

슬러그류 액상속도 측정용 전류형식 전자기유량계 개발

강덕홍^{†,*} · 안예찬^{**} · 김종록^{*} · 오병도^{**} · 김무환^{**}

Development of a Current-Type Electromagnetic Flowmeter to Obtain the Liquid Mean Velocity in Two-Phase Slug Flow

Deok-Hong Kang, Yeh-Chan Ahn, Jong-Rok Kim, Byung Do Oh and Moo Hwan Kim

Key Words : Current-Type Electromagnetic Flowmeter(전류형식 전자기유량계), High Temporal Resolution(고시간분해능), Virtual Potential Distribution(가상포텐셜분포), Weight Function(가중함수), Slug Flow(슬러그류), Film Velocity(액막속도), Flow Pattern Coefficient (유동패턴함수), Localization Parameter(국소화 계수)

Abstract

The transient nature and complex flow geometries of two-phase gas-liquid flows cause fundamental difficulties when measuring flow velocity using an electromagnetic flowmeter. Recently, a current-sensing flowmeter was introduced to obtain measurements with high temporal resolution (Ahn *et al.* ⁽¹⁾). In this study, current-sensing flowmeter theory was applied to measure the fast velocity transients in slug flows. To do this, the velocity fields of axisymmetric gas-liquid slug flow in a vertical pipe were obtained using Volume-of-Fluid (VOF) method and the virtual potential distributions for the electrodes of finite size were also computed using the finite volume method for the simulated slug flow. The output signal prediction for slug flow was carried out from the velocity and virtual potential (or weight function) fields. The flowmeter was numerically calibrated to obtain the cross-sectional liquid mean velocity at an electrode plane from the predicted output signal. Two calibration parameters are required for this procedure: a flow pattern coefficient and a localization parameter. The flow pattern coefficient was defined by the ratio of the liquid resistance between the electrodes for two-phase flow with respect to that for single-phase flow, and the localization parameter was introduced to avoid errors in the flowmeter readings caused by liquid acceleration or deceleration around the electrodes. These parameters were also calculated from the computed velocity and virtual potential fields. The results can be used to obtain the liquid mean velocity from the slug flow signal measured by a current-sensing flowmeter.

기호설명

B : 자속밀도의 x 방향 성분
 H : 자속밀도와 관련된 포텐셜
 j_y : \mathbf{j} 의 y 성분
 L : 축방향(z) 계산공간 길이

L_b : 슬러그 기포 길이
 L_e : 전극의 각 변 길이
 L_n : 슬러그 기포 선단위치
 L_t : 슬러그 기포 끝단위치
 R : 도관 반경
 Δt : 시간스텝
 u : 균일한 액막속도
 \mathbf{v} : 유속
 v_m : 액체 단면평균속도
 v_r : \mathbf{v} 의 r 방향 성분
 v_z : \mathbf{v} 의 z 방향 성분

[†] 책임저자, 회원, 포항산업과학연구원 에너지연구팀

E-mail : kangdh@rist.re.kr

TEL : (054)279-6548 FAX : (054)279-6688

* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

- $W_r(r, \theta, z)$: \mathbf{W} 의 r 방향 성분
- $W_z(r, \theta, z)$: \mathbf{W} 의 z 방향 성분
- δ : 액막두께
- ϵ : 기공률
- τ : 적분부피
- 상첨자
- * : 관반경으로 무차원된 표시

1. 서론

전자기 유량계는 지난 40 년간 단상 액체유동에서의 액체 평균속도를 정확히 측정해 왔으며 관내 삽입물이 없어 압력손실이 거의 없고 응답성이 빠르며 두 상간의 큰 전기전도도 차이를 효율적으로 이용할 수 있어 2 상류에의 적용이 지속적으로 시도되고 있다.

속도변화가 큰 슬러그류를 측정하기 위해서는 시간분해능이 높은 전자기유량계가 필요하다. 그러나 기존 전압형식의 유량계는 전력누설에 의한 잡음이 시간분해능을 높일수록 증가하여 측정상 난점으로 작용하였다⁽²⁾. 따라서 Ahn 등⁽¹⁾에 의해 전력누설잡음에 강한 전류형식의 유량계를 제안한 바 있다.

본 연구에서는 Ahn 등⁽¹⁾이 제안한 전류형식 전자기 유량계 이론을 슬러그류에 적용을 통하여 전류형식 전자기유량계의 수치적 출력신호예측 및 보정을 시도하였다.

전류형식 유량계의 출력전류 i 는 전극표면에서의 전기 이중층에 의한 접촉저항을 무시할 수 있는 영역에서 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$i = \frac{\iiint_V \mathbf{v} \cdot \mathbf{W} d\tau}{\Delta G} \quad (1)$$

여기에서, 가중벡터 \mathbf{W} 는 자속밀도 \mathbf{B} 와 가상전류밀도 \mathbf{j} 의 외적으로 정의된다 ($\mathbf{W}=\mathbf{B} \times \mathbf{j}$). 식(1)의 분모는 두 전극사이의 가상포텐셜차로 이를 구하기 위하여 가상상황을 배경으로 하고 있다. 가상상황은 단위가상전류를 한쪽 전극에 가하고 정지된 유체를 지나 반대쪽 전극으로 흘러나오게 하는 것인데 이때 시험부내에 발생하는 가상전류밀도분포 \mathbf{j} 를 구하면 가중벡터 \mathbf{W} 를 구할 수 있다. 따라서 가상전류밀도 \mathbf{j} 는 전극의 형상, 유량계 도관의 전기적 조건, 기액 2 상류의 경우 유동패턴에 관계된다. 유도자기장이 작고 유체의 전기전도도가 균일한 경우에 $\nabla \times \mathbf{B}=0$ 와 $\nabla \times \mathbf{j}=0$ 이 성립하여 자속밀도 \mathbf{B} 와 가상전류밀도 \mathbf{j} 와 관계된 포텐셜 H 와 G 는 $\nabla^2 H = \nabla^2 G = 0$ 가 성립한다. 여기서 G 를 가상포텐셜이라 부른다. ΔG 는 두 전극에서의 가상포텐셜의

차이를 의미한다. 가중벡터 \mathbf{W} 는 ∇G 와 관련되어 있어, 가상 포텐셜 G 를 계산하면 임의의 속도장에 대하여 전자기유량계의 출력을 예측할 수 있도록 한다.

축대칭 속도분포 및 형상을 가진 슬러그류에서의 유도기전력(flow induced electromotive force)은 다음과 같은 삼중적분으로 표시될 수 있다.

$$\iiint_V \mathbf{v} \cdot \mathbf{W} d\tau = 2\pi \iiint_V [v_r(r, z)W_r(r, z) + v_z(r, z)W_z(r, z)] r dr dz \quad (2)$$

여기에서 $W_r(r, z)$ 과 $W_z(r, z)$ 는 반경방향 가중함수, 축방향 가중함수로 부르기로 하고 균일한 횡자기장 B 에 대하여 아래와 같이 정의한다.

$$W_r(r, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tilde{W}_r(r, \theta, z) d\theta = -\frac{B}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin \theta \frac{\partial G}{\partial z} d\theta \quad (3)$$

$$W_z(r, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tilde{W}_z(r, \theta, z) d\theta = \frac{B}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\partial G}{\partial y} d\theta \quad (4)$$

전류형식 유량계에서 슬러그류 상태에서의 출력전류 i_{TP} 는 Ahn 등⁽¹⁾에서 환상류에 대해서 유도한 것과 유사하게 다음과 같이 간단히 유도된다.

$$i_{TP} = \frac{i_{SP}}{2v_{mSP}R \cdot (IA) f} \iiint_V [-v_r(r, z) \int_0^{2\pi} \sin \theta \frac{\partial G}{\partial z} d\theta + v_z(r, z) \int_0^{2\pi} \frac{\partial G}{\partial y} d\theta] r dr dz \quad (5)$$

$$\equiv \frac{i_{SP}}{v_{mSP} f} \chi$$

여기서 하첨자 SP 와 TP 는 각각 단상과 2 상, v_m 은 실제의 액체단면평균속도, f 는 유동패턴함수, χ 는 국소화 계수를 의미한다. 유동패턴함수는 기액 2 상류의 보정과정을 간단히 하기 위해 제안된 것으로 단상과 2 상에서의 두 전극사이 액체저항의 비로 정의된다. 전자기유량계는 액체의 속도를 축방향으로 가중평균한 값을 출력으로 내기 때문에 완전발달되지 않은 유동의 경우에 유량계 출력이 전극을 지나는 지점에서 액체의 국소 단면속도를 의미하지 않는다. 그러므로 유량계 출력에서부터 국소 단면속도를 얻기 위해서는 국소화 계수가 필요하다. 국소화 계수는 유동 구조 및 액체 속도분포의 함수이다.

실제 슬러그류 측정에 전자기유량계가 사용될 때에는 식(5)에서 보는 바와 같이 단상액체류에서의 보정차트, 유동패턴함수, 국소화 계수가 요구된다. 단상액체류에서의 보정차트는 유량계 제작업체에서 제공하거나 현장에서 2 상류 실험에 앞서 단상류 실험을 수행함으로써 얻어지고 이로부터 식(5)의 i_{SP}/v_{mSP} 값을 구할 수 있다. 보정차트 내에는 액체의 전기전도도도 영향이 포함되어 있는데 전기전도도는 액체의 종류 및 온도의 함수이다. 유동패턴함수 값을 구하기 위해서는 유동패턴을 측정하여야 하는데 슬러그류에서 유동패턴은 두개의 임피던스 미터를 축방향으로 설치하면 얻을 수 있

다. 먼저 두개의 임피던스 미터로부터 기공율을 각각 측정하고 측정된 두 기공율의 상호상관함수를 구함으로써 기공율 전파속도를 구하면 기포길이도 구할 수 있다. 유동패턴함수 형태를 수치해석으로부터 제공받으면, 기공율 즉 액막두께와 기포길이로부터 유동패턴함수 값을 구할 수 있다. 또한 국소화 계수 값은 주어진 유동 구조에 대하여 가상포텐셜분포와 속도분포를 계산함으로써 제공받을 수 있다. 결국 출력전류 i_{TP} 만 측정하면 슬러그류에서 액체의 단면평균속도를 얻을 수 있다. 유량계의 출력으로부터 액체 단면평균 평균속도를 획득하기 위하여 전압형식 및 전류형식의 유량계 공히 다음 식을 사용하여야 한다.

$$v_{m,TP} \Big|_{z=Electrode} = \chi \int [\bar{v}_r(z)q(z) + \bar{v}_z(z)p(z)] dz \quad (6)$$

식(6)의 각 함수는 아래와 같이 정의된다.

$$p(z) \equiv \int \frac{\pi W_z(r,z)}{BR \cdot (1A)} r dr \quad (7)$$

$$q(z) \equiv \int \frac{\pi W_r(r,z)}{BR \cdot (1A)} r dr \quad (8)$$

$$\bar{v}_z(z) \equiv \frac{1}{p(z)} \int v_z(r,z) \frac{\pi W_z(r,z)}{BR \cdot (1A)} r dr \quad (9)$$

$$\bar{v}_r(z) \equiv \frac{1}{q(z)} \int v_r(r,z) \frac{\pi W_r(r,z)}{BR \cdot (1A)} r dr \quad (10)$$

식(6)의 $v_{m,TP} \Big|_{z=Electrode}$ 는 전극면에서 액체의 단면평균 속도이다. 또 χ 는 국소화 계수이고 $p(z)$ 는 축방향 가중밀도함수이며, $q(z)$ 는 반경방향에 대하여 적분된 반경방향의 가중함수이다.

2. 3 차원 가상포텐셜분포 계산

슬러그류에서 유량계 출력검토 및 보정계수를 구하기 위하여 수직관내에서의 2 차원 축대칭 유동장과 3 차원 가상포텐셜분포를 계산하였다. 25.4mm 직경의 수직관내에서 상승하는 슬러그 유동의 수치해석은 전산유체해석용 상용코드인 CFD-ACE+(CFD Research Corporation)에 내재되어 있는 체적분율법(fractional volume of fluid, VOF)을 적용하여 수행하였다. 본 연구에서는 물과 공기를 사용하였으며, 기포가 유량계유효영역(effective flowmeter window, $4R$)보다 긴 경우와 작은 경우의 두 가지 슬러그류에 대하여 고려하였다. 긴 기포와 작은 기포에 대한 초기길이는 각각 $5.6R$, $2R$ 로 하였으며 계산결과 최종 기포의 길이는 각각 $6.1R$, $2.9R$ 로 성장하였다.

2.1 수치해석방법

해석영역의 축방향 길이는 준-정상상태의 테일러 기포형상과 상승속도를 구하기에 충분하도록 $40R$ 로 하였다. 해석상에 이용된 좌표는 축대칭 원통좌표계인 (r,z) 를 사용하였다. 비압축성 유체에 대한 비정상, 2 차원 연속방정식과 나비에-스톡스(Navier-Stokes)방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + g \quad (13)$$

여기서 v_r 과 v_z 는 각각 반경방향과 축방향의 속도 성분이며, t 는 시간, r 과 z 는 각각 반경방향과 축방향의 좌표이고 p 는 압력을 나타낸다. 경계조건은 $r=0$ 에서 축대칭 조건 그리고 도관벽에 대하여는 점착조건을 적용하였다. 상기의 지배방정식의 차분화는 비균일 원통격자계에 대하여 유한체적법을 적용하였다. 대류항에 대한 격자면에서의 내사법의 적용은 1 차 상류도식을 적용하였다. 액체는 초기에 정지되어 있으며 유동은 고정좌표계를 참조하였다.

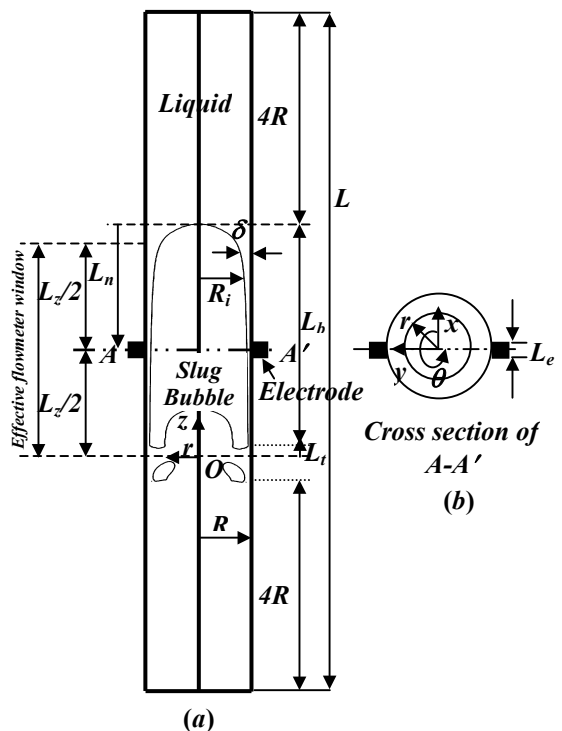


Fig.1 Schematic diagram of the computational domain for the three-dimensional virtual potential

기-액 경계면의 위치는 액상의 체적분율 F 에 의해 정의되며, F 는 식(14)로부터 구해진다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{v_r}{r} \frac{\partial(rF)}{\partial r} + v_z \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

정교한 계면의 형성을 위하여 PLIC(piecewise linear interface reconstruction)기법을 적용하였으며, 표면 장력에 의한 계면상의 정미법선력은 식(15)에 나타난 Yang 등⁽⁴⁾이 제시한 모델을 적용하였다.

$$\mathbf{F}_s = \int \sigma \mathbf{n} \times d\mathbf{x} \quad (15)$$

여기서, σ 는 두 유체사이의 표면장력(본 연구에서는 0.0725 N/m), \mathbf{x} 는 각 계산 격자 셀(cell)내 계면의 모서리 그리고 \mathbf{n} 은 계면의 법선벡터로 다음식에 의해 구해진다.

$$\mathbf{n} = \nabla F \quad (16)$$

식(14)의 차분화는 현시적방법이 적용되었으며, 따라서 CFL (Courant-Friedrichs and Lewy) 조건을 만족시키기 위하여 본 연구에서는 자동시간증분 모드를 사용하였으며, 계산결과 시간증분량은 대략 10^{-5} 초 정도로 나타났다. 각 시간증분에 대한 수렴조건은 각 변수들의 레지듀얼(residual)이 10^{-4} 이하가 되었을 때 만족하는 것으로 하였다.

격자 의존도는 반경 및 축방향의 격자수를 67×988 , 45×656 , 57×1750 의 3 가지 경우에 대하여 실시하였다. 격자 시스템에 따른 기포의 상승속도의 최대편차는 1.5% 이하로 나타났다. 그러나 격자 시스템에 따라 테일러 기포 후류에서 비현실적인 작은 기포들의 발생정도가 다르게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 이러한 비실제적인 작은 기포들의 발생이 가장 작은 경우인 57×1750 격자 시스템을 사용하였다

전술한 슬러그류에 대한 3 차원 가상포텐셜분포를 계산하기 위해 사용된 수치해석 방법은 Ahn 등⁽³⁾에 서술한 것과 크게 다르지 않으며, Fig.1 에 관련 계산영역을 나타내었다.

2.2 해석결과 및 토의

Fig. 2 는 작은 기포에 대하여 축방향 가중함수를 자속밀도 B 로 나눈 값의 분포를 보여주고 있다. 축방향 가중함수의 분포는 전극에 대한 기포 선단위치 $L_n^* = L_n/R$ 로 대표되는 기포위치에 따라 변한다. 축방향 가중함수는 가상 전류밀도 y 방향 성분의 원주방향 평균이며 함수값이 0.5 이면 전극에 인가된 가상 전류밀도의 1.24%에 해당한다. 단상액체류 (Fig. 2 의 그림 a) 의 경우 축방향 가중함수는 전극면 ($z^*=z/R=2$) 에 대하여 대칭이다. 한편 상승하는 슬러그 기포의 경우인 Fig.2 의 그림 b 에서 g 까지의 축방향 가중함수분포는 비대칭적인 모습을 보이고 있다. 0.1 이상의 가중함수값을 가지는 유량계유효지역이, 전극에 대한 슬러그 기포 위치에 따라 변화됨을 알 수 있다. 이는 가상 전류가 가장 작은 저항을 가진 통로를 따라 우회하여 흐르기 때문이다. 테일러기포 후류영역이 전극으로 다가올수록 축방향 가중함수는 단상액체류의 경우와 유사하게 변화됨을 알 수 있다.

보다 정확한 시간평균 액체유량을 측정하기 위하여서는 적절한 유동패턴함수와 국소화계수 값이 요구된다. 먼저 Figs. 3 (a), (b)에 반경방향 속도성분 $\bar{v}_r(z^*)$ 이 고려될 경우와 고려되지 않을 경우의 길고 짧은 기포에 대하여 기포위치에 따른 국소화계수값을 나타내었다. 테일러 기포가 상승함에 따라 $L_n^* \leq L_b^* - L_z^*/2$ 일 경우에는 길고 짧은 기포의 경우

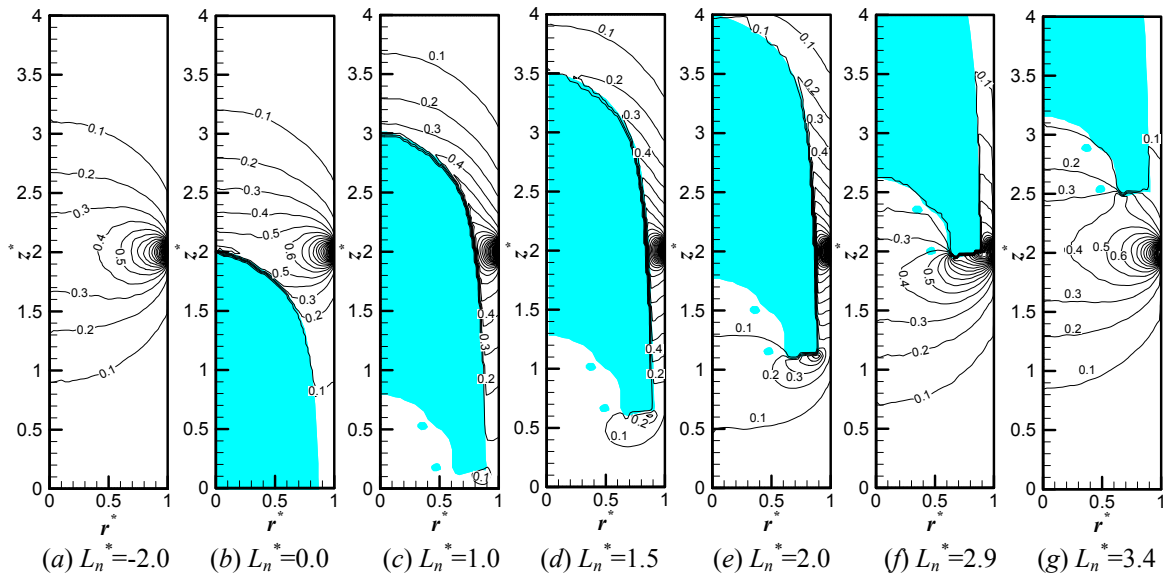
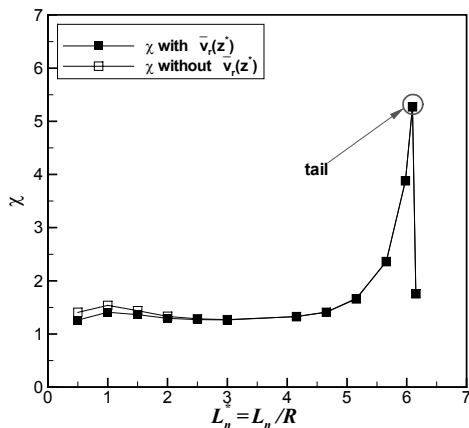
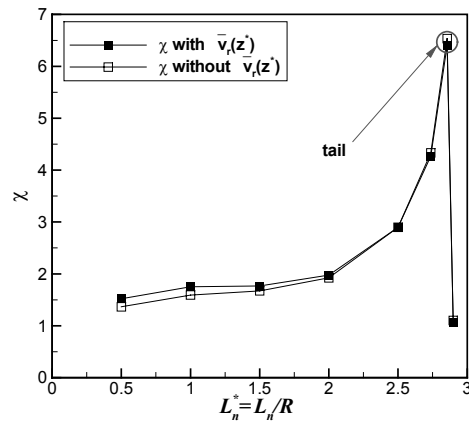


Fig. 2 Contour plots of the normalized axial weight function $W_z(r, z)/B$ (short bubble)



(a) Long bubble



(b) Short bubble

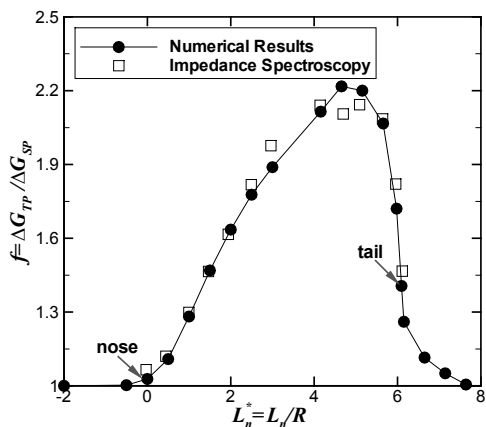
Fig. 3 Plot of the localization parameter with respect to the bubble location, L_n^*

모두 거의 일정한 국소화계수값을 가지며, 기포꼬리 끝부분이 전극면에 도달할 경우 국소화계수가 최대에 도달하였다. 이후 액체슬러그 영역에서 국소화계수값이 급격히 떨어짐을 알 수 있었다.

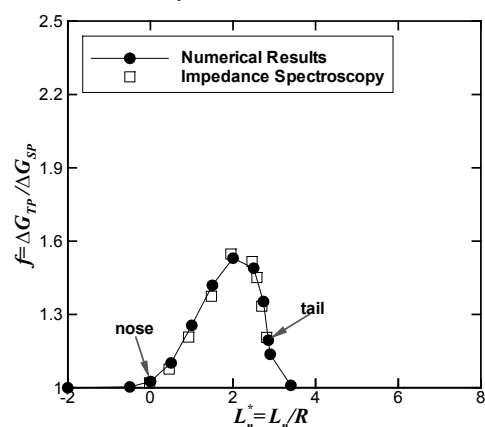
전류형식 전자기유량계를 보정하기 위해서는 유동패턴함수 f 를 미리 알아야 한다. 본 연구의 임피던스 스펙트로스코피(impedance spectroscopy) 실험 및 계산으로부터 얻어진 두 전극 사이의 가상 포텐셜차이로부터 유동패턴함수를 Fig. 4 에 나타내었는데 실험 및 계산 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 유동패턴함수를 구하기 위한 두 전극사이의 유체저항 측정에 사용된 장비는 Princeton Applied Research VMP2/Z 이었다. Fig.5 는 실험 개념도를 보여주고 있다. 두 개의 직경 2mm 백금전극이 직경 25.4mm 도관내벽에 설치되었으며, 정밀가공된 두 개의 아크릴 재질의 가상 기포들로 기체코어를 모사하였다. 세라믹 봉을 사용하여 가상 기포를 도관 중심에 위치시켰다. 백금-수도물 시스템의 임피던스를 측정하기 위하여 DC 바이어스 없는 5mV 정현파를 VMP2/Z 에서 인가하였다. 임피던스가 온도에 민감한 값이므로 측정시 분위기

온도를 $11.6 \pm 0.6^\circ\text{C}$ 로 유지시켰다. 1000Hz 이상에서 리액턴스 성분이 사라지고 저항성분만 존재함을 알 수 있는데 이는 Fig.6 의 보테선도(Bode plot)에서 잘 보여주고 있다. 단상($L_n^* = -2.0$) 및 L_n^* 이 5.25 인 슬러그류에서는 수도물의 저항이 11.6°C 에서 각각 $70.1\text{K}\Omega$ 과 $150.2\text{K}\Omega$ 이었고, 이로부터 유동패턴함수가 측정되었다.

유동패턴함수는 무차원 기포선단위치 L_n^* 의 함수로 볼 수 있다. $L_n^* < 0$ 이거나 $L_n^* > L_b^* + 0.5$ 일 때 유동패턴함수는 거의 1 을 가진다. 따라서, 전류형식 유량계입장에서 볼 때 $L_n^* < 0$ 이거나 $L_n^* > L_b^* + 0.5$ 의 경우를 단상액체류로 간주하여도 무방함을 알 수 있다. 유동패턴 함수 f 의 최대값은 긴 기포의 경우 $L_n^* = 4.66$ 에서 2.22, 짧은 기포의 경우 $L_n^* = 2.0$ 에서 1.53 으로 나타났다. 전자기 유량계의 유효영역보다 긴 기포의 경우 유동패턴 함수 f 의 최대값은 기포꼬리의 끝단부가 전자기 유량계의 유효영역의 하단부에 도달하였을 때 나타났으며, 전자기유량계의 유효영역보다 짧은 기포의 경우 기포길이의 50% 이상이 전극면을 통과하였을 때 유동패턴 함수 f 의 최대값이 나타났다



(a) Long bubble



(b) Short bubble

Fig. 4 Flow pattern coefficient f as a function of the bubble location L_n^*

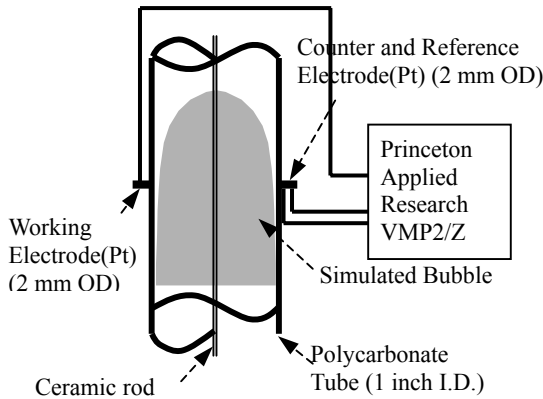


Fig. 5 Schematic diagram for impedance spectroscopy of tap water

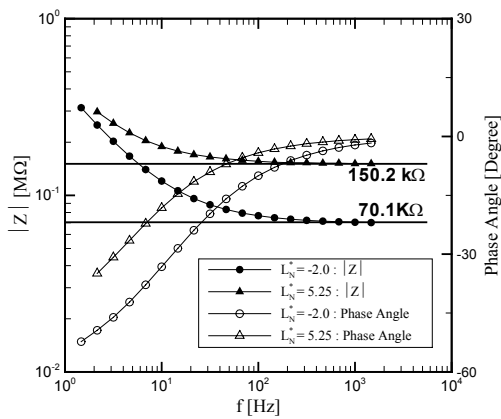


Fig. 6 Bode plot from impedance spectroscopy of tap water (11.6°C)

Fig. 7 은 시간에 따른 보정이 안된 전류형식 전자기유량계의 출력신호와 전극단면에서의 액상의 평균속도를 보여주는 그림이다. Fig. 7로부터, 보정인자인 유동패턴함수와 국소화계수를 무시할 경우, 슬러그류에 대한 액체의 단면평균속도계측에 전류형식 전자기유량계 적용시 상당한 오차가 유발됨을 예측할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 수직관내 슬러그 유동에 대하여 전류형식 전자기유량계 이론이 적용되었다. 이를 위해 직경 25.4mm 인 수직관내의 2 차원 축대칭인 기액 슬러그 2 상 유동에 대하여 체적분율법을 이용하여 두 가지 테일러 기포길이(77.47mm, 36.83 mm)에 대한 각각의 속도장파 슬러그 기포의 상승 속도 및 형상을 구하였다. 유한 크기의 전극에 대하여 수치해석을 통하여 구한 두 가지 슬러그 기포의 전극에 대한 위치변화에 따른 3 차원 가상포텐셜분포를 계산하였다.

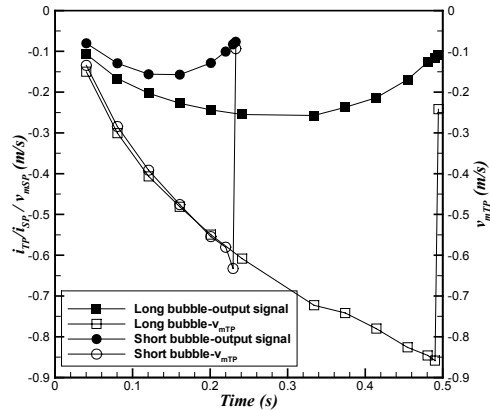


Fig. 7 Normalized output signal, $\frac{i_{TP} \cdot v_{mSP}}{i_{SP}}$

가상포텐셜의 구배로부터 축방향 가중합수를 단상 액체류, 슬러그류에 대해 계산하였다. 슬러그 유동에 대한 속도 및 가상 포텐셜분포로부터 전류형식의 전자기 유량계의 슬러그 기포의 상승에 따른 출력신호를 예측하였다. 한편 유동패턴함수 f 를 도입하여 전류형식 유량계의 보정과정을 간단히 하고 이를 계산 및 실험적으로 구하였으며, 슬러그류와 같이 완전발달 유동이 아닌 경우 야기되는 유량측정오차를 줄이고자 국소화계수 χ 를 도입하였으며, 가상 포텐셜분포 및 속도장으로부터 전류형식 유량계에 대한 국소화계수값을 계산하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업 및 교육부의 두뇌한국 21 사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Ahn, Y. C., Oh, B.D. and Kim, M.H. 2003 Theory of a current-type electromagnetic flowmeter for two-phase flow and numerical computation of the 3D virtual potential distributions for annular flow, *Transactions of the KSME*, B, 27, No. 6, 714-725.
- (2) Tsiknakis, E. 1988 Novel excitation waveforms and signal processing for electromagnetic flowmetering, Ph.D. Dissertation, University of Bradford, UK.
- (3) Ahn, Y.C., Oh, B.D., and Kim, M.H 2003 An advanced electromagnetic flowmetry for two-phase flow (KL-13; Keynote lecture), *Proceedings of the 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, Seoul, Korea, Oct. 5~11.
- (4) Yang, H.Q. and Przekwas, A.J. 1998 Computational modeling of microfluid devices with free surface devices with free surface liquid handling, *CFDRC*, PA-98-11.