

# 전단박화유체의 수직상향 난류유동시 저항감소에 관한 연구

차경옥\* · 김봉각\*\* · 김재근\*\*\*  
(1997년 10월 21일 접수)

## A Study on the Drag Reduction of Shear Thinning Fluid with Vertical upward Turbulent Flow

Kyong-Ok Cha, Bong-gag Kim and Jea-Geun Kim

**Key Words:** Polymer Solution(고분자 수용액), Pressure Drop(압력강하), Drag Reduction(저항감소)Local Void Fraction(국부 보이드율), Shear Thinning Fluid(전단박화유체).

### Abstract

The drag reduction is the phenomenon that occurs only when the shear stress from the wall of pipe is beyond the critical point. The drag reduction increase as the molecular weight, concentration of the polymer and Reynolds number increase, but it is limited by Virk's maximum drag reduction asymptote. Because of the strong shear force for the polymer on the turbulent flow, the molecular weight and the drag reduction do not decrease. Such mechanical degradation of the polymer occurs in all polymer solvent systems. This paper is to identify and develop high performance polymer additives for fluid transportations with the benefits of turbulent drag reduction. In addition, drag reduction in vertical flow by measuring the pressure drop and local void fraction on vertical-up flow of close system is evaluated.

### 1. 서 론

어류들이 물에서 이동할 때 그 어류의 유영 속도를 유체역학 측면에서 관찰해 보면은 의외로 고속임을 알 수가 있다. 그 이유는 어류의 체표로부터 분비되어진 점탄성체의 성질을 갖는 점액물질의 작용이라는 것이 밝혀졌다.<sup>(1)</sup>

유체의 난류유동시 저항 감소는 난류저항과 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에 마찰저항을 줄일 수 있다는 것은 곧 에너지 절약이라는 관점이며, 일부 유체역학자 및 고분자화학자들에 의해 유체의 유동장에 고분자물질 첨가시 난류저항 억제에 관한 연구가 폭넓게 수행되고 있지만, 이 현상에 대한 이론적 확립 및 정량적인 설명이 상당히 부족한 실정이다, 그러나 지금까지 현상학적으로

규명한 결과에 따르면은 분자량이 큰 고분자물질의 점탄성이 난류저항 억제에 중요한 역할을 한다고 잘 알려져 있다. 그러므로 유체의 유동장내 난류저항을 감소시키기 위해 작동유체에 미세고체입자, 섬유입자, 계면활성제, 생물학적 첨가제 등을 혼합하여 비뉴턴유체(Non-Newton fluid)로 흐르게 하는 방법이 여러 연구자들에 의하여 연구되어 오고 있다.<sup>(2)-(3)</sup> 더욱이 소량의 수용성 고분자물질을 유체 내에 용해시켜 작동유체의 물성치 변화를 거의 일으키지 않고 저항을 감소시키는 방법이 가장 효과적이라고 알려졌다.<sup>(4)</sup> 이 때 사용되는 고분자 수용액은 전단박화(shear-thinning)유체로서 난류영역에서 뉴턴유체와 유사한 결보기 점도를 가져야 한다.

고분자물질에 따른 마찰저항 감소현상은 뉴턴유체뿐만 아니라 비뉴턴유체에서도 적용 가능할 것으로 예상된다. 즉, 소방차의 방수능력(pump ability)의 향상, 선박 및 잠수함의 항해속도의 상승, 원유수송, 각종 유체수송에 있어서 펌프력향상 등에 적용이 가능하리라 예측된다. 또한 동맥

\* 회원, 명지대학교 기계공학과

\*\* 충청대학 기계설계학과

\*\*\* 회원, 신성대학 자동차 계열

경화와 같은 병의 치료시 혈관에 해롭지 않은 고분자물질을 혈액 순환계에 첨가함으로써 혈액순환을 원활히 할 수 있는 것처럼 그 응용 및 적용이 크게 기대된다. 특히 열병합발전소에서 난방시스템이라든지, 원유수송네트워크등 많은 산업기기에서 유체 수송시 펌핑동력에 막대한 비용이 소요되지만, 이처럼 수송 관로에서 마찰저항의 감소를 보다 효과적으로 감소시킬 수 있는 방법이 규명된다면 에너지 절약 관점에서 매우 중요한 방법이 될 뿐 아니라 적용 분야는 더욱 넓어질 것으로 예측할 수 있다. 그러나 비뉴턴유체의 난류유동시 난류 형성과 고분자물질의 동력학에 대한 이론이 아직도 정립되지 않은 상태에서 이를 정량화 하는 것은 매우 어려운 실정이다. 또한 지금까지 대다수의 저항 감소에 관한 연구는 주로 수평관에서만 수행되었는데 이는 고분자물질의 기계적퇴화(mechanical degradation)를 무시하기 위해서 수송관을 개방계로 택한 것으로 사료된다. 그 동안 2상유동장에서 고분자물질에 의한 저항 감소현상에 관한 연구는 매우 미진한 실정이며 이중 대다수의 연구<sup>(5)-(6)</sup>는 수평관내에서 수행되었다. 그러나 수직 밀폐계로 구성된 산업기기가 많은데도 불구하고 이에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 밀폐계 실험 장치인 수직원관 내에 우선 뉴턴유체인 물을 순환시킬 경우와 합성고분자물질 A611P(Co-polymer)를 물에 첨가하여 흐르게 할 경우에 감소되는 저항을 실험적으로 규명함으로써 펌프의 동력을 감소시킬 수 있는 방법을 규명하고자 한다. 이로서 동일 펌프의 동력으로 A611P를 첨가한 수용액을 수송시킬 경우 순수수용액에 비해 단위 시간당 배출 유량이 증가시킬 수 있다면 수송비용을 크게 절약할 수 있다. 또한 기-액 2상유가 수직상향 유동시 고분자물질이 기포에 미치는 영향도 고찰함으로써 저항 감소현상과 유동특성과의 관계를 살펴보고자 한다.

## 2. 기초이론

유체의 전단응력 또는 겔보기 점도와 전단률의 상호관계는 비뉴턴유체의 점성에 대해서 가장 광범위하게 사용되고 있는 것이 Power law 모델이다. Power law 모델은 전단응력( $\tau$ )은 전단 변형률( $\dot{\gamma}$ )의  $n$ 승에 비례하며 다음과 같다.

$$\tau = m \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은 유동 지수이고,  $m$ 은 농도의 파라메타이다.

이 모델에서 겔보기 점성( $\eta$ )은 아래 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

이때 식 (1)과 (2)에서 겔보기 점도를 전단응력의 항으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = m^{1/n} \tau^{(n-1)/n} \quad (3)$$

어떤 유체의 점성 거동을 결정하기 위해서는 지수  $n$ 과 변수  $m$ 을 알아야 한다. 만약  $n=1$ 이면 뉴턴유체로서 변수  $m$ 은 점성 계수( $\mu$ )와 같게 된다. 또한  $n < 1$ 이면 점도는 전단변형률 또는 전단응력이 증가함에 따라 감소한다. 이와 같은 유체는 전단박화 유체로 칭하고 있다. 그리고  $n > 1$ 이면, 점도는 전단응력의 증가에 따라 증가하는데 이와 같은 유체를 전단 강화(shear-thickening)유체로 불러진다. 위의 유체들은 주어진 온도와 압력 하에서 임의의 한 점에 대한 전단응력이 순간변형률에만 의존한 것이다. 이러한 유체들은 시간에 무관한 비뉴턴 점성유체 또는 순수점성 비뉴턴유체이다. 이상과 같이 Power law 모델은 간단하고 다양하지만 매우 큰 한계점을 가지고 있다. 즉, 대부분 비뉴턴유체에서 관찰되는 전단 박화유체의 경우 전단응력이 "0"에 접근함으로써 겔보기 점도는 " $\infty$ " 임으로 항복응력을 가지지 않는다는 것을 의미하므로 비현실적인 한계가 있다. 그러나 본 연구에서 사용한 고분자수용액은 다수의 레올로지 학자들에 따라 실험적으로 규명한 결과 전단박화 유체임을 제시하였다.<sup>(7)</sup>

## 3. 실험

### 3.1 실험장치

Fig.1은 본 실험에서 사용한 실험 장치를 도시한 그림으로서 순환 회로는 수직관 시험부 내부

에 기-액 2상류가 순환할 수 있도록 설계, 제작하였다. 본 실험에서는 액상만 흐르게 할 경우와 액상과 기상이 공존하여 흐르게 하는 경우에 실험적 결과를 고찰하고자 한다. 실험 장치는 공기 압축기, 압력조절탱크, 압력조절기, 기-액 혼합부, 공기 및 물 속도 계측부, 원심펌프, 기-액 분리탱크, 순환수 저장탱크, 시험부로 구성하였다.

액상의 순환회로는 순환수 저장탱크 내의 물을 용량이 3마력인 부식방지용 내산 스테인레스 원심펌프에 의해서 순간유량계를 통과한 후 시험부로 유입되며, 공기압축기에서 분사된 공기는 압력조절기에 의하여 일정한 압력으로 조절된 후 순간유량계를 통과하고 기-액 혼합부를 거쳐 시험부를 통과한다. 시험부를 통과한 2상류는 기-액 분리탱크로부터 분리된 공기는 대기로 방출시킨 후 순환수를 저장탱크에 저장되어 일련의 순환회로를 완성한다. 이때 원심펌프와 순간유량계 사이에는 배수관을 순환수저장탱크와 연결하였으며, 공기분사기와 압력조절기 사이에 공기저장탱크를 설치하여 각상의 압력파동을 안정화 되도록 하였다.

공기와 순환수 유량은 시험부의 입구부에서 소정의 유동양식이 형성되도록 관로에 장치한 게이트밸브로 각 상의 유량을 조절하였다. 각 상의 걸보기 속도계측용 순간유량계는 원심펌프와 공기압축기에서 각 상의 최대 걸보기속도를 계산하므로써 그 범위에 맞는 유량계를 선정하고, 유량계의 보정은 단위시간당 관내에 흐르는 체적유량으로 검증하였다. 본 실험에서 사용한 액상의 작동유체는 순수수용액과 고분자수용액으로 용량이 300ℓ 용량인 순환수 저장탱크에 저장하였다.

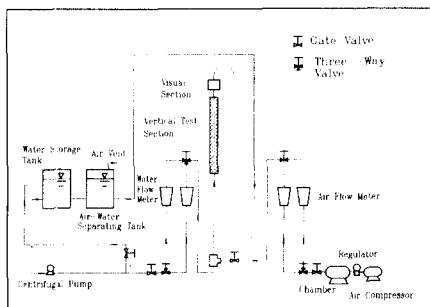


Fig. 1 Schematic diagram of the two phase flow facility

그 동안 선행된 연구에 의하면 마찰저항을 감소시키기 위해 주로 많이 첨가된 수용성 고분자 물질은 PAA와 PEO이지만 밀폐계 시스템에서는 기계적퇴화로 인하여 그 효과가 매우 낮았다. 그러나 최근에는 밀폐계로부터 저항감소에 보다 효과적인 첨가제 A611P로 규명된 결과<sup>(8)</sup>가 있었기에 본 연구에서는 분자량의 수가 1,400만~1,600만개로 구성되어 있는 A611P 고분자물질을 고려 선택하였다. 본 연구에 사용한 고분자 수용액은 전단박화 유체이며 이를 Kalashnikov<sup>(8)</sup>는 모세관 점도계와 회전점도계를 변형하고 수용성 고분자 물질의 종류, 농도, 온도 등을 실험변수로 하여 고분자수용액의 전단율에 따른 걸보기점도를 계측하여 제시한 것으로 그 결과를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 2(a)는 러시아 Meisei Chemical사에서 제조한 Alcox고분자물질로서 평균분자량 수가 1,400만개이며, 본 실험에 사용한 수용성 합성 고분자물질 A611P의 분자량 수와 거의 같다. 그림에서 전단율을 증가시킬수록 또는 농도를 증가할수록 걸보기점도는 순수수용액에 가까운 수치를 나타내고 있기 때문에 수용성 합성고분자물질 A611P는 전단박화 유체임을 알 수 있다.

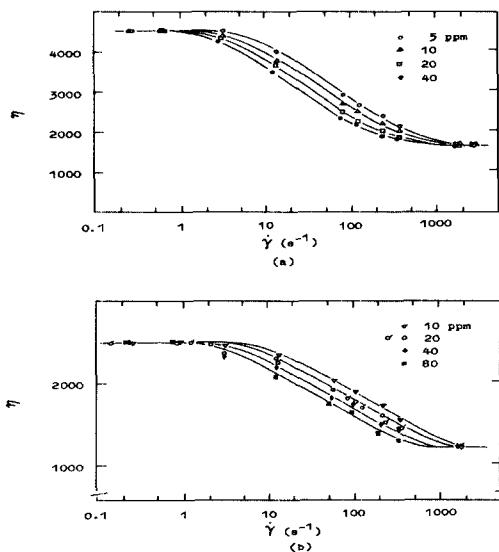


Fig. 2 Reduced viscosity vs shear rate for solutions of small concentration of different polymer (a) Alcox,  $c^* = 222$  ppm, (b) plyox WSR-301,  $c^* = 400$ ppm (Experimental data of Kalashnikov<sup>(1)</sup>)

Fig. 2(b)는 분자량수가 620 만개인 Polyox WSR -301 고분자물질로서 Fig. 2의 (a)와 동일한 경향을 보이고 있다. 이상과 같이 수용성 고분자물질의 물성치를 살펴본 결과 본 실험에서 사용한 A611P 고분자물질은 Alcox 고분자물질과 유사한 것이다. 따라서 전단박화 유체로서 난류 유동 영역에서 순수수용액과 고분자수용액에 대한 레이놀즈수의 차이가 없음을 예측 할 수 있다.

### 3.2 실험 방법

가시화가 가능한 내경 24mm, 두께 3mm인 투명한 아크릴판 시험부는 2상류의 혼합부로부터 1,200mm ( $L/D=50$ ) 떨어진 위치에 장착하고, 시험부의 입구와 출구간의 1,000mm사이 스트레이너케이지 형식의 차압용 압력변환기(DRUCK, model PDCR 120/WL)를 장착하여 유량변화에 따른 차압을 측정하였다. 이때 압력변환기의 측정범위는  $\pm 35\text{kPa}$ 이며, 최대·최소 압력차에 해당하는 허용 주파수는 10.5kHz이나 압력강하를 계속해 본 결과 차압신호는 2kHz이하이므로 압력변환기의 주파수 응답특성은 충분함을 확인하였다. 온도변화에 따르는 오차는 0~50°C 범위 내에서 0.1% 이내이다. 압력변환기에 의해 검출된 차압신호는 차압지시계(DRUCK, model DPI 260)에 의해 차압측정치를 디지털로 직접 나타내며 아날로그 신호는 A/D 변환기(Dantek, model DAS-1600)로 입력된다. 또한 국부 보이드울 분포측정은 전기전도도프로브를 이용하여 시험부인관의 중심에서 관의 벽방향으로 2mm씩 이동하며 검출하여 A/D 변환기로 입력된다. 계속된 신호가 정확한지를 가지적으로 판단하기 위해 A/D 변환기 전단에 오실로스코프를 설치하고 관찰하였다. 이렇게 A/D 변환기로 입력된 신호는 퍼스널 컴퓨터에 의해 2/1,000초 간격으로 최대 4,096개의 신호를 받아들여 저장하였다. 입력된 신호는 프로그램에 의해 처리되어 프린터를 통하여 출력하였다.

## 4. 실험결과 및 검토

### 4.1. 단상유동의 압력강하 및 저항감소율

Fig. 3은 순수수용액과 고분자수용액이 순환할 때 레이놀즈수와 고분자수용액의 농도변화에 따라 압력강하비를 비교 도시한 그림이다. 이때 동압( $\Delta P$ )과 정압( $\Delta P_s$ )의 비를 압력강하비로 정의

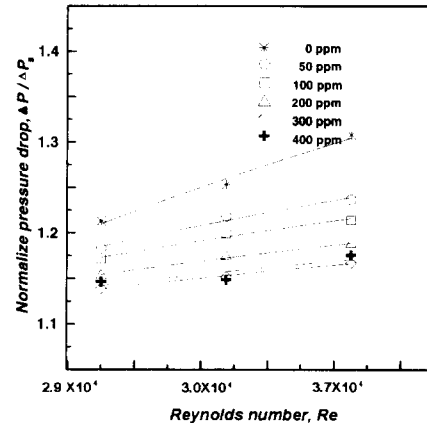


Fig. 3 Comparison of normalized pressure drop with and without polymer additive.

하였다. 레이놀즈수가 증가할 경우 압력강하비도 증가하며, 레이놀즈수가 일정할 때 순수 수용액만 흐르게 할 경우보다 고분자수용액을 흐르게 할 경우 농도증가에 따라 압력강하비는 현격하게 감소됨을 알 수 있다. 압력강하비의 감소는 유체를 수송시키는데 필요한 펌프의 동력을 효과적으로 줄일 수 있다는 사실을 알 수 있다. 또한 고분자수용액의 농도를 증가할수록 그 효과는 더욱 크다는 사실을 알 수 있다. 그러나 고분자 수용액의 농도를 300ppm에서 400ppm으로 증가시킬 경우 압력강하비는 반대로 미소하게 감소됨을 볼 수 있다. 이와 같은 결과로 볼 때 고분자 수용액을 무한정 증가시킨다고 해서 압력강하비가 계속 감소되지 않는다는 사실을 알 수 있다. 밀폐계 실험장치내에 고분자수용액을 흐르게 할 때 고분자수용액의 기계적퇴화로 유체의 유동시간에 따라 압력강하에 미치는 영향이 크기 때문에 이를 정량화 하기는 매우 어렵다. 그래서 고분자수용액을 순환시킨 후 30분 정도가 경과한 다음에는 비교적 안정적이므로 이 때 측정한 압력 강하치를 정량화하고 이를 비교 및 분석하였다.

Fig. 4~5는 순수수용액과 A611P 고분자수용액이 순환할 경우 고분자물질의 농도, 순수 수용액의 레이놀즈수, 유체의 유동시간을 변수로 하여 압력강하를 측정하고, 식(4)에 의해 마찰저항 감소율(drag reduction)을 산출하여 마찰저항 감소 효과를 도시하였으며, 유체의 유동시간에 따른 마찰저항 감소율을 비교하므로써 고분자수용액의 기계적퇴화 정도를 고찰하였다.

$$D.R. (\%) = \frac{\Delta P_{NP} - \Delta P_{AP}}{\Delta P_{NP}} \times 100 \quad (4)$$

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

이들 그림을 종합적으로 살펴보면 실험시간 경과에 따른 저항 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 기계적퇴화가 실험초기 시간에 다소 급속히 발생하지만 저항감소율은 최대 약 75%임을 볼 수 있다. 농도가 증가할수록 마찰저항 감소효과는 더욱 증가할 뿐만 아니라 기계적퇴화의

크기가 작아짐을 볼 수 있다. 그러나 농도가 400 ppm일 경우 오히려 마찰저항 감소효과가 낮아짐을 볼 수 있는데 이는 Virk<sup>(10)</sup>가 수평관 개방계에서 최저 저항감소 점근선이 존재한다고 제시한 것과 같이 밀폐계 수직관에서의 최저 저항감소 점근선이 농도 300ppm과 400ppm 사이에 존재한다는 것을 예측할 수 있다. 실험결과와 같이 밀폐계에서는 실험초기에 고분자수용액은 기계적퇴화로 인하여 마찰저항 감소효과가 저하됨을 알 수 있으나, 많은 산업기지에서 유체 유동장은 밀폐계로 구성되어 있기 때문에 이와 같은 유동장에서 가급적 가격이 저렴하고 작동유체에 물성치 변화를 거의 주지 않는 A611P와 같은 고분자물질을 첨가한다면 유체수송에 있어 커다란 펌프의 동력을 절감할 수 있게 된다.

Fig. 6은 고분자수용액의 농도를 200ppm이며  $Re=3.4 \times 10^4$ 로 일정하게 유지하고 순환시킬 때 시간에 따른 마찰저항 감소율을 로그 좌표로 표시하여 상관 관계를 도식한 그림으로서 마찰저항 감소율에 대한 것은 다음 식처럼 지연시간(t)에 따라 비례하여 감소함을 알 수 있다.

$$D.R. = -8.167 \log(t) + 67.3 \quad (5)$$

따라서 밀폐계에서 고분자 수용액을 유동시키면 기계적퇴화는 시간의 함수이므로 이를 보완하기 위해서는 식(5)에 준하여 주기적으로 유동장에 고분자물질을 투입한다면 지속적인 저항감소 효과를 유지할 것으로 판단된다.

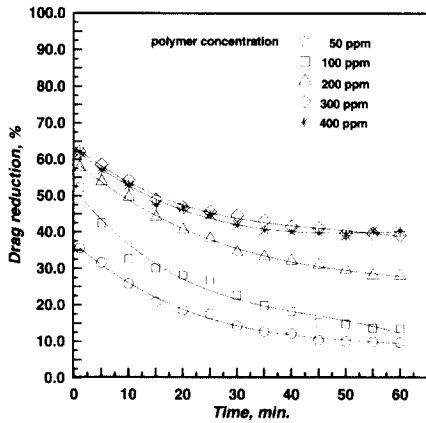


Fig. 4 Present drag reduction versus time for polymer concentrations at  $Re=3.0 \times 10^4$ .

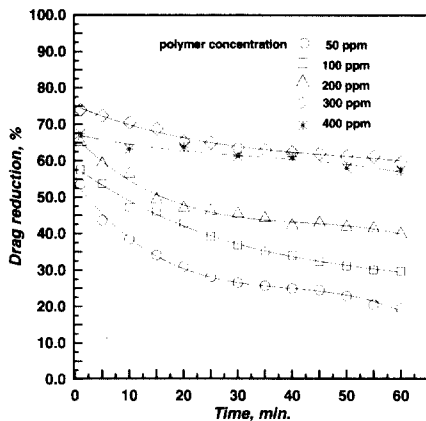


Fig. 5 Present drag reduction versus time for polymer concentrations at  $Re=3.8 \times 10^4$ .

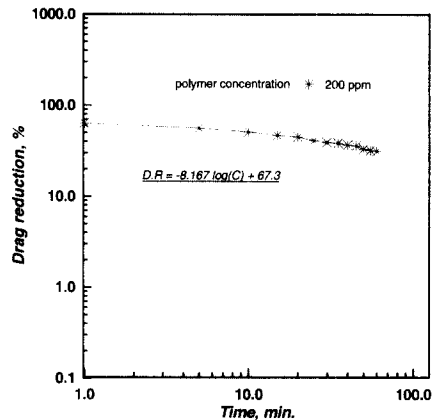


Fig. 6 Effect of time on the drag reduction.

Fig. 7은 레이놀즈수가 일정할 때 마찰저항 감소율과 고분자수용액의 농도변화에 따른 상관 관계를 도시한 그림으로 수직관 상향유동에서 저항 감소율과 고분자수용액 농도(C)의 관계를 식(6)~(7)과 같이 규명하였다. 따라서 밀폐계 수직상향 유동장에서 고분자 수용액의 농도를 식(6)과 (7)에 의해 결정한다면 유체의 저항감소 효과는 매우 효과적일 것으로 판단된다.

Re=3.0×10<sup>4</sup> 일 경우 :

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

Re=3.4×10<sup>4</sup> 일 경우 :

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

4.2. 2상유동에서 저항감소와 보이드율 분포특성

Fig. 8은 걸보기물속도(J<sub>SL</sub>)를 2.5m/s, 걸보기공기속도(J<sub>SA</sub>)를 0.25m/s로 유동시켰을 때와 A611P 수용액의 농도를 50ppm~300ppm으로 하여 공기와 함께 유동시켰을 때 실험시간에 따른 저항 감소율을 비교한 그림이다.

고분자수용액의 농도를 증가할수록 기계적퇴화의 정도는 작으며, 동일한 시간대에 농도증가는 저항 감소효과의 증가로 나타냄을 알 수 있다. 따라서 냉난방 순환회로, 화학공정, 냉각탑, 열교환기뿐만 아니라 지역난방수 등 여러 분야의 유동상태에 따라서 발생하거나 발생 가능성이 있는 2상류 유동장에 A611P와 같은 고분자물질을 첨

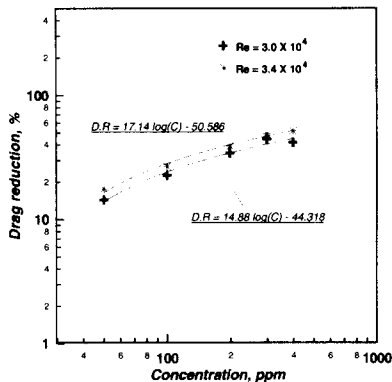


Fig.7 Effect of concentration on the drag reduction.

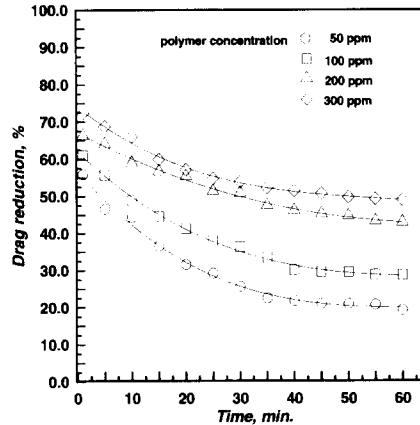


Fig. 8 Percent drag reduction versus time for polymer concentration at J<sub>SL</sub>=2.5m/s, J<sub>SA</sub>=0.25m/s.

가하면 실험결과와 같이 저항 감소효과를 얻을 수 있다. 이로 인한 엄청난 시스템의 유지비를 절감할 수 있을 것으로 예측된다.

최근 국내에서 시설 설비를 하고 있는 지역 냉·난방 네트워크 시스템내의 유체유동시 고분자물질을 첨가함으로써 저항 감소효과를 극대화시킬 수 있다고 예측된다. 또한 산업기기 중 2상 유동 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.

Fig. 9는 J<sub>SL</sub>=2.5m/s로 일정하게 유지하고, J<sub>SA</sub>의 변화와 실험시간에 따른 저항 감소율을 비교 도시한 것으로서 이때 고분자수용액의 농도는 50ppm과 300ppm이다. 농도가 50ppm인 고분자수용액을 유동할 경우 실험초기 시간에 J<sub>SA</sub>를 증가 시킴에 따라 저항 감소효과 크지만 실험시작 후 약 45분 이후에 J<sub>SA</sub>=1.25m/s일 때가 J<sub>SA</sub>=2.0m/s일 때보다 저항 감소효과가 작게 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 농도가 300ppm인 경우에도 50 ppm일 때와 동일한 경향이다. 따라서 고분자수용액의 농도와 J<sub>SL</sub>을 일정하게 유지하였을 경우 J<sub>SA</sub>를 증가시켰을 경우 시간경과에 따라 고분자물질의 기계적퇴화를 가속시켜 저항 감소효과를 저하시킴을 알 수 있다.

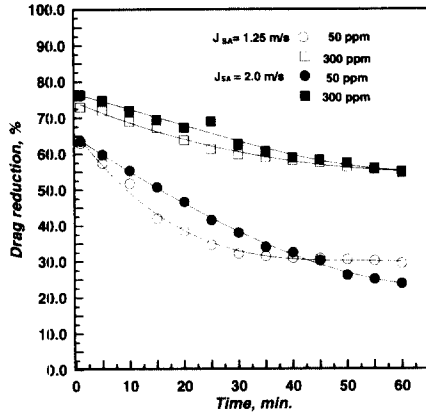


Fig. 9 Comparison of percent drag reduction at  $J_{SL}=2.5m/s$ .

Fig. 10은 농도가 50ppm 및 300ppm일 때  $J_{SA}=0.25m/s$ 로 일정하게 유지하고  $J_{SL}$ 의 변화에 따른 저항 감소율 및 기계적퇴화 정도를 비교 도시한 것이다. 농도와  $J_{SA}$ 가 일정할 때  $J_{SL}$ 의 증가에 따라서 시간경과와 상관없이 저항 감소현상이 증가함을 볼 수 있다. 이는 겔보기물속도를 증가시킬 경우 고분자물질의 기계적퇴화의 요인보다 저항 감소효과를 극대화하려는 성질을 가지고 있으므로 장기간 2상류를 흐르게 할 경우 가급적  $J_{SL}$ 을 크게 하는 한편  $J_{SA}$ 를 적게 할수록 저항 감소효과를 극대화할 수 있음을 규명하였다.

Fig. 11은  $J_{SL}=2.5m/s$ ,  $J_{SA}=2.0m/s$ 에서 유동시간에 따른 저항 감소율을 로그 좌표로 표시하여 상관 관계를 도시한 것이다. 이때 고분자수용액의 농

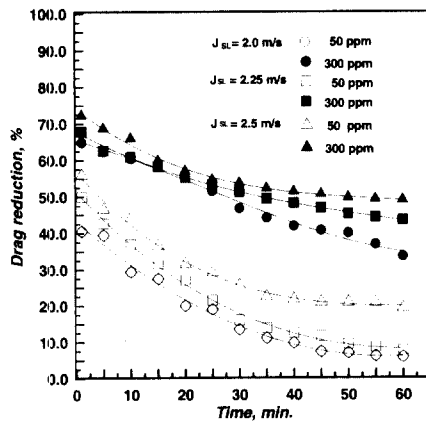


Fig. 10 Comparison of percent drag reduction at  $J_{SA}=0.25m/s$ .

도는 50ppm과 300ppm일 때로서 마찰저항 감소율(D.R)은 밀폐계 내를 유동할 때 유동시간(t)에 따라 비례하여 감소함을 알 수 있다. 농도가 50ppm일 때의 마찰저항감소율은  $\log(t)^{-10.75}$ 에 비례하여 감소되고, 농도가 300ppm일 때는  $\log(t)^{-5.72}$ 에 비례함으로써 감소됨을 알 수 있다. 2상 유동계에서 고분자 수용액을 유동시키면 기계적퇴화는 시간의 함수이므로 이를 보완하기 위해서는 식(8)~(9)에 준하여 주기적으로 유동장에 고분자물질을 투입한다면 지속적인 저항감소 효과를 유지할 것으로 판단된다.

$$D.R = -10.75 \log(t) + 73.11 \quad (8)$$

$$D.R = -5.72 \log(t) + 81.74 \quad (9)$$

Fig. 12는 순수 수용액만 유동하는 경우  $J_{SA}$ 를 0.25m/s로 유지하고  $J_{SL}$ 를 변화시켜 보이드율을 계측한 것을 반경비에 따라 도시한 그림으로서  $r/R=0$ 인 지점은 관의 중심을 의미하며,  $r/R=1$ 인 지점은 관의 벽을 의미한다. 반경방향의 보이드율은  $J_{SL}$ 에 따라 관의 중앙부 보다 높은 보이드율 값을 지닌다. 즉,  $J_{SL}=2.5m/s$ 일 때  $r/R=0.25$ 인 지점,  $J_{SL}=2.25m/s$ 일 때  $r/R=0.57$ 인 지점,  $J_{SL}=2.5m/s$ 일 때  $r/R=0.92$ 인 지점이 최대보이드율의 최고점 위치이다. 이와 같은 현상은 기포류에서 기포는 대부분 액체속도에 의하여 변화되는데 그 원인은 아직 정확히 밝혀지지 않고 있으나, 벽면 근처에서의 액상이 지니는 속도구배가 원인이 된다고 예측

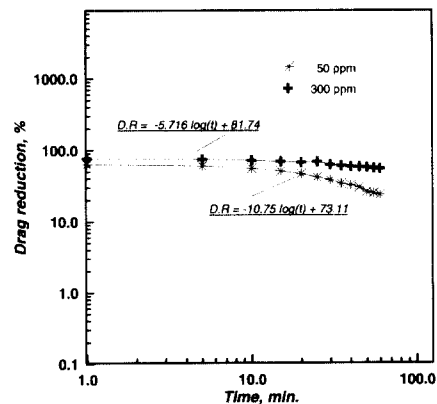


Fig.11 Correlation of drag reduction versus polymer concentration.

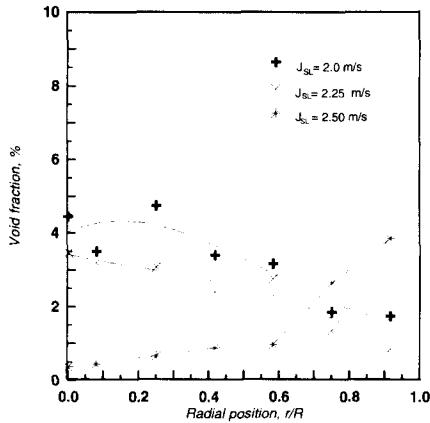


Fig. 12 Local void fraction profiles at  $J_{SA}=0.25m/s$  without polymer additives.

하고 있다.<sup>(11) (12)</sup>

Fig. 13은 순수수용액의  $J_{SL}$ 은 2.5m/s,  $J_{SA}$ 은 0.25 m/s 로 흐르게 할 경우와 순수수용액에 고분자물질의 농도를 변화 시켜 흐르게 할 때, 반경 방향에 따른 보이드율 분포를 도시한 그림이다. 순수수용액을 흐르게 할 때 보이드율 분포의 최고 정점 위치가  $r/R=0.92$ 이지만, 고분자수용액의 농도가 100ppm일 경우는  $r/R=0.75$ 지점, 100ppm일 경우는  $r/R=0.25$ 지점, 100ppm일 경우는  $r/R=0$ 인 관의 중앙에서 최고 보이드율 값이 분포하는 특성을 알 수 있다. 이는 고분자수용액이 관의 벽근처에서 마찰을 감소시켜 관의 벽근처의 유동 속도가 증가되어 기포가 관의 벽근처에서 중심쪽으로 이동하여 유동한다고 예측된다. 또한 기포 주위에서 유선의 변형을 초래하여 기포의 합체현상을 유도하므로 2상류의 유동 특성이 변화됨을 알 수 있다.

Fig. 14는 기-액 2상유동장에서  $J_{SL}$ 를 2.0 m/s,  $J_{SA}$ 를 0.25m/s로 유지하고 고분자물질을 첨가했을 경우와 첨가하지 않았을 경우 유동형태를 사진 촬영한 것으로 카메라 셔터속도를 1/4000초로 하였다. 이들 그림을 비교 살펴보면 순수수용액을 시험부내에 유동시켰을 경우 작은 기포가 시험관 전체에 균일하게 분포하여 흐르고 있으나, 100, 200, 300ppm인 A611P수용액을 각각 흐르게 했을 때는 고분자물질을 첨가하지 않았을 경우 보다 기포의 크기가 성장하며, 농도가 300ppm일 때는 수직관내 기포의 합체현상으로 작은 테일러형 기포로 성장하며, 후에는 작은 기포를 동반하여 슬

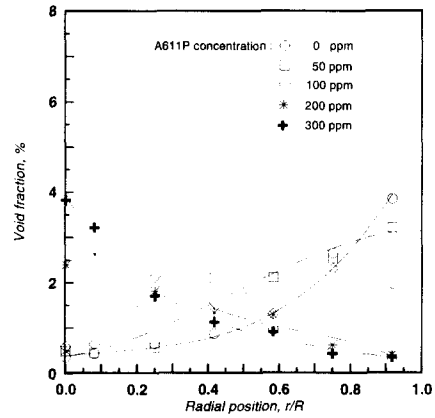


Fig. 13 Comparison local void fraction profiles without and with polymer additives at  $J_{SL}=2.5m/s$ ,  $J_{SA}=0.25m/s$ .

리그류의 형태처럼 유동양식이 천이 됨을 알 수 있다.

Fig. 15는  $J_{SL}$ 를 2.0m/s이며  $J_{SA}$ 를 0.25m/s로 유지시키며 고분자물질을 첨가했을 경우와 첨가하지 않았을 경우 반경방향에 따른 보이드율 분포를 도시한 그림으로 Fig. 14와 잘 일치하고 있음을 나타내고있다. 이와 같은 2상류에서 유동특성은 저항감소현상과 밀접한 관계가 있을 것으로 예측된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 밀폐계 수직상향 유동장에서 전단박화 유체에 의한 저항감소현상과 고분자물질이 2상류에서 보이드율 분포에 미치는 영향을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

① A611P 수용액을 원관내 수직 상향으로 흐르게 할 경우 순수수용액에 비해 압력강하가 현저히 감소됨을 규명하였다. 따라서 동일 펌핑력으로 A611P 수용액을 수송시킬 경우 순수수용액에 비해 단위시간당 배출 유량이 증가되기 때문에 유동 시스템을 소형화시키는데 크게 기여할 수 있을 뿐 아니라 유체 수송비용을 크게 절약할 수 있음을 규명하였다.

② 고분자수용액의 농도가 일정할 때 시간에 따른 저항감소율에 미치는 기계적퇴화의 상관 관계식 및 레이놀즈수가 일정할 때 저항감소율과 고분자수용액의 농도변화의 상관 관계를 규명하



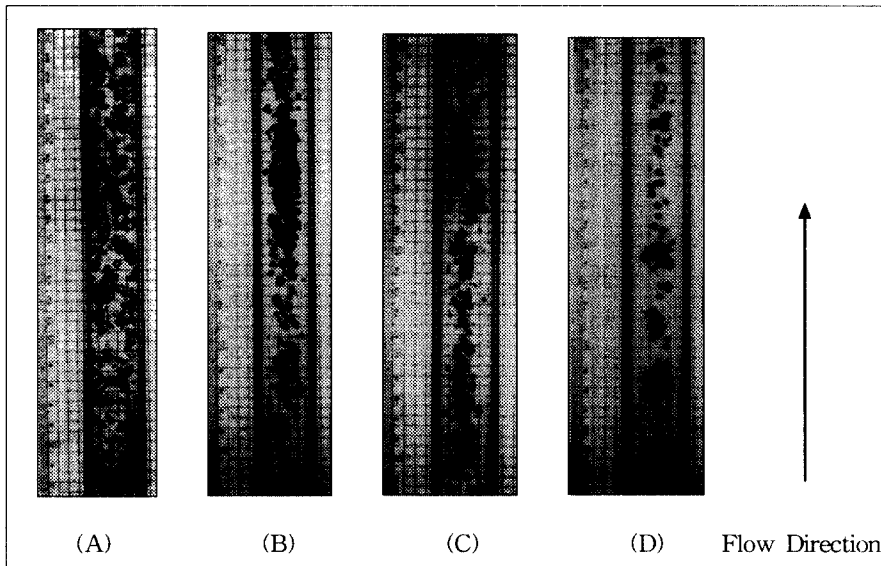


Fig. 14 Comparison of bubble behaviors with and without A611P additives at  $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$  (A) only two phase flow (B) concentration 100 ppm, (C) concentration 200 ppm, (D) concentration 300 ppm.

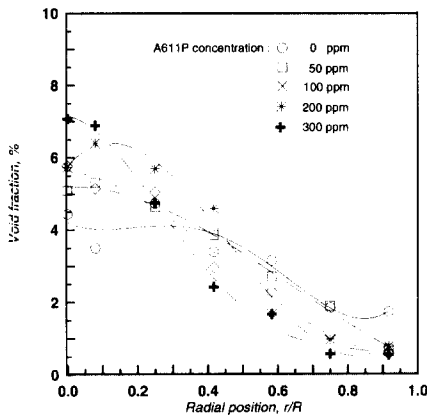


Fig. 15 Comparison local void fraction profiles without and with polymer additives at  $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ .

였다.

③ 고분자수용액은 2상류장에서 저항감소 현상을 현격히 감소시키거나 겔보기 공기속도를 증가시키면 기계적퇴화를 더욱 촉진시키므로 저항감소 효과가 감소됨을 규명하였다.

④ 2상유동장에서 겔보기공기속도가 일정할 때

겔보기물속도를 증가시키므로 국부 보이드율 분포의 최대 정점 위치는 관의 중심에서 관의 벽쪽으로 이동함을 규명하였다. 이때 고분자수용액을 유동시키는 경우 농도를 증가할수록 보이드율의 최대 정점 위치는 관의 벽에서 관의 중심으로 이동함을 규명하였다. 이와 같은 현상은 관의 벽 근처에서 저항이 감소되므로 유동속도가 증가되어 기포의 최대 정점 위치를 변화시키는 것으로 예측된다. 또한 고분자 수용액은 기포주위의 유선을 변형시켜 기포의 합체현상을 초래하여 유동형태가 변화됨을 규명하였다.

### 참고문헌

- (1) 조경채, 1989, "레올러지", 대한교과서 주식회사, p. 269.
- (2) 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. pp.20-29.
- (3) Ghassemzadeh, M. R. and Carmi, S. 1981,

- "Rheological Studies of Coil-Oil Mixtures", *Rheol. Acta* Vol.20, No.2, pp.198-202.
- (4) Toms, B. A, 1948, "Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tube at Large Reynolds Numbers", *Proc. 1st Int. Congress on Rheol.*, Vol.2, pp. 135-141.
- (5) Rosehart, R. G, and Scott, D. S., 1972, "Gas-Liquid Slug Flow with Drag Reducing Polymer Solutions", *AIChE. Journal*, Vol.18, No.4, pp.744-750.
- (6) Sylverster, N. D. and Brill, J. P., 1976, "Drag Reduction in Two-Phase Annular-Mist Flow of Air and Water", *AIChE. Journal*, Vol.22, No.3, pp.615.
- (7) Mizunuma, H and Kato H., 1988, "Influence of Polymer Additives on Transitional Plane Poiseuille Flow", *J. JSME* Vol.31. No.2, pp. 209-217.
- (8) Kalashnikov, V. N., 1994, "Shear-rate Dependent Viscosity of Dilute Polymer Solutions", *The Society of Rheology*, Vol. 38, No.5, pp.1385-1403.
- (9) Cha, K. O. and Kim, J. G., 1996, "A Study on the Drag Reduction for Horizontal Two-Phase Flow", *KSME*, Vol.20, No.4, pp.1470-1480.
- (10) 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.
- (11) Kazin, I. V., 1964, "Radial Distribution of Stream in Rising Turbulent Steam-Water Flow", *Teploenergetika*, Vol.11, No.1, pp.40- 43.
- (12) Serizawa, A., Kataoka, I., and Michiyoshi, I., 1975, "Turbulence Structure of Air-Water Bubbly Flow II. Local Properties", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.2, pp.235-246.