

〈논 문〉 SAE NO. 96370017

## 圓管內의 二相旋回流動 特性에 관한 研究

### The Study on the Two-Phase Swirl Flow Characteristics in Cylindrical Pipe

차 경 옥\*, 김 재 근\*\*  
K. O. Cha, J. G. Kim

#### ABSTRACT

Many investigations have been made to determine the pressure drop and heat transfer characteristics for single phase flow in tape generated swirl flow. But few studies have been carried out to investigate the heat transfer in two component, two phase swirl flow with non-boiling. An experimental study has been conducted to determine the effects of tape twist ratios on two phase convective heat transfer coefficients, pressure drop, and void fraction distribution in a non-boiling, air-water, two phase flow. The flow conditions were both swirl and non swirl flows. The internal diameter of the test section is 42.5mm. The tape twist ratios of pitch to diameter ratio varied from 4.0 to 10.6. The superficial water and air velocity were controlled from 0.25 to 1.0m/s and 0.5 to 4.0m/s respectively. The heating conditions were isothermal and nonisothermal. The flow patterns identified with experiments were bubbly, bubbly-slug, slug, and slug-annular flow in up-flow.

This study has concluded that no significant difference in void fraction distribution were observed both isothermal and nonisothermal conditions, the pressure drop for two phase flow with twisted tape swirler increase as the tape twist ratio decrease, and that values of two phase heat transfer coefficient increase when the tape twist ratio decreases.

주요기술용어 : Flow Pattern(유동양식), Void Fraction(보이드율), Pressure Drop(압력강하), Two Phase Heat Transfer Coefficient(2상열전달계수), Swirl Flow(선회유동), Tape Twist Ratio(테이프 비틀음).

#### 기 호 설 명

A : 면적  
B-S : 기포류-슬러그류

\* 정회원, 명지대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 명지대학교 대학원 기계공학과

h	: 열전달계수
J <sub>s</sub>	: 겉보기 속도
ΔL	: 합력강하 측정거리
q	: 열유속
S-A	: 슬러그류-환상류
t	: 시간
B	: 기포류
d	: 직경
H	: 피치
L	: 현의 길이
ΔP	: 압력강하
S	: 슬러그류
T	: 온도
V	: 체적
y	: 테이프 비틀림

#### 하첨자

a	: 가속도
f	: 마찰력
L	: 물
s	: 선회유동
TP	: 2상유동
V	: 체적
a	: 보이드율
A	: 공기
g	: 중력
ns	: 비선회유동
tot	: 총합
w	: 시험부 벽면
c	: 현평균

## 1. 서 론

2성분과 1성분 2상유동 열전달 메카니즘의 큰 차이점은 전자는 비등이 발생하지 않는다는 점으로서 이에 관한 연구들은 비등계, 즉 1성분 2상유동계에서 발생하는 열수력학적인 특성들을 묘사하는데 밀접한 연관이 있기 때문에 중요한 연구분야로 대두되었다. 관련된 연구결과에 의하면 2성분 2상유동 열전달기구는 열전달을 현저히 증가시킬 뿐 아니라, 기상과 액상의 유동조건에

따라서 형성되는 유동양식은 열전달율에 결정적인 영향을 미치는 파라메타라는 사실이 밝혀졌다. 따라서 2상간에 밀도 차가 큰 기-액 유동계에서 형성되는 유동양식은 계압력, 열유속, 유동계의 기하학적 형상, 유동속도 및 유동방향에 따라 상이하므로 이들에 따라서 열전달 특성도 크게 달라진다. 그러므로 다수의 연구자들에 의해 유동양식을 판별하는 기법들, 즉 유동양식도, 각 상의 겉보기속도, 운동량유속 및 무차원 변수에 의한 방법들이 제시되어 왔으나 아직도 2상의 유동이력과 유동양식간의 친이영역 때문에 문제점이 있다<sup>1)</sup>.

2성분 2상유동계의 초기 연구들은 화학공정, 열공정 및 석유수송관 설계에 적용하기 위한 비선회 원관유동인 경우가 대부분으로서 이들 연구를 종합적으로 검토해 본 결과 공기-물의 체적비 증가, 층류유동의 경우 열경계층을 감소시키는 기포의 교반, 유동의 교란효과로 인한 난류강도의 증가 및 공기량의 증가가 열전달을 증가시키는 주요인자들로 판명되었다.

최근에는 응축기와 증발기, 고성능 열교환기, 입자가속기 냉각, 초단파 양극, 분사노즐, 와류박리기, 로켓트 노즐 냉각등 광범위한 열전달기구의 성능향상 설계와 관련하여 2상선회유동 열전달현상에 대한 해석이 중요한 연구분야로 대두되었다. 그 동안 2상유동장에서 선회유동을 발생시키는 장치로 비틀림 테이프, 코일와이어, 나선관 형태의 선회기들이 이용되어 왔는데 이중 비틀림 테이프를 이용한 연구결과<sup>2)~4)</sup>들에 의하면 선회유동으로 인한 난류효과와 원심대류효과, 회전작용을 하는 테이프의 열전달, 와류혼합들이 대류열전달을 촉진시키는 요인으로 밝혀졌다. 그러나 이러한 와류현상은 경계층의 혼합을 초래하여 마찰손실과 열전달을 증가시키는 원인이 될 뿐 아니라 2차순환으로 인한 점성효과와 혼합현상은 입구부 영역에서 지배적으로 발생한다. 고열유속 유동계의 경우는 밀도변화로 인한 부력이 지배적으로 유동장에 작용하기 때문에 열전달 메카니즘을 더욱 복잡하게 만들어 그 해석이 대단히 어렵다.

이상에서 기술한 2상선회 대류열전달에 대한

대부분의 연구들은 비등계에서 발생하는 마찰손실과 열전달율을 테이프 비틀음과 상관시킨 결과를 제시한 것으로서 2성분 2상류가 선회유동을 하는 테이프 비틀음에 따르는 대류열전달과 유동양식을 따르는 보이드울 분포, 압력강하 특성을 구명한 연구가 거의 없음이 밝혀졌다. 또한 유동장의 열적 조건이 등온과 비등온인 경우 보이드울 분포를 비교 검토한 연구들이 제시되지 않고 있다. 그러므로 본 연구의 목적은 기-액 2성분 2상류가 비비등 조건으로 수직관에서 비선회와 선회유동을 하는 경우 열유속이 없는 등온과 열유속이 있는 비등온 두 가지 열적 조건에서 테이프 비틀음에 따르는 대류열전달과 유동양식에 따르는 보이드울 분포, 압력강하 특성을 실험을 통하여 규명하고자 했다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 유동양식

2상유동계를 지배하는 파라메타들 중 보이드울 분포에 따라서 형성되는 유동양식들은 계의 압력강하, 열전달, 각 상의 속도에 결정적인 영향을 줄 뿐 아니라 유동양식의 천이는 운동량, 에너지, 질량이송의 변화를 초래하므로 반드시 규명 되어야 한다.

유동양식은 크게 분리유동, 혼합유동, 분산유동으로 구분되는데 분리유동은 기상과 액상이 하나의 연속적인 계면에 의하여 분리되는 유동으로 이에 속하는 유동양식은 성층류, 파상류, 환상류이다. 반면에 혼합유동은 기포류, 프러그류, 슬러그류와 같이 유동방향으로 상분포가 균일하지 못하며 각 상간의 운동량 교환이 활발하여 상분포의 변화가 심한 유동이다. 분산유동은 분산기포류, 액적과 같이 판단면을 통하여 매우 작은 직경의 기포나 액적들이 비교적 균일하게 유동하는 형태이다. 수평관에서 유동조건에 따라서 형성되는 유동양식은 기포류, 프러그류, 슬러그류, 성층류, 환상류등이며 수직관에서는 기포류, 슬러그류, 처인류, 환상류 등으로 형성된다.

유동양식에 관한 초기의 연구들은 가시적 관찰을 이용하여 유동양식을 판별하였기 때문에 객관

성이 결여되었으나 최근에는 열선풍속계, 복사감쇄기, X-선 등의 측정기구와 광학 프로우브, 전도 프로우브등이 다양하게 개발이 되어 이들을 이용한 연구들이 활발히 수행되고 있다. Zuber 등<sup>5)</sup>은 X-선 측정기구를 개발하여 수직 기-액 유동계에서 형성된 기포류, 슬러그류, 환상류에 대한 통계적 분석을 수행하였다. Griffith 등<sup>6)</sup>은 단일 전도 프로우브를 사용하여 기포류, 슬러그류, 환상류에 관한 연구를 하였다. Matsui 등<sup>7)</sup>은 압력파동성분을 통계적으로 처리하여 유동양식을 판별하였다.

### 2.2 보이드울 정의

보이드울은 기-액 2상류에서 유동양식을 판별하는 중요한 인자로서 계측방법에 따라서 체적 보이드울, 면적 평균보이드울, 현평균 보이드울, 국부 보이드울로 구분되며 이들의 정의는 다음과 같다.

체적 보이드울( $\alpha_v$ )은 시험부를 차지하는 기상과 액상의 총 체적에 대한 기상이 차지하는 체적 비로서 다음과 같이 정의된다.

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

면적 평균보이드울( $\alpha_a$ )은 시험부를 차지하는 각 상의 총 면적의 합에 대한 기상이 차지하는 면적비로서 다음과 같이 정의된다.

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

현평균 보이드울( $\alpha_c$ )은 X-선 또는  $\gamma$ -선이 통과하는 총 현 길이에 대한 기상이 통과하는 현 길이의 비로 정의된다.

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

국부 보이드울( $\alpha$ )은 총 계측시간에 대한 기포가 프로우브를 통과하는 시간의 비로써 정의되는데 열선풍속계, 전도 프로우브 및 광섬유 프로우

브를 사용하여 계측하며 다음과 같이 정의한다.

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

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

### 2.3 2상 압력강하

2상유동계에서 관 길이 방향으로 발생하는 압력강하 식(5)와 같이 마찰손실, 가속손실, 정압손실로 구성되는데 일반적인 관로에서는 마찰손실이 압력손실의 주된 요인이 된다. 2성분 2상류가 수평관에서 비선회유동을 하는 경우는 Lockhart-Martinelli-Nelson<sup>9)</sup>이 제시한 상관식이 보편적으로 사용되고 있으나 2상 마찰계수의 질량속도에 따라서 오차범위의 증감이 있기 때문에 많은 상관식들이 다양한 유동조건으로 개발이 되어왔다<sup>9)</sup>. 단상유동인 경우는 물론이고 선회유동은 막비등을 포함한 2상류의 대류열전달계수

와 압력강하를 증가시킬 뿐 아니라 임계열유속을 50~100% 범위까지 증가시킨다는 사실이 밝혀졌다<sup>10)~11)</sup>.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{tot} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_f + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_a + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_g \quad (5)$$

본 실험에서 압력강하는 시험부 입, 출구부 사이에 스트레인 게이지형식의 차압용 압력변환기를 설치하여 식(6)과 같이 계측하였다.

$$\Delta P = -\int_1^2 \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{tot} \Delta L \quad (6)$$

## 3. 실험

### 3.1 실험장치

Fig.1은 본 실험에 사용한 2상인 기-액유동 실험장치로서 등온과 비등온 조건에서 공기와 물이 동시에 상향유동하도록 설계하였으며 실험과 정에서 기포류, 기포류-슬러그류, 슬러그류, 슬러그류-환상류가 형성되도록 제작하였다. 순환 회로는 공기압축기, 공기분사기, 공기-물 혼합

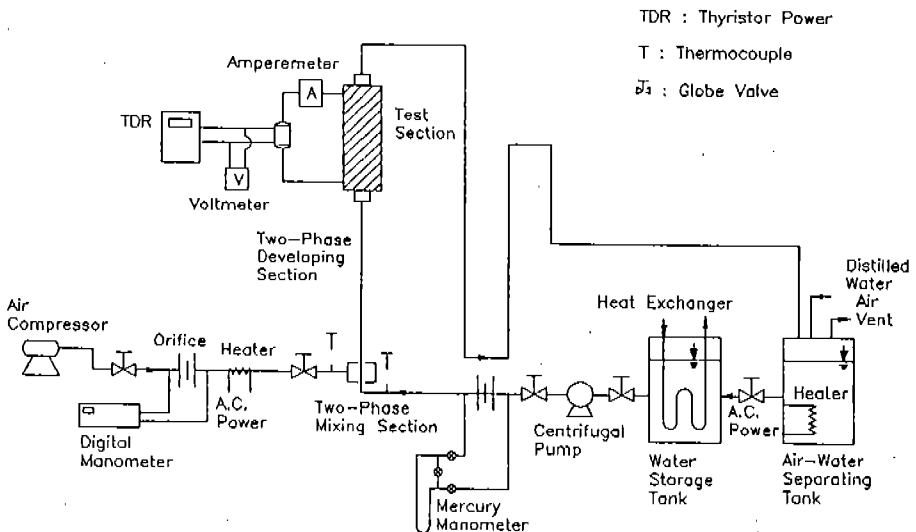


Fig.1 Schematic diagram of the two phase flow facility

부, 공기 및 물 유동속도 계측부, 원심펌프, 순환수 저장탱크, 기-액 분리탱크 및 시험부로 구성하였다. 5마력 용량의 공기압축기에서 분사된 공기는 500W 열량의 테이프 가열기를 슬라이더스로 조절하여 소정의 온도로 예열된 후 공기분사기를 통해 시험부로 유입했다. 순환수 저장탱크의 용량은 400ℓ로서 탱크내의 수두는 실험중 원심펌프에 충분한 제동유효 흡입양정이 공급되도록 800mm로 일정하게 유지하였다. 탱크내의 순화수는 3kw 열량의 가열기에 의해 예열된 후 1마력 용량의 원심펌프에 의해 공기-물 혼합부를 거쳐 시험부에 유입하도록 하였으며, 시험부를 통과한 2상류는 하향관을 거쳐 기-액 분리탱크에서 분리된 후 순환수 저장탱크에 유입된다. 각상의 결보기 속도측정용 오리피스는 미국기계학회에서 발간한 자료<sup>12)</sup>를 참고하여 공기인 경우 관경비가 0.6, 물인 경우 0.53인 첨단 오리피스를 동판으로 정밀하게 설계제작하여 보정하므로써 사용하였다. 모든 배관은 열손실을 방지하기

위하여 두께 25mm의 세라크울(cerakwool) 단열제를 사용하여 절연시켰다.

### 3.2 시험부

Fig.2는 시험부를 도시한 것으로 외경 48.5mm, 내경 42.5mm, 길이 1,000mm 스테인레스관(SUS 304)을 사용하였다. 가열부의 길이는 450mm로서 CI 카타리지 히터에 의한 전기적인 방법으로 최대열량은 9kw로서 TPR(thyristor power)장치를 이용하여 조절을 하였다. 보이드율 계측을 위한 전도 프로우브는 시험부 출구에 직경 4.8mm의 계측공을 뚫어 프로우브를 삽입하였으며, 시험부 입구부의 2상류 온도측정은 T형식 열전대를 사용하여 가열부 앞에서 120되는 위치에서 직경 3mm의 계측공을 뚫어 관의 중심으로부터 평균 온도를 측정하였다. 시험부 벽면온도는 시험부에 두 쌍의 K형식 열전대를 하나는 내관 벽면에 다른 하나는 벽면에서 깊이 2mm로 심어서 계측하였다. 시험부 전반부에는 길이 1,270mm의

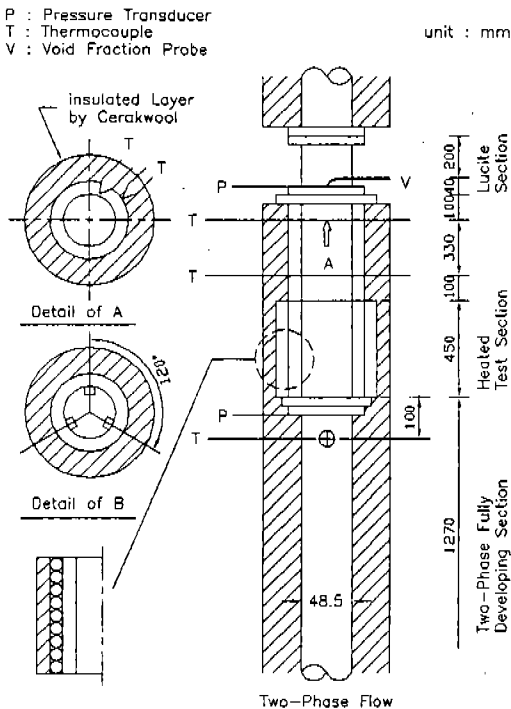


Fig.2 Test section

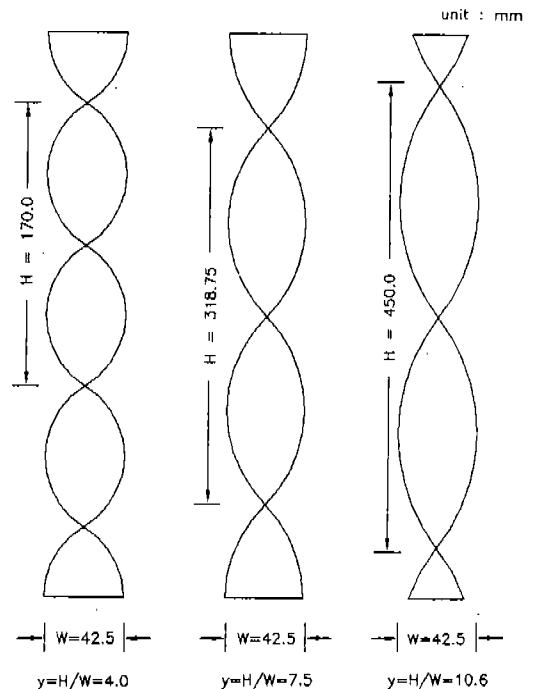


Fig.3 Twisted tapes used in experiments

관을 설치하여 기-액 2상류가 완전 발달하도록 하였으며, 시험부 직후에는 길이 200mm의 투명관을 설치하여 유동양식을 가시적으로 판별하였는데 투명관은 내열 유리관(pyrex glass tube)을 사용하였다.

Fig.3은 비틀림 테이프를 나타낸 그림으로 테이프 비틀을  $y$ 는 피치를 관직경으로 나눈 값이다. 본 실험에서 사용한 테이프 비틀율은  $y=4, 0, 7.5, 10.6$  세 가지 종류이다.

### 3.3 자료처리

Fig.4는 전기 전도프로브 신호로부터 국부 보이드율과 유동양식, 스트레인 게이지형식의 차압용 압력변환기에 의한 압력강하와 시험부의 온도를 측정하는 자료처리도이다. 유동양식 판별 및 국부 보이드율 측정을 위한 전기 전도 프로브 신호는 2상유동 계측기(Kanomax model 7931)를 통해 A/D 변환기로 입력되고, 압력 변환기에 의해 검출된 차압신호는 압력지시계에 의해 차압 측정치를 직접 나타내며 A/D 변환기로 입력된다. A/D 변환된 전기 전도 프로브 신호와 차압신호는 압력지시계에 의해 차압 측정치를 직접 나타내며 A/D 변환기로 입력된다. A/D 변환된 전기 전도 프로브 신호와 차압신호는 퍼스널 컴퓨터로 2ms 간격으로 최대 2048개의

신호를 받아들여 저장시켰다. 입력된 신호는 프린터를 통하여 출력되며, 보이드율 측정은 "L" 자형 전기 전도 프로브를 사용하고 오실로스코프(Nicolet model 32090-3C)로 신호를 확인하며, TTL출력전압과 아날로그 신호를 A/D변환기에 연결하여서 컴퓨터에 입력시켰다. 온도측정은 14개의 열전대를 데이터 로거(Yokogawa model 3848)에 연결하여 출력시켰다. 또한 기-액 혼합부 전에 각상의 온도계측용 열전대는 디지털 온도계(Yokogawa model 2572-20)로 검출되었다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 유동양식 판별

$J_{SL}$ 를 1.0m/s로 유지하고,  $J_{SA}$ 를 0.5~4.0m/s로 변화시키며 전기 전도 프로브로부터 검출한 신호에 의한 유동양식 판별결과를 Fig.5와 같이 도시하였다. Fig.5(A)는  $J_{SA}=0.5$ m/s일 경우 기포류로서 프로브에서 검출된 펄스들이 0V와 최대 출력전압 5V사이에 고주파의 파동경향을 나타내는데 이는 전도성인 물과 물속에 산재된 비전도성인 작은 기포들이 연속적인 교대로 프로브를 통과하기 때문이다. 기포가 통과할

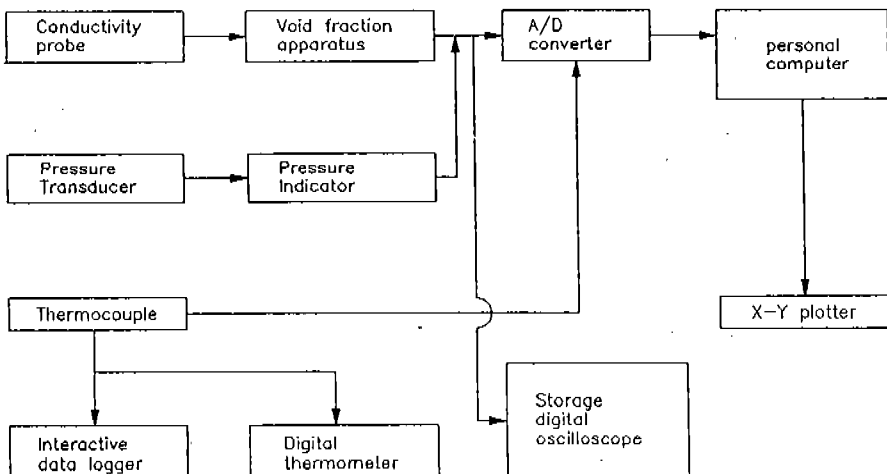


Fig.4 Schematic diagram of data processing system

때 펄스들의 양은 최대펄스를 나타내고 있다. 또한 중간펄스는 기포가 프로우브를 스치고 지나가는 경우이다. (B)는  $J_{SA}=1.0\text{m/s}$ 일 경우 기포류에서 슬러그류로 천이를 나타내는 그림으로서 기포들의 합체현상에 따라서 큰 기포들이 형성되어 관내에 산재한 작은 기포들과 함께 프로우브를 통과하므로 기포통과시간은 지연되어 간헐적으로 평탄한 형태의 펄스가 최대출력에 나타내고 있다. (C)는  $J_{SA}=2.0\text{m/s}$ 인 슬러그류의 경우로서 그림과 같이 작은 기포들이 프로우브를 순간적으로 통과하기 때문에 펄스가 짧고 그 빈도수가 감소하면서 기체-슬러그와 액체 슬러그가 프로우브를 통과하는 시간이 기포-슬러그류 천이에 비하여 한층 길어지고 있다. 이것은 기포-슬러그류와 액체 슬러그류 펄스가 각각 최대, 최소 출력에서 단형 특성을 나타냄을 알 수 있다.

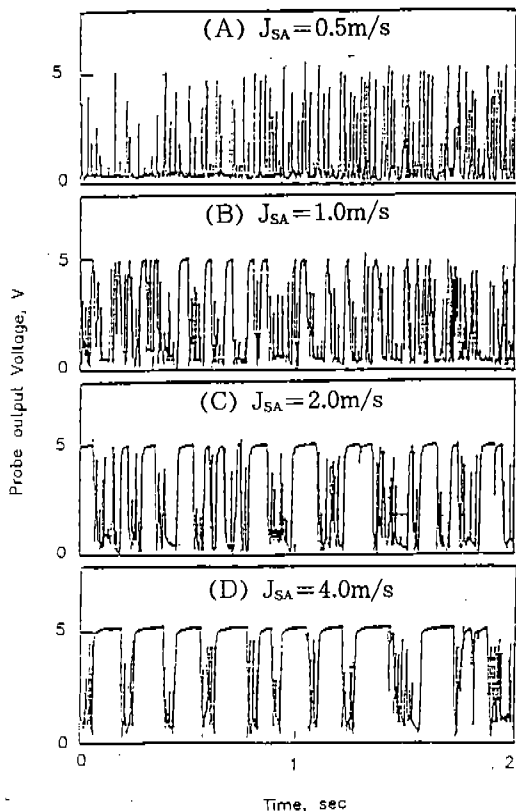


Fig.5 Probe signals for flow patterns

(D)는  $J_{SA}=4.0\text{m/s}$ 일 경우 슬러그류에서 환상류로 천이 하는 경우 이에 상응한 신호로서 슬러그류와 거의 유사한 경향을 보이고있다. 기포 슬러그의 발생빈도가 액체 슬러그보다 현저하게 증가하면서 고주파성분이 나타나는데 이와 같은 현상은 지배적인 기포-슬러그 유동에는 주기적으로 액체 슬러그가 산재되어 있어 기포-슬러그와 액체 슬러그가 불안정하게 유동하기 때문이다.

4.2 국부보이드율 분포특성

Fig.6-7은 비선회유동인 경우 등온과 비등온시 국부보이드율 분포를 나타낸 그림들이다. 겉보기 공기속도  $J_{SA}$ 를 0.5, 2.0m/s로 각각 일정하게 유지하고, 겉보기 물속도  $J_{SL}$ 를 0.25~1.0m/s로 변화시킨 경우 원관의 중앙부에서 관벽까지의 반경방향에 따르는 국부 보이드율 분포를 비교한 그림으로서 이때 열유속 즉,  $q=0$ 인 등온과 비등온시 87.5kw/m<sup>2</sup>이다. 또한 등온과 비등온 조건에서의 보이드율을 비교 검토한 것으로서 동일한 유동양식에서는 가열 조건에 관계없이 그 값이 거의 같게 분포함을 알 수 있다. 따라서 겉보기 물속도와 공기속도가 같을 경우는 등온이나 비등온 어느 경우나 국부보이드율 분포가 같

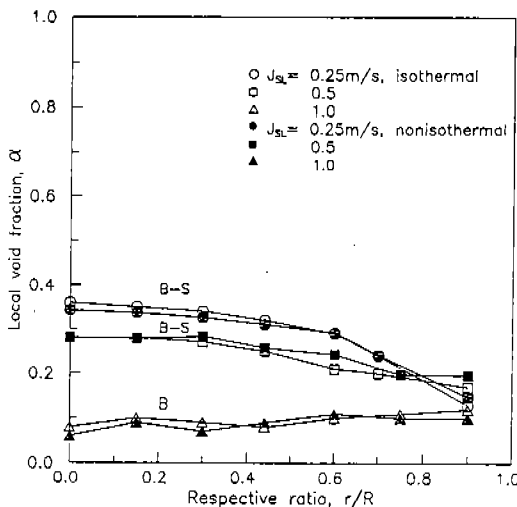


Fig.6 Comparison of local void fraction profiles under isothermal and nonisothermal condition for  $J_{SA}=0.5\text{m/s}$

다는 사실을 알 수 있다. 이는 비비등 상태에서 작동유체의 밀도변화가 거의 없기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 2상 대류열전달계수를 구할 때 등은 조건에서의 보이드율값을 사용하였다. 한편 Fig.6에서 기포류인 경우 보이드율이 관벽 근처, 즉  $r/R$ 이 0.9되는 위치에서 원관의 중앙부 보다 높은 보이드율값을 지닌다. 이와 같은 형상은 기포류에서 기포 현상은 대부분 액체속도에 의하여 변화하고 기포의 거동은 그 형상에 의하여 영향을 받는데 기포가 상기와 같은 거동을 나타내고 원인은 정확히 밝혀지지 않고 있으나 벽면 근처에서의 액상이 지니는 속도구배가 원인이 된다고 생각한다.

Kazin<sup>13)</sup>는 관직경이 57mm이고 증기-물 속도가 0.5m/s인 경우 보이드율 분포가 최대로 발생한 위치는  $r/R=0.6$ 이다. Serizawa<sup>14)</sup>에 의하면 관직경이 60mm으로서 겉보기 액체속도가 1.03m/s인 경우 보이드율이 최대로 발생할 수 있는 반경방향의 위치는  $r/R=0.9$ 로 밝혀졌다. 이들의 연구와 본 실험결과들을 비교하여 보면 관벽근처에서 발생하는 보이드율의 정점발생위치에 영향을 주는 인자는 관직경과 겉보기 액체속도라는 사실을 알 수 있다. 아울러 시험부의 크

기와 각 상의 속도는 유동 중앙부에서의 보이드율분포 뿐 아니라 기포류인 경우 보이드율 정점 발생위치에 영향을 주는 중요한 인자가 됨을 알 수 있다. 슬러그류-환상류로 천이 함에 따라 보이드율은 관벽에 가까워질수록 급격히 감소함을 알 수 있는데 이는 관벽에 형성되는 액막 때문이라고 생각된다.

4.3 압력강하

Fig.8은 비선회 유동인 경우와 선회유동인 경우 겉보기 물속도를 일정하게 유지시켰을 때 테이프 비틀을 변화 따르는 무차원 압력강하비를 나타낸 그림들로서 무차원 압력강하비는 차압( $\Delta P$ )을 정합( $\Delta P_0$ )으로 나눈 값이다. 그림에서 무차원 압력강하비는 유체속도가 일정하면 테이프 비틀율의 감소에 따라 증가하는데 이는 비틀 테이프로 인하여 작동유체의 와류혼합유동이 발생하여 마찰손실을 증가시킴을 알 수 있다. 이때 테이프비틀율이  $\infty$ 는 비선회 유동을 의미하다. 무차원 압력강하비는 비선회유동에 비하여 선회유동시 약 1.35~1.56배가 증가함을 볼 수 있는데 결국 비틀림 테이프를 유동장에 장착시 많은 펌핑동력을 요하게 된다.

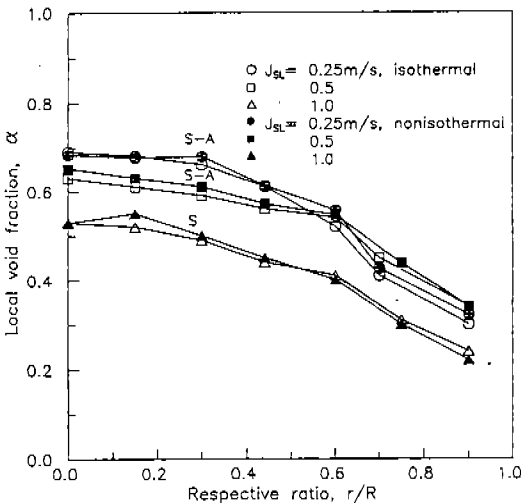


Fig.7 Comparison of local void fraction profiles under isothermal and nonisothermal condition for  $J_{SA}=2.0\text{m/s}$

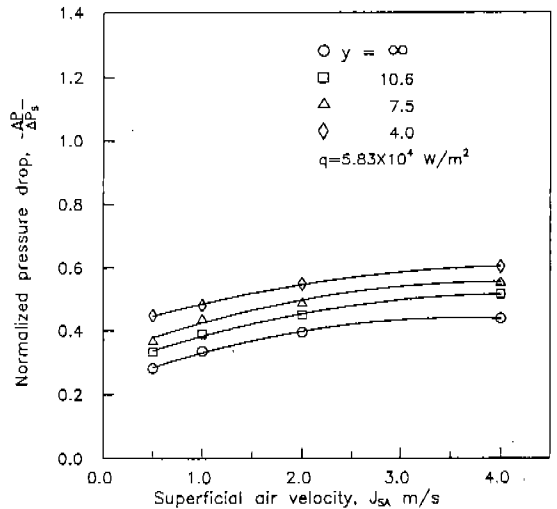


Fig.8 Comparison of normalized pressure drop profiles with tape twist ratios at  $J_{SL}=1.0\text{m/s}$



4.4 대류열전달

측정한 열유속은 시험부에서 발생하는 열손실을 고려하지 않은 값이기 때문에 시험구의 입구와 출구에서 유체의 온도를 측정 후 에너지 평형식을 이용 보정하여 계산에 사용하였다. 시험부 벽면온도의 측정에 따르는 불확실성을 계산하기 위해 열전도 방정식에서 구한 온도와 열전대로 측정된 온도를 비교해 본 결과 13%의 오차가 있었다. 본 실험에서 대류열전달에 관한 연구는 비선회유동과 선회유동시 시험부의 입구, 출구부에서 작동유체의 온도  $T_i$ 와  $T_o$ 를 측정하고 식(5)에 의하여 시험부내의 2상류의 bulk temperature를 계산하였으며, 또한 가열부에서 온도 측정은 내벽에 가까운 위치에서 검출하므로써 식(6)에 따라서 2상 대류 열전달계수를 계산하였다.

$$T_b = T_i + (T_o - T_i)(Z/L) \tag{5}$$

$$h_{TP} = q / (T_w - T_b) \tag{6}$$

Fig.9는 시험부에서 온도를 측정하여 계산한 2상 대류열전달계수와 상관식을 이용한 2상 열

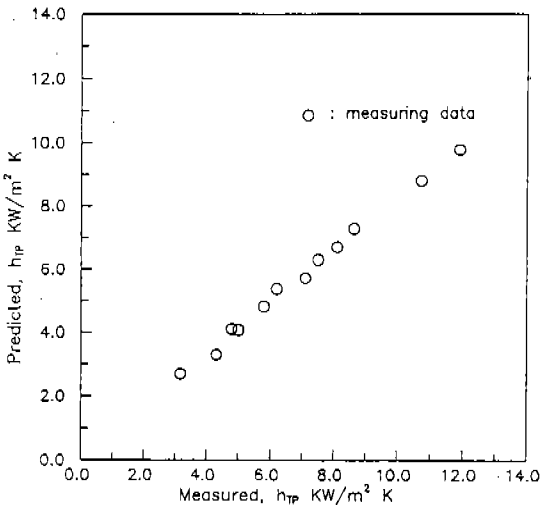


Fig.9 Comparison of measured and predicted two phase heat transfer coefficients in non swirl flow

전달계수를 비교한 그림으로서 평균오차가 21.7% 있었다. 이때 횡축은 Kudirka등<sup>15)</sup>이 수직관에서 기-액 2상류가 비선회 유동시 개발한 상관식(7)을 이용하여 계산된 열전달계수로서 이때 평균 보이드율  $\bar{\alpha}$ 는 본 실험을 통하여 측정하였으며 단상 대류열전달계수  $h_L$ 은 Sieder-Tate등<sup>16)</sup>이 단상 유동장에서 개발한 상관식을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{h_{TP}}{h_T} = \left( \frac{1}{1-\bar{\alpha}} \right)^{0.8} \tag{7}$$

Fig.10-11는 열유속이 일정할 때 겉보기 물속도와 겉보기 공기속도를 변화시키며 2상 대류열전달계수를 도식한 그림으로서 비선회와 선회유동장에서 겉보기 물속도의 증가, 겉보기 공기속도의 증가시 2상 대류열전달계수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 유동장내 유량이 증가함에 따라 벽면에 열경계층의 감소를 초래하여 대류열전달 증가의 한 요인임을 확인할 수 있다.

Fig.12은 비선회와 테이프 비틀음의 변화에 따른 선회유동시 2상 대류열전달계수를 비교한 그림으로 동일한 시험부의 입구조건에서 비선회유동보다 선회유동시 2상 대류열전달계수가 약

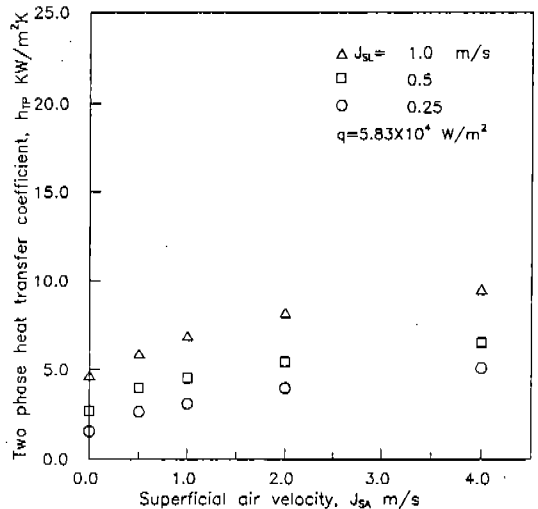


Fig.10 Two phase heat transfer coefficients in non swirl flow

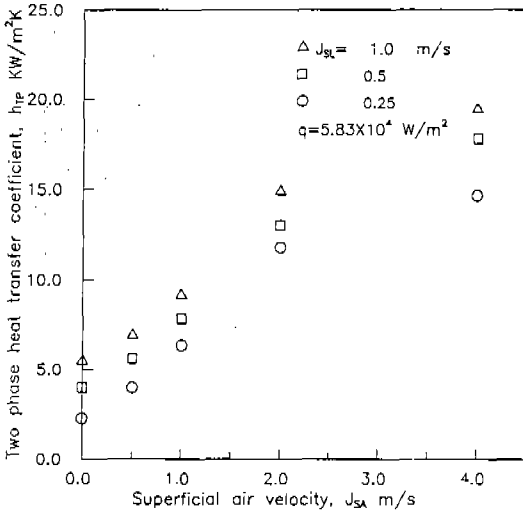


Fig.11 Two phase heat transfer coefficients in swirl flow with  $\gamma=4.0$

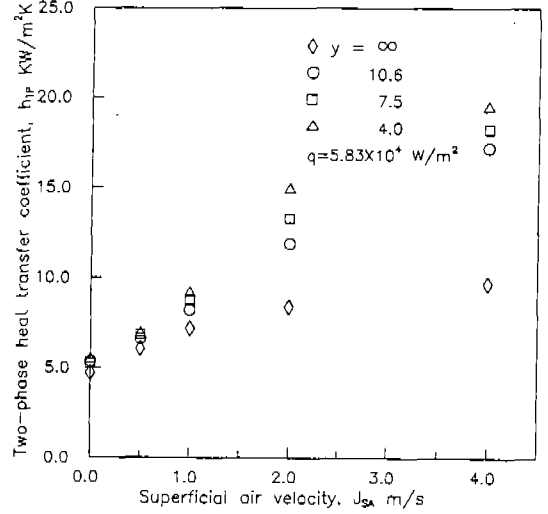


Fig.12 Comparison of two phase heat transfer coefficients with tape twist ratios at  $J_{SL}=1.0m/s$

1.3~2.9배로 증가함을 알 수 있다. 이는 선회유동으로 인한 난류효과와 원심대류효과, 와류혼합들이 대류열전달을 촉진시키는 요인이기 때문에 선회유동시 유동장내의 속도성분, 즉 관의 축방향과 접선방향 속도성분에 의한 와류혼합현상이 시험부의 열경계층을 변화시키는 것으로 고려되고 있다.

5. 결 론

기-액 2성분 2상류를 비비등 조건으로 수직원관에서 상향으로 비선회유동 및 선회유동 시키는 경우 열적조건에 따르는 보이드율 분포, 압력강하와 2상 대류열전달계수를 실험적으로 구명할 결과 다음과 같이 결론을 얻었다.

- 1) 국부 보이드율분포는 기포류를 제외하고 관중에서 관벽으로 갈수록 감소하고 기포류에서  $r/R$ 이 0.9되는 위치에서 원관의 중앙부 보다 높은 보이드율 값을 지니며, 주어진 유동양식에서 비비등시 열유속에 관계없이 거의 동일하게 분포한다. 이는 비비등시 열유속을 변화시켜도 작동유체의 밀도변화가 거의 없으므로 국부 보이드율분

포에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

- 2) 압력강하는 겉보기 물속도와 겉보기 공기속도 증가에 따라 증가하며, 비선회 유동에 비해 선회유동시 테이프의 비틀림이 감소함에 따라 증가하는데 이는 비틀림 테이프로 인한 와류혼합유동이 마찰손실에 기인함을 확인하였으며, 비선회유동보다 선회유동시 테이프 비틀림이  $\infty \sim 4.0$  범위에서 무차원 압력강하가 약 1.35~1.56배로 증가한다.
- 3) 2상 대류열전달계수는 겉보기 물속도와 겉보기 공기속도 증가에 따라 증가하는데 이는 유동장내 유량이 증가함에 따라 시험부 벽면에 열경계층의 감소를 초래하여 대류열전달 증가의 한 요인으로 사료되며, 비선회유동보다 테이프 비틀림이  $\infty \sim 4.0$  범위인 선회유동시 2상 대류열전달계수가 약 1.3~2.9배로 증가한다.

참 고 문 헌

1. Spalding, D. B., 1980, "Multiphase Flow Prediction in Power System Equipment

- and Components," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.6, pp. 157~168.
2. Gambill, W. R., and Bundy, R. D., 1963, "High-Flux Heat Transfer Characteristics of Pure Ethylene Glycol in Axial and Swirl Flow," *AIChE. J.*, Vol.9, No.1, pp. 55~59.
  3. Plessis, J. P., and Kr ger, D. G., 1984, "Friction Factor Prediction for Fully Developed Laminar Twisted Tape Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.27, No.11, pp. 2095~2100.
  4. Jensen, M. K., and Bensler, H. P., 1985, "Two-Phase Pressure Drop with Twisted Tape Swirl Generators," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.11, pp. 201~211.
  5. 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.
  6. Griffith, p., 1964, "Two Phase Flow Regime Detecting," *ASME Paper 64-WA/HT-43*.
  7. 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.
  8. Martinelli, R. C., Nelson, D. B., and Schnectady, N. Y., 1948, "Prediction of Pressure Drop during Forced Circulation Boiling of Water," *Tran. of ASME*, Vol.70, pp. 695~702.
  9. Staub, F. W., 1969, "Two Phase Fluid Modeling-The Critical Heat Flux," *Nuci. Sci. Eng.*, Vol.35, pp. 190~199.
  10. Gambill, W. R., Bundy, R. D., and Wansbrough, R. W., 1961, "Heat Transfer, Burnout, and Pressure Drop for Water in Swirl Flow through Tubes with Internal Twisted Tapes," *Chem. Eng. Symp. Series*, Buffalo, pp. 127~137.
  11. Whalley, P. B., 1979, "The Effect of Swirl on Critical Heat Flux in Annular Two Phase Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.5, pp. 211~217.
  12. ASME, 1959, "Flow Meter and Its Application,"
  13. Kazin, I. V., 1964, "Radial Distribution of Stream in Rising Turbulent Steam-Water Flow," *Teploenergetika*, Vol.11, No. 1, pp. 40~43.
  14. Serizawa, A., Kataoka, I., and Michiyoshi, I., 1975, "Turbulence Structure of Air-Water Bubbly Flow II. Local Properties," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.2, pp. 235~246.
  15. Kudirka, A. A., Grosh, R. J., and McFadden, P. W., 1965, "Heat Transfer in Two Phase Flow of Gas-Liquid Mixtures," *Ind. Eng. Chem. Fund*, Vol.4(3), pp. 339~344.
  16. Sieder, E. N., and Tate, G. E., 1936, "Heat Transfer and Pressure Drop" *Ind. Eng. Chem. Fund*, Vol.28, pp. 1429~1435.