

저주파 정현파 및 고주파 삼각파 여자법을 사용한 실시간 기포 및 슬러그류 측정용 전자기유량계

A Real-Time Measurement of Bubbly and Slug Flow Using Electromagnetic Flowmeter with Low Frequency Sinusoidal and High Frequency Triangular Excitations

안예찬, 차재은, 서경우, 김무환
포항공과대학교
경상북도 포항시 남구 효자동

요 약

2상 유동의 특성을 연구하기 위해 저주파 정현파를 이용한 전자기 유량계와 고주파 삼각파를 이용한 전자기 유량계가 개발되었다. 저주파 정현파를 이용한 전자기 유량계는 출력 형태가 전압형태이다. 이를 이용하여 기포류에서 슬러그류로의 천이를 검출하였다. 또한 유량계 출력, 액체유량, 기공율 사이의 실험적 관계가 기포류에서 단순이론식과 매우 잘 일치하는 결과를 보였다. 이로부터 단상구간 (j_f 측정용) 및 2상구간 (ΔU_{TP} 측정용) 에서의 두 전자기 유량계 출력을 이용하여 기포류에서의 기공율 측정이 가능하게 되었다. 한편 고주파 삼각파를 이용한 전자기 유량계의 출력형태는 전류형태이다. 이를 이용하여 비교적 정확한 액상 평균 속도를 실시간으로 측정하였다. 이와 동시에 테일러 기포의 위치 및 길이 정보를 얻을 수 있었다.

Abstract

In order to investigate the characteristics of electromagnetic flowmeter in two-phase flow, electromagnetic flowmeters with 5Hz sinusoidal and 240Hz triangular AC excitation were designed and manufactured. The sinusoidal flowmeter was a voltage type. It enabled us to detect transitions from bubbly to slug flow. The relation among its output, liquid flowrate and void fraction has a good agreement with the simple relation. Therefore the measurement of void fraction became possible by two electromagnetic flowmeters installed in the single-phase section (for the measurement of j_f) and in the two-phase section (for the measurement of U_{TP}). The triangular flowmeter was a current type. For two-phase slug flow, it 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.

1. 서론

전자기유량계는 Michael Faraday의 전자기유도현상 원리를 이용하는 것으로, 유동하는 전도성 유체의 유속에 수직으로 자기장이 주어지면, 유속과 자기장의 수직인

방향으로 이들의 세기에 비례하여 생성되는 유도기전력 (flow induced electromotive force)으로부터 액체의 평균 유속 및 유량을 측정하는 계측기이다. 전자기유량계는 기액 2상류 각 상간의 전기전도도 차이를 효과적으로 이용하여 기공율과 같은 2상 유동을 측정할 수 있으며, 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 2상류의 방사능 유체나 유독성 유체, 액체금속 등의 유량 측정에 이용될 수 있다. 또한 테일러 기포(Taylor bubble) 전후에서 액상 속도 방향이 역전되는 매우 복잡한 수직 슬러그류에서 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 유량신호이외에 일종의 전기적 노이즈인 자체유도기전력(transformer electromotive force) 신호가 생성되고 이는 유량신호와 중첩되어 유량 측정을 어렵게 만든다. 따라서 자체유도기전력은 자기장의 일차미분 값에 비례하고 유동에 의한 유도기전력은 자기장에 직접 비례함을 이용하여, 자체유도기전력을 제거하려는 많은 시도가 있어 왔다. 그러나 이 시도들은 단상 액체 유량 측정을 그 목표로 하고 있다. 2상 유동은 그 특성이 신속히 변화하고 자체유도기전력이 잡음이 아니라 유용한 정보 즉 전극을 포함한 관 단면에 대한 유동의 대칭정도를 나타내기 때문에 새로운 유량계 디자인이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는, 우선 일차원적 해석으로 전자기유량계의 검출부(detector)를 설계 제작하되, 균일하여 유동의 비대칭에 의한 자체유도기전력이 없는 기포류에서는 저주파 정현파를 사용하여 기공율을 측정하는데 이용하였다. 저주파 정현파를 사용하면 전자석 전력공급선과 신호선 사이의 저항 및 용량 결합에 의한 전력누설잡음도 제거할 수 있는 장점이 있다. 또한 슬러그류에서는 고주파 (240Hz) 여자법을 이용하여 빠른 2상 유동의 특성을 효과적으로 검출할 수 있도록 하였고, 주파수 증가에 따라 심각해지는 전력누설잡음에 대한 대책으로 전력누설잡음에 강한 전류형식의 유량계를 개발하였으며, 삼각파 여자법을 이용하여 슬러그 액막 유속뿐 아니라 테일러 기포의 전극에 대한 상대적 위치도 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 한편 잡음제거 및 신호분리에 중점을 둔 신호처리부(signal processor)를 설계하여 유량계 출력신호에 따른 유동의 특성을 고속 CCD 카메라와 동기시켜 분석할 수 있도록 하였다.

2. 기존 연구

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

Bevir⁽²⁾는 전자기유량계식인 식(1)에 가상전류j를 도입하여 Shercliff의 가중함수 개념을 확장한 가중벡터 $W=B \times j$ 를 고안하면서 식(2)를 얻었다.

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

$$\Delta U = \iiint_t \mathbf{v} \cdot \mathbf{W} dt \quad (2)$$

한편 Bevir는 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.

$$\bar{W}'(r) = \frac{1}{2p} \int_0^{2p} \int_{-\infty}^{\infty} W_z dz dq = \text{constant} \quad (3)$$

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 $\bar{W}'$ 가 $4B/pd$ 가 되어 식(4)와 같이 된다.

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

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

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

이 관계식은 기공율 α 가 증가할수록 2상류 상황에서 두 전극사이의 전위차 ΔU_{TP} 가 같은 액상유량이 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 Bernier와 Brennen⁽³⁾의 단순관계식은 기상의 분포에서 균일성과 등방성이 존재하는 경우에만 유효함을 증명하였으며, 이 결과는 Bevir⁽⁶⁾에 의해서 이미 연구된 바 있다.

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

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

3. 개발된 전자기유량계

3.1개요

본 연구에서 개발한 전압형식 전자기유량계는 유도기전력으로 인해 두 전극사이에 발생한 전압차를 측정하는 것이다. 본 연구에서 단상 및 기포류에서의 전압형식 전자기유량계 보정곡선을 제시하였고 기포류에서 슬러그류로의 유동패턴 천이 현상을 측정하였다. 주파수의 증가에 따라 심각해지는 전력 누설 잡음으로 인해 전압형식 전자기 유량계에 인가해 주는 주파수를 저주파로 사용하였고, 기포류는 유동의 비대칭에 의한 자체유도기전력이 없기 때문에 정현파를 사용하였다. 전력누설잡음은 전자석 전원공급선과 유량계 신호선 사이의 저항 및 용량결합에 의해 전자석 전력이 신호선으로 누설되면서 발생하는 잡음이다.

두 번째로 기존 방식과는 달리 기전력으로 인해 발생한 전류를 측정하는 방식을 채택하여 슬러그류 측정에 이용하였다. 전류형식의 유량계는 전력누설잡음에 강하여 고주파로 갈수록 문제가 심각해지는 전력누설잡음에 의한 신호파형 왜곡을 줄일

수 있다. 또 슬러그류에서는 유동이 빨리 변하여 고주파 여자법을 사용하였으며 유동의 전극에 대한 비대칭이 실시간으로 바뀌고 이로 인한 자체유도기전력이 유도기전력에 혼합되어 발생하기 때문에 삼각파 여자법을 사용하여 두 신호를 분리하였다.

개발된 전자기 유량계 중 전압 형식의 전자기 유량계 계략도는 Fig.1(a)와 같으며, 전류 형식의 전자기 유량계 계략도는 Fig.1(b)와 같다.

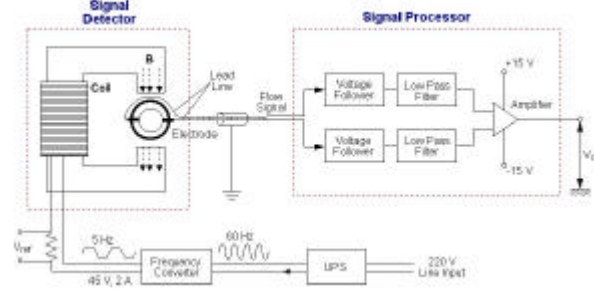


Fig.1 (a) The schematic diagram of electromagnetic flowmeter developed (Voltage type)

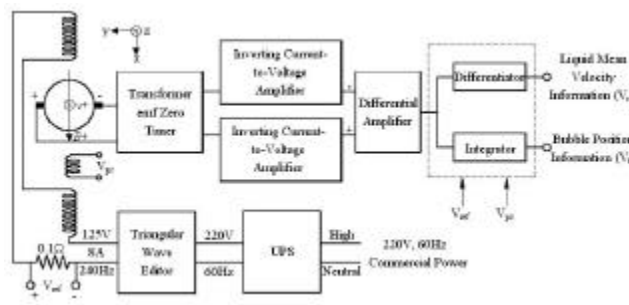


Fig.1(b) The schematic diagram of electromagnetic flowmeter developed (Current type)

3.1.1유도기전력(flow induced emf)

균일한 2 상 유동시에는 전자기 유량계 식인 식(1)로부터 전압형식의 유량계를 위한 경계조건을 이용하면 식(5)가 유도된다. 여기에서, 평균기공율(average void fraction)은 식(6)과 전자기 유량계 측정부에 설치한 두 압력탭 사이의 압력 강하를 이용하여 계산할 수 있다^(9,10).

$$\frac{\Delta P_h}{\Delta Z} = r_g a g + r_f (1-a) g \approx r_f (1-a) g,$$

$$a = 1 - \frac{\Delta P_h}{r_f g \Delta Z} \quad (6)$$

또한 식(1)에서 전류형식의 유량계를 위한 경계조건을 이용하면 식(7)을 유도할 수 있다.

$$i = \frac{\iiint \mathbf{v} \cdot \mathbf{W} dt}{\Delta U^v} \quad (7)$$

한편 균일한 횡자기장, 점전극, 선형 축대칭 유동하에서 식(7)은 단상 액체유동의 경우에 식(8)로 환상류 및 기포류(유체가 균일 등방성으로 가정될 수 있을 경우)의 경우에 식(9)로 바뀐다.

$$i_{SP} = \frac{4BQ}{pd\Delta U_{SP}^v} = \frac{Bv_m d}{\Delta U_{SP}^v} \quad (8)$$

$$i_{TP} = \frac{4BQ_L}{pd(1-a)\Delta U_{TP}^v} = \frac{Bv_{Lm} d}{\Delta U_{TP}^v} \quad (9)$$

또 긴 테일러 기포를 가진 슬러그류는 전극 주변의 국소부분에서 환상류로 가정할 수 있으므로 이 경우에도 식(9)가 유효하다고 가정하는 것은 큰 무리가 없다. 따라서 긴 테일러 기포를 가진 슬러그류에서 유량계 출력전류 i_{TP} 가 식(10)과 같은 관계를 가지게 되고 유동패턴함수 f 를 정의할 수 있게 된다. 유동패턴함수는 액막두께 같은 유동형태에만 의존하는 함수이며 실험적, 수치해석 방법을 통해서 구할 수 있다.

$$i_{TP} = \frac{Bv_{Lm} d}{\Delta U_{TP}^v} = \frac{i_{SP}}{v_m} \frac{\Delta U_{SP}^v}{\Delta U_{TP}^v} v_{Lm} \equiv \frac{i_{SP}}{v_m} \frac{1}{f} v_{Lm} \quad (10)$$

3.1.2 자체유도기전력(transformer emf)

자체유도기전력은 전자석 코일과, 두 전극을 포함하는 임의의 폐회로선(closed contour C)이 변압기의 1 차 및 2 차 코일처럼 작동하여 발생하는 기전력으로서 발생하는 원리를 따라 “Transformer Electromotive Force”로 흔히 불리운다. 전자석 코일에 의해 시간에 따라 변하는 자기장이 발생하면 Faraday 법칙, 식(11)이 적용된다.

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (11)$$

3.2 구성

3.2.1 전원공급부

전압형 전자기 유량계의 전원공급부는 정현파 교류전원에 의해 구동되며, 그 교류전원은 UPS(무정전 공급장치)와 주파수 변환기(frequency converter)를 거쳐 일정한 주파수(5Hz)와 전류값(2A)으로 제어된다(Fig.1(a)). 이로부터 630Gauss(rms)의 정현파 자기장이 만들어진다. 자기장 파형을 검출하기 위하여 0.1Ohm, 10W 의 저항을 전자석 코일과 직렬로 연결하고 양단의 전압(V_{ref})을 측정하였다.

전류형 전자기 유량계의 전원공급부는 Fig.1(b)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 0.1Ohm, 10W 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(b)에 점선으로 표시된 신호후처리부에서 조정신호(control signal)로 사용된다.

3.2.2 검출부(detector)

전압형 전자기 유량계와 전류형 전자기 유량계의 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 설치

하였다. 극간 간격은 40mm, 극 단면은 50mmx50mm 이다.

전자석에서 발생하는 자기장의 세기를 F.W.Bell 사의 가우스미터를 이용하여 측정하였는데 전압형 전자기 유량계는 Fig.2(a)와 같고 전류형 전자기 유량계는 Fig.2(b)와 같으며, 이는 내경 1" 유로에 대하여 균일한 자기장으로 가정할 수 있다.

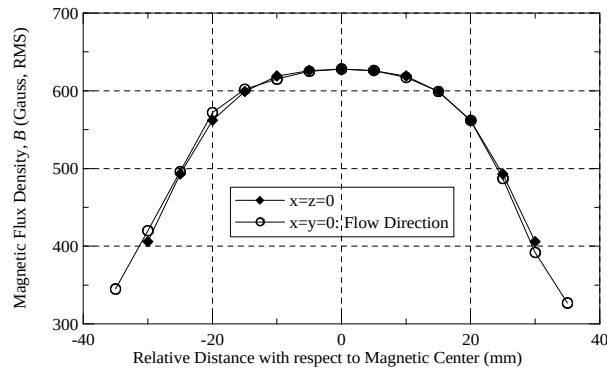


Fig. 2(a) The distribution of magnetic flux density (Voltage type)

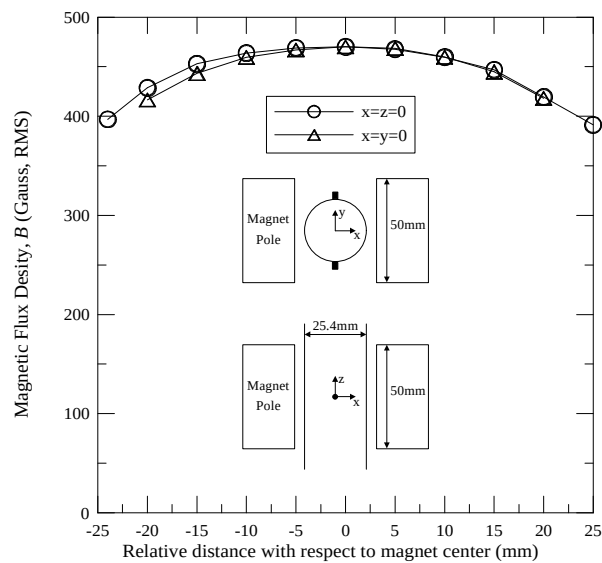


Fig.2(b) The distribution of magnetic flux density (Current type)

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 대칭자기장을 설계하는 것은 실제로 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 전압형 전자기

유량계와 전류형 전자기 유량계 모두 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 발생하는 자체유도기전력과 비대칭 자기장에 의하여 C2 에서 발생하는 자체유도기전력을 가변저항을 조절하여 상쇄시킨다.

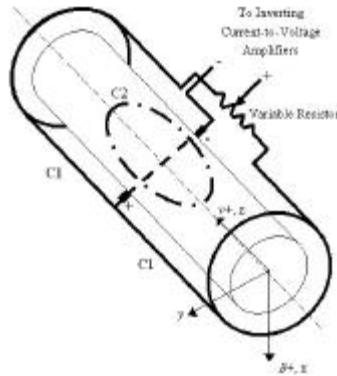


Fig.3 Transformer emf zero tuner

3.2.4 신호처리부

전자기유량계를 사용하여 유량을 측정하는데 있어 가장 어려운 점 중의 하나는 유량신호가 1 mV 정도의 크기로서 시간에 따라 변하는 자기장에 의해 유도된 자체유도기전력으로 인한 잡음 및 전자석에 전원을 공급하는 전원선과 전극으로부터의 신호선 사이에 존재하는 저항 및 용량 결합에 의한 전력누설잡음과 그 외의 잡음들에 비해 너무 작기 때문이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 전압형 전자기 유량계에 신호처리부를 설계·제작하였다. 신호처리부는 입력단으로서 큰 입력저항값을 갖도록 한 전압 폴러워(voltage follower), 다양한 전기적 노이즈를 제거하기 위한 필터(filter) 그리고 자료획득장치가 쉽게 자료를 처리할 수 있도록 신호를 400 배 증폭하는 증폭기(amplifier)로 구성된다. 한편 자체유도기전력 잡음을 제거하기 위한 Fig.3 과 같은 자체유도기전력 상쇄회로는 전압 폴러워에 신호가 입력되기 전에 설치되었다. 또 저주파수의 전원으로 전자석을 여자시켜 저항 및 용량 결합에 의한 잡음도 최대한 줄이도록 고안하였다. 이러한 과정을 거쳐 신호대 잡음비를 좋게 하였고 자체유도기전력을 제거하기 위한 영점조절(zero tuning)도 가능하였다^(11,12).

Fig.1(a), (b)에서 볼 수 있듯이 1Ω, 10W 의 저항을 전자석 회로에 직렬연결하고 저항 양단의 전압을 측정함으로써 참조전압 (V_{ref})을 획득하였다. 이러한 참조전압을 이용하면 유량신호인 유도기전력과 다른 잡음의 구분이 가능하고, 여자전류와 자기장의 크기 및 위상을 알 수 있다.

슬러그 유동 분석을 위한 전자기 유량계는 전술한 바와 같이, 고주파로 갈수록 문제가 심각해지는 전력누설잡음에 의한 신호파형 왜곡을 줄이기 위하여 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(b)에 점선으로 표시된 신호후처리부로 입력된다. 신호후처리부에 입력

되는 파형은 자기장에 비례하는 유도기전력(V_m)과 자기장의 일차미분에 비례하는 2상유동 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 대응된다.

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

(B) 위치에서는 유동의 비대칭성(V_t)이 음의 방향으로 최대이고 (D) 위치에서는 유동의 비대칭성(V_t)이 양의 방향으로 최대이다. 또 슬러그류에서 (B), (C), (D)로 갈수록 유속이 음의 방향으로 증가하므로 V_m 신호의 기울기가 증가한다.

신호후처리부는 V_m+V_t 파형을 V_m 과 V_t 로 분리하는 역할을 한다. 신호후처리부내의 미분기를 이용하여 V_m 의 기울기를 측정하면 액상의 평균유속 정보를, 적분기를 이용하여 V_t 를 반주기마다 적분하면 테일러 기포 위치정보를 얻을 수 있다.

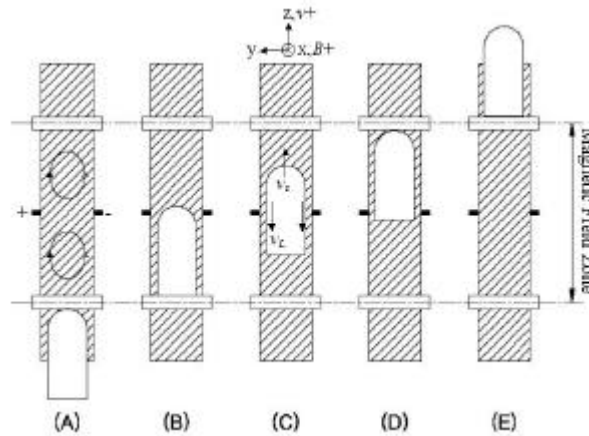


Fig.4 (a) The position of a Taylor bubble

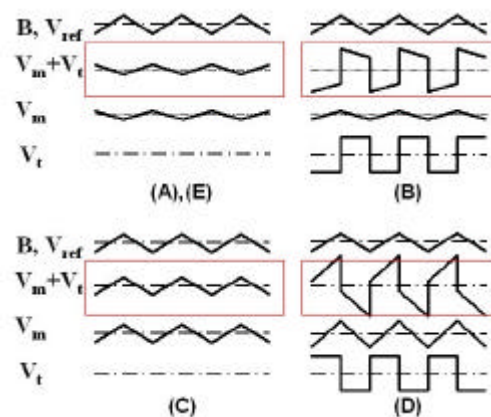


Fig.4 (b) The signals corresponding to each position

3.2.5 2상류 실험장치

전자기유량계를 2 상유동 상황에서 테스트하기 위하여 Fig.5 와 같은 2 상류 루프를 제작하였다. 내경 1 인치의 수직 상향의 물-공기 2 상유동 실험장치의 하단에 기

포발생기를 설치하고, 내경의 45 배 위치에 전자기 유량계를 설치하였다. 전자기 유량계로 유입되는 액상 및 기상의 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.

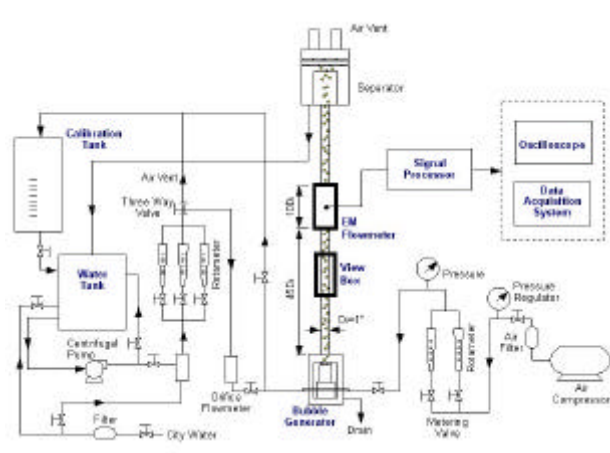


Fig.5 Schematic diagram of two-phase flow experimental facility

4. 실험결과

4.1 단상실험결과

Fig.6(a) (b)는 단상 액체에서의 전자기유량계의 보정곡선이다. 액상의 평균속도는 기 보정된 오리피스미터를 사용하여 획득하였고 본 연구에서 개발된 전압형 전자기 유량계의 단상에서의 불확실도는 실시간 측정시 $\pm 1.5\%$ (percentage for full scale), 전류형 전자기유량계에서는 $\pm 2.24\%$ (percentage for full scale)였다. 한편 단상에서의 측정결과는 2 상에서의 결과를 얻기 위하여 식(5)와 식(9)에 대입되었다.

4.2 2상실험결과

4.2.1 기포류 측정

본 실험에서는 상온의 물-공기 2 상유동을 사용하였다. Fig.7 은 기체의 겉보기 속도 j_g 에 대한 유량계 출력의 RMS 값의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 기상의 겉보기 속도가 낮은 영역인 기포류에서는 유량계의 출력이 선형적으로 증가하나, 겉보기 속도가 증가하여 슬러그 영역으로 천이함에 따라 선형성이 무너짐을 볼 수 있다. 이러한 천이는 기포류에서 기포가 응집되어 슬러그 기포가 형성되기 시작하는 지점부터 서서히 진행되는데, 이러한 경향변화는 에디전류의 비대칭으로 인한 자체유도기전력의 유입 때문이다. 따라서 유량계 출력의 RMS 값의 경향의 변화로부터 유동양식의 천이를 판별할 수도 있음을 알 수 있다.

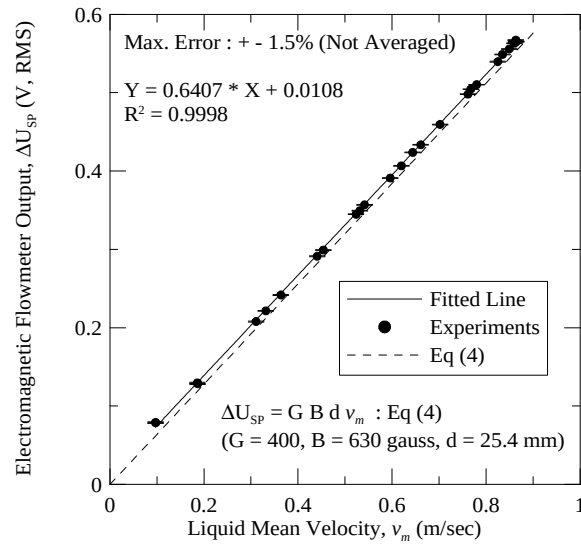


Fig.6(a) Single-phase calibration (Voltage type)

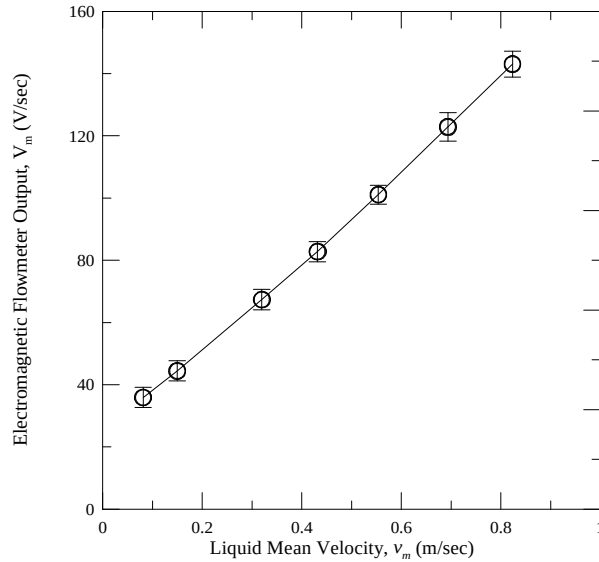


Fig.6(b) Single-phase calibration (Current type)

Fig.8은 2상유동에서의 출력값을 액체 겉보기 속도 j_f 로 노말라이즈한 값과 압력 강하를 이용하여 식(6)으로부터 구한 기공율과의 관계를 보여주는 그림이다. 이 그림에서의 실선은 식(5)에 의하여 실험 조건에 맞추어 구했으며, 측정된 데이터와 단순관계식 (식(5))은 기공율 0.3 이하 즉 기포류에서 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 추후에 단상구간과 2상구간에 전자기유량계를 각각 설치하여 그들의 출력을 측정하면 j_f 와 ΔU_{TP} 를 알 수 있고 여기에 Fig.8을 이용하면 기포류에서의 기공율을 측정할 수 있게 된다.

이처럼 전압형 전자기 유량계는 기포류에서 기공율을 정확하게 측정을 할 수 있으며, 또한 기포류에서 슬러그류로의 천이 과정도 잘 보여 주고 있음을 알 수 있다.

4.2.2 슬러그류 측정

Fig.9 (a)는 정지된 액상 내에 테일러 기포가 상승할 때 액막평균속도 및 테일러 기포위치 정보의 변화를 테일러 기포 전단끝과 전극사이의 거리에 대하여 나타낸 그림이다.

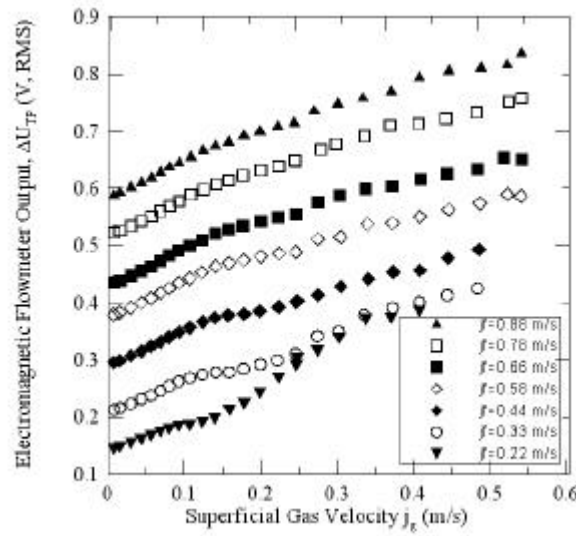


Fig. 7 Flow-pattern transition with gas volumetric flux j_g

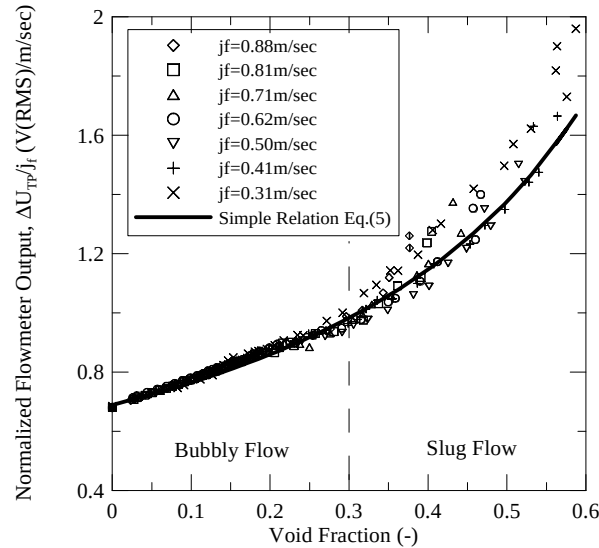


Fig. 8 Calibration for Two-phase Bubbly Flow

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. 이 때 기포 길이 및 위치 그리고 속도는 고속 CCD 카메라를 이용하여 측정하였는데 세 경우 모두 기포 속도가 이론식 $v_s = 0.35 \text{ } gd$ (0.175 m/sec)와 잘 일치하였다.

Fig.9 (a)에서 3 개의 굵기가 다른 회색선은 테일러 기포의 위치변화를 보여주고 있는데 “0”에서 출발하여 “0”로 끝나고 있고 최소값은 기포 전단끝이 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 있는데 이는 테일러 기포 모양이 반구모양으로 매우 일정하기 때문이다. 또 최소값과 최대값이 발생한 시간을 유량계로부터 알 수 있으므로 매우 정확한 기포 상승속도 이론식을 이용하면 기포 길이를 측정할 수 있게 된다.

3 개의 굵기가 다른 흑색선은 액막평균속도 변화를 보여주고 있는데 식(10)에서

정의된 유동패턴함수 f 를 “1”로 가정하고 그린 그래프이다. 유동패턴함수 f 를 엄밀히 고려한 연구는 현재 진행 중이기 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. 실험결과와 비교를 위하여 현재까지 존재하는 두 결과인 광변색 염료 방법(photochromic dye method)을 이용한 DeJesus⁽¹³⁾의 결과와 PIV(particle image velocimetry) 기술을 이용한 Polonsky⁽¹⁴⁾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 사용한 다는 것 그리고 액막이 심하게 교란되는 경우에도 정확한 평균유속을 측정할 수 있다는 것이다.

Fig.9 (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.

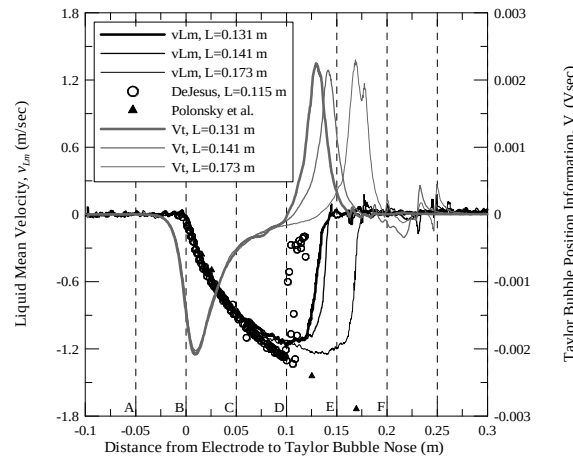


Fig.9 (a) Liquid mean velocity and Taylor bubble position information

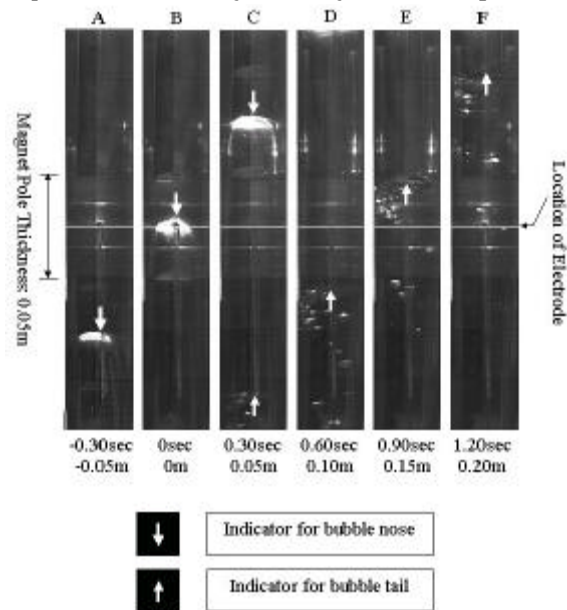


Fig.9 (b) Photos taken by high speed CCD camera with the time and the distance from electrode to Taylor bubble nose for the bubble of $L=0.131\text{m}$

5. 결론

본 연구를 통하여 개발된 전압 형식의 전자기 유량계를 사용하여 단상 및 기포류에서의 유동측정 기술을 다음과 같이 확립하였다.

1) 저주파(5Hz) 정현파 전압형식 전자기 유량계는 단상(불확실도 $\pm 1.5\%$ (percentage for full scale)) 및 기포류 조건하에서 탁월한 유량측정 성능을 보였다.

2) 액체의 겉보기 속도에 따른 유량계 출력의 RMS 값에 의해 기포류에서 슬러그류로의 천이 과정을 검출 할 수 있었다.

3) 기포류에서의 단순 관계식과 단상 및 2 상 구간에 설치되는 2 개의 전자기 유량계를 이용하면 기포류에서 기공율을 매우 정확하게 측정할 수 있다.

본 연구를 통하여 개발된 전류 형식의 전자기 유량계를 사용하여 단상 및 슬러그류에서의 유동측정 기술을 다음과 같이 확립하였다.

4) 고주파(240Hz) 삼각파를 전류형식 전자기유량계를 잡음 제거 기술이 내재된 신호처리부와 함께 개발하였다. 단상에서의 불확실도는 $\pm 2.24\%$ (percentage for full scale)였다.

5) 2 상 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 액막 경우에는 전자기 유량계 방법이 탁월한 성능을 발휘할 것으로 예상된다.

6) 전자기 유량계를 이용하여 액상평균속도 측정과 동시에 테일러 기포의 위치 및 길이 정보를 얻을 수 있었다.

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
- j_f** : 액체의 겉보기 속도
- ΔP_h** : 수두차
- Q, Q_L** : 단상 및 2 상에서의 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
 $\mathbf{v}$: 속도벡터
 v_z, v_s : $\mathbf{v}$ 의 z 방향 성분, 테일러 기포속도
 v_m, v_{Lm} : 단상 및 2 상에서의 액상평균속도
 $\mathbf{W}$: 가중벡터 ($\mathbf{B} \times \mathbf{j}$)
 W_z : $\mathbf{W}$ 의 z 방향 성분
 $\overline{W}$: 식(3)에 정의된 기호
 a : 기공율
 t : 적분부피
 하첨자
 SP : 단상
 TP : 2 상

후 기

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

참고문헌

- (1) Shercliff, J.A., Relation between the velocity profile and the sensitivity of electromagnetic flowmeters, J. Applied Physics, 1954, **25**, 817-818.
- (2) Bevir, M.K., The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters, J. Fluid Mech., 1970, **43**, part 3, 577-590.
- (3) Bernier, R.N. and Brennen, C.E., Use of the electromagnetic flowmeter in a two-phase flow, Int. J. Multiphase Flow, 1983, **9**, No. 3, 251-257.
- (4) Bernier, R., Unsteady two-phase flow instrumentation and measurement, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1981.
- (5) Wyatt, D.G., Electromagnetic flowmeter sensitivity with two-phase flow, Int. J. Multiphase Flow, 1986, **12**, No. 6, 1009-1017.
- (6) Bevir, M.K., The Predicted effects of red blood cells on electromagnetic flowmeter sensitivity, J. Physics D: Applied Physics, 1971, **4**, 387-399.
- (7) Velt, I.D., Petrushaitis, V.I., Sprjgin, B.S., Krasilnikov, I.V., Mikhailov, Yu.V. and Tuleninov, V.R., Correlation technique for flow rate measurement of electroconductive fluids and two-phase media and device for its implementation (Patent No. 30.01.82)
- (8) Krafft, R., Electromagnetic flowmeters in multiphase flows, Ph.D. Thesis, Cranfield Inst. of Technology, 1993.
- (9) Lockhart R.W. and Martinelli R.C., Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes, Chemical Engineering Progress, 1949, **45**, No.1, 39-48.
- (10) Georges E. Smissaert, Two-component two-phase flow parameters for low circulation rates,

ANL-6755, July, 1963.

- (11) Watanabe, M. Noise compensation in electromagnetic flowmeter, US Patent 4,019,385, 1977.
- (12) James, W.G., An induction flowmeter design suitable for radioactive liquids, The Review of Scientific Instruments, 1951, **22**, No.12, 989-1002.
- (13) DeJesus, J.M., "An experimental and numerical investigation of two-phase slug flow in a vertical tube", Ph.D. Thesis, U. of Toronto, Canada, 1997.
- (14) Polonsky, S., Shemer, L. and Barnea, D., "The relation between the Taylor bubble motion and the velocity field ahead of it", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 25, 957-975, 1999.