

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 18, No. 4, 1998

## 고분자로 인한 마찰저항 감소의 OTEC시스템 응용

김철암\*, 성준희\*, 최형진\*, 천원기\*\*, 김 신\*\*, 김종보\*\*\*, 김형택\*\*\*\*

- \* 인하대학교 고분자공학과
- \*\* 정회원, 제주대학교 에너지공학과
- \*\*\* 종신회원, 인하대학교 기계공학과
- \*\*\*\* 정회원, 아주대학교 에너지학과

## Application of Polymer Induced Drag Reduction to OTEC System

C. A. Kim<sup>\*</sup>, J. H. Sung<sup>\*</sup>, H. J. Choi<sup>\*</sup>, W. Chun<sup>\*\*</sup>, S. Kim<sup>\*\*</sup>, C. B. Kim<sup>\*\*\*</sup>,  
H. T. Kim<sup>\*\*\*\*</sup>

- \* *Dept. of Polymer Science & Engineering, Inha University*
- \*\* *Dept. of Nuclear and Energy Engineering, Cheju National University*
- \*\*\* *Dept. of Mechanical Engineering, In-ha University*
- \*\*\*\* *Dept. of Energy, Ajou University*

### ABSTRACT

Polymer induced turbulent drag reduction in a rotating disk apparatus was investigated using four different molecular weights of poly(ethylene oxide) (PEO) in a synthetic seawater solution for the purpose of potential application to the cold water piping in the Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) system. To apply drag reduction to the OTEC we measured the temperature dependence on the drag reduction efficiency. From this study, it was found that the drag reduction efficiency increases

with the temperature and the concentration. To measure the drag reduction efficiency during the operation period, the drag reduction behavior was detected as a function of time and the results obtained from the experiment was compared to the Brostow's model equation.

### 기 호 설 명

%DR : 백분율 마찰저항 감소

$M$  : 마찰 저항감소에 참여하는 고분자의 수평균 분자량 [g/mol]

### 1. 서 론

대부분의 유체 유동에서, 마찰에 의한 에너지 손실의 많은 부분은 난류상태에서 발생된다. 하지만 마찰에 의한 에너지 손실은 유동장에 아주 미량의 첨가제를 주입함에 따라 급격하게 감소된다는 것이 알려져 있으며, 이를 마찰저항 감소(drag reduction, DR) 현상이라 한다. 즉, 유연하면서 분자량이 큰 고분자의 소량을 난류 유동에 도입함으로써 마찰(drag)이 쉽게 감소된다고 알려져 있다. 분자량이 큰 고분자를 약 10ppm 이내를 관 유동의 난류 유동상태에 첨가하면 마찰이 최소 50%이상 감소시킬 수 있다.<sup>[1]</sup> 이와 같이 마찰저항 감소를 일으킬 수 있는 첨가제들은 위에서 소개한 고분자 물질 이외에도 계면활성제,<sup>[2]</sup> 불용성 섬유상 물질,<sup>[3]</sup> 등 여러 가지 형태를 가진다고 알려져 있다. 많은 연구들이 이 영역에서 수행되어 왔지만, 마찰저항 감소의 물리적인 반응 기구를 명확하게 설명하지 못하고 있는 실정이다. 그러나, 이러한 마찰저항 감소 현상이 고분자 용액의 점탄성(viscoelasticity)에 연관이 있다고 일반적으로 받아 들여지고 있다.<sup>[4,5]</sup> 난류 유동에서의 마찰저항 감소는 원유와 같은 액체의 장거리 운송, 홍수와 배수의 효율 증대, 소방, 현탁액과 슬러리(slurry)의 운송, 관개 용수, 지역 냉난방

순환계, 바다 및 생의학계등 많은 산업 공정과 운영<sup>[6]</sup>에 큰 잠재적 이점을 가지고 있어서 많은 연구들이 발표되어 왔다. 다양한 마찰저항 감소 고분자 물질들 중에서, 고분자량의 수용성인 폴리에틸렌 옥사이드 (poly(ethylene oxide), PEO)가 물을 용매로 사용한 수계에서 마찰저항 감소제로서 가장 널리 사용되어 왔다.<sup>[7]</sup>

난류 마찰저항 감소에 고분자를 적용시키는데 있어서 가장 크게 고려하여야 하고, 적용을 제한하는 한계는 고분자 사슬의 퇴화이다. 따라서 난류에서의 고분자 사슬의 퇴화에 관한 많은 연구 결과들이 보고되어 왔다.<sup>[7-9]</sup> 고분자의 퇴화는 고분자 분자와 용매간의 상호 작용에 의하여 영향을 달리하게 된다.

한편 지구면적의 2/3을 차지하는 바다는 다양한 에너지 자원의 보고로서, 그 중 태양에너지를 모을 수 있는 큰 저장소이다. 이러한 해양 에너지를 이용할 수 있는 방법중의 하나가 해양 온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)기술 이다. 해양 온도차 발전 기술은 기후 조건과 기상 조건에 관계없이 24시간 가동이 가능하다. 이러한 장점을 가지고 있는 OTEC 기술의 핵심은 온도가 낮은 심해수를 펌프로 펴 올려서 표면수와의 온도차를 이용하여 증기압이 높은 물질의 기화에너지를 전기에너지로 전환하는 것으로, 이러한 에너지의 전환시 열매에 대한 열 교환기의 효율 증대가 요구된다.<sup>[10]</sup> 이와 같이 열 교환기의 효율을 증대하는 방법 중의 하나로 잠재력을 가지고 있는 것은 교환기내의 관 유동 흐름에 대한 마찰을 감소시킴으로써 펌프력 감소를 저하시키는 것이다.

따라서 본 연구에서는 순수한 증류수에서 많이

연구되어진 PEO를 바닷물과 같은 염도를 가진 수용액에 녹여서 이 고분자가 나타내는 마찰저항 감소와 분자적 인자에 대한 영향을 조사하여 해양 온도차 발전에 적용할 수 있는지를 조사하고자 하였다. 이러한 목표를 달성하고자 온도에 따른 마찰저항 감소, 고분자의 농도에 대한 마찰저항 감소의 거동 변화를 조사하였다. 그리고 실험 기간 동안 고분자가 기계적 퇴화 거동을 살펴보았다.

## 2. 실험

본 실험을 수행하는데 있어서 실제 해수를 사용하는 대신에 본 실험실에서 해수의 평균 염도를 기초로 하여 표준 인공 해수를 제조하여 사용하였다. 염도는 장소에 따라서 다소 차이가 있지만, 상대적인 조성비는 비교적 일정하기 때문에 본 연구진은 해수 1kg에 염을 35g 녹여서 표준화하였다. 그 조성을 살펴보면 NaCl 27.01g, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 10.44g, KCl 0.90g을 증류수 1000g에 용해시켰다. 마찰저항 감소제로는 선형의 고분자 물질인 고분자량의 폴리에틸렌 옥사이드를 사용하였다. 이 고분자는 순수한 물에 대하여 양호한 용해도를 보인다. 고분자는 Scientific Polymer Products Inc.에서 구입하였는데, 평균 분자량은  $4 \times 10^5$  에서부터  $5 \times 10^6$  g/mol의 범위를 가진다. 고분자 용액은 적당량 취하여 0.5 wt% 진한 용액을 만들어 이 진한 용액을 원하는 농도만큼 취하여 유동장에 직접 주입함으로써 실험 농도를 맞추어 마찰저항 감소 효율을 측정하였다.

본 실험에서 사용된 장치는 회전 원판 장치로 대략도는 Fig. 1에 표시하였다. 지름 14.5cm × 두께 0.32cm인 스테인레스 스틸 원판을 내경 16.3cm × 높이 5.5cm의 크기를 가지고 외부 순환형 온도조절이 가능한 원통형 용기에 설치한다. 이 용기를 채우는데 필요한 용액의 양은 1020cm<sup>3</sup> 이다.

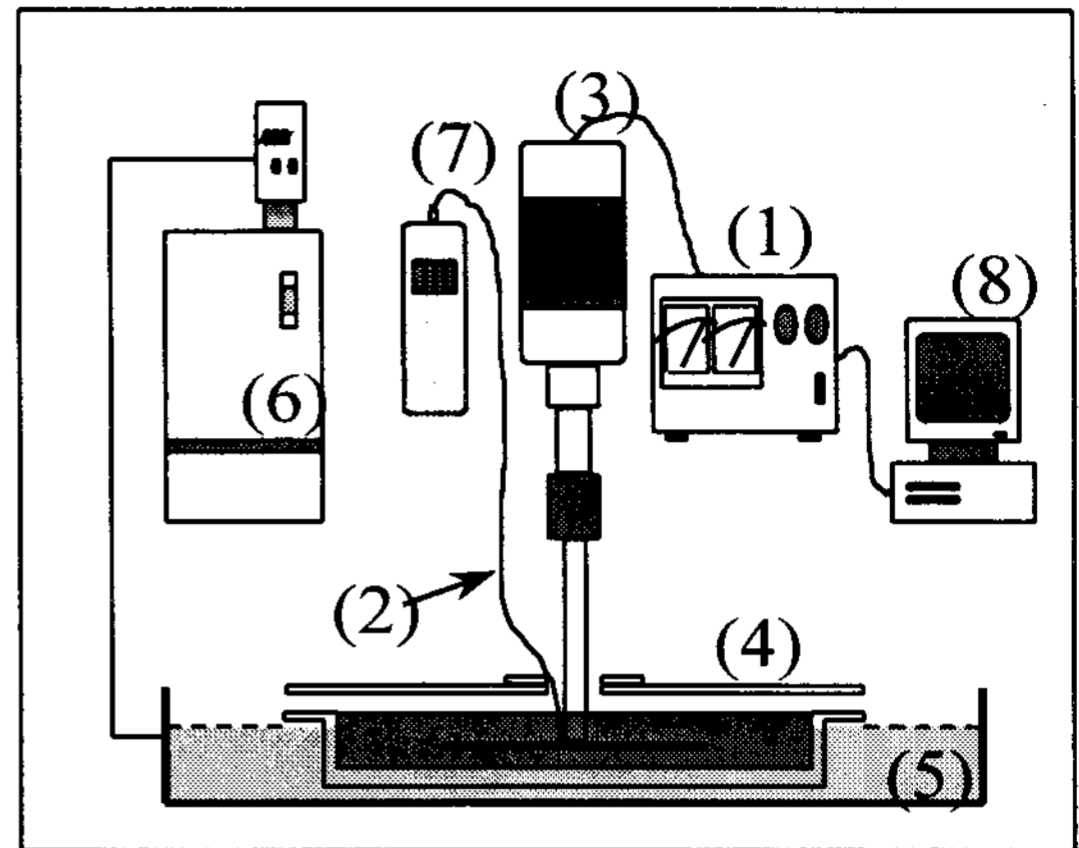


Fig. 1. Schematic diagram of rotating disk apparatus.

- (1) speed controller (2) thermocouple  
(3) motor (4) solution container  
(5) water bath (6) water circulating system  
(7) thermometer (8) A/D converter & PC.

원판은 DC 서보모터(Cole Parmer Master Servodyne Unit)를 이용하여 일정한 회전속도로 회전시키면서 이 때 원판에 부하되는 토크는 A/D 변환기를 통하여 PC에 저장된다. 계의 온도는 물을 순환시킴으로써 조절하고, 회전속도는 디지털 타코메타를 가지고 측정하였다.

마찰저항 감소 효율은 해수 용매에서 원판이 주어진 일정 회전 속도를 유지하는데 요구되는 토크를 우선 측정한다. 그 후 원판이 위의 회전속도를 유지하면서 고분자를 첨가되었을 때, 부하되는 토크 값의 변화를 측정한다. 그렇게 측정된 토크를 이용하여 다음과 같은 백분율 마찰저항 감소를 정의할 수 있다.

$$\%DR = \frac{T_0 - T_P}{T_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서  $T_0$ 는 순수한 용매에서 부하되는 토크 값이고  $T_P$ 는 고분자를 첨가하였을 때 용액에 부하되는 토크 값이다. 또한 회전 원판의 레이놀

스 수는 다음과 정의된다.

$$N_{Re} = \frac{\rho r^2 \omega}{\mu} \quad (2)$$

여기서  $\omega$ 는 원판의 회전 속도,  $r$ 은 원판의 반지름,  $\rho$ 는 유체의 밀도이고,  $\mu$ 는 유체의 점도이다. 본 회전 원판 장치를 사용하는 경우 난류는 레이놀즈 수가  $3.0 \times 10^5$  이상이 되어야 하는데, 이에 상응하는 원판의 회전 속도가 550 rpm이다. 고분자에 의한 마찰저항 감소는 난류 영역에서 발현되는 특성이므로 본 실험에서는 모든 측정을 550 rpm 이상에서 실시하였다.

용액에서의 고분자 사슬의 거동을 측정하는데는 Ubbelohde 점도계를 사용하여, 용매가 증류수와 해수일 때 각각의 사슬의 형태와 전단하에서의 고분자 사슬의 퇴화의 정도를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본성 점도(intrinsic viscosity,  $[\eta]$ ) (dl/g)는 고분자의 점도 평균 분자량을 결정하기 위하여 일반적으로 사용되는 값으로 고분자의 가장 중요한 용액 물성중의 하나이다. 일반적으로 본성 점도는 용액의 농도,  $C$  (g/dl)와 비점도 (specific viscosity),  $\eta_{sp}/C$  또는  $\ln \eta_{rel}/C$ 의 그림에서 농도를 영으로 외삽하여 y-절편의 값으로 결정한다. 이 관계는 다음과 같이 표현된다:

$$\eta_{sp}/C = [\eta] + k[\eta]^2 C \quad (3)$$

여기서  $k$ 는 Huggins 상수이고, 비점도의 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_{sp} = (\eta_p - \eta_s) / \eta_s \quad (4)$$

여기서  $\eta_s$ 는 고분자가 없는 용매만의 점도값이고,  $\eta_p$ 는 고분자 용액의 점도이다. 고분자 용액의 본성점도는 용액과 고분자간의 상호 작용(interaction)의 척도이다. 동일한 고분자가 서로 다른 용매에서 다른 본성 점도를 나타낼 경우 본성 점도가 큰 값을 나타내는 계의 용액상태에 있는 고분자가 더 양호한 용매와의 상호 작용을 한다. 고분자에 의한 마찰저항 감소가 고분자의 용액의 물리적 성질과 밀접한 관계를 가지고 있으므로 고분자 용액의 본성 점도를 측정함으로써 마찰저항 감소가 용매에 따라 어떻게 거동을 나타낼 것인지를 예측할 수 있다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 PEO 시료의 증류수와 바닷물에서의 본성 점도의 값들로 분자량이 증가할 수록 본성점도의 값이 증가함을 보여준다. 이것은 본성 점도가 점도 평균 분자량을 측정하는 값이기 때문이다. 동일한 분자량에서의 본성 점도는 증류수에서의 값보다 바닷물에서의 값이 더 큰 것을 보여주는 데, 이것은 물과 PEO 분자들간의 수소 결합이 전해질들에 의해서 변화가 일어나기 때문이라고 사료된다. PEO와 전해질간의 상호인력에 대한 고찰은 고분자와 알칼리

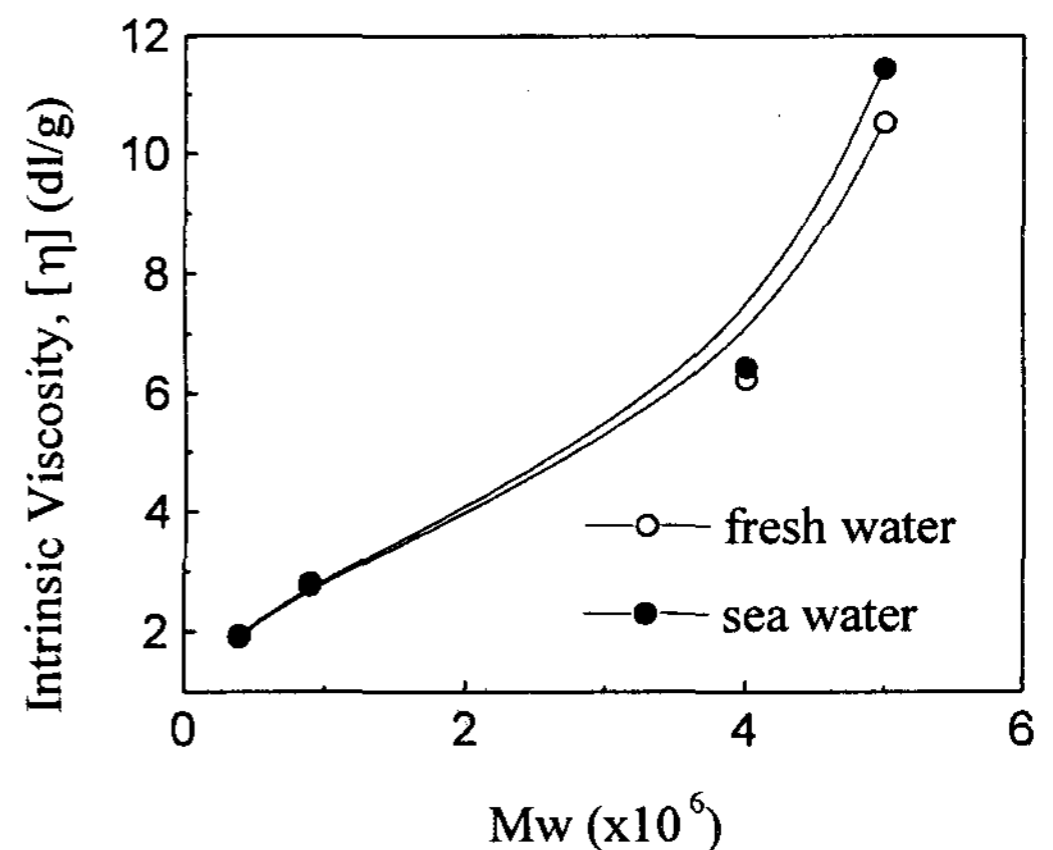


Fig. 2. Intrinsic viscosity of various molecular of PEO in two different solvents at 25 °C.

금속 염들간에 강력한 결합에 의해 높은 용융점을 가지는 결정성 착물(complex)을 만들 수 있다는 사실로부터 확인할 수가 있다.<sup>[11]</sup>

동일한 분자량에서 농도가 증가할 수록 마찰저항 감소의 값이 증가하는데 일반적인 고분자 용액에서 농도에 대한 효과는 최적 농도를 가지고 있다. 그런데 이 최적 농도는 고분자의 분자량이 증가할 수록 더 낮은 농도에서 나타나는데, 바닷물에서의 PEO의 경우에는 그림에서 보는 바와 같이 농도 50 ppm에서 공통적으로 나타나는 것을 볼 수가 있다. 이는 본성 점도에서 설명한 대로 해리 되어 있는 전해질들과 고분자 분자들간의 상호작용에 의해서 고분자의 형태 크기(conformation)가 변화하기 때문인 것으로 사료된다.

한편 마찰저항 감소 실험을 실시하였을 때 회전 원판 장치를 이용하면 시간의 함수로서 마찰저항 감소의 효율을 측정할수 있다는 장점이 있다.<sup>[12]</sup> Fig. 4는 여러 온도에서 마찰저항 감소를 시간에 대하여 측정한 결과를 보여준다. 마찰저항 감소가 시간에 따라 감소하는 것은 고분자 분자의 기계적인 퇴화에 의해서 분자의 길이가

줄어들기 때문이다. 그림에서 초기의 마찰저항 감소의 값이 온도가 증가할 수록 높은 것을 보여준다. 하지만 시간이 지남에 따라 효율의 감소속도가 훨씬 빠른 것을 복 수 있는데 이것은 고분자의 형태 크기가 온도가 증가할 수록 커지며, 형태 크기가 커질 수록 마찰저항이 증가하고, 분자가 절단될 확률도 증가한다는 사실에 기인한 것이다. Fig. 5에서는 분자량이 5백만인 PEO의 농도에 따른 마찰저항 감소를 시간에 대하여 측정한 결과이다. Fig. 3에서 확인한 바와 같이 온도를 달리 하여 마찰저항 감소를 측정하여도 공통적으로 50 ppm에서 최대의 마찰저항 감소를 나타내는 것을 보여주고 있다. Fig. 6에서는 난류의 세기에 대한 마찰저항 감소의 효율을 고분자의 농도에 대하여 측정한 결과이다. 난류의 세기가 증가할수록 50ppm에서 최적 마찰저항 감소 거동이 뚜렷하게 나타난다. 난류 유동에서의 첨가제의 전단에 대한 안정성이 마찰저항 감소제를 선정하는데 고려되어야 할 사항이다. 유동에서의 첨가제의 기계적 퇴화(mechanical degradation)는 용매의 특성에 의존한다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 마찰저항 감소가 시간에 따라 감소하는

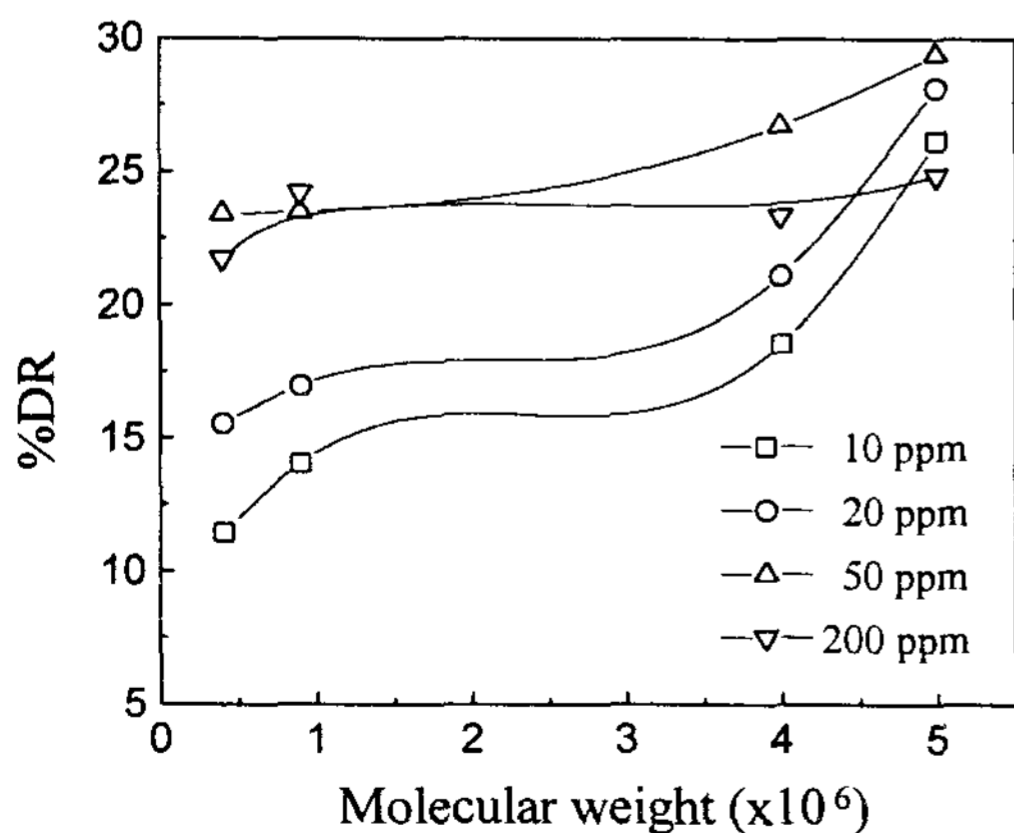


Fig. 3. Percent drag reduction as a function of PEO molecular weight with various concentrations at  $N_{Re}=9.9 \times 10^5$  and  $25^\circ\text{C}$

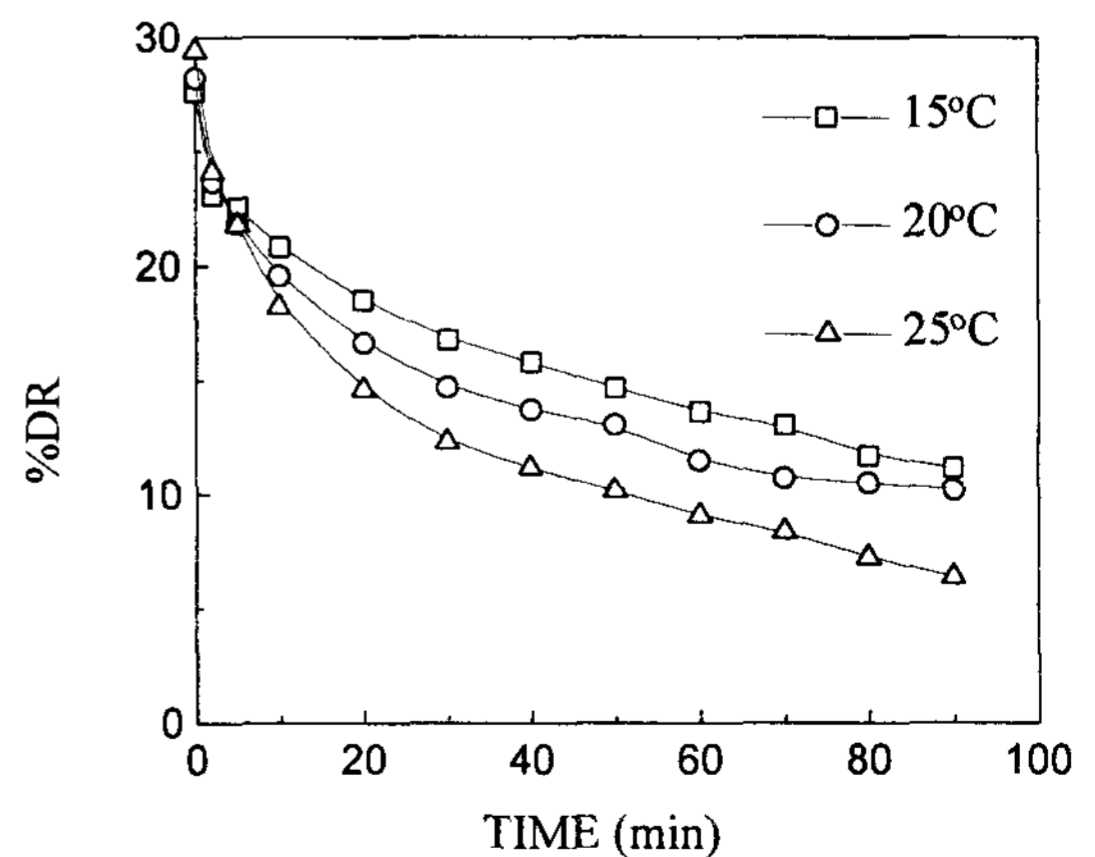


Fig. 4. The profile of percent drag reduction of PEO ( $M_w=5 \times 10^6$ , 50ppm) for different temperatures.

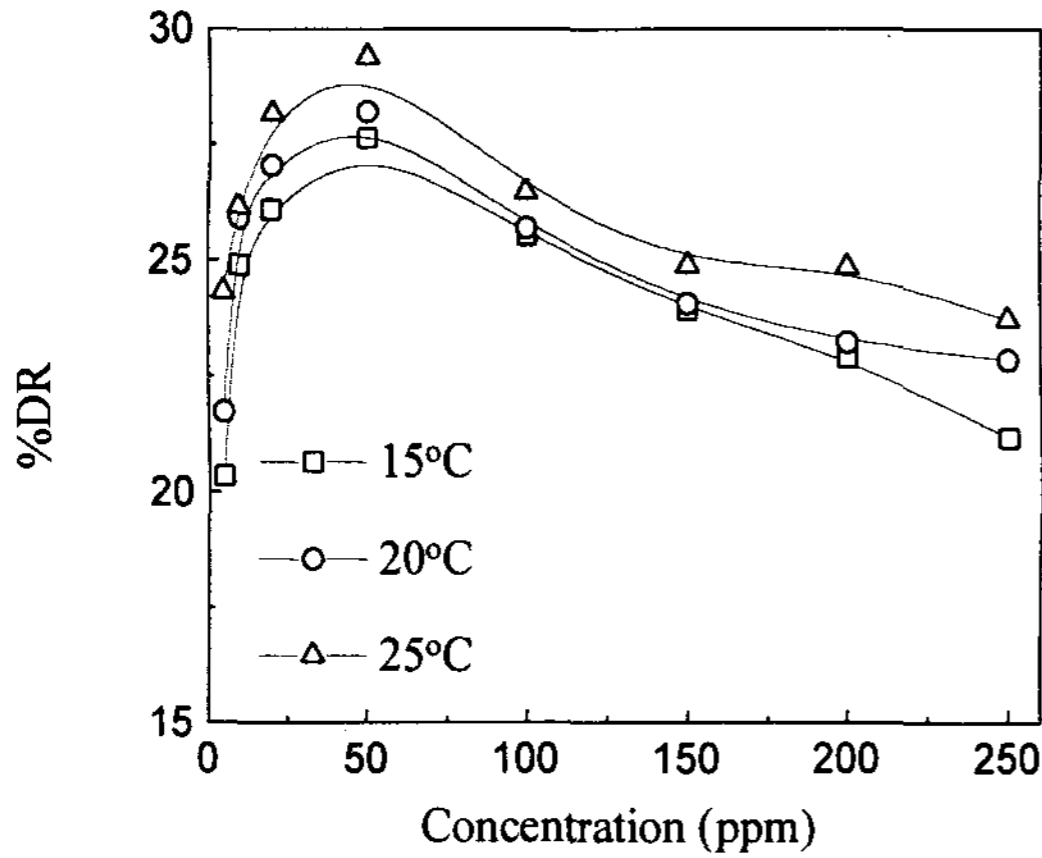


Fig. 5. Percent drag reduction versus PEO ( $M_w=5 \times 10^6$ ) concentration for different temperatures.

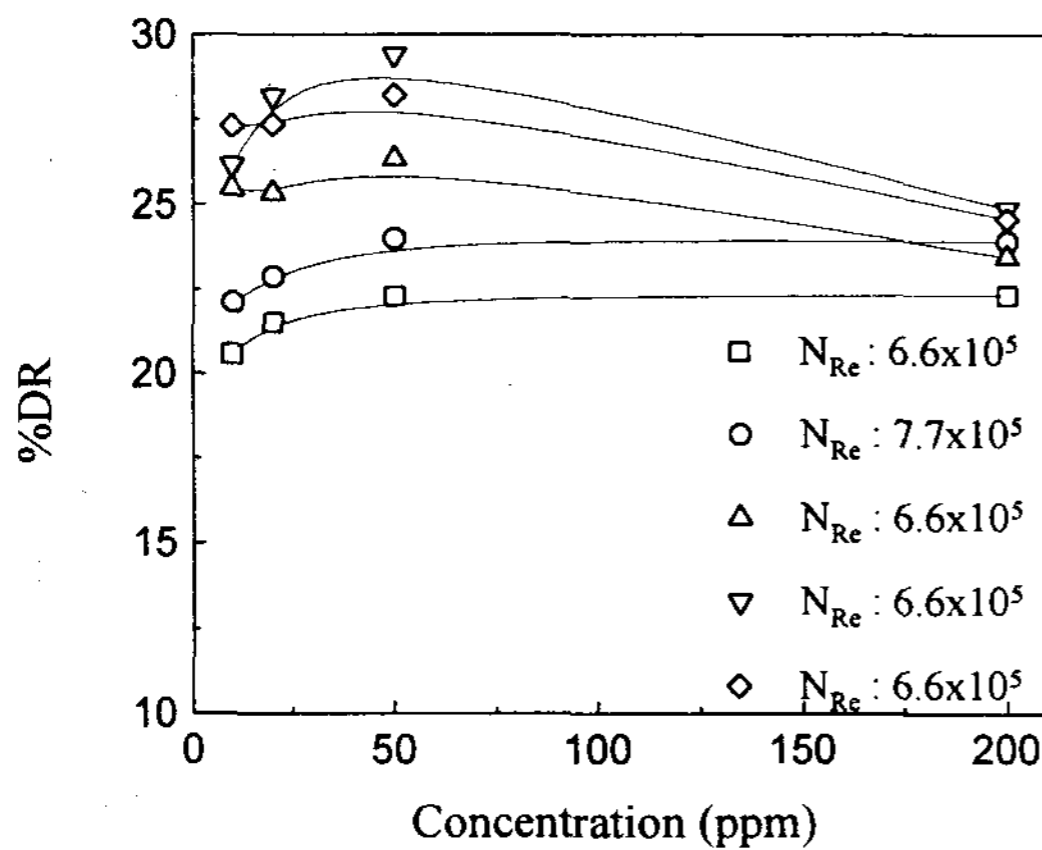


Fig. 6. Percent drag reduction of PEO ( $M_w=5 \times 10^6$ ) as a function of polymer concentration for different Reynolds numbers at 25°C.

것은 첨가된 고분자의 기계적 퇴화에 기인한다.<sup>[13,14]</sup> 마찰저항 감소의 온도의존성에 대한 분석은 Brostow에 의해서 이루어졌다.<sup>[15,16]</sup> 마찰저항 감소는 용매가 무엇이든지 간에 고분자의 상대적 분자량에 직접적으로 비례한다고 보고되었다.<sup>[17,18]</sup> 이러한 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{DR}{DR_0} = \frac{M}{M_0} \quad (5)$$

그리고 첨자 0은 유동이 시작되는 초기의 값을 나타낸다. 실험시간 ( $t$ ) 동안 기계적인 퇴화에 통한 마찰저항 감소의 손실은 다음과 같이 지수함수적으로 표현할 수 있다:

$$DR/DR_0 = e^{-Rt} \quad (6)$$

여기서  $R$ 은 부가적인 인자로 상수가 아니다. 그리고 시간이 지나도 더 이상 분자량이 줄어들지 않는 임계분자량 ( $M_\infty$ )을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$M_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} M \quad (7)$$

Brostow<sup>[15,16]</sup>는 유동장에서 고분자 사슬의 방향이 변화하는 점에서 고분자 사슬의 절단이 쉽게 일어난다고 지적하였다. 따라서 특정 위치에 의존하여, 고분자 사슬이 마찰저항 감소가 진행됨에 따라 외력을 더 받거나 덜 받거나 하는데, 한 고분자 사슬에 있는 이러한 위치의 평균을  $W$ 이라고 설정하면 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$M_\infty = \frac{M_0}{1+W} \quad (8)$$

여기서  $W$ 는 마찰저항 감소제의 농도  $C$ , 기계적 퇴화를 일으키는 난류 유동에 기원을 둔 에너지  $U_d$ 와 하나의 결합을 깨기 위하여 필요한 에너지  $\epsilon$ 와 관련이 있다.<sup>[15]</sup> 따라서 분자량의 관계를 살펴보면,

$$\frac{M}{M_0} = \frac{1}{1 + \frac{M_0 U_d}{CN_A \epsilon}} \quad (9)$$

과 같이 나타낸다. 유동이 지속되는 동안 마찰저항 감소제에 공급되는 에너지의 일부분은 사슬을 절단하는데 사용하지 않고 마찰저항 감소제 사슬의 완화(relaxation)에 사용되기 때문에 최종적인 에너지항은 다음 식과 같다.

$$U_d = U_\infty (1 - e^{-ht}) \quad (10)$$

여기서  $h$ 는 마찰저항 감소제의 전체(사슬의 퇴화와 완화에 영향을 모두 미치는) 농도에 의존하는 인자이다. 식 (8), (9)와 (10)를 종합하면 최종적으로 다음 식과 같은 마찰저항 감소의 기계적 퇴화에 관한 모델식을 구성할 수 있다.

$$\frac{DR}{DR_0} = \frac{1}{1 + W(1 - e^{-ht})} \quad (11)$$

식 (11)을 본 마찰저항 감소 실험에 적용시킨 결과를 Fig. 7과 8에 나타내었다. 시간에 대한 마찰저항 감소값을 초기 마찰저항 감소값으로 나누어 상대 마찰저항 감소값 ( $DR/DR_0$ )을 구하고 이를 시간에 대하여 도식화하였다. 두 그림에서 보는 것처럼 실험 결과와 모델식이 잘 맞고 있는 것을 볼 수가 있다.

위에서 설명한 것과 같이  $W$ 가 마찰저항 감소제의 농도와 상관 관계는 두 그림으로부터 확인할 수 있다. 두 그림에서 고분자의 농도가 증가함에 따라서  $W$ 의 값이 감소하고 있음을 볼 수가 있다. 여기서 구한  $W$ 값을 Table 1에 정리하였다.  $W$ 의 정의에서부터 보면  $W$ 는 농도  $C$ 에 반비례하므로 농도가 증가함에 따라서  $W$ 의 값이 감소하는 하리라고 예상되는데, 이 예상이 실

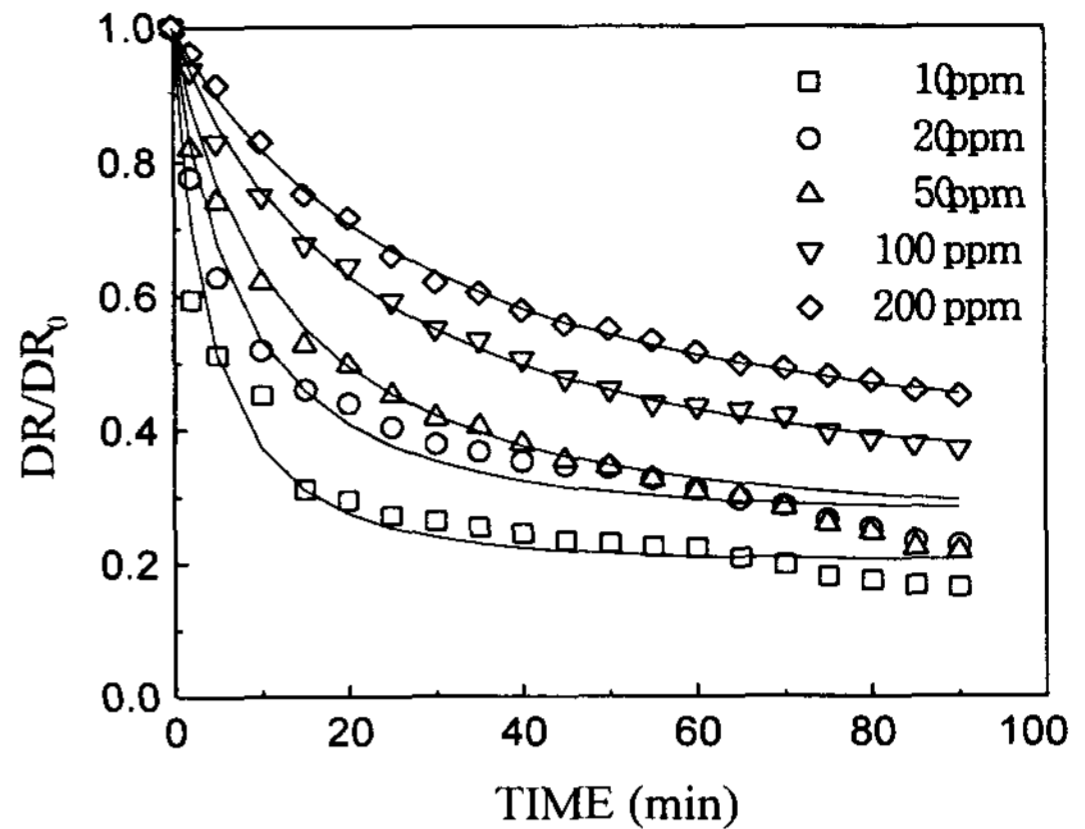


Fig. 7. Time dependence of relative drag reduction efficiency,  $DR/DR_0$  of PEO ( $M_w=5 \times 10^6$ ). The symbols represent the experimental values; lines are obtained from Brostow's equation.

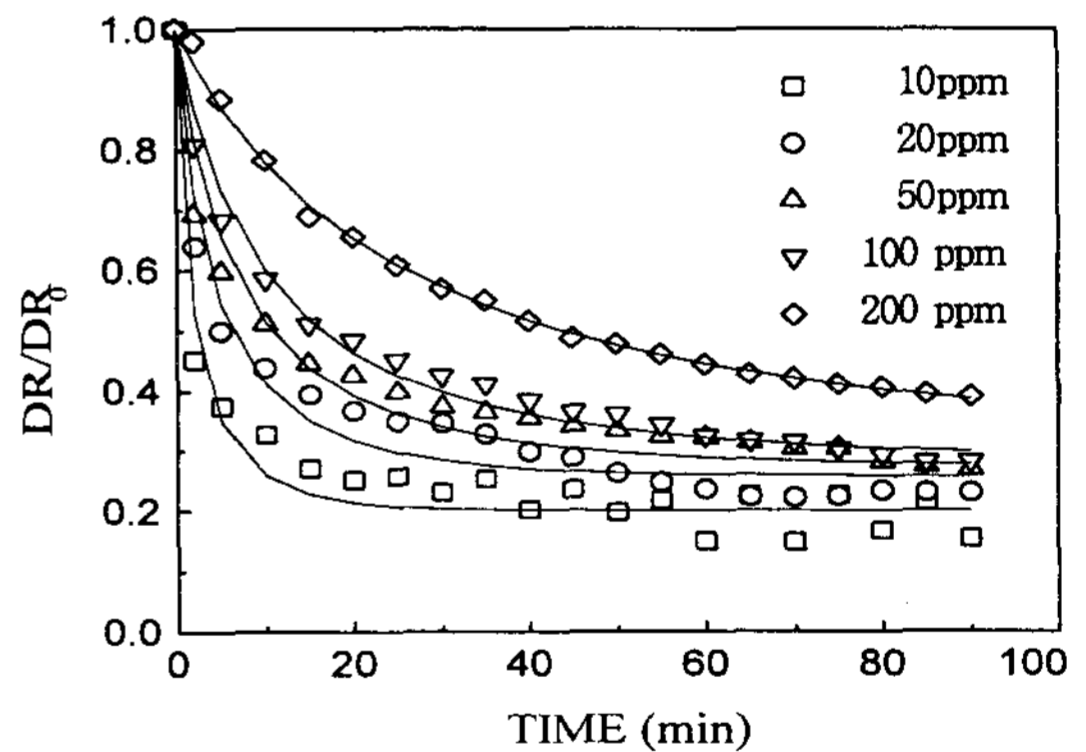


Fig. 8. Time dependence of relative drag reduction efficiency,  $DR/DR_0$  of PEO ( $M_w=4 \times 10^6$ ). The symbols represent the experimental values; lines are obtained from Brostow's equation.

험값과 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 Brostow의 모델식은 고분자에 의한 마찰저항 감소의 시간에 대한 영향을 잘 표현한다고 할 수 있다.

Fig. 9는 분자량이  $5 \times 10^6$  인 PEO 50ppm의 분

Table 1. Various values of PEO drag reducers in seawater

Mw	Conc. (ppm)				
		10	50	100	200
4×10 <sup>6</sup>	DR <sub>0</sub>	18.57	26.74	26	23.35
	W	4.0	2.66	2.50	2.28
	h	0.1259	0.0438	0.0310	0.0132
5×10 <sup>6</sup>	DR <sub>0</sub>	26.15	29.39	26.45	24.84
	W	3.87	2.70	2.13	1.68
	h	0.0568	0.0236	0.0162	0.0141

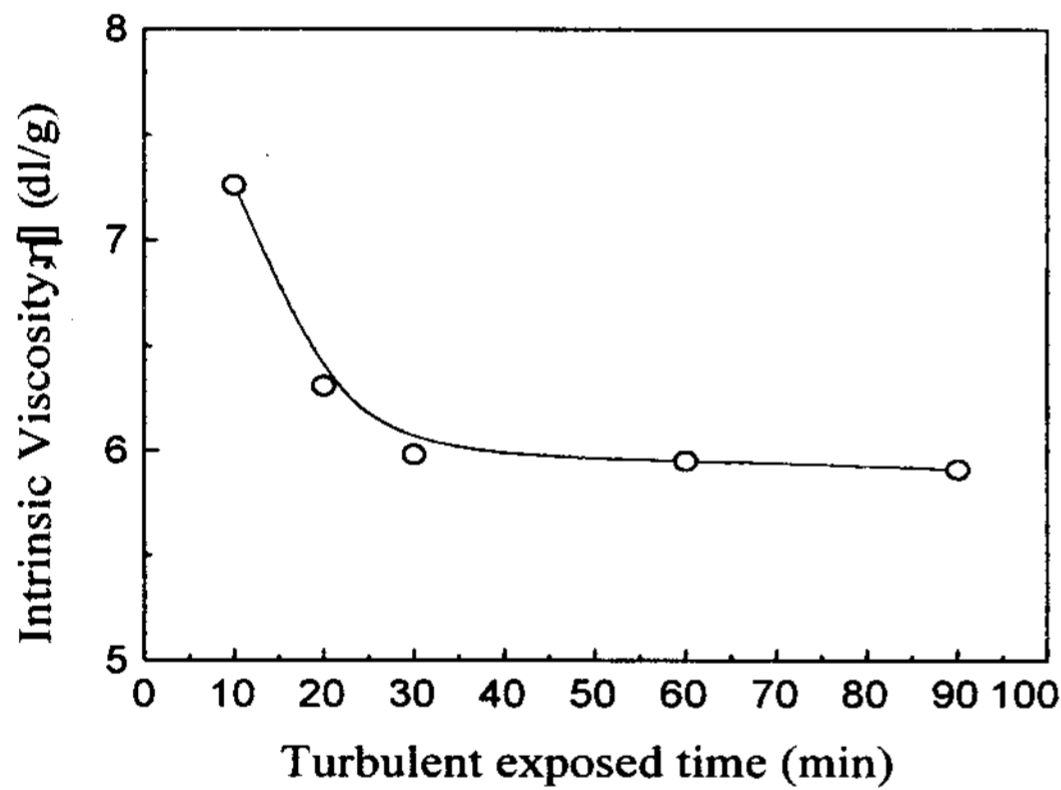


Fig. 9. Intrinsic viscosity of PEO ( $M_w=5 \times 10^6$ ) as a function of duration time of turbulence exposed at  $N_{Re}=9.9 \times 10^5$ .

성 점도를 난류에 노출된 시간에 따라 측정함으로써 본성 점도가 감소하다가 일정한 값의 평면을 가지는 것을 보여준다. 이는 고분자 사슬의 절단에 의해서 고분자의 분자량이 감소하여 고분자의 관성 반경이 감소하기 때문에 나타나는 거동으로 전단에 노출되는 시간이 증가할수록 분자량이 감소한다. 하지만 전단에 의한 고분자 사슬의 퇴화는 사슬의 중간 점에서 절단이 일어난다고 보고되었다. 중간에서의 절단이 계속 진행되면서 더 이상 절단이 일어나지 않는 임계점

분자량에 도달하게 된다. 그러므로 Fig. 9에서 보는 대로 고분자 투입 30분 이후에는 본성 점도의 감소가 일어나지 않는데 이는 분자량이 더 이상 감소하지 않는 임계분자량에 도달하였기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 일반적으로 마찰저항 감소제로 가장 많이 사용되는 선형 고분자인 PEO를 이용하여 해양 온도차 발전을 위한 마찰저항 감소 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본성 점도를 측정하여 고분자가 용매에 따라서 어떠한 형태를 가지는지 조사하였다. 그 결과 동일한 분자량을 가지는 고분자라도 증류수에서 보다 해수에서 더 큰 관성 반경을 가지는 것을 확인하였다. 이러한 확인으로부터 우리는 PEO가 증류수에서 보다 해수에서 더 좋은 마찰저항 감소 효율을 나타낼 것이라고 예측하였다.
- (2) 농도에 대한 마찰저항 감소 실험을 실시한 결과, 50 ppm에서 최대 마찰저항 감소 값을 나타내는 것으로 확인하였다.
- (3) 온도차 발전을 위해서는 온도에 대한 마찰저항 감소의 영향을 살펴보았다. 그 결과 온도가 증가할수록 마찰저항 감소의 감소 속도가 증가하는 것을 관찰하였다.
- (4) 전단에 대하여 마찰저항 감소 효율을 유지하여야 마찰저항 감소제의 안정성을 살펴보기 위하여 마찰저항 감소의 시간에 대한 거동의 변화를 측정하고 Brostow의 모델식과 비교하여 실험값에 잘 맞는 것을 확인하였다. 비교 결과 사슬의 절단이 쉽게 영향을 받을 수 있는 상태를 표시하는 인자 W가 농도에 대하여 반비례의 관계를 가지고 이것은 W의 정의에 잘 부합되는 것을 알았다.



## 후 기

본 연구는 과학기술부의 연구비 지원으로 수행되었다.

## 참 고 문 헌

- Gyr, A. and Bewerdorff, H.-W., 1995, Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- 김철암, 최형진, 윤형기, 박성룡, 김종엽, 1998, Drag reduction characteristics of surfactant by a rotating disk apparatus, J. Korean Ind. & Eng. Chemistry, 제9권, pp.149.
- Kale, D. D. and Metzner, A. B., 1976, Turbulent drag reduction in dilute fiber suspensions: mechanistic considerations, AIChE J., Vol. 22 pp.669.
- Armstrong, R. and Jhon, M. S., 1983, Turbulence induced change in the conformation of polymer molecules, J. Chem. Phys., Vol. 79, pp.3143.
- Vlassopoulos, D. and Schowalter, W. R., 1994, Steady viscometric properties and characterization of dilute drag-reducing polymer solutions, J. Rheol., Vol. 38, pp.1427.
- Sellin, R. H., Hoyt, J. W., and Scrivener, O., 1982, The effect of drag-reducing additives on liquid flows and their industrial applications part I: Basic aspects, J. Hydr. Res., Vol. 20, pp.29.
- Fisher, H. and Rodriguez, F., 1971, Degradation of drag-reducing polymers, J. Appl. Polym. Sci., Vol. 15, pp.2975.
- Culter, J. D., Zakin, J. L., and Patterson, G. K., 1975, Mechanical degradation of dilute solutions of high polymers in capillary tube flow, J. Appl. Polym. Sci., Vol. 19, pp.3235.
- Moussa, T., Tiu, C., and Sridhar, T., 1993, Effect of solvent on polymer degradation in turbulent flow, J. Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 49, pp.261.
- Avery, W. H. and Wu, C., 1993, Renewable energy from the ocean, Oxford University Press, New York, pp.3.
- Ataman, M. and Boucher, E. A., 1982, Properties of aqueous salt solutions of poly(ethylene oxide), J. Polym. Sci., Vol. 20, pp.1585.
- Yang, K. S., Choi, H. J., Kim, C. B., Kim, I. S., and Jhon, M. S., 1994, Characterization of turbulent drag reduction in rotating disk system, Korean J. Chem. Eng., Vol. 11, pp.8.
- Virk, P. S., 1975, Drag reduction fundamentals, AIChE J., Vol. 21, pp.625.
- Berman, N. S., 1978, Drag reduction by polymers, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 10, pp.47.
- Brostow, W., 1993, Drag reduction and mechanical degradation in polymer solutions in flow, Polymer, Vol. 24, pp.631.
- Brostow, W., Eritepiner, H., and Singh, R. P., Flow of dilute polymer solutions: Chain conformations and degradation of drag reducers, Macromolecules, Vol. 23, pp.5109.
- Zakin, J. L. and Hunston, D. L., 1978, Effects of solvent nature on the mechanical degradation of high polymer solutions, J. Appl. Polym. Sci., Vol. 22,

pp.1768.  
18. Hunston, L. and Zakin, J. L., 1980,  
Flow-assisted degradation in dilute

polystyrene, Polym. Eng. Sci., Vol. 20,  
pp.517.