

# 고분자를 이용한 관수로에서의 마찰감소에 관한 실험연구

김만식\* · 김재근\*\*

## 1. 서 론

우리나라는 공업화 및 산업화의 근대사회로 들어오면서부터 도시에 인구가 집중되는 현상이 이루어지고 있으며, 이는 환경 및 보건적인 측면에서 매우 심각한 문제를 유발시키고 있다. 특히 도시에 수십년전 설비한 상당수의 하수관은 국민 보건위생 및 수해의 발생의 큰 요인으로 규명되었다. 전국적으로 지하에 설치한 하수도 배관은 몇 만 킬로미터 이상이다. 이중 절반 이상이 토사, 음식물 찌꺼기, 오물 등으로 퇴적되어 막혀 버린 상태이며, 이로 인한 수질오염, 부식, 하수 찌꺼기로 인한 부패 악취 및 각종 병충해가 서식하는 한편 관의 파손으로 오·폐수가 지하로 유출하고 있다. 이는 국민 위생상 큰 문제를 유발시키는 동시에 지하수의 오염원이 되고 있다. 또한 각 지역의 하수도관이 막힘으로 인해 폭우 때는 배수가 제대로 되지 않아 교통 장애를 비롯하여 침수 지역까지 발생케 되어 국민과 국가적으로 재산 손실이 막대한 실정이다.

고분자물질에 따른 마찰저항 감소현상은 소방차에서 방수 방출능력의 향상, 선박 및 잠수함의 항해속도의 상승, 원유수송, 각종 유체수송에 있어서 펌프력 향상 및 의학분야에서도 동맥경화와 같은 병의 치료시 혈관에 해롭지 않은 고분자물질을 혈액순환계에 첨가함으로써 혈액순환을 원활히 할 수 있는 것처럼 그 응용 및 적용에 있어서 크게 기대되고 있다.

따라서 본 연구는 고분자 물질을 이용하여 하수관로에서 유속을 증대시켜 관로의 부식 및 토사 침식을 방지하는 기법을 개발하고, 또한 단위 시간당 유출량을 증대시키므로 하수관 시스템을 소형화시켜 공사비용을 절감하는 효과를 얻는 동시에 관내 유체의 난류를 감소시키므로 관의 수명을 연장시키는 기법을 실험적으로 연구하고자 한다. 따라서 우선 수직관수로에서 점성을 감소시키는 실험을 실시하였으며 대단히 만족스런 결과를 도출하였다. 만일 본 연구가 성공적으로 수행되면 이는 하수관거 정비 및 유지 관리에 투입하는 막대한 예산을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구의 실험장치에서 순환회로는 수직관수로 시험부의 내부에 기-액 2상류가 유동할 수 있도록 제작하였다. 실험장치는 공기압축기, 압력조절탱크, 압력조절기, 기-액 혼합부, 공기 및 물속도 계측부, 원심펌프, 기-액 분리탱크, 순환수 저장탱크, 시험부로 구성하였다. 액상의 순환회로에서 순환수 저장탱크내의 물을 용량이 3마력인 부식방지용 내산스테인레스 원심펌프에 의해서 순간유량계를 통과한 후 시험부로 유입시켰다. 이때 원심펌프와 순간유량계 사이에는 배수관을 순환수 저장탱크와 연결하여 유동 압력파동을 안정화시킬 수 있도록 하였다. 본 실험에서 사용한 액상의 작동유체는 물과 고분자수용액으로서 용량이 200ℓ 용량인 순환수 저장탱크에 저장하였다. 작동유체의 초기온도를 27℃로 일정하게 유지하기 위하여 탱크내의 순환수를 3kW 열량의 가열기에 의해 예열된 후 펌프에 의해 기-액 혼합부를 거쳐 시험부에 유입시켰으며, 실험 중 작동유체의 온도상승은 동관으로 제작한 열교환기를 순환수 저장탱크 내에 설치하여 조절하였다. 그 동안 선행된 연구에 의하면 저항을 감소시키기 위한 첨가제인 수용성 고분자물질은 PAA(Polyacrylamide)와 PEO(Polyethyleneoxide)이지만 밀폐계에서는 기계적 퇴화로 인하여 그 효과가 매우 낮았으나, 합성 고분자인 A611P(Co-polymer) 고분자물질은 저항감소 효과가 다수 우수하다고 규명된 연구가 있었다. 그러나 분자량이 많은 고분자물질이 저항감소 효과가 우수하다는 연구결과가 있어 본 연구에서는 A611P 보다 분자량의 수가 평균 200만개가 많은 합성 고분자 물질인 A601P를 사용하였다. A601P는 분자량의 수가 1,600만~1,800만개

\* 정회원 · 신성대학 토목정보과 교수, 공학박사 · 041-350-1481(E-mail:kmspj@shinsung.ac.kr)

\*\* 신성대학 기계자동차계열 교수, 공학박사 · 041-350-1222(E-mail:kjg@shinsung.ac.kr)

로 구성되어 있으며, 다수의 레올러지학자들에 의해 실험적으로 shear-thinning 유체임이 제시되었다.

## 2.2 실험방법

시험부는 내경 24mm, 두께 3mm, 길이 1,200 mm인 관을 사용하였다. 수직관수로 시험부는 입·출구 1,100mm사이 에 차압계측구멍을 직경 3mm로 뚫어서 스트레인게이지 형식의 차압용 압력변환기(Druck, model PDCR 120/ WL)를 장착하고 압력강하를 계측하였다. 이때 압력변환기의 측정범위는  $\pm 35\text{kPa}$ 이며, 최대·최소 압력차에 해당하는 허용주파수는 10.5kHz이나 압력강하를 계측해 본 결과 차압신호는 2kHz이하이므로 압력변환기의 주파수응답 특성은 충분함을 확인하였다. 온도변화에 따르는 오차는 0~50℃ 범위 내에서 0.1% 이내이다. 압력변환기에 의해 검출된 차압신호는 차압지시계(Druck, model DPI 260)에 의해 차압측정치를 디지털로 직접 나타내며 아날로그 신호는 A/D변환기(Dantek, model DAS-1600)로 입력시켰다. 계측된 신호가 정확한지를 가시적으로 판단하기 위해 A/D변환기 전단에 오실로스코프를 설치하고 관찰하였다. 이렇게 A/D변환기로 입력된 신호는 퍼스널 컴퓨터에 의해 최대 4,096개의 신호를 받아들여 저장시켰다. 입력된 신호는 프로그램에 의해 처리되어 프린터를 통해서 출력시켰다.

## 3. 실험결과 및 검토

Fig. 1은  $Re=3.4 \times 10^4$ 일 때 고분자물질을 첨가하지 않았을 경우와 고분자물질의 농도를 100ppm, 300ppm을 첨가하여 유동시켰을 때 유동시간 후 30분이 경과했을 때 차압측정기에서 출력된 신호를 비교한 것이다. 순수 수용액을 유동시켰을 때 보다 고분자물질의 농도를 증가 시켰을 때 압력강하는 작게 출력되며, 파동성분도 작게 나타남을 볼 때 고분자수용액은 순수수용액에 비해 저항을 현격히 감소시킴을 알 수 있다.

Fig. 2은 순수수용액과 고분자수용액을 유동시킬 때 레이놀즈수와 고분자수용액의 농도변화에 따른 압력강하 비를 비교 도시한 그림이다. 이때 동압( $\Delta P$ )과 정압( $\Delta P_s$ )의 비를 압력강하비로 정의하였다.

레이놀즈수 증가에 따라 압력강하비가 증가하며, 레이놀즈수가 일정할 때 순수 수용액만 유동시켰을 때보다 고분자수용액을 유동시켰을 경우 농도증가에 따라 압력 강하비는 현격하게 감소됨을 알 수 있다. 이와 같은 압력 강하비의 감소정도는 유체를 수송시키는데 필요 펌프동력을 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

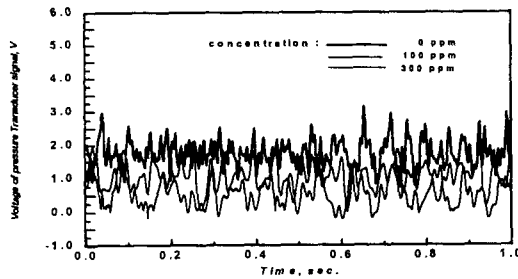


Fig. 1. Comparisons of Pressure drop Wave with and without polymer additives at  $Re=3.4 \times 10^4$

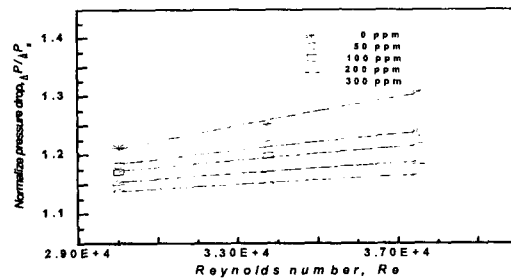


Fig. 2. Comparison normalize pressure drop with and without polymer additive

Fig. 3과 4는 순수수용액과 A611P 고분자수용액을 유동시켰을 경우 고분자물질의 농도, 순수 수용액의 레이놀즈수, 유체의 유동시간을 변수로 하여 압력강하를 계측하고, 아래 식(1)에 의해 마찰저항 감소율(DR: Drag Reduction)을 산출하여 마찰저항 감소효과를 도시하였다. 이때 시간에 따른 마찰저항 감소율을 비교한 것은 유동장내에서 고분자수용액이 기계적 퇴화를 동반하므로 이를 정량화 시켜 비교하고자 함이다.

$$D.R. (\%) = \frac{\Delta P_{NP} - \Delta P_{AP}}{\Delta P_{NP}} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $\Delta P_{NP}$ 와  $\Delta P_{AP}$ 는 고분자를 첨가하지 않았을 때와 첨가하였을 때의 차압을 나타낸다.

Fig. 3은 고분자 물질의 종류에 따른 마찰저항감소율을 비교 도시한 그림으로 A611P 보다 A601P가 마찰저항 감소율이 현격히 높음을 알 수 있다. 이들 고분자의 차이점은 단지 분자량이 A611P보다 A601P가 더크

다는 차이점으로서 고분자 물질의 분자수가 마찰저항감소 효과에 지대한 영향을 미침을 알 수 있다.

이들 그림을 종합적으로 살펴보면 실험시간 경과에 따른 마찰저항 감소율은 초기시간에 다소 급격히 감소되나 실험을 시작하여 30분이 경과한 후에는 30분 이전에 비해 미소한 감소현상을 볼 수 있다. 이는 밀폐계로부터 펌프 및 유동장의 형상 등에 의한 기계적 퇴화가 실험초기 시간에 다소 급속히 발생하지만 최대 약 75%의 마찰저항 감소효과가 있다. 농도가 증가할수록 마찰저항 감소효과는 더욱 증가할 뿐만 아니라 기계적 퇴화의 크기가 적음을 볼 수 있다. 그러나 농도가 400ppm일 경우 오히려 마찰저항 감소효과가 적어짐을 볼 수 있는데 이는 Virk가 제시한 최저 마찰저항감소 점근선에 접근한 것으로 예측할 수 있다.

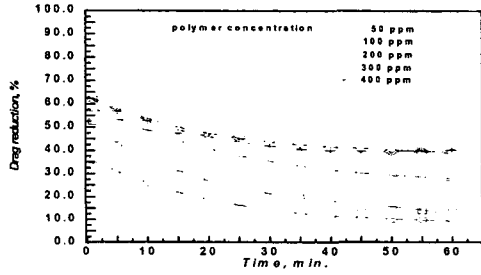


Fig. 3. Present drag reduction versus time for polymer concentrations at  $Re=3.0 \times 10^4$

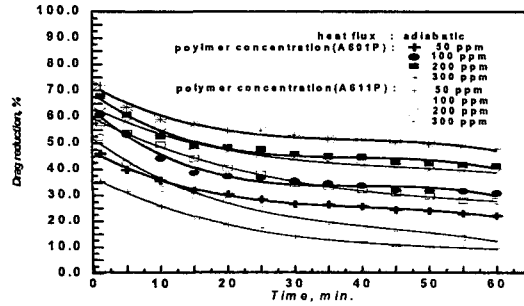


Fig. 4. Comparison of drag reduction for polymer kinds at  $Re=3.0 \times 10^4$

Fig. 5와 6은 순수수용액과 공기가 공존하여 2상 유동할 때 즉 걸보기 물속도( $J_{SL}$ )를 2.5m/s로 일정하게 유지하고, 걸보기공기속도( $J_{SA}$ )를 0.25 m/s, 2.0 m/s로 각각 유동시켰을 때 A611P 고분자 수용액의 농도를 변화시키며 60분 동안 마찰저항 감소율을 비교한 그림들이다. 이들 종합적으로 살펴보면 고분자수용액을 유동시킨 후 유동시간 경과에 따라서 마찰저항 감소율이 감소됨을 알 수가 있다. 이때 실험을 시작하여 30분이 경과한 후에는 30분 이전에 비해 변화가 거의 없음을 나타내고 있다. 또한 고분자물질의 농도가 증가할수록 기계적 퇴화가 적게 발생됨을 알 수 있다. 이때 기계적 퇴화는 수용성 고분자의 구조가 파괴되는 현상이다. 고분자수용액의 농도가 클수록 기계적 퇴화의 정도는 작음을 알 수 있다.

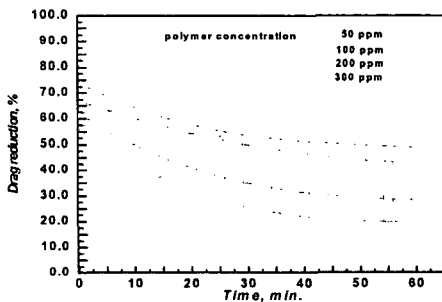


Fig. 5. Percent drag reduction versus time for polymer concentration at  $J_{SL}=2.5m/s$ ,  $J_{SA}=0.25m/s$

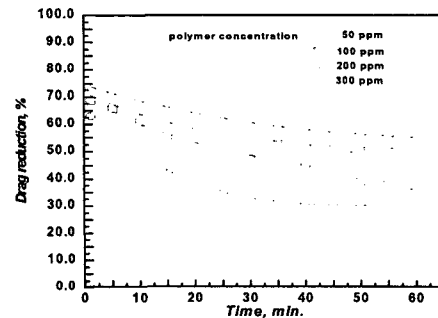


Fig. 6. Percent drag reduction versus time for polymer concentration at  $J_{SL}=2.5m/s$ ,  $J_{SA}=2.0m/s$

Fig. 8은 기-액 2상유동장에서  $J_{SL}$ 를 2.5m/s,  $J_{SA}$ 를 0.25m/s로 유지하고 고분자물질을 첨가했을 경우와 첨가하지 경우 유동형태를 사진 촬영한 것이다. 고분자물질을 첨가하지 않은 0ppm 인 경우 시험부내에 유동시켰을 경우 작은 기포가 시험관 전체에 균일하게 분포하여 유동하고 있으나, 100, 200, 300ppm인 A611P수용액을 각각 유동시켰을 때는 고분자물질을 첨가하지 않았을 경우 보다 기포의 크기가 성장하여 관의 중심부근에서 유동함을 볼 수 있다. 특히 농도가 300ppm일때는 기포모양이 작은 테일러형 기포로 성장하고 그 뒤에 작은 기포를 동반하여 유동함을 알 수 있다. 이와 같은 현상이 발생하는 원인은 고분자 수용액의 경우 관벽 근처의 물속도가 증가되므로 상대적으로 기포가 관중심으로 이동하여 기포가 합체되어 유동하는 것으로 예상

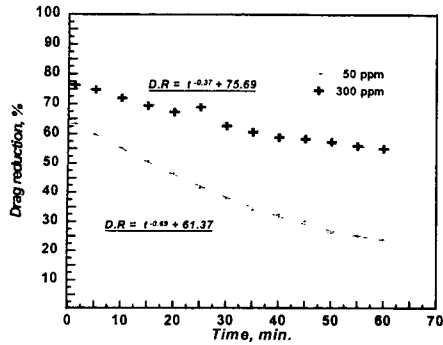


Fig. 7. Correlation of drag reduction versus polymer concentration at  $J_{SL}=2.5m/s$ ,  $J_{SA}=2.0m/s$

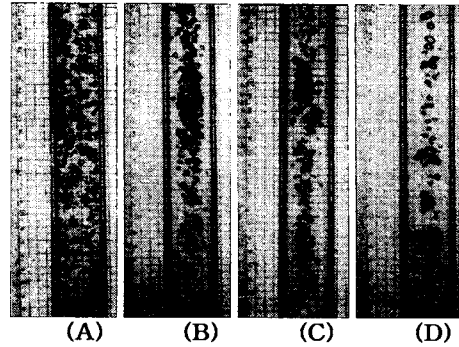


Fig. 8. Comparison of bubble behaviors with and without A611P additives at  $J_{SL}=2.0m/s$ ,  $J_{SA}=0.25m/s$  (A) only two phase flow (B) 100ppm, (C) 200ppm, (D) 300ppm.

할 수 있다.

#### 4. 결론

1. 기-액 2상류가 유동시 고분자물질의 농도를 증가시킬수록 마찰저항감소율이 증가됨을 볼 수 있었다. 그러나 시간이 경과됨에 따라 고분자 수용액의 기계적 퇴화로 인해 점차적으로 마찰저항 감소율이 감소됨과 수직 관수로에서 마찰저항감소 현상을 고분자수용액의 농도 및 유동시간과의 상관 관계식을 규명하였다.
2. 고분자물질의 농도를 증가시킬수록 관벽에 산재하여 유동하던 기포가 관의 중심부근에서 유동함을 볼 수 있다. 이와 같은 현상이 발생하는 원인은 고분자 수용액의 경우 관벽 근처의 물속도가 증가되므로 상대적으로 기포가 관중심으로 이동하여 기포가 합체되어 유동하는 것으로 예측된다.
3. 수직관수로내로 A611P 보다 A601P 고분자수용액을 유동시킬 경우 순수수용액에 비해 유동 저항이 현저하게 감소됨을 규명하였다. 따라서 동일 펌프의 동력으로 A601P수용액을 수송시킬 경우 순수수용액에 비해 단위시간당 배출 유량이 증가됨을 규명하였다.
4. 동일한 동력으로 단위 시간당 유체의 수송능력을 증대시키므로 하수도 관로에서의 관의 직경을 감소시킬 수 있을 것으로 예측되므로 하수도 수송시스템을 소형화 할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 유동장내 유체의 벽면 마찰을 감소시켜 벽면의 유동속도가 증가하므로 홍수시에 도시의 침수방지와 각종 하수도 관내 음식쓰레기 및 토사 등을 비롯한 각종 부유물의 퇴적을 예방할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

1. Sellin, R. H. J. Hoyt, J. W. and Scrivener, O. 1982, "The Effect of Drag REduction Additives on fluid flows and Their Industrial Applications. Part 1:Basic Aspects.", J. Hydraulic Res. Vol. 20. No.29, pp. 235~292
2. de Gennes, P. G., 1990, "Introduction to Polymer Dynamics." Cambridge University Press, pp.34~54.
3. Durst, F. Schmit, K. and Brunn, P. O., 1989 "The Critical Shear Stress and Degradation of Polymer Additives in Turbulent Pipe Flow.", 4th Int. Conference on Drag reduction, Davos, Switzerland
4. Virk, P. S. Mickley, H. S. and Smith, K. A. 1970, "The Ultimate Asymptote and Mean Flow Structure in Toms' Phenomenon", Transactions of the ASME, Vol.92, No.2. pp. 488~493
5. Cha, K. O. and Kim, J. G., 1996, "A Study on the Drag Reduction with Polymer Additives." SAREK, Vol.8, No.2, pp. 198~207
6. Kalashnikov, V. N., 1994, "Shear-rate Dependent Viscosity of Dilute Polymer Solu- tions.", The Society of Rheology, Vol. 38, No. 5, pp. 1385~1403