

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 19, No. 1, 1999

## 난류유동에서 PEO가 마찰저항 감소효과에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

천원기\*, 김 신\*, 이보안\*, 최형진\*\*, 김철암\*\*

\* 제주대학교 에너지공학과

\*\* 인하대학교 고분자공학과

## Experimental Study on Drag Reduction Effect of PEO in Turbulent Flow

W. G. Chun\*, S. Kim\*, B. A. Lee\*, H. J. Choi\*\*, C. A. Kim\*\*

\* *Department of Nuclear & Energy Engineering, Cheju National University*

\*\* *Department of Polymer Science & Engineering, Inha University*

### ABSTRACT

As polymer added in flow, the phenomenon of drag reduction effect was found by many experiments and studies. We divided polymer into three molecular weight( $2 \times 10^5$ ,  $4 \times 10^5$ ,  $5 \times 10^5$ ) and into four concentration(1, 5, 10, 20wppm), then we measured the drag reduction effect in the range Reynolds Number with 30000~60000. Finally we found that the most effect drag reduction was that molecular weight is  $2 \times 10^5$  with 10wppm concentration. Then the concentration was according to PEO molecular weight, and in general DR increase according to Reynolds Number.

## 기 호 설 명

- $DR$  : drag reduction  
 $f$  : Darcy friction factor  
 $f_A$  : friction factor for working fluid with drag reduction additives  
 $f_S$  : friction factor for pure working fluid  
 $L$  : length of the test section [m]  
 $L_e$  : entrance length [m]  
 $Re$  : Reynolds Number  
 $v$  : average velocity [m/s]  
 $\epsilon/d$  : roughness ratio  
 $\Delta P$  : differential pressure [ $N/m^2$ ]  
 $\Delta P_A$  : differential pressure for working fluid with drag reduction additives [ $N/m^2$ ]  
 $\Delta P_S$  : differential pressure for pure working fluid [ $N/m^2$ ]  
 $\rho$  : density [ $kg/m^3$ ]  
 $\tau_w$  : wall shear stress [ $N/m^2$ ]

## 1. 서 론

### 1.1 고분자 화합물

난류 유동에서 마찰을 살펴보면, 난류는 고체 표면의 부근에서 발생하는데 그 유체의 유동에 대한 마찰은 주로 이 난류와 연관돼있다. 난류 마찰에 의한 에너지 손실의 양은 그 값이 커서 마찰감소 방법을 찾기 위한 다양한 연구가 시도 되었다.

Toms<sup>1)</sup>는 소량의 폴리에틸메타크릴산 (polyethyl metacrylate)을 모노클로로벤젠 (monochlorobenzene)에 용해시켜 난류상태로 원관 내를 유동시키는 실험을 하였다. 그는 이 실험에서 순수한 용매만의 경우와 비교하여 현저한 저항 감소를 나타내는 현상, 이른바 Toms 효과(Toms Phenomenon)를 발견하였다. Toms의 연구가 보

고된 이래, 산업적으로 원유의 수송, 지역난방에서 열원의 수송 및 석탄의 수송 등 유체의 수송 일 절감과 소방에서의 살수 능력 향상, 잠수함과 같은 선박의 항행 속도 향상, 하수 시스템 및 홍수 배수 시스템의 개발 등 다양한 분야에 Toms 효과의 응용이 가능하므로 광범위한 연구가 진행되어 왔으며, 석탄 수송 시스템(coal slurry system), 원유수송시스템 등에서는 첨가제를 사용한 마찰저항 감소효과가 응용되고 있다.

여기서 고분자에 의한 마찰저항 감소란 유체가 난류상태로 매끈한 원형 관을 흐를 때 분자량이 매우 높은(약  $10^5 \sim 10^7$ ) 고분자 첨가제를 유체에 극소량 첨가시켜 줌으로써 유동 중의 난류를 억제시켜 마찰저항이 감소되는 것을 말한다. 따라서 수송에 필요한 펌프의 용량을 줄일 수 있으며, 단위 시간당 유량의 증가 효과를 관 직경을 감소시키는데 활용할 수 있다. 고분자 첨가제에 의한 마찰저항 감소(drag reduction : DR) 현상은 용매로 물을 사용하였을 경우 최대 80%까지 마찰저항 감소 효과를 주는 것으로 보고되고 있다.<sup>2)</sup> 본 연구에서는 분자량  $2 \times 10^5$ ,  $4 \times 10^5$ ,  $9 \times 10^5$ 의 고분자 화합물 PEO(Polyethylene Oxide)를 각각 1, 5, 10, 20wppm의 농도로 물에 첨가했을 때 발생하는 마찰저항 감소효과를 연구하였다.

### 1.2 마찰저항

관 유동에서 Darcy의 마찰인자(friction factor)  $f$ 는 평균속도와 관에서의 압력 강하(pressure drop)향으로 다음과 같이 나타낼 수 있다 :

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho v^2} = \frac{2D}{\rho v^2} \frac{\Delta P}{L} \quad (1)$$

여기서  $D$ 와  $L$ 은 시험부(test section)의 직경 및 길이,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $v$ 는 관내에서 유체의 평균 속도 그리고  $\Delta P$ 는 시험부 두 지점 사이의 압력차(differential pressure)이다.

완전히 발달된 유동 영역에서 압력 구배를 얻기 위해서는 입구로부터 입구길이(entrance length)  $L_e$ 을 지난 다음의 두 지점 사이의 압력 강하를 측정해야 한다. Newton 유체의 층류 유동에서의 입구길이  $L_e$ 는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>3)</sup> :

$$\frac{L_e}{D} = \frac{Re}{20} \quad (2)$$

Newton 유체의 층류 유동에서 입구 길이  $L_e$ 의 최대 값은 직경  $D$ 의 100배 정도이며 난류 유동인 경우 직경  $D$ 의 20배 정도로 극히 작은 값으로도 충분한 반면, 비-Newton 유체의 경우 Cho와 Harnett<sup>4)</sup>에 의하면 입구길이  $L_e$ 는 직경의 110배 정도로 매우 크게 나타난다고 보고되고 있다.

일반적으로 층류 마찰인자는 완전히 발달된 Newton 유체의 Reynolds 수의 함수 관계로 나

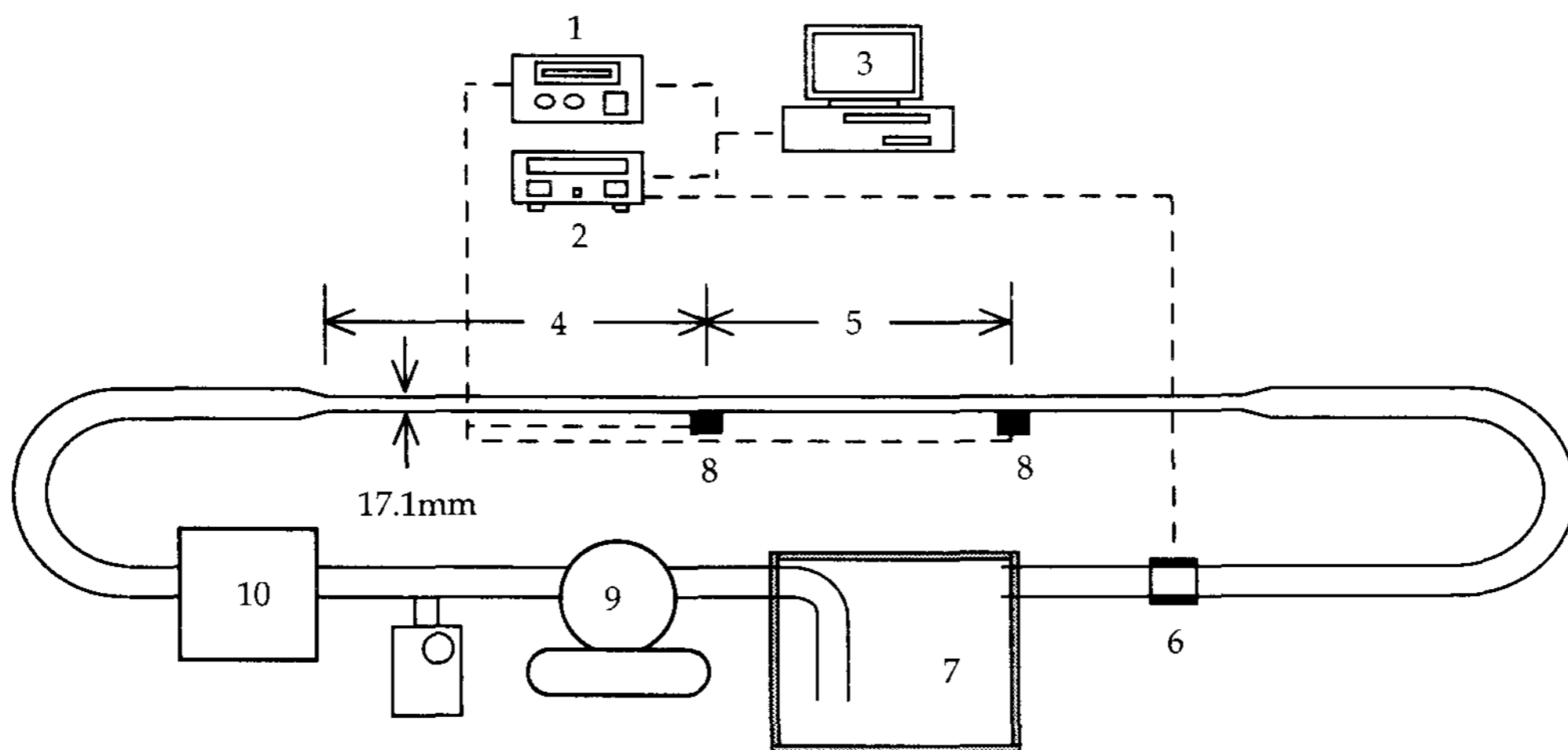
타낼 수 있으며  $f=64/Re$ 이 된다. 그리고, Prandtl에 의해 유도되었듯이 Newton 유체의 완전히 발달한 난류 영역에서 마찰인자는 흔히

$$f^{-1/2} = 2.0 \ln(Re f^{1/2}) - 0.8 \quad (3)$$

로 표현된다. 그러나, 실제 유로에서는 표면 거칠기(roughness)가 존재하고 난류 유동의 마찰인자에 영향을 주므로 표면 거칠기에 의한 영향이 고려되어야 한다. Moody 선도에서는 Colebrook의 상관식이 채택되고 있으나 사용이 불편하여 흔히 Haaland에 의해 제시된 상관식이 사용된다<sup>5)</sup> :

$$\frac{1}{f^{1/2}} \approx -1.8 \log \left[ \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{\epsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (4)$$

여기에서  $\epsilon/d$ 는 관 직경에 대한 표면 거칠기 높이 비를 나타낸다.



- 1. differential pressure transducer
- 2. Doppler flow meter
- 3. PC
- 4. entrance length (2000mm)
- 5. test section (2000mm)
- 6. doppler flow meter sensor
- 7. water tank
- 8. pressure sensor
- 9. Moineau pump
- 10. surge tank

Fig. 1. Schematic diagram of the drag reduction test loop.

### 1.3 마찰저항 감소

일반적으로 난류 상태의 유체에 소량의 첨가물을 첨가하여 얻을 수 있는 압력강하 감소 효과로 마찰저항 감소의 효과를 정의할 수 있다 :

$$DR = \frac{\Delta P_S - \Delta P_A}{\Delta P_S} \quad (5)$$

여기서  $\Delta P_S$ 는 용매만 존재할 때 마찰 때문에 생기는 관의 단위길이 당 압력 강하이며,  $\Delta P_A$ 는 마찰저항 감소제를 첨가한 상태에서 마찰 때문에 발생하는 관의 단위길이 당 압력 강하이다. 또 마찰저항 감소는 다음과 같은 식을 이용해서도 표현할 수 있는데,

$$DR = 1 - f_A/f_S \quad (6)$$

(at constant flow rate)

여기서  $f_A$ 는 마찰저항 감소제가 포함된 유동의 마찰인자이고,  $f_S$ 는 용매만 존재할 때의 마찰인자이다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 수조, 유동안정 탱크, 차압계, 초음파 유량계, Moineau 펌프, PC등으로 구성하였다. 이 시스템은 순환회로로 구성하였는데 이는 다양한 첨가물의 투입과 교체를 가능하게 하고 유동조건을 조절할 수 있게 하기 위함이다. 1200mm×650mm×600mm의 비교적 큰 수조를 사용하여 펌프의 흡입/토출에 의한 영향을 최대한 줄였다. 시험부는 내경 17.1mm인 동관을 사용하였다. 고분자 화합물 첨가에 의한 마찰저항 감소를 정확히 측정하기 위해서는 완전히 발달된

(fully developed) 유동영역을 충분히 확보해야 한다. 그런데 고분자 화합물과 같은 비-Newton 유체의 경우에는 난류유동의 경우에도 층류와 비슷하게 입구길이가 긴 특징이 있다. Cho와 Hartnett<sup>4)</sup>의 보고에 의하면 입구길이가 직경의 약 110배 정도이다. 따라서 이 조건을 만족하기 위해 2000mm의 입구부를 확보하였다. 이는 지름의 117배의 입구영역을 확보한 것이므로 시험부는 완전히 발달된 난류 유동장으로 생각할 수 있다.

### 2.2 유량의 주입 조건과 측정 장치

유량을 제공하기 위하여 본 실험에서는 펌프를 사용하였다. 그런데 일반적으로 사용하는 원심펌프는 고분자 용액의 퇴화를 잘 일으키는 것으로 알려져 있다. 그래서 본 실험에서는 고분자 화합물의 기계적 퇴화에 영향이 매우 적은 것으로 알려진 Moineau 펌프를 사용하였다.

펌프의 구동 때문에 발생하는 진동과 맥동을 줄이고 안정된 유량을 얻기 위하여 펌프와 순환회로의 연결 부위를 플렉시블호스(flexible hose)로 연결하여 진동을 흡수 할 수 있도록 하였다. 그리고, 순환회로 입구에 유동안정 탱크를 설치하여 펌프에 의한 맥동과 진동을 완화시키고 차압을 측정할 때 차압의 떨림을 최소화하였다. 유동안정 탱크는 최대 6기압까지 견디는 것을 사용하였다.

고분자 화합물은 기계적 퇴화에 민감하므로 가능한 한 유동에 방해를 주지 않도록 하기 위해, 유량 측정에 흔히 사용되는 오리피스형 유량계나 터빈 유량계 등을 유로 내에 설치하는 대신에 초음파 유량계(EIT사 MODEL 2410)를 사용하여 유량을 측정하였다. 초음파 유량계는 초음파를 발진시켜 유동장에 보내고 반사되어 나오는 초음파의 파장을 측정하고 Doppler 효과를 이용해 유동속도를 측정하는 장비이다. 본 실험에서 채택한 장비는 측정 범위가 유속을 기준으로 0.03 ~ 9.1

m/sec로 본 실험에서 수행하고자 하는 실험 범위(1.0~3.0 m/sec)를 충분히 지원한다. 그리고, 자체적으로 유속 정보를 유량 정보로 환산하여 제공하도록 되어있다. 초음파 유량계에서 나온 유량 신호는 A/D 변환기에서 변환을 거쳐 PC에 저장할 수 있도록 하였다.

유량 측정 센서는 유량 측정의 안정성을 위해 순환 회로 출구 측에 설치하였다. 마찰저항 감소 효과 실험에서 정확한 유량의 측정과 설정된 유량이 실험 중 일정하게 유지하는 것은 매우 중요하다. 유량을 조절하는 방법은 펌프 구동 모터의 회전수(rpm)를 변화시키는 방법과 탱크를 밀폐시키고 탱크 내의 수위와 압력을 질소나 공기 가스 압을 이용하여 유량에 진동이 있는 경우에도 일정하게 압력을 유지할 수 있도록 하는 방법, 그리고 펌프에서 나오는 유량을 요구된 유량에 맞게 바이패스(bypass)시키는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 모노 펌프(대봉엔지니어링 MODEL DSF 40-1)를 구동할 때 인버터(현대중공업 MODEL HV-3.5LD)를 연결하여 1800rpm을 일정하게 펌프에 제공함으로써 동력을 일정하게 유지시켰다. 이로써 펌프의 회전을 안정시켰으며, 이 상태에서 V.S. Moter Controller를 사용하여 실제 rpm을 조절함으로써 실험 시 원하는 유량을 얻을 수 있도록 하였다.

### 2.3. 차압 측정 장치

차압의 측정은 시험부 상단과 하단 사이에 Fig. 2와 같은 압력측정 회로를 구성하고, 차압계를 이용하여 측정하였다. 바이패스 밸브(bypass valve) 및 차단 밸브(shutoff valve) 모두가 개방되었을 때는 차압이 발생하지 않고, 이 상태에서 바이패스 밸브만을 폐쇄시키면 차압이 걸린다. 여기서 배수 밸브(drain valve)는 작동 유체를 교체하여 실험하고자 할 때 측정 회로에 남아 있는 고분자 화합물 용액을 세척하기 위해 사용된다.

본 실험에 사용될 차압계는 Validyne 사의

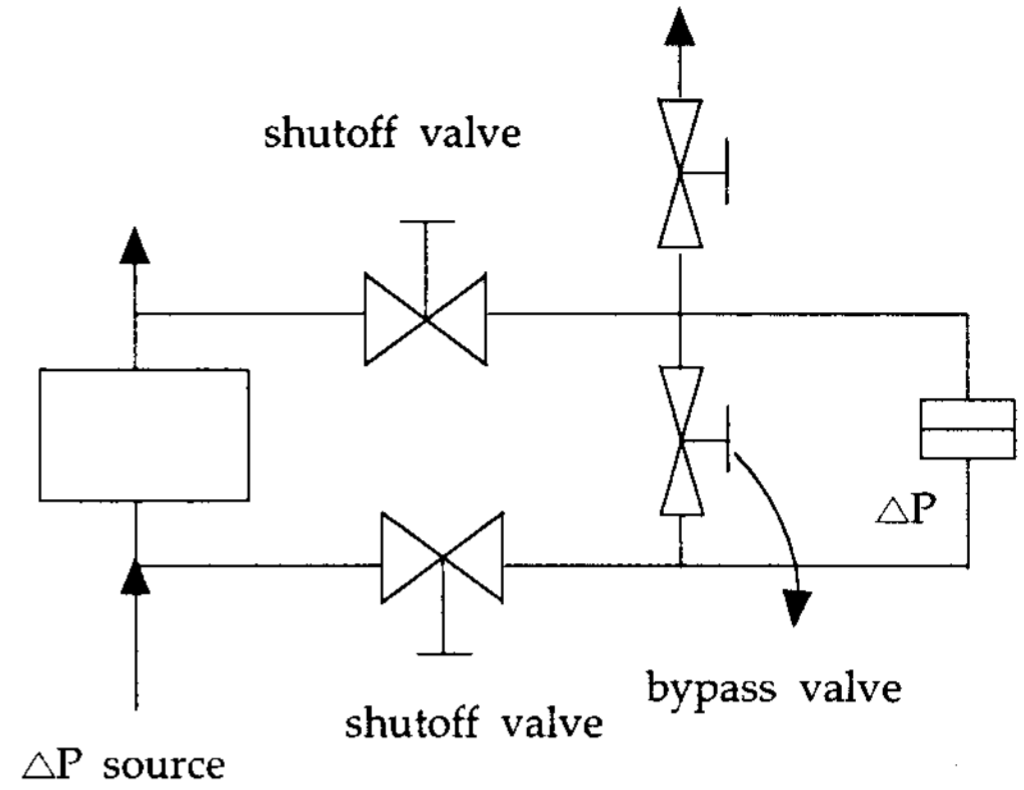


Fig. 2. Differential pressure measuring circuit

Model DP15-TL로 다이어프램 교체식이어서 측정하는 차압의 범위에 따라 다이어프램을 선택하고 교체할 수 있으므로 정밀한 차압측정이 가능하다. 유량계에서와 마찬가지로 차압기에서 나온 신호는 A/D 변환기를 거쳐 PC에 저장되도록 하였으며 동시에 모니터로 볼 수 있도록 프로그램 하였다.

차압을 측정하기 위해 시험부에 2m 간격으로 작은 구멍을 뚫었다. 본 실험에서는 무엇보다도 정확한 차압의 측정이 요구되기 때문에 실험 조건이 변화할 때마다 압력 보정기(pressure calibrator)를 이용하여 차압을 보정하여 사용하였다. 여기에서 사용된 압력 보정기는 Beamex사의 PC-104와 PG-300V로 0~4bar 범위의 차압에 대한 보정이 가능하다. 그리고 차압의 떨림을 방지하기 위해서 중간에 유동안정 탱크를 설치하였다.

## 3. 결 과

### 3.1. 물에 대한 기초 실험

계측기를 포함하여 실험장치의 구성과 실험 절차가 제대로 되어 있는지를 검증하고, 실험에 사용된 시험부의 표면조도(roughness)에 대한 정보

를 얻기 위해서 우선 물을 작동유체로 한 실험을 수행하였다.

작동유체로 물을 사용하여 마찰인자를 측정하여 식 (4)의 Haaland 상관식과 비교한 결과, Fig. 3에서 보듯이 본 시스템 시험부의 표면조도가 0.00085mm으로 나타났다. 본 연구팀은 0.22bar까지 측정이 가능한 다이어프램을 가지고 30000~60000 사이의 Reynolds 수에서 실험을 수행하였다. 그리고 PEO의 각각의 분자량에 따라서도 물에서 행했던 기초실험과 같은 차압계(0.22bar)로

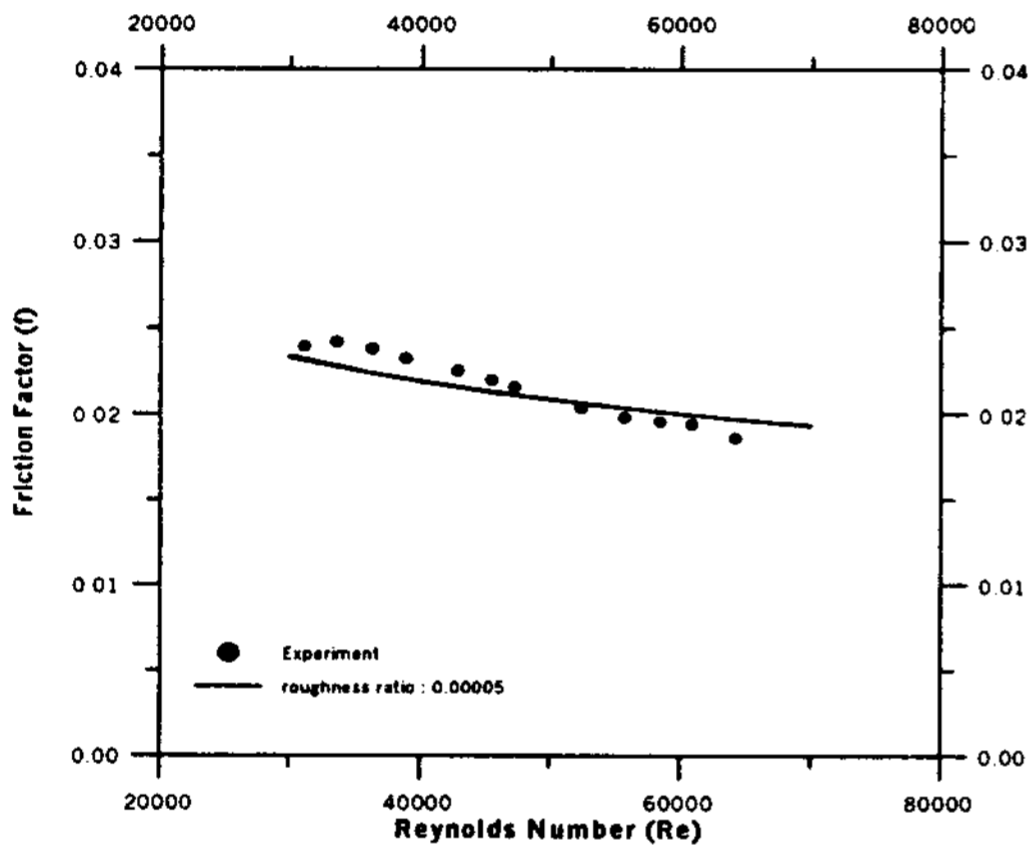


Fig. 3. Friction factors for pure water

같은 Reynolds 범위(30000~60000)에서 실험을 수행하였다. 그리고 고분자화합물 첨가 시 DR 계산은 표면조도가 0.00085mm일 때의 Haaland 식

$$f = -0.0047 \times \log(Re) + 0.0717 \quad (7)$$

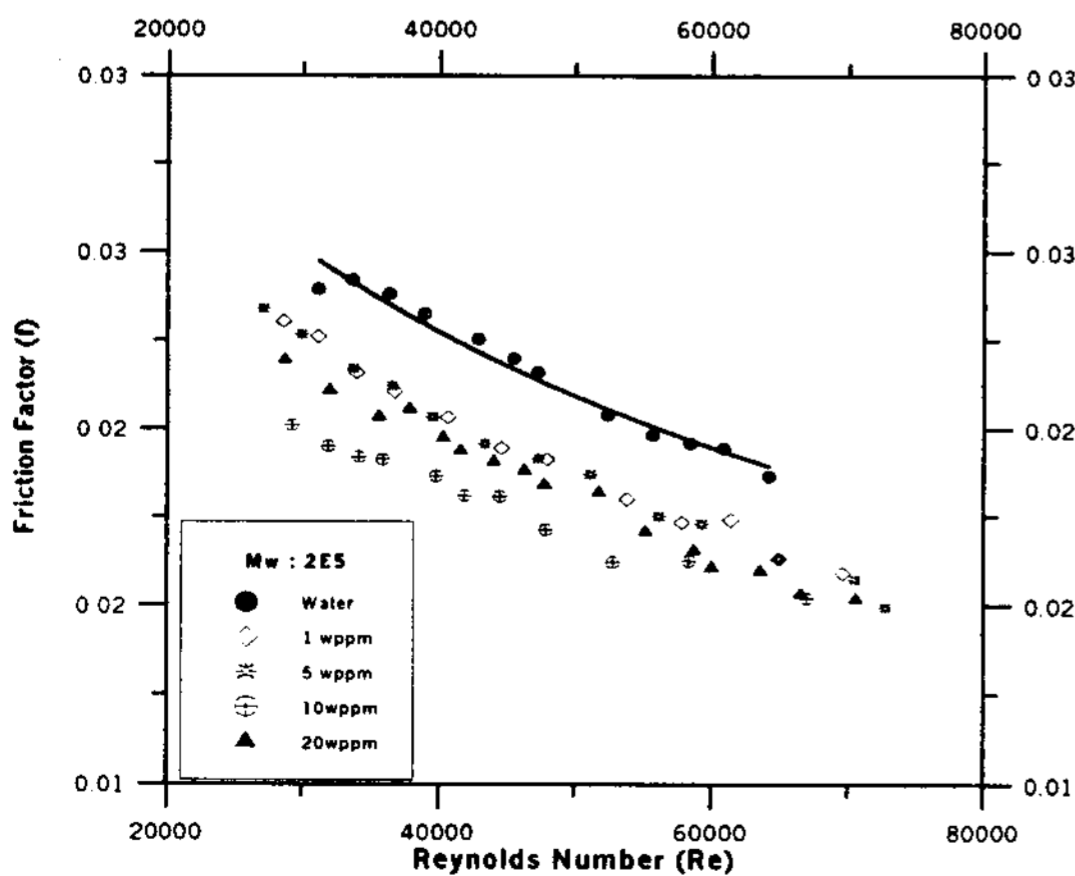
을 기준으로 하여 계산하였다.

### 3.2 마찰저항 감소효과와 퇴화 측정 및 고찰

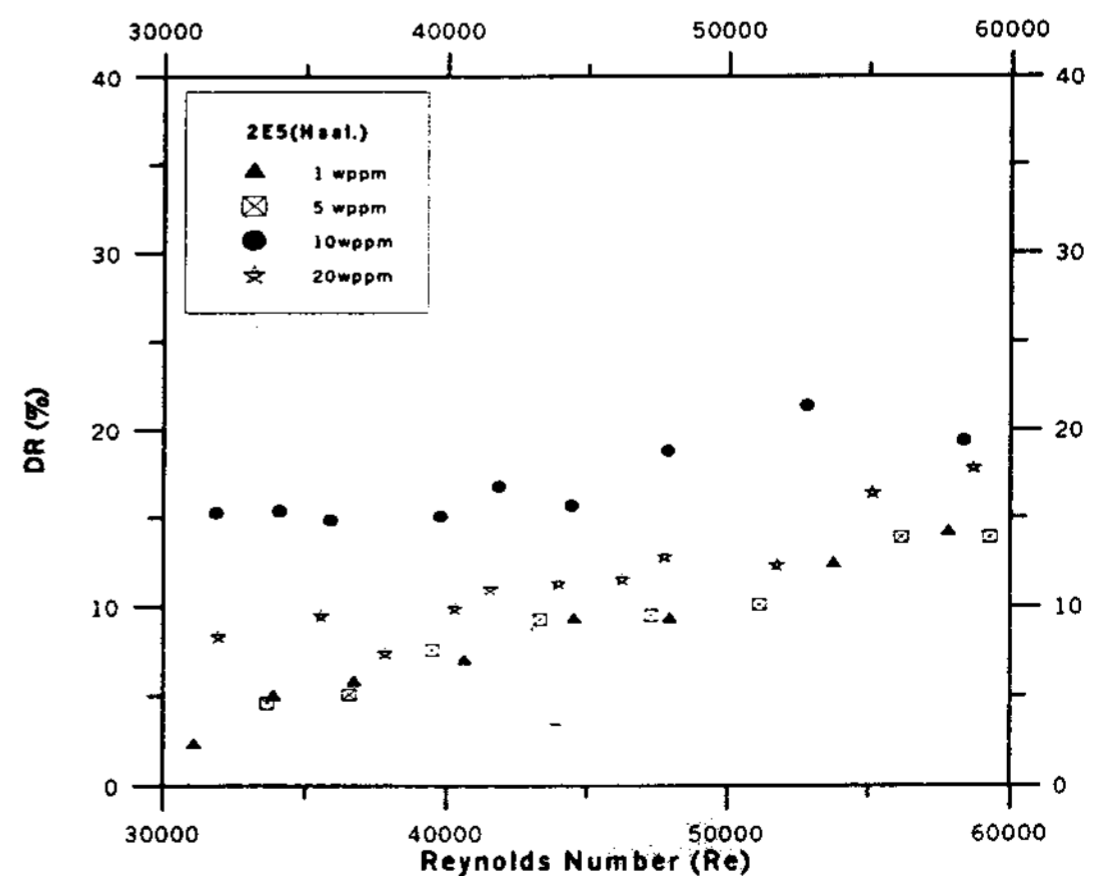
본 실험에서는 분자량  $2 \times 10^5$ ,  $4 \times 10^5$ ,  $9 \times 10^5$ 의 PEO를 가지고, 각 분자량에 대해 농도(1, 5, 10, 20wppm)에 따라 마찰저항 감소효과를 관찰하였다.

Fig. 4. (b)는 대부분의 농도(1, 5, 10, 20wppm)에서 Reynolds 수가 증가함에 따라 DR이 증가하는 현상을 보이고 있다. 농도가 10wppm, Reynolds 수가 52000 일 때 가장 높은 DR 효과(21.4%)를 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 비교적 작은 농도라고 할 수 있는 1, 5wppm에서는 DR 효과가 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5. (b)는 20wppm의 농도일 때 전체적으로 높은 DR(약 13~20%)이 나타난다. 5wppm인 경우 Reynolds 수가 40000이하에서 가장 DR 효



(a) Friction Factor



(b) Drag Reduction

Fig. 4. Friction Factor and Drag Reduction with PEO(Mw:  $2 \times 10^5$ )

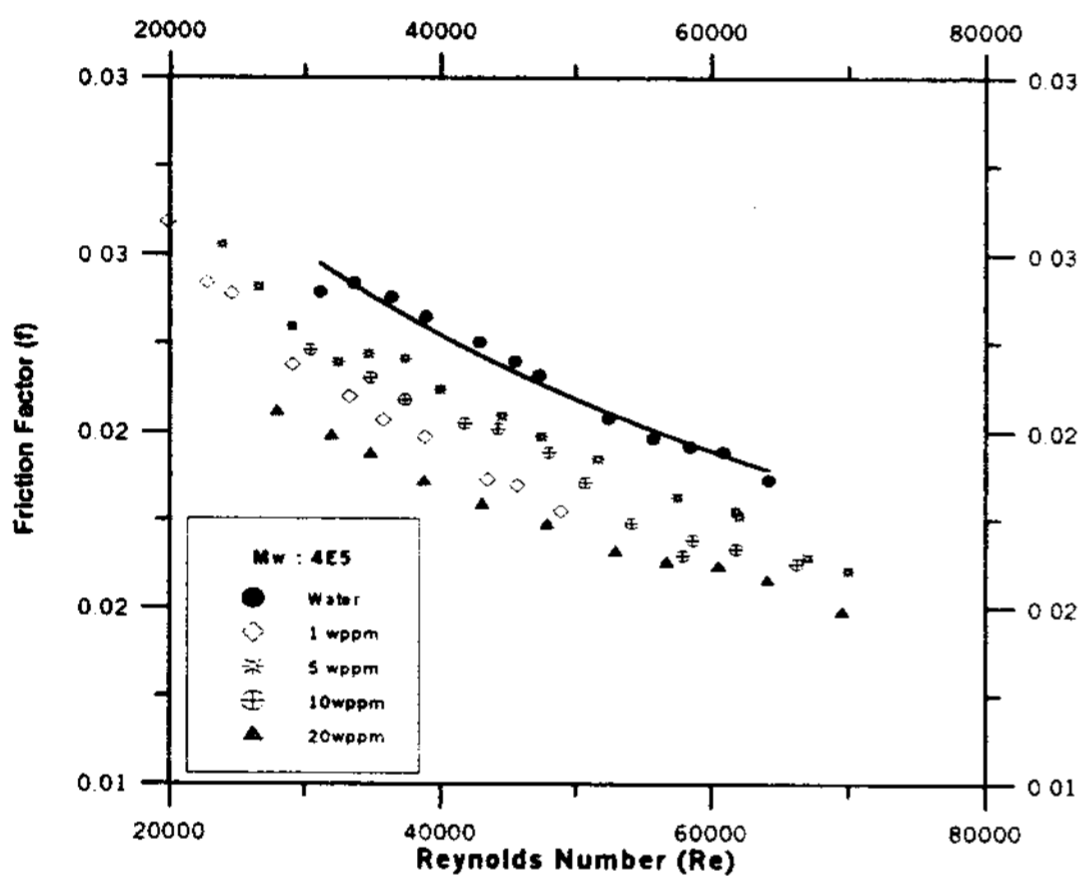
과가 떨어지다가 Reynolds 수가 증가할수록 DR 효과가 높아지는 현상을 보이고 있다.

Fig. 6. (b)에서 보면, 전체적인 Reynolds 수 20,000~60,000 범위에서 1wppm의 농도가 가장 높은 DR을 나타내고 있다.

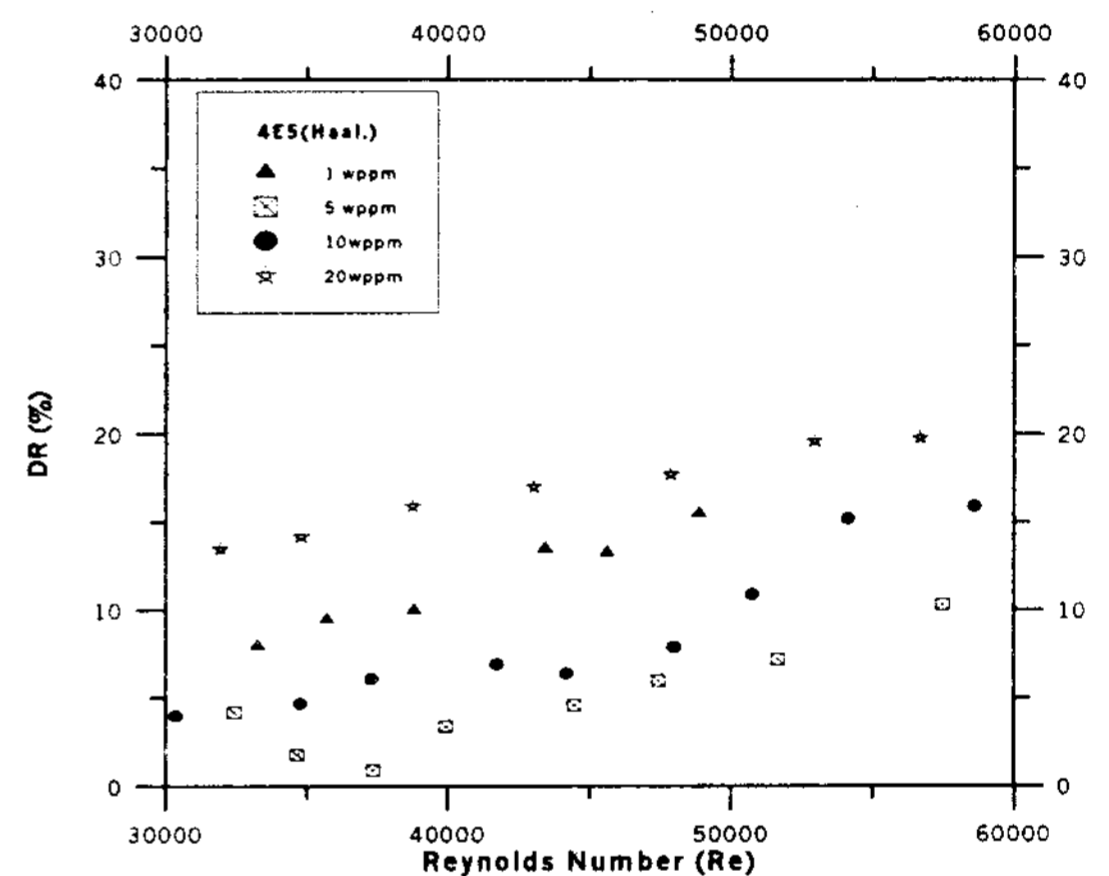
이를 볼 때 분자량 별로 최적의 DR을 나타내는 농도가 존재하며 Reynolds 수 20,000~60,000 범위에서는 Reynolds 수에 따라 DR이 증가함을 알 수 있다. 본 실험을 통해서 PEO  $2 \times 10^5$ 일 경

우에는 10wppm, PEO  $4 \times 10^5$ 일 경우에는 20wppm에서, PEO  $9 \times 10^5$ 에서는 1wppm에서 가장 높은 DR 효과를 관찰하였다.

Fig. 7은 분자량에 따른 DR 효과를 보여주고 있다. 1wppm[Fig. 7. (a)]에서는 셋 중 분자량이 가장 큰 PEO  $9 \times 10^5$ 이 가장 높은 DR을 보이고 있다. 5wppm[Fig. 7. (b)]에서는 PEO  $4 \times 10^5$ 이 대체적으로 낮은 DR을 보였으며,  $2 \times 10^5$ 와  $9 \times 10^5$ 이 비슷한 DR(12%)을 보였다. 10wppm[Fig.

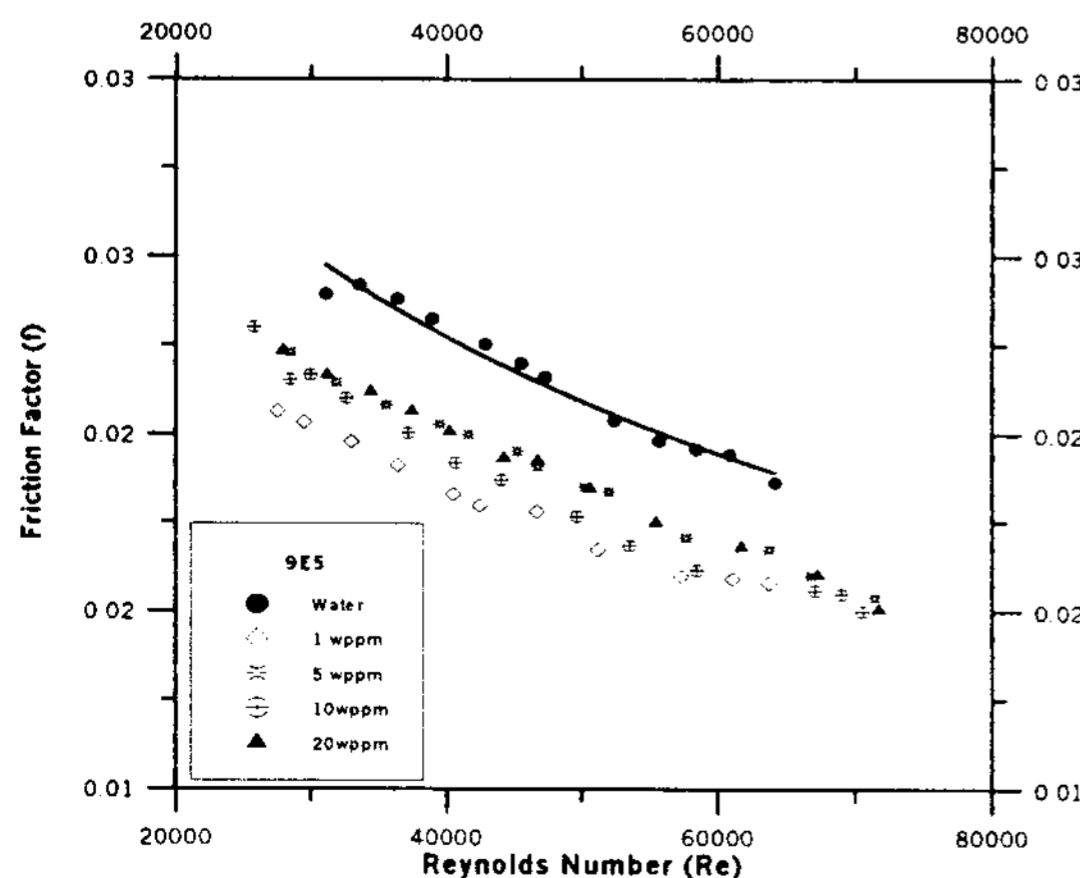


(a) Friction Factor

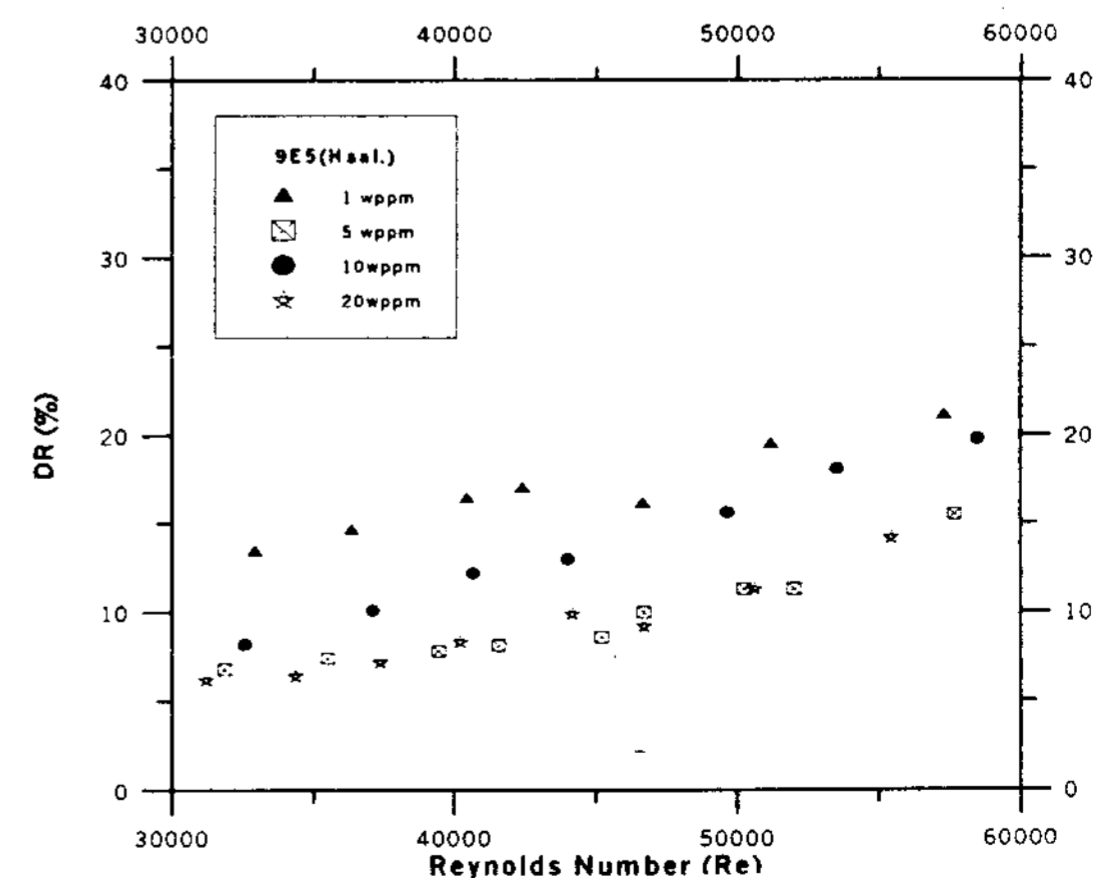


(b) Drag Reduction

Fig. 5. Friction Factor and Drag Reduction with PEO ( $M_w: 4 \times 10^5$ )



(a) Friction Factor



(b) Drag Reduction

Fig. 6. Friction Factor and Drag Reduction with PEO ( $M_w: 9 \times 10^5$ )

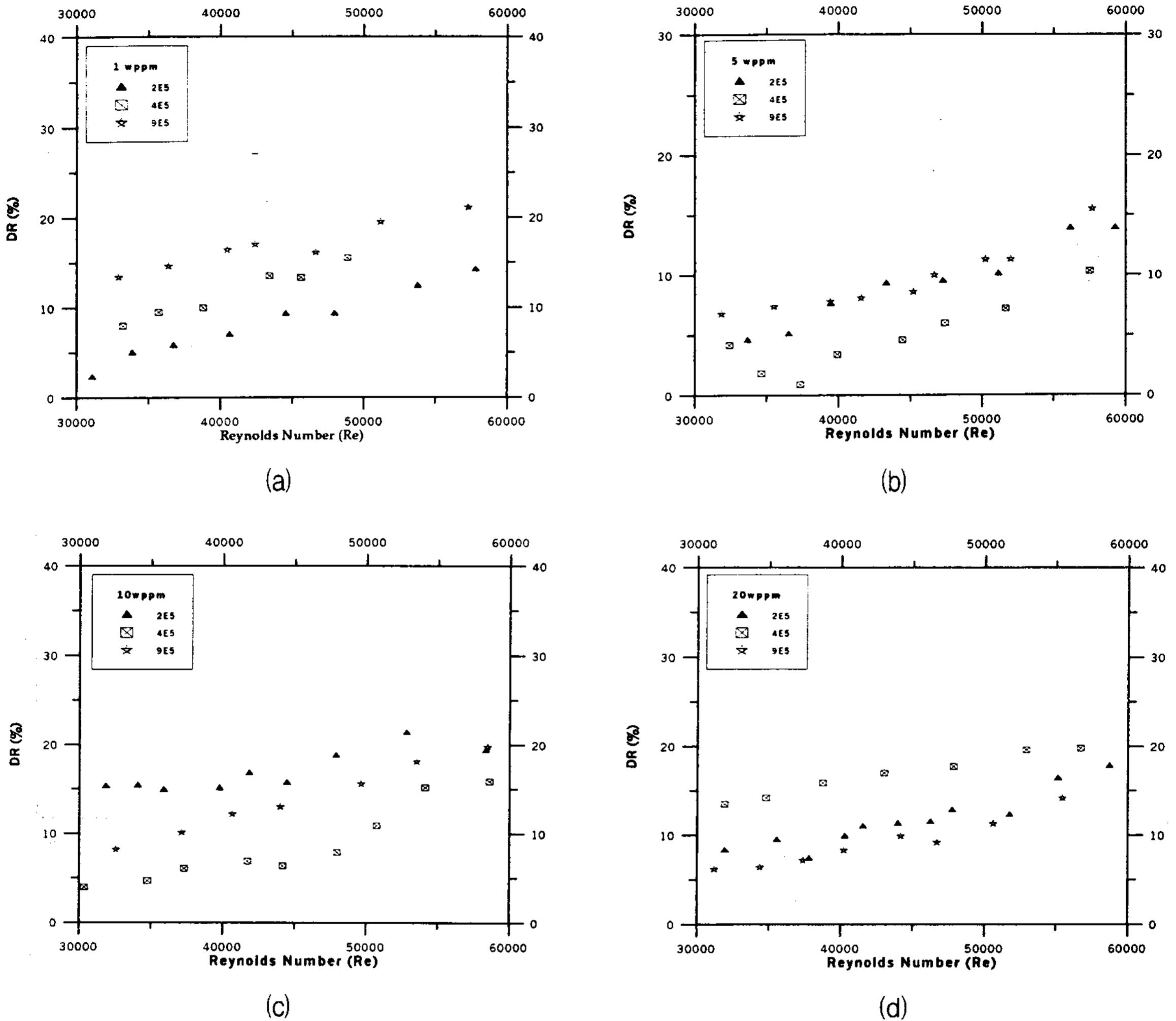


Fig. 7. The effect of DR according to Molecular Weight

7. (c)]에서는  $2 \times 10^5$ 가 가장 높은 DR을 보이고 있다. 20wppm[Fig. 7. (d)]에서는 본 실험의 Reynolds 수 영역에서  $4 \times 10^5$ 이 가장 좋은 DR을 나타내고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 3가지 분자량( $2 \times 10^5$ ,  $4 \times 10^5$ ,  $9 \times 10^5$ )과 4가지 농도(1, 5, 10, 20wppm)의 고분

자 화합물 PEO를 원형 관 난류유동에 첨가하여 난류 마찰저항 감소를 측정하였다. 여기서 Reynolds 수의 범위는 20000~60000으로 하였다. 그리고 차압의 범위는 0.04~0.22bar, 속도 범위는 1.0m/s~3.0m/s에서 측정하였다. 실험결과 위의 범위 안에서 DR은 최대 21%로 나타났다.

본 실험을 통해 최적의 DR 효과를 나타내는 적정 Reynolds 수, 적정 농도 그리고 적정 분자량이 존재함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 이 세 인자와 마찰저항 감소 효과 사이의 상관관계



를 명확히 규정할 수 없었지만, 더 다양한 분자량과 농도와 더 넓은 범위의 Reynolds 수에서 실험을 통하여 이들 인자가 마찰 저항감소효과에 미치는 영향을 규명할 수 있는 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 기초 연구 사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Toms, B. A., 1948, "Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers.", Proc. 1st Int. Congress on Rheology, vol.II. pp.135~41. North Holland Publ. Co.
2. Choi, U.S., Cho, Y.I and Kasza, K.E., 1987, "Screening and degradation tests of linear polymer additives for district heating applications", Report of Argon National Laboratory, ANL-87-49.
3. Kays, W.M. and Crawford, M.E., 1980, *Convective Heat and Mass Transfer*, 2nd Ed., McGraw Hill, New York.
4. Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., 1982, "Non-Newtonian fluids in Circular pipe flow," *Int. Advances in Heat Transfer*, Vol. 15, pp.59~141. Academic Press, New York.
5. White, F.M., 1994, *Fluid Mechanics*, 3rd Ed. McGraw Hill, New York.