨어진 점에 설치하고, 이로부터 매 30 cm 간격으로 10개, 40 cm 간격으로 7개의 tap을 설치하였다. 압력측정용 관은 가공이 용이한 3.0 cm PVC 관으로 관내면은 조도를 무시할 수 있을 정도로 매끈한 관을 사용하였다.

고분자용액 주입기는 Cole Parmer Masterflex (Model No. 3,358,609)를 사용했으며 주입 유량범위는 1.26~1,300 ml/min로 관속을 흐르는 총유량중에 viscous sublayer로 흐르는 유량의 범위와 같게 하였다. 이 주입량은 viscous sublayer로 흐르는 유량과 거의 같은 3% 정도이다.

Injector는 관 중심과 관벽에 설치하였다. 관중심 injector는 bulk 흐름에서 주입량 변화에 따른 저항감소효과를 측정하기 위해 관 중앙에 유체의 흐름방향과 동일하게 설치하였다. 관벽 injector는 half-slot 형태로 관벽면에서의 저항감소측정을 위해 관벽에 설치하였다. Fig. 3에 injector의 상세도를 나타내었다.

압력차를 측정하는데 사용할 목적으로 내경 10 mm이고 길이 2 m인 투명 PVC 관을 이용하여 Fig. 4와 같이 manometer를 제작하였다. 예상되는 Reynold수의 범위내에서 발생된 각 압력 tap간의 압력차를 고려하여 manometer의 높이는 2m로 하였다. 유량이 증가하여 물이 manometer의 높이를 2m로 하였다. 유량이 증가하여 물이 manometer의 높이를 넘게 되면 관위에 압축공기를 주입하여

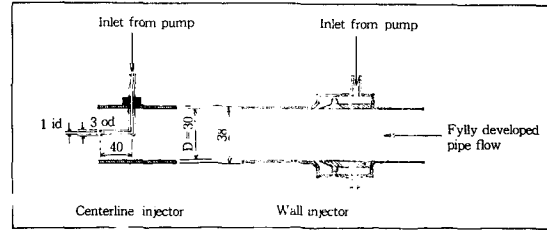


Fig. 3. Sketch of test section for fluid injection (All dimensions in mm)

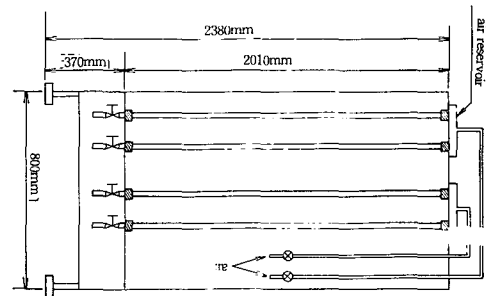


Fig. 4. Multi-manometer

물의 높이를 조절하였다. Fig. 4에 manometer의 상세도를 도시하였다.

## III-2 사용된 고분자 물질

유동저항감소효과가 대단히 좋은 Separan AP-273과 Polyox WSR-Coagulant를 사용하였다. Separan AP-273은 Dow Chemical Company에서 제조한 polyacrylamide(PAM)이고 Polyox WSR-Coagulant는 Union Carbide Company의 polyethyleneoxide(PEO)이다.

Table 1. Characterization of samples

Sample solution	Concentration (wppm)	Relative viscosity (30°C)	(Mol. wt) × 10 <sup>-6</sup> Mfr's
PAM (AP-273)	100	2.011	2.0
	300	2.883	
	500	2.914	
	1000	15.421	
PEO (Coagulant)	100	1.153	5.0
	300	1.306	
	500	1.841	
	1000	2.760	

저항감소 효과는 고분자용액의 제조방법에 따라 달라질 수 있으므로 일관성을 기하고 실험의 재현성을 얻기 위하여 용매의 표면에 고분자 물질의 분말을 뿌린후 일정시간(48시간)동안 방치하며 확산에 의해 용해 시키는 방법을 썼으며 실온에서 방치하였다. Table. 1에 Oswald-Fenske점도계로 측정 한 고분자용액의 상대점도를 표시하였다.

III-3. 실험방법 및 장치의 보정

30분 정도 pump를 가동하여 유동이 정상 상태가 되도록 하고 압력 tap에 들어있는 공기를 제거한 후 측정위치의 압력 tap을 manometer에 연결하였다. 유량은 bypass valve로 조절하고 동시에 온도를 측정하였다. 압력은 2분 간격으로 3~4회 측정하여 평균치를 취하였다.

유동실험에서 정확한 유량측정과 압력측정이 가장 중요하며 장치의 보정 또한 중요하다. 유량측정은 실험관내에 물을 계속 순환시키면서 유량을 electric balance(Chyo JP-3000W)로 측정하였다. 저울위에 놓여진 용기에 실험관의 출구로부터 일정한 시간동안 유출되는 물의 양을 계측하고 동시에 일정거리에서의 압력을 측정하였다.

이 실험결과에서 Reynold수를 계산하고 산출된 마찰계수 값을 Table. 2에 나타내었다. 이실험결과가 Fig. 5와 일치하는 사실로보아 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

III-3. 실험데이터의 처리방법

마찰계수와 Reynold수는 다음과 같은 식으로

Table 2. Friction factor and Reynolds number

$\Delta P$ (mmHg)	$Q$ (kg/min)	$N_{Re}$	$f$	$\bar{u}$ (m/sec)
68.5	36.66	22013.28	0.00607	0.811
83.0	40.78	24487.21	0.00588	0.902
121.0	48.62	29194.91	0.00581	1.075
138.0	51.89	31158.4	0.00552	1.148
217.0	56.03	33624.7	0.00532	1.239
260.1	63.00	37829.6	0.00453	1.393
322.0	81.92	49191.4	0.00401	1.811

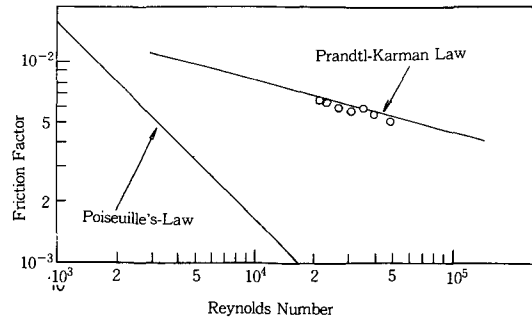


Fig. 5. Friction factor for Von-Karman equation

계산하였다.

$$f = \left(\frac{\Delta p}{2}\right) \left(\frac{d}{l}\right) \left(\frac{8c}{\rho u^2}\right) \tag{4}$$

$$N_{Re} = \frac{D\bar{u} \rho}{\mu} \tag{5}$$

$\Delta p_w$ 를 순수한 용매의 압력차라 하고,  $\Delta p_p$ 를 고분자의 압력차라 하면 저항감소 능력은

$$\% DR \Delta = \Delta \frac{\Delta P_w - \Delta P_p}{\Delta P_w} \Delta \times 100 \tag{6}$$

로 나타낼 수 있다.

한편, 고분자 용액을 관내로 주입했을 경우 분산되는 평균농도는

$$C_{av} = \frac{Q_p}{(Q_w + Q_p)} \times C_p \tag{7}$$

로 나타낼 수 있다.

IV. 결과 및 검토

IV-1. 고분자용액의 유동성

Couette type rotational viscometer로 측정 한 PEO 와 PAM용액의 농도 변화에 따른 유동형태를 Fig. 6~7에 나타내었다. Fig. 6에 표시한 stress와 strain의 관계를 볼때 PAM은 stress가 증가함에 따라 점도는 작아지고, stress가 감소하면 점도가 증가하는 shear thinning<sup>20)</sup> 현상을 보이며 구조가 파괴되는 thixotropic의 경향을 보인다. PEO에 대한 Fig.7을 고찰해볼때 dilatancy에서 thixotropic으로

II. 난류흐름에서 국소저항 감소

transition을 일으키는 것으로 보아 고분자의 구조가 뭉쳐진 상태에서 선형상태로 변형되다가 파괴되는 것으로 추측된다. 또한 구조변형이 더 높은 shear

rate까지 계속되는 것으로 보아 낮은 유속범위에서 고농도의 고분자를 사용할 경우 오히려 저항감소 능력이 상실된다고 볼 수 있다.

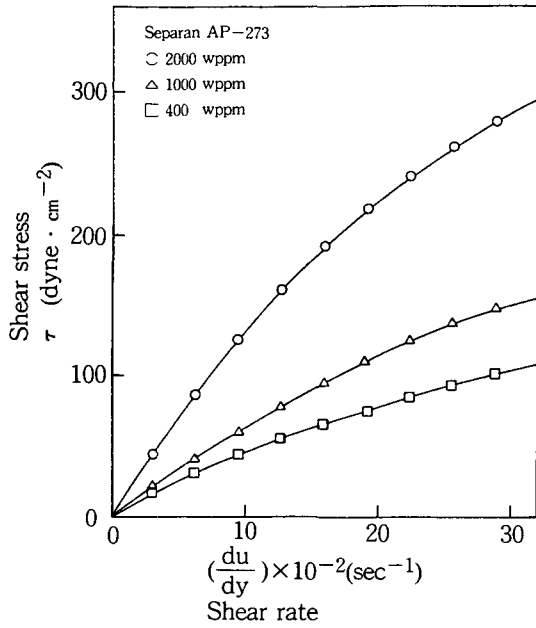


Fig. 6. Flow curves of PAM with various concentration at 20°C

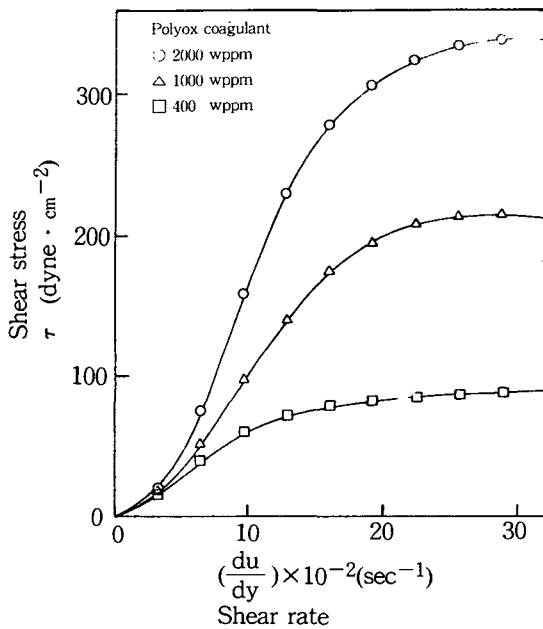


Fig. 7. Flow curves of PEO with various concentration at 20°C

IV-2. 저항감소 효과

고분자용액 농도 변화와 주입량에 따른 저항감소 효과를 알아보기 위해 Reynold수를 22,000으로 고정하고 관중앙과 관벽에 고분자용액을 유입하였다. Fig. 8~10은 PEO 300, 500, 1000 wppm에서 주입량 변화에 따른 %DR을 도시한 것으로 주입량이 증가함에 따라 저항감소 효과가 증가하는 것을

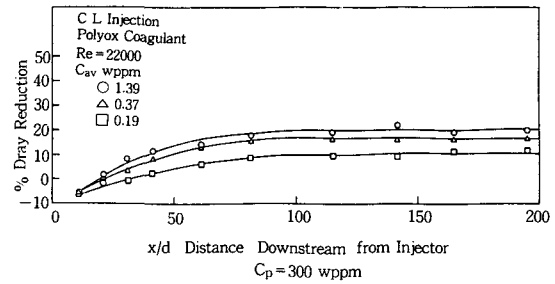


Fig. 8. Local drag reduction for injection of PEO at the centerline

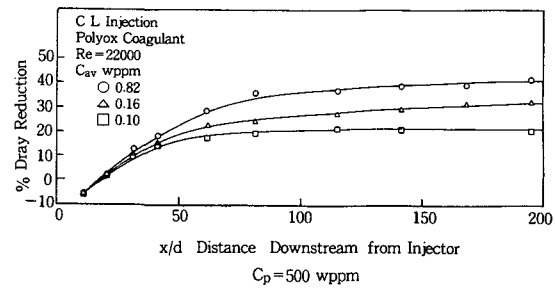


Fig. 9. Local drag reduction for injection of PEO at the centerline

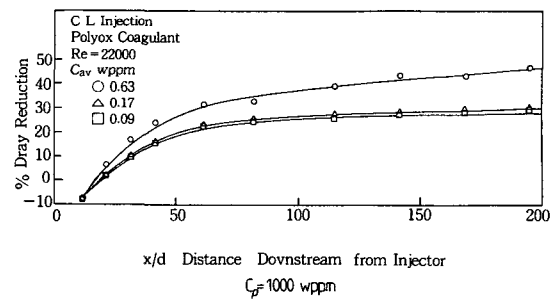


Fig. 10. Local drag reduction for injection of PEO at the centerline

볼 수 있다. 고분자용액을 유입한 직후 오히려 저항이 증가하는데 이것은 유입부분의 영향이라고 하기 보다는 고분자용액의 특성으로 해석된다.

Fig. 11~13는 PAM 300, 500, 1000 wppm을 관중양에 유입한 것으로 PEO와 같이 유입양이 증가함에 따라 저항감소 효과가 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 14는 동일한 농도와 주입량에서 PEO와 PAM을 비교한 것으로 PEO가 약 20%정도 크게 나타났다.

Fig. 15~16은 고분자용액을 관벽에 유입한 것으로 관중양과는 달리 저항감소 효과가 빠르게 나타났다. 이것은 고분자 용액이 주로 관벽에 작용하는 것으로 추측된다. 또한 관벽에서는 결과치가 상당히 변동하는 것을 볼 수 있는데 이것은 turbulent burst에<sup>21)</sup> 의한 것으로 해석된다.

Fig. 17은 PAM 500 wppm을 관중양과 관벽에 유입했을 때를 비교한 것으로 % DR에서는 거의 같은 수치를 보인다.

고분자의 평균농도 변화에 따른 저항감소 정도를 Fig. 18~19에 나타냈다. PAM과 PEO 두 물질 모두 농도가 증가함에 따라 최적유입량이 감소하는데

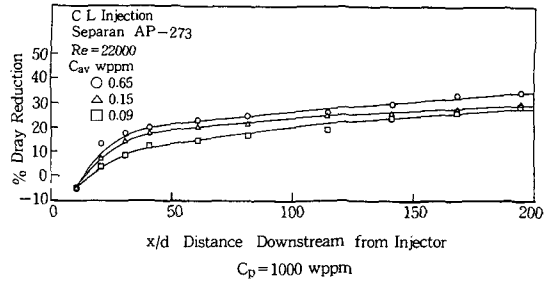


Fig. 13. Local drag reduction for injection of PAM at the centerline

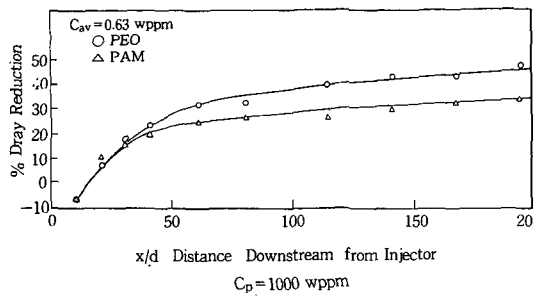


Fig. 14. Comparison of local drag reduction for injection of PEO and PAM at the centerline

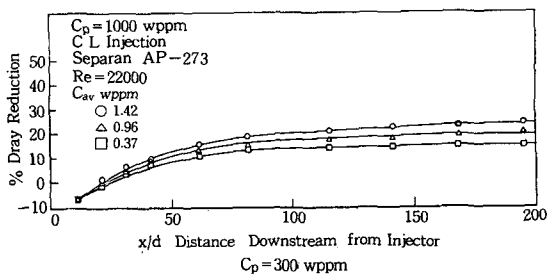


Fig. 11. Local drag reduction for injection of PAM at the centerline

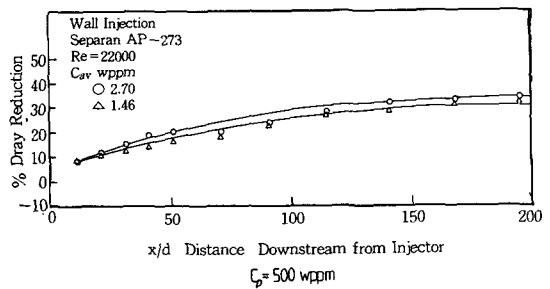


Fig. 15. Local drag reduction for injection of PAM at the wall

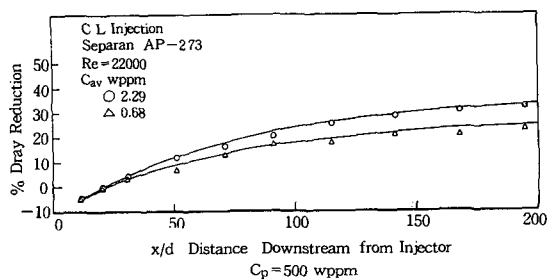


Fig. 12. Local drag reduction for injection of PAM at the centerline

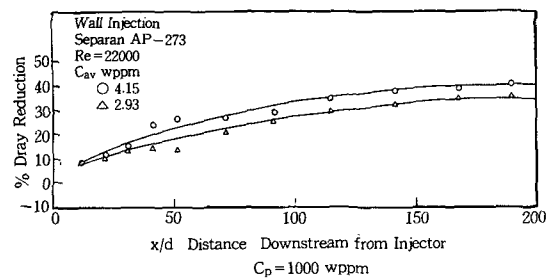


Fig. 16. Local drag reduction for injection of PAM at the Wall

II. 난류흐름에서 국소저항 감소

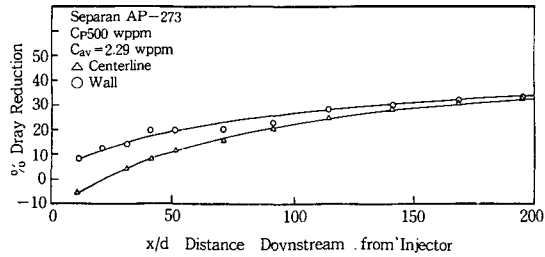


Fig. 17. Comparison of local drag reduction for injection of PAM at the wall and centerline

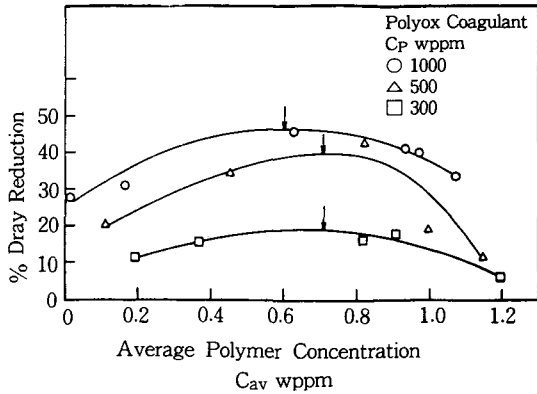


Fig. 18. Effect of average concentration on local drag reduction

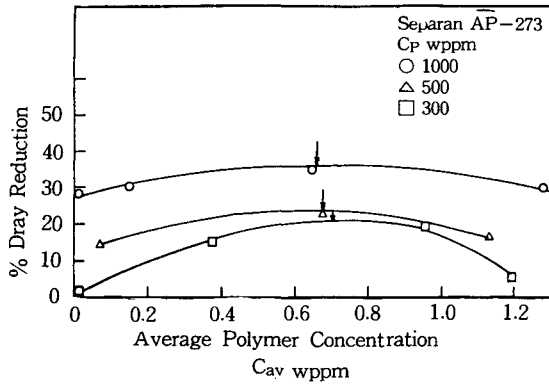


Fig. 19. Effect of average concentration on local drag reduction

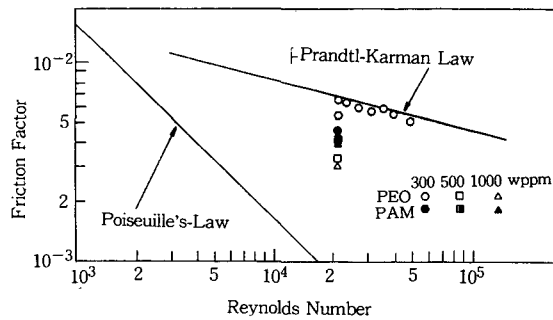


Fig. 20. Aspects of polymeric regime: Effect of polymer concentration

이것은 rotational viscometer의 결과와 상응하는 것이다.

Fig. 20은 일정한 Reynold수에서 농도에 따른 마찰계수의 값을 도시한 것으로 농도가 증가할수록 마찰계수의 값이 점점 낮아지는 것을 볼 수 있다.

IV-3. 고분자용액의 퇴화현상

저항 감소제의 큰 문제는 여러가지 요인에 의해 고분자의 주쇄(main chain)가 절단되어 분자량이 저하되는 퇴화(degradation)현상이 발생이다.

여러 연구가들의 연구결과에 의하면 퇴화는 응력의 정도, 온도, 시간, 고분자의 종류, 분자량, 분자량 분포, 용액의 상호작용의 일곱가지 요소에 의하여 지배받는 것으로 알려졌다.

본 연구에서는 고분자용액을 관내로 유입 했으므로 응력정도, 온도 등을 무시할 수 있고, 시간과 분자량 분포, 고분자물질에 따라 퇴화형식이 좌우된다고 할 수 있다.

Fig. 21에 고분자용액의 시간에 따른 퇴화현상을 나타냈다. 초기에는 변화가 없다가 시간이 지남에 따라 PAM에 PEO에 비하여 ageing에<sup>22)</sup> 의한 퇴화에 대해 저항성이 큼을 보여준다. 이것은 분자구조상의 차이로 해석되며, 분자량 분포의 차로 설명할 수 있다.

매우 평탄한 분자량 분포, 즉 큰 polydispersity를 갖는 고분자물질의 경우 분자량변화에 따른 성분의 변화가 심하지 않으므로 저항감소의 양식은 분자량이 큰 고분자, 즉 분포곡선상의 tailend부분에 의하여 크게 영향을 받으며, 이 부분의 fraction이 작아 쉽게 퇴화가 일어나 저항감소의 효율이

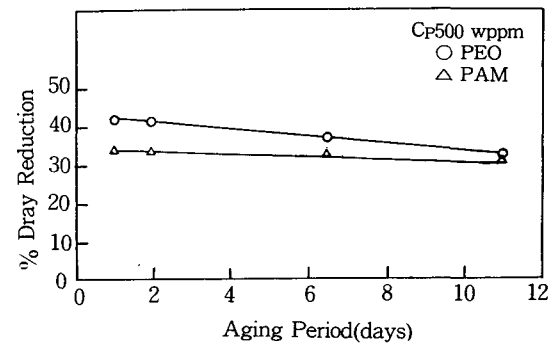


Fig. 21. Effect of solution age on local drag reduction



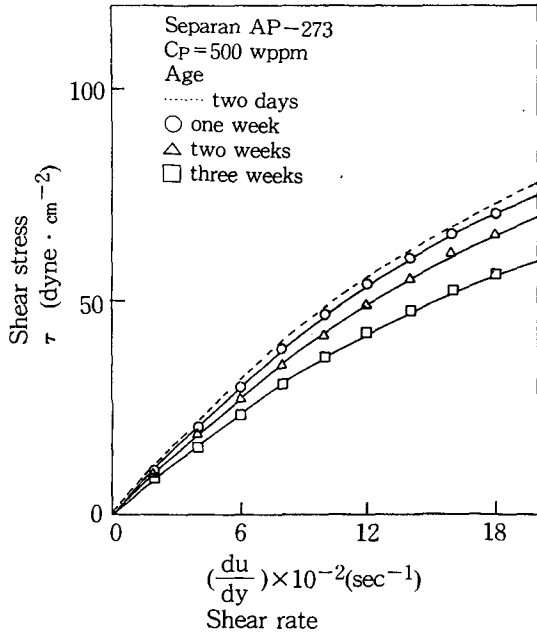


Fig. 22. Flow curves of PAM with solution age

급격히 떨어진다. 한편 좁은 polydispersity를 보이는 고분자물질일 경우에는 분자량의 변화에 따른 성분의 변화가 심하여 분포곡선상의 중앙부분이 차지하는 fraction이 크고, 따라서 저항감소에 참여하는 분자의 수도 상대적으로 많아 분자량이 큰 분자가 퇴화하더라도 작은 분자의 저항감소율은 쉽게 줄어들지 않는 것으로 이해된다. 두 물질의 퇴화형식으로 부터 PAM이 PEO보다 작은 polydispersity를 가지는 것으로 기대된다.

Fig. 22는 rotational viscometer로 용액의 퇴화현상을 측정된 것으로 시간이 지남에 따라 일정한 stress에서 변형속도가 감소함을 알 수 있다.

고분자수용액을 제조한 후 시간에 따른 용액의 변형을 알아보기 위해 IR(Nicolet, Model 5DX)로 분석한 결과를 Fig. 23~24에 도시하였다. PEO와 PAM 두 물질 모두 시간이 경과함에 따라 peak의 transmittance가 감소하며, hydrolysis가 일어남을 알 수 있다.

V. 결론

- 1) 최대 저항감소는 순수유체보다 PEO에서

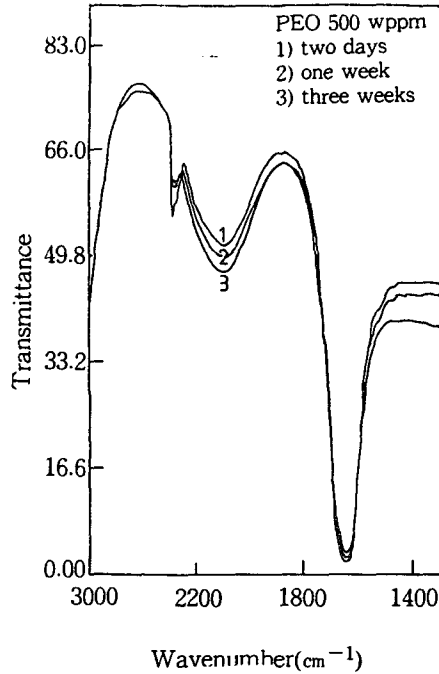


Fig. 23. Infrared spectra of the degree of hydrolysis of PEO

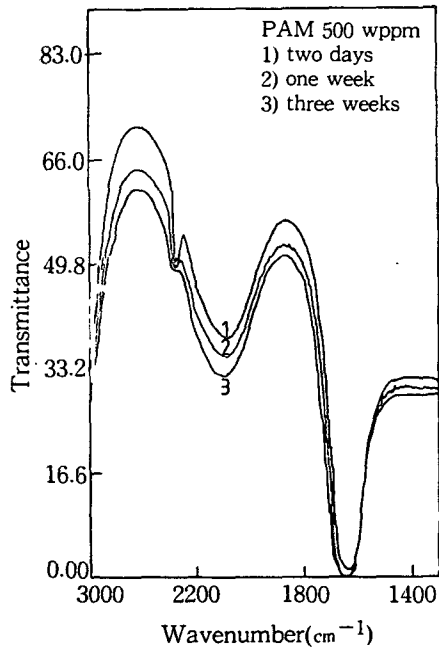


Fig. 24. Infrared spectra of the degree of hydrolysis of PAM

II. 난류흐름에서 국소저항 감소

47 % 감소되었고, PAM에서 35 % 감소되었다.

2) 고분자 수용액을 관벽에 유입했을때 관중양보다 저항감소효과가 빠르게 나타났다.

3) 고분자 용액은 주로 관벽부근에 작용하여 저항감소효과를 나타내는 것을 알 수 있다.

4) PAM이 PEO보다 ageing에 의한 퇴화현상에 강하게 저항하는데 이것은 분자구조상의 차이로 해석된다.

NOMENCLATURE

- $C_p$  : Master polymer solution (wppm)
  - $C_{av}$  : Bulk mean polymer concentration (wppm)
  - $d$  : Pipe diameter
  - $d/x$  : Distance downstream from injector
  - $DR$  : Drag reduction
  - $du/dy$ : uelocjty gradient( $sec^{-1}$ )
  - $f$  : Friction factor
  - $g_c$  : Gravitational conversion factor  
( $kg_m/kg_f$ )( $m \cdot sec^{-2}$ )
  - $l$  : Pipe length
  - $m$  : Rate of flow in mass per unit time (kg/sec)
  - $\Delta P$  : Pressure drop of water
  - $\Delta P_p$  : Pressure drop after polymer injection
  - $\Delta P_w$  : Pressure drop before polymer injection
  - $Q_p$  : Injection volumetric flow rate of mater solution
  - $Q_w$  : Volumetric flow rate of water in the pipe
  - $N_{Re}$  : Reynolds number
  - $u$  : Mean velocity (m/sec)
  - $x$  : Downstream distance ( $x=0$  at point of injection)
- Greek letters
- $\rho$  : Density
  - $\mu$  : Viscosity
  - $\tau$  : Shear stress ( $dyne/cm^{-2}$ )

REFERENCES

1. Dodge, D.W. and Metzner, A.B. : AIChE J., 5, 189 (1959).

2. Astarita, G., G. Greco. and L. Nicodemo AIChE J., 15, 564 (1969).

3. Virk, P.S., Milkey, H.S. and Smith, K.A. : Trans. ASME J. Appl. Mech., 37, 488 (1970).

4. Hoyt, J.W. : Trans. ASME J. Basic Eng., 94, 258 (1972).

5. Virk, P.S. : J. Fluid Mech., 45, 225 (1971).

6. Toms, B.A., : Proceedings of the international congress on rheology, Holland (1948), Vol.2, p.135, North Holland, Amsterdam, 1949.

7. Ram, A., Finkelstein, E. and Elata, C. : I & EC Process Design and Development., 6, 309 (1967).

8. Leacarbours, J.A., Cluter, J.D. and wahl, H.A. : Soc. Petrol. Eng. J., 9, 229 (1971).

9. Paterson, R.W. and Abernatuy, F.H. : J. Fluid Mech., 43, 969 (1970).

10. Fisher, D.H. and Rodriguez, F. : J. Appl. Polym. Sci., 15, 2975 (1971).

11. Wells, C.S. and Spangler, J.G. : Phys. Fluids., 10, 1890 (1967).

12. Latto, B., and Shen, C.H. : Can. J Chem. Eng., 48, 34 (1970).

13. Rabie, L.H. : Ph.D. Thesis, Edinburgh University (1978).

14. McComb, W.D. and Rabie, L.H. : AIChE J., 28, 547 (1982).

15. Zimm, B.H. : J. Chem. Phys., 24, 269 (1956).

16. Peterlin, A. : Nature., 227, 598 (1970).

17. Stevenson, J.F. and Bird, R.B. : Trans, Soc. Rheol., 15, 135 (1971).

18. Kohn, M.C. : J. Polym. Sci., 11, 2339 (1973).

19. Porter, R.S. and Johnson, J.F. : J. Phys. Chem., 63, 202 (1959).

20. Brodkey, R.S. : The Phenomena of Fluid Motions, Addison-Wesley Publishing Company, 1967.

21. Offen, G.R. and Kline, S.J. : J. Fluid Mech., 70, 209 (1970).

22. Hinch, E.J. and Elata, C. : J. Non-Newtonian Fluid Mech., 5, 411 (1979).