

합성 고분자물질 A611P를 첨가한 기액 2상 수직상향의 유동특성에 관한 실험적 연구

Experimental study on the flow characteristic by the co-polymer A611P additive in gas-liquid two-phase vertical up flow

차 경 옥*, 김 재 근**, 양 회 준***
K. O. Cha, J. G. Kim, H. J. Yang

Key words : Two-phase flow(2상유동), Pressure drop(압력강하), Local void fraction(국부 보이드
율 분포), Drag reduction(마찰저항 감소), Flow patterns(유동양식)

Abstract

Two-phase flow phenomena are observed in many industrial facilities and make much importance of optimum design for nuclear power plant and the liquid transportaion system. The particular flow pattern depends on the conditions of pressure, flow velocity, and channel geometry. However, the research on drag reduction in two-phase flow is not intensively investigated. Therefore, experimental investigations have been carried out to analyze the drag reduction and void fraction by polymer addition in the two-phase flow system. We find that the polymer solution changes the characteristic of two-phase flow. The peak position of local void friction moves from the wall of the pipe to the center of the pipe when polymer concentration increase. And then we predict that it is closely related with the drag reduction.

기 호 설 명

D.R : 마찰저항 감소율(%)
F : 함수
 J_{SL} : 결보기 물속도(m/s)
 ΔP : 압력강하(Kpa)
t : 시간(sec)

w : 웨센버그 수
 η : 점도(CP)
f : 마찰계수
 J_{SA} : 결보기 공기속도(m/s)
ppm : 100만분의 1
Re : 레이놀즈수
V : 전압
 λ : 유체의 특성계수
 γ : 전달율

* 정회원, 명지대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 신성대학 자동차계열

*** 충청대학 기계설계과

1. 서 론

기체와 액체가 함께 공존하여 흐르는 2상유동은 보이드올 및 압력강하 등에 따라 여러 가지 형태를 가지게 된다. 기-액 2상유체를 구성하는 기체와 액체간에 밀도 차가 큼으로 기체는 부력을 받아 중력과 반대 방향으로 항상 떠오르는 경향이 있다. 그러므로 유동방향이 수직인가 또는 수평인가에 따라서 유동양식이 변하게된다. 최근에는 우주산업의 발달로 대기권 밖에서 중력을 받지 않은 상태에서 2상유동에 관해 연구도 활발히 이루어지고 있다.⁽¹⁾ 그러나 수직유동에는 중력이 유동방향과 같거나 정반대이므로 유동의 형태는 측대칭이다. 수직 상향유동에서 유동양식은 기본적으로 기포류(bubbly flow), 슬러그류(slug flow), 처연류(churn flow), 환상류(annular flow), 그리고 액적류(drop flow) 등을 이루고 있다. 이러한 각 유동양식에서 경계는 확연히 구분되는 것은 아니며, 결국은 한 유동양식에서 다른 유동양식으로 천이될때는 2개의 유동양식이 혼합하여 나타난다.

한편 유체의 난류유동시 마찰저항을 줄일 수 있다는 것은 곧 에너지를 절약한다는 관점이므로 최근의 몇몇 학자들은 유동장에 고분자물질을 첨가하여 난류저항을 감소시키기 위한 연구를 수행하고 있지만, 이 현상에 대한 이론적 확립 및 정량적인 설명이 상당히 부족한 실정이다. 그러나 현상학적으로 규명한 결과에 따르면 분자량이 큰 고분자물질의 점탄성이 난류저항 억제에 중요한 역할을 한다는 것은 잘 알려져 있다.^(2,3) 더욱이 소량의 수용성 고분자물질을 유체내에 용해시켜주었을 때 작동유체의 물성치변화는 거의 일으키지 않고 마찰저항을 감소시키는 방법이 가장 효과적이라고 알려졌다.⁽⁴⁾ 이때 사용되는 고분자수용액은 shear-thinning 유체로서 난류영역에서 뉴턴유체와 유사한 걸보기점도를 가져야 한다.

이와같이 고분자물질에 따른 마찰저항 감소현상은 뉴턴유체뿐만 아니라 비뉴턴유체의 유동장에서도 적용할 수 있다. 특히 열병합발전소에서 난방시스템이라든지, 원유수송네트워크등 많은 산업기기에서 유체 수송시 펌핑동력에 막대한 비용이 소요되지만, 이처럼 수송 관로에서 마찰저항을 보다 효

과적으로 감소시킬 수 있는 방법을 얻는다면은 에너지절약의 차원에서 매우 중요한 역할이 될 뿐 아니라 적용분야도 더욱 넓어질 것으로 예측할 수 있다. 그러나 비뉴턴유체의 난류유동시 난류형성과 고분자물질의 동력학에 대한 이론이 미흡한 상태로서 이를 정량화한다는 것은 매우 어려운 실정이다. 또한 지금까지 대다수의 마찰저항감소에 관한 연구는 주로 고분자 수용액의 특성퇴화를 무시하고, 수송관을 수평관 개방계를 사용하였다. 그동안 2상유동장에서 고분자물질에 의한 마찰저항감소현상에 관한 연구는 상당히 미진하다. 이중 대다수의 연구^(5,6)는 역시 수평관내에서 수행되었다. 그러나 밀폐계로 구성된 산업기기가 많은데도 불구하고 이에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 밀폐계 수직원관 내에 기-액 2상류를 상향유동할 경우 유동양식을 판별하고, 판별된 유동조건에서 합성고분자물질인 A611P(Co-polymer)를 첨가하여 유동시킬때에 감소되는 마찰저항을 실험적으로 규명함으로써 에너지를 얼마만큼 절약할 수 있는가를 규명 및 분석하는 한편 기-액 2상 유동장에서 고분자물질이 기포에 미치는 영향을 고찰하므로써 이에 따른 유동특성을 연구하고자 한다.

2. 관련이론

2.1 고분자물질에 의한 난류억제

고분자에 의한 난류억제의 메커니즘에 대한 몇 가지 사실^(7,8)을 정리하면 다음과 같다.

① 난류억제는 벽면에서 일어난다. 이에 대한 증거로 주사기로 관벽부에 고분자를 주입하면 즉시 저항감소가 나타나지만 관의 중심부에 주입한 경우는 액이 분산되어 관벽부로 도달될 때까지의 난류는 없어지지 않는다. 즉, 마찰저항 감소제는 경계층 및 점성저층내 효과를 얻을 수 있기 때문이다.

② 고분자의 분자량은 수 10만 이상을 가지고 있으며, 선형구조로 조성된 고분자이어야 한다. 이는 고분자의 큰 퍼짐성이 랜덤코일상의 용해상태로 유효하기 때문이다.

③ 난류 억제제 전반적으로 난류가 줄어들 경우 여전히 점성저층내의 흐름은 완전한 층류가 아니

고, 속도구배의 장소적, 시간적인 변동이 크다. 고분자수용액은 벽면에 대한 흐트러짐의 발생까지도 억제하는 것이 아니고 그 발달을 억제하는 것일 것이다. 그런데 난류 억제는 다음과 같은 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 고속류에 있어서 경계층 바깥쪽의 흐름으로부터 경계층 또는 점성저층으로 주입하는 에너지를 고분자가 절단함에 의해 흡수할까 하는 것이고, 넓은 의미에서의 변형(완화적인 변형)에 의해서 흡수할까 하는 것이다. 이 변형은 벽면에 대한 고분자수용액의 거시적인 점탄성변형이라고 하는 경우와 쇄상분자의 랜덤코일의 미시적인 점탄성변형을 직접 고찰하는 측면이 있을 것이다.

고분자는 층류에 있어서도 절단하려는 가능성을 충분히 가지고 있기 때문에 절단설도 배제하기 어렵지만 또한 완화적인 쇄상 고분자수용액의 점탄성에 대한 분자론적 이론을 바탕으로 분자의 변형에 의한 에너지축적에 착안했다는 학설도 있다. 그러나 현재로서는 후자의 학설을 따르고 있는 실정이다.

고분자물질의 변형에 의한 에너지흡수는 전단속도가 가장 큰위치, 즉 벽면에서 일어난다. 결국 고분자수용액은 벽면근처에서 난류성장을 가장 유효하게 억제할 수 있다. 변형분자는 또다른 위치에서 형태를 회복하고 벽면으로 다시와서 작용하게된다. 여하튼 고분자물질에 의해 난류억제의 메커니즘을 명확히 해명한다면 지금까지 많은 연구가 진행되고 있는 난류발생의 기구를 푸는 전망을 주는 것이라고 말할 수 있다.

2.2 고분자물질의 기계적퇴화

고분자물질의 퇴화는 고분자 체인내에서 결합이 끊어지고, 화학반응에 의해 물리적 성질이 변화하는 현상을 말한다. 고분자물질의 퇴화종류는 개시 반응의 형태에 따라 열적퇴화, 기계적퇴화, 광화학적퇴화, 생물학적퇴화 등으로 구분할 수 있지만, 여기서는 주로 용액 중에 가해진 기계적 힘에 의해서 발생하는 기계적퇴화에 대하여 논하고자 한다.

고분자에 가해진 응력은 두 가지 형태로 완화된다. 하나는 비화학적 완화과정으로 고분자체인(chain)이 주위 분자와의 미끄러짐(enthalpy relaxation)

에 의한 것과 체인구조의 변화과정으로 화학결합이 끊어지는 것이다. 고분자물질이 기계적인 힘을 받았을 때 화학결합이 끊어지기 위한 임계조건은 하나의 고분자에 저장될 수 있는 탄성에너지의 양과 고분자물질의 변형을 받은 상태가 지속되는 시간에 의존하며, 가해진 에너지가 결합해리에너지(bond dissociation energy)보다 크게 될 때 화학결합은 끊어지게 된다. 이와같이 고분자물질의 기계적퇴화는 고분자첨가제에 의해 발생하는 난류 마찰저항 감소현상에 있어 저항감소는 시간이 경과함에 따라 점진적으로 저하되는 중요한 원인이 되고 있다.

2.3 마찰저항 감소현상 설명을 위한 방정식의 정의

일반적으로 난류유동에서 점탄성유체의 마찰계수는 뉴턴유체의 마찰계수보다 적게 관찰되고 있다. 그러나 마찰저항 감소율은 한계가 있다. 이 마찰저항이 최소가 되는 한계를 나타내는 선을 최소저항 점근선이라고 한다. 이 점근선은 겔보기점성에 바탕을 둔 레이놀즈수(Re_a)와 무차원 길이(L/D)만의 함수이지만 완전 발달된 난류유동에서는 오직 레이놀즈수만의 함수가 된다. Virk에 의해 보고된 최소저항 점근선은 다음과 같은 식으로 표시된다. 즉

$$\frac{1}{f} = 19.0 \log(Re_a \sqrt{f}) - 32.4 \quad (1)$$

Cho등⁽⁹⁾은 실험적 연구를 통해서 윗식을 보다 간략하게 다음과 같이 정리했다. 즉

$$600 < Re < 6,000 \text{ 일 때, } f = 0.20 Re^{-0.48} \quad (2)$$

그러나 최근에 고분자물질의 종류, 농도, 분자량, 퇴화의 정도, 용해의 화학적성분 등은 변수들에 의해 난류 마찰성능에 미치는 파라메타들로서 이들 영향을 설명하는데 사용되는 무차원변수는 Wessenberg수이다. 이것은 유체의 특성(λ)과 유동의 특성시간(D/V)과의 비로 정의되며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$W_s = (\lambda V)/D \quad (3)$$

또한 완전히 발달된 난류의 마찰계수는 아래와 같다.

$$W_s < W_{sc} \text{ 일 때, } f = F(Re_a, W_s) \quad (4)$$

여기서 W_{sc} 는 최소저항 점근선에서의 임계 Weissenberg수이다.

식(4)는 Weissenberg수가 임계값보다 작을 경우 난류의 마찰계수는 Re_a 와 W_s 의 함수임을 나타내며, 반대로 Weissenberg수가 임계값보다 클 때의 난류의 마찰계수는 오로지 Re_a 만의 함수가 된다.

점탄성 물질의 구조방정식(constitutive equation)에는 여러 가지가 있지만 그 중에서 관유동의 연구에 주로 사용되는 것이 Powell-Eyring의 식이다.

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})(\sinh^{-1} \lambda \dot{\gamma}) / \lambda \dot{\gamma} \quad (5)$$

여기서 η_{∞} 는 무한 전단을 점성계수이며 η_0 는 영 전단을 점성계수이다. 식(5)로부터 λ 를 실험적으로 구하면 식(3)으로부터 W_s 를 계산할 수 있다.

본 연구에서는 압력강하 실험결과를 이용하여 마찰저항 감소율을 구하는 식을 다음과 같이 정의했다. 즉

$$D.R(\%) = \frac{\Delta P_{NP} - \Delta P_{AP}}{\Delta P_{NP}} \times 100 \quad (6)$$

여기서, ΔP_{AP} 와 ΔP_{NP} 는 유체 중에 고분자를 첨

가했을때와 첨가하지 않았을때의 시험부로부터 측정한 압력강하이다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

Fig.1은 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 이 실험장치에서 순환회로는 수직관시험부 내부에 기-액 2상류가 유동할 수 있도록 제작하였다. 실험장치는 공기압축기, 압력조절탱크, 압력조절기, 기-액 혼합부, 공기 및 물속도 계측부, 원심펌프, 기-액 분리탱크, 순환수저장탱크, 시험부로 구성하였다.

액상의 순환회로에서 순환수 저장탱크내의 물을 용량이 3마력인 부식방지용 내산스테인레스 원심펌프에 의해서 순간유량계를 통과한 후 시험부로 유입시켰다. 또한 공기압축기에서 분사된 공기는 압력조절기에 의하여 일정한 압력으로 조절된 후 순간유량계를 통과하고 기-액 혼합부를 거쳐 시험부로 유입시켰다. 시험부를 통과한 2상류는 기-액 분리탱크에서 분리된 공기는 대기로 방출시킨 후 순환수를 저장탱크에 저장시키므로 일련의 순환회로를 완료시킨다. 이때 원심펌프와 순간유량계 사이에는 배수관을 순환수저장탱크와 연결하였으며, 공기분사

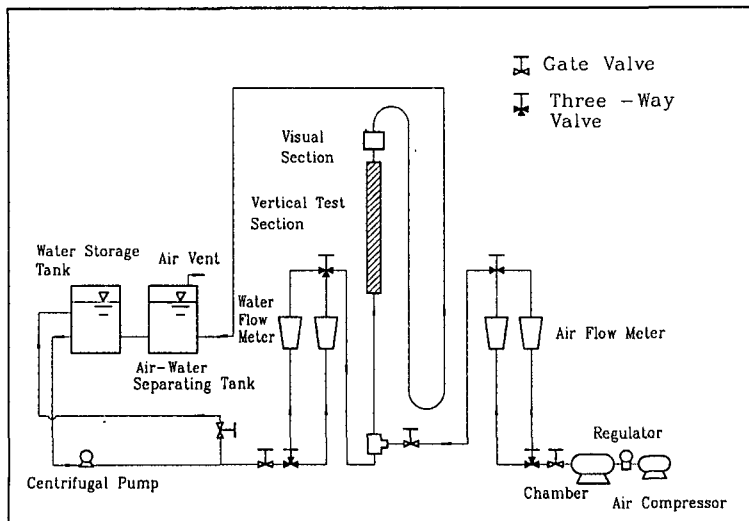


Fig.1 Schematic diagram of the two phase flow facility

기와 압력조절기 사이에 공기저장탱크를 설치하여 각상의 압력파동을 안정화시킬 수 있도록 하였다.

공기와 순환수 유량은 시험부의 입구부로부터 소정의 유동양식이 형성할 수 있도록 관로에 장치한 게이트밸브로 각 상의 유량을 조절하였다. 각 상의 겉보기 속도계측용 순간유량계는 원심펌프와 공기압축기에서 각 상의 최대겉보기속도를 계산하므로서 그 범위에 맞는 유량계를 선정하고, 유량계의 보정은 단위시간당 관내에 흐르는 체적유량으로 검증하였다. 본 실험에서 사용한 액상의 작동유체는 물과 고분자수용액으로서 용량이 200ℓ용량인 순환수저장탱크에 저장하였다.

그 동안 선행된 연구에 의하면 마찰저항을 감소시키기 위한 첨가제인 수용성 고분자물질은 PAA와 PEO이지만 밀폐계에서는 기계적퇴화로 인하여 그 효과가 매우 낮았다. 그러나 마찰저항감소에 보다 효과적인 첨가제가 A611P이기에^(10,11) 본 연구에서는 분자량의 수가 1,400만~1,600만개로 구성되어 있는 A611P 고분자물질을 선택하여 실험에 첨가제로 사용하였다.

3.2 시험부 및 실험방법

Fig.2는 시험부를 도시한 것이다. 가시화가 가능한 내경 24mm, 두께 3mm인 투명한 아크릴관 시험부는 2상류의 혼합부로부터 1,400mm(L/D=58.3) 떨어진 위치에 장착하고, 시험부의 입구와 출구간의 1,000mm 사이에 스트레인지지 형식의 차압용 압력변환기(Druck, model PDCR 120/WL)를 장착함으로써 유량변화에 따른 차압을 측정하였다. 이때 압력변환기의 측정범위는 $\pm 35\text{kPa}$ 이며, 최대·최소 압력차에 해당하는 허용주파수는 10.5kHz 이나 압력강하를 계속해 본 결과 차압신호는 2kHz 이하이므로 압력변환기의 주파수 응답 특성은 충분함을 확인하였다. 온도변화에 따르는 오차는 0~50℃ 범위 내에서 0.1% 이내이다. 압력변환기에 의해 검출된 차압신호는 차압시계(Druck, model DPI 260)에 의해 차압측정치를 디지털로 직접 나타내며 아날로그 신호는 A/D변환기(Dantek, model DAS-1600)로 입력시켰다. 또한 국부보이드울 분포측정은 전기전도프로우브를 이용하여 시험부인 관의 중심에서 관벽으로 2mm씩 이동하며 검출하여 A/D

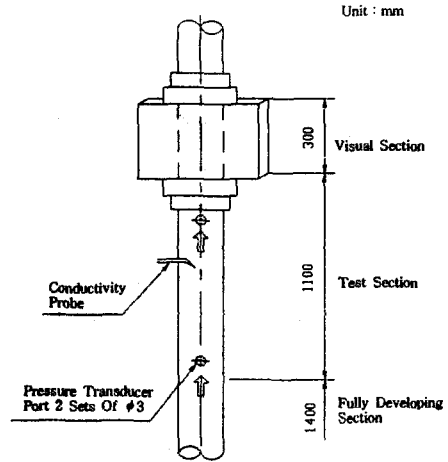


Fig.2 Test Section

변환기로 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. 고분자수용액이 기포에 미치는 영향을 가시적으로 관찰하기 위해 시험부 상부에 특수조명장치를 포함한 유동 가시화부를 설치하고 사진촬영을 하였다.

4. 실험결과 및 검토

4.1 수직상향 기-액 2상류의 유동양식 판별

수지관 상향유동장에서 기-액 2상류의 겉보기물 속도와 겉보기공기속도의 범위를 전기전도프로우브에서 검출된 신호와 이 신호를 통계 처리하여 유동양식을 판별하였다. 또한 본 실험에서 판별된 유동조건을 기존에 제시한 유동양식도와 비교하였으며, 마지막으로 사진 촬영에 의해 최종 판별하였다.

Fig.3은 겉보기물속도(J_{SL})를 2.0m/s로 일정하게 유지하고, 겉보기공기속도(J_{SA})를 0.25~2.0m/s로 변화시켜 시험부 관중양에서 전기전도 프로우브로부터 검출된 신호를 도시한 그림이다. 그림으로부터 횡축은 센서에서 나온 신호의 계측시간을 의미하며, 종축에서 전기전도 프로우브의 출력전압을 의

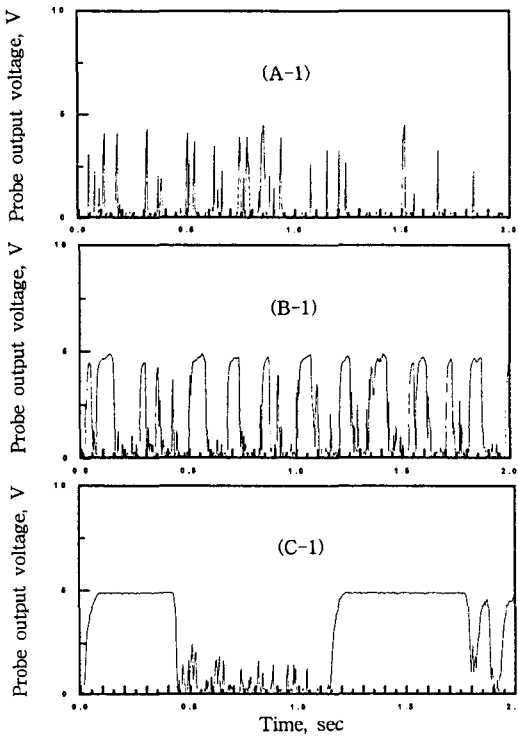


Fig.3 Classification of flow patterns by conductivity probe at $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ (A-1) bubbly flow, (B-1) bubbly-slug flow, (C-1) slug-annular flow

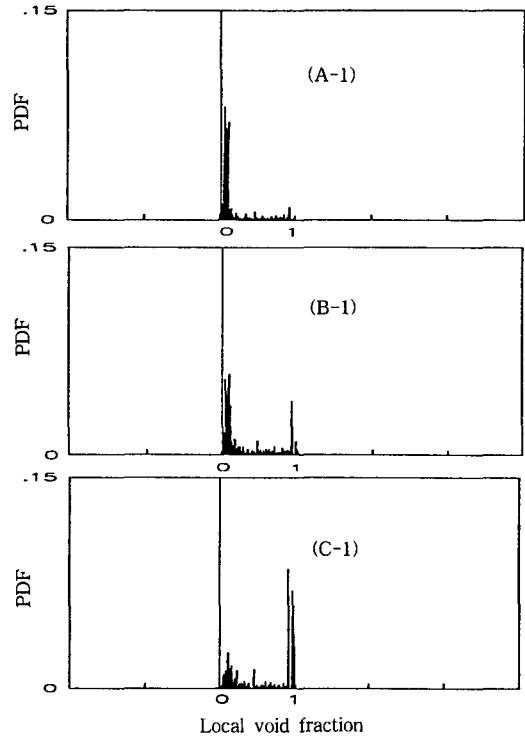


Fig.4 Classification of flow patterns for PDF of conductivity probe signals at $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ and (A-1) $J_{SA}=0.25\text{m/s}$, (B-1) $J_{SA}=1.25\text{m/s}$, (C-1) $J_{SA}=2.0\text{m/s}$

미한다. 종축에서 5V는 전기전도 프로브의 센서 부분에 비전도성인 기상이 통과할때이며, 0V는 전도성인 액상이 프로브의 센서를 통과할 때 출력되는 신호이다. 0V와 5V 사이의 신호는 기포가 프로브의 센서를 스치고 지나갈 때 출력되는 신호이다.

Fig.3(A-1)은 J_{SA} 가 0.25m/s일 때 검출한 신호로서 프로브로부터 검출된 펄스들이 0V와 최대 출력전압인 5V 사이에서 고주파의 파동경향을 나타내는데, 이는 전도성인 물과 물속에 산재된 비전도성인 작은 기포들이 연속적으로 교차하여 프로브를 통과하기 때문이다. 이와같은 신호에 따른 것은 전형적인 기포류의 유동임을 판별할 수 있다. Fig.3(B-1)은 J_{SA} 를 1.25m/s로 유동시켰을 때 기포류에서 슬러그류로 천이를 나타내는 그림이다. 기포들의 합체현상에 따라서 큰 기포들이 형성되고 관내에 산재한 작은 기포들과 함께 프로우

브를 통과하기 때문에 기포통과시간이 지연되어 간헐적으로 평탄한 형태의 펄스가 최대출력에 나타나고 있다. Fig.3(C-1)은 $J_{SA}=2.0\text{m/s}$ 일 때로서 작은 기포들이 프로브를 순간적으로 통과하므로 펄스가 짧고 그 빈도수가 감소하면서 기체 슬러그와 액체 슬러그가 프로브를 교대로 통과하는데 이때 액체 슬러그에 비해 기체 슬러그의 통과 시간이 더 크기 때문에 슬러그류에서 환상류로 천이되는 유동양식이라고 예측할 수 있다.

Fig.4는 보이든 신호를 FFT에 의해 확률밀도함수(Probability Density Function : PDF)로 처리하여 도시한 그림이다. 그림에서 횡축 "0"은 액상이 전기전도 프로브에서 검출한 신호의 빈도수에 해당되며, "1"은 비전도성인 기상에 해당되는 빈도수이다. 또한 "0"과 "1"사이에는 기포가 센서를 스치고 지나 갈때와 작은 기포가 센서를 통과할 때 출력되는 전기적 신호의 빈도수에 해당된다. 이

때 전기전도 프로우브로부터 검출된 신호는 보이 드을 계측기내에서 TTL변환시켜 이를 확률밀도함수로 처리한 것이다. Fig.4(A-1)은 $J_{SL}=2.0m/s$, $J_{SA}=0.25m/s$ 인 경우로서 액상이 프로우브로부터 검출된 신호의 빈도수가 "0" 지역에서 가장 많이 분포하고 있으므로 지배적인 액체의 유동속에 작은 기포들이 산재하여 유동하고 있음을 볼 때 전형적인 기포류임을 확인할 수 있다. Fig.4(B-1)에서 $J_{SL}=2.0m/s$, $J_{SA}=1.25m/s$ 일 때는 다소 액상의 빈도수가 기상의 빈도수보다 큰 것으로 표시될 때는 기포류에서 슬러그류의 천이유동으로 판별된다. 또한 액상과 기상의 빈도수가 거의 같을 때는 슬러그류에 해당되지만 Fig.4(C-1)은 $J_{SL}=2.0m/s$, $J_{SA}=2.0m/s$ 일때로서 액상의 빈도수보다 기상의 빈도수가 다소 큰 것으로 표시될 때는 슬러그류에서 환상류로 판별할 수 있다.

Taitel등⁽¹²⁾은 수직상향 유동장에서 걸보기물속도(J_{SL}) 및 걸보기공기속도(J_{SA})에 따른 유동양식

실험에 의하여 규명한 유동양식과 본 실험에 따라서 각상의 속도를 변화시키며 규명한 결과와 비교했을 때 잘 일치하는 경향을 얻을 수 있었다. 따라서 이런 근거의 신뢰성을 보다 확인하기 위해 유동양식을 사진 촬영하여 최종 판별하였다.

Fig.5는 시험부의 상단에 설치된 가시화부에서 카메라로 사진촬영한 것으로 Fig.5(A)는 $J_{SL}=2.0m/s$, $J_{SA}=0.25m/s$ 일때로서 작은 기포들이 시험부 전체에 균일분포를 이루면서 유동함을 나타냈을 때는 가시적으로 전형적인 기포류임을 최종 판별할 수 있다. 또한 Fig.5(B)는 $J_{SL}=2.5m/s$, $J_{SA}=0.25m/s$ 일때로서 Fig.5(A)와 동일한 경향임을 볼 수 있다.

4.2 국부 보이드울 분포

본 연구에서는 고분자수용액이 기포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 기-액 2상유동시 시험부에서 반경방향에 따른 국부보이드울 분포를 물과

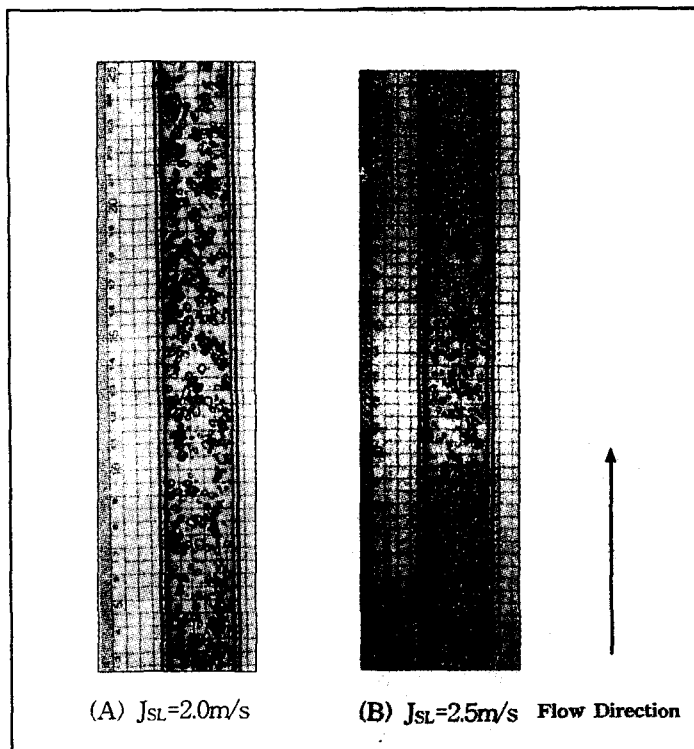


Fig.5 Comparison of bubble behaviors at $J_{SA}=0.25m/s$

고분자물질을 첨가한 고분자수용액을 유동시키며 측정했다. 이때 고분자수용액의 기계적퇴화를 감안하고 고분자수용액이 실험장치를 유동한지 30분이 지났을 때 전기전도 프로브에 의한 시간평균 국부보이드율 분포를 측정하고 분석하였다.

Fig.6은 물만을 유동시키는 경우 J_{SA} 를 0.25m/s로 유지하고, J_{SL} 의 변화에 따른 국부보이드율을 측정하고 반경비에 의해 기포류 유동을 도시한 것이다.

이때 J_{SL} 에 따라 최고보이드율 값이 변화함을 알 수가 있었다. 즉, $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ 이고 반경비가 $r/R=0.25$ 인 위치에서, $J_{SL}=2.25\text{m/s}$ 이고, 반경비가 $r/R=0.57$ 인 위치에서, $J_{SL}=2.5\text{m/s}$ 이고 $r/R=0.92$ 인 위치에서 국부보이드율은 값의 최고값을 나타낸다. 또한 $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ 일 때 국부 보이드율분포가 포물선 형태와 같이 분포하지만, $J_{SL}=2.25\text{m/s}$ 일 때는 관의 중심에서 관벽까지 평탄한 형태로 분포하며, 반면 $J_{SL}=2.5\text{m/s}$ 및 $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ 일 때는 관의 중심에서 관의 벽쪽으로 갈수록 국부보이드율 분포가 증가하여 역 포물선 형태로 분포함을 볼 수 있다.

이와같은 현상은 기포류에서 기포의 유동속도가 액체속도에 의하여 변화된다고 판단되나, 그 원인은 아직 정확하게 밝혀지지는 않고 있는 실정이다. 그러나 이에 대한 메커니즘을 규명하기 위해 다수

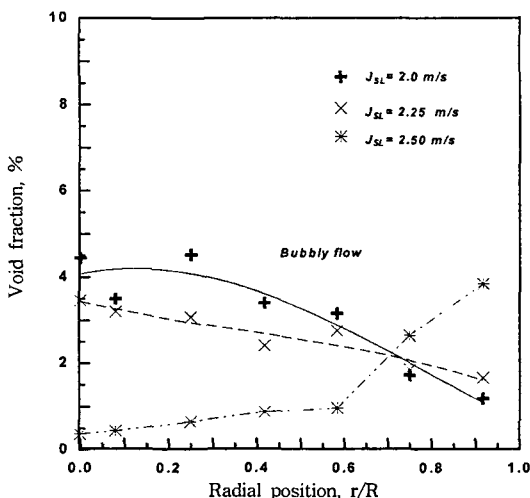


Fig.6 Local void fraction profiles at $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ without polymer additives

의 연구자에 의해 연구 중에 있는 실정이며, 현재로서는 벽면 근처에서의 액상이 지나는 속도구배가 원인이 된다고 예측하고 있다.^(13~15)

Fig.7은 기-액 2상유동장에서 $J_{SL}=2.0\text{m/s}$, $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ 로 유지하고 이때 고분자물질을 첨가했을 경우와 첨가하지 않았을 경우 유동형태를 사진 촬영한 것이다. 각각의 사진을 살펴보면 고분자물질을 첨가하지 않은 0ppm인 물을 시험부내에 유동시켰을 경우 작은 기포가 시험관 전체에 균일분포하면서 유동하고 있으나, 고분자물질인 A611P수용액을 농도가 100ppm, 200ppm, 300ppm으로 각각 유동시켰을때는 고분자물질을 첨가하지 않았을 경우 보다 기포의 크기가 성장하여 관의 중심부근에서 유동함을 볼 수 있다. 특히 농도가 300ppm일때는 기포의 모양이 작은 테일러형 기포로 성장하지만 후에는 작은 기포를 동반하여 슬러그류의 형태처럼 유동하므로 유동양식이 천이 됨을 알 수 있다.

Fig.8은 $J_{SL}=2.0\text{m/s}$, $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ 에서 고분자물질을 첨가했을 경우와 첨가하지 않았을 경우 반경방향에 따른 보이드율 분포를 도시한 것으로서 Fig.7과 같은 경향임을 알 수 있다. $r/R=0$ 인 지점(관의 중심)에서 농도가 높을수록 국부보이드율 값은 크며, $r/R=0.92$ 지점(관의 벽근처)에서는 관의 중심 지점과 정 반대의 분포특성을 보이고 있다. 관의 중심에서 물인 경우 보이드율 값이 4.4%인데 비해 농도가 300ppm일 경우 7.2%이다. 이와같이 고분자물질이 기포의 형상과 유동위치를 변화시키므로 이로 인한 2상유동장에서 마찰저항 감소현상을 비롯한 각종 유동인자에 어떤 영향을 미쳤을 것으로 예측할 수 있다.

Fig.9는 $J_{SL}=2.5\text{m/s}$, $J_{SA}=1.25\text{m/s}$ 에서 물과 공기를 유동시킬 경우와 물에 고분자물질을 첨가한 고분자수용액의 농도변화를 시켜가며 유동할 때 국부보이드율 분포를 도시한 것으로 Fig.8과 동일한 경향을 보인다. 또한 시험부를 사진 촬영하여 Fig.10에 도시하였다. 그림에서 고분자수용액의 농도를 증가시킬수록 시험부의 벽근처에서는 기상의 유동이 적어짐을 볼 수 있으며 Fig.9와 잘 일치하는 경향이 있다. 이상과 같이 기-액 2상류 유동시 고분자수용액은 기포주위의 유선 변형을 초래하여

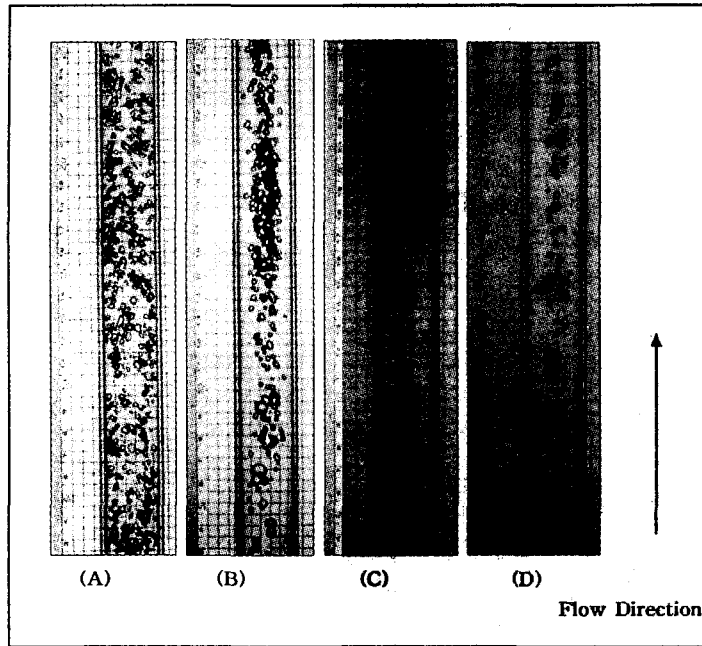


Fig.7 Comparison of bubble behaviors with and without A611P additives at $J_{SL}=2.0\text{m/s}$, $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ (A) only two phase flow, (B) concentration of 100ppm, (C) concentration of 200ppm, (D) concentration of 300ppm.

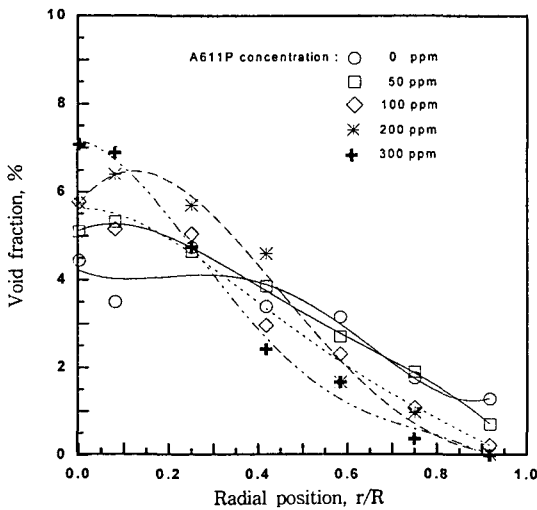


Fig.8 Comparison of local void fraction profiles without and with polymer additives at $J_{SL}=2.0\text{m/s}$, $J_{AS}=0.25\text{m/s}$

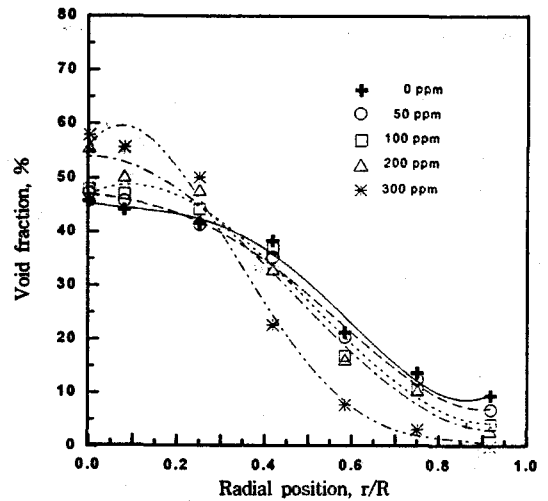


Fig.9 Comparison of local void fraction profiles without and with polymer additives at $J_{SL}=2.5\text{m/s}$, $J_{SA}=1.25\text{m/s}$

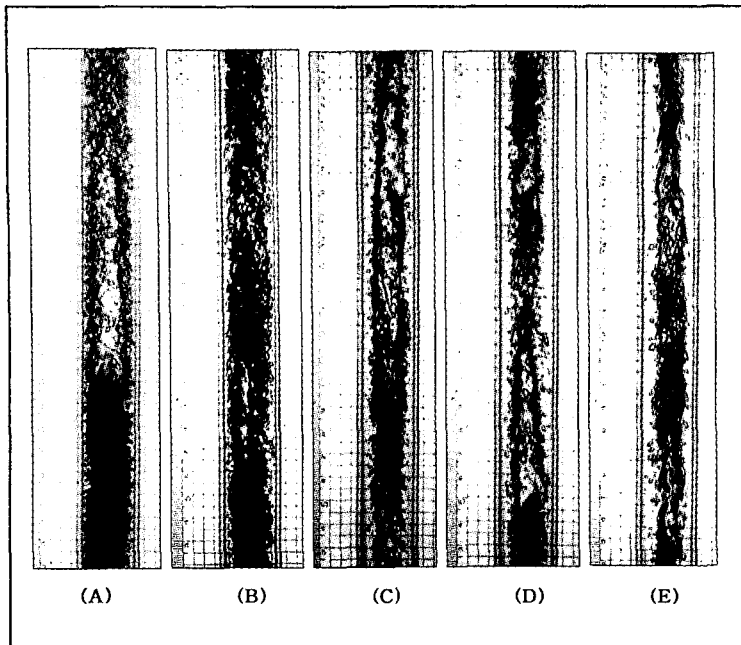


Fig.10 Comparison of bubble behaviors with and without A611P additives at $J_{SL}=2.5m/s$, $J_{SA}=1.25m/s$ (A) only two phase flow (B) concentration of 50ppm, (C) concentration of 100ppm, (D) concentration of 200ppm, (E) concentration of 300ppm

기포를 합체시킬 경우 관의 중심쪽으로 이동시키는 특성을 가지고 있음일 알 수 있다. 이 특성은 마찰저항 감소현상과 밀접한 관계가 있음이 예측된다.

4.3 고분자물질의 기계적퇴화 및 마찰저항감소

Fig.11은 $J_{SL}=2.5m/s$ 로 일정하게 유지하고, J_{SA} 의 변화와 실험시간에 따른 마찰저항 감소율을 비교 도시한 것으로서 이때 고분자수용액의 농도는 50ppm과 300ppm이다. 마찰저항 감소율은 식(6)에 의해 산출하였다. 마찰저항 감소율은 압력강하 감소값은 펌핑동력의 감소를 의미한다. 이처럼 미소량의 고분자물질에 의해 펌핑동력이 감소된다는 것은 에너지 절약이란 관점에서 매우 유용하리라 판단된다. 이때 농도를 50ppm의 고분자수용액으로 유동할 경우 실험초기 시간에 걸보기공기속도(J_{SA})를 증가시키면 따라 마찰저항 감소효과 크지만 실험시작 후

약 45분 이후에 $J_{SA}=1.25m/s$ 일 때가 $J_{SA}=2.0m/s$ 일 때보다 마찰저항 감소효과가 보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 고분자수용액의 농도가 300ppm인 경우에는 50ppm일 때와 동일한 경향으로 표시되고 있다. 따라서 J_{SL} 을 일정하게 유지하였을 경우 J_{SA} 를 증가시키면 유체유동장내 작동유체(고분자 수용액)의 난류증가로 인하여 고분자물질의 기계적퇴화를 가속시켜 마찰저항 감소효과를 저하시킴을 예측할 수 있다.

Fig.12는 고분자수용액의 농도가 50ppm 및 300ppm일 때 $J_{SA}=0.25m/s$ 로 일정하게 유지하면서 J_{SL} 의 변화에 따른 마찰저항 감소율 및 기계적 퇴화 정도를 비교 도시한 것이다. 고분자수용액의 농도를 동일하게 하고 J_{SL} 의 증가에 따라서 마찰저항 감소현상은 증가하지만, Fig.11 J_{SA} 의 점진적 증가에 따라 기계적퇴화는 크게 나타내므로 J_{SA} 을 일정하게 유지하고 J_{SL} 의 증가에 따라서 기계적

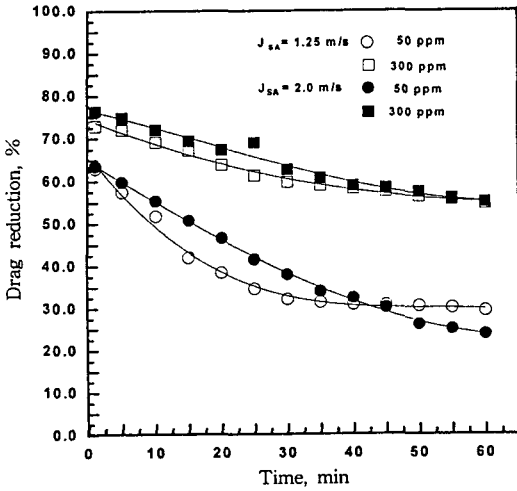


Fig.11 Comparison of percent drag reduction at $J_{SL}=2.5m/s$

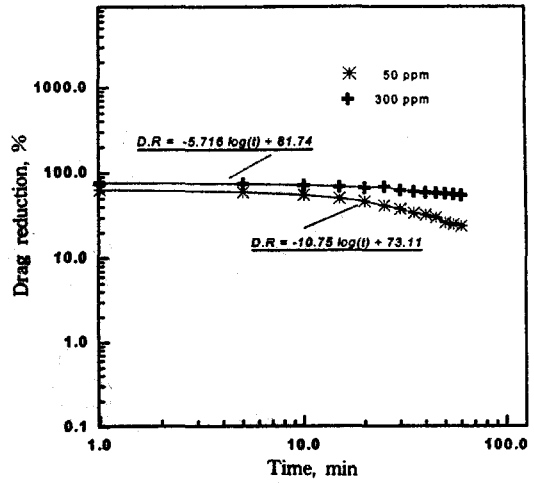


Fig.13 Correlation of drag reduction versus polymer concentration

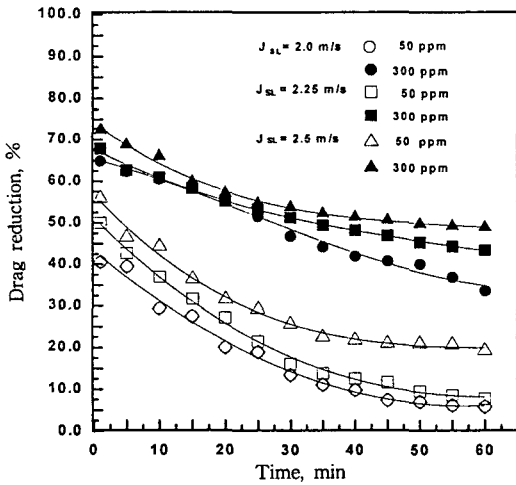


Fig.12 Comparison of percent drag reduction at $J_{SA}=0.25m/s$

퇴화의 정도는 적어짐을 나타낼 것이다. 물속도를 증가시킬 경우 기계적퇴화의 요인보다 마찰저항 감소율의 효과를 극대화하려는 성질을 갖고 있기에 장기간 2상류의 유동에 따라 액상의 속도가 크고, 기상의 유량이 적을수록 마찰저항 감소효과를 극대화할 수 있음을 규명하였다. 또한 밀폐계에서 A611P 고분자물질과 같이 작동유체의 물성치에 대한 변화를 주지 않는 고분자물질을 소량으로 투입

했을 때 약 60%이상의 마찰저항을 감소시킨다는 것은 펌핑동력을 이에 상응하는 만큼 줄일 수 있다는 것이다. 따라서 에너지 절약이라는 차원에서 매우 중요한 역할을 할 것으로 예측된다.

Fig.13은 $J_{SL}=2.5m/s$, $J_{SA}=2.0m/s$ 에서 유동 시간에 따른 마찰저항 감소율을 로그 좌표로 표시하여 상관관계를 도식한 것이다. 이때 고분자수용액의 농도는 50ppm과 300ppm일 때로서 마찰저항 감소율(D.R.)은 밀폐계내를 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. 이와같은 결과는 고분자수용액의 농도증가는 유동시간에 따라 기계적퇴화가 미소하여 마찰저항 감소효과가 지속적으로 유지되기 때문이다.

$$D.R. = -10.75\log(t) + 73.11 \quad (7)$$

$$D.R. = -5.72\log(t) + 81.74 \quad (8)$$

5. 결 론

본 연구에서는 밀폐계 수직원과 내에 기-액 2상류를 상향유동시켜 유동양상을 관찰을 하였으며,

판별된 유동조건에서 합성고분자물질 A611P(Co-polymer)인 고분자수용액을 첨가하여 유동시킬 때 압력강하 및 국부보이드울분포를 예측하므로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기포류유동시 걸보기물속도를 증가시킬 경우 기포가 관의 중심에서 관 벽쪽으로 이동하면서 유동함을 확인할 수 있었다. 그러나 고분자수용액을 농도의 증가에 따라 유동시킬 때 주변의 기포들끼리 합체되어 관의 벽쪽에서 관의 중심쪽으로 이동하면서 유동하며, 유동양식이 천이됨을 규명하였다.

2) 밀폐계에서도 A611P 고분자수용액의 농도, 걸보기 속도의 증가에 따라 유동시킬 경우 마찰저항 감소현상이 현격히 감소됨을 확인하였다. 이때 걸보기물속도의 증가는 유동시간과 상관없이 마찰저항 감소현상을 지속적으로 증가하지만, 걸보기공기속도의 증가는 고분자물질의 기계적퇴화를 가속시킴을 규명하였다.

3) 고분자수용액의 농도가 증가할수록 기계적퇴화가 적으며 높은 마찰저항 감소율을 유지함을 규명하였다. 또한 마찰저항 감소율 및 기계적퇴화를 밀폐계내에서 작동유체의 유동시간과의 상관관계 즉, 농도가 50ppm일 때는 마찰저항 감소율은 $\log(t)^{-10.75}$ 에 비례하며, 농도가 300ppm일 때는 $\log(t)^{-5.72}$ 에 비례하여 감소됨을 규명함으로써 일정한 마찰저항 감소효과를 지속적으로 유지할 수 있는 조건을 규명하였다.

후 기

본 연구는 한국학술 진흥재단의 자유공모과제(과제번호:1997-001-E00022) 연구비로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Krotiuk, W. J., 1990, "Thermal-hydraulics for space power propulsion and thermal managment system design," progress in astronautics and aeronautics, Vol. 122, American Institute of Astronautics and Aeronautics.

2. Virk, P. S. and Mickley, H. S., 1970, "The ultimate asymptote and mean flow structure in toms' phenomenon", Transactions of the ASME, of Applied Mechanics, Vol. 37, pp. 488~493.

3. de Gennes, P. G., 1990, "Introduction to Polymer Dynamics.", Cambridge University Press, pp. 34~54.

4. 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.

5. Otten, L. and Abdelrahman S. F., 1975, "Pressure drop and drag reduction in two-phase non-newtonian slug flow.", The Canadian. Journal of Chemical Eng., Vol. 52, pp. 438~448.

6. Mujawar, B. A. and Rao, M. R., 1981, "Gas non-newtonian liquid two phase flow in straight horizontal tube", Indian Journal of Technology, Vol. 19, pp. 343~348.

7. Astarita, G., 1965, "Possible interpretations of the mechanism of drag reduction in viscoelastic liquids," Int. Eng. Chem. Fundam., Vol. 4, pp. 354.

8. Gadd, G. E., 1965, "Turbulence damping and drag reduction produced by certain additives in water," Nature, Vol. 206, pp. 463.

9. 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.

10. Cha, K.O. and Kim, J.G. 1996, "A study on the drag reduction in a horizontal two phase flow." KSME. Vol. 20, No. 4, PP. 1472~1480.

11. 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.
12. Taitel, Y. and Barnea, D., 1980, "Modelling flow pattern transition for steady, upward gas-liquid flow in vertical tubes.", AIChE. J., Vol. 26, pp. 345~354.
13. Liu, T. J. and Bankoff, S. G., 1990, "Structure of air-water bubbly flow in vertical Pipe: II void fraction, bubbly velocity and bubbly size distribution." Int. Symp. on Gas-Liquid Two-Phase Flows, ASME Winter Annual Meeting, Dallas, TX.
14. Serizawa, A. and Kataoka, I. and Michiyoshi, I., 1988, "Bubbly size effect on phase distribution." In. Proc. of the Japan/U.S.A. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, pp. 15~20.
15. Moursali, M. and Bataille, T., 1994, "An upward turbulent bubbly boundary layer along a vertical flat plate" Int. J. Multiphase flow, Vol. 21, No. 1, pp. 107~117.