두 개의 컨덕턴스미터를 이용한 슬러그류의 기공률 및 기공률 전달속력 실시간 측정

김종록[†] ·안예찬[*]·강덕홍[**]·김무환[*]

Real-time measurement of void fraction and its propagation speed of slug flow with two Conductance meters

Jongrok Kim, Yeh-Chan Ahn, Deok Hong Kang and Moo Hwan Kim

Key Words: Two phase flow(2상류), Slug flow(슬러그류), Void fraction(기공률), Propagation speed(전달속력), Conductance meter(컨덕턴스미터), Separated Probe(분전극)

Abstract

Two ring-type conductance meters were manufactured to measure void fraction and its propagation speed in slug flow. The signal of conductance meter with two rings depends on liquid temperature. Therefore a conductance meter with separated probe designed by Coney (1973), which is independent of liquid temperature, was used and experimentally proved. The manufactured conductance meters showed a good repeatability and agreement with the analytical solution by Coney (1973). From time lag between two conductance meter, we could calculate the propagation speed of void fraction.

기호설명

a : 컨덕턴스미터 전극 형상변수
d : 원관 내경
G : 전기전도도
G^* : 무차원화된 전기전도도
g : 중력가속도
h : 무차원 액막두께
I_1 : 컨덕턴스미터 신호1
I_2 : 컨덕턴스미터 신호2
l : 평판형 전극에서 분전극 길이
m_1 : 제1종 완전타원적분의 변수
t : 액막두께
v_s : 슬러그기포 속력
x : 전류비 I_2/I_1
α : 기공률
β : 제1종 완전타원적분 변수
σ : 유전률
$\lambda, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_s$: 컨덕턴스미터 전극 형상변수

† 책임저자, 회원, 포항공과대학 기계공학과 대학원
E-mail : jongrok@potech.ac.kr
TEL : (054)279-5551 FAX : (054)279-3199
* 회원, 포항공대 기계공학과
** 회원, 포항산업과학연구원 에너지연구팀

1. 서 론

기공률은 기액 2상류의 특성을 파악하는데 중요한 변수중의 하나로서, 이를 측정하는 기술에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다.

산업현장에서 안정성 확보나 열전달 성능평가의 정확성을 높이기 위해서는 기공률의 실시간 측정이 필요하며, 슬러그류와 같이 유로단면에 대한 기공률이 급격히 변하는 2상류의 기공률을 측정하기 위해서는 측정기기의 빠른 반응성이 요구된다.

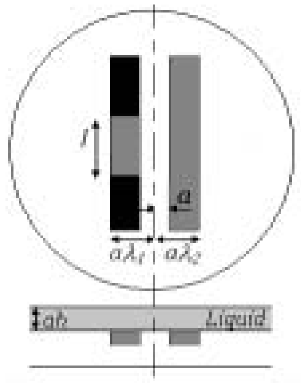

Fig. 1 Plate probe

액체가 전도성 물질이고, 기체가 비전도성 물질일 경우, 측정하고자 하는 유로에서 액체의 컨덕턴스를 측정함으로써 기공률을 계산해 낼 수 있다. 이 방법은 빠른 반응성과 높은 정확도를 갖고 있으며, 국소 영역의 기공률을 실시간으로 측정 가능하다.

이전에 이루어진 많은 연구들로부터 높은 주파수의 교류 신호를 인가하면(수도물의 경우, 10~100kHz) 임피던스는 전기저항 성분을 나타내고, 직류 신호를 인가하면 커패시턴스(capacitance) 성분을 나타낸다. 이런 이유로 일반적으로 임피던스미터를 컨덕턴스미터(conductance meter)와 커패시턴스미터로(capacitance meter) 분류한다.

Coney[(1)]는 액체층에 의한 평판 전극의 반응을 이론적으로 설명하였다. Asali et al[(2)]는 링(ring) 전극을 처음으로 적용하였고, Andreussi et al[(3)]과 Tsochatzidis et al[(4)]는 링 전극의 배치에 따른 반응을 이론적으로 발전시켰다.

Fossa[(5)]는 링 전극을 이용한 컨덕턴스미터가 관 직경에 무관함을 보였고. Devia & Fossa[(6)]는 링 전극의 단면이 일정하고 축대칭인 기존 전극의 반응이 비선형성을 보완하기 위한 디자인을 보였으나, 수평관에서만 적용할 수 있는 문제점이 있다.

본 연구는 수직관에서 2상유동에 대하여 연구할 것이므로 기존에 연구되어진 단면이 일정하고 축대칭인 전극을 사용하였다.

본 연구에서는 링 전극 컨덕턴스미터를 이용하여 슬러그류에서 기공률 및 기공률 전달 속도를 측정하고자 한다.

2. 컨덕턴스미터

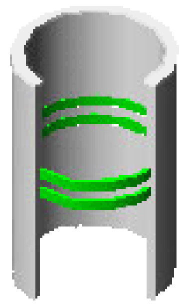

Fig. 2 Ring probe in circular tube

2.1 컨덕턴스 이론

2.2.1 평판형 전극

평판 전극이 Fig. 1과 같이 구성되었을 때, 식 (2.1) 과 같이 정의된 G^*는 식 (2.2)로 나타나게 된다[(1)].

$$G^* = G/\sigma l \tag{2.1}$$

$$G^* = \frac{K(m_1)}{K(1-m_1)} \tag{2.2}$$

이 때, G는 실제 전기전도도(Ω^{-1}), l은 분전극의 길이(m), σ는 액체의 유전률($\Omega^{-1}m^{-1}$)을 나타내고, $K(m)$은 식(2.3)으로 정의되는 제1종 완전 타원적분, m_1은 식(2.4)로 정의되는 변수이다[(1)].

$$K(m) = \int_0^{\pi/2} (1 - m\sin^2\theta)^{-1/2} d\theta \tag{2.3}$$

$$m_1 = \frac{\sinh\frac{1}{2}k(\lambda_2 - 1)\sinh\frac{1}{2}k(\lambda_1 - 1)}{\sinh\frac{1}{2}k(\lambda_2 + 1)\sinh\frac{1}{2}k(\lambda_1 + 1)} \tag{2.4}$$

2.2.2 링형 전극

2.2.1 절의 결과를 Fig. 2의 링형 전극에 적용시키면, 관내 환상류의 액막 두께 t는 다음의 식과

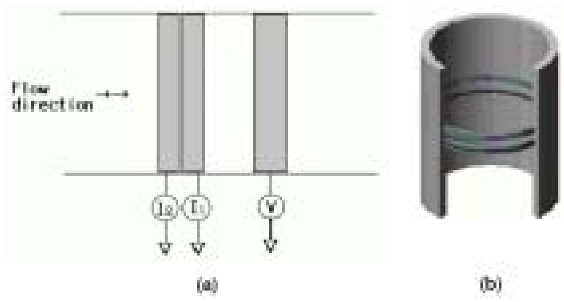

Fig. 3 Conductance meter with separated probe

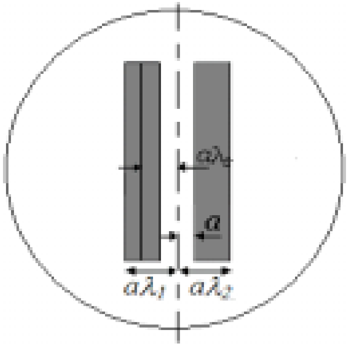

Fig. 4 Geometry of separated probe

같이 h로 환산된다.

$$h = -R\ln(1 - t/R) \tag{2.5}$$

2.2.3 분전극

일반적으로 액체의 온도가 1℃ 상승할 경우 전기전도도는 약 2.5% 상승한다. 따라서, 액막 측정 시 온도의 변화가 오차를 발생시키게 된다. 이를 보정하기 위해서 기포가 발생하는 전단에 기준 전극을 설치하여 액체의 전기전도도를 확인하는 방법이 있다.

하지만, 기준 전극의 설치가 불가능한 경우 Coney[(1)]가 제안한 분전극을 이용할 수 있다. 분전극은 Fig. 3 와 같이 반경 방향으로 나누어지고, 나누어진 전극 사이는 매우 얇은 절연막으로 절연된 전극이다. Fig. 3(a)의 I_1과 I_2로 각 흐르는 전류의 비는 액막의 두께만의 함수가 되고 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{F(\beta, m_1)}{F\left(\frac{1}{2}\pi, m_1\right) - F(\beta, m_1)} \tag{2.6}$$

여기에서 $F(\beta, m)$은 아래와 같이 정의 되는 제1종 완전타원적분이다.

$$F(\beta, m_1) = \int_0^{\beta} (1 - m_1 \sin^2\alpha)^{-1/2} d\alpha \tag{2.7}$$

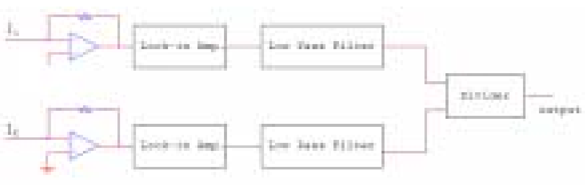

Fig. 6 Schematic of signal processing

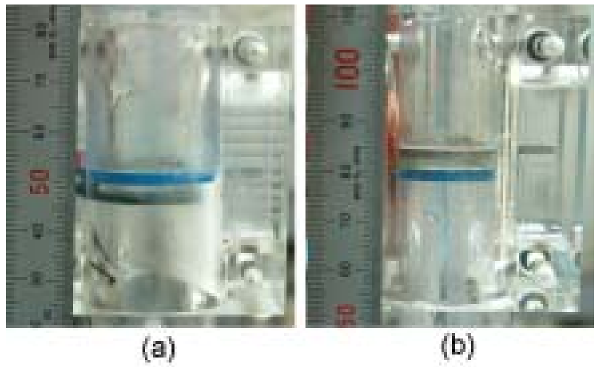

Fig 5. Photograph of impedance meter

그리고, m_1은 식 (2.4)로부터 주어지고, β는 아래의 식으로 주어진다.

$$\sin^2\beta = \frac{\sinh\frac{\pi}{2h}(\lambda_2 + 1)\sinh\frac{\pi}{2h}(\lambda_1 - \lambda_s)}{\sinh\frac{\pi}{2h}(\lambda_1 - 1)\sinh\frac{\pi}{2h}(\lambda_2 + \lambda_s)} \tag{2.8}$$

3. 실험장치

3.1 전극

전극의 형상은 액막두께가 2mm일 때 가장 좋은 분해능을 얻도록 하기 위하여 $\lambda_1=\lambda_2=\lambda=3$, $\lambda_s=2$가 되고, a=1mm가 되도록 제작하였다[(1)]. 분전극 사이는 얇은 절연테이프를 이용하여 절연하였다. Fig. 5는 제작된 전극 사진이다. 두 전극은 각각 원관 상부와 하부에 설치하였다.

3.2 전원 및 신호처리부

컨덕턴스미터에는 20kHz, 500mV의 정편파 전류를 인가하고, 120Hz로 신호를 획득하였다. 전극으로부터 나온 신호들은 Lock-in Amp.를 이용하여 이 컨덕턴스 성분만 분리하였다. 분리된 신호

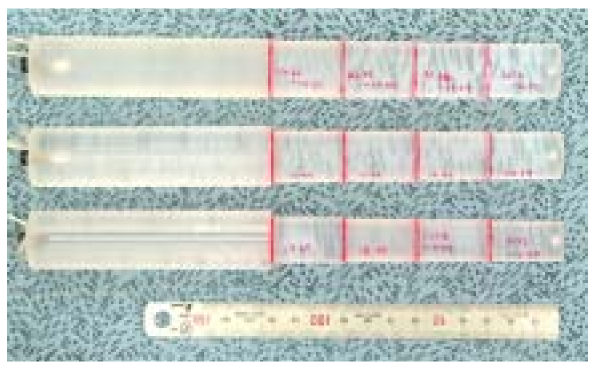

Fig. 7 Reference Rod

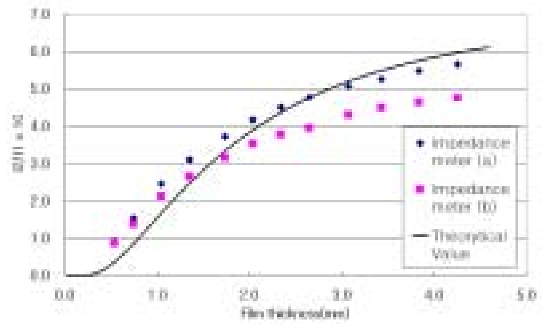

Fig. 8 Calibration result and theoretical value

들은 나눗셈 회로를 통하게 되고, 최종 신호인 I_1 과 I_2의 전류비는 오실로스코프를 통하여 측정하였다. Fig. 6는 신호처리부의 개략도이다.

3.3 컨덕턴스미터 보정

컨덕턴스미터를 보정하기 위하여 아크릴 봉을 이용하여 Fig. 7과 같이 기포를 모사하였다. 하나의 봉은 각각 4가지의 다른 직경을 갖는 부분과 관과 봉이 동일한 축상에 놓이도록 가이드 부분으로 이루어져 있다. 보정은 액막 두께당 40회 측정을 하였으며, 오차범위는 ±8.2%내에서 측정되었다. 보정 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

두 임피던스미터의 결과가 다른 것은 제작 과정에서 설계 a=1mm 로 정확하게 만들어지지 못하였기 때문이다. 이론값과 차이를 보이는 것은 이론값을 계산하는 과정에 분전극 사이가 매우 얇은 간격으로 절연되어 있다는 가정이 들어가지만, 실제 제작과정에서는 일정 두께를 갖기 때문에 나타나는 차이로 보여진다.

두 임피던스미터의 보정결과로부터 기공률과 전류비($x = I_2/I_1$)의 보정곡선을 구하면 Fig. 9 와 같고 임피던스미터(a)의 보정식은 식 (2.8)로 나타

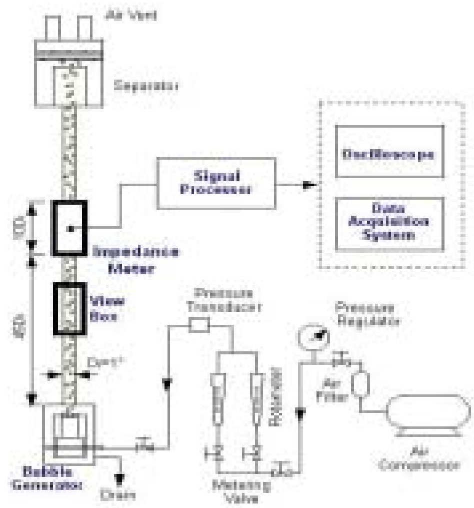

Fig. 10 Schematic of experiment facility

내고 임피던스미터(b)는 식 (2.9)로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = -0.0002x^6 + 0.0024x^5 - 0.0128x^4 + 0.0235x^3 + 0.0071x^2 - 0.1069x + 0.9998 \quad (2.8)$$

$$\alpha = -0.0002x^6 + 0.0014x^5 - 0.0027x^4 - 0.0161x^3 + 0.0675x^2 - 0.1415x + 1.0001 \quad (2.9)$$

3.4 슬러그 기포 측정

임피던스미터가 설치된 테스트부를 기포발생기가 설치된 관에 설치하여 실험하였다. 실험장치는 Fig. 10에 나타나 있다. Fig. 11은 실제 슬러그 기포를 생성하여 실험한 결과이다.

두 신호사이의 시간차이는 0.60초로 측정되었고, 임피던스미터 사이의 거리가 105mm이므로 슬러그의 속력은 175mm/s가 된다. 이는 이론식 $v_s = 0.35\sqrt{gd}$와 잘 일치하는 결과이다.

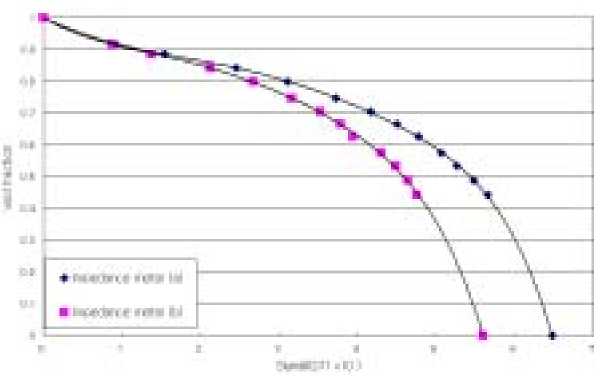

Fig 11. Calibration curve

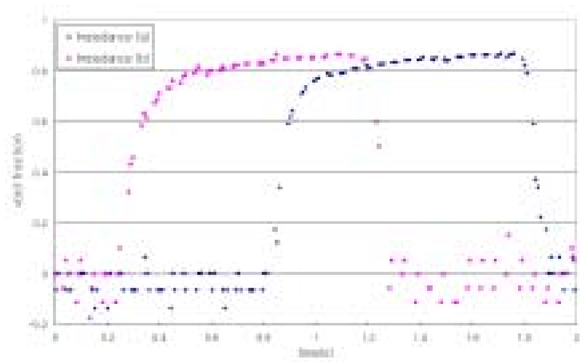

Fig 11. Measurement result for slug bubble

4. 결 론

본 연구를 통하여 컨덕턴스미터를 이용하여 슬러그류의 기공률 및 기공률 전달 속도를 측정하였다. 온도에 영향을 받지 않고 기공률을 측정할 수 있는 분전극을 이용하여 오차범위 ±8.2%에서 기공률을 측정하였으며, 실제 슬러그류에서 측정결과 측정된 속력이 이론치와 잘 일치함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업 및 원자력연구개발 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Coney, M.W.E., 1973, "The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two phase flow", *J. Phys. E: Scient. Instrum*. **6**, 903~910.

(2) Asali, J.C., Hanratty, T.J., Andreussi, P., 1985, "Interfacial drag and film height for vertical annular flow", AIChE J. 31, pp.895~902.

(3) Andreussi, P., Di Donfrancesco, A., Messia, M., 1988, "An impedance method for the measurement of liquid hold-up in two phase flow", Int. J. Multiphase Flow, 14, pp.777~785.

(4) Tsochatzidis, N.A., Karapantios, T.D., Kostoglou, M.V., Karabelas, A.J., , 1992, "A conductance method for measuring liquid fraction in pipes and packed beds", Int. J. Multiphase Flow, 5, pp.653~667.

(5) Fossa, M., 1998, "Design and performance of a conductance probe for measuring the liquid fraction in two-phase gas-liquid flows, Flow Measurement and Instrumentation", 9, pp.103~109.

(6) F. Devia, M. Fossa, 2003, "Design and optimization of impedance probes for void fraction measurements", Flow Measurement and Instrumentation, 14, pp.139~149.