

전자기유량계를 이용한 기포 및 슬러그 유동 측정방법 연구

차재은[†] · 안예찬* · 서경우** · 김무환***

(2002년 4월 20일 접수, 2002년 9월 30일 심사완료)

Flow Measurement in Bubbly and Slug Flow Regimes Using The Electromagnetic Flowmeter Developed

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

Key Words : Electromagnetic Flowmeter(전자기유량계), Void Fraction(기공률), 2상유동(Two-Phase Flow), Flow-Pattern Recognition(유동양식 인식)

Abstract

In order to investigate the characteristics of electromagnetic flowmeter in two-phase flow, an AC electromagnetic flowmeter was designed and manufactured. In various flow conditions, the signals and noises from the flowmeter were obtained and analyzed by comparison with the observed flow patterns with a high speed CCD camera. The experiment with the void simulators in which rod shaped non-conducting material was used was carried out to investigate the effect of the bubble position and the void fraction on the flowmeter. Based on the results from the void simulator, two-phase flow experiments encompassed from bubbly to slug flow regime were conducted. The simple relation $\Delta U_{TP} = \Delta U_{SP}/(1-\alpha)$ was verified with measurements of the potential difference and the void fraction. Due to the lack of homogeneity in a real two-phase flow, the discrepancy between the relation and the present measurement was slightly increased with void fraction and also liquid volumetric flux j_f . Whereas there is no difference in the shape of the raw signal between single-phase flow and bubbly flow, the signal amplitude for bubbly flow is higher than that for single-phase flow at the same water flow rate, since the passage area of the water flow is reduced. In the case of slug flow, the phase and the amplitude of the flowmeter output show dramatically the flow characteristics around each slug bubble and the position of a slug bubble itself. Therefore, the electromagnetic flowmeter shows a good possibility of being useful for identifying the flow regimes.

기호설명

B : 자속밀도 벡터 [Gauss]
d : 유량계 관의 내경 [m]
i : 입력 전류 [A]
j : 가상전류밀도(virtual current density) [A/m²]
j : 겉보기 속도 [m/s]
N : 코일 감은 수 [turn]
L_g : 자석의 극간 거리 [mm]

ΔP : 전체압력강하 [Pa]
ΔP_h : 수두차 [Pa]
ΔP_f : 마찰압력강하 [Pa]
ΔP_{ac} : 가속압력강하 [Pa]
Q : 체적유량 [m³/sec, lpm]
U : 전위 [Volt]
 $\angle U_{AB}$: 전극 사이의 전위차 [Volt]
v : 속도 벡터 [m/s]
v_m : 평균속도 [m/s]
W : 가중 벡터(weight vector)
W : 질량유동율 [kg/s]
X_{tt} : 로커트 - 마티넬리 변수 (Lockhart-Martinelli parameter)
 ϕ^2 : 2상유동배수(two-phase multiplier)
α : 기공률
τ : 적분 체적
μ : 자기 투자율 [Tesla-m /A]

[†] 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : jecha@postech.ac.kr

TEL : (054)279-5551 FAX : (054)279-3199

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

** 포항공과대학교 대학원 환경공학부

*** 포항공과대학교 기계공학과

하첨자

- f : 액상(liquid phase)
 g : 기상(gas phase)
 L : 액상
 TP : 2상유동(two-phase flow)
 SP : 단상유동(single-phase flow)

1. 서론

핵발전소를 포함한 파워플랜트 및 냉동·공조기의 성능향상과 안전성 확보를 위하여 2상유동(two-phase flow)의 보다 정확한 기술이 요구된다. 일반적으로 전자기유량계를 사용하여 2상유동의 조건 하에서 액상의 체적유량(volume flowrate)과 기공률(void fraction)을 동시에 측정하는 것은 쉽지가 않다. 전자기유량계는 전도성 유체가 자기장(magnetic field)을 가로질러 흘러갈 때 자기장과 유동방향에 수직인 두 전극(electrode) 사이에 유도되는 전위차(electric potential difference)를 검출하는 측정 기기이다. 지난 40여년간 전자기유량계는 단상(single phase)에서 액체의 평균 속도를 정확히 측정해 왔으며, 현재 유량계 시장의 20% 정도를 차지하고 있다. 전자기유량계는 압력 손실이 거의 없고 관내 삽입물이 없어 유동 교란이 적고, 응답성이 빠르며 두 상간의 큰 전기전도도 차이를 효율적으로 이용할 수 있어 2상유동 측정에 있어 전자기유량계의 응용은 지속적으로 고려되어왔다. 그러나 비전도상의 영향으로 불확실성이 존재하므로 2상유동 하에서의 응용은 어려운 점이 있어 왔다.

일반적으로 상용 전자기유량계는 정확도를 높이기 위하여 응답성을 희생하고, 기술 보안을 위하여 블랙박스(black box)처럼 디자인되어 있으므로 2상유동을 측정하기에는 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 잡음과 유량 신호들을 처리할 수 있도록 정현파(sine wave) 교류형 전자기유량계를 그 신호처리부를 포함하여 직접 설계·제작하였다.

직류 전자기유량계는 잘 알려진 바와 같이 물속에서 분극현상(polarization phenomena)을 일으키게 되므로, 본 연구에서는 전자석을 교류 전류를 사용하여 가진시켰다. 그러나 교류 전자기유량계의 경우 시간에 따라 변화하는 자기장 때문에 자체유도기전력(transformer emf)이 발생한다. 이 기전력이 유량에 비례하는 유도기전력(motional emf) 신호에 혼입되어 유량정보를 파악하기가 매우 어렵다. 자체유도기전력은 자기장에 대해 90° 위상

차가 있고 유도기전력은 자기장과 같은 위상을 가지고 있으므로 적절한 신호처리 회로를 이용하여 분리할 수 있는 가능성이 있다. 따라서 대부분의 전자기유량계 연구가 자체유도기전력과 유도기전력을 분리하는데 집중되어 있다. 한편 근래에는 저주파 여자법과 비정현파를 이용한 여자방식(펄스직류여자법, 복주파수여자법)이 교류 전자기유량계의 단점을 극복하고자 사용되어지고 있다⁽¹⁾.

본 연구에서는 물과 같이 전기전도도가 낮은 유체의 유량을 측정하기 위하여 저주파여자법을 이용한 교류 전자기유량계를 설계·제작하였다. 본 유량계의 정확도를 파악하기 위하여 단상의 물에서 유량계를 교정하여 정확도를 확보하였다. 그리고 이것을 이용하여 수직상승관에서 물-공기의 2상유동 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 기포류에서 슬러그류까지의 영역에 대하여 물-공기의 2상유동 조건하에서 기공률과 전자기유량계의 신호의 특성을 파악하였다. 전자기유량계의 여러 잡음과 신호들에 대한 2상유동의 영향을 관찰하기 위하여 여러가지 유동양식에서 고속카메라와 신호를 동기시켜 관찰하였다 또한 기포모사체(void simulator)를 이용하여 기포의 위치 및 기공률이 유량계 출력에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 기존연구

전도성 유체와 자기장의 상호작용에 관한 실험적 연구의 기원은 1832년 Faraday가 지구 자기장과 템즈강(The Thames) 밑에 설치한 전극을 사용하여 템즈강의 유량을 측정하고자 하는 시도였다.

Shercliff⁽²⁾는 액체금속(liquid metal)의 유량을 측정하고자 전자기유량계 이론을 체계적으로 유도·정리하였다. 또한 Shercliff는 유로 단면에서의 유속분포가 유량신호에 미치는 영향을 가중함수(weight function) 개념을 도입하여 표현하였으며, 가중함수를 사용하여 균일한 자기장과 한 쌍의 점전극(point electrode)을 가진 유량계에 대하여 선형 축대칭 유속분포를 가지는 경우에 두 전극간의 전위차(ΔU)는 단면에 대한 평균 유속(v_m), 자기장(B), 관경(d)에 비례하여 $\Delta U = Bv_m d$ 이 성립함을 보였다.

Bevir⁽³⁾는 가상전류(virtual current) j 의 개념을 사용하여 가중함수 개념을 3차원으로 확대한 가중벡터(weight vector) $\mathbf{W} = \mathbf{B} \times \mathbf{j}$ 를 도입하였다. 이로부터 비압축성 유체에서 유량계가 이상적 유량계(ideal flowmeter, 출력이 속도분포에 관계없이 유량에만 비례하는 유량계로서, 유량계 설계자가 궁극

적으로 얻고자 하는 목표)가 되기 위한 필요충분 조건이 $\text{curl } \mathbf{W} = 0$ 이며, 몇몇 더 제한적인 유동형태에 있어서도 \mathbf{W} 와 관련된 적절한 조건이 존재함을 보였다.

Hori, Kobori 및 Ouchi⁽⁴⁾는 수은 또는 물에서 두 개의 전자기유량계를 이용하여 여러 가지 2상유동 연구를 수행하였다. 그들은 직경이 다른 다수의 플라스틱 막대들을 유로관에 삽입하여 2상유동을 모사하였고, 이로부터 막대의 위치 및 직경이 출력에 미치는 영향을 조사하였다. 그러나 이들이 출력에 미치는 분명한 인자들을 찾을 수는 없었다. Hemp⁽⁵⁾는 정현파 교류 전자석을 이용하는 전자기유량계의 에디전류(eddy currents)와 변압기 신호(transformer signals)를 계산하는 방법을 연구하였다. 그는 에디전류에 의한 전기장의 축방향 성분 E_z 과 평편한 유동(flat profile flow)에 의해 유도되는 전위 포텐셜(potential) U 사이의 관계를 제안하였다. 그는 이로부터 자기장 구성(magnetic field shaping)에 의해서는 기초적 오차(base-line error)를 제거할 방법이 없음을 증명하였다. 그는 전자기유량계에서 감도 측정(sensitivity measurement)과 자체 보정(self-calibration)을 위해 새로운 기법에 대한 기초적인 토대를 마련하였다. 최근 그는 이러한 관계를 활용하여 대형 전자기유량계를 저비용으로 교정하는 기법을 제안하였다⁽⁶⁾.

Bernier과 Brennen⁽⁷⁾은 2상유동에서 유량계 실험을 수행하여 균일한 2상유동에서는 두 전극간의 전위차가 $\Delta U_{TP} = \Delta U_{SP}/(1-\alpha)$ 가 됨을 밝혔다. 이 단순 관계식(simple relation)에서 ΔU_{SP} 는 2상유동 상황에서 흐르는 액체유량과 같은 양이 단상액체로 흐를 때에 발생하는 전위차이며 α 는 비전도상의 기공률이다. Bernier과 Brennen은 $\Delta U_{TP} = \Delta U_{SP}/(1-\alpha)$ 이 2상유동의 유동양식과 전기전도도의 균일성과 상관없이 유효하다고 결론 내렸다. 한편 Bernier⁽⁸⁾는 동심 환상류에서 엄밀해(exact solution)에 대하여 연구한 바 있고 Wyatt⁽⁹⁾는 그 결과를 증명하였다.

한편 Wyatt⁽⁹⁾는 Bernier 과 Brennen⁽⁷⁾에 의한 단순 관계식이 분산된 상이 균일하게 분포되고 그 크기가 작으며 방향성이 없는 입자이어서 거시적으로 균일(homogeneous)하고 등방성(isotropic) 부유물로 간주될 수 있을 때에만 유효함을 밝혔다. 다시 말해서 등방성을 가지지만 균일하지 않은 경우 또는 균일하지만 비등방성을 가진 부유물에 대해서는 단순관계식 $\Delta U_{TP} = \Delta U_{SP}/(1-\alpha)$ 가 일반적으로 성립하지 않음을 보였다. 이 결과는 Bevir⁽¹⁰⁾에 의해 이미 언급된 바도 있다.

Velt⁽¹¹⁾는 교류 자기장에 의해 유체 내에 유도된

에디전류에 관심을 기울였는데 비전도 입자가 자기장을 통과해서 흐를 때 전극을 중심으로 한 에디전류들의 균형이 깨어져, 그 결과가 두 전극 사이에서 발생하는 신호에 영향을 미친다고 밝혔다.

Murakami, Maruo, 및 Yoshiki⁽¹²⁾는 새로 개발한 유량계를 사용하여 2상유동의 기공률을 측정하였다. 그들은 전자기유량계 출력을 사용하여 Wyatt에 의하여 계산되는 기공률을 수두차로부터 계산된 기공률과 비교함으로써 기포류 및 천-난류 영역(churn-turbulent flow)의 기공률 측정을 위하여 전자기유량계를 사용할 수 있는 가능성을 실험적으로 제시하였다.

Krafft⁽¹³⁾는 연속상 내에 존재하는 비연속상이 유량계의 출력에 미치는 영향을 유도기전력과 자체유도기전력의 변화를 보면서 조사하였는데 이로부터 연속상의 속도와 비연속상인 기포의 속도를 동시에 측정하는데 전자기유량계가 사용될 수 있음을 제시하였다.

3. 유량계방정식

Fig. 1은 전자기유량계의 일반적인 형태이다. 유로관 내 전위분포 U 는 포아송 형태의 방정식에 의해 표현된다 (Shercliff,⁽¹⁴⁾ Bevir,⁽³⁾ Lunta⁽¹⁵⁾).

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

여기에서 \mathbf{v} 는 속도벡터, \mathbf{B} 는 자속밀도 벡터이다. 선형 축대칭유동, 균일한 자기장일 경우에 Shercliff⁽¹⁴⁾는 비전도성관, 균일한 액체에 대하여 식 (1)의 해를 아래와 같이 유도하였다.

$$\Delta U_{AB} = B v_m d = \frac{4B}{\pi d} Q \quad (2)$$

여기에서 ΔU_{AB} 와 d 는 Fig. 1에서 전극 A와 전극 B사이의 전위차와 거리를 나타낸다. 또 v_m 은 유로 단면에서의 평균속도, Q 는 유량을 나타낸다. 식 (2)에서 ΔU_{AB} 는 유체의 전기전도도, 점도 및 압력에 무관함을 알 수 있다. Shercliff는 Fig. 2에 나타난 가중함수를 제안했고 이를 통해 단면의 각 부분의 유속이 최종 신호에 기여하는 정도를 표현하였다. Fig. 2와 같이 전극 주변에서는 유속이 최종 신호에 미치는 영향이 강하고 전극으로부터 멀어질수록 그 영향이 줄어든다. 그러므로 유량계의 민감도는 가중함수에 따라 결정되는데 가중함수는

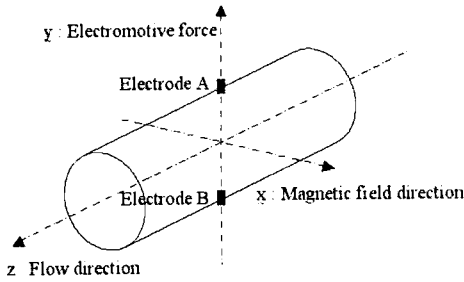


Fig. 1 Electromagnetic flowmeter with conventional form

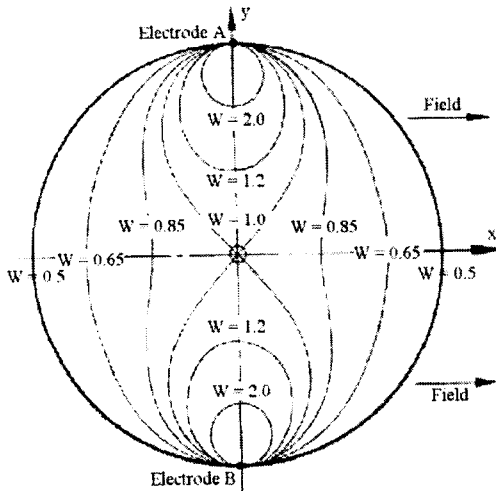


Fig. 2 Distribution of the weight function of Shercliff

자속 분포와 전극과 액체의 상대적인 위치에 의해 결정된다.

Bevir⁽³⁾는 Shercliff의 가중함수를 3차원 가중벡터로 확장하여 전자기유량계 방정식을 아래와 같이 표현하였다.

$$\Delta U = \iiint_r \mathbf{v} \cdot \mathbf{W} \, d\tau \quad (3)$$

여기에서 \mathbf{W} 는 가중벡터로서 각 지점에서의 속도 \mathbf{v} 가 전위차 ΔU 에 미치는 영향을 나타낸다. 가중벡터 \mathbf{W} 는 $\mathbf{W} = \mathbf{B} \times \mathbf{j}$ 로 정의된다. 식 (3)에서 체적적분은 유량계 전체체적 τ 에 대해 수행되며 가중벡터는 유량계의 형상과 전극 형태에 따라 달라진다. 한편 \mathbf{j} 는 가상전류로서 가상적으로 한쪽 전극에 단위전류(unit current)가 들어가 정지된 전도성 유체를 통과하여 반대쪽 전극으로 빠져 나올

때 유체 내에 형성되는 전류밀도를 의미한다. 따라서 가상전류 \mathbf{j} 가 수식화 될 때 그것은 이미 전극과 유량계 경계조건 및 경계내의 전기전도도 분포를 정의하였다는 의미를 가진다. 또 가상전류 \mathbf{j} 는 액체내의 모든 지점에서 $\mathbf{B} \times \mathbf{v}$ 의 미소 발전기 (element generator)가 각각 전극에 미치는 영향을 가중시키는 역할을 한다.

Wyatt⁽⁹⁾는 점전극을 가진 일반적인 유량계에서 선형 축대칭 유동 [$\mathbf{v} = \mathbf{v}(0,0,v(r))$], 균일한 자기장 ($B_x = B_y = B_z = B$)의 경우 식 (3)을 단순화시키고자 시도하였다. 그는 전극사이의 전위차가 이러한 조건에서는 속도분포에 관계없이 유량에 비례함을 알아내었다. 한편, 비례상수를 계산하기 위하여 선형 축대칭 유동의 특별한 경우인 균일한 선형 유동 [$\mathbf{v} = \mathbf{v}(0,0,v)$]에서 식 (4)를 적용하면 그 비례상수가 $4B/\pi d$ 임을 밝혔다.

$$\Delta U_{AB} = \int_A^B \mathbf{B} \times \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l} \quad (4)$$

여기서 선적분은 전극 A에서 전극 B사이의 임의의 경로에 대해서 수행된다. 또한 균일·등방성인 부유물이 존재할 때 유량계 출력은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

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

Bevir⁽¹⁰⁾의 이론에 따르면 유량계 내에 비균일 등방성의 부유물이 흐르는 경우에는 유량계 출력이 식 (6)과 같이 표현됨을 알 수 있다. Q_L 은 액체만의 유량이고 ΔU_{TP} 는 2상유동에서 두 전극 사이에 존재하는 전위차이며 ΔU_{SP} 는 같은 액체유량 Q_L 이 단상액체의 형태로만 흐를 때 두 전극 사이에 형성되는 전위차이다.

$$\Delta U_{TP} = \frac{4B}{\pi d} \frac{Q_L}{1-\alpha} \left[1 - \frac{\lambda k}{(k+2)(k+n+2)} \right] \quad (6)$$

식 (6)에서 λ 와 k 는 식 (7)과 같이 전기전도도의 분포를 나타내며, n 은 관내 속도 분포를 표현한다. 여기서 반경 r 은 무차원화된 반경 ($0 < r < 1$)이다 (Wyatt,⁽⁹⁾ Bevir⁽¹⁰⁾).

$$\sigma(r) = 1 + \lambda r^k \quad (7)$$

$$v \propto 1 - r^n \quad (8)$$

4. 실험장치

4.1 2상유동 실험장치

Fig. 3은 수직 동향류(concurrent flow)의 2상유동을 실험하기 위한 장치의 개략도이다. 유동 관찰을 위하여 시험부(testsection)를 포함한 대부분의 관들은 투명한 폴리카보네이트를 사용하여 제작하였다. 측정부는 내경(D_i) 1인치의 폴리카보네이트관을 사용하였고, 그 이외의 관들은 부식을 방지하기 위하여 스테인레스로 제작하였다. 기액 혼합을 위하여 기포발생기를 실험장치 하단에 제작 설치하였고, 2상유동 측정용으로 제작된 전자기유량계는 기포발생기에서부터 $45D_i$ 떨어진 지점에 설치하였다.

기포발생기의 상단에는 내경 0.3 mm의 니들 6개를 수직으로 균일하게 배치하였다. 기포발생기의 하단에는 수도물 공급라인과 압축공기라인을 연결하였다. 수도물은 필터를 사용하여 불순물을 $5 \mu\text{m}$ 까지 제거하였으며 원심펌프 (1 HP, 50 LPM - 10 m HEAD)를 이용하여 순환되도록 하였다. 물은 펌프에서부터 로타미터(rotameter)와 오리피스유량계(orifice flowmeter)를 지나서 기포발생기로 유입된다. 이 오리피스유량계는 압력 측정을 위하여 두 개의 플랜지 탭을 내었고 두께 1 mm 판에 직경 9 mm의 오리피스가 장착되었다. 기포발생기에 유입된 물은 공기와 혼합되어 2상유동을 형성하여 상부의 측정부를 지나서 기액분리기(separator)에서 분리되어 물탱크를 통해 펌프로 재유입된다.

압축공기는 압력조절기(pressure regulator)를 통해 압력을 조절하고 로타미터를 이용해 유량을 측정 한 후에 기포발생기 내부에 위치해 있는 공기유동 교란을 줄이기 위한 공기실로 공급된다. 유량을 정확히 조절하기 위하여 Swagelok 미터링 밸브를 사용하였다.

오리피스유량계는 부피를 미리 보정한 보정탱크(calibration tank)에 10리터의 물이 차오르는 시간을 초시계(stop watch)로 측정하여 보정하였고 최대 실험범위인 26 LPM의 유량을 각 측정량에서 최대 $\pm 0.94\%$ 내의 불확실도(uncertainty)를 가지고 측정할 수 있도록 하였다.

기공률은 전자기유량계의 측정부에 설치한 압력탭(pressure tap) 사이의 압력강하를 측정하여 계산하였다. 수직관에서 두 점 사이의 압력강하는 식 (9)와 같이 수두차(hydrostatic head) ΔP_h , 2상유동 마찰 압력강하(two-phase frictional pressure drop) ΔP_{fp} , 및 가속압력강하(accelerational pressure drop) ΔP_{ac} 의 합으로 나타난다.

$$\Delta P = \Delta P_h + \Delta P_{fp} + \Delta P_{ac} \quad (9)$$

가속압력강하는 상변화가 없고 기포의 겉보기 속도(superficial liquid velocity)가 낮을 경우 수두차 비하여 무시할 수 있을 만큼 작다. 수두차 ΔP_h 는 두 지점 사이의 전체압력강하(total pressure drop) ΔP 로부터 식 (10)의 로커터-마티넬리 변수(Lockhart-Martinelli parameter) X_u 와 2상유동배수(two-phase multiplier) ϕ_l^2 를 이용하여 계산되는 마찰압력강하를 빼줌으로써 계산할 수 있다.

$$X_u = \left(\frac{W_l}{W_g} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.1}, \quad (10)$$

$$\phi_l^2 = \frac{\left(\frac{\Delta p}{\Delta z} \right)_p}{\left(\frac{\Delta p}{\Delta z} \right)_l}, \quad \phi_l^2 = 1 + \frac{20}{X_u} + \frac{1}{X_u^2}$$

여기서 W_l , W_g 와 ρ_l , ρ_g 는 기상과 액상의 질량유동율(mass flowrate)과 밀도를 μ_l , μ_g 는 점도를 나타내며, $(\Delta p/\Delta z)_p$ 는 2상유동 중에서 액체가 단상으로 흘러갈 때의 압력강하를 나타낸다. 따라서 평균기공률(average void fraction)은 식 (11)을 이용하여 측정한 수두차로부터 계산할 수 있다.^(16,17)

$$\frac{\Delta P_h}{\Delta z} = \rho_g \alpha g + \rho_f (1 - \alpha) g \approx \rho_f (1 - \alpha) g,$$

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta P_h}{\rho_f g \Delta z} \quad (11)$$

그리고 사각의 투명 육면체 내에 물을 채워서 만든 가시창(view box)을 전자기유량계의 직전에 설치하여 2상유동의 형상을 육안으로 또는 고속카메라로써 관찰이 용이하도록 하였다.

고속카메라는 초당 1000 프레임을 찍을 수 있는 성능을 가지고 있다. 이상 유동 측정을 위하여 고속카메라를 자료획득장치(data acquisition system; Metrabyte DAS-1802ST/DA)와 트리거링 신호를 이용하여 동기시켰다. 또 유량계로부터의 다양한 신호의 분석을 위하여서 Tektronix TDS3034 디지털 오실로스코프를 사용하였다.

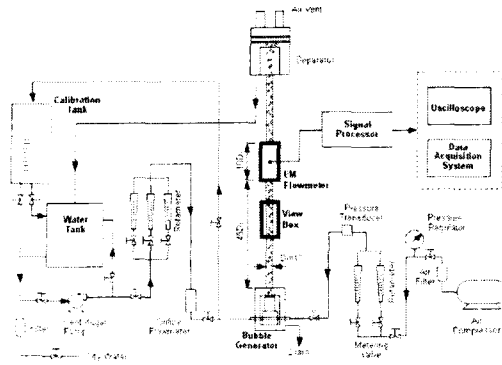


Fig. 3 Schematic diagram of experimental facility

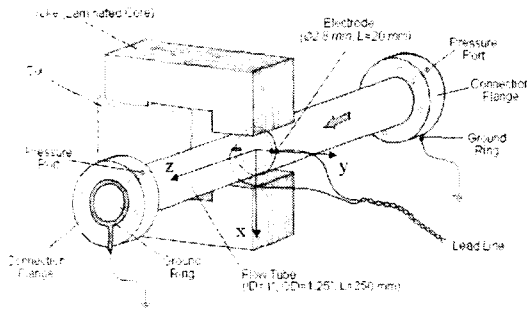


Fig. 4 Electromagnetic flowmeter developed (signal detector)

4.2 전자기유량계

전자기유량계에 장착된 전자석은 정현파 교류 전원에 의해 구동되며, 그 교류전원은 UPS(무정전 공급장치)와 주파수 변환기(frequency converter)를 거쳐 일정한 주파수와 전류값으로 제어하여 공급하였다. 일반적으로 전자기유량계는 신호검출부(signal detector)와 신호처리부(signal processor)로서 구성되며, Fig. 4는 본 연구에서 제작한 전자기유량계는 신호검출부를 나타낸다. 신호검출부는 투명한 폴리카보네이트로 만들어진 유로관과 전자석 및 전극으로 구성되어 있다.

한쌍의 전극(직경 2.8 mm, 길이 20 mm)은 비자성체이면서 부식에 강한 SUS 316으로 만들었으며, 전극이 유체와 닿는 면이 유로관의 내표면에 일치되어 장착하였다. 신호를 끌어내기 위하여 신호선은 잡음을 줄이기 위하여 쉴드(shield)선을 이용하여 두 전극에 연결하였으며, 쉴드선 한쪽 끝을 접

지시켰다.

또한 시험부 양끝 측 전극을 중심으로 상하류 125 mm 지점에 두 플랜지(flange)를 설치하였고, 플랜지 표면에 접지링을 각각 부착시켰다. 전자석은 C자 형태의 요크(yoke)와 에나멜 코팅된 직경 1.2 mm 전선을 1000번 감은 코일로 구성되는데 코어에 발생하는 에디전류에 의한 손실을 억제하기 위하여 실리콘 코팅된 두께 0.3 mm의 박판을 성층시켜 요크를 만들었다. 각 박판은 와이어 커팅 방법을 이용하여 C자 형상을 만들었으며 50 mm 두께가 되도록 성층시켰다. 자극 사이의 거리 L_g 는 36 mm이고 자극의 크기는 유동방향 z으로 50 mm, 전극방향 y으로 45 mm이다. 코일의 감은 수 N과 극간 거리는 자기 회로(magnetic circuit)에 대한 Ampere의 법칙 식 (12)로써 결정하였다. 식 (12)는 1차원 가정하에서 전자석 설계인자들 사이의 관계를 보여주며, Fig. 5(a)에 근사적 계산을 위한 자기회로를 나타내었다.

$$\oint \frac{\mathbf{B}}{\mu} \cdot d\mathbf{L} = \frac{B}{\mu_{Fe}} L + \frac{B}{\mu_{air}} L_g = Ni, \quad B = \frac{\mu_{air} Ni}{L_g} \quad (12)$$

여기서 L은 코어를 xy평면에서 볼 때 C형태 곡선의 길이이고 L_g 는 자극 사이의 거리이며 μ_{Fe} 와 μ_{air} 는 페라이트 코어 및 공기의 투자율이다. 두 극사이의 자속밀도는 F.W.Bell 사의 Model 6010 가우스미터(gauss meter)와 Hall sensor를 사용하여 측정하였다. Fig. 5(b)는 2A-45V 교류전원을 전자석에 인가시켜 자속밀도를 측정한 값으로, 최대치는 전자석 중심부에서 630 Gauss를 나타내었다.

4.3 신호처리부

신호처리부는 Fig. 6에 나타난 바와 같다. 전자기유량계를 사용하여 유량을 측정하는데 있어 가장 어려운 점 중의 하나는 유량신호가 1 mV 정도의 크기로서 그 외의 잡음들에 비해 너무 작기 때문이다. 아래는 교류전자기유량계에서의 주된 잡음의 원천을 열거한 것이다.

- (1) 시간에 따라 변하는 자기장에 의해 유도된 자체유도기전력으로 인한 잡음 (유체 내에 발생하는 에디전류 포함)
- (2) 전자석에 전원을 공급하는 전원선과 전극으로부터의 신호선 사이에 존재하는 저항 및 용량 결합에 의한 잡음

이 외에도 유량 정보를 가지고 있는 유량신호를 왜곡하는 원인들은 아래와 같다.

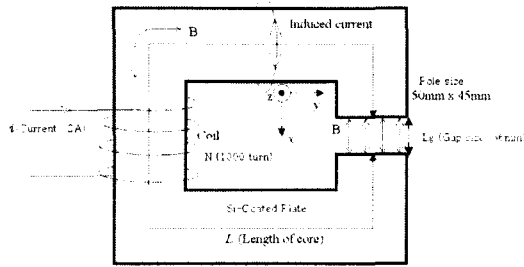


Fig. 5(a) Magnet design parameters

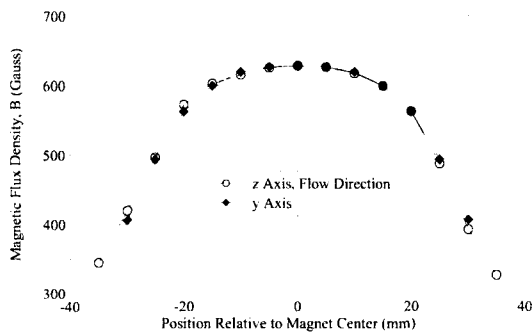


Fig. 5(b) Magnetic flux density of electromagnetic flowmeter

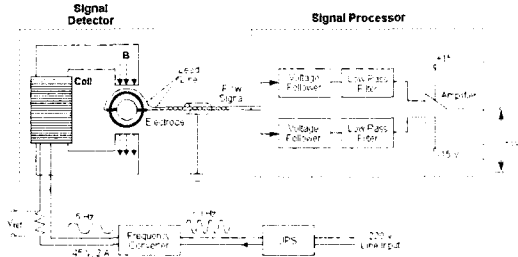


Fig. 6 Schematic diagram of signal processing unit

- 1) 전원의 불안정으로 인한 자기장의 변화
- 2) 전자석의 철손 및 히스테리시스 영향
- 3) 전위측정부의 입력임피던스가 전극 사이의 출력임피던스에 비해 매우 크지 못할 때 발생하는 신호의 부하손실(loading effect)

위의 문제점을 극복하기 위하여 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 400배 증폭하는 증폭기(amplifier)로 구성된다. 한편 자체유도기전력 잡음을 제거하기 위하여 전압 폴러워에 신호가 입력되기 전에 픽업코일(pickup coil)을 이용하여 반자체유도기전력을 생성시켜 자체유도기전력을 상쇄시켰고, 저주파수의 전원으로 전자석을 여자시켜 저항 및 용량 결합에 의한 잡음도 최대한 줄이도록 고안하였다. 이러한 과정을 거쳐 신호대 잡음비를 좋게하였고 자체유도기전력을 제거하기 위한 영점조절(zero tuning)도 가능하였다^(18,19).

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 1 Ω, 10 W의 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.

5. 실험방법 및 결과

5.1 단상유동 실험

Fig. 7은 본 연구에서 설계·제작한 전자기유량계를 단상의 20°C 물에서 보정한 결과를 나타낸다. 자료획득장치로써 동시에 측정한 오리피스유량계의 평균유속과 전자기유량계의 출력을 비교하여 전자기유량계를 보정하였다. 그 결과 전자기유량계의 불확실도는 각각의 측정값의 $\pm 1.5\%$ (실시간) $\pm 0.2\%$ (10초간 평균)로 나타났다. 저유량에서의 불확실도가 고유량의 경우에 비해서 다소 컸는데 이는 신호대 잡음비가 저유량에서 나빠지기 때문이다.

Fig. 7에서 점선은 Shercliff가 제안한 식 (2)를 이용하여 계산한 출력값에 증폭기의 이득(gain)을 곱하여 계산한 것이며, 실선은 직접 측정한 값으로서 서로 잘 일치함을 볼 수 있다.

한편, 기공률만 측정할 수 있다면 단상에서의 보정자료 ΔU_{sp} 와 단순관계식 (5)를 이용하여 2상 유동에서의 전자기 유량계 출력 ΔU_{TP} 를 각각의 액상의 평균 유속에 대하여 균일하고 등방성인 부유물이 흐르는 2상유동 조건에서의 예측할 수 있다.

5.2 2상유동 실험

Fig. 8은 2상유동에서의 전자기유량계 보정곡선이다. 본 실험에서는 상온의 물-공기 2상유동을 사용하였다. Fig. 8에 보이는 표식은 각각의 액상의

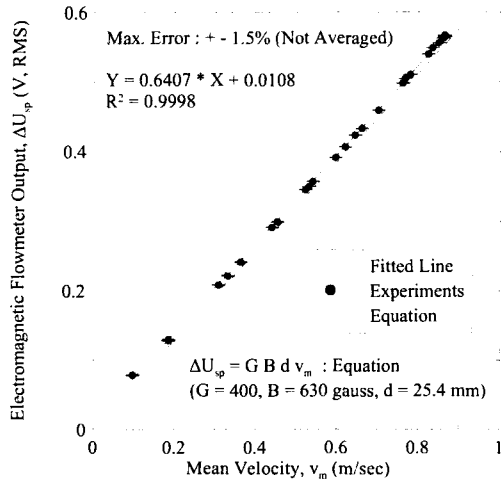


Fig.7 Single-phase calibration data of electromagnetic flowmeter

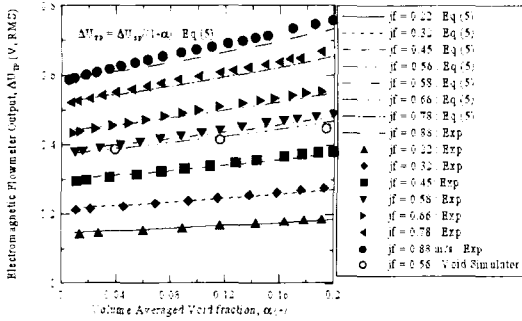


Fig. 8 Two-phase calibration data of electromagnetic flowmeter

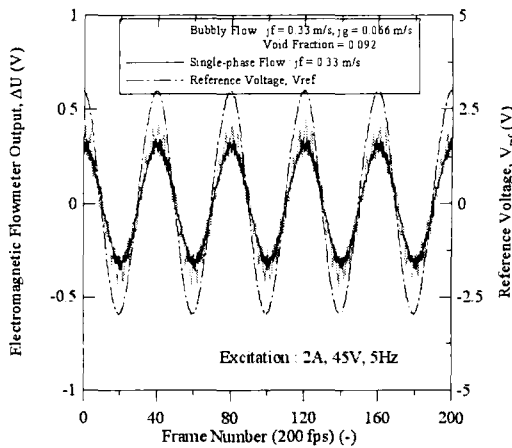


Fig. 9 Raw signal of the EM-flowmeter in the bubbly flow

겉보기 속도 j_f 에 대하여 유량계의 출력과 기공률 사이의 관계를 보여준다. Fig. 8의 각 선들은 식

(5)에 의하여 ΔU_{TP} 를 실험조건에 맞추어 계산한 것인데 실험값과 약간의 차이를 보이고 있다. 이것은 유량계의 유로관 단면에서 기포의 비균일 분포 때문에 발생하는 것으로 판단되며, 그 차이는 기공률과 액상의 겉보기 속도가 증가할수록 커진다. 이로부터 식 (5)의 정확도는 비균일성이 증가할수록 점차 감소함을 알 수 있다.

한편 기공률은 시험부 양단에 위치한 두 플랜지 사이의 차압을 측정하여 식 (11)로부터 계산하였다. Fig. 8로부터 기공률과 유량계 출력이 주어지면 2상유동의 조건하에서 액상의 유량을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 기포류(bubbly flow)에서의 전자기유량계 출력신호변화를 시간에 따라 보여주고 있다. 이때 전자석에 공급한 교류전원은 2A, 45V, 5Hz이다. 일점쇄선으로 나타낸 참조전압은 전술한 바와 같이 자기장, 여자전류, 유도기전력과 같은 위상을 가지고 있다. 실선과 점선으로 표시된 것은 단상에서의 신호와 기포류에서의 신호를 각각 나타낸다. 두 신호는 그 위상이 일치하지만 기포류의 신호 진폭이 같은 액체유량 조건임에도 불구하고 단상에서의 신호보다 크기를 볼 수 있다. 이것은 기상에 의해 액상 유로 면적 감소하여 결과적으로 액속도가 증가하였기 때문으로 결론지을 수 있다.

슬러그류(slug flow)에서의 신호는 단상류나 기포류에 비해 매우 복잡하고, 중요한 유동의 변화가 더 빠르다. 따라서 전자석에 인가되는 여자전원의 주파수를 20Hz로 증가시켜 실험하였다. Fig. 10(a)에서 일점쇄선은 참조전압, 실선은 유량계 출력신호를 나타내며, Fig 10(b)는 슬러그의 위치에 따른 고속촬영 결과를 나타낸다. 슬러그류에서는 슬러그 기포(slug bubble)의 위치에 따라, 유체 내에 생성되는 두 에디전류(두 전극이 포함된 축 a-a'가 지나가는 단면을 중심으로 상하류의 자기장영역에서 각각 발생함)의 영향력이 달라진다. 또 상하류 쪽에 생긴 두 에디전류의 방향이 전극을 기준으로 볼 때 서로 반대이다. 따라서 신호처리부에 있는 전압풀러위에 신호가 인가되기 전에 미리 자체유도기전력을 상쇄시켰음에도 불구하고 전극을 포함하는 단면에 대한 상하 유동의 비대칭 때문에 자체유도기전력(유체내의 두 에디전류 비대칭에서 기인함)이 유도기전력에 유입되어 최종 유량계 출력의 위상을 참조전압(자기장의 위상을 표시함)을 기준으로 양의 방향 또는 음의 방향으로 변경시키게 된다.

유량계의 출력과 슬러그 기포의 움직임을 순간 순간 대응시키기 위하여 고속카메라를 사용하여

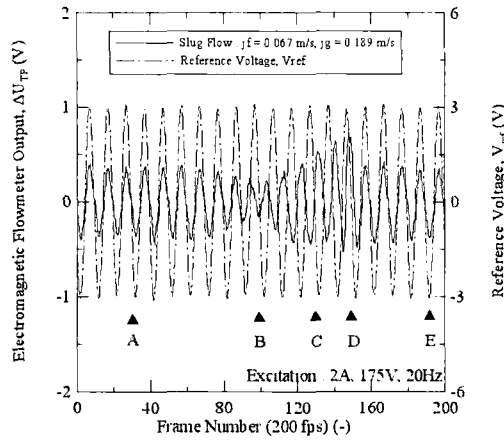


Fig. 10(a) Raw signal of the EM-flowmeter in the slug flow

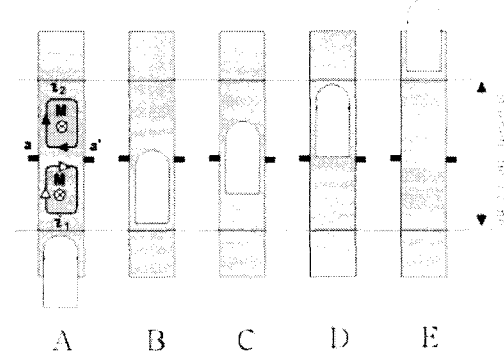


Fig. 10(b) Slug position in the flowtube of EM-Flowmeter

초당 200 프레임으로 영상을 획득하였으며, Fig. 10(a)의 각 경우에 대하여 슬러그 기포의 위치를 판별하여, 그 결과를 Fig. 10(b)에 표시하였다.

A 지점에서는 자기장영향권내에 슬러그 기포가 존재하지 않는다. 따라서 전극을 포함하는 유로 단면에 대하여 상하부의 유동 조건이 대칭을 이룬다.

따라서 액상속도에 의한 유도기전력만 출력에 포함되어 유량계 출력의 위상은 참조전압의 위상과 동일하다.

그러나 B 지점에서는 유량계 출력의 위상과 참조전압의 위상 사이에 90° 차이가 남을 볼 수 있다. 이것은 전극보다 아래쪽에 생긴 에디전류가 슬러그 기포에 의해 방해 받고 있기 때문이다. 이 경우에 아래쪽 에디전류는 최소가 되고 상하부의 에디전류의 비대칭에 의한 자체유도기전력은 최대가 된다. 한편 유량계 출력의 진폭은 B지점

로 수록 줄어들을 볼 수 있는데, 이것은 잘 알려져 있는 바와 같이 슬러그 기포전단에서 액체의 속도가 감소하기 때문이다.

C 지점에서는 유량계 출력의 위상과 참조전압의 위상 사이에 180° 차이가 남을 볼 수 있다. 이는 에디전류에 의한 자체유도기전력의 유입이 전혀 없음을 말해주나, 유도기전력의 위상이 180° 바뀌었음을 의미한다. 식 (1)에서 자기장의 위상이 일정할 경우 속도벡터가 반대로 바뀔 경우 전위의 값이 부호가 바뀔을 알 수 있다. 따라서 잘 알려진 바와 같이 슬러그 기포 주위의 액막에서 액상이 역류하고 있음을 이 신호로부터 알 수 있다. 고속카메라로부터 얻은 영상으로부터 C 지점에서는 슬러그 기포가 시험부의 중심에 위치하고 있음을 확증하였다. 한편 C 지점 부근에서 유량계 출력의 진폭이 증가하는 것은 역류하는 액막의 속도가 슬러그 전단에서 후단까지 계속 증가함을 의미한다.

D 지점에 슬러그 기포가 도달하면 유량계 출력의 위상과 참조전압의 위상 사이에 270° 차이가 나고 유량계 출력 진폭의 갑작스런 감소가 일어난다. 위상차는 전극보다 위쪽에 생긴 에디전류가 슬러그 기포에 의해 방해 받고 있기 때문이다. 이 경우에 위쪽 에디전류는 최소가 되고 상하부의 에디전류의 비대칭에 의한 자체유도기전력은 B 지점에서와는 반대쪽으로 최대가 되고 이는 270° 위상차를 유발한다. 한편 잘 알려진 바와 같이 슬러그 후류에서는 와류가 형성되고, 반전되어 흐르는 액막의 속도가 와류지역을 만나면서 갑자기 감소하여 유량계의 유도기전력 신호에 그 영향이 반영되어 갑자기 진폭이 감소함을 볼 수 있다.

이와 같이 기포류 및 슬러그류에서의 신호분석을 통하여 각 유동양식에서의 특징들을 밝힐 수 있었고 이를 통하여 두 유동양식의 천이를 유량계 출력을 보고 판별할 수 있는 가능성을 확인하였다. Fig. 11은 기체의 걸보기 속도 j_g 에 대한 유량계 출력의 RMS값의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 기상의 걸보기 속도가 낮은 영역인 기포류에서는 유량계의 출력이 선형적으로 증가하나, 걸보기 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 RMS값의 경향의 변화로부터 유동양식의 천이를 판별할 수도 있음을 알 수 있다.

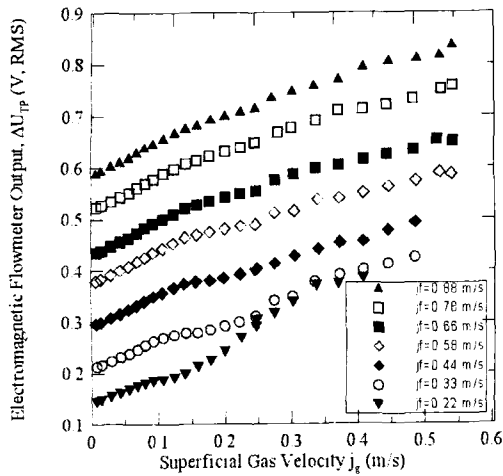


Fig. 11 Flow-pattern transition with gas volumetric flux j_g

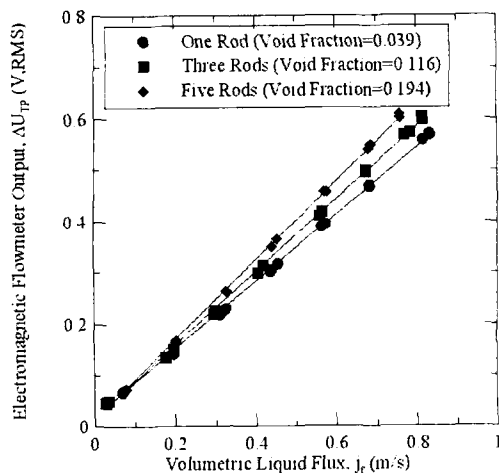


Fig. 12 Void simulator results

Fig. 12는 기포모사체를 이용하여 액상의 물에서의 기포의 위치와 기공률이 유량계 출력에 미치는 영향을 살펴본 것이다. 이 기포모사체는 본 연구의 기포의 크기와 비슷한 값을 갖도록 하였으며, 약 5mm의 비전도성인 아크릴봉을 이용하여 만들었다. 기포모사체는 유동방향으로 충분히 길기 때문에 유동은 2차원으로 가정할 수 있다. 일정한 액체유량 Q_L 에 대하여 기포모사체의 개수가 증가할수록 (기공률의 증가를 의미) 유량계의 출력은 증가하였고 전극에 대한 기포모사체의 위치에 따른 출력의 변화는 미미하였다. 한편, 이 기포모사체 실험의 결과는 Fig. 8에 물-공기의 2상유동 결과에 나타내었으며 서로 잘 일치하여 기공률의 효

과가 전자기유량계의 출력에 잘 반영됨을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구는 2상유동에서의 전자기유량계의 특성을 살펴보고 그 측정 가능성을 모색하고자 전자기유량계의 신호검출부 및 신호처리부를 직접 설계·제작하여 단상조건에서 정확도를 검증하여 그 설계 기법을 획득하고, 체계적인 2상유동 실험을 수행하였다. 본 연구로부터 아래와 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 설계·제작된 교류전자기유량계는 단상액체 및 2상유동의 조건 하에서 매우 좋은 성능을 보였다. 기포류의 기공률을 측정할 수만 있으면 전자기유량계는 액상의 유량을 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 전자기유량계의 출력의 위상변화를 통해 슬러그 기포의 순간적인 위치 검출과 액속도의 순간 측정의 가능성을 확인하였다.

(3) 기포류에서의 전자기유량계의 출력과 단순관계식 $\Delta U_{TP} = \Delta U_{SP}/(1-\alpha)$ 을 이용한 계산값 사이에는 기공률과 액체의 겉보기 속도의 증가에 따라 그 차이가 증가하였다. 이것은 2상유동에서 유체의 전기전도도에 유동조건에 따른 기포의 재배치 등으로 인하여 비균일성이 점차 증가되어 단순관계식의 정확도가 낮아졌기 때문이다.

(4) 기포류와 단상액체류의 출력신호의 위상은 일치하지만 진폭은 기공률의 영향이 유로 면적에 반영되어 증가하였다. 이 결과는 기포모사체를 이용한 실험에서도 잘 입증되었다.

(5) 액체의 겉보기 속도 j_f 에 따른 유량계 출력 RMS 값의 변화 경향을 보고 기포류와 슬러그류 사이의 유동양식 천이를 검출할 수 있었다. 이것은 슬러그류에서 유량계 출력에 자체유도기전력이 유입되어 그 영향이 반영되었기 때문이다.

후 기

이 연구는 국가지정연구실 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kuromori, K., Nishiyama, K., Okada, T. and Ohta,

- H., 1992, "New Magnetic Flowmeter with Dual Frequency Excitation-ADMAG," Yokogawa Technical Report, No. 14, 34~42.
- (2) Shercliff, J.A., 1954, "Relation Between the Velocity Profile and the Sensitivity of Electromagnetic Flowmeters," *J. Applied Physics*, **25**, 817~818.
- (3) Bevir, M.K., 1970, "The Theory of Induced Voltage Electromagnetic Flowmeters," *J. Fluid Mechanics*, **43**, Part 3, 577~590.
- (4) Hori, M., Kobori, T. and Ouchi, Y., 1966, "Method for Measuring Void Fraction by Electromagnetic Flowmeters," Nippon Genshiryoku Kenkyuho (Rep.), JAERI, No. 1111.
- (5) Hemp, J., 1991, "Theory of Eddy Currents in Electromagnetic Flowmeters," *Phys. D: Appl. Phys.*, **24**, 244~251.
- (6) Hemp, J., 2001, "A Technique for Low Cost Calibration of Large Electromagnetic Flowmeters, Flow Measurement and Instrumentation", **12**, 123~134.
- (7) Bernier, R.N. and Brennen, C.E., 1983, "Use of The Electromagnetic Flowmeter in a Two-Phase Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, **9**, No. 3, 251~257.
- (8) Bernier, R., 1981, "Unsteady Two-Phase Flow Instrumentation and Measurement," Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- (9) Wyatt, D.G., 1986, "Electromagnetic Flowmeter Sensitivity with Two-Phase Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, **12**, No. 6, 1009~1017.
- (10) Bevir, M.K., 1971, "The Predicted Effects of Red Blood Cells on Electromagnetic Flowmeter Sensitivity," *J. Physics D: Applied Physics*, **4**, 387~399.
- (11) Velt, I.D., Petrushaitis, V.I., Sprjgin, B.S., Krasilnikov, I.V., Mikhailov, Yu.V., and Tuleninov, V.R., 1982, "Correlation Technique for Flow Rate Measurement of Electroconductive Fluids and Two-Phase Media and Device for Its Implementation," (Patent No. 30.01.82)
- (12) Murakami, M., Maruo, K. and Yoshiki, T., 1990, "Development of an Electromagnetic Flowmeter for Studying Gas-Liquid, Two-Phase Flow," *International Chemical Engineering*, **30**, No.4, 699~702.
- (13) Krafft, R., 1993, "Electromagnetic Flowmeters in Multiphase Flows," Ph.D. Thesis, Cranfield Inst. of Technology.
- (14) Shercliff, J.A., 1962, "The Theory of Electromagnetic Flow Measurement," Cambridge University Press.
- (15) Lunta, E. and Halttunen, J., 1989, "The Effect of Velocity Profile on Electromagnetic Flow Measurement," *Sensor and Actuator*, **16**, 335~344.
- (16) Lockhart R.W. and Martinelli R.C., 1949, "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes," *Chemical Engineering Progress*, **45**, No.1, 39~48.
- (17) Georges E. Smislaert, 1963, "Two-Component Two-Phase Flow Parameters for Low Circulation Rates," ANL-6755, July.
- (18) Watanabe, M., 1977, "Noise Compensation in Electromagnetic Flowmeter," US Patent 4,019,385.
- (19) James, W.G., 1951, "An Induction Flowmeter Design Suitable for Radioactive Liquids," *The Review of Scientific Instruments*, **22**, No.12, 989~1002.