

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 19, No. 3, 1999

관 유동에서 폴리머 첨가에 의한 저항감소 현상의 실험적 고찰

차경옥*, 김재근**

* 명지대학교 기계공학과

** 신성대학 자동차계열

An Experimental Study on the Drag Reduction with polymer Additives in Pipe Flow System

K. O. Cha^{*}, J. G. Kim^{**}

* *Department of Mechanical Engineering Myong-Ji Univ.*

** *Department of Faculty Automobile Shin-Sung Colle.*

ABSTRACT

Previous researchers have studied how to reduce a pumping power in order to save energy in the fluid transporting system. Especially, it has been studied a lot about reducing the pressure drop among parameters related to the energy saving for fluid transport. This study is to investigate the effect of a substantial drag reduction caused by the polymer(A611P, A601P) when the working fluids flow to the vertical and horizontal direction in the vertical cylindrical equipment of closed flow system. In this experiment, we mount a visualization equipment on the test section and take pictures. With using the PIV system, instrument and analyzing the movement of bubble for different polymer concentration are observed and some mechanism of the drag reduction effect is clarified.

기 호 설 명

- D.R : 저항감소율(%)
 J_{SL} : 겉보기 물속도(m/sec)
 J_{SA} : 겉보기 공기속도(m/sec)
 $\dot{\gamma}$: 전달률 (sec⁻¹)
 Re : 레이놀즈수

1. 서 론

유체의 난류유동시 압력강하는 난류저항과 밀접한 관계를 갖고 있다. 이때 압력강하를 줄이는 것은 곧 에너지 절약이라는 관점에서 고분자 첨가제에 의한 난류저항 억제에 대한 폭넓은 연구가 수행되어 오고 있으나, 이 현상에 대한 이론적 확립 및 정량적인 연구는 매우 부족한 실정이다. 한편, 유체의 점탄성 특성과 에너지 소비 관계에서 저항감소현상을 살펴 볼 수 있다. 플라스틱, 용유물, 단백질용액 등에서의 응력은 변형구배 이력(history of deformation gradation)의 비선형 함수로 표시되는데, 이런 유체들을 기억유체(memory fluid) 또는 점탄성유체(viscoelastic fluid)라고 한다. 점탄성유체가 난류에 관내를 흐를 때의 유동특성은 뉴턴유체나 단순점성 비뉴턴 유체와는 매우 다른 특성을 보이고 있는데, 난류유동시 점탄성유체의 마찰계수는 뉴턴유체나 단순점성 비뉴턴유체의 경우 보다 낮게 관찰된다. 이것을 저항감소현상이라 한다. 그런데 난류현상과 고분자 동력학 사이의 관련 자체는 아직 완전히 규명되지 못한 상태이고, 난류유동에서의 저항감소현상에 대한 해석은 현재도 많은 연구자들에 의해 연구되고 있다. Astarita¹⁾는 점탄성유체의 난류유동은 억제되는 것이 아니라 점성유체보다 덜 확산적인 것이라고 예측했다. Gadd²⁾는 저항감소현상의 원인은 난류확산의 감소가 아니고 난류발생의 감소에 있다는 이론을 제안했다. Gadd가

제시한 이론은 Johnson³⁾에 의해서 확인되었는데 그들은 고분자물질을 포함하는 경계층의 발달과정에서 small eddy의 생성이 감소됨을 보였다. 이것을 일반적으로 난류생성 억제이론(decreased production of turbulence)이라고 한다. 저항감소현상은 난류 유동장내에서 첨가물질에 의한 소용돌이 신장의 억제에 관계가 있다는 소용돌이 신장의 저항이론(resistance to vortex stretching)도 알려져 있다. Gadd는 소용돌이 신장은 벽면에서 고분자와의 상호작용에 의해 발생하며, 소용돌이 신장감소는 혼합의 감소를 가져오는 한편, 난류의 소멸속도를 증가시키므로 결국 저항 감소를 일으키게 된다고 했다. 저항감소현상의 기구를 설명하기 위한 이론이 Peterin⁴⁾에 의해서도 제안되었다. 그는 난류 유동장내의 고분자는 이웃하는 에디(eddy)의 중간 부분과 같은 신장 유동(elongation flow) 특성이 있는 영역에서 코일과 유사한 형태를 유지하고 있다가 강하게 펼쳐지는 분자의 신장을 일으켜 신장 유동에 대한 저항력이 증가하여 난류발생의 억제에 따라서 난류 마찰을 이끌어 낼 수 있다고 설명하였다. 이를 분자 신장-인장 유동이론(molecular stretching - elongation flow theory)이라고 한다. 또한 난류에 의한 에너지 소비에 관해서는 다음과 같이 설명할 수 있다. 즉 mean flow의 운동에너지는 난류 유동장내의 큰 eddy에 의해 흡수되어 작은 eddy로 전달되는데 최종적으로 가장 작은 Kolmogorov eddy에 이르러 분자 마찰에 의해 소비된다. 관내를 흐르는 유체 구조상 난류의 경계층은 Lumley⁵⁾에 의하면 크게 관성층(inertial layer)과 점성저층(viscous sublayer)의 두 영역으로 구분할 수 있으며, 이때 mean flow로부터 에너지를 흡수하여 소비시키는 여러 크기의 eddy들은 관성층에 존재한다. Lumley가 제안한 저항감소이론은 점성저층 바깥 부분에 존재하는 고분자에 의해 점성저층의 두께가 증가한다는 이론을 바탕으로 하고 있다. 그의 이론에 따르면 점성저

층에 고분자는 연신 되지 않고 단지 회전만을 하기 때문에 이 부분에서의 점도는 본질적으로 변하지 않게 되어 상대적으로 점도의 감소를 가져온다는 것이다. 이를 분자 신장-점성저층의 확대 이론(molecular stretching thickening of viscous sublayer)이라고 한다. Lumley가 제안한 저항감소이론은 관 벽의 효과가 존재하는 상황을 그 전제로 하고 있지만, 최근에 유체가 난류상태로 흐르는 관 중심부에 고분자를 주입시킨 실험에서 벽의 효과가 존재하지 않는 조건에서도 저항감소 현상이 발생하는 것이 관찰되었다. 그러나 de Grnnes⁶⁾는 완전히 다른 방식으로 저항감소현상을 설명하는 새로운 이론을 제안하였다. 그 이론의 핵심은 small scale에서 일어나는 고분자효과는 점성이 아니라 탄성에 의해서 설명되어진다는 탄성이론(elastic theory)에 있다. 이상과 같이 저항감소현상의 기구에 대한 여러 가지 이론이 제안되고 있지만 종합적으로 정리하면 크게 완화설과 전단설로 나누어 설명할 수 있다. 전단설이라는 것은 난류에 있어서 경계층의 바깥쪽 흐름으로부터 경계층 또는 점성저층으로 주입하는 에너지를 고분자가 차단하여 흡수한다는 견해이다. 또한 고분자의 완화적인 변형에 의해서 난류 에너지를 흡수한다는 견해가 완화설이다. 물론 고분자는 층류에 있어서도 전단하는 가능성을 충분히 가지고 있기 때문에 전단설도 무시하기가 어렵지만, 여기서는 쇄상 고분자 수용액의 점탄성에 대한 분자적 이론에 기인하여 분자의 변형에 의한 에너지 축적에 착안한 Kohn⁷⁾의 관찰을 보면, 층류에 있어서는 분자의 운동량 확산이 전단응력의 본체이며, 이 기구에 의해서 유체의 운동에너지내에는 마찰열의 소멸(dissipation)이 이루어지지만, 유속이 크게 되고 경계층내의 속도구배는 유체의 작은 덩어리가 돌출하여 큰 운동량 수송, 즉 큰 전단 저항이 발생하는 난류로의 이행이 이루어진다. 그런데 경계층내에 만약 쇄상 고분자의 랜덤 코일(random coil)이 존재한다면 이것이 용이하

게 변형하여 경계층내로 주입되는 에너지를 흡수하여 준다. 결국 랜덤코일이 일종의 부가적인 에너지를 빨아들이는 역할을 수행하게 된다. 점성저층으로부터 유체의 작은 덩어리가 돌출해 가는 대신에 고분자의 변형에 의해 에너지를 흡수하는 것이다. 결과적으로 흐름은 안정화되고, 랜덤코일의 완화적인 변형에 의한 에너지 손실은 난류 혼합에 의한 것보다 훨씬 작기 때문에 보다 좋은 효율을 얻게 된다. 따라서, 난류유동 저항은 대폭적으로 저하되고, 고분자의 변형에 의한 에너지흡수 또는 전단속도가 가장 큰 곳, 즉 벽면에서 난류억제가 실현된다. 그러므로, 고분자는 벽면에서 최고로 난류의 성장을 억제한다는 것이다. 이상과 같이 난류 저항감소현상의 기구에 대해 살펴보았지만 이것은 확립된 이론이 아니라 학설에 불과하며, 정성적, 정량적인 연구가 계속 이루어질 필요가 있다.

2. 관련 이론

2.1 고분자물질에 의한 난류 억제의 가설

고분자에 의한 난류억제의 상세한 메카니즘은 아직 확실하지는 않지만, 몇 가지 가정을 정리하면 다음과 같다.

- ① 난류억제는 벽면에서 일어난다.⁸⁾ 이에 대한 증거는 주사기로 관 벽 부에 고분자를 주입하면, 즉시 저항감소가 나타나지만 관의 중심부에 주입할 경우는 고분자수용액이 분산되어 관 벽부분에 도달할 때까지 난류는 없어지지 않는다. 즉 마찰저항 감소제는 경계층 또는 점성저층 내에서 효과를 발휘한다고 예측할 수 있기 때문이다.
- ② 선형구조를 갖는 고분자물질의 분자수가 10만 이상을 필요로 한다.⁹⁾ 이것은 고분자의 큰 확산성 및 랜덤코일상의 용해상태가 유효하다고 생각 할 수 있다.

- ③ 전체적으로 고분자첨가 시 유동에 억제제가 작용하여 난류가 대폭적으로 없어질 때도 여전히 점성저층 내의 흐름은 완전한 층류가 아니고, 속도구배의 위치 및 시간적인 변동이 크다. 고분자수용액은 벽면에 대한 흐트러짐의 발생까지도 억제하는 것이 아니고 그 발달을 억제하는 것일 것이다.¹⁰⁾

현재까지 난류발생에 관한 메카니즘이 정립되어 있지 않다. 따라서 이에 관한 연구가 진행되고 있다. 이때 난류억제의 문제는 난류발생의 상세한 가설 및 학설을 전제로 한다고도 말할 수 있다. 따라서 난류억제 문제는 반대로 난류 발생의 메카니즘을 푸는 전망을 주는 것이라고도 말할 수 있다.

2.2 고분자에 의한 난류억제

난류억제 효과현상을 표현하는데는 여러 가지가 있지만, 일반적으로 무첨가제와 비교, 고분자 종류, 농도 등을 변수로 가정할 경우 편리하다. 고분자에 의한 난류억제에 있어서 큰 관심사의 하나가 되는 것은 분자량의 의존성이다. 고분자에 의한 저항감소에 대한 인자들을 정확히 알지 못한다고 해도 가소성이 풍부하고, 액체 중에 확산을 나타내는 쇠상분자의 랜덤코일이 벽면에 발생하는 와난(渦亂)과 성장하는 와난이 역학적으로 상호작용을 하는 것은 상상하기에 어렵지 할 수 있다. 고분자의 분자량이 10만 이상인 폴리에틸렌옥시드에서는 저항감소의 현상이 뚜렷하게 나타나며, 10 ppm 초희박용액에 있어서도 저항감소는 가능한 최대의 효과를 발휘할 수가 있다. 어떠한 충분한 저항감소효과를 기대하기 위해서는 수 10만 이상의 분자량을 필요로 하는 것이다. 이 경우 큰 퍼짐을 가지는 랜덤 코일과 와난의 공간적 상호작용도 되면서, 코일의 '완화적' 변형의 시상수(time constant)와 와난의 생멸 시상수의 상대적 관계는 중요한 의미를 가지고 있을 것이다. 이와 관련하여 Virk¹¹⁾은 폴리에틸렌옥시드, 폴리

아크릴아미드 등 여러 종류의 분자량(수 10만~1000만)에 대하여, 여러 가지의 농도, 관의 지름에 대한 데이터를 정리하여, 저항감소효과에 극한 차이가 있다는 것을 규명하였으며 이런 현상을 최대저항감소 점근선(maximum drag reduction asymptote)이라고 했다. 그러나 이 점근선은 고분자물질의 종류, 분자량, 농도 등에는 관계가 없다. 단지 고분자가 난류억제의 기능을 완수하기 위해서는 앞에서 설명했던 것처럼 분자량수가 10만 이상을 필요로 하게 되지만, 그래도 쇠상분자가 난류와 유체역학적으로 상호 작용한다고 하는 경우에 직접적인 관계를 가지는 것은 분자량이 아니고 고분자량의 랜덤코일이 용매 중에서 나타나는 큰 '퍼짐'일 것이다. 저항감소 효과와 관계되는 것은 고분자의 중합도가 아니고, 용액 중에서는 퍼짐이라고 하지만, 사실은 유체 중에 퍼진 쇠상 분자변형의 완화 시간이 중요할 것으로 예견된다.

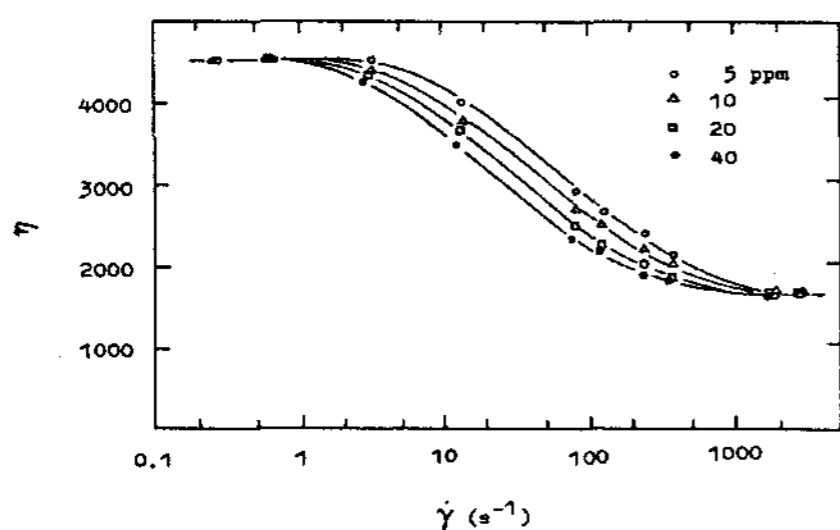
3. 실험

3.1 고분자물질의 물성치

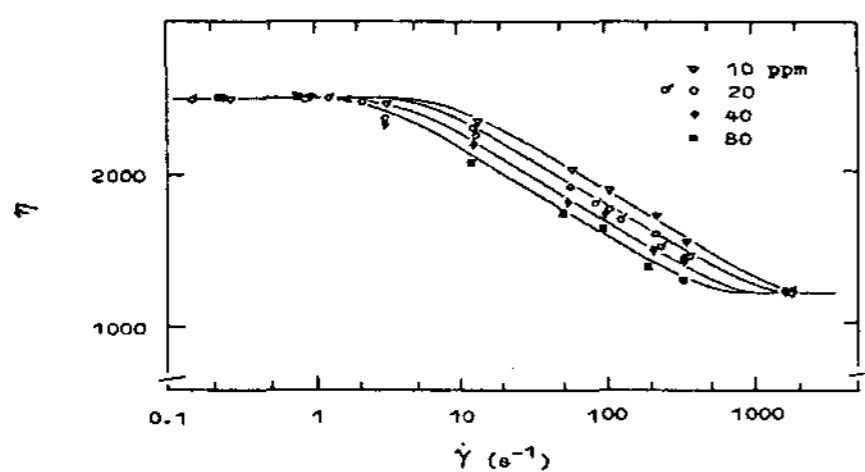
그 동안 선행된 연구에 의하면 압력강하를 감소시키기 위해 주로 많이 첨가된 수용성 고분자 물질은 PAA(Polyacrylamide)와 PEO(Polyethyleneoxide)이나, 밀폐계 시스템에서는 PAA, PEO 수용액은 기계적 퇴화로 인하여 그 효과가 매우 작음이 규명되었으며 밀폐계에서 효과적인 첨가제가 A611P임이 규명된 결과¹²⁾를 고려하여 본 연구에서는 분자량의 수가 1,400만~1,600만개로 구성되어 있는 A611P와 이보다 분자량수가 평균 200만개 많은 A610P 등을 사용하였다. 본 실험에 사용한 고분자 수용액은 그 동안 다수의 레올러지학자들에 의해 실험적으로 규명된 결과 전단박화(Shear-Thinning)유체임을 제시하였다. 특히 Kalashnikov¹³⁾는 모세관점도계와 회전점도계를

변형하고 수용성 고분자물질의 종류, 농도, 온도 등을 실험 변수로 하여 고분자 수용액의 전단율에 따른 겔보기 점도를 측정하여 제시한 것으로 그 결과를 살펴보면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1의 (a)는 러시아 Meisei Chemical사에서 제조한 Alcox 고분자물질로서 평균분자량 수가 1,400만개이다. 이는 본 실험에 사용한 수용성 합성 고분자물질 A611P의 분자량 수와 유사하다. 전단율을 증가시킬수록 겔보기 점도는 순수수용액에 가까운 수치를 보이고 있음을 볼 때 전단박화 유체임을 알 수 있다. Fig. 1의 (b)는 분자량 수가 620 만개인 Polyox WSR-301 고분자물질로서 Fig. 1의 (a)와 동일한 경향을 보이고 있다. 이상과 같이 수용성 고분자물질의 물성치를 살펴본 결과 본 실험에 사용하는 수용성 고분자물질은 전단박화 유체로서 난류 영역에서 순수 수용액과 고분자 수용액에 대한 레이놀즈수의 차이는



(a) Alcox



(b) Polyox WSR-301

Fig. 1. Reduced viscosity vs shear rate for solution of small concentration of different polymer

거의 없을 것으로 예측 할 수 있다.

3.2 실험장치

Fig. 2와 3은 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 이 실험장치에서 순환회로는 수직 및 수평관 시험부의 내부에 단상 및 기-액 2상류가 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 3마력인 부식방지용 내산스테인레스 원심펌프에 의해서 순간유량계를 통과한 후 시험부로 유입시켰다. 또한 공기압축기에서 분사된 공기는 압력조절기에 의하여 일정한 압력으로 조절된 후

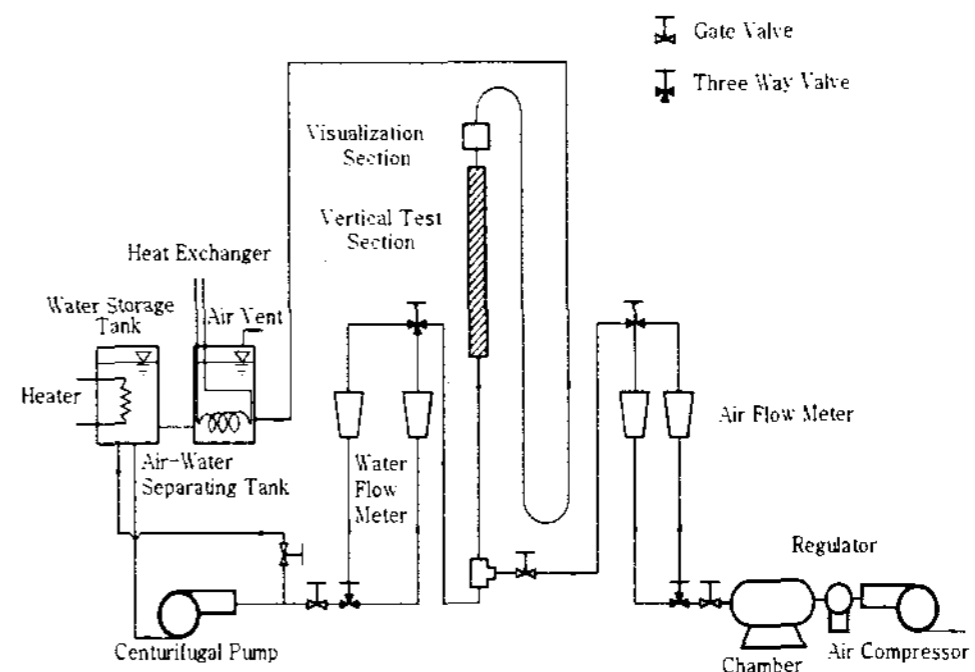


Fig. 2. Schematic diagram of the vertical flow facility

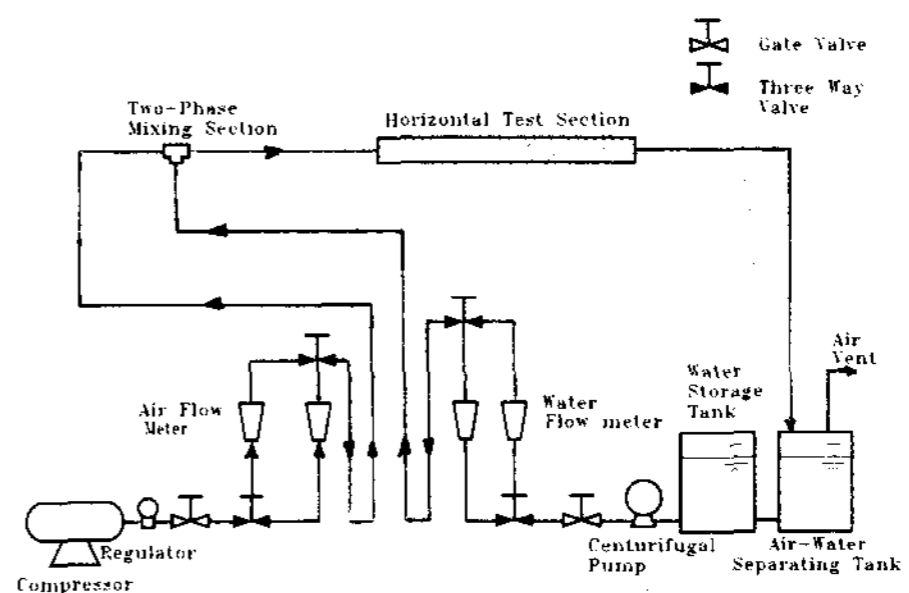


Fig. 3. Schematic diagram of the horizontal flow facility

순간 유량계를 통과하고 기-액 혼합부를 거쳐 시험부로 유입시켰다. 시험부를 통과한 2상류는 기-액 분리탱크에서 분리된 공기를 대기로 방출시킨 후 순환수를 저장탱크에 저장시키므로 일련의 순환회로를 완료시킨다. 이때 원심펌프와 순간유량계 사이에는 배수관을 순환수 저장탱크와 연결하였으며, 공기분사기와 압력조절기 사이에 공기저장탱크를 설치하여 압력파동을 안정화시킬 수 있도록 하였다. 공기와 순환수 유량은 시험부의 입구로부터 소정의 유동양식이 형성될 수 있도록 관로에 장치한 게이트 밸브로 각 상의 유량을 조절하였다. 각 상의 겉보기 속도계측용 순간유량계는 원심펌프와 공기압축기에서 각 상의 최대겉보기속도를 계산함으로써 그 범위의 유량계를 선정하였으며, 유량계의 보정은 단위시간당 관내에 흐르는 체적유량으로 검증하였다.

3.3 실험방법

수평 및 수직관 시험부의 입·출구부에 스트레인 게이지 형식의 차압용 압력변환기(DRUCK, model PDCR 120/WL)를 장착하고 유량변화에 따른 차압을 측정하였다. 압력변환기의 측정 범위는 $\pm 35\text{kPa}$ 이며, 최대 최소 압력차에 해당하는 허용 주파수는 10.5kHz 이나 압력강하를 계측해 본 결과 차압 신호는 2kHz 이하이므로 압력변환기의 주파수 응답 특성은 충분함을 확인하였다. 이때 온도 변화에 따르는 오차는 $0\sim 50^\circ\text{C}$ 범위 내에서 0.1% 이내이다. 압력변환기에 의해 검출된 차압 신호는 차압 지시계(DRUCK, model DPI 260)에 의해 차압 측정치를 디지털로 직접 나타내며 아날로그 신호는 A/D변환기(Dantek, model DAS-1600)로 입력시켰다. 이렇게 A/D변환기로 입력된 신호는 퍼스널 컴퓨터로 $2/1,000$ 초 간격으로 최대 4,096개의 신호를 받아들여 저장시켰다. 입력된 신호는 프로그램에 의해 처리되어 프린터를 통하여 출력시켰다. 수평 시험부 반경방향에 따른 속도 파동성분은 열선 풍속계(KANOMAX,

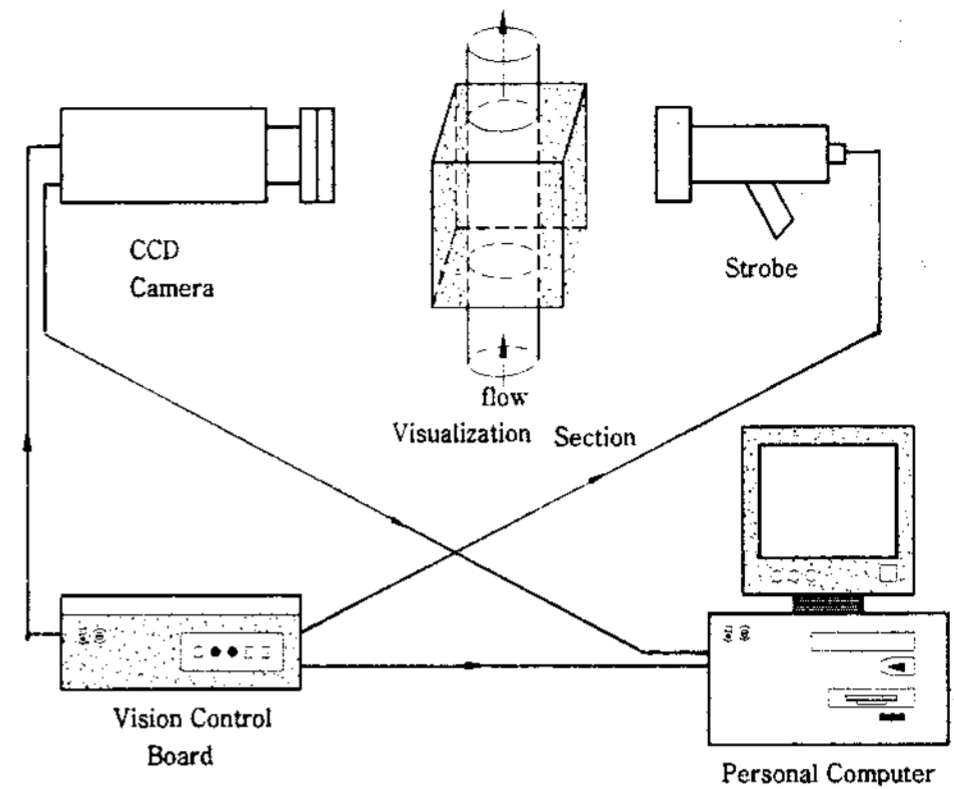


Fig. 4. Schematic diagram of visualization system

model 7224)로서 계측하였으며, 열선 풍속계용 프로우브(TSI, model 1264AW)는 "L" 형식으로 액체 측정용으로 유동장에 미소하게 영향을 주는 작은 프로우브이다. 또한 시험부의 상부에는 고분자수용액 내에 기포의 거동을 분석하기 위하여 가시화부를 설치하였으며, 가시화부는 내열유리관(Pyrex glass tube)을 사용하였다. 가시화는 Fig. 4와 같이 PIV시스템(IN-Tech, model ITVS-100)을 설치하고 사진 촬영하였다. ITVS-100시스템은 vision control board, CCD 카메라, 스트로버로 구성되었다. CCD 카메라로 원형관내 유체를 촬영할 때 관의 굴절 및 반사를 극소화하기 위하여 유동관로 외부를 사각덕트로 제작, 설치하여 유동관로와 사각덕트 사이를 물로 채웠다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 본 실험에 사용한 고분자물질 A601P와 A611P의 저항 감소효과를 비교 도시하였다. 수직 상향 시험부에서 고분자수용액의 유동조건은 순수수용액의 레이놀즈수와 동일하게 하고 순수수용액에 농도를 50ppm, 100ppm, 200ppm, 300ppm으로 첨가하고 각각 유동시키며 실험시작 후 5분이 경과 후 압력강하를 계측하고, 5분 간

격으로 60분 동안 실험에 대한 저항감소율을 고찰하였다. 농도가 동일할 경우 비교하여 보면 A611P수용액에 비해 A601P수용액이 저항감소효과가 더 우수함을 볼 수 있다. 이때 두 물질의 물성치 차이점은 A601 P가 A611P보다 분자량이 평균 200만개 더 많다. 따라서 분자량이 큰 고분자물질이 저항감소 효과가 좋음을 알 수 있다. 그러므로 이와 같은 점을 고려하여 레올로지학자들이 고분자물질을 개발한다면 더욱 저항 감소율을 높일 수 있다고 판단된다.

한편 그림을 살펴보면 실험시간 경과에 따른 저항 감소율은 초기시간에 다소 급격히 감소되나 실험을 시작하여 30분이 경과한 후에는 30분 이전에 비해 완만한 것을 볼 수 있다. 이는 실험장치중 펌프 및 유로의 형상 등에 의해 밀폐계를 순환하는 고분자수용액의 기계적 퇴화가 실험초기에는 급속히 발생하지만 약 30분이 경과한 후부터는 기계적 퇴화의 정도가 미소함을 볼 수 있다. 밀폐계에서 기계적퇴화는 필연적으로 발생하지만 $Re=3.0 \times 10^4$ 이며 농도가 300ppm일 때 실험시작 후 30분이 경과한 실험조건에서도 최대

약 50%이상의 저항 감소율을 유지하고 있음을 볼 수 있다. 또한 수평관 개방계에서 고분자수용액의 농도를 수십 ppm으로 유동시켰을 때 저항 감소율이 90%이상의 효과가 있음을 규명한 연구도 있지만¹⁴⁾, 밀폐계 내로 고분자수용액을 유동시킨 후 시간이 30분 정도 지났을 경우 농도 50ppm~300ppm일 경우 $Re = 3.0 \times 10^4$ 에서 저항 감소율은 약 26~53%이음을 알 수 있다. 한편, 밀폐계에서는 유동시간에 따라 기계적 퇴화로 인하여 일정한 저항 감소율을 유지 할 수 없는 단점이 있다. 그러나 많은 산업기기는 밀폐계로 구성되어 있기 때문에 유체의 유동장은 작동유체에 물성치 변화를 거의 주지 않는 A6 01P와 같은 고분자물질을 첨가한다면 유체수송에 있어 펌프 동력을 크게 절감할 수 있다고 판단된다.

Fig. 6은 수직관에서 A611P 및 A601P 고분자수용액의 농도를 200 ppm으로 유동시킬 때 $Re=3.4 \times 10^4$ 로 일정하게 유지하고, 시간에 따른 저항 감소율을 로그 좌표로 표시하여 상관 관계를 비교 도시한 것으로서 저항 감소율(D.R)에 대한 곡선의 방정식은 다음과 같이 표시된다.

여기서 t는 유동시간을 나타낸다.

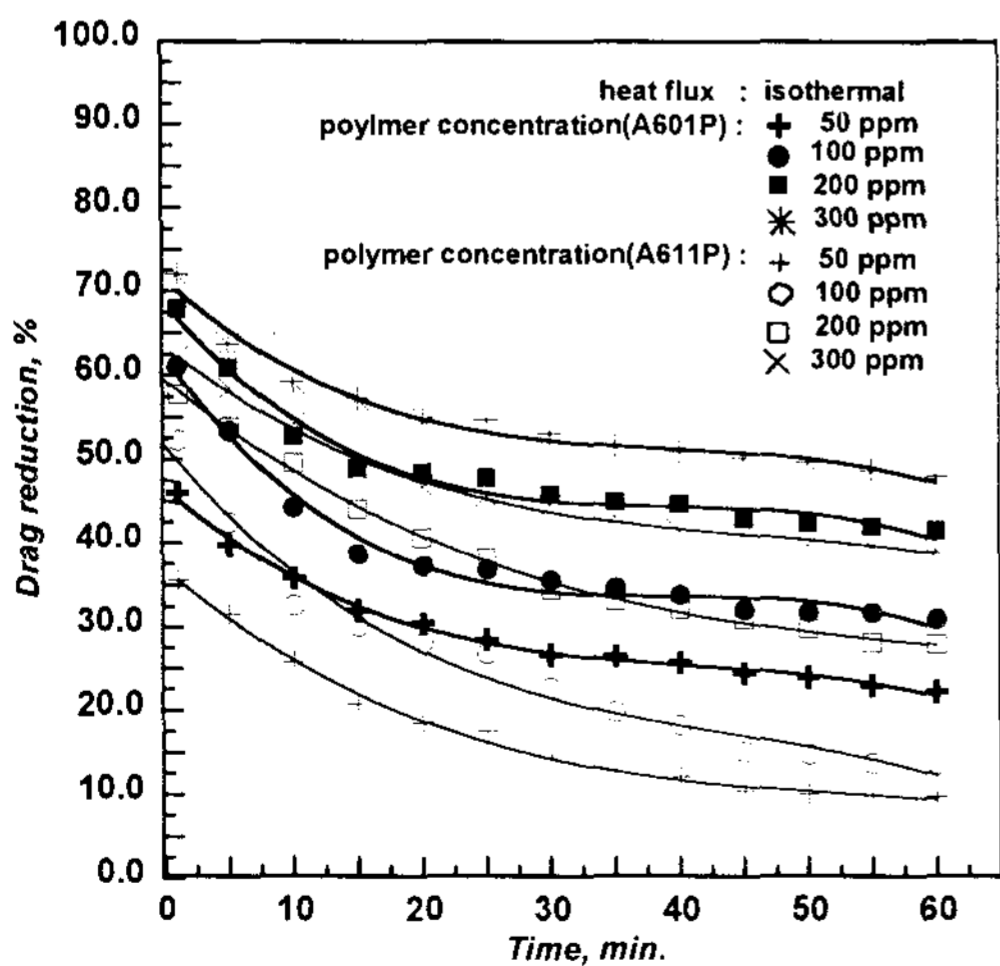


Fig. 5. Comparison of percent drag reduction for polymer kind at $Re=3.0 \times 10^4$ in vertical up-ward flow

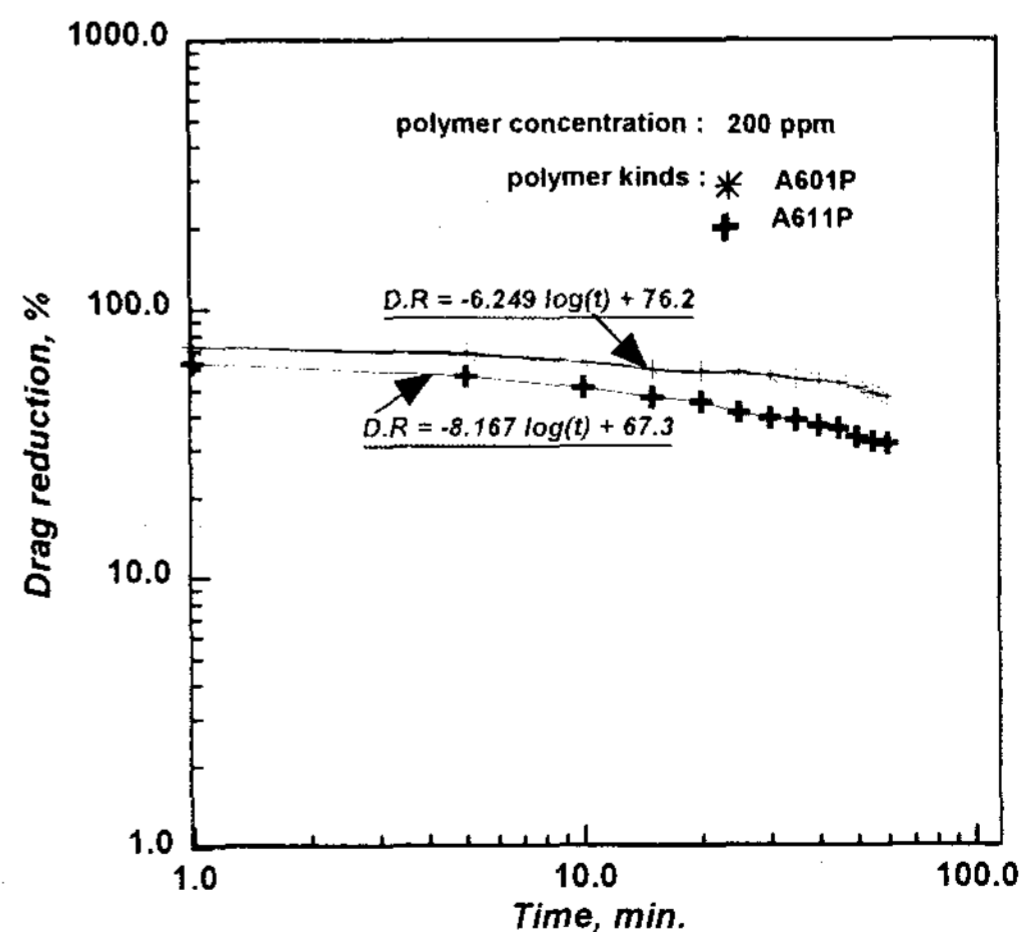


Fig. 6. Correlation of time versus drag reduction for polymer kinds

$$D.R = -8.167 \log(t) + 67.3 \quad (1)$$

$$D.R = -6.249 \log(t) + 76.2 \quad (2)$$

저항감소효과는 유체의 유동시간과의 관계가 A611P의 경우는 $\log(t)^{-8.167}$ 에 비례하며, A601P는 $\log(t)^{-6.249}$ 같이 비례하여 감소됨을 볼 수 있다. 이와 같은 감소현상은 기계적 퇴화로 기인된 것으로 판단된다.

밀폐계에서 기계적 퇴화로 인해 시간에 따른 저항감소현상의 변화는 시간과 저항감소율과의 상호관계를 고려하여 유동장에 고분자물질을 주기적으로 첨가한다면 지속적으로 저항감소효과를 유지 할 것으로 예측된다.

Fig. 7~8은 순수 수용액의 레이놀즈수가 3.3×10^4 으로 유동할 때와 순수 수용액을 유동시켰을 때 소요되는 동일한 펌프의 동력으로 순수 수용액에 농도가 50ppm의 PAAM 수용액과 A611P 수용액 경우 시험부 중심과 시험부의 벽면에서 1mm떨어진 위치에서 열선 풍속계의 프로우브로부터 검출된 속도 신호를 비교 도시한 그림들이다.

Fig. 7은 관의 중심에서 순수 수용액과 고분자 수용액을 유동시켰을 때 검출한 속도 신호를 비교한 것으로서 순수 수용액의 유동보다 고분자 수용액을 유동시켰을 때 평균속도는 증가되나, 속도 신호의 파동 성분은 고분자물질 첨가와 관계 없이 거의 차이가 없음을 볼 수 있다.

Fig. 8은 시험부 관의 벽근처에서 검출한 신호를 비교 도시한 것으로서 관의 벽근처에서 측정 한 평균속도는 순수 수용액만 유동할 때보다 PAAM 수용액, A611P 수용액 순으로 증가하며, 반대로 속도 파동 성분은 순수 수용액, PAAM 수용액, A611P 수용액 순으로 감소함을 볼 때 저항감소효과는 유동장 관의 벽근처에서 지배적으로 발생됨을 알 수 있다. 이와 같이 고분자물질에 의한 저항 감소현상은 관의 벽근처에서 지

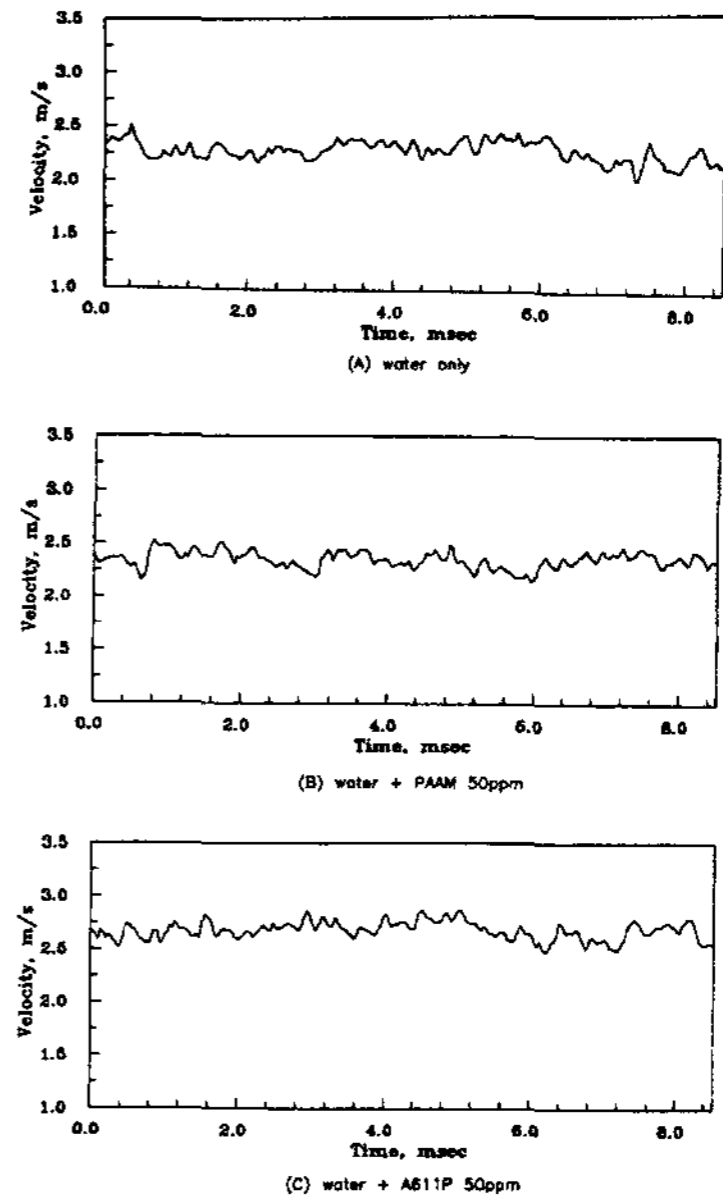


Fig. 7. Comparison of velocity signals at $Re=3.3 \times 10^4$ on the pipe center

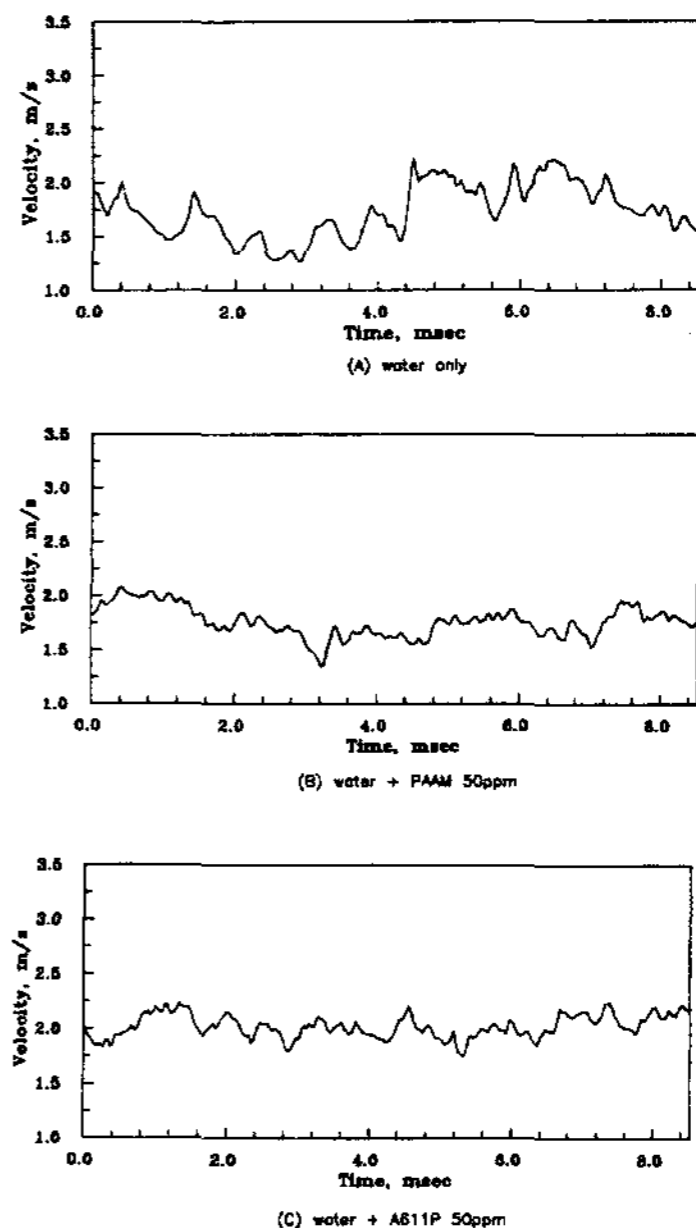


Fig. 8. Comparison of velocity signals at $Res= 3.3 \times 10^4$ near the wall of pipe

배적으로 발생하므로 관의 벽근처로부터 난류가 발생하는 대신에 고분자의 변형에 의해 에너지를 흡수하여 흐름을 안정화시켜 난류를 완화시키고 난류유동 저항은 대폭적으로 저하되며, 고분자에 의한 에너지 흡수 또는 전단속도가 가장 큰 위치, 즉 유동장 벽면에서 난류를 억제한다는 기존에 보고된 완화설을 뒷받침할 수 있는 좋은 실험적 자료라고 판단된다.

Fig. 9는 겉보기물속도를 2.5m/s, 겉보기 공기속도를 0.25m/s 일 때 PIV시스템을 이용하여 고분자물질의 농도를 변화시키며 유동시간이 30분 경과했을 때 촬영한 것이다. 이때의 농도조건은 각각 50ppm, 100 ppm, 200ppm, 300ppm이다. 이들 그림을 비교하여 보면 고분자수용액의 농도를 증가시킬수록 관벽 근처에 있던 기포들이 관의 중심쪽에 인접한 기포와 합체하므로 기포의 크기가 성장하면서 관의 벽과 중심부근 사이에서 상향 유동함을 나타내고 있다. 특히 A601P의 농도가 300ppm일 때는 기포의 모양이 작은 테일러형 형태의 기포로 성장하여 마치 슬러그류의 유동형태처럼 유동양식이 천이 됨을 알 수 있다. 이와

같이 기포의 형태는 고분자수용액의 농도 변화에 따라 변화됨을 볼 수 있는데, 기포의 모양과 유동 위치의 변화는 저항감소 현상과 밀접한 관계가 있다고 판단된다. 그런데 고분자 수용액의 농도에 따라서 유동장에서 기포의 모양과 유동위치가 변화한다는 것은 고분자 수용액의 유동속도가 변화되어 발생하는 변화로 예측할 수 있다. 이는 저항감소현상과 직접적인 관계가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10은 겉보기물속도를 2.5 m/s, 겉보기 공기속도를 0.25 m/s로 할 때 PIV시스템을 이용하여 고분자물질의 농도를 변화시키며 유동시간이 30분 경과했을 때 영상을 분석하여 시험부내의 기포의 속도벡터를 도시한 것이다. 30분이 경과했을 때 촬영한 사진은 고분자수용액의 기계적 퇴화를 고려하기 위해서이다. 그림에서 0ppm은 고분자물질을 첨가하지 않은 상태 즉, 순수수용액만 유동하는 것을 의미한다. 순수수용액에 비하여 고분자수용액의 농도를 증가시킬수록 기포는 관의 중심으로 이동하여 유동한다. 특히 농도가 증가할수록 속도벡터를 살펴보면 관의 벽근처에서 관의

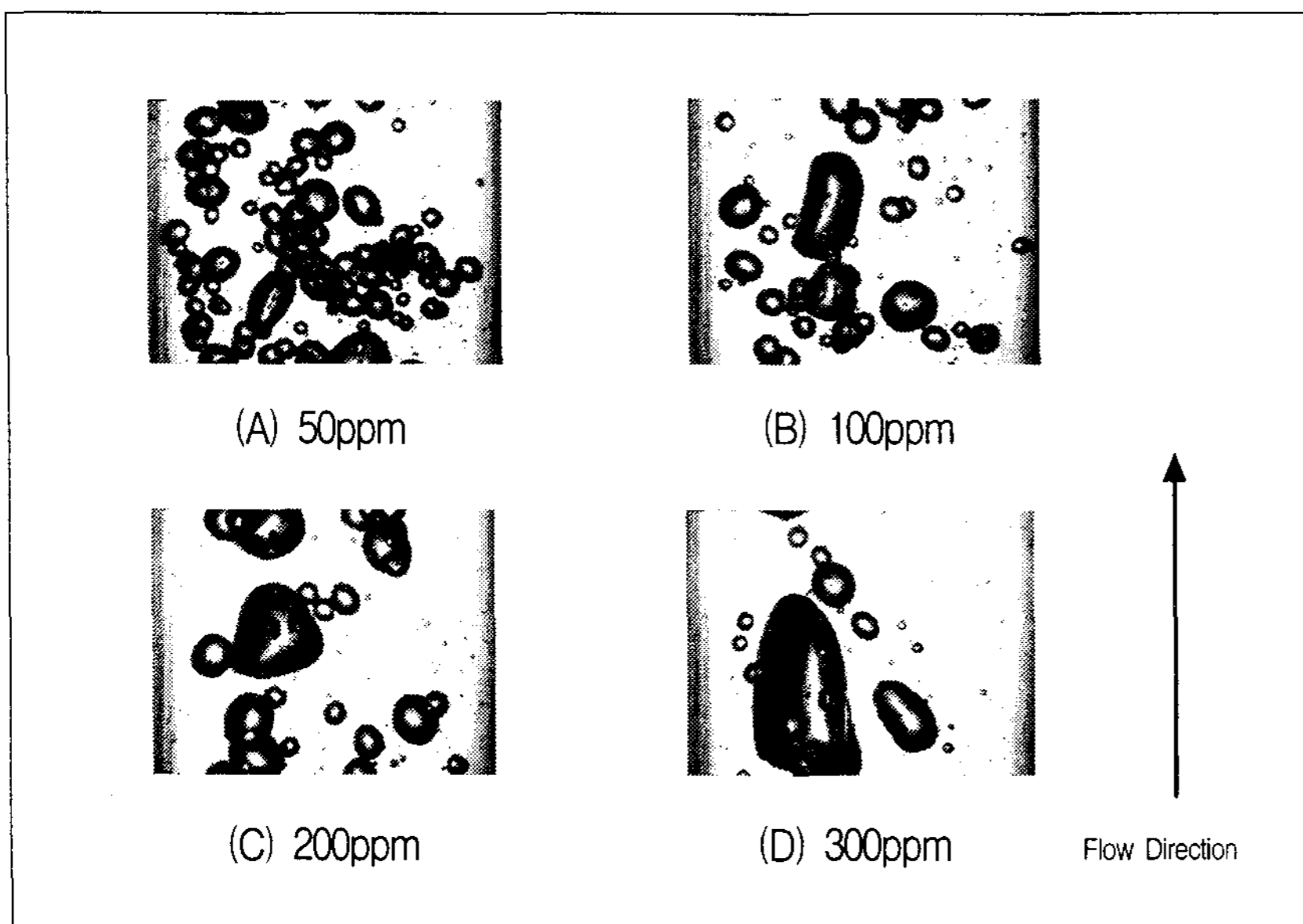
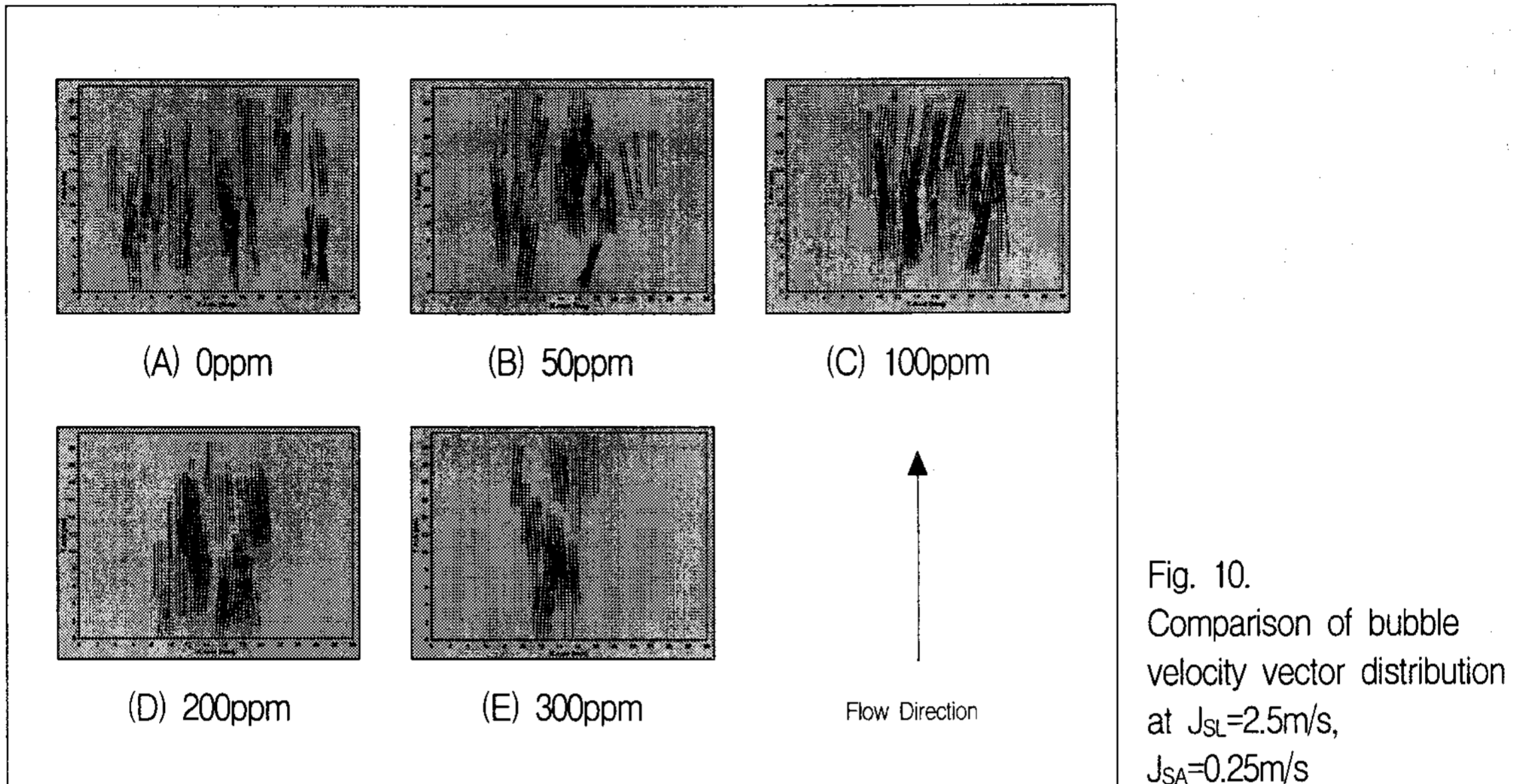


Fig. 9. Comparison of bubble behavior at $J_{SL}=2.5$ m/s, $J_{SA}=0.25$ m/s



중심으로 향하는 것을 볼 수 있다. 이는 고분자 수용액의 농도증가가 관의 벽근처 저항을 감소시킴으로써 벽의 근처 액체속도가 증가하여 상대적으로 관의 벽쪽에서 유동하는 기포가 관의 중심으로 이동한다고 판단된다. 따라서 이와 같은 결과는 저항감소현상이 관의 벽근처로부터 발생한다고 할 수 있으므로 기존에 추측한 완화설을 뒷받침할 수 있는 자료라고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 밀폐계 수직 및 수평원관 내에 고분자수용액을 유동시킬 때 압력강하, 유동속도 변동성분 및 가시화를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유동장에서 계측된 속도 신호를 관찰한 결과 고분자물질에 의한 저항감소현상은 관의 벽근처에서 지배적으로 일어나는 것을 규명하였다. 이는 관의 벽근처로부터 난류가 발생하는 대

신에 고분자의 변형에 의해 에너지를 흡수하여 흐름을 안정화시켜 주므로 난류가 대폭적으로 저하됨을 예측할 수 있다, 그러므로 기존에 보고된 저항감소 현상에 대한 여러 학설 중 완화설을 뒷받침할 수 있는 근거를 규명하였다.

2. 가시화부의 CCD카메라에 의해 사진 촬영한 결과 고분자수용액내의 기포는 농도에 따라 유동모양과 위치가 변화됨을 볼 수 있었다. 특히 농도를 증가할수록 기포는 관의 벽과 관의 중심사이에 분포함을 볼 수 있었다. 이는 고분자 수용액이 기포 주위의 유선을 변형시킨다는 것을 알 수 있으며, 고분자물질에 의한 저항감소현상의 메커니즘을 예측 할 수 있었다.

참고 문헌

1. Astarita, G. 1965, "Possible Interpretations of the Mechanism of Drag Reduction in Viscoelastic Liquids", Ind. Eng. Chem.

- Fundam., Vol. 4, p.354.
2. Gadd, G. E. 1966, "Differences in Normal Stress in Aqueous Solutions of Turbulent Drag Reducing Additives", Nature, Vol. 212, p.1348.
 3. Johnson, B. and Barchi, R. H. 1968, "Effect of Drag Reducing Additives on Boundary Layer Turbulence.", J. Hydronautics, Vol. 2, pp.108~114.
 4. Peterin, A. 1971, "Molecular Model of Drag Reduction by Polymer Solutes.", Nature, Vol. 227, p.598.
 5. Lumley, J. L. 1973, "Science Macromolecular Reviews.", J. Polymer, Vol. 11, pp.367~3844.
 6. de Gennes, P. G., 1990, "Introduction to Polymer Dynamics", Cambridge University Press, pp.34~54.
 7. Kohn, M. C. 1973. "Energy Storage in Drag Reducing Polymer Solutions.", J. Polymer Sciences, Vol. II, pp.2339~2356.
 8. Gadd, G. E. 1965, "Turbulence Damp- ing and Drag Reduction Produced by Certain Additives in Water.", Nature, Vol. 206, p. 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- pp.87~49
 10. Gadd, G. E., 1966, "Differences in Normal Stress in Aqueous Solutions of Turbulent Drag Reduction Additi- ves.", Nature, Vol. 212, p.1348.
 11. Virk, P. S. and Mickley, H. S. 1970, "The Ultimate Asymptote and Mean Flow Structure in Toms' Phenomenon", Transactions of the ASME, of Applied Mech. Vol. 37, pp. 488-493.
 12. 차경옥, 김재근, 양희준, 1998, "합성 고분자 물질 A611P를 첨가한 기-액 2상 수직상향의 유동특성에 관한 실험적 연구", 냉동 및 공기 조화학회 논문집, Vol. 10, NO. 4, pp.398~410.
 13. Kalashnikov, V. N. 1994, "Shear-rate Dependent Viscosity of Dilute Polymer Solutions.", The Society of Rheology, Vol. 38, No. 5, pp.1385~1403.
 14. Sellin, R. H. Hoyt, J. W. and Scri- vener, 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.