

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 20, No. 2, 2000

## 수직원형관에서 첨가제에 따른 마찰저항 감소에 관한 연구

차경옥\*, 김재근\*\*

\* 명지대학교 기계공학과

\*\* 신성대학 기계·자동차계열

## A Study on the Drag Reduction by an Additives in Cylindrical Vertical Tube

K.O.Cha\*, J.G.Kim\*\*

\* *Department of Mechanical Engineering, Myongji University*

\*\* *Faculty of Mechanical & Automobile, Shin sung College*

### Abstract

When the liquid with the additive of ppm unit of a polymer flows, the pressure drop can be manifestly decreased compared to that of pure liquid : that's the drag reduction. This method is that a small amount of a polymer which doesn't make the transformation of the properties of the working fluid is dissolved into the working fluid, the links of chains of the polymer do a buffer action to the molecules of the working fluid which come out between near the wall of the pipe and the interface, so that the pressure drop is dramatically decreased. When we transport the fluid, therefore, we can save a lot of pumping power, or we can increase the transportation capacity with using the same transportation equipment. But when a polymer solution is also flowing in the fluid transportation system, the degradation which have a very close relation with the phenomena of the drag reduction occurs necessarily. When adding polymer to reduce the drag in two phase flow system, It is impossible to find some studies. This study is focussing on a searching examination for the experimental study

considering the mechanical degradation in the closed tow phase system to find out the conditions which could improve the pump capacity.

## 1. 서 론

관로내의 유동장으로부터 마찰저항을 가급적 줄이고자 작동유체에 합성 무기고분자, 합성고분자, 미세한 고체입자, 섬유입자, 계면활성제등의 첨가제를 혼합시켜 비뉴턴유체(Non-Newtonian Fluid)로 유동시키는 방법등이 많은 학자들에 의해서 연구되고 있다.<sup>1,2)</sup> 이중 소량의 수용성 고분자물질이 유체내에서 용해함으로써 작동유체의 물성치 변화를 거의 일으키지 않는 상태로 마찰저항을 감소시키는 방법이 가장 효과적이라고 하였다. 이런 학설은 레올러지 학자들에게는 주목을 끌지 못했지만 Toms<sup>3)</sup> 이후 1970년부터 실용적인 관심을 갖는 유체역학자들에 의하여 고분자물질 첨가에 따른 마찰저항 감소현상 및 고분자물질 첨가와 같은 점탄성유체의 특성에 관한 연구가 이루어져다. 특히 Toms는 고분자 수용액과 유기용매계에 국한되는 마찰저항감소현상을 발견하였지만 이런 현상은 실용적으로 뉴턴유체뿐만 아니라 비뉴턴유체의 유동장에서도 적용할 수 있다고 하였다. 순수 뉴턴유체인 수용액에 수십 ppm의 수용성 고분자를 첨가할 경우 마찰저항은 보통 수십 %정도이지만 어떤 경우는 고속유체의 저항이 90%까지 저하하는 예조차도 있다.<sup>4)</sup>

미국의 알래스카 원유 수송관(Transfer of Alaska crude oil pipeline)에서도 수송능력을 향상시키고자 소량의 고분자 물질을 원유수송관의 원유에 첨가했을 뿐만아니라 석유회사인 코노코(Conoco) 및 알코(Arco)들도 이러한 고분자 물질을 상품화하고 있다.

한편 밀폐계 시스템으로 구성된 각종 열교환기 및 열병합발전소의 난방시스템, 원유수송 네트워크, 오·폐수처리관로 등의 각종 산업시스템에서

유체를 수송할 때 펌핑동력에 막대한 비용이 소요되므로 이와 같은 수송관로에서 마찰저항을 보다 효과적으로 감소시킬 수 있는 방법이 개발된다면 에너지절약이란 차원에서 상당히 중요한 역할이 될뿐 아니라 적용분야도 광범위 하리라 생각된다.

국내에서도 각 도시마다 각종 산업 대단지 및 대단위 아파트 단지에 유입되고 있는 오·폐수를 각 지역의 종말처리장으로 유출하고 있으며, 이와 같은 각종 오·폐수의 급증으로 새로운 오·폐수 처리에 따른 관로를 계속 증설해야 하지만 오·폐수를 수송할 경우에 엄청난 펌핑동력을 요구할 것으로 예측되고 있다. 또한 서울근교의 신도시인 평촌, 일산, 분당, 수지, 목동등지의 열병합발전소는 사용하고 남은 폐열을 이용하여 인근 주거지역에 난방시스템을 가동하고 있지만, 이때 난방수송에 사용되는 연간 비용이 엄청나게 지불하고 있다. 더욱이 원유는 수송관을 통하여 장거리를 수송할 때 대기온도 및 화학적 변화로 인하여 원유내에 기포가 발생하기 쉽기 때문에 기-액 2상으로 유동하게 된다. 이때 작동유체의 어떠한 물성값에 영향을 미치지 않는 고분자물질을 첨가시켜 수송한다면 관로에서 발생하는 마찰저항을 보다 효과적인 감소를 얻을 수 있기에 수송비용을 효과적으로 줄일 수 있다고 본다.

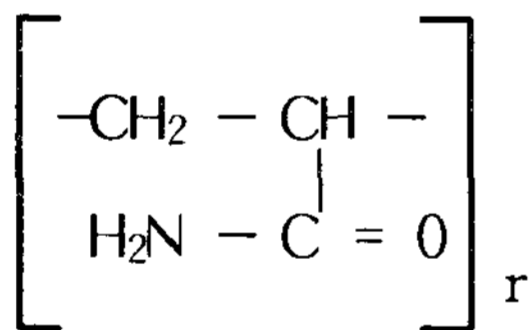
위의 추론으로 볼 때 소방자동차의 방수능력(pump ability)의 향상,<sup>5)</sup> 선박 및 잠수함의 항해 속도상승,<sup>6)</sup> 원유수송,<sup>7)</sup> 각종 유체를 수송할 때 펌프력의 향상<sup>8)</sup> 의학 분야인 동맥경화등을 치료할 때 혈관에 인체에 해롭지 않은 고분자물질을 첨가함으로써 혈액순환을 원활히 할 수 있는 것처럼 그 응용 및 적용은 광범위함으로 크게 기대되고 있다.

본 연구는 밀폐계 수직원관 내에 2상류가 유동할 때 순수 수용액과 고분자 수용액을 각각 수직상향 유동시켰을 때 마찰저항감소현상을 실험을 통하여 규명하고자 하며, 고분자 수용액의 기계적퇴화를 분석함으로써 유동장에 주기적인 고분자물질을 투여하여 지속적인 마찰저항감소효과에 어떠한 영향을 미치는가를 검토하는데 목적을 가졌다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 고분자물질의 물성치

본 실험에서 사용한 고분자물질(A611P)은 미국의 SP<sup>2</sup>사(Scientific Polymer Products Inc.)로부터 구입한 것으로서 분자량의 숫자는 대략 1,400만~1,600만개 정도로 구성되어 있고, 분자의 조성식은 아래와 같다.



여기서  $r$  은 반복 계수이다.

또한 A611P인 고분자 수용액은 그 동안 다수의 레올러지학자들에 의해 실험적으로 규명한 결과 전단박화유체(shear-thinning fluid)임을 제시하였다.<sup>9)</sup>

Kalashnikov<sup>10)</sup>는 모세관 점도계와 Zimm-Crothers가 고안한 회전점도계로 수용성인 PEO 계열 고분자물질의 종류, 농도, 온도 등을 실험의 변수로 취하여 고분자 수용액의 전단율에 따른 겔보기 점도를 측정하여 전단박화유체임을 확인하였다. 이때 사용된 수용성 고분자물질은 분자량수가 620만개인 Polyox WSR-301 고분자물질로서 본 실험에 사용한 A611P의 분자량 수와 유사

하다.

### 2.2 마찰저항의 감소현상에 따른 방정식

일반적으로 난류유동에서 점탄성유체의 마찰계수는 뉴턴유체의 마찰계수보다 작게 관찰되고 있다. 그러나 마찰저항 감소율은 한계가 있다. Cho 등<sup>(11)</sup>은 실험적 연구를 통해서 위 식을 보다 간략하게 다음과 같이 정리했다. 즉

$$600 < Re < 6,000 \text{ 일 때, } f = 0.20 Re^{-0.48} \quad (1)$$

그러나 최근에 고분자물질의 종류, 농도, 분자량, 퇴화의 정도, 용해의 화학적 성분 등이 난류 마찰성능에 영향을 미치는 인자(parameter)들로서 이들 관계를 설명하는데 사용되는 무차원변수는 Weissenberg수이나, 이때 유체의 특성( $\lambda$ )과 유동의 특성시간( $D/V$ )과의 비(ratio)로 정의되며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$W_s = (\lambda V)/D \quad (2)$$

또한 유체역학적으로 완전히 발달된 영역에서 난류의 마찰계수는 아래와 같다.

$$W_s < W_{sc} \text{ 일 때, } f = F(Re_a, W_s) \quad (3)$$

여기서  $W_{sc}$ 는 최소저항 점근선에서의 임계 Weissenberg수이다.

식(3)는 Weissenberg수가 임계값보다 작을 경우 난류의 마찰계수는  $Re_a$ 와  $W_s$ 의 함수임을 타내며, 반대로 Weissenberg수가 임계값보다 클 때의 난류의 마찰계수는 오로지  $Re_a$ 만의 함수가 된다. 점탄성 물질의 구조방정식(constitutive equation)에는 여러가지가 있지만 그 중 주로 관유동의 연구에 사용되는 것이 Powell-Eyring의 식이다.

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) (\sinh^{-1} \lambda \gamma) / \lambda \gamma \quad (4)$$

여기서  $\eta_{\infty}$ 는 무한 전단율 점성계수이며  $\eta_0$ 는 영 전단율 점성계수이다. 식(4)으로부터  $\lambda$ 를 실험적으로 구하면 식(2)으로부터  $W_s$ 를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 압력강하 실험결과를 이용하여 마찰저항 감소율(percent drag reduction)에 대한 식을 다음과 같이 정의했다. 즉

$$D.R(\%) = \frac{\Delta P_{NP} - \Delta P_{AP}}{\Delta P_{NP}} \times 100 \quad (5)$$

여기서,  $\Delta P_{AP}$ 와  $\Delta P_{NP}$ 는 각각 유체 중에 고분자를 첨가했을 때와 첨가하지 않았을 때 시험부에서 측정한 압력강하(pressure drop)이다.

### 2.3 고분자물질의 퇴화

고분자물질의 퇴화(degradation)에 관한 연구내용을 고찰해 보면<sup>12,13)</sup> 고분자 체인 내에서 결합이 끊어지고, 화학반응에 의해 물리적 성질이 변화하는 현상을 말한다. 고분자물질의 퇴화종류는 개시 반응의 형태에 따라 여러 가지의 퇴화로 구분할 수 있다. 그 중 고분자 수용액에 가해진 기계적 힘에 의하여 기계적퇴화가 주로 발생한다. 이때 기계적퇴화는 비화학적 퇴화로서 고분자에 가해진 응력에 의한 것을 뜻하며, 기계적퇴화는 고분자 체인(chain)이 주위 분자간의 미끄러짐(enthalpy relaxation)에 의한 것과 체인구조의 변화로 화학결합이 끊어지는 것이다. 고분자물질이 기계적인 힘을 받았을 때 화학결합이 끊어지기 위한 임계조건은 하나의 고분자에 저장될 수 있는 탄성에너지의 양과 고분자 물질의 변형을 받은 상태가 지속되는 시간에 의존하며, 가해진 에너지가 결합해리에너지(bond dissociation energy)보다 크게 될 때 화학결합은 끊어지게 된

다. 이와 같이 유동장에서 고분자첨가제에 의해 발생하는 난류 마찰저항 감소현상은 고분자 물질에 의한 기계적퇴화에 의해 저하된다. 이때 밀폐계에서 작동유체의 유동시간이 경과함에 따라 점진적으로 기계적퇴화는 가속화되어 저항감소 현상을 저하시키는 중요한 원인이 되고 있다. 그동안 선행된 연구에 의하면 저항을 감소시키기 위한 첨가제인 수용성 고분자물질은 PAAM (Polyacrylamide)와 PEO(Polyethylene oxide)이지만 밀폐계에서는 기계적퇴화로 인하여 그 효과가 매우 낮았으나, 합성 고분자인 A611P(Co-polymer) 고분자물질은 저항감소 효과가 매우 우수하다고 규명된 연구<sup>14,15)</sup>가 있었다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

그림 1은 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 이 실험장치에서 순환회로는 수직관 시험부의 내부에 기-액 2상류(gas-liquid two-phase flow)가 유동할 수 있도록 제작하였다. 실험장치는 공기압축기, 압력조절탱크, 압력조절기, 기-액 혼합부, 공기 및 물속도 측정부, 원심펌프, 기-액 분리탱크, 순환수 저장탱크, 시험부로 구성하였다. 액상의 순환회로에서 순환수 저장탱크내의 물을 용량이 3HP인 부식방지용 내산스테인레스 원심펌프에 의해서 순간유량계를 통과한 후 시험부로 유입시켰다. 또한 공기압축기에서 분사된 공기는 압력조절기에 의하여 일정한 압력을 조절된 후 순간유량계를 통과하고, 기-액 혼합부를 거쳐서 시험부로 유입시켰다. 시험부를 통과한 2상류는 기-액 분리탱크에서 분리된 공기는 대기로 방출시킨 후 순환수를 저장탱크에 저장함으로 일련의 순환회로를 완료하도록 한다. 이때 원심펌프와 순간유량계 사이에는 배수관을 순환수 저장탱크와 연결하였으며, 공기분사기와 압력조절기 사이에

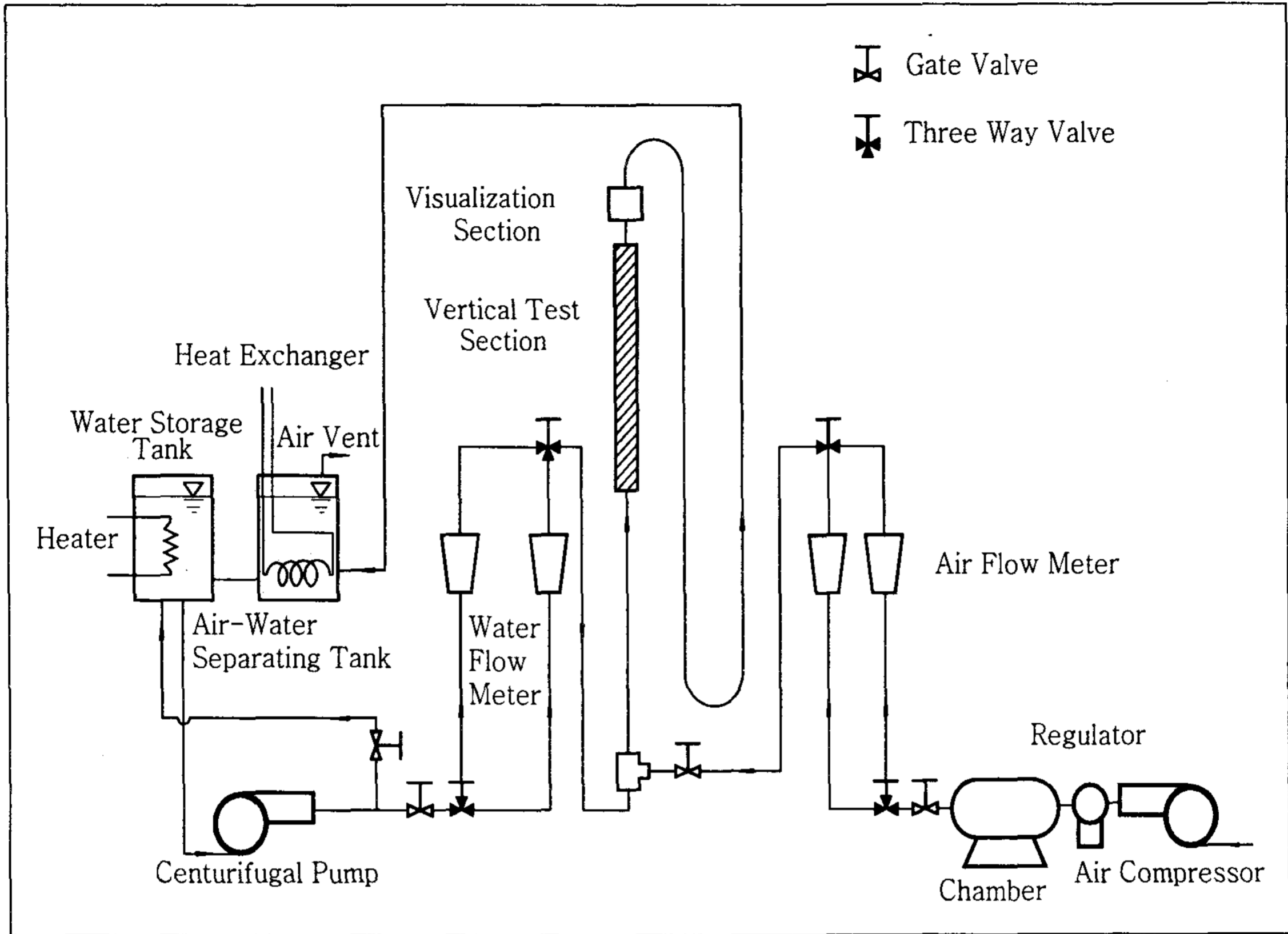


Fig. 1. Schematic diagram of the flow facility

공기저장탱크를 설치하여 압력파동을 안정화시킬 수 있도록 하였다. 공기와 순환수 유량은 시험부의 입구로부터 소정의 유동양식이 형성될 수 있도록 관로에 장치한 게이트 밸브에 의해 각 상의 유량을 조절하였다. 각 상의 결보기 속도계측용 순간유량계는 원심펌프와 공기압축기에서 각 상의 최대결보기속도를 계산함으로써 그 범위에 유량계를 선정하였으며, 유량계의 보정은 단위시간 당 관내에 흐르는 체적유량으로 검증하였다.

### 3.2 시험부 및 실험방법

그림 2는 시험부를 도시한 것으로 시험부는 내경 24mm, 두께 3mm, 길이 1,200 mm인 관을 사용하였다. 수직관 시험부는 기-액 혼합부로부터

1,400mm(L/D=58.3) 떨어진 위치에 설치하였고, 시험부 입·출구 1,100mm사이에 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 10.5kHz이지만 압력강하를 계측해 본 결과 차압신호는 2kHz이하이므로 압력변환기의 주파수응답 특성은 충분함을 확인하였다. 온도변화에 따르는 오차는 0~50 °C범위 내에서 0.1%이내이다. 압력변환기에 의해 검출된 차압신호는 차압지시계(Druck, model DPI 260)에 의해 차압측정치를 디지털로 직접 나타내며 아날로그 신호는 A/D변환기(Dantek,

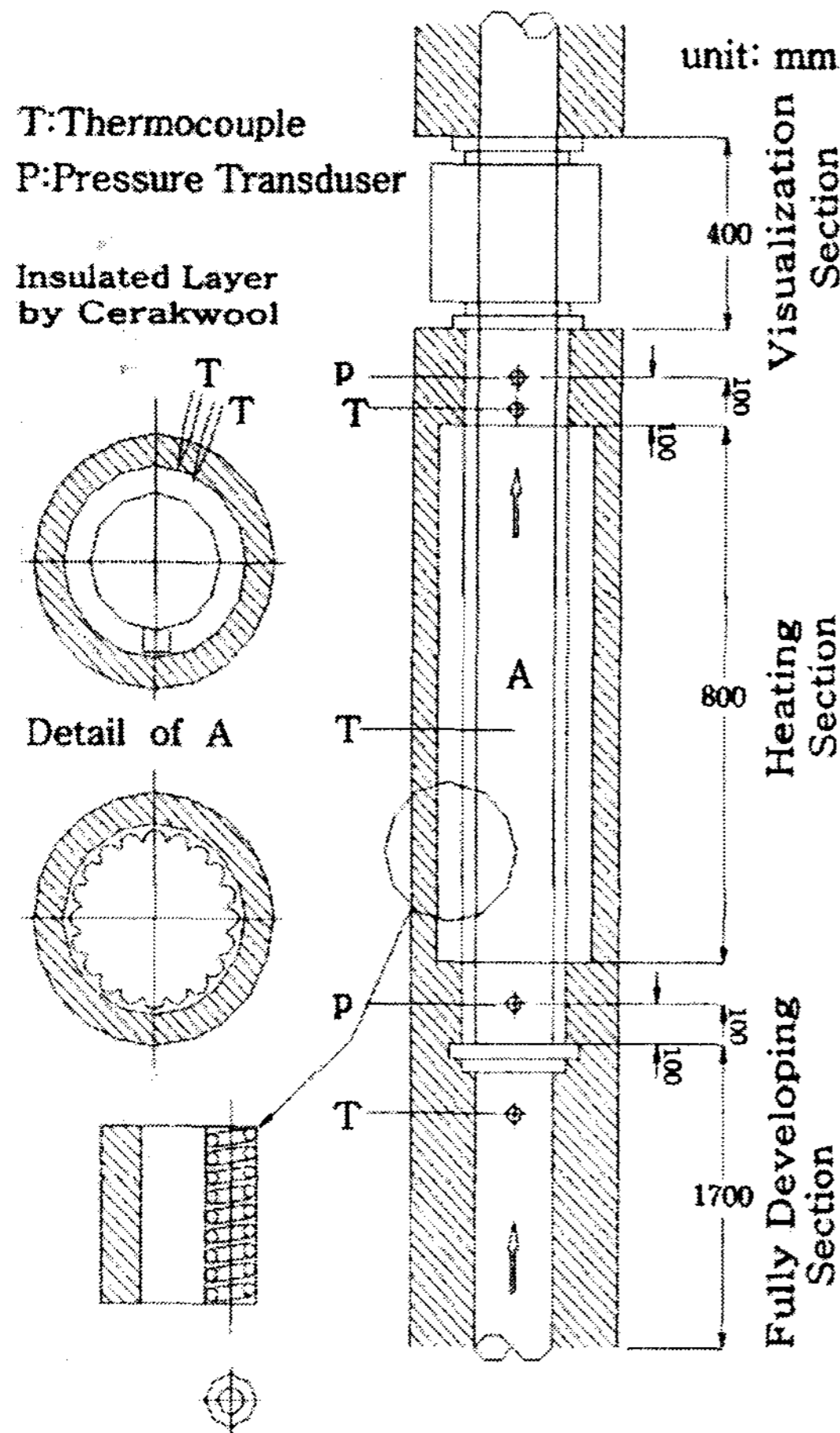


Fig. 2. Test section

model DAS-1600)로 입력시켰다. 측정된 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.

#### 4. 실험결과 및 검토

그림 3은 고분자수용액의 유동조건을 순수수용

액의 레이놀즈수와 동일하도록 순수수용액에 A611P의 농도를 50ppm~400ppm으로 첨가해서 유동시켰으며, 실험시작 후 1분이 지난 후 압력강하를 측정하고, 5분 간격으로 60분 동안 실험시간에 대한 마찰저항 감소율을 고찰하였다. 이들 데이터등을 종합적으로 살펴보면 실험시간 경과에 따른 마찰저항 감소율은 초기시간에 다소 급격히 감소되지만 실험을 시작하여 30분이 경과한 후에는 30분 이전에 비해 미소한 감소현상을 나타내고 있다. 이런 현상은 밀폐계를 순환되는 있는 고분자수용액이 실험장치중 펌프 및 유로의 형상 등에 의한 기계적퇴화가 실험초기 시간에 다소 급속히 발생하지만 약 30분이 경과한 후에는 기계적퇴화의 정도는 미소함을 볼 수 있다. 이러한 기계적퇴화가 진행됨에도 불구하고  $Re = 3.8 \times 10^4$ 이며 농도가 300ppm일때 실험시작 후 30분이 경과한 후에도 최대 약 60%이상의 마찰저항 감소율을 유지하고 있음을 확인할 수가 있다. 또한 농도를 증가시킬수록 마찰저항 감소율은 더욱 증가할 뿐만 아니라 기계적퇴화는 줄어들고 있음을 나타내고 있다. 그러나 농도가

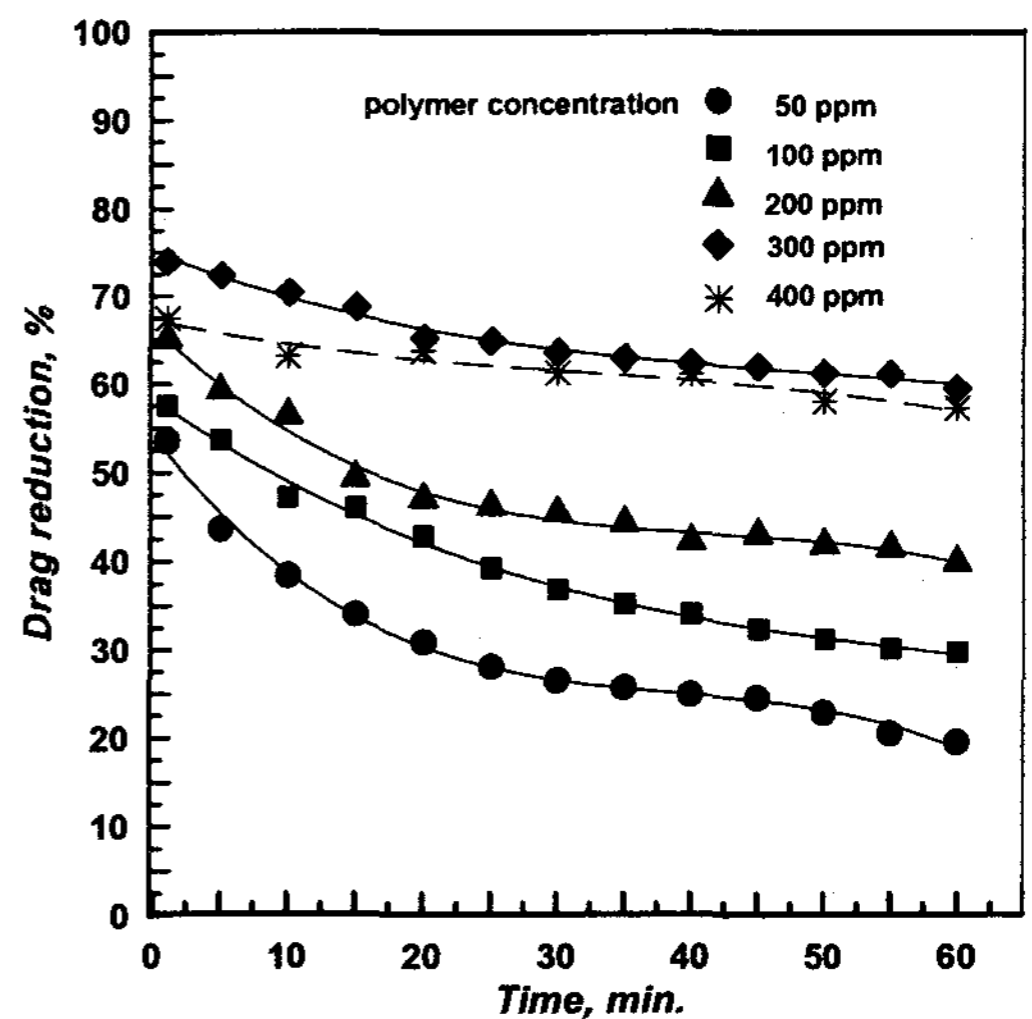


Fig. 3. Present drag reduction versus time for polymer concentrations at  $Re = 3.8 \times 10^4$

400ppm일 경우 오히려 300ppm일때보다 마찰저항 감소효과가 낮아지고 있다. 이는 수평관내 개방계 시스템에서 작동유체를 유동했을 때 발표한 Virk<sup>16)</sup>의 최대마찰저항감소 점근선(Virk's maximum drag reduction asymptote)의 존재를 수직 상향관에서도 확인할 수 있는 자료가 된다. 단 Virk의 경우 수평 개방계에서 고분자수용액의 농도가 수십 ppm에서 최대 마찰저항감소 점근선에 접근하지만 밀폐계 시스템에서는 농도가 300 ppm~400 ppm사이에 존재함을 알 수 있다.

밀폐계내로 고분자수용액을 유동시킨 후 시간이 30분 정도 지났을 경우 농도 50ppm~300ppm일때 약 27%~64%이므로 비록 시간이 30분이 지난 후라도 마찰저항감소 효과는 비교적 지속적으로 유지하고 있음을 알 수 있다. 이처럼 밀폐계에서는 실험초기에 고분자수용액은 기계적퇴화로 인하여 마찰저항 감소효과가 저하되나, 여러 가지 산업기기는 밀폐계로 구성되어 있기 때문에 유체의 유동장은 작동유체에 물성치 변화를 거의 주지 않는 A611P와 같은 고분자물질을 첨가한다면 유체수송에 있어 펌프동력을 크게 절감할 수 있게 된다. 그러나 유동장내 기계적퇴화로 인해 마찰저항 감소율을 지속적으로 유지하기 어려운 단점이 있다. 그러나 이를 보완하기 위해 유동장내 간단한 고분자물질 첨가장치를 설치하고, 시간에 따라 고분자물질을 주기적으로 첨가한다면 이런 단점은 충분히 해소할 수 있다고 예측된다.

그림 4는 순수수용액에 해당되는 레이놀즈수 변화와 A611P수용액의 농도변화에 따른 마찰저항 감소율을 비교한 것이다. 이때 A611P수용액의 농도가 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm, 400 ppm을 각각 유동시킨 후 시간이 30분 정도 경과된 후 계측한 자료를 비교한 것이다. 마찰저항 감소율은 레이놀즈수의 증가에 따라 미소하게 증가하지만, 레이놀즈수가 일정할때 고분자물질의 농도 증가에 따라 증가함을 나타내었다. 레이놀즈수가  $2.9 \times 10^4$ 이고, 고분자수용액의 농도가 50 ppm보다

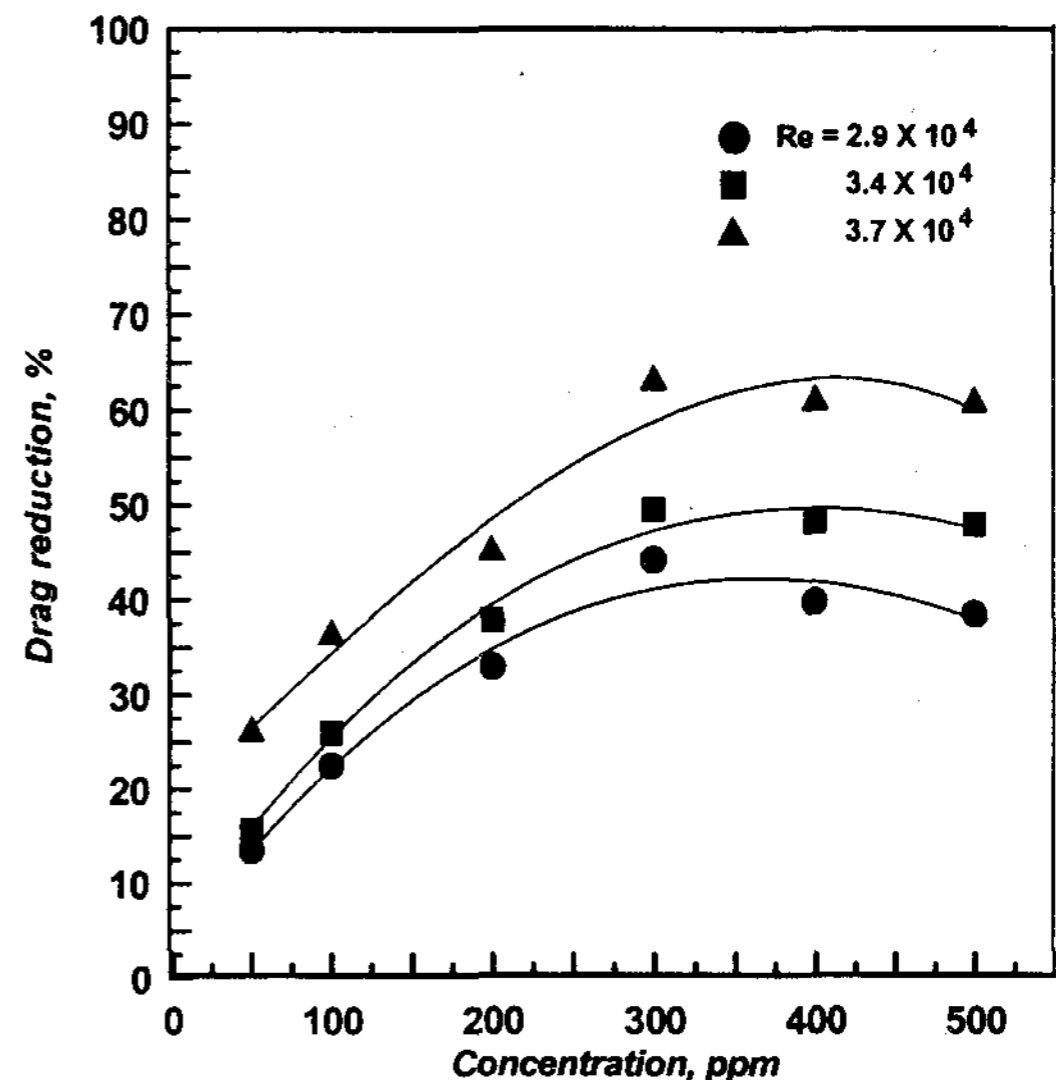


Fig. 4. Effect of concentration on the drag reduction measure data after 30 minutes from the start of the circulation of the working fluid in the test loop

100 ppm일 경우가 마찰저항 감소율이 58%로 증가하며, 100 ppm일때 보다는 200 ppm일 경우가 52%정도 증가하며, 200 ppm보다 300 ppm일 경우가 29%증가하며, 400 ppm과 500 ppm 사이에는 차이가 거의 없음을 나타내고 있다. 이런 경향은 고분자수용액의 농도를 증가시키기에 따라 마찰저항 감소효과는 일정한 범위에서는 증가하나, 농도를 너무 증가시키면 오히려 마찰저항 감소효과에 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 따라서 고분자수용액의 농도와 마찰저항 감소효과는 비선형적인 관계임을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Tiu<sup>17)</sup> 등에 의하면 레이놀즈수가 일정할 때 고분자수용액(AP-30)의 농도를 변화시키며 마찰저항 감소현상을 규명한 결과와 동일한 경향이다.

그림 5는 레이놀즈수가 일정할 때 마찰저항 감소율과 고분자수용액의 농도변화에 따른 상관관계를 도시한 그림으로 수직관 상향유동에서 마찰저항 감소율(D.R)과 고분자수용액의 농도(C)와의 관계를 식(6) 및 (7)과 같이 규명하였다. 레이놀즈

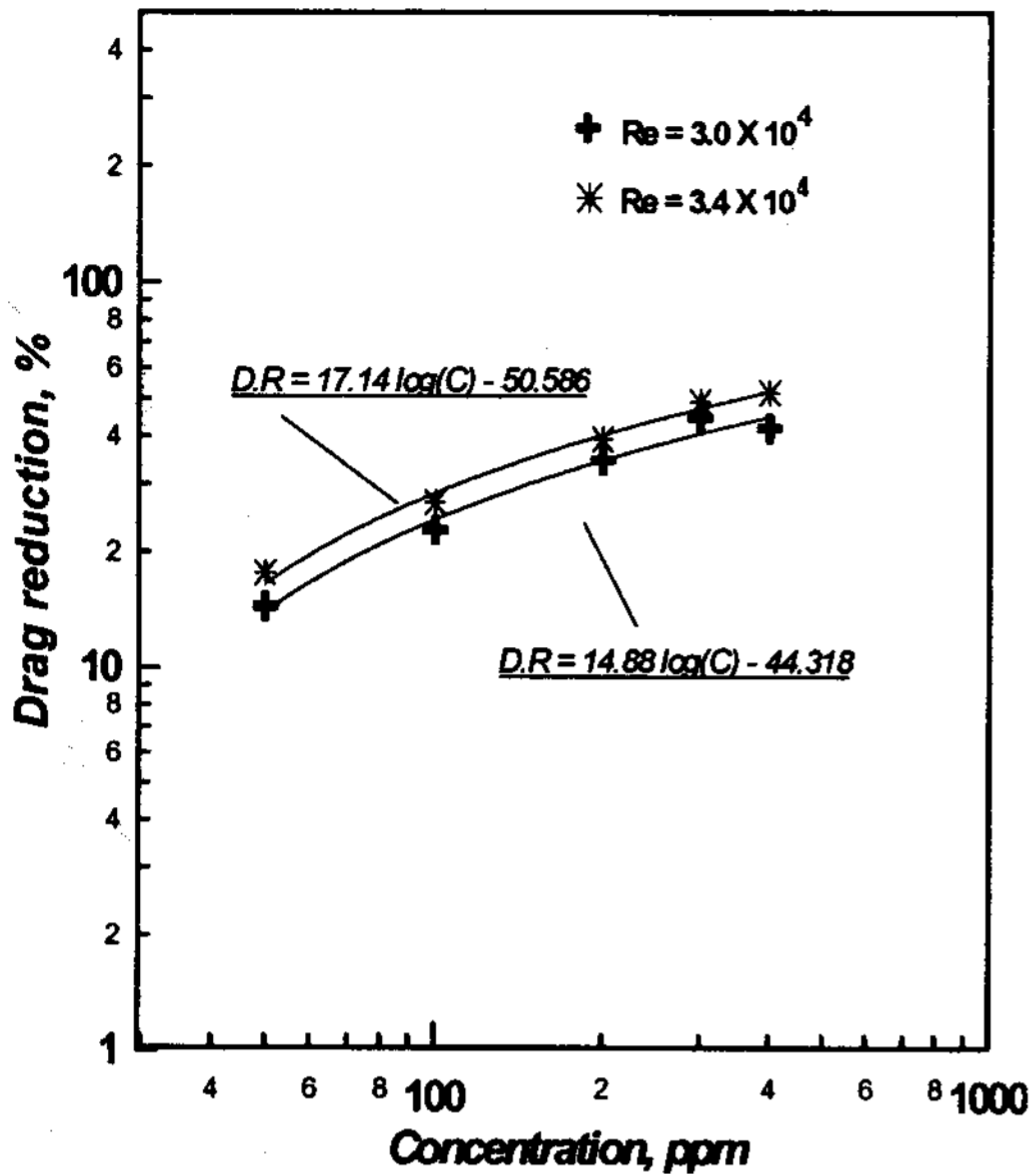


Fig. 5. Correlation of polymer concentration versus drag reduction

수  $Re = 3.0 \times 10^4$  일 경우 마찰저항 감소율은  $\log(C)^{14.88}$ 에 비례하여 증가하며,  $Re = 3.4 \times 10^4$  일 경우는  $\log(C)^{17.14}$ 에 비례하여 증가함을 규명하였다.

$$D.R. = 14.88 \log(C) - 44.318 \quad (6)$$

$$D.R. = 17.14 \log(C) - 50.586 \quad (7)$$

그림 6은 겔보기물속도( $J_{SL}$ )를 2.5m/s, 겔보기공기속도( $J_{SA}$ )를 0.25m/s로 유동시켰을 때와 A611P 수용액의 농도를 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm으로 하여 공기와 함께 유동시켰을 때 실험시간에 따른 마찰저항 감소율을 비교한 그림이다. 고분자수용액의 농도는 증가할수록 기계적퇴화의 정도는 작으며, 동일한 시간대에 농도증가는 마찰저항 감소효과의 증가로 나타내고 있다. A611P고분자물질이 밀폐계내에 2상류로 수직상향 유동할 경우 난류마찰저항을 현저히 줄일 수 있는 감소

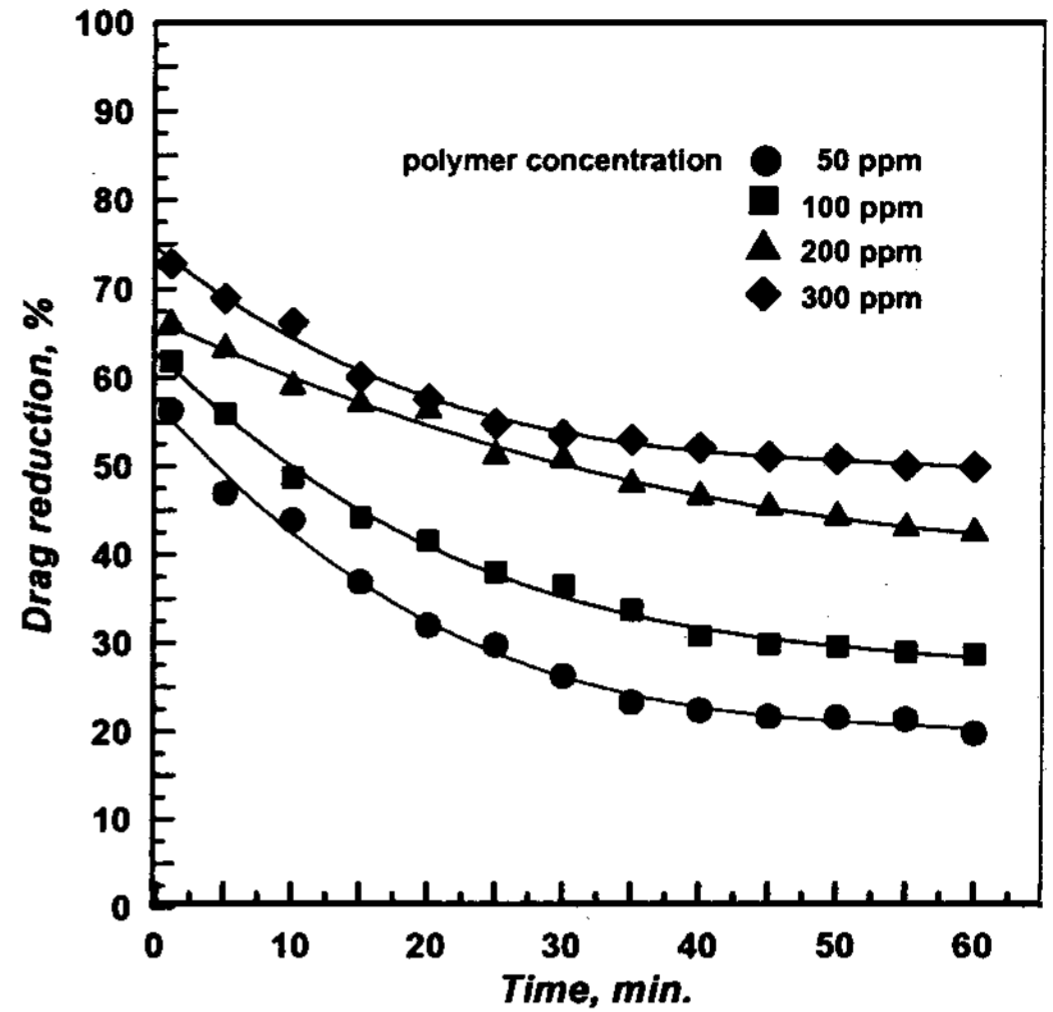


Fig. 6. Percent drag reduction versus time for polymer concentration at  $J_{SL} = 2.5\text{m/s}$ ,  $J_{SA} = 0.25\text{m/s}$

제로 판단된다. 따라서 냉난방 순환회로, 화학공정, 냉각탑, 열교환기뿐만 아니라 원유의 장거리 수송 등 여러 분야의 유동상태에 따라서 발생하거나 발생 가능성이 있는 2상류 유동장에 A611P와 같은 고분자물질을 첨가하면 실험결과와 같이 큰 마찰저항 감소효과를 얻을 수 있다고 예측된다. 이로 인하여 시스템의 유지비를 크게 절감할 수 있다. 최근 국내에서 시설 설비를 하고 있는 지역 냉·난방 네트워크 시스템내의 유체유동시 고분자물질을 첨가함으로써 마찰저항 감소효과를 극대화시킬 수 있다고 예측된다. 또한 산업기기 중 2상유동 시스템은 대다수가 밀폐계로 구성되어 있으며, 이런 유동장에 가격이 저렴한 A611P와 같은 고분자물질을 첨가하여 수송시켰을 때 막대한 펌프의 동력을 절감할 뿐만 아니라 적용을 달리하면 고분자수용액의 경우 단위 시간당 배출 유량이 증가되므로 유동장의 직경을 줄일 수 있기에 2상유동시스템을 소형화로 구성할 수도 있다. 앞으로 많은 레올러지학자들의 계속적인 연구로 인해 A611P고분자물질보다 유동저항을 더욱 많이 줄일 수 있는 고분자물질이 개발된다면 이로 인한 기대효과는



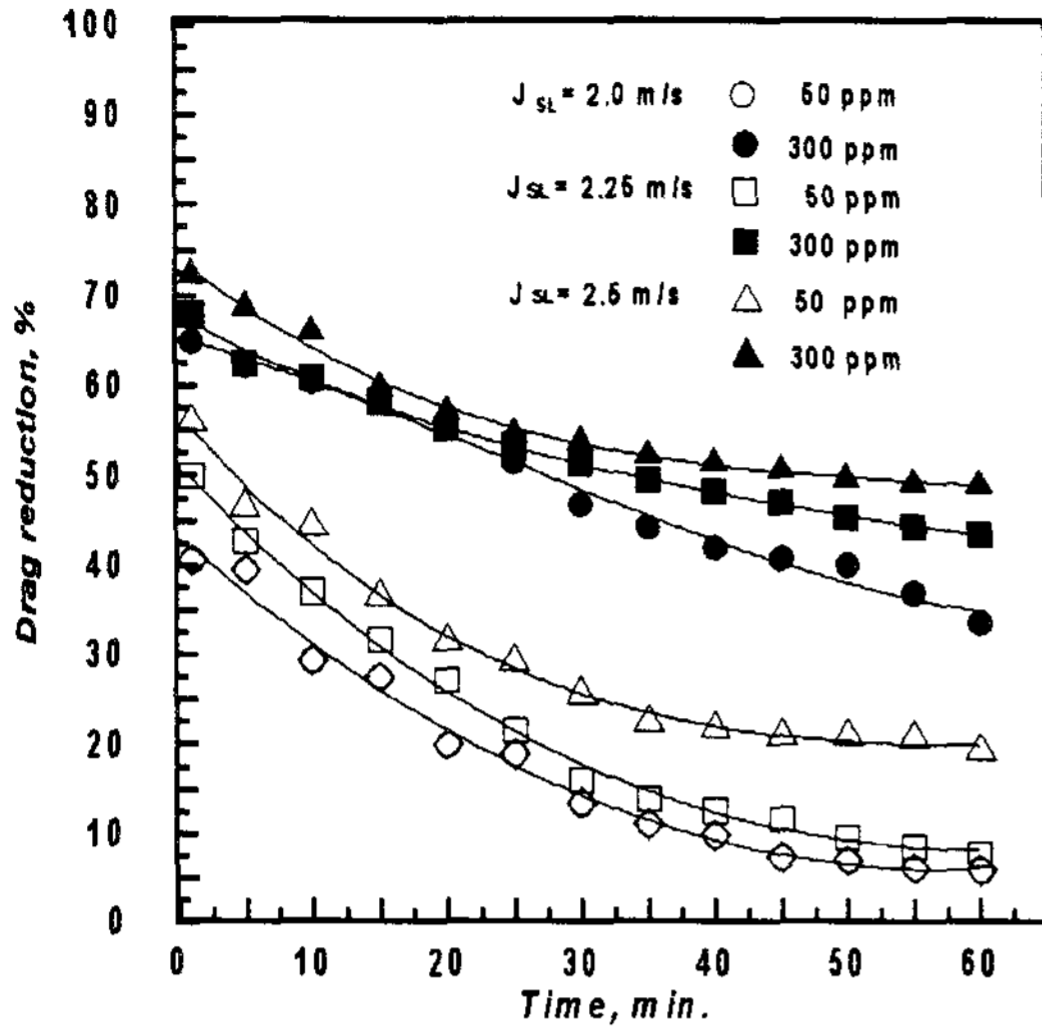


Fig. 7. Comparison of percent drag reduction at  $J_{SA} = 0.25 \text{ m/s}$

더욱더 커지리라 예상된다.

그림 7은 고분자수용액의 농도가 50 ppm 및 300 ppm일때 겉보기 공기속도  $J_{SA} = 0.25 \text{ m/s}$ 로 일정하게 유지하면서 겉보기 물의 속도  $J_{SL}$ 의 변화에 따른 마찰저항 감소율 및 기계적퇴화 정도를 비교 도시한 것이다. 고분자수용액의 농도를 동일하게 하고  $J_{SL}$ 의 증가에 따라서 마찰저항 감소현상은 증가하지만, 물속도를 증가시킬 경우 기계적퇴화의 요인보다 마찰저항 감소율의 효과를 극대화하려는 성질을 가지고 있기에 장기간 2상류를 유동시킬 경우 액상의 속도가 클수록 마찰저항 감소효과를 극대화할 수 있음을 규명하였다. 또한 밀폐계에서 A611P 고분자물질과 같이 작동유체의 물성치에 대한 변화를 주지 않는 고분자물질을 소량으로 투입했을 때 약 60%이상의 마찰저항을 감소시킨다는

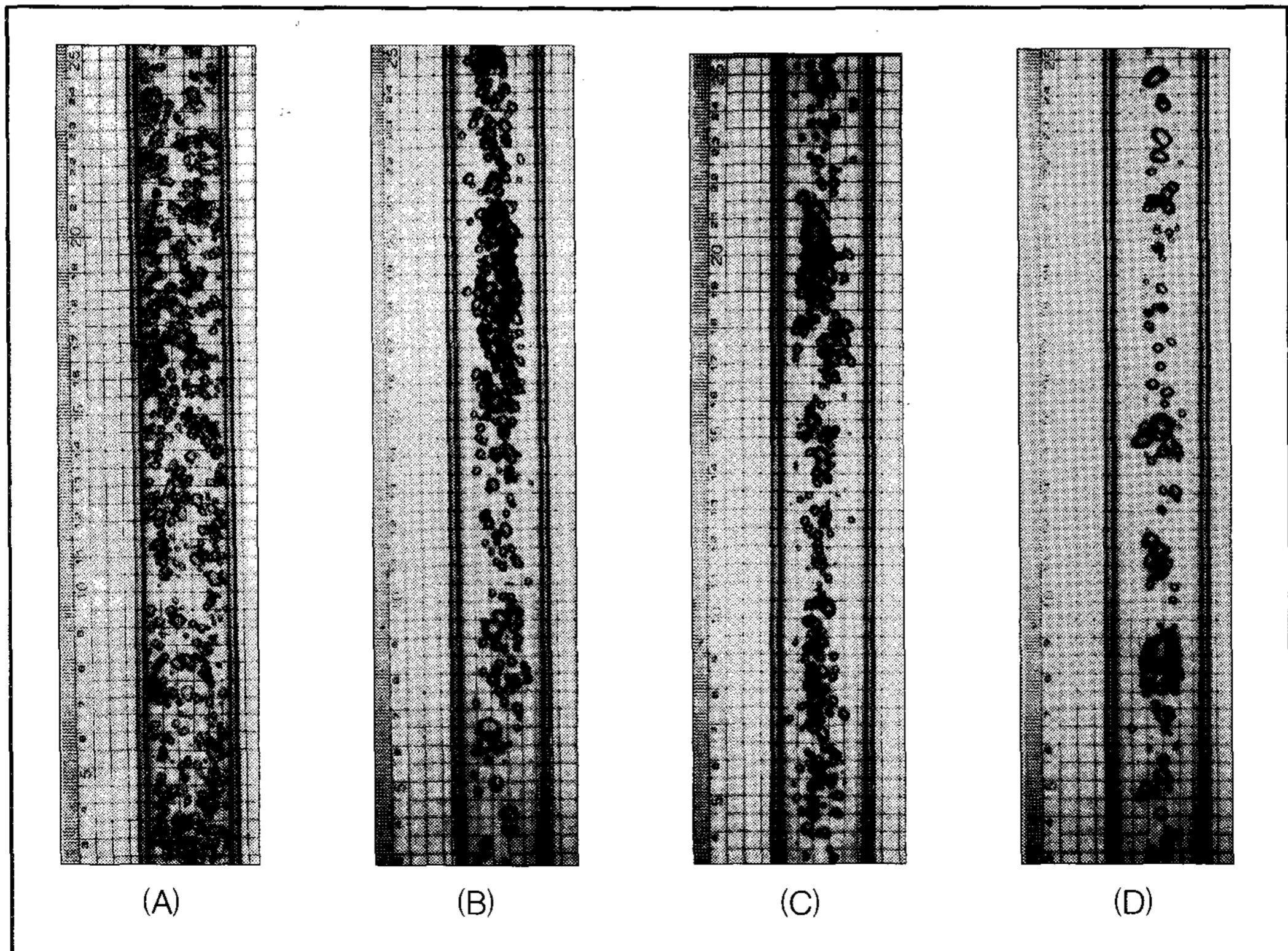


Fig. 8. Comparison of bubble behaviors with and without A611P additives at  $J_{SL} = 2.0 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA} = 0.25 \text{ m/s}$  (A) only two phase flow (B) 100 ppm, (C) 200 ppm, (D) 300 ppm.

것은 펌핑동력을 이에 상응하는 만큼 줄일 수 있다는 것이다. 따라서 에너지 절약이라는 차원에서 매우 중요한 역할을 할 것으로 예측된다.

그림 8은 겔보기 물속도  $J_{SL} = 2.0 \text{ m/s}$ , 겔보기 공기속도  $J_{SA} = 0.25 \text{ m/s}$ 를 유지하고 고분자물질을 첨가했을 경우와 첨가하지 않았을 경우 유동형태를 사진 촬영한 것이다. 고분자물질을 첨가하지 않은 0 ppm인 물을 시험부내에 유동시켰을 경우 작은 기포가 시험관 전체에 균일 분포하면서 유동하고 있으나, A611P수용액의 농도를 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm으로 하여 각각 유동시켰을 때는 고분자물질을 첨가하지 않았을 경우 보다 기포의 크기가 성장하여 관의 중심부근에서 유동함을 나타내고 있다. 이는 고분자수용액이 기포 주위로부터 유선의 변형을 창출하므로 기포의 합체현상을 초래한다고 사료된다. 고분자수용액을 유동시킬 경우 순수 수용액일 때 보다 기포가 관의 벽근처에서 중앙으로 이동하는 것은 고분자물질에 의해 관의 벽근처에서 마찰이 감소하며 물의 속도를 증가하게 되고 이로 인해 기포가 관의 중심쪽으로 이동한다고 예측된다.

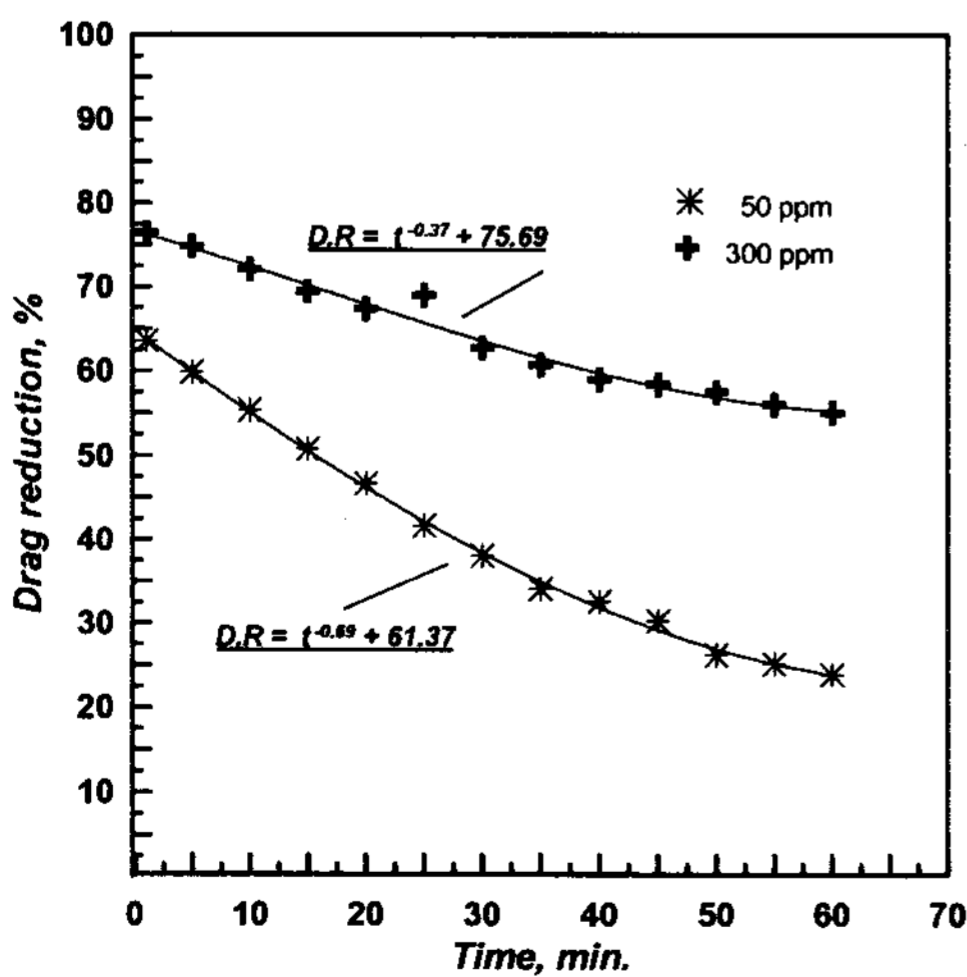


Fig. 9. Correlation of drag reduction versus polymer concentration at  $J_{SL} = 2.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA} = 2.0 \text{ m/s}$

그림 9는 겔보기 물의 속도  $J_{SL} = 2.5 \text{ m/s}$ , 겔보기 공기의 속도  $J_{SA} = 2.0 \text{ m/s}$ 에서 유동시간에 따른 마찰저항 감소율을 표시하여 상관 관계를 도사한 것이다. 이때 고분자수용액의 농도는 50 ppm과 300 ppm일때로서 마찰저항 감소율(D.R)은 밀폐계내를 유동할때 유동시간(t)에 따라 비례하여 감소함을 알 수 있다. 농도가 50 ppm 일때의 마찰저항감소율은  $t^{-0.69}$ 에 비례하여 감소되고, 농도가 300 ppm 일때는  $t^{-0.37}$ 에 비례함으로서 감소됨을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 고분자수용액의 농도증가는 유동시간에 따라 기계적퇴화가 미소하며, 유동시간에 따라 고분자물질을 주기적으로 첨가한다면 마찰저항 감소효과가 지속적으로 유지할 수 있을 것으로 예측된다.

$$D.R = t^{-0.69} + 61.37 \quad (8)$$

$$D.R = t^{-0.37} + 75.69 \quad (9)$$

## 5. 결 론

본 연구에서는 밀폐계 수직원관 내에 작동유체를 상향유동시켜며 합성고분자물질 A611P(Co-polymer)인 고분자수용액을 첨가하여 유동시킬때 기계적퇴화를 고려한 마찰저항감소율을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 농도를 증가할수록 마찰저항 감소효과는 더욱 증가할 뿐만 아니라 반면 기계적퇴화의 크기가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그러나 농도가 300ppm일때보다 400ppm일때 마찰저항 감소효과가 낮아지므로 최저 마찰저항감소는 점근선이 300ppm~400ppm사이에 존재함을 예측하였다.
2. 밀폐계 수직관에서 마찰저항감소 현상을 고분자수용액의 농도 및 유동시간과의 상관 관계식을 규명하였다. 따라서 유체의 수송관로에

동일한 시간경과 후에 주기적으로 고분자물질을 투여한다면 지속적인 효과를 계속 유지할 수 있음을 규명하였다.

3. 밀폐계내에서 마찰저항 감소율 및 기계적퇴화는 작동유체의 유동시간과의 상관관계가 있음을 규명하였다 즉, 농도가 50ppm 일때는 마찰저항 감소율은  $t^{-0.69}$ 에 비례하며, 농도가 300 ppm 일때는  $t^{-0.37}$ 에 비례한다.

### 참 고 문 헌

1. de Gennes, P. G., "Introduction to Polymer Dynamics.", Cambridge University Press, 1990, pp.34~54.
2. Burger, E. D., Chorn, L. G., and Perkins, T. K. "Studies of drag reduction conducted over a broad range of pipeline condition when flowing prudhoe bay crude oil," J. Rheol., Vol. 24, 1980, pp.603~626.
3. Toms, B. A., "Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tube at Large Reynolds Numbers", Proc. 1st Int. Congress on Rheology, Vol. 2, No. 135, 1948, pp.135~141.
4. Sellin, R. H. J., "Drag reduction in sewers : First results from a permanent installation," J. Hydraulic Res., Vol. 16, 1978, pp.337~351
5. Sellin, R. H. J. Hoyt, J. W. and Scrivener, O., "The Effect of Drag Reduction Additives on fluid flows and Their Industrial Applications. Part 1: Basic Aspects.", J. Hydraulic Res. Vol.20, No.29, 1982, pp.235~292.
6. Astarita, G., "Possible Interpretations of the Mechanism of Drag Reduction in Viscoelastic Liquids.", Ind. Eng. Chem. Fundamentals Vol.4, 1965, pp.354~368.
7. Gadd, G. E., "Turbulence Damping and Drag Reduction Produced by Certain Additives in Water.", Nature, Vol.206, 1965, pp.463~469.
8. Gadd, G. E., "Differences in Normal Stress in Aqueous Solutions of Turbulent Drag Reducing Additives.", Nature, Vol. 212, 1966, pp.1348~1353.
9. Mizunuma, H and Kato H., "Influence of Polymer Additives on Transitional Plane Poiseuille Flow.", J. JAME Vol.31. No.2, 1988, pp.209~217.
10. Kalashnikov, V. N., "Shear-rate Dependent Viscosity of Dilute Polymer Solutions.", The Society of Rheology, Vol. 38, No.5, 1994, pp.1,385~1,403.
11. Choi, U. S. Cho, Y. I. and Kasza, K. E., "Screening and Degradation Tests of Linear-Polymer Additives for District Heating Applications.", Report of Argon National Laboratory, ANL-87-49, 1987.
12. Burger, E. D., Chorn, L. G., and Perkins, T. K., "Studies of drag reduction conducted over a broad range of pipeline condition when flowing prudhoe bay crude oil," J. Rheol., Vol. 24, 1980, pp.603~626
13. Kenis, P. R., "Turbulent Flow Friction Reduction Effectiveness and Hydrodynamic Degradation of Polysaccharides and Synthetic Polymers.", J. Applied Polymer Science, Vol. 15, 1971, pp.607~618
14. 차경옥, 김재근, "고분자물질 첨가에 따른 마찰저항감소에 관한 연구." 냉동및공기조화학회 논문집, Vol.8, No.2, 1996, pp.198~207.

15. 차경옥, 김재근, 양희준, “합성 고분자물질 A611P를 첨가한 기액2상 수직상향의 유동특성에 관한 실험적연구”, 냉동및공기조화학회 논문집, Vol.10, N0.4, 1998, pp.398~410.
16. Virk, P. S. and Mickley, H. S., “The Ultimate Asymptote and Mean Flow Structure in Toms’ Phenomenon”, Transactions of the ASME, of Applied Mechanics, Vol. 37, 1970, pp.488~493.
17. Tiu, C. and Chee, N., “Turbulent Flow Behaviour of Dilute Polymer Solutions in a Annulus”, Canadian J. Chem. Engin. Vol. 57, 1979, pp.572~577.