

고주파 삼각파 여자법을 사용한 실시간 슬러그 유동 측정용 전자기유량계

안예찬[†] · 차재은* · 김무환**

(2002년 4월 20일 접수, 2002년 9월 30일 심사완료)

A Real-Time Measurement of Slug Flow Using Electromagnetic Flowmeter with High Frequency Triangular Excitation

Yeh-Chan Ahn, Jae-Eun Cha and Moo-Hwan Kim

Key Words : Electromagnetic Flowmeter(전자기유량계), High Frequency Triangular Excitation(고주파 삼각파 여자법), Liquid Film Velocity(액막속도), Slug Flow(슬러그류), Bubble Location(기포위치)

Abstract

In order to investigate the characteristics of two-phase slug flow, an electromagnetic flowmeter with 240Hz triangular AC excitation was designed and manufactured. The signals and noise from the flowmeter were obtained, and analyzed in comparison with the observations with a high speed CCD camera. The uncertainty of the flowmeter under single-phase flow was $\pm 2.24\%$ in real-time. For two-phase slug flow, electromagnetic flowmeter provided real-time simultaneous measurements of the mean film velocity around Taylor bubble and the relative location and the length of the bubble. Besides, it is an easier and cheaper method for measuring mean film velocity than others such as photochromic dye activation method or particle image velocimetry.

기호설명

B : 자속밀도벡터
 B : B 의 x 방향 성분
 d : 유로 직경
 E : 전기장
 f : 유동패턴함수, 식 (9)에 정의된 기호
 i : 유량계 출력 전류
 j : 유체를 정지시킨 상태에서 전극으로 1A의 전류를 흘릴 때 유체에 발생하는 가상전류밀도
 Q, Q_L : 단상 및 2상에서의 액체유량
 U : 포텐셜

ΔU : 두 전극 사이의 포텐셜 차이
 ΔU^v : 유체를 정지시킨 상태에서 전극으로 1A의 전류를 흘릴 때 두 전극 사이에 발생하는 가상 포텐셜 차
 v : 속도벡터
 v_m, v_{Lm} : 단상 및 2상에서의 액상평균속도
 v_s, v_z : 테일러 기포속도, v 의 z 방향 성분
 W : 가중벡터 ($B \times j$)
 W_z : W 의 z 방향 성분
 \overline{W} : 축대칭 가중함수, 식 (3)에 정의된 기호
 α : 기공률
 τ : 적분부피

하첨자

SP : 단상
 TP : 2상

[†] 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과,
 E-mail : ayc@postech.ac.kr,
 TEL : (054)279-5551 FAX : (054)279-3199
 * 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과,
 ** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

1. 서론

전자기유량계는 Michael Faraday 의 전자기유도 현상 원리를 이용하는 것으로, 유동하는 전도성 유체의 유속과 가해진 자기장에 수직인 방향으로 유속과 자기장의 세기에 비례하여 생성되는 유도 기전력 (flow induced electromotive force) 으로부터 액체의 평균 유속 및 유량을 측정하는 계측기이다. 전자기유량계는 기액 2 상류 각 상간의 전기전도도 차이를 효과적으로 이용할 수 있고, 내부에 가동부가 없어 유동장 교란과 압력손실이 작고, 전기적 신호에 의해 유량을 측정하므로 응답성 (response)이 매우 빠르며, 유량계와 멀리 떨어진 곳에서도 그 전기적 신호를 확인할 수 있으므로, 단상 및 2 상류의 유독성 유체나 방사능 유체, 액체금속 등의 유량 측정에 이용될 수 있다.

특히 테일러 기포(Taylor bubble) 전후에서 액상 속도 방향이 역전되는 매우 복잡한 수직 슬러그 유동에서 전자기유량계는 평균유속의 변화를 실시간으로 측정하는 좋은 기기가 된다.

물의 유량 측정에 사용하는 전자기유량계는 유체내의 전기화학적(electro-chemical)인 문제를 피하기 위하여 교류 전원을 이용하여 자기장을 형성시킨다. 그러나 교류자기장은 시간에 따라 자기장이 변하므로, 유동에 의해 생성되는 유량신호 이외에 일종의 전기적 잡음인 자체유도기전력 (transformer electromotive force) 신호가 생성되고 이는 유량신호와 중첩되어 유량 측정을 어렵게 만든다. 따라서 자체유도기전력은 자기장의 일차미분값에 비례하고 유동에 의한 유도기전력은 자기장에 직접 비례함을 이용하여, 자체유도기전력을 제거하려는 많은 시도가 있어 왔다. 펄스파(pulsed-DC) 교류전원을 사용하거나 상용주파수 보다 낮은 저주파의 정현파(sinusoidal wave)를 이용하는 것이 그 예이다. 한편 저주파 정현파를 사용하면 전자석 전력공급선과 신호선 사이의 저항 및 용량 결합에 의한 전력누설잡음도 제거할 수 있는 장점이 있다.

그러나 이 예들은 단상 액체 유량 측정을 그 목표로 하고 있다. 2 상 유동은 그 특성이 신속히 변화하기 때문에 고주파 (240Hz) 여자법을 사용하는 것이 필수적이고 단상의 경우와는 달리 자체유도기전력이 잡음이 아니라 유용한 정보 즉 전극을 포함한 관 단면에 대한 유동의 대칭정도를 나타내기 때문에 2 상 유동 측정용 새로운 유량계 디자인이 필수적이다.

그러나 고주파 여자법을 사용하는 경우에 전술한 전력누설잡음이 심각해지고 이로 인해 유량신

호의 측정을 어렵게 만든다. 따라서 2 상 유동 측정을 위한 유량계로서 본 연구에서는 전력누설잡음에 의해 영향을 적게 받는 진류형식유량계를 사용하였고 유도기전력과 자체유도기전력의 모양을 매우 다르게 하여 이를 쉽게 분리하기 위하여 삼각파 여자법을 사용하였다. 이로부터 슬러그 액막 유속뿐 아니라 테일러 기포의 전극에 대한 상대적 위치도 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 한편 유량계 출력신호에 따른 유동의 특성을 고속 CCD 카메라와 동기시켜 분석할 수 있도록 하였다.

2. 기존연구

2.1 기존 전자기유량계

Shercliff⁽¹⁾는 액체금속의 유량측정을 위하여 전자기유량계와 관련된 이론을 체계적으로 정리하였다. Shercliff 는 유량계 유로 단면 각 부분에서의 유속이 최종 출력에 미치는 정도를 나타내기 위하여 가중함수(weight function)를 제안하였다.

Bevir⁽²⁾는 전자기유량계식인 식 (1)에 가상전류 j 를 도입하여 Shercliff 의 가중함수 개념을 확장한 가중벡터 $\mathbf{W}=\mathbf{B}\mathbf{x}_j$ 를 고안하면서 식 (2)를 얻었다.

$$\nabla^2 U = \text{div}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

$$\Delta U = \iiint_V \mathbf{v} \cdot \mathbf{W} \, d\tau \quad (2)$$

한편 Bevir 는 비압축성 유체가 흐를 경우 유량계가 속도분포와 상관없는 출력을 내는 이상유량계(ideal flowmeter)가 되기 위한 필요충분 조건 $\text{curl} \mathbf{W}=0$ 을 제시하였고 선형 축대칭 유동일 때는 그 조건이 식 (3)과 같이 됨을 증명하였다.

$$\overline{W}'(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_z \, dz d\theta = \text{constant} \quad (3)$$

식 (3)은 균일한 횡자기장 하에서는 전극의 모양에 상관없이 조화함수(harmonic function)의 중간값 정리에 의하여 항상 성립한다. 이로부터 식 (2)는 균일한 횡자기장, 점전극, 선형 축대칭 유동일 경우에 상수 \overline{W}' 가 $4B/\pi d$ 가 되어⁽⁵⁾ 식 (4)와 같이 된다.

$$\Delta U = 2\pi \overline{W}' \int_0^{d/2} v_z(r) r dr = \frac{4B}{\pi d} Q = B v_m d \quad (4)$$

Bernier 와 Brennen⁽³⁾은 실제의 2 상류 실험을 수행하였는데 균일한 2 상류의 경우에는 단순 관계식(simple relation) 식 (5)가 잘 맞음을 보였다.

$$\Delta U_{TP} = \frac{4B}{\pi d} \frac{Q_L}{1-\alpha} = \frac{\Delta U_{SP}}{1-\alpha} \quad (5)$$

이 관계식은 기공률 α 가 증가할수록 2 상류 상황에서 두 전극사이의 전위차 ΔU_{TP} 가 같은 액

상유량이 단상으로 흐를 때의 전위차 ΔU_{SP} 보다 더 커짐을 말한다. 이에 덧붙여 그들은 단순관계식이 유동양식 또는 전기전도도의 균일성과는 상관없이 유효하다고 밝혔다. 또한 Bernier⁽⁴⁾은 환상류의 경우의 엄밀해를 구하였고 Wyatt⁽⁵⁾는 이 결과를 재검증하였다.

그러나 Wyatt⁽⁵⁾는 Bernier 와 Brennen⁽³⁾의 단순관계식은 기상의 분포에서 균일성과 등방성이 존재하는 경우에만 유효함을 증명하였으며, 이 결과는 Bevir⁽⁶⁾에 의해서 이미 연구된 바 있다.

Velt 등⁽⁷⁾은 시간에 따라 변하는 자기장으로 인해 유도된 에디전류(eddy current)가 가지는 대칭성이 비전도상에 의해 깨어져 전극에 자체유도기전력 신호를 생성시킴을 밝혔다.

Krafft⁽⁸⁾은 액상의 속도와 기포의 속도를 동시에 측정하기 위하여 유도기전력 및 자체유도기전력 신호를 이용하였다.

Cha 등⁽⁹⁾은 기포류 및 슬러그류에서 저주파 정현파를 사용하여 유동측정을 시도하였으나 유도기전력과 자체유도기전력을 완전히 분리하지는 못하였다.

2.2 슬러그 액막속도 측정

많은 연구들이 단일 테일러 기포 주위의 유동에 대하여 이루어졌으나 실험적으로 액막속도를 측정할 경우는 매우 드물다. 이는 액막이 매우 얇고(~1mm) 쉽게 교란되기 때문이다.

그럼에도 Goldsmith 와 Mason⁽¹⁰⁾은 알루미늄 입자 트레이서를 이용하여 테일러 기포 상류 및 액막속도를 측정하였다.

Kvernfold 등⁽¹¹⁾은 LDV 기술을 이용하여 몇 개의 단면에서의 속도 및 수평 슬러그류 액막속도를 측정하였다. Nakoryakov 등^(12,13)은 전기화학속도센서(electrochemical velocity probe)를 이용하여 수직 슬러그류의 순간속도장 및 전단력을 측정하였다. Mao 와 Dukler⁽¹⁴⁾는 수직 슬러그류에서 벽 전단력의 분포를 측정하여 유닛 슬러그당 2 지점에서 액상 속도방향의 반전이 일어남을 지적했다.

토론토 대학 연구그룹⁽¹⁵⁻¹⁸⁾에서는 광변색 염료 방법(photochromic dye method)을 이용하여 정지한 유체(kerosene) 내에서 움직이는 단일 테일러 기포 상류, 후류, 주위 액막에서의 유동장을 측정하였고 액막 평균속도도 제시하였다.

Polonsky 등⁽¹⁹⁾은 PIV(particle image velocimetry) 기술을 이용하여 상향류, 하향류 및 정지한 액상 내에서 움직이는 테일러 기포 상류 및 주위액막에서의 유동장을 측정하였고 액막 평균속도도 제시

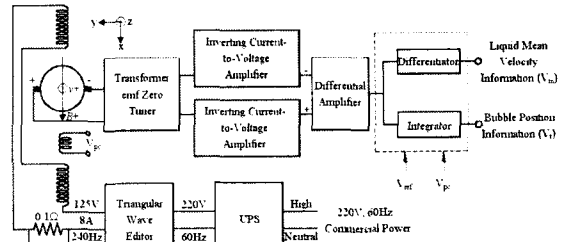


Fig. 1 The schematic diagram of electromagnetic flowmeter developed

하였다.

3. 개발된 전자기유량계

3.1 개요

본 연구에서 개발한 전자기유량계는 기전력으로 인해 두 전극사이에 발생한 전압차를 측정하는 기존 방식과는 달리 기전력으로 인해 발생한 전류를 측정하는 방식을 채택하고 있다. 이는 고주파로 갈수록 문제가 심각해지는 전력누설잡음에 의한 신호파형 왜곡을 줄이기 위함이다. 전력누설잡음은 전자석 전원공급선과 유량계 신호선 사이의 저항 및 용량결합에 의해 전자석 전력이 신호선으로 누설되면서 발생하는 잡음이다.

개발된 전자기유량계의 계략도는 Fig. 1 과 같다.

3.1.1 유도기전력(flow induced emf)

전자기유량계식인 식(1)에서 전류형식의 유량계를 위한 경계조건을 이용하면 식(6)을 유도할 수 있다.

$$i = \frac{\iiint \mathbf{v} \cdot \mathbf{W} d\tau}{\Delta U^v} \tag{6}$$

한편 균일한 횡자기장, 점전극, 선형 축대칭 유동하에서 식 (6)은 단상 액체유동의 경우에 식 (7)로 환상류 및 기포류(유체가 균일 등방성으로 가정될 수 있을 경우)의 경우에 식 (8)로 바뀐다.

$$i_{SP} = \frac{4BQ}{\pi d \Delta U_{SP}^v} = \frac{Bv_m d}{\Delta U_{SP}^v} \tag{7}$$

$$i_{TP} = \frac{4BQ_L}{\pi d(1-\alpha)\Delta U_{TP}^v} = \frac{Bv_{Lm} d}{\Delta U_{TP}^v} \tag{8}$$

또 긴 테일러 기포를 가진 슬러그류는 전극 주변의 국소부분에서 환상류로 가정할 수 있으므로 이 경우에도 식 (8)이 유효하다고 가정하는 것은 큰 무리가 없다. 따라서 긴 테일러 기포를 가진 슬러그류에서 유량계 출력전류 i_{TP} 가 식 (9)와 같

은 관계를 가지게 되고 유동패턴함수 f 를 정의할 수 있게 된다. 유동패턴함수는 액막두께 같은 유동형태에만 의존하는 함수이며 실험적, 수치해석 방법을 통해서 구할 수 있다.

$$i_{TP} = \frac{Bv_{Lm}d}{\Delta U_{TP}^v} = \frac{i_{SP}}{v_m} \frac{\Delta U_{SP}^v}{\Delta U_{TP}^v} v_{Lm} \equiv \frac{i_{SP}}{v_m} \frac{1}{f} v_{Lm} \quad (9)$$

3.1.2 자체유도기전력(transformer emf)

자체유도기전력은 전자석 코일과 두 전극을 포함하는 임의의 폐회로선(closed contour C)이 변압기의 1차 및 2차 코일처럼 작동하여 발생하는 기전력으로서 발생하는 원리를 따라 “Transformer Electromotive Force”로 흔히 불리운다. 전자석 코일에 의해 시간에 따라 변하는 자기장이 발생하면 Faraday 법칙, 식 (10)이 적용된다.

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (10)$$

3.2 구성

3.2.1 전원공급부

전원공급부는 Fig. 1 에서와 같이 UPS 를 통해 안정화시킨 60Hz 상용전원을 삼각파 발생기(triangular wave editor, Pacific Power Source 115ASX)를 이용하여 240Hz, 470Gauss(rms)의 삼각파 자기장을 만들어 주는 부분이다. 자기장 파형을 검출하기 위하여 0.10hm 의 저항을 전자석 코일과 직렬로 연결하고 양단의 전압(V_{ref})을 측정하거나 픽업 코일을 사용하여 유도된 전압(V_{pc})을 측정하였다. 또 V_{ref} 와 V_{pc} 은 Fig. 1 에 점선으로 표시된 신호처리부에서 조정신호(control signal)로 사용된다.

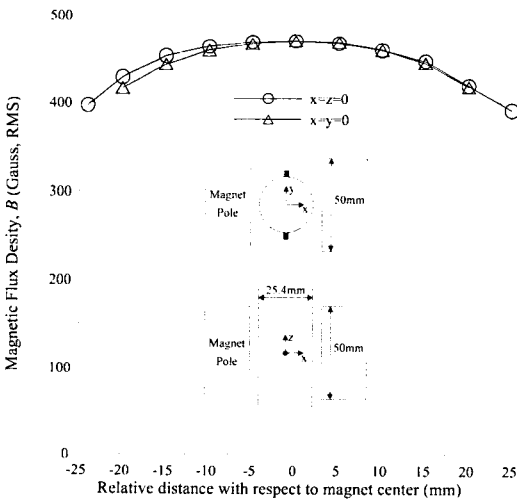


Fig. 2 The distribution of magnetic flux density

3.2.2 검출부(detector)

검출부는 투명한 폴리카보네이트 관에 지름 2mm 의 전극 두개를 지름방향으로 맞설치한 것과 전자석으로 구성된다. 전자석은 실리콘 코팅된 박판을 적층시켜 제작한 C 자형 요크(yoke)에, 5mmx3mm 전선 단면을 가진 에나멜 코팅된 두 코일을 직렬연결하여 두 극에 설치하였다. 극간 간격은 40mm, 극 단면은 50mmx50mm 이다.

전자석에서 발생하는 자기장의 세기를 F.W.Bell 사의 가우스미터를 이용하여 측정한 것이 Fig. 2 와 같고 이는 내경 1 인치 유로에 대하여 균일한 자기장으로 가정할 수 있다.

3.2.3 자체유도기전력 상쇄회로(transformer emf zero tuner)

자체유도기전력이 발생하는 폐회로선 C 로는 두 가지가 있는데 그 하나는 두 전극을 연결하는 유체와 두 전극에서 나온 두 신호선이 이루는 폐회로(C1)이고 다른 하나는 두 전극이 포함된 유체내의 폐회로(C2)가 있다. C2 에서 발생하는 자체유도기전력은 자기장 및 유동형태가 전극을 포함한 관 단면에 대하여 완전히 대칭이면 신호선으로 자체유도기전력 영향이 검출되지 않으나 엄밀한 대칭 자기장을 설계하는 것은 실제적으로 불가능하고 2 상유동에서는 유동형태의 대칭성도 시간에 따라 계속적으로 변한다. 따라서 최종적으로 신호선에 2 상유동의 비대칭성 변화만을 측정하기 위하여 C1 에서 발생하는 자체유도기전력과 비대칭 자기장에 의하여 C2 에서 발생하는 자체유도기전력을 미리 제거할 필요가 있다. 이를 위하여 Fig. 1 의 자체유도기전력 상쇄회로(transformer emf zero tuner)를 설치하였고 그 구조는 Fig. 3 와 같다.

자체유도기전력 상쇄회로는 전극을 포함한 관 단면 상하부에 C1 을 Fig. 3 와 같이 배치하고 가변저항(variable resistor)을 설치한 형태이다. C1 에서

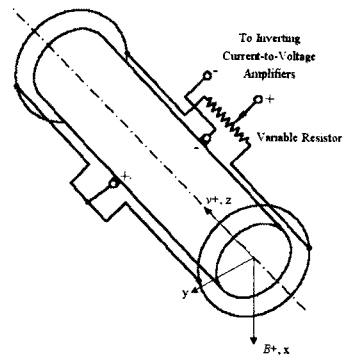


Fig. 3 Transformer emf zero tuner

발생하는 자체유도기전력과 비대칭 자기장에 의하여 C2 에서 발생하는 자체유도기전력을 가변 저항을 조절하여 상쇄시킨다.

3.2.4 증폭부(amplifier)

전술한 바와 같이, 고주파로 갈수록 문제가 심각해지는 전력누설잡음에 의한 신호파형 왜곡을 줄이기 위하여 본 유량계는 전류형식을 취하고 있다. 전류량을 측정하기 위하여 설치된 전류-전압 반전 증폭기(inverting current-to-voltage amplifier) 한 쌍은 입력 임피던스가 매우 낮아 전력누설잡음을 최소화할 수 있다. 전류-전압 반전 증폭기의 출력은 차동증폭기(differential amplifier)를 거쳐서 Fig. 1 에 점선으로 표시된 신호후처리부로 입력된다.

3.2.5 신호후처리부

신호후처리부에 입력되는 파형은 자기장에 비례하는 유도기전력(V_m)과 자기장의 일차미분에 비례하는 2 상유동 비대칭성에 의한 자체유도기전력(V_t)의 영향이 중첩된 형태이다. 특히 z 방향의 속도를 가지는 액체 내에서 테일러 기포가 상승하는 슬러그류에서, Fig. 4(a)와 같이 테일러 기포가 상승할 때 각 위치에 대해서 Fig. 4(b)의 V_m+V_t 파형이

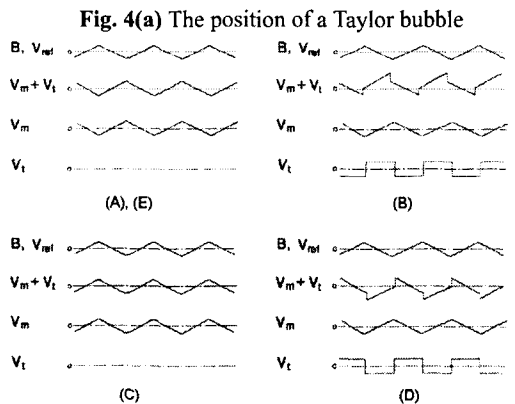
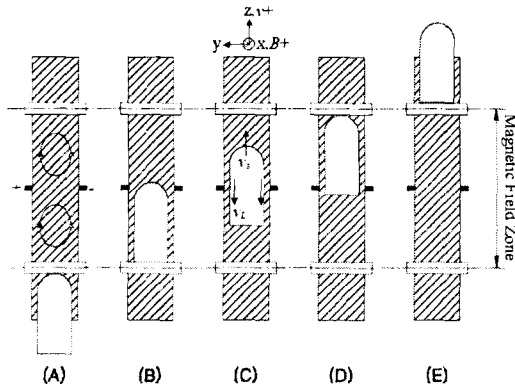


Fig. 4(b) The signals corresponding to each position

대응된다.

테일러 기포가 (A)와 (E) 위치에 있을 때는 유동의 대칭성으로 인해 V_t 가 없고 양의 방향 역상 속도를 보이는 V_m 만 존재한다. 한편 (C) 위치에 있을 때는 유동의 대칭성으로 인해 V_t 는 없고 역상 속도가 음의 방향으로 반전되는 전형적인 슬러그류 현상으로 인하여 음의 방향 역상속도를 보이는 V_m 만 존재한다.

(B) 위치에서는 유동의 비대칭성이 음의 방향으로 최대이므로 V_t 가 최소값을 가지게 되고 (D) 위치에서는 유동의 비대칭성이 양의 방향으로 최대이므로 V_t 가 최대값을 가지게 된다.

신호후처리부는 V_m+V_t 파형을 V_m 과 V_t 로 분리하는 역할을 한다. 신호후처리부내의 미분기를 이용하면 역상의 평균유속 정보를, 적분기를 이용하면 테일러 기포 위치정보를 얻을 수 있다.

3.3 2 상류 실험장치

전자유량계를 2 상유동 상황에서 테스트하기 위하여 Fig. 5 와 같은 2 상류 루프를 제작하였다. 내경 1 인치의 수직 상향의 물-공기 2 상유동 실험장치의 하단에 기포발생기를 설치하고, 내경의 45 배 위치에 전자유량계를 설치하였다. 전자유량계로 유입되는 액상 및 기상 유량은 각각 미리 보정한 오리피스 유량계(불확실도 $\pm 0.94\%$) 및 로타미터(rotameter)로써 측정하였다. 유동관찰을 위하여 1000fps 성능을 가진 고속 CCD 카메라를 유량계 출력을 받는 DAS(data acquisition system, Metrabyte DAS-1802ST/DA)와 동기시켰고 500fps 로 유동을 관찰하였다. 또 신호분석을 위하여 디지털 오실로스코프(Tektronix TDS3034)를 사용하였다.

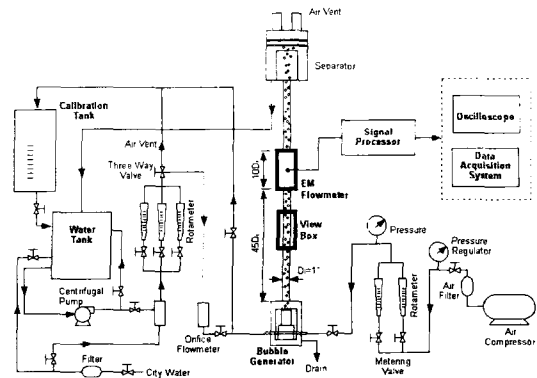


Fig. 5 Schematic diagram of two-phase flow experimental facility

4. 실험결과

4.1 단상실험결과

Fig.6 은 단상 액체에서의 전자기유량계의 보정 곡선이다. 액상의 평균속도는 기 보정된 오리피스 미터를 사용하여 획득하였고 본 연구에서 개발된 전자기유량계의 단상에서의 불확실도는 실시간 측정시 $\pm 2.24\%$ (percentage for full scale)였다. 이 중에서 전원불안정으로 인한 자기장의 불확실도는 $\pm 0.44\%$ 였다. 한편 단상에서의 측정결과는 2 상에서의 결과를 얻기 위하여 식 (9)에 대입되었다.

4.2 2 상실험결과

Fig. 7(a)는 정지된 액상 내에 테일러 기포가 상승할 때 액막평균속도 및 테일러 기포위치 정보의 변화를 테일러 기포 전단끝과 전극사이의 거리에 대하여 나타낸 그림이다. 유량계 출력의 샘플링은 삼각파 한 주기마다 2 번씩 이루어졌기 때문에 480Hz 가 된다. 세가지 길이의 기포에 대하여 실험하였는데 각각 0.131 m, 0.141m, 0.173m 였다. 이때 기포 길이 및 위치 그리고 속도는 고속 CCD 카메라를 이용하여 측정하였는데 세 경우 모두 기포 속도가 이론식 $v_s = 0.35\sqrt{gd}$ (0.175 m/sec)와 잘 일치하였다.

Fig. 7(a)에서 3 개의 굵기가 다른 회색선은 테일러 기포의 위치변화를 보여주고 있는데 "0"에서 출발하여 "0"로 끝나고 있고 최소값은 기포 전단 끝이 전극을 지나친 직후에 발생하고 최대값은 기포 후단끝이 전극을 지날 때 발생하였다. 이는 예상된 결과를 잘 반영하고 있는 것이다. 특히 최소값 부근에서는 세 곡선이 잘 일치함을 볼 수 있는

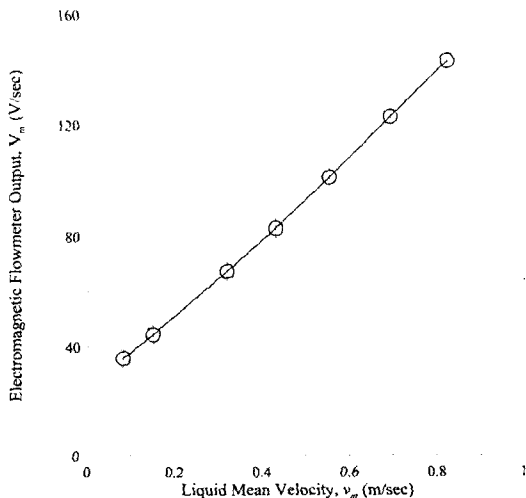


Fig. 6 Single-phase calibration

데 이는 테일러 기포 모양이 반구모양으로 매우 일정하기 때문이다. 또 최소값과 최대값이 발생한 시간을 유량계로부터 알 수 있으므로 매우 정확한 기포상승속도 이론식을 이용하면 기포 길이를 측정할 수 있게 된다.

3 개의 굵기가 다른 회색선은 액막평균속도 변화를 보여주고 있는데 식 (9)에서 정의된 유동패턴함수 f 를 "1"로 가정하고 그린 그래프이다. 유동패턴함수 f 를 엄밀히 고려한 연구는 현재 진행중이기 때문에 차후에 발표하기로 한다. 정지된 액체 내에서 기포를 상승시켰기 때문에 액체평균속도 역시 "0"에서 출발하여 "0"로 끝나고 있고 액막에서 역방향 속도가 발생하여 가속되는 전형적인 슬러그류의 특성을 잘 보여주고 있다.

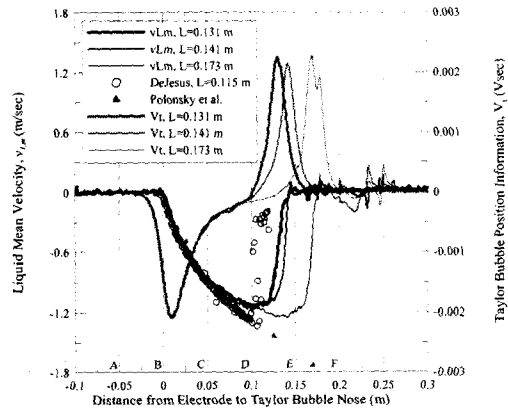


Fig. 7(a) Liquid mean velocity and Taylor bubble position information

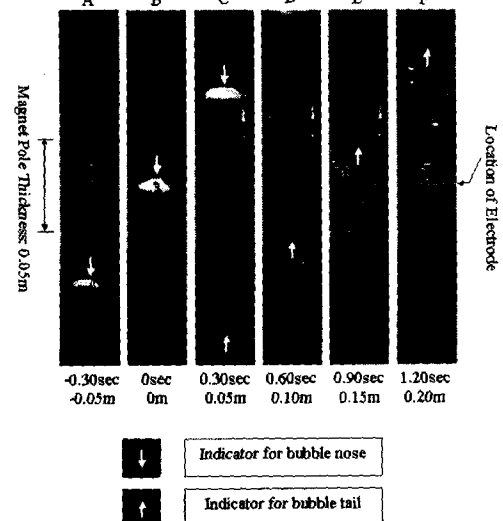


Fig.7(b) Photos taken by high speed CCD camera with the time and the distance from electrode to Taylor bubble nose for the bubble of L=0.131m

실험결과와 비교를 위하여 현재까지 존재하는 두 결과인 광변색 염료 방법(photochromic dye method)을 이용한 DeJesus⁽¹⁸⁾의 결과와 PIV(particle image velocimetry) 기술을 이용한 Polonsky⁽¹⁹⁾의 결과를 인용하였다. 비록 유동패턴함수 f 를 "1"로 가정하였지만 비교적 잘 일치하는 결과를 관찰할 수 있었다. 또 전자기유량계를 사용한 방법이 인용한 두 실험에 비하여 기지는 큰 장점은 실시간 측정이 가능한 것과 값싸고 단순한 방법을 사용한다는 것 그리고 액막이 심하게 교란되는 경우에도 정확한 평균유속을 측정할 수 있다는 것이다.

Fig.7(b)는 길이 0.131m 의 테일러 기포가 상승할 때 주요 지점에서 고속 CCD 카메라로 찍은 사진들이다. 테일러 기포 전단끝과 전극사이의 거리와 각각의 위치에서의 상대시간을 표시하였다.

5. 결론

본 연구를 통하여 개발된 전자기유량계를 사용하여 2상 슬러그 유동측정 기술을 확립하였다.

(1) 고주파 (240Hz) 삼각파 교류 여자법을 사용하는 전류형식의 전자기유량계를 잡음 제거 기술이 내재된 신호처리부와 함께 개발하였다.

(2) 단상에서의 전자기유량계 불확실도는 실시간 측정시 $\pm 2.24\%$ (percentage for full scale)였다.

(3) 2상 슬러그류에서 광변색 염료 방법(photochromic dye method) 및 PIV(particle image velocimetry) 기술에 비교하여 보았을 때 값싸고 단순한 방법을 이용하여 비교적 정확한 액상평균속도를 실시간으로 얻을 수 있었으며 더 나아가 다른 두 방법으로 측정이 불가능한 교란이 있는 액막의 경우에는 전자기유량계 방법이 탁월한 성능을 발휘할 것으로 예상된다.

(4) 전자기유량계를 이용하여 액상평균속도 측정과 동시에 테일러 기포의 위치 및 길이 정보를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Shercliff, J.A., 1954, "Relation Between the Velocity Profile and the Sensitivity of Electromagnetic

- Flowmeters," *J. Applied Physics*, Vol. 25, pp. 817~818
- (2) Bevir, M.K., 1970, "The Theory of Induced Voltage Electromagnetic Flowmeters," *J. Fluid Mech.*, Vol. 43, part 3, pp. 577~590.
- (3) Bernier, R.N. and Brennen, C.E., 1983, "Use of The Electromagnetic Flowmeter in a Two-Phase Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 9, No. 3, pp. 251~257.
- (4) Bernier, R., 1981, "Unsteady Two-Phase Flow Instrumentation and Measurement," Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- (5) Wyatt, D.G., 1986, "Electromagnetic Flowmeter Sensitivity with Two-Phase Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 12, No. 6, pp. 1009~1017.
- (6) Bevir, M.K., 1971, "The Predicted Effects of Red Blood Cells on Electromagnetic Flowmeter Sensitivity," *J. Physics D: Applied Physics*, Vol. 4, pp. 387~399.
- (7) Velt, I.D., Petrushaitis, V.I., Sprjgin, B.S., Krasilnikov, I.V., Mikhailov, Yu.V. and Tuleniov, V.R., 1982, "Correlation Technique for Flow Rate Measurement of Electroconductive Fluids and Two-Phase Media and Device for Its Implementation," Soviet Union Patent No. SU901829.
- (8) Krafft, R., 1993, "Electromagnetic Flowmeters in Multiphase Flows," Ph.D. Thesis, Cranfield Inst. of Technology.
- (9) Cha, J.E., Ahn, Y.C. and Kim, M.H., 2002, "Flow Measurement with an Electromagnetic Flowmeter in Two-Phase Bubbly and Slug Flow Regimes," *Flow measurement and Instrumentation*, accepted.
- (10) Goldsmith, H.L. and Mason, S.G., 1962, "The Movement of Single Large Bubbles in Closed Vertical Tubes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 14, pp. 52~58.
- (11) Kvernfold, O., Vindoy, V., Sontvedt, T., Saasen, A. and Selmen-Olsen, S., 1984, "Velocity Distribution in Horizontal Slug Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 10, pp. 441~457.
- (12) Nakoryakov, V.E., Kashinsky, O.N. and Kozmenko, B.K., 1986, "Experimental Study of Gas-Liquid Slug Flow in a Small-Diameter Vertical Pipe," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 12, No. 3, 337-355.
- (13) Nakoryakov, V.E., Kashinsky, O.N., Petukhov, A.V. and Gorelik, R.S., 1989, "Study of Local Hydrodynamic Characteristics of Upward Slug Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 7, pp. 560~566.
- (14) Mao, Z.S. and Dukler, A., 1989, "An Experimental Study of Gas-Liquid Slug Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 8, pp. 169~182.
- (15) DeJesus, J.D., Ahmad, W. and Kawaji, M., 1995, "Experimental Study of Flow Structure in Vertical Slug Flow," *Proc. 2nd Int. Conf. Multiphase Flow*, Kyoto, P9-51-P9-55.
- (16) Kawaji, M., DeJesus, J.M. and Tudsoe, G., 1997, "Investigation of Flow Structures in Vertical Slug Flow," *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 175, pp. 37~48.
- (17) Ahmad, W.R., DeJesus, J.M. and Kawaji, M., 1998, "Falling Film Hydrodynamics in Slug Flow," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 53, pp. 123~130.

- (18) DeJesus, J.M., 1997, "An Experimental and Numerical Investigation of Two-Phase Slug Flow in a Vertical Tube," Ph.D. Thesis, U. of Toronto, Canada.
- (19) Polonsky, S., Shemer, L. and Barnea, D., 1999, "The Relation Between the Taylor Bubble Motion and the Velocity Field Ahead of It," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 25, pp. 957~975.