

高分子物質 添加에 따른 摩擦抵抗減少에 관한 研究

A Study on the Drag Reduction with Polymer Additives

김 재 근*, 차 경 옥**, 최 형 진***, 김 종 보****
J. G. Kim, K. O. Cha, H. J. Choi, C. B. Kim

Key words : Two phase flow (2상유동), Void fraction (보이드율), Drag reduction (마찰저항 감소), Liquid mean velocity (액체평균속도), Turbulent intensity (난류강도)

Abstract

It is well known that drag reduction in single phase liquid flow is affected by polymer material, molecular weight, polymer concentration, pipe diameter, and flow velocity. Drag reduction in two phase flow can be applied to the transport of crude oil, phase change system such as chemical reactor, pool and boiling flow, and to prevent cavitation which occurs in pump impellers. But the research of drag reduction in two phase flow is not sufficient. The purpose of the present work is to evaluate the drag reduction by measuring pressure drop, void fraction, mean liquid velocity, and turbulent intensity whether polymer is added in the horizontal two phase system or not. Experiment has been conducted in a test section with the inner diameter of 24mm and the length of 1,500mm. The polymer materials used are two kinds of polyacrylamide[PAAM] and co-polymer[A611P]. The polymer concentration was varied with 50, 100 and 200 ppm under the same experimental conditions. Experimental results showed that the drag reduction of co-polymer is higher than that of polyacrylamide. Mean liquid velocities increased as polymer was added, and turbulent intensity decreased inversely near the pipe wall.

1. 서 론

2상유동은 1성분 2상유동과 2성분 2상유동으로 구분되며, 1성분과 2성분 2상유동에서 열전달 메

커니즘의 큰 차이점은 전자는 비등이 발생하지 않는다는 점이다. 이에 관한 연구들은 비등계, 즉 1성분 2상유동계에서 발생하는 열, 수력학적 특성들을 묘사하는데 밀접한 관련이 있기 때문에 중요한 연구 분야로서 관심의 대상이 되어 많은 연구자들이 활발히 수행하고 있다. 기-액 2상류의 유동구조에 중요한 영향을 미치는 유동양식은 각 상의 유동조건에 따라 달리 형성되는데, 각 상의 유동속도, 유동방향, 보이드율 분포, 계의 압력, 유로의

* 명지대학교 대학원 기계공학과

** 정희원, 명지대학교 기계공학과

*** 인하대학교 고분자공학과

**** 정희원, 인하대학교 기계공학과

기하학적 조건 등에 커다란 관계가 있다.

순수 수용액에 미소량의 고분자물질을 첨가하여 난류유동을 할 때 압력강하는 순수 수용액만을 유동시켰을 경우보다 감소하는데 이 현상을 마찰저항 감소(drag reduction)라고 한다. 마찰저항 감소현상은 에너지 절약 측면에서 원유 수송관⁽¹⁾, 지역난방 유동계 네트워크⁽²⁾, 홍수 방지용 관로⁽³⁾, 각종 유체수송에 있어서의 펌프력향상⁽⁴⁾ 및 의학 분야에서는 동맥경화의 치료시 혈액 순환계에 인체에 무해한 고분자수용액을 첨가함으로써 응용 및 적용에 크게 기대되고 있다⁽⁵⁾. 이 현상은 여러 공학 응용 분야에서 난류유동에 따른 압력손실이 시스템에서 에너지 소모를 가져오기 때문에 소량인 고분자물질을 첨가함에 따라 유체 유동으로부터 압력손실을 감소시킬 수만 있다면 에너지 소모의 감소, 즉 소요 펌프력의 감소를 가져올 수 있다. 또한 최근 보고⁽⁶⁾에 의하면 알래스카 원유 수송관에서 소량의 고분자물질을 수송관내에 투입하여 원유의 수송능력을 향상시키고 있으며, 미국 코노코(Conoco)와 알콜(Arco)등의 석유회사들은 이러한 고분자물질을 상품화시키기 위한 준비를 하고 있는 실정이다. 이와같이 실용적인 적용분야는 점차 확대할 것으로 기대된다. 그러나 마찰저항 감소는 관벽에서 전단응력이 어느 임계치 이상이 되었을 때만 나타나는 현상으로서 이 임계치 이상에서의 마찰저항 감소는 고분자물질의 분자량, 농도, 레이놀즈수에 따라 증가하지만 Virk⁽⁷⁾의 최대 저항 감소 접근선에 의해서는 제한을 받는다. 난류 유동장내의 고분자물질은 강한 전단력을 받기 때문에 분자량의 감소와 함께 고분자의 마찰저항 감소효과가 떨어지지만, 이러한 고분자의 기계적 퇴화현상은 모든 고분자 용매계에서 발생된다.

2상유동계에서의 마찰저항 감소에 관한 연구는 단상류에 비해 매우 빈약한 실정이나 고분자물질 첨가에 따르는 마찰저항 감소현상은 냉난방 순환회로, 화학공정, 냉각탑, 열교환기 등 많은 산업 기기에 적용할 수 있다고 본다. 2상유동계에서의 마찰저항 감소에 관한 대표적 연구를 살펴보면 Oliver 등⁽⁸⁾은 비뉴톤 액체와 기체 혼합 순수 수용액의 압력강하 자료를 상관시키기 위한 실험적 압력강하 상관식을 얻어서 Lockhart-Martinelli 상관식⁽⁹⁾과

비교 검토하여 수정상관식을 제시하였다. 그의 연구 결과에 의하면 뉴톤 유체는 슬러그 영역에서 순환 유동양식을 창출하는 반면에 비뉴톤 유체는 기체슬러그 주위에서 유선의 변형을 창출하였다고 했다. Greskovich 등⁽¹⁰⁾은 물과 공기 등의 2상유동계에 점탄성 고분자물질 palyox를 50ppm 첨가한 결과 압력강하가 50%까지 감소하는 효과를 얻었다. Rosehart 등⁽¹¹⁾은 수평관에서 공기-물 유동계에 고분자물질을 첨가했을 때 연구 결과 동일한 겉보기 액체속도에서는 단상류인 경우보다도 축방향 압력구배가 크다는 사실을 밝혔다. Sylverster 등⁽¹²⁾은 수평관에서 공기-물이 환상 분무 유동을 하는 경우 고분자물질을 100ppm 첨가시킴으로써 겉보기 공기속도가 일정할 때 겉보기 액체속도의 증가와 더불어 마찰저항 감소가 크게 나타남을 밝혔다. 이처럼 2상유동시 마찰저항 감소현상에 관한 연구의 관련 자료를 검토해 본 결과 2상유동시 대다수가 마찰저항 감소현상에 국한되었지, 기-액 2상 기포류 유동시 액상 평균속도와 난류강도가 마찰저항 감소현상에 미치는 영향을 규명하기 위한 연구는 거의 없는 실정이다. 그러므로 본 연구의 목적은 수평관에서 기포류 유동시 두 종류의 고분자물질을 각각 첨가하였을 경우와 첨가하지 않았을 경우에 압력강하를 측정하여 고분자물질에 의한 마찰저항 감소율을 규명하고, 액상 평균속도와 난류강도를 측정하여 이들이 마찰저항 감소에 미치는 영향을 실험적으로 규명하여 기존의 마찰저항 감소이론을 뒷받침할 수 있는 근거자료를 축적하는데 목적을 두었다.

2. 이론적 배경

2.1 유동양식

2상유동계를 지배하는 파라메타들 중 보이드율 분포에 따라서 형성되는 유동양식은 계의 압력강하, 열전달, 각 상의 속도에 결정적인 영향을 줄 뿐 아니라 유동양식의 천이는 운동량, 에너지, 질량이송의 변화를 초래하고 있다고 생각한다.

또한 유동양식을 크게 분류하면 분리유동(separated flow), 혼합유동(co-current flow), 분산유

동(dispersed flow)으로 구분되는데 분리유동은 기상과 액상이 하나의 연속적인 계면에 의하여 분리되는 유동으로 이에 속하는 유동양식은 성층류(stratified flow), 파형류(Wavy flow), 환상류(annular flow)이다. 반면에 혼합유동은 기포류(bubbly flow), 플러그류(plug flow), 슬러그류(slug flow)와 같이 유동방향으로 상분포가 균일하지 못하며 각 상간의 운동량 교환이 활발하여 상분포의 변화가 심한 유동이다. 분산유동은 분산기포류, 액적과 같이 관의 단면을 통하여 매우 작은 직경의 기포나 액적들이 비교적 균일하게 유동하는 형태이다. 수평관에서 유동조건에 따라서 형성되는 유동양식은 기포류, 플러그류, 슬러그류, 성층류, 환상류등이며, 수직관에서는 기포류, 슬러그류, 슬러그-환상류, 환상류 등으로 형성된다.

유동양식에 관한 초기의 연구들은 가시적 관찰을 이용하여 유동양식을 판별하였기 때문에 객관성이 결여되었으나 최근에는 열선 풍속계, 복사감쇄기, X-선 등의 측정 기구와 광학 프로우브, 전도 프로우브등이 다양하게 개발이 되어 이들을 이용한 연구들이 활발히 수행되고 있다. Zuber등⁽¹³⁾은 X-선 측정 기구를 개발하여 수직 기-액 유동계에서 형성된 기포류, 슬러그류, 환상류에 대한 통계적 분석을 수행하였다. Griffith등⁽¹⁴⁾은 단일 전도 프로우브를 사용하여 기포류, 슬러그류, 환상류에 관한 연구를 하였다. Matsui등⁽¹⁵⁾은 압력 파동 성분을 통계적으로 처리하여 유동양식을 판별하였다.

2.2 보이드울 정의

보이드울은 기-액 2상류에서 유동양식을 판별하는 중요한 인자로서 계측 방법에 따라서 체적 보이드울, 면적평균 보이드울, 현평균 보이드울, 국부 보이드울로 구분되며 이들의 정의는 다음과 같다.

체적 보이드울(α_v)은 시험부를 차지하는 기상과 액상의 총 체적에 대한 기상이 차지하는 체적비로서 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_v = \frac{V_G}{V_L + V_G} \quad (1)$$

여기서 V_G 와 V_L 은 기상의 체적과 액상의 체적을 나타낸다.

면적평균 보이드울(α_a)은 시험부를 차지하는 각상의 총 면적의 합에 대한 기상이 차지하는 면적비로서 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_a = \frac{A_G}{A_L + A_G} \quad (2)$$

여기서 A_G 와 A_L 은 기상의 면적과 액상의 면적을 나타낸다.

현평균 보이드울(α_c)은 X-선 또는 γ -선이 통과하는 총 현 길이에 대한 기상이 통과하는 현 길이의 비로 정의된다.

$$\alpha_c = \frac{L_G}{L_L + L_G} \quad (3)$$

여기서 L_G 와 L_L 은 기상과 액상의 현의 길이를 나타낸다.

국부 보이드울(α)은 총 계측 시간에 대한 기포가 프로우브를 통과하는 시간(t)의 비로써 정의되는데 열선 풍속계, 전도 프로우브 및 광섬유 프로우브를 사용하여 계측하며 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} t_i}{t} \quad (4)$$

본 실험에서 보이드울 계측에 사용한 프로우브는 전기 전도 프로우브로서 유동장내에서 기상과 액상이 동시에 유동하는 경우 발생하는 전기 전도차를 이용하여 보이드울을 계측하였다.

2.3 마찰저항 감소 이론

난류현상과 고분자들의 동역학 자체가 아직도 완전히 해석되지 못한 상태이기에 난류에서의 마찰저항 감소 현상에 대한 이론적인 해석은 매우 난해하다. 마찰저항 감소 현상의 기구에 대한 여러가지 이론이 알려지고 있지만 종합적으로 정리하면 크게 완화설과 전달설로 나누어 설명할 수 있다. 전달설이라는 것은 고속류에 있어서 경계층의 바깥쪽 흐름으로부터 경계층 또는 점성저층으로 주입하는 에너지를 고분자가 절단함에 의해 흡수한다는 견해이다. 또한 고분자의 완화적인 변형에 의해서 난류 에너지를 흡수한다는 견해가 완화설인데, 이는 쇠

상(鎖狀) 고분자 용액의 점탄성에 대한 분자적 이론에 기인한 것으로 고려된다. 즉, 난류에 있어서는 분자의 운동량 확산이 전단응력의 본체이며, 이 기구에 의해서 유체의 운동에너지가 마찰열로 소산(dissipation)되지만, 유속이 크게 되고 경계층내의 속도구배가 크게 되면 유체의 작은 덩어리가 돌출하여 큰 운동량 수송, 즉 큰 전단저항이 발생하는 난류로 이행이 이루어진다. 그렇지만 경계층 내에 쇄상 고분자의 랜덤 코일(random coil)이 존재한다면 이것이 용이하게 변형하여 경계층 내로 주입되는 에너지를 흡수한다. 결국 랜덤 코일이 일종의 부가적인 에너지를 빨아들이는 입의 역할을 수행하게 된다. 점성저층으로부터 유체의 작은 덩어리가 돌출해 가는 대신에 고분자의 변형에 의해 에너지를 흡수하는 것이며, 결국 흐름은 안정화되고, 랜덤코일의 완화적인 변형에 따른 에너지 손실은 난류 혼합에 의한 것보다 훨씬 작기 때문에 보다 좋은 효율을 얻게 된다. 그러므로, 난류 유동저항은 대폭적으로 저하되고, 고분자의 변형에 의한 에너지 흡수 또는 전단속도가 가장 큰 위치, 즉 벽면에서 난류억제가 실시되므로써 고분자는 벽면에서 최적으로 난류의 성장을 억제한다는 것이다.

3. 실험

3.1 실험장치

본 실험에서 사용한 2상유동계 실험장치로 수평

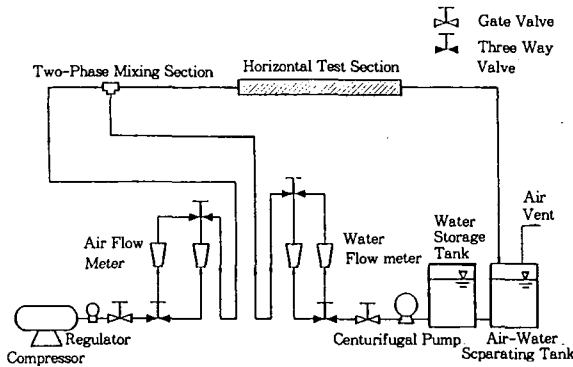


Fig.1 Schematic diagram of the two phase flow facility

관 시험부내를 기-액 2상류가 유동하도록 설계 및 제작되었으며 Fig.1에 개략도를 도시하였다. 실험 장치는 공기 압축기, 공기 분사기, 기-액 혼합부, 공기 및 물속도 계측부, 원심펌프, 기-액 분리탱크, 순환수 저장탱크, 시험부로 구성되어 있다. 공기 압축기에서 분사된 공기는 압력조절기에 의해 일정한 압력으로 조절된 후 순간 유량계를 통하여 기-액 혼합부를 거쳐 시험부로 유입된다. 또한 탱크내 순환수는 부식 방지용 내산 스테인레스 원심 펌프에 의해 순간 유량계를 통하여 기-액 혼합부를 거쳐 시험부로 유입된다. 시험부를 통과한 2상류는 기-액 분리탱크에서 분리된 후 순환수는 순환수 저장탱크에 저장되도록 하였다. 공기와 순환수 유량은 시험부의 입구에 소정의 유동양식이 형성되도록 관로에 장치한 게이트밸브로 각 상의 유량을 조절하였다. 각 상의 겉보기 속도 계측용 순간 유량계는 원심펌프와 공기 압축기에서 각 상의 최대 겉보기속도를 계산하였다. 그 범위에 맞는 유량계를 선정하고, 유량계의 보정은 단위시간당 관 내에 흐르는 체적유량으로 검증하였다. 본 실험에서 사용한 작동유체는 순수 수용액과 고분자 수용액으로서 300 l 용량의 순환수 저장탱크에 저장하였다.

3.2 시험부

Fig.2는 시험부를 도시한 그림으로서 가시화가 가능한 내경 24mm, 두께 3mm인 투명한 아크릴관을 사용하였으며, 수평관 시험부(A-1)는 완전 발달

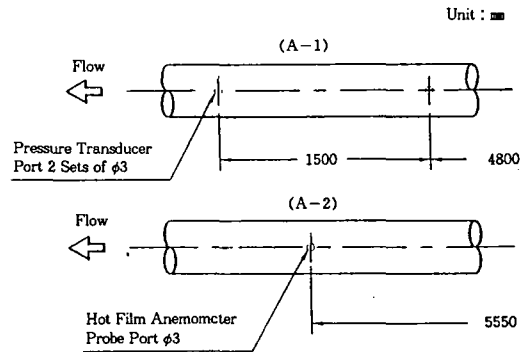


Fig.2 Test Section

되는 거리를 고려하여 2상류 혼합부로부터 4,800 mm(L/D=200) 떨어진 곳에 장착하였고, 시험부 입·출구 1,500mm 사이에 차압계측 구멍을 직경 3 mm로 뚫어서 스트레인 게이지 형식의 차압용 압력 변환기를 설치하였다. 또한 유동하는 유체의 보이드율 분포, 평균속도, 그리고 난류강도 측정을 위하여 차압측정시 사용한 시험부 입구의 구멍이 유동장의 영향을 미칠 것을 고려하여 시험부(A-2)를 교체하고 계측 구멍을 전반부로부터 5,550mm(L/D=231)인 위치에 3mm로 1개 뚫었다. 유동양식

판별을 위한 전기 전도 프로우브는 열선 프로우브의 계측 구멍을 이용하여 교대로 장착하였다. 이때 열선 풍속계 프로우브와 전기 전도 프로우브를 자유로이 이송할 수 있도록 미세거리조절기를 연결시켰다.

3.3 실험방법

본 실험은 먼저 기포류의 유동양식 판별을 전기 전도 프로우브로 일정한 걸보기 속도에서 관 중심과 관중심 상부 2지점에서 전기 전도 프로우브의 출력신호를 계측하여 유동양식을 판별하였다. 전기 전도 프로우브로부터 판별된 유동조건에서 시험부에 가시화 장치를 장착하고 사진촬영을 하여 기포류의 유동양식을 최종 판별하였다. 이렇게 판별된 기포류 유동시 순수 수용액과 고분자물질 2종류의 농도를 변화시키며 시간에 따른 보이드율분포, 압력강하, 평균속도, 난류강도를 계측하였으며, 사진촬영도 병행하였다. 열선 풍속계의 원추형 프로우브를 관 상부로부터 2mm 씩 하부로 이동하며 시험부 반경 방향에 따른 평균속도와 난류강도를 계측하여 액상평균속도와 난류강도를 산출하였다. 실험에 앞서 열선 풍속계 보정은 Fig.3에 도시한 것과 같이 DISA Information에서 J. Pichon⁽¹⁶⁾이 제시한 방법으로 수행하였다. 액상평균속도와 난류강도는 Liu⁽¹⁷⁾가 제시한 방법으로 상분리를 하였으며, Fig.4와 같다. 이때 열선 풍속계의 보정 오차는 ± 5% 이내이다. 고분자물질의 용해방법은 1ℓ의 물

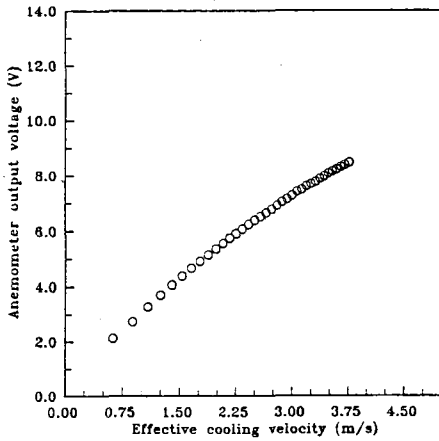


Fig.3 Calibration result of hot-film anemometer

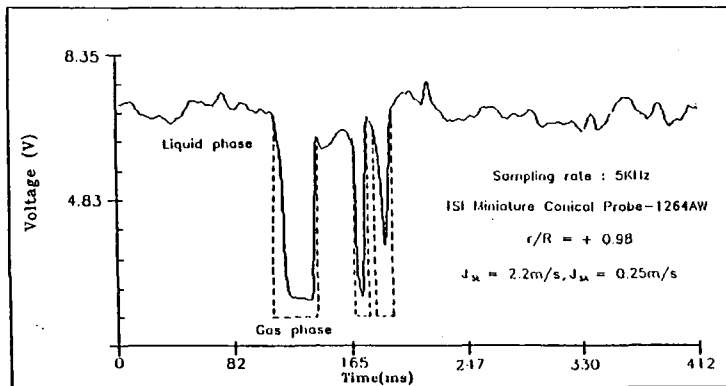


Fig.4 Typical raw data and results obtained by the phase discrimination

을 비이커에 넣고 폴리아크릴아마이드(PAAM) 또는 코폴리머(A611P)를 첨가한 다음 교반기로 5분 동안 500rpm으로 교반시킨 후 다시 100rpm으로 10분 동안 교반시켰다. 이렇게 충분히 교반된 고농도 수용액이 Stock-Solution이며, 이것을 299 l의 물에 넣어 100rpm으로 다시 한번더 1시간 정도 교반시켰다. 이때 고분자물질이 15g, 30g, 60g일 때 교반된 50ppm, 100ppm, 200ppm의 농도인 고분자 수용액은 물 전체에 균일한 농도를 유지하도록 하루 동안 방치한 후에 실험을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 유동양식 판별

겉보기 물속도(J_{SL}) 2.0m/s, 겉보기 공기속도(J_{SA}) 0.25m/s일 때 전기 전도 프로우브로 기포류의 유동양식을 판별한 결과를 Fig.5와 같이 도시하였

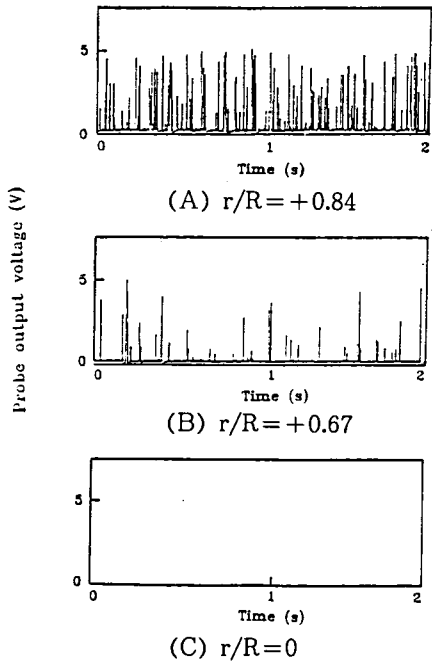


Fig.5 Probe signal for flow $J_{SL}=2.0m/s$ and $J_{SA}=0.25m/s$

다. 횡축은 신호를 계측하는 시간을 의미하며, 종축은 전기 전도 프로우브의 출력전압을 의미하는 것으로서, 5V는 전기 전도 프로우브의 센서 부분에 기상이 통과할 때 출력되는 신호이며 0V는 액상이 통과할 때 출력되는 신호이다. Fig.5의 (A)는 시험부 무차원반경비, $r/R=0.84$ 인 지점에서 프로우브로부터 검출된 신호로서 0V와 최대 출력 전압 5V사이에서 고주파의 파동경향을 나타내는데 이는 전도성인 액상과 액상속에 비전도성인 작은 기포들이 산재하여 프로우브를 통과함을 볼 수 있다. (B)는 $r/R=0.67$ 일때 지배적인 액상의 유동속에 간헐적으로 기상이 지나감을 볼 수 있다. (C)는 $r/R=0$ 일 때로서 즉, 관 중심에서는 액상만 유동함을 볼 수 있다. 이는 기상의 밀도차에 의해 관의 상부에서 미소 크기의 기포가 유동함을 볼 수 있기에 수평관의 전형적인 기포류임을 판별하였다. Fig.6은 $J_{SL}=2.0m/s$, $J_{SA}=0.25m/s$ 일때 사진촬영한 것으로서 수평관에서 전형적인 기포류가 유동함을 알 수 있다. 이때 카메라 촬영 속도는 1/400초이다.

4.2 기포의 거동

Fig.7~8은 $J_{SL}=2.0m/s$, $J_{SA}=0.25m/s$ 일 때 PAAM수용액의 농도변화와 시험부 무차원 반경비에 따른 보이들 분포와 기포의 거동을 사진촬영한 것을 비교 도시한 것이다. 이때 기포는 부력의 효과로 인하여 관의 상부에 분포하며, 보이들 분포는 고분자 수용액의 농도를 증가시 관중심쪽으로 높게 분포하나 관벽으로 갈수록 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 고분자수용액의 농도를 증가함에 따라 액상의 속도 증가로 인하여 인접한 기포가 합체되어 기포의 크기가 증가되고 관중심쪽으로 분포

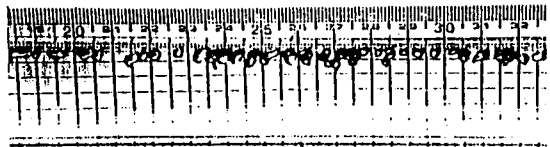


Fig.6 Photograph of bubbly flow at $J_{SL}=2.0m/s$ and $J_{SA}=0.25m/s$

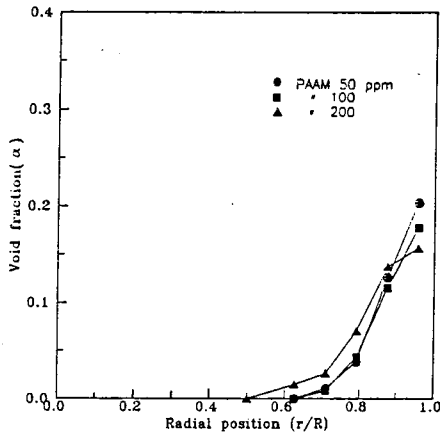


Fig.7 Comparison of void fraction profiles with flow including PAAM additives at $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ and $J_{SA}=0.25\text{m/s}$

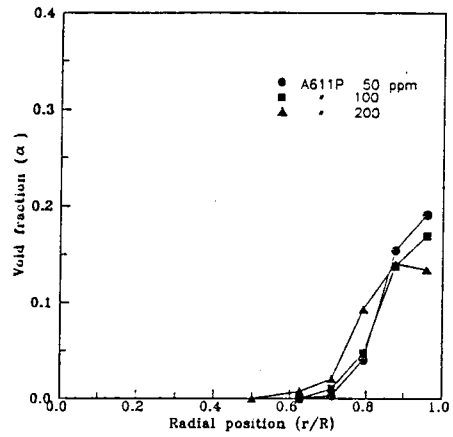


Fig.9 Comparison of void fraction profiles with A611P flow including A611P additives at $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ and $J_{SA}=0.25\text{m/s}$

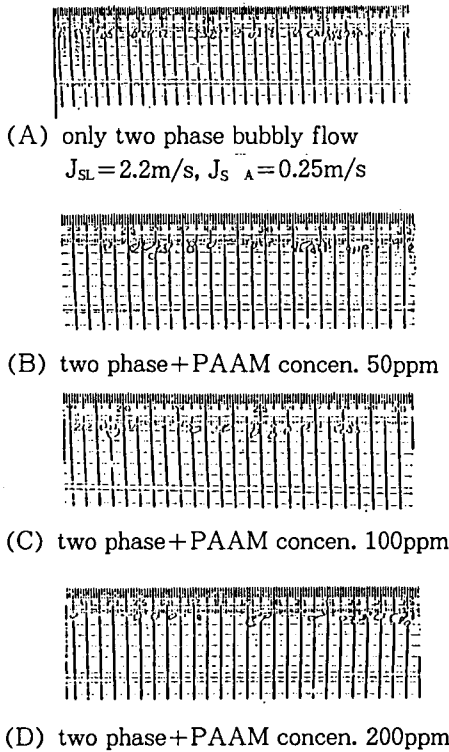


Fig.8 Comparison of bubble behaviors with and without PAAM additives

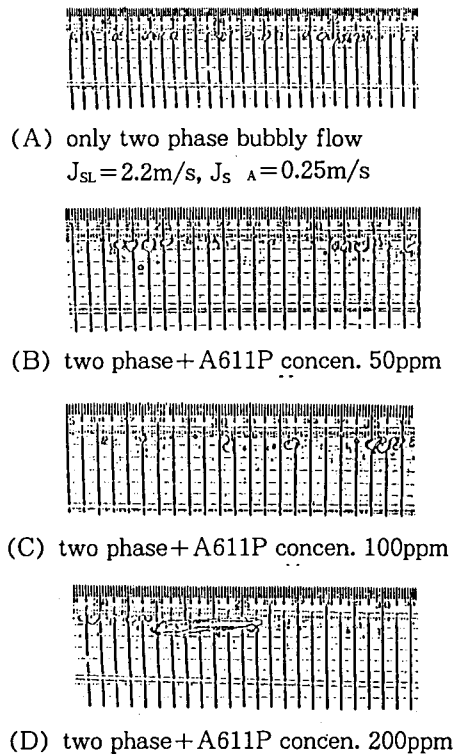


Fig.10 Comparison of bubble behaviors with and without A611P additives

하여 유동됨을 알 수 있다. Fig.9~10은 $J_{SL}=2.0\text{m/s}$, $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ 일 때 A611P수용액의 농도 변화 및 시험부 무차원 반경비에 따른 보이드율 분포와 기포의 거동을 사진촬영한 것을 비교 도시한 것으로 PAAM 수용액의 경우와 동일한 경향을 볼 수 있으며, 기포류 유동에서 고분자 수용액의 농도 변화에 따라 유동양식이 천이됨을 볼 때 고분자 수용액이 기포 주위에서 유선의 변형을 초래하여 2상류의 유동특성을 변화시킴을 예측할 수 있다.

4.3 마찰저항 감소

Fig.11은 $J_{SL}=2.1\text{m/s}$, $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ 으로 유동할 때 시간경과에 따른 마찰저항 감소를 도시한 그림으로서 마찰저항 감소(D.R.; Drag Reduction)는 아래 식에 의해 계산되었다.

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

여기서, ΔP_{NP} 와 ΔP_{AP} 는 고분자를 첨가하지 않았을 때와 첨가하였을 때의 차압을 나타낸다.

PAAM수용액의 경우 시간 경과에 따라 마찰저항 감소율은 미소한 변화가 있음을 볼 수 있는데 농도 변화에 따라서 초기 시간에는 농도가 높을수록 마찰저항 감소율이 크게 나타난 약 30분 후 농

도변화에 따라 거위 차이가 없음을 볼 수 있는데 이는 고분자 수용액이 일정시간 동안 기계적 퇴화가 진행되었으나 기계적 퇴화의 한계점에 이른 것으로 사료된다. 그러나 A611P수용액의 경우는 마찰저항 감소율이 농도증가에 따라 크게 증가하며 처음부터 30분전까지는 고분자물질의 기계적 퇴화로 인하여 다소 급격한 감소를 보이나 30분 이후에는 비교적 퇴화의 정도가 30분 이전보다 안정적임을 볼 수 있다. 또한 농도 증가에 따라 마찰저항 감소율이 크게 증가함을 볼 수 있는데 밀폐계에서 A611P수용액이 200ppm 일때 최대 56~46%의 마찰저항감소효과가 있음을 볼 수 있다.

4.4 액상 평균속도와 난류강도

본 실험에서는 액상 평균속도와 난류강도 계측은 고분자물질의 기계적 퇴화를 고려하여 실험 시작 후 30분이 경과한 후에 시험부에서 반경방향으로 관의 하부로부터 2mm씩 프로우브를 이송하여 관 상부까지 계측하였다. Fig.12~13은 $J_{SL}=2.2\text{m/s}$, $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ 일 때 즉, 기포류 조건에서 순수 수용액에 50ppm의 PAAM과 A611P를 각각 첨가하여 유동할 때 열선 풍속계로부터 2상류 속도신호를 검출하여 상분리한 후 시험부 반경방향에 따른 액상의 평균 속도분포와 난류강도를 도시한 그

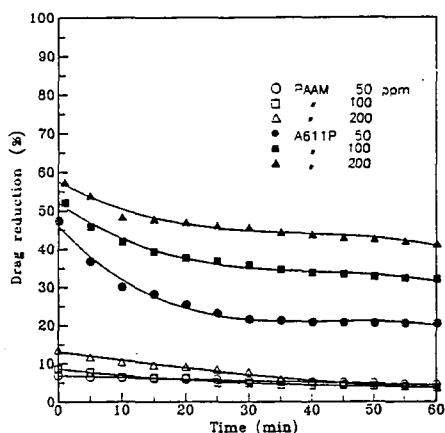


Fig.11 Comparison of drag reduction for polymer additives at $J_{SL}=2.1\text{m/s}$ and $J_{SA}=0.25\text{m/s}$

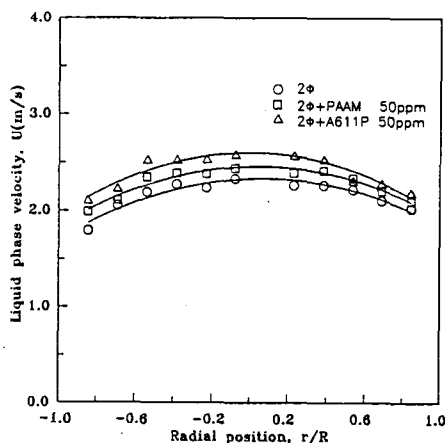


Fig.12 Effect of the polymer additives on liquid phase velocity in two phase flow at $J_{SL}=2.2\text{m/s}$ and $J_{SA}=0.25\text{m/s}$

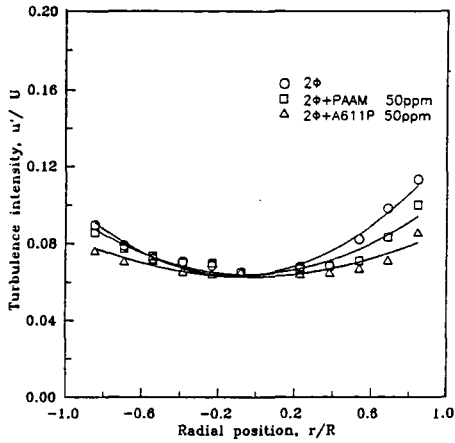


Fig.13 Comparison of turbulence intensity profiles in two phase flow $J_{SL}=2.2\text{m/s}$ and $J_{SA}=0.25\text{m/s}$

림들이다. 이때 -1.0 은 관의 하부를 의미하며, $+1.0$ 은 관의 상부를 의미한다. 액상 평균속도는 고분자물질의 첨가 여부에 관계없이 관 중앙부에서 최대가 되고, 관벽으로 갈수록 감소되는 타원형 형태의 난류속도 분포를 나타내고 있으며, 시험부의 단면 전체에서 순수 수용액, PAAM수용액, A611P 수용액 순으로 속도가 증가함을 나타내고 있다. 또한 관 하부보다 관 상부에서 유동하기 때문으로도 사료된다. 난류강도를 도시한 그림을 살펴보면 관 중앙 근처에서는 고분자물질에 관계없이 그 크기가 거의 일정하나 관벽 근처로 갈수록 순수 수용액, PAAM수용액, A611P수용액 순으로 그 크기가 감소되므로서 관벽 부근에서 난류 현상이 억제이 이루어지고 있다. 이는 관 벽근처에서 고분자물질 첨가에 따른 마찰저항감소 현상이 발생한다고 본다면, 기존에 보고된 완화설을 뒷받침할 수 있다고 예측된다. 또한 관 하부보다 관 상부에서 난류강도가 큰것은 관 상부에서 유동하는 기상과 액상의 파동성분에 의한 영향으로 고려된다. 본 실험에서 액상 평균속도와 난류강도 계측은 실험 시작 후 30분에서 40분 사이에 계측이 완료되었는데 이때의 마찰저항 감소율의 경우 A611P수용액은 2.1~6.19%, PAAM수용액은 2.2~7.9%의 기계적퇴화가 발생하므로 액상 평균속도, 난류강도신호는 이상의 오

차가 내적되어 있다고 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 수평관에서 기-액 2상류가 기포류로 유동할 때 고분자물질을 첨가할때와 첨가하지 않을 때에 보이드올분포, 압력강하, 액상 평균속도와 난류강도를 측정하였으며, 사진촬영도 하여 마찰저항 감소현상을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 순수수용액의 경우 기포류인데 반해 고분자 물질 첨가시 농도에 따라 기포류에서 슬러그류까지 유동양식이 천이 현상을 이루고 있다. 이는 고분자 수용액이 기포의 합체를 초래하므로 2상류의 유동양식을 변화시킴을 알 수 있었다.

2) 고분자의 농도가 높을수록 마찰저항 감소율이 증가하는데 PAAM수용액보다 A611P수용액이 마찰저항 감소효과가 크기때문에 마찰저항 감소제로서는 기존에 많이 사용한 PAAM수용액보다 A611P수용액이 효과적임을 알 수 있다. 또한 A611P수용액은 초기 시간에 급격한 기계적 퇴화가 나타나지만 밀폐계에서 200ppm일 때 최대 56~46%의 마찰저항 감소효과가 나타났을때 각종 2상유동 장치에서 고분자 물질 첨가에 따라 막대한 펌핑동력을 감소시킬 수 있으며 더욱이 펌핑 시스템을 소형화 할 수 있다고 예측된다.

3) 액상의 평균속도는 고분자 수용액 농도증가에 따라 증가하며 관의 상단부에서 기상으로 인하여 관 하단부 보다 속도가 증가 하고, 난류강도는 고분자물질에 관계없이 관중심 부근에서는 거의 동일한 값을 나타내나 관벽 부근에서는 고분자물질 첨가에 따라 감소하므로서 관벽부근에서 난류현상이 억제됨을 알 수 있다. 이 결과는 단상유동시 마찰저항 감소이론에서 고분자물질의 완화적인 변형에 의해서 난류 에너지를 흡수한다는 완화설을 뒷받침 할 수 있는 근거로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Burger, E. D., Chorn, L. G., and Perkins, T. K., 1980, "Studies of drag reduction con-

- ducted over a broad range of pipeline condition when flowing prudhoe bay crude oil," J. Rheol., Vol. 24, pp. 603~626.
2. Selin, R. H. J., Hoyt, J. W., Pollert, J., and Scrivener, O., 1982, "The effect of drag reduction additives on fluid flows and their industrial applications. Part 2 : Present applications and future proposals," J. Hydraulic Res., Vol. 20, pp. 235~293.
 3. Sellin, R. H. J., 1978, "Drag reduction in sewers : First results from a permanent installation," J. Hydraulic Res., Vol. 16, pp. 337~351.
 4. Golda, J., 1986, "Hydraulic Transport of coal in pipes with drag reduction additives," Chem. Eng. Comm. 43 : 53.
 5. Selin, 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.
 6. Choi, U. S., Cho, Y.I., and Kasza, K. E., 1987, "Screening and Degradation Tests of Linear-polymer additives for district heating applications," Argonne National Laboratory Report ANL-87-49..
 7. Virk, P. S. and Mickley, H. S., 1970, "The Ultimate Asymptote and Mean Flow Structure in Toms' Phenomenon", Transactions of the ASME, pp. 488~493.
 8. Oliver, D. R. and Young, h., 1968, "Two-Phase Non-Newtonian Flow Part 1 : Pressure Drop and Hold-up", Trans. Instn. Chem. Engrs, Vol 46, pp. 449~464.
 9. Lockhart, R. W. and Martinelli, R. C., 1949, "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes", Chem. Eng. Prog. Vol. 45, No. 1, pp. 39~48.
 10. Greskovich and Shrier, 1971, "Drag Reduction in Two-Phase Flow", Eng. Chem. Fundam, Vol. 10, No. 4, pp. 646-648
 11. 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.
 12. 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.
 13. Zuber, N., and Jones, O. C. Jr., 1975, "The Interrelation between Void Fraction Fluctuations and Flow Patters in Two-Phase Flow," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 2, pp. 273~306.
 14. Griffith, P., 1964, "Two Phase Flow Regime Detecting," ASME Paper 64-WA/HT-43.
 15. Matsui, G., and Aizawa, T., 1987, "Statistical Properties of Pressure Drop Fluctuations and Flow Patterns in Horizontal Gas-Liquid Two-Phase Flow," JSME, Vol. 53, No. 485, pp. 144~148.
 16. Pichon, J., 1970, "Comparison of Some Methods of Calibrating Hot-Film Probes in Water", DISA Information, No. 10, October, pp. 16~21.
 17. Liu, T. J., 1989, Experimental Investigation of Turbulence Structure in Two-Phase Bubbly Flow, Ph. D. Thesis of Northwestern University.