

〈논 문〉 SAE NO. 96370062

고분자물질 첨가에 의한 유동특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Flow with Polymer Additives

차 경 옥,* 김 재 근**
K. O. Cha, J. G. Kim

ABSTRACT

The phenomena of drag reduction using small quantities of a liner macromolecules has attracted the attention of many experimental investigations. On the other hand 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 flow with cavitation which occurs pump impellers. But the research on 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 additives a horizontal single and two phase system or not. Flow pattern of air-water two phase flow was classified by electrical conductivity probe signal. Velocities and turbulent intensities of signal were measured simultaneously with a Hot-film anemometer.

주요기술용어 : Polymer Solution(고분자수용액), Drag Reduction(마찰저항감소), Degradation(퇴화), Liquid Mean Velocity(액체평균속도), Turbulent Intensity(난류강도)

1. 서 론

어떠한 종류 어류의 유영속도가 유체역학 측면에서 관찰해 보면 이외로 고속임이 주목되는데 그 이유는 어류의 체표에서 분비되는 점탄성체의 성질을 띄는 점액물질 작용이라는 것이 밝혀졌

다. Toms¹⁾는 점탄성물질인 고분자 수용액과 유기 용매계로부터 마찰저항 감소현상을 규명하였지만, 이 현상은 실용적 측면에서는 뉴턴유체 뿐만 아니라 비뉴턴유체 유동자에서도 적용할 수 있다. 예를 들자면 소방차의 방수능력(Pumpability)향상²⁾, 선박과 잠수함의 항해속도 상승³⁾, 원유수송⁴⁾, 각종 유체수송에 있어서 펌프력 향상⁵⁾ 및 의학 분야에서도 동맥경화 치료시 혈액 순환계에 무해한 고분자물질을 첨가함으로

* 정회원, 명지대학교 기계공학과

** 명지대학교 대학원 기계공학과

서 혈액순환을 원활히 할수 있는 것처럼 그 응용 및 적용은 많은 분야에서 기대되고 있다. 특히 대량의 액상 유체를 원거리 수송하는데는 난류 마찰로 인한 높은 동력 펌프와 직경이 큰관이 요구될 뿐만 아니라 시스템의 설치 및 유지하는데 엄청난 비용이 들기 때문에 가급적 시스템에 대한 에너지 소모를 줄이기 위하여 분자량이 높은 고분자물질을 유체 유동 중 첨가하다면 유체의 유동성이 증가하면서 유체 수송에 필요한 펌프의 용량이 대폭 줄어 에너지 절약을 할 수 있다. 따라서 단위 시간당 유량의 증가 효과는 관의 직경을 감소시킬 수 있으며 이에 따른 수송 시스템도 소형화하는데 기여할 수 있고 더욱이 시스템 설치에 관한 공사비용도 줄일 수 있다고 생각된다.

그동안 2상유동계의 마찰저항 감소에 관한 연구는 단상류에 비해 매우 빈약한 실정이지만 고분자물질 첨가에 따르는 마찰저항 감소현상은 냉난방 순환회로, 화학공정, 냉각탑, 열교환기 등 많은 산업기기에 적용할 수 있다고 본다. 2상유동계의 마찰저항 감소에 관한 연구를 살펴보면 Oliver 등⁶⁾은 비뉴턴액체와 기체 혼합물의 압력강하 자료를 상관시키기 위한 실험적 압력강하 상관식을 얻어 Lockhart-Martinelli 상관식⁷⁾과 비교 검토하여 수정상관식을 제시하였다. 그의 연구 결과에 의하면 뉴턴유체는 슬러그 영역에서 순환 유동양식을 창출하는 반면 비뉴턴유체는 기체 슬러그 주위에서 유선의 변형을 창출한다고 하였다. Greskovich 등⁸⁾은 물과 공기 등의 2상 유동계에 점탄성 고분자물질 palyox를 50ppm 첨가한 결과 압력강하 50%까지 감소효과를 얻었으며, Rosehart 등⁹⁾은 수평관에서 공기-물 유동계에 고분자물질을 첨가시켰을때의 연구결과 동일한 겔보기 액체속도에서는 단상류인 경우보다도 축방향 압력구배가 크다는 사실을 밝혔다. Sylverster 등¹⁰⁾은 수평관에서 공기-물이 환상분무 유동을 하는 경우 고분자물질을 100ppm 첨가시킴으로서 겔보기 공기속도가 일정할때 겔보기 물속도의 증가와 더불어 마찰저항 감소가 크게 나타남을 밝혔다. 이때 대부분의 연구자들은 주로 폴리에틸렌 옥사이드(PEO)와 폴리아크

릴아마이드(PAAM)의 고분자첨가제를 사용하였으며 뉴턴유체인 물을 용매로 실험하였다. 그 결과 PEO는 기계적 퇴화에 민감하여 시간이 경과함에 따라 마찰저항감소율도 PAAM보다 현저히 감소함을 보여주고 있으며, 초기 마찰저항 감소율이 PEO보다 PAAM이 우수하다고 알려지고 있다.

난류현상과 고분자 동력학 자체가 아직 완전히 해석되지 못한 상태이므로 난류에서의 마찰저항 감소 현상에 대한 이론적인 해석은 매우 복잡하다. 마찰저항 감소현상의 기구에 대한 여러 가지 이론이 알려지고 있지만 종합적으로 정리한다면 크게 완화설과 전단설로 나누어 설명할 수 있다. 전단설이라는 것은 고속류에 있어서 경계층의 바깥쪽 흐름으로부터 경계층 또는 전성저층으로 주입하는 에너지를 고분자가 절단하므로서 흡수한다는 견해이다. 또한 고분자의 완화된 변형에 의해서 난류 에너지를 흡수한다는 견해가 완화설인데, 이는 쇄상 고분자용액의 점탄성에 대한 분자적이론에 기인한 것이며, 점성저층으로부터 유체의 작은 덩어리가 돌출해 가는 대신에 고분자의 변형에 의해 에너지를 흡수하는 것이다. 결국 흐름은 안정화되고, 랜덤코일의 완화된 변형에 의한 에너지 손실이 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 실시된다. 따라서 고분자는 벽면에서 최고로 난류의 성장을 억제한다는 완화설이 있다. 그러나 이와 같은 이론은 단상류에 국한된 학술로 정확히 확립된 학설은 아직 없는 형편이다.

본 연구의 목적은 수평관에서 단상류와 2상류가 유동할때 두 종류의 고분자물질을 각각 첨가하였을 경우와 첨가하지 않았을 경우에 대한 압력강하를 계속하여 마찰저항 감소율을 규명하고, 시험부 반경방향의 액상평균속도와 난류강도를 측정하여 이들이 마찰저항 감소에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig.1은 본 실험에서 사용한 2상유동계 실험 장치로 수평관 시험부를 단상류와 기-액 2상류가 유동하도록 제작하였다. 본 실험장치는 공기 압축기, 공기 분사기, 기-액 혼합부, 공기 및 물 속도 계측부, 원심펌프, 기-액 분리탱크, 순환수 저장탱크, 시험부등으로 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 스테일레스 원심펌프에 의한 순간 유량계를 통과하고 기-액 혼합부를 거쳐 시험부로 유입된다. 시험부를 통과한 2상류는 기-액 분리탱크에서 분리된 후 순환수는 순환수 저장탱크에 저장되도록 하였다. 공기와 순환수의 유량은 시험부의 입구부에 소정의 유동양식이 형성되도록 관로에 장치한 밸브로 각상의 유량을 조절하였다. 각상에서 겉보기속도의 계측용 순간유량계는 원심펌프와 공기압축기에

서 각상의 최대 겉보기속도를 계산하여 그 범위를 맞는 유량계를 선정하였으며, 유량계의 보정은 단위시간당 관내에 흐르는 체적유량으로 검증하였다. 본 실험에서 사용한 작동유체는 순수 수용액과 고분자 수용액으로서 300 l 용량인 순환수 탱크에 저장하였다.

2.2 시험부

Fig.2는 시험부를 도시한 그림으로서 가시화가 가능한 내경 24mm, 두께 3mm인 투명한 아크릴관을 사용하였다. 수평관 시험부(A-1)는 완전 발달되는 거리를 고려하여 2상류 혼합부로부터 4,800mm(L/D=200) 떨어진 곳에 장착하였고, 시험부 입구 및 출구 1,500mm 사이에 차압계측 구멍을 직경 3mm로 뚫어서 스트레인이 게이지 형식의 차압용 압력변환기를 설치하였다. 또한 유동하는 유체의 평균속도와 난류강도 측정을 위하여 차압측정시 사용한 시험부 입구의 구멍이 유동장의 속도와 난류강도에 영향을 미칠 것을 고려하여 시험부(A-2)를 교체하도록 하였으며, 열선 프로우브의 계측 구멍을 전반부로부터 5,550mm(L/D=231)인 위치에 3mm로 1

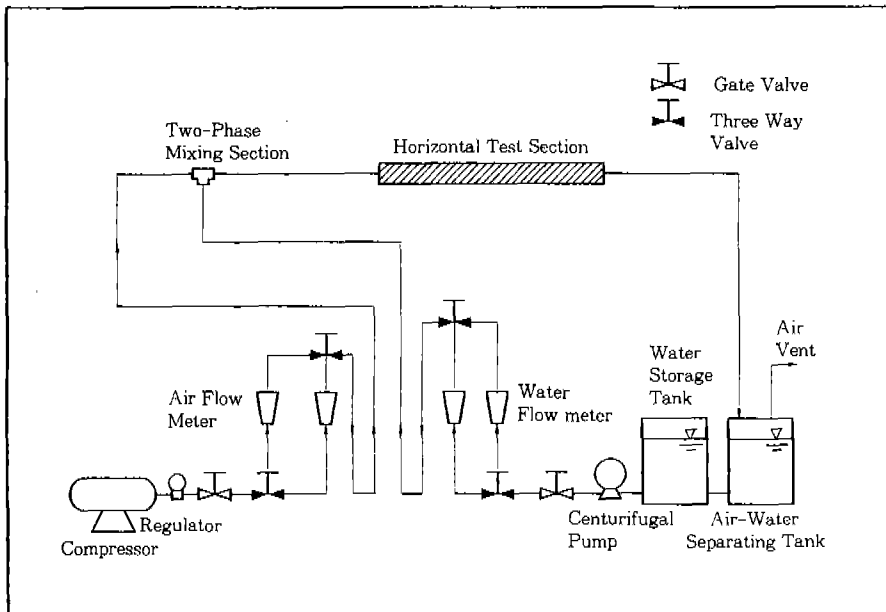


Fig.1 Schematic diagram of the two phase flow facility

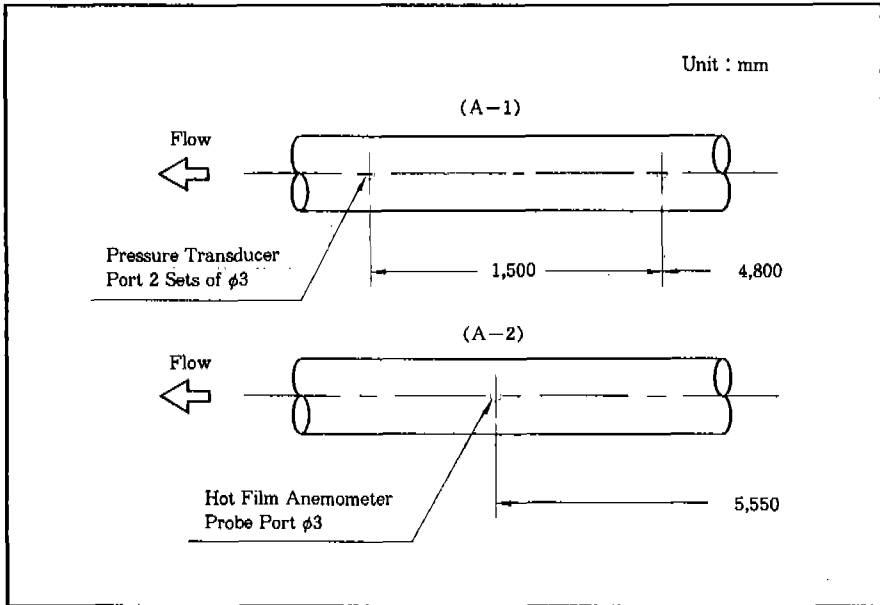


Fig.2 Test Section

개 뚫었다. 유동양식 판별을 위한 전기 전도 프로우브는 열선 프로우브의 계측 구멍을 이용하여 교대로 장착하였다. 이때 열선 풍속계 프로우브와 전기전도 프로우브를 자유로이 이송할 수 있도록 미세거리장치를 연결시켰다.

2.3 자료처리

Fig.3은 본실험의 자료처리를 도시한 것이다. 유동양식 판별을 위한 전기 전도 프로우브 신호는 2상유동계측기(Kanomax Model 7931)를 통해 A/D 변환기(Nanotec Model NM-7)로 입력되고, 압력 변환기(Druck, model PDCR 120/WL)에 의해 검출된 차압신호는 압력지시계에 의해 차압 측정치를 직접 나타내며 A/D 변환기로 입력된다. A/D 변환된 전기 전도 프로우브 신호와 차압 신호는 2/1000초 간격으로 최대 2048개의 신호를 퍼스널 컴퓨터에서 받아들여 저장하여 자료처리를 하였다. 프로우브(TSI model 1264AW)에서 검출된 액상평균속도와 난류강도 신호는 열선 풍속계로 입력되어 온도 보정 및 선형화된 신호는 정규화 하여 A/D 변환기로 입력되고 퍼스널 컴퓨터에 최대 2048개

의 신호를 받아들여 저장한다. 이때의 sampling rate는 5khz, 파열비는 1.05로 하였다.

2.4 실험방법

본 실험은 먼저 단상유동시 고분자물질을 첨가하였을 경우와 첨가하지 않았을 경우 시간에 따른 압력강하를 계측하여 마찰저항 감소율을 산출하였으며, 평균속도, 난류강도를 계측하였다. 2상유동시 기포류의 유동양식에서 순수 수용액과 고분자물질 농도를 변화시키면서 시간에 따른 압력강하, 평균속도, 난류강도를 계측하였다. 열선 풍속계의 원추형 프로우브를 관의 상단부에서 2mm씩 하부로 이동하며 시험부 반경방향에 따른 평균속도와 난류강도를 계측하여 액상평균속도와 난류강도를 산출하였다. 실험에 앞서 열선 풍속계 보정은 Fig.4에 도시한 것과 같이 DISA Information에서 J. Pichon¹¹⁾이 제시한 방법으로 수행하였다. 액상평균속도와 난류강도는 Liu²⁾가 제시한 방법으로 Fig.5와 같이 상분리를 시켰다. Fig.5에서 점선안의 신호는 기상의 신호이며, 액상 측정용 열선풍속계 프로우브에서 밀도가 적은 기상이 통과할때 출력되는 신호는 급격

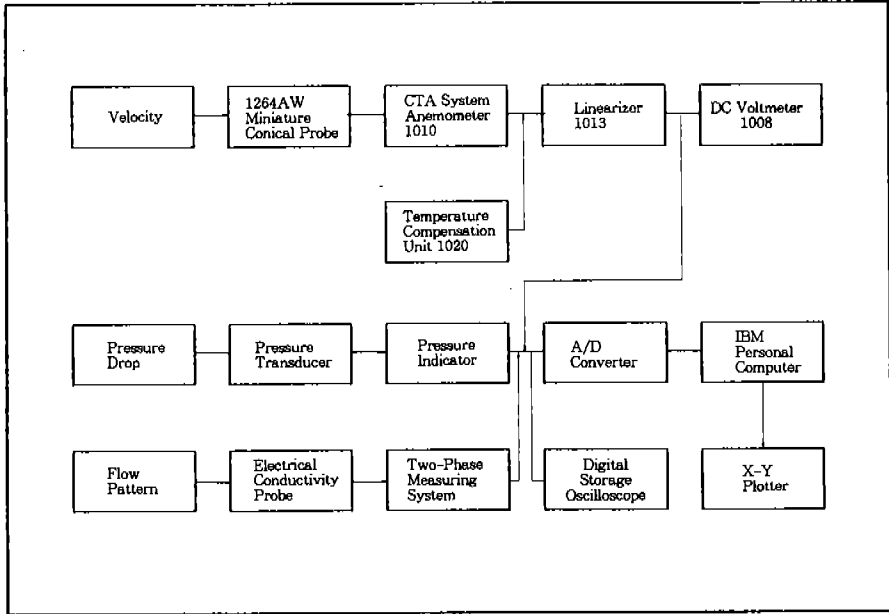


Fig.3 Block diagram of data processing

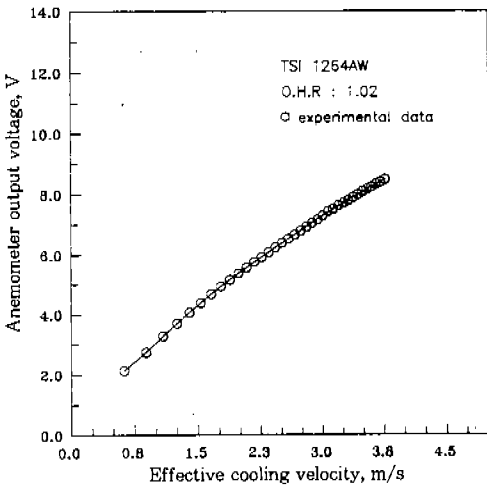


Fig.4 Calibration result of hot-film anemometer

히 저하되기 때문에 Threshold(T)와 기울기(S)를 이용한 상분리를 하였다.

고분자물질의 용해방법은 1ℓ의 순수 수용액을 비이커에 넣고 폴리아크릴라이드(PAAM) 또는 코폴리머(A611P)를 첨가한 다음 교반기

로 5분 동안 500rpm으로 교반시킨 후 다시 100rpm으로 10분 동안 교반시켰다. 이렇게 충분히 교반된 고농도 수용액은 Stock-Solution이며, 이것을 299ℓ의 순수 수용액에 넣어 100rpm으로 1시간 동안 더 교반시킨다. 이때 고분자물질이 15, 30, 60g일때 교반된 50, 100, 200ppm의 농도인 고분자 수용액은 순수 수용액 전체에 균일한 농도를 유지하도록 하루 동안 방치해 둔 후 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력강하와 마찰저항감소

Fig.6~7은 단상류와 2상류의 유동시 겉보기 속도 변화, 고분자물질의 종류 및 농도변화에 따른 압력강하를 비교 도시한 그림들로서 순수 수용액의 유동보다 고분자물질 수용액인 경우 압력강하는 감소하며, 또한 순수 수용액보다는 PAAM수용액의 경우 압력강하가 감소로 나타나지만 농도변화에 따른 영향은 매우 미소함을 나타내는 반면 A611P수용액의 경우 농도변화에

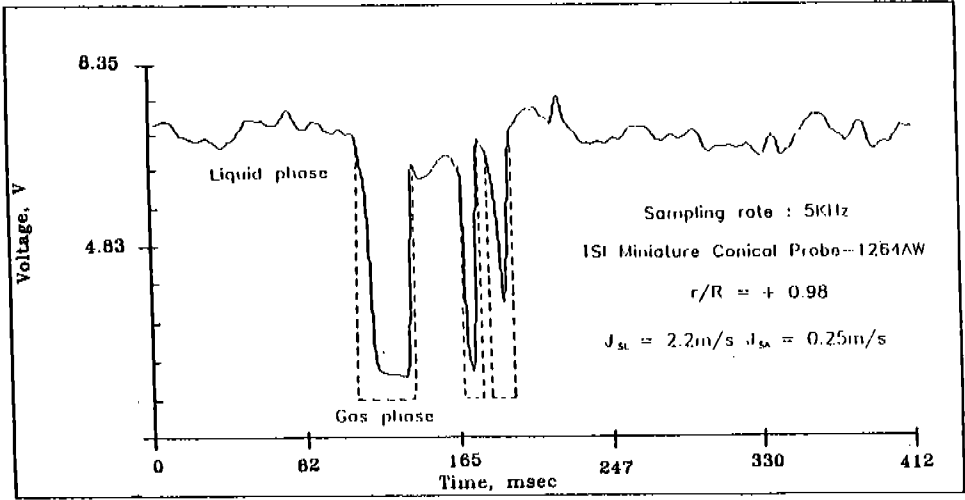


Fig.5 Typical raw data and result obtained by the phase discrimination

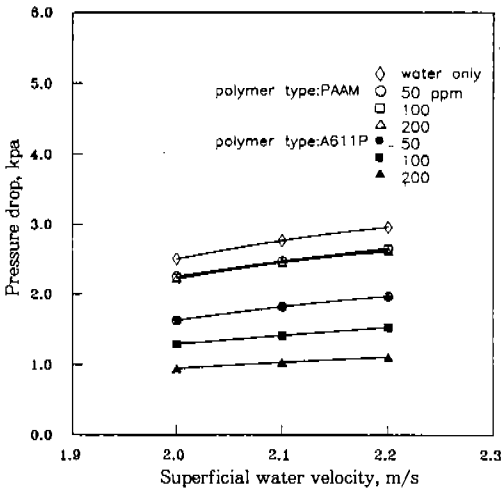


Fig.6 Comparisons of pressure drop for polymer additives

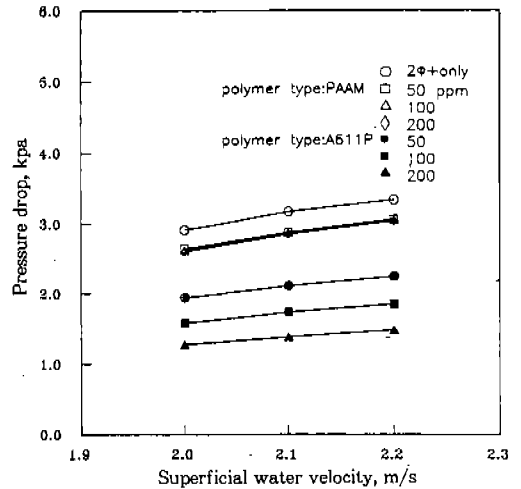


Fig.7 Comparisons of pressure drop for polymer additives at $J_{SA} = 0.25 \text{ m/s}$

의한 압력강하가 현격히 감소함을 알 수 있다. 이때 본 실험에서 사용한 고분자물질중 PAAM의 분자량은 5만~6만개이나 A611P의 분자량이 14만~15만개로서 압력강하는 고분자물질의 분자량이 클수록 감소됨을 알 수 있다. 단상류에 비해 2상류의 압력강하가 증가함은 유량증가 및 2상류의 난류정도가 증가함에 따라 기인된다고 생각된다. 이때 압력강하는 고분자물질이 어느정

도 실험시간의 경과에 따라 기계적 퇴화가 발생하므로 이를 고려하여 작동유체가 실험장치를 유동한지 30분이 되었을때 측정한 자료이다.

Fig.8~9는 단상류와 결보기물속도(J_{SL})가 2.1m/s로 유동할때와 2상류와 $J_{SL} = 2.1 \text{ m/s}$, 결보기공기속도(J_{SA})가 0.25m/s로 유동할때 어느정도 실험시간의 경과에 따른 마찰저항 감소를 도시한 그림으로서 마찰저항 감소(D.R)는 아래 식

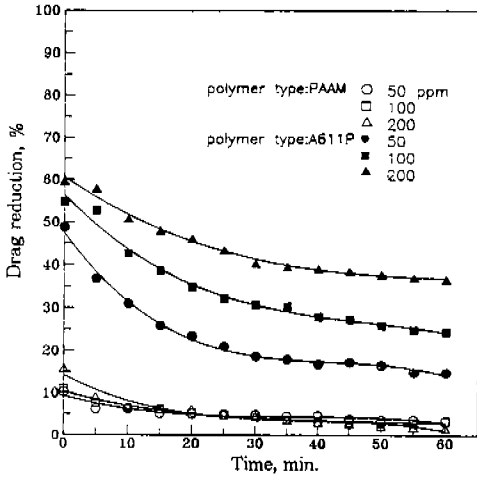


Fig.8 Comparison of drag reduction for polymer additives at $J_{SL}=2.1m/s$

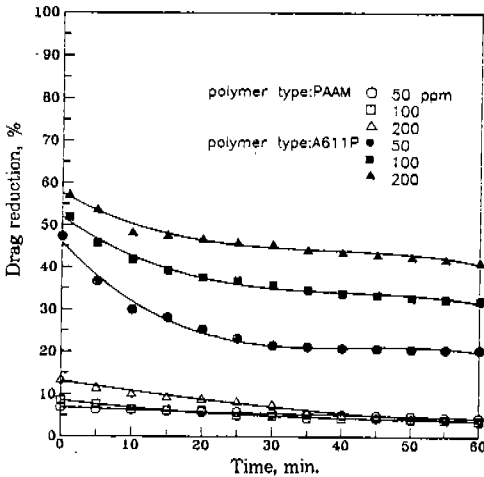


Fig.9 Comparison of drag reduction for polymer additives at $J_{SL}=2.1m/s$ and $J_{SA}=0.25m/s$

에 의해 계산되었다.

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

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

단상류와 2상류의 유동시간, 고분자물질 종류와 농도변화에 따른 마찰저항 감소율을 비교도 시한 그림들로서 단상유동시 농도 200ppm인 A611P수용액인 경우 초기 시간에는 마찰저항 감소율이 최대 60%까지 이르나 시간에 따라 마찰저항 감소율은 고분자물질의 기계적퇴화로 인하여 감소하는 경향을 알 수 있다. 2상유동인 경우도 동일한 경향을 보이나 초기 실험 시간에는 단상유동에 비해 마찰저항 감소효과가 적으나 30분 이후에는 크게 나타내고 있다. PAAM수용액인 경우 초기시간에는 마찰저항 감소현상이 최대 약 15%까지 이르지만 시간에 따라 농도 변화에 상관없이 약 5~4%의 마찰저항 감소효과를 얻을 수 있다. 또한 PAAM수용액에서도 시간 경과에 따라 마찰저항 감소율은 미소한 변화가 있는데 Yang등¹³⁾은 회전 디스크계를 이용한 마찰저항 감소실험에서 PAAM과 폴리에틸렌옥사이드(PEO) 각각의 마찰저항감소 성능실험 및 고분자 분해실험에서 PAAM이 PEO보다 마찰저항 값이 적지만 높은 온도에 따라서 온도 분해 및 강한 전단에 의한 기계적분해가 일어나지 않음을 보여 주었는데, 본 연구와도 비슷한 결과를 얻었다고 볼 수 있다. 그러나 A611P수용액인 경우에는 마찰저항 감소율이 농도증가에 따라 크게 증가하며 처음부터 30분전까지는 고분자물질의 기계적퇴화로 인하여 다소 급격한 감소를 보이나 30분 이후에는 비교적 안정적임을 나타내고 있다. 또한 농도 증가에 따라 마찰저항 감소율이 크게 증가함이 입증되고 있다. 따라서 기존에 마찰감소제로 사용한 PAAM보다는 A611P가 더욱 효과적임을 알 수 있다.

3.2 액상평균속도와 난류강도

본 실험에서는 액상평균속도와 난류강도 계측은 고분자물질의 기계적 퇴화를 고려하여 실험이 30분 정도 경과한 후에 시험부 반경방향으로 관의 하단부에서 2mm씩 프로우브를 이송하여 관의 상단부까지 계측하였다. Fig.10은 순수 수용액이 $J_{SL}=2.2m/s$ ($Re=3.3 \times 10^4$)으로 유동시 유동장의 난류유동임을 확인하기 위하여 계측한 신호와 실험식(Power Low)과 비교한 그림으로

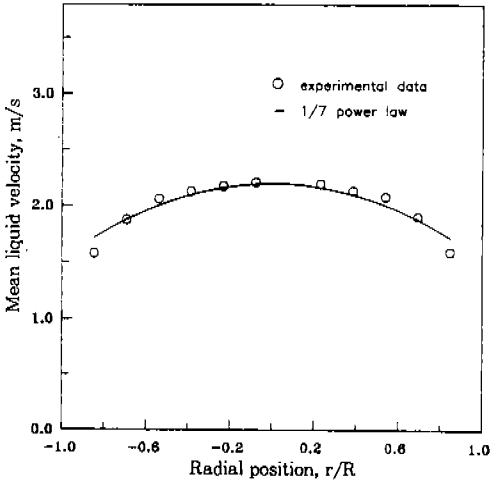
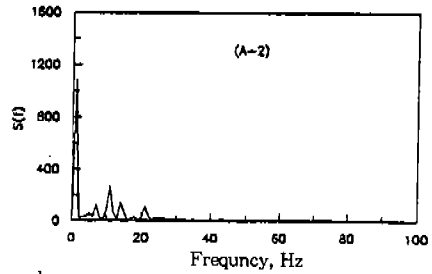
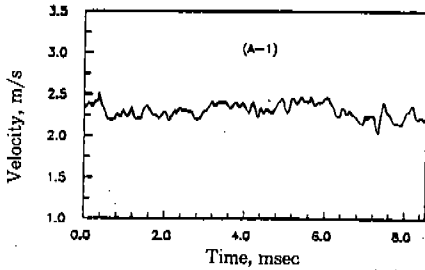


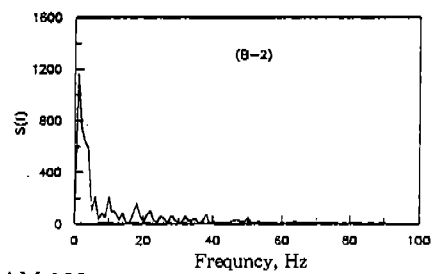
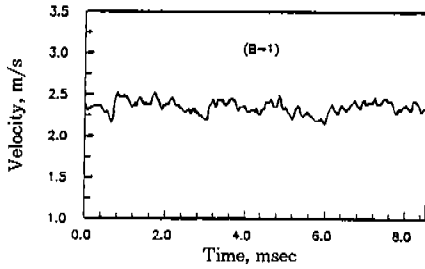
Fig. 10 Liquid velocity profile at $Re = 3.3 \times 10^4$

서 난류유동임을 볼 수 있다. 이때 종축의 -1.0 은 시험부 관의 하단부를 의미하여, 1.0 은 시험부 관의 상단부를 의미한다.

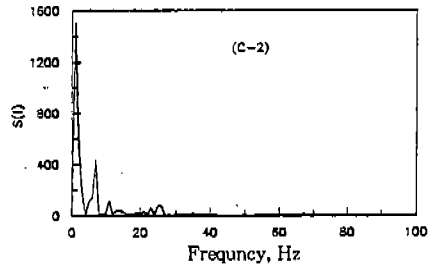
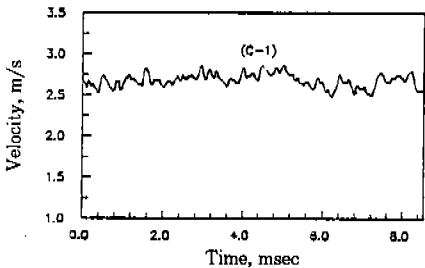
Fig. 11~12는 시험부 관벽에서 1mm 떨어진 위치와 중심에서 순수 수용액이 $J_{SL} = 2.2m/s$ 로 유동할 경우와 농도 100ppm의 PAAM과 A611P수용액이 유동할때 열선풍속계에서 검출된 속도신호와 그 신호의 스펙트럼을 도시한 그림으로서 이들 결과를 종합적으로 살펴보면 관의 중심에서 계측한 속도신호의 파동성분은 고분자물질 첨가에 관계없이 미소한 변화로 나타내고 있었으나 관벽 근처에서의 계측한 속도신호의 파동성분은 순수 수용액만 유동할때보다 PAAM 수용액, A611P수용액 순으로 파동성분이 감소



(a) Water only



(b) Water+PAAM 100ppm



(c) Water+ A611P 100ppm

Fig. 11 Comparison of velocity signals and power spectrum at $J_{SL} = 2.2m/s$ on the pipe center

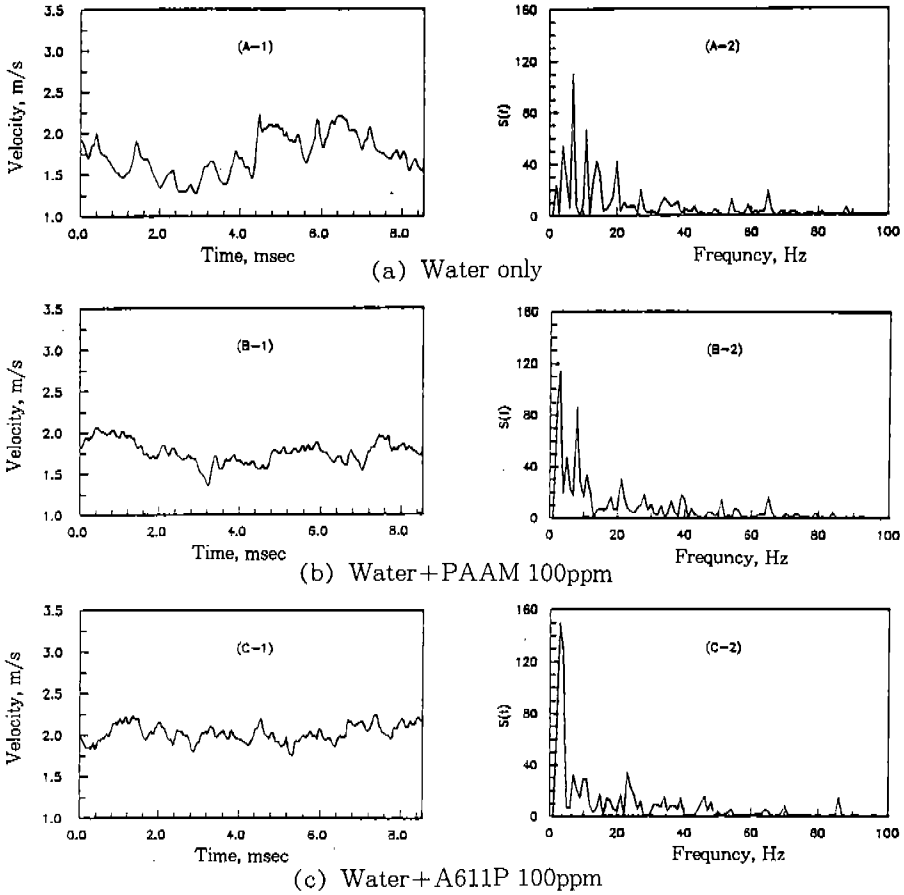


Fig.12 Comparison of velocity signals and power spectrum at $J_{SL} = 2.2\text{m/s}$ near the wall of pipe

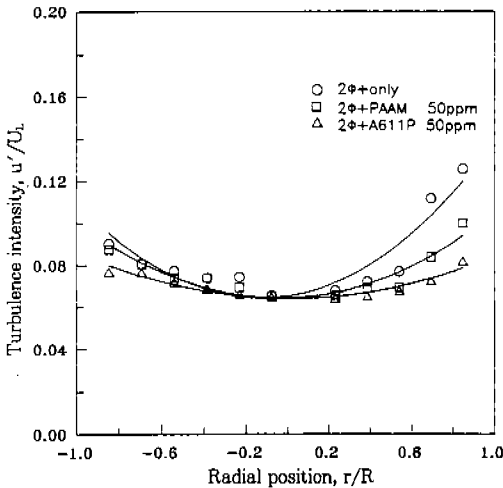


Fig.13 Comparison of turbulence intensity profiles two phase flow $J_{SL} = 2.1\text{m/s}$, $J_{SA} = 0.25\text{m/s}$

함을 나타내고, 스펙트럼 분석결과 순수 수용액인 경우 여러 고주파수 성분이 존재하여 밴드폭이 큰데 비해 고분자수용액의 경우 적어짐을 볼 때 이는 고분자물질 첨가시 관벽근처의 난류유동을 억제하여 마찰저항 감소현상이 관벽 근처에서 발생하는 것이며, 기존에 보고된 완화설을 뒷받침할 수 있음이 확인되고 있다.

Fig.13은 $J_{SL} = 2.1\text{m/s}$, $J_{SA} = 0.25\text{m/s}$ 일때 즉, 순수 수용액의 기포류 유동조건 일때와 순수 수용액에 50ppm의 PAAM과 A611P를 각각 첨가하여 유동할때 열선풍속계로 부터 각각 2상류 속도신호를 검출하여 상 분리한 후 시험부 반경방향에 따른 난류강도를 도시한 그림이다. 고분자물질의 기계적퇴화를 고려하여 실험시작 후 30분이 되었을 때 계측한 것으로 시험부 반경방향에 따른 계측시간은 약 10분정도 소요된다.

따라서 마찰저항 감소율의 경우 실험시작후 30분에서 40분사이에 A611P수용액은 2.1~6.19%, PAAM수용액은 2.2~7.9%가 고분자물질의 기계적퇴화로 인하여 감소되며, 열선풍속계의 보정오차가 약 $\pm 5\%$ 이므로 난류강도의 신호에 위와 같은 오차가 내적 되어 있다고 판단된다. 난류강도는 관의 중앙 근처에서 고분자물질에 관계없이 그 크기가 거의 일정하지만 관벽 근처로 갈수록 순수 수용액, PAAM수용액, A611P수용액 순으로 그 크기가 감소되므로 관벽 부근에서 난류현상이 억제됨을 볼 수 있다. 고분자물질 첨가시 관벽 근처의 난류강도가 억제됨을 볼 때 마찰저항 감소현상은 관벽 근처에서 발생한다고 사료되며, 기존의 단상유동시 보고된 완화설을 뒷받침할 수 있음을 확인되고 있다. 관의 하단부보다 관의 상단부에서 난류강도가 크게 발생하는데 이는 관의 상단부에서 유동하는 기상과 액상의 파동성분에 의한 영향으로 고려된다.

4. 결 론

본 연구는 수평관에서 단상류와 기-액 2상류가 각각 유동할때 고분자물질을 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우에 압력강하를 측정하고 마찰저항 감소효과를 연구하였으며 동일한 유동장에서 반경방향에 따르는 액상평균속도와 난류강도를 측정하여 마찰저항 감소 현상을 고찰하므로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단상류와 2상류의 유동시 고분자의 농도가 높을수록, 결보기 속도가 증가할수록 압력강하는 감소하며, 마찰저항 감소율이 증가하는데 PAAM수용액보다 A611P수용액이 마찰저항 감소효과가 크므로 마찰저항 감소제로서는 A611P수용액이 효과적임을 알 수 있다.
- 2) PAAM수용액은 시간에 따른 기계적 퇴화에 비교적 안정적이나 A611P수용액은 초기 때는 급격한 기계적 퇴화가 나타나며, 2상유동시 단상유동에 비하여 압력강하가 증가하나 실험이 30분 정도 경과한 후에는 마찰저항 감소효과가 크게 나타내고 있다.

- 3) 단상류의 속도성분과 속도신호의 스펙트럼 비교 분석 결과 마찰저항 감소현상은 관벽에서 발생함을 확인하였고, 2상류의 난류강도는 고분자물질에 관계없이 관 중심 부근에서는 거의 동일한 값을 나타내며 관벽 근처에서는 순수 수용액, PAAM수용액, A611P수용액 순으로 감소하고, 관벽 부근에서 난류현상이 억제됨으로 알 수 있다. 이 결과는 단상유동시 기존에 보고된 마찰저항 감소 이론 중 완화설과 일치되고 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 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 Rheology, Vol. 2, pp. 134~141.
2. R. H.J. Sellin, J. W. Hoyt and O. Scrivenner, 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. Astarita, G., 1965, "Possible Interpretations of the Mechanism of Drag Reduction in Viscoelastic Liquids", Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol. 4, pp. 354.
4. Gadd, G. E., 1965, "Turbulene Damping and Drag Reduction Produced by Certain Additives in Water", Nature, Vol. 26, pp. 463.
5. Gadd, G. E., 1966, "Differences in Normal Stress in Aqueous Solutions of Turbulent Drag Reducing Additives", Nature, Vol. 212, pp. 1348.
6. Oliver, D. R. and Young, h., 1968, "Two-Phase Non-Newtonian Flow Part 1: Pressure Drop and Hold-up", Trans. Instin. Chem. Engrs, Vol. 46, pp. 449-464.
7. 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.
8. Greskovich and Shrier, 1971, "Drag Reduction in Two-Phase Flow", Eng. Chem. Fundam, Vol. 10, No. 4, pp. 646~648.
9. 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.
10. 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.
11. Pichon, J., 1970, "Comparison of Some Methods of Calibrating Hot-Film Probes in Water", DISA Information, No. 10, October, pp. 16~21.
12. Liu, T. J. 1989, "Experimental Investigation of Turbulence Structure in Two-Phase Bubbly Flow", Ph. D. Thesis of Northwestern University.
13. Yang, K. S., Choi, H. J., Kim, C. B., and Jhon, M. S., 1991, "A study of drag reduction by polymer additives in rotating disk geometry", Korean J. Rheology, Vol. 3, pp. 75~85.