

## 원관내 수직상향 2상유동에서 고분자물질이 유동양식에 미치는 영향

차 경 옥\* · 김 재 근\*\*

### The Effect of Flow Patterns with Polymer Additives From Two Phase Flow at Vertical up Ward in Circular Tube

K. O. Cha · J. G. Kim

**Key words** : Mechanical Degradation(기계적 퇴화), Drag Reduction(저항 감소), Gas-Liquid  
Two Phase Flow(기-액 2상유동), Flow Pattern(유동양식).

#### Abstract

Flow pattern of air-water two phase flow depends on the conditions of pressure, void fraction, and channel geometry. We classify the flow pattern by measuring the output signal of the conductivity probe. Under the classified flow pattern, we mount a visualization equipment on the test section and take pictures. we vary the concentration of pure solvent and polymer to measure local void fraction. We know that the maximum point position of local void fraction distribution move from the center of the pipe to the wall of the pipe as JSL increase when JSA is constant in two phase flow. But we find that the maximum point position of local void friction move from the wall of the pipe to the center of the pipe when polymer concentration increase.

#### 1. 서 론

2성분 2상유동에 관해서 그 동안 연구된 결과<sup>(1)</sup>에 의하면 2성분 2상유동조건은 열기지에서 열전달을 현저히 증가시킬 뿐 아니라 기상과 액상의 유동조건에 따라 형성되는 유동양식은 열전달에

결정적인 영향을 준다는 사실이 규명되었다. 즉, 2상간의 밀도 차이가 큰 기-액 유동계에서 형성되는 유동양식은 계의 압력, 열유속, 유동계의 기하학적 형상, 유동속도 및 유동방향에 따라 상이함으로 유동특성도 크게 달라진다. 그러므로 연구자 다수들에 의해 유동양식을 판별하는 기법들은 각

\* 정회원, 명지대학교 공과대학 기계공학과(원고접수일 : 98년 2월)

\*\* 정회원, 신성대학 자동차계열

상의 겉보기속도, 운동량, 유속 및 무차원 변수에 의한 방법들이 제시되어 왔으나 아직도 2상의 유동이력과 유동양식간의 천이 영역 때문에 문제점이 있다.<sup>(2)</sup> 최근에 몇몇 연구자들에 의하면 유동양식을 통계적인 방법<sup>(3)</sup>과 모델링<sup>(4)</sup>에 따라서 판별하는 방법들이 추진되어 오고 있다. 한편 유체를 장거리 수송시키는데 많은 펌핑동력이 소요되므로 에너지 절약이란 관점에서 펌핑동력을 감소시킬 수 있는 방법이 그 동안 많은 연구자들의 결과에 의하면 압력강하를 감소시킬 수 있는 것은 미세 고체입자, 섬유입자, 합성고분자, 합성무기고분자, 계면활성제, 생물학적 첨가제 등을 혼합하여 유동시키는 방법이 있으며, 이 중 소량의 수용성 고분자를 유체내에 용해시켜 물성치 변화를 일으키지 않고 난류 마찰저항을 감소시키는 방법이 가장 효과적이라고 알려져 있다.<sup>(5)</sup> 이때 작동유체에 고분자물질을 첨가하면 비뉴턴유체로 변하는데 비뉴턴유체의 난류유동시 난류 형성과 고분자물질의 동력학에 대한 이론이 미흡한 상태로서 이를 해석한다는 것은 매우 어려운 실정이다. 특히 2상 유동장에 고분자물질을 첨가함에 따라 마찰저항 감소효과는 매우 크다는 사실을 현상학적으로 규명한 연구는 소수 있지만<sup>(6)(7)</sup> 2상유동장에서 고분자 수용액이 유동양식에 미치는 영향을 규명한 연구는 찾아볼 수 없었다.

본 연구는 수직 원관내에 순수 수용액인 물을 수직상향 유동시켰을 경우와 밀폐계에서 저항 감소효과가 큰 고분자물질인 A611P 수용액<sup>(8)(9)</sup>을 유동시킬 때 고분자 수용액의 농도 변화가 2상류의 국부 보이드율 분포 및 유동양식에 미치는 영향을 규명함으로써 2상 비뉴턴유체를 수송시켰을 때 유동장 해석에 필요한 자료로 축적하는데 목적을 두었다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 유동양식

2상유동계를 지배하는 파라메타들 중 보이드율 분포에 따라 형성되는 유동양식들은 계의 압력강하, 열전달, 각 상의 속도등에 결정적인 영향을 미

친다. 또한 유동양식의 천이는 운동량, 에너지, 질량 이송의 변화를 초래하고 있다.

유동양식에서 분리유동은 기상과 액상이 하나의 연속적인 계면에 의하여 분리되는 유동으로 이에 속하는 유동양식은 성층류, 파상류, 환상류이다. 반면에 혼합유동은 기포류, 프리그류, 슬러그류와 같이 유동방향으로 상분포가 균일하지 못하며 각 상간의 운동량 교환이 활발하여 상분포의 변화가 심한 유동으로 된다. 또한 분산유동은 분산기포류, 액적과 같이 관단면을 통하여 매우 작은 직경의 기포나 액적들이 비교적 균일하게 유동하는 형태이다. 수평관에서 유동조건에 따라서 형성되는 유동양식은 기포류, 프리그류, 슬러그류, 성층류, 환상류 등이며 수직관에서는 기포류, 슬러그류, 처연류, 환상류 등으로 형성된다.

한편 이와 같은 유동양식에 관한 초기의 연구들은 가시적 관찰을 이용하여 유동양식을 판별하였기 때문에 객관성이 결여되었으나 최근에는 열선 풍속계, 복사감쇄기, X-선 등의 측정기구와 광학 프로우브, 전도 프로우브 등이 다양하게 개발되어 이들을 이용한 연구들이 활발히 수행되고 있다. Zuber등<sup>(10)</sup>은 X-선 측정기구를 개발하여 수직 기-액 유동계에서 형성된 기포류, 슬러그류, 환상류에 대한 통계적 분석을 수행하였다. Griffith등<sup>(11)</sup>은 단일 전도 프로우브를 사용하여 기포류, 슬러그류, 환상류에 관한 연구를 하였으며 Matsui 등<sup>(12)</sup>은 압력 파동 성분을 통계적으로 처리하여 유동양식을 판별하였다.

### 2.2 보이드율 분포

보이드율은 기-액 2상류에서 유동양식을 판별하는 중요한 인자로서 계측방법에 따라서 체적 보이드율, 면적평균 보이드율, 현평균 보이드율, 국부 보이드율로 구분된다. 본 연구에서는 전기 전도 프로우브를 이용하여 국부 보이드율을 실험을 통하여 계측하였다. 이때 국부 보이드율( $\alpha$ )은 총 계측 시간에 대한 기포가 프로우브를 통과하는 시간( $t$ )의 비로써 정의되는데 열선풍속계, 전도 프로우브 및 광섬유 프로우브를 사용하여 계측하며 다음과 같이 정의한다.

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

본 실험에서 보이드율 계측에 사용한 프로우브는 전기전도 프로우브로서 유동장내에 기상과 액상이 동시에 유동하는 경우 발생하는 전기 전도차를 이용하여 보이드율을 계측하였다.

### 2.3 고분자물질의 물성치

본 실험에서 사용한 합성 고분자물질인 A611P의 경우 분자량의 수는 1,400 만 ~ 1,600 만개로 구성되어 있다. 이 물질은 그 동안 다수의 레올로지 학자들에 의해 실험적으로 전단박화 유체임을 제시하였다. You<sup>13)</sup>는 유출시간이 100 초 이상으로 운동에너지 보정이 필요 없는 Ubbelohde형식의 점도계를 이용하여 A611P 수용액의 걸보기점도를 난류유동장에서 계측한 결과 전단율 증가에 따라 걸보기점도가 감소됨을 규명하였다. 난류유동장에서 순수 수용액과 고분자 수용액의 걸보기점도가 거의 차이가 없다고 가정한다면 고분자 수용액의 경우 레이놀즈수는 뉴턴유체인 순수 수용액과 거의 같다고 예측할 수 있다. 또한 Kalashnikov<sup>14)</sup>는 모세관 점도계와 Zimm-Crothers가 고안한 회전 점도계를 변형하여 수용성 고분자물질의 종류, 농도 등을 실험변수로 취하였다. 이들은 고분자 수용액의 전단율에 따른 걸보기점도를 계측하여 제시한 것으로 그 결과를 살펴보면 평균 분자량수가 1,400 만개인 Alcox 고분자물질의 농도를 변화시키며 전단율에 따른 걸보기 점도를 비교한 결과 전단율을 증가시킬수록 걸보기점도는 순수 수용액에 가까운 수치를 나타내므로 Alcox 수용액은 전단박화 유체임을 규명하였다. 이 때 사용한 고분자물질은 본 실험에 사용한 A611P의 분자량 수와 유사하다. Kato<sup>15)</sup> 등은 순수 수용액과 PAAM 수용액의 속도비를 intermittency factor로 정의하고 power law model에 적용하여 유동지수와 평균속도를 고려한 식(3)과 같이 레이놀즈수(Re\*)를 유도하여 Re\*변화에 따른 intermittency factor를 비교한 결과 층류유동에서 난류유동으로 천이과정 이후부터 intermittency factor는 같게 됨을 실험을 통하여 규명하였다.

$$\tau = K(du/dy)^n \quad (2)$$

$$Re^* = \left(\frac{n}{2n+1}\right)^n \frac{6U^2 \cdot (H/2)^n}{K} \quad (3)$$

이상과 같이 수용성 고분자물질의 물성치를 살펴본 결과 본 실험에 사용하는 A611P 수용액은 전단박화 유체로서 난류 영역에서 순수 수용액과 고분자 수용액의 레이놀즈수의 차이는 거의 없을 것으로 예측할 수 있다.

## 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, 순환수 저장탱크, 시험부로 구성하였다.

액상의 순환회로에서 순환수 저장탱크내의 물은 용량이 3마력인 부식방지용 내산스테인레스 원심펌프에 의해서 순간유량계를 통과한 후 시험부로 유입시켰다. 또한 공기압축기에서 분사된 공기는 압력조절기에 의하여 일정하게 한 후 순간유량계를 통과하고 기-액 혼합부를 거쳐 시험부로 유입시켰다. 시험부를 통과한 2상류는 기-액 분리탱크에서 분리된 공기는 대기로 방출시킨 후 순환수만 저장탱크에 저장시키므로 일련의 순환회로를 완료시킨다. 이때 원심펌프와 순간유량계 사이에 배수관을 순환수 저장탱크와 연결하였으며, 공기 분사기와 압력조절기 사이에 공기 저장탱크를 설치하여 각상의 압력파동을 안정화시켰다.

공기와 순환수 유량은 시험부의 입구부로부터 소정의 유동양식이 형성할 수 있도록 관로에 장착한 게이트밸브로 각 상의 유량을 조절하였다. 각 상의 걸보기 속도계측용 순간유량계는 원심펌프와 공기압축기에서 각 상의 최대 걸보기속도를 계산하므로써 그 범위에 맞는 유량계를 선정하고, 유량계의 보정은 단위 시간당 관내에 흐르는 체적

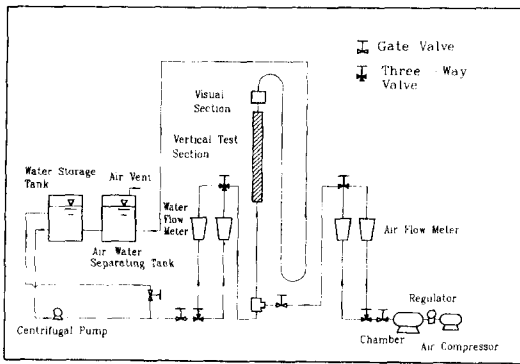


Fig. 1 Schematic diagram of the two phase flow facility

유량으로 검증하였다. 한편 본 실험에서 사용한 액상의 작동유체는 물과 고분자 수용액으로서 용량이 200 인 순환수 저장탱크에 저장하였다.

### 3.2 시험부 및 실험방법

Fig. 2는 시험부를 도시한 것이다. 가시화가 가능한 내경 24mm, 두께 3mm 인 투명한 아크릴관 시험부는 완전 발달되는 영역의 거리를 고려하여 2상류의 혼합부로부터 1,400mm 떨어진 위치에 장착하고, 유동양식 및 국부 보이드율 분포측정은 전기전도 프로우브를 이용하여 시험부인 관의 중

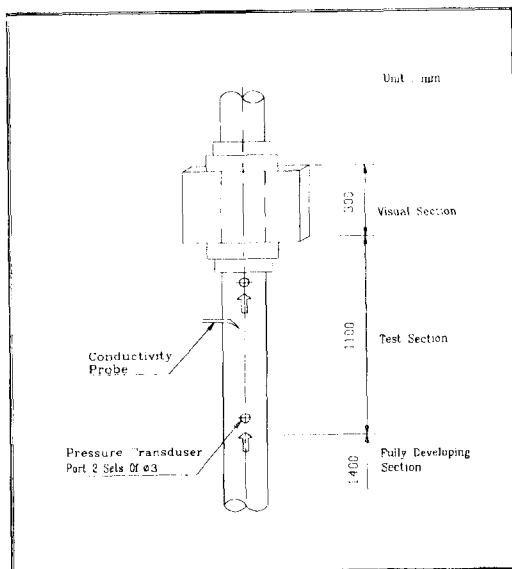


Fig. 2 Test Section

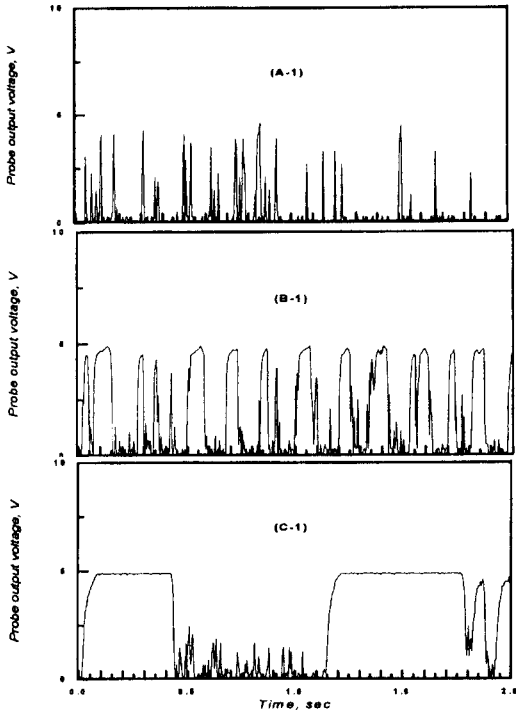
심에서 관벽으로 2mm씩 이동 및 검출하여 A/D변환기로 입력시켰다. 계측된 신호가 정확한지를 가시적으로 판단하기 위해 A/D변환기 전단에 오실로스코프를 설치하고 관찰하였다. 이렇게 A/D변환기로 입력된 신호는 퍼스널 컴퓨터에 의해 최대 4,096개의 신호를 받아들여 저장하였으며, 입력된 신호는 프로그램에 의해 처리되어 프린터를 통해서 출력시켰다. 또한 고분자 수용액이 기포에 미치는 영향을 가시적으로 관찰할 수 있도록 하기 위해서 시험부 상부에 특수 조명 장치를 포함한 유동 가시화부를 설치하고 사진 촬영을 하였다.

## 4. 실험결과 및 검토

### 4.1 유동양식 판별

Fig. 3은 겉보기 물속도( $J_{SL}$ )를 2.0m/s로 일정하게 유지하고, 겉보기 공기속도( $J_{SA}$ )를 0.25~2.0m/s로 변화시켜 시험관 중앙부에서 전기전도 프로우브로부터 검출된 신호를 도시한 그림이다. 그림으로부터 횡축은 센서에서 나온 신호의 계속 시간을 의미하며, 종축에서 전기전도 프로우브의 출력전압을 의미한다. 종축에서 5V는 전기전도 프로우브의 센서 부분에 비전도성인 기상이 통과할 때이며, 0V는 전도성인 액상이 프로우브의 센서를 통과할 때 출력되는 신호이다. 0V와 5V사이의 신호는 기포가 프로우브의 센서를 스치고 지나갈 때 출력되는 신호이다.

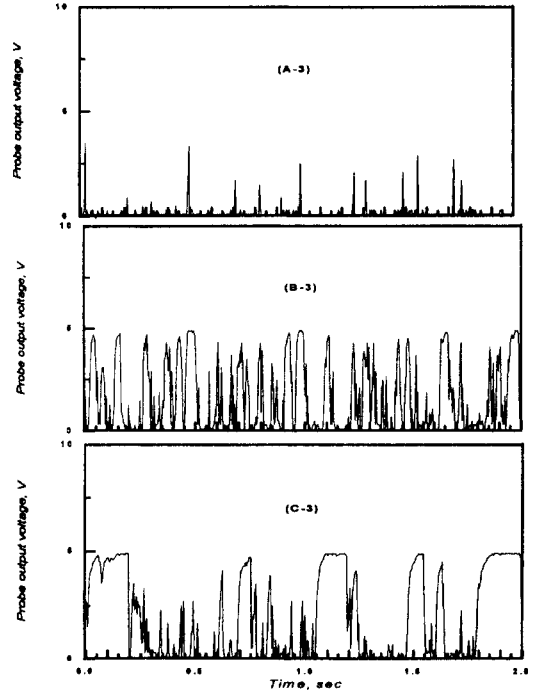
Fig. 3 (A-1)은  $J_{SA}$ 가 0.25m/s일 때 검출한 신호로서 프로우브로부터 검출된 펄스들이 0V와 최대 출력전압인 5V사이에서 고주파의 파동경향을 나타내는데, 이는 전도성인 물과 물속에 산재된 비전도성인 작은 기포들이 연속적으로 교차하여 프로우브를 통과하기 때문이다. 이와같은 신호에 따른 것은 전형적인 기포류의 유동임을 판별할 수 있다. Fig. 3 (B-1)은  $J_{SA}$ 을 1.25m/s로 유동시켰을 때 기포류에서 슬러그류로 천이를 나타내는 그림이다. 기포들의 합체현상에 따라서 큰 기포들이 형성되고 관내에 산재한 작은 기포들과 함께 프로우브를 통과하기 때문에 기포 통과시간이 지연되어 간헐적으로 평탄한 형태의 펄스가 최대출력에



**Fig. 3 Classify 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**

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

Fig. 4 (A-3)는 기포류에 해당되는 신호로서  $J_{SL}$ 을 빠르게 한다는 것은 단위 시간당 액상 유량을 증가시키는 것으로 관의 중앙에서 유동하는 기포들은 관벽으로 밀려 이동하여 유동한다. 따라서 Fig. 4 (A-3)의 신호는 Fig. 3 (A-1)보다 기포의 신호가 적게 나타냄을 관찰할 수 있다. 이와 관련된 내용은 시험부의 반경방향에 따른 국부 보이드율



**Fig. 4 Classify of flow patterns by conductivity probe at  $J_{SL}=2.5\text{m/s}$  (A-3) bubbly flow, (B-3) bubbly-slug flow, (C-3) slug flow**

분포에서 다시 고찰하고자 한다. Fig. 4 (B-3)는 기포류에서 슬러그류로 천이 되는 유동양식이며, Fig. 4 (C-3)는 슬러그류이다. 이상과 같이 2상류의 유동장에서 전기전도 프로우브를 이용하여 유동양식을 판별한 것은 Barnea<sup>(13)</sup>이 제시한 방법으로 본 연구에서도 동일한 방법으로 유동양식을 판별하였다.

Fig. 5는 시험부의 상단에 설치된 가시화부에서 카메라로 사진 촬영한 것으로 Fig. 5 (A)는  $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ 일 때로서 작은 기포들이 시험부 전체에 균일분포를 이루면서 유동하며 가시적으로 기포류임을 최종 판별할 수 있다. 또한 Fig. 5 (B)는  $J_{SL}=2.5\text{m/s}$ 이고,  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ 일 때로서 Fig. 5 (A)와 동일한 경향임을 볼 수 있다.

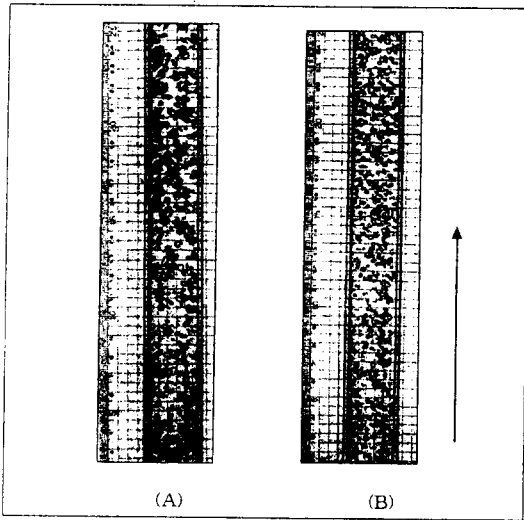


Fig. 5 Comparison of bubble behaviors at  $J_{SA} = 0.25 \text{ m/s}$ , camera shutter speed  $1/4,000 \text{ sec}$  (A)  $J_{SL} = 2.0 \text{ m/s}$  (B)  $J_{SL} = 2.5 \text{ m/s}$

4.2 보이드율 분포

본 연구에서는 고분자 수용액이 기포에 미치는 영향을 고찰하고자 가-액 2상유동시 시험부의 반경방향에 따른 국부 보이드율 분포를 순수 수용액과 고분자물질을 첨가한 고분자 수용액으로 유동시켜가면서 계속했다. 이때 고분자 수용액의 기계적퇴화를 감안하므로 고분자 수용액을 실험장치에 유동한지 30분이 지났을 때 전기전도 프로우브에 의하여 시간평균 국부 보이드율 분포를 계속하고 분석하였다.

유체를 수직상향으로 유동시킬 경우 유동에 대한 관련 인자들은 관의 중심에서 반경방향의 대칭으로 작용하기 때문에 국부 보이드율 측정은 관의 중심에서 반경방향으로 2mm간격에 따라 7곳에서 측정했다.

Fig. 6~7은  $J_{SL}$ 를 일정하게 유지하고,  $J_{SA}$ 를 변화시키며 시험부 반경방향에 따른 국부 보이드율 분포를 도시한 것이다. 이 그림에서 횡축의 반경비( $r/R$ )가 0인 지점은 관의 중심을 의미하며,  $r/R=1$ 인 지점은 관의 벽을 의미한다. 이들을 종합적으로 검토하여 보면 국부 보이드율 분포는 기포류를 제외한 모든 유동에서는 관의 중심으로부터

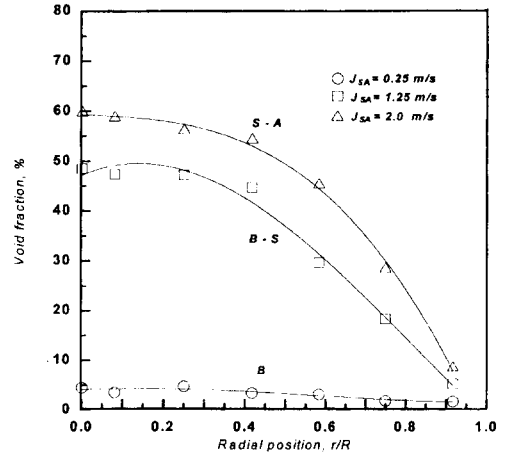


Fig. 6 Local void fraction profiles at  $J_{SL} = 2.0 \text{ m/s}$  without polymer additives

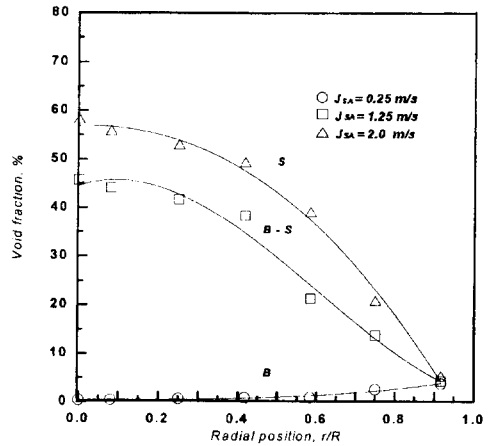


Fig. 7 Local void fraction profiles at  $J_{SL} = 2.5 \text{ m/s}$  without polymer additives

터 보이드율의 값은 최고 값을 갖지만 관벽쪽으로 이동할수록 국부 보이드율의 값은 심한 감소의 포물선형태로 분포하고 있음을 나타내고 있다. 또한  $J_{SL}$ 를 일정하게 유지하고  $J_{SA}$ 를 빠르게 할수록 관의 전체에서 보이드율 값이 커짐을 볼 수 있다. 그러나  $J_{SA}$ 이 0.25m/s일 때는 기포류-슬러그류, 슬러그류 등 기타 다른 유동 국부 보이드율이 다르게 분포됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 순수 수용액만 유동했을 경우  $J_{SA}$ 를 0.25m/s로 유지하고  $J_{SL}$ 를 변화시켜 국부 보이드율을 계속하고, 기포류의 유동을 반경비에 따라

도시한 것이다.

여러가지 속도인  $J_{SL}$ 는 반경비( $r/R$ )가 작을수록 높은 보이드율을 갖지만, 반면 점진적으로 반경비가 클수록 보이드율은 급속하게 감소를 이루고 있다. 국부 보이드율의 최고 값은  $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ 에서  $r/R=0.25$ 인 지점,  $J_{SL}=2.25\text{m/s}$ 는  $r/R=0.57$ 인 지점,  $J_{SL}=2.5\text{m/s}$ 일 때는  $r/R=0.92$ 인 지점에서 갖는다. 또한  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ ,  $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ 일 때 국부 보이드율은 포물선 형태와 같이 분포하고,  $J_{SL}=2.25\text{m/s}$ 일 때는 관의 중심에서 관벽까지 평탄한 형태로 분포하며,  $J_{SL}=2.5\text{m/s}$ 일 때는  $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ 인 경우와 반대로 관의 중심에서 관의 벽쪽으로 갈수록 국부 보이드율 분포가 증가하여 역포물선 형태로 분포함을 볼 수 있다.

이와 같은 현상은 기포류에서 기포의 유동속도가 액체속도에 의하여 변화된다고 판단되나, 그 원인은 아직 정확히 밝혀지지 않고 있지만 현재로서는 벽면 근처에서의 액상이 지니는 속도구배가 원인이 된다고 예측하고 있다.

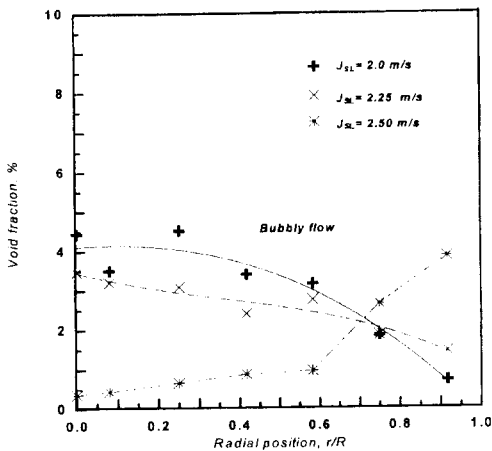


Fig. 8 Local void fraction profiles at  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$  without polymer additives

Fig. 9는  $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ 로 유동하고 있을 때 고분자물질을 첨가했을 경우와 첨가하지 않았을 경우 유동형태를 사진 촬영한 것이며 카메라 셔터속도를 1/4000 초로 하였다. 각각의 사진을 비교하여 살펴보면 고분자물질을 첨가하지 않은 순수 수용액을 시험관내에 유동시켰을 경

우 작은 기포가 시험관 전체에 균일하게 분포하여 유동하고 있다. 그렇지만 고분자물질인 A611P 수용액의 농도를 100ppm, 200ppm, 300 ppm으로 각각 유동시켰을 때는 고분자물질을 첨가하지 않은 순수 수용액의 경우 보다 기포의 크기가 성장하면서 관의 중심 부근으로 유동을 나타내고 있다. 특히 A611P의 농도가 300ppm일 때는 기포모양이 작은 테일러형 기포로 성장하고 그 뒤에 작은 기포를 동반하여 슬러그류의 형태처럼 유동하므로 유동양식이 천이 됨을 알 수 있다.

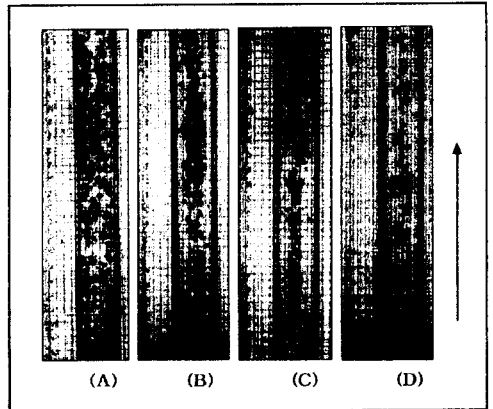
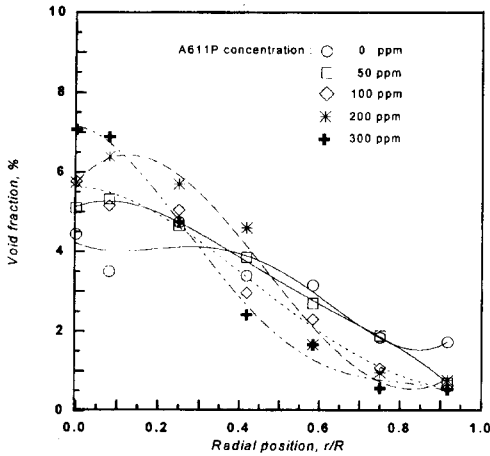


Fig. 9 Comparison of bubble behaviors with and without A611P additives at  $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ , camera shutter speed 1/4,000sec (A)only two phase flow (B)concentration 100ppm (C)concentration 200ppm, (D)concentration 300ppm.

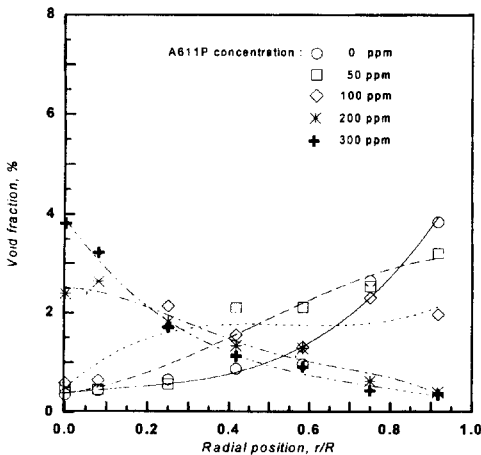
Fig. 10은 고분자물질을 첨가했을 경우와 첨가하지 않았을 경우 반경방향에 따른 보이드율 분포를 도시한 것으로서 Fig. 9와 잘 일치하고 있음을 나타내고 있다. 반경비가  $r/R=0$ 인 지점에서 농도가 높을수록 국부 보이드율 값이 크며, 관의 벽 근처에서는 관의 중심지점과 정 반대의 국부 보이드율 분포특성을 보이고 있다. 즉, 관의 중심에서 순수 수용액의 경우 보이드율 값이 4.4 %인데 비해 농도가 300 ppm인 경우 7.2 %이다. 이와 같이 고분자물질은 2상유동장에서 마찰저항 감소현상을 비롯한 각종 유동에 영향을 미치었을 것으로 예측할 수 있다. 또한 2상유동장에서의 보이드율 분포는 대류열전달과 밀접한 관계가 있기 때문에 고분



**Fig. 10 Comparison local void fraction profiles without and with polymer additives at  $J_{SL}=2.0\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$**

자 수용액의 대류열전달에 어떠한 영향이 있을 것으로 예측된다.

Fig. 11은  $J_{SL}=2.5\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ 일 때 순수 수용액을 유동시킬 경우와 순수 수용액에 고분자 물질을 첨가하여 유동시킬 경우 반경방향에 따른 국부 보이드율 분포를 도시한 것이다. 순수 수용액을 유동시킬 경우와 농도가 50ppm인 고분자 수용액에서 국부 보이드율 분포의 최저 값은 관의 중심에서 나타내지만, 최고 값은 관의 반경비가  $r/R = 0.92$ 인 관벽의 근처에서 일어난다. 또한 고

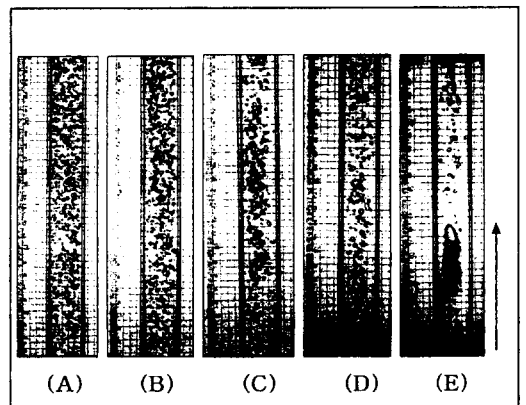


**Fig. 11 Comparison local void fraction profiles without and with polymer additives at  $J_{SL}=2.5\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$**

분자 농도변화에 따라서 국부 보이드율 분포의 최고 값은 관의 반경비에 의해서 달라진다. 즉 고분자 수용액의 농도가 100ppm일 때는  $r/R=0.75$ 에서 나타나며, 200ppm일 때  $r/R=0.25$ 지점에서, 300ppm일 경우는  $r/R = 0$ 인 관의 중심에서 국부 보이드율 값이 최고로 분포하는 특성을 알 수가 있다. 이와 같이 보이드율 분포는 고분자 수용액의 농도에 따라서 변화됨을 알 수 있다.

Fig. 12는  $J_{SL}=2.5\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ 이라 하고, 고분자 수용액의 농도를 50ppm, 100 ppm, 200ppm, 300ppm으로 유동시켰을 때 사진 촬영한 것이다.

Fig. 12 (A)는 수직원관인 시험부에 순수 수용액만을 유동시켰을 때 기포가 시험부 전체에 균일하게 분포되어 있는 것을 2차원으로 나타낸 사진이므로, 동일한 조건에서 국부 보이드율 분포를 나타낸 Fig. 11과 비교해 보면 약간의 차이가 있는 것처럼 보인다. 한편 Fig. 12 (B)~(D)는 고분자 수용액의 농도를 점차적 증가를 할수록 작은 기포는 주변에 있는 기포들과 합체하므로 시험부의 벽부근에서부터 관의 중심쪽으로 이동하여 유동하고 있음을 볼 수 있다. 특히 고분자 수용액의 농도



**Fig. 12 Comparison of bubble behaviors with and without A611P additives at  $J_{SL}=2.5\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=0.25\text{m/s}$ , camera shutter speed  $1/4,000\text{sec}$  (A)only two phase flow (B)concentration 50ppm, (C)concentration 100ppm, (D)concentration 200ppm.**



가 200ppm과 300ppm일 때는 기포의 합체로 인한 형상은 순수 수용액을 유동시킬 경우의 기포형상과 명확히 구분된다. 또한 동일한 조건에서 시험부의 반경방향에 따른 국부 보이드율 분포특성을 도시한 Fig. 11과 일치하고 있음을 알 수가 있다. 이와같은 현상은 고분자 수용액이 기포 주위로부터 유선변형을 초래하므로써 2상류의 유동특성이 변화됨을 예측할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 밀폐계 수직원관 내에 기-액 2상류를 상향유동시켜 유동양식을 판별을 하였으며, 판별된 유동조건에서 합성 고분자물질 A611P(Co-polymer)인 고분자 수용액을 첨가하여 유동할 때 국부 보이드율 분포를 측정하므로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기포류 유동에서 걸보기 물속도를 증가시킬수록 최대 국부 보이드율 값이 관의 중앙부에서 관의 벽부근으로 이동됨을 규명하였다. 이와같은 현상은 기포의 유동속도가 액체의 유동속도에 의하여 변화하기 때문이다.
2. 순수 수용액을 시험부내로 유동할 경우 작은 기포가 시험관 전체에 균일하게 분포하고 있으나, A611P수용액의 농도를 증가시킬수록 기포의 크기가 성장하며 관의 중심부근으로 유동함을 알 수 있었다. 또한 고농도 수용액인 경우 기포의 모양이 작은 테일러형 기포로 성장하고 그 뒤에 작은 기포를 동반하여 슬러그류의 형태처럼 유동하므로 유동양식이 친이 됨을 알 수 있다.

### 참고문헌

- (1) Srinivas, N. S., and Elamvaluthi, G., 1984, "Two Phase Heat Transfer in Two Component Vertical Flows," *Int. J. Multi-phase Flow*, Vol. 10, No. 2, pp. 237-242
- (2) Spalding, D. B., 1980, "Multiphase Flow Prediction in Power System Equipment and Components," *Int. J. Multi-phase Flow*, Vol. 6, pp. 157-168
- (3) 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
- (4) 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
- (5) 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
- (6) Otten, L. and Abdelrahman S. F., 1976, "Pressure Drop and Drag Reduction in Two-Phase Non-Newtonian Slug Flow.," *The Canadian Journal of Chemical Eng.*, Vol. 52, pp.438-448
- (7) Sylvester, 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. 615-621
- (8) 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
- (9) 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
- (10) Zuber, N., and Jones, O. C. Jr., 1975, "The Interrelation between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 2, pp. 273-306
- (11) Griffith, P., 1964, "Two Phase Flow Regime Detecting," *ASME Paper 64-WA/HT-43*
- (12) 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
- (13) You, B. S., 1993, "A Study on Ionic Polymer Drag Reduction in RDA.," *In-ha Univ. Department of Rheologis*
- (14) Kalashnikov, V. N., 1994, "Shear-rate Dependent Viscosity of Dilute Polymer Solutions.," *The Society of Rheology*, Vol. 38, No. 5, pp. 1385-1403
- (15) Mizunuma, H and Kato H., 1988, "Influence of Polymer Additives on Transitional Plane Poiseuille Flow.," *J. JAME* Vol. 31. No. 2, pp. 209-217.

- (16) Barnea, D., Shoham, O., and Taitel, Y., 1980, "Flow Pattern Characterization in Two Phase Flow by Electrical Conductance Probe," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 6, pp. 387-397

## 저 자 소 개



**차경옥(車京玉)**

1945년 1월생. 1972년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1977년 단국대학 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1984년 동대학원 기계공학과 졸업(박사). 1981년 부터~현재 명지대학교 기계공학과, 교수, 당학회 회원.



**김재근(金在根)**

1964년 10월생. 1989년 명지대학교 기계공학과 졸업. 1991년 동대학 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 기계공학과 졸업(박사). 1997년 부터~현재 신성대학 자동차계열, 전임강사, 당학회 회원.