〈응용논문〉 DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.11.1027 ISSN 1226-4881

3-ring 임피던스미터의 유체 전기 전도도 독립성에 대한 실험적 연구

김종록* ·안예찬** ·김무환*†
* 포항공과대학교 기계공학과, ** 부경대학교 의공학과

Experimental Study of Characteristics of Three-Ring Impedance Meter and Dependence of Characteristics on Electric Conductivity of Fluids

Jongrok Kim*, Yeh-Chan Ahn**and Moo Hwan Kim*†
* Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH,
** Department of Biomedical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received June 9, 2010 ; Revised August 26, 2010 ; Accepted September 9, 2010)

Key Words: 2-Phase Flow(2상유동), Void Fraction(기공률), Impedance Meter(임피던스미터), Temperature(온도), Electric Conductivity(전도도)

초록: 2상유동(기체-액체) 현상은 전자기발전, 원자력발전, 철강산업 등 유체 시스템에 자주 나타나는 현상으로, 2상유동을 파악하는 것은 유체 시스템의 안정성 및 성능을 위해 중요하다. 2상유동 특성 중 기공률은 압력강하와 열전달 성능을 결정하는 주요 인자로서 이를 측정하는 기술이 특히 중요하다. 유동의 임피던스를 측정하여 기공률을 산정하는 임피던스법은 전기적 특성을 이용하기 때문에 반응속도가 빨라 실시간 측정이 가능하며, 유동관 벽에 전극을 설치할 경우 유동 교란없이 측정할 수 있는 장점이 있다. Coney는 원형관에 적용할 수 있는 ring 임피던스미터를 이론적 연구하였다. 본 연구에서는 Coney가 이론적으로 제안하고 실험적으로 검증하지 못한 3-ring 임피던스미터의 유체 전기전도도에 대한 독립성을 실험적으로 검증하였다.

Abstract: A two-phase (gas-liquid) flow is a common phenomenon in fluidic systems, e.g., fluidic systems in the electro-magnetic or nuclear power generation industry and in the steel industry. The measurement of a two-phase flow is important for guaranteeing the safety of the system and for achieving the desired performance. The measurement of the void fraction, which is one of the parameters of the two-phase flow that determines the pressure drop and heat transfer coefficient, is very important. The time resolution achieved by employing the impedance method that can be used to calculate the void fraction from the impedance of the fluid is high because the electric characteristics are taken into account. Therefore, this method can be employed to accurately measure the void fraction without distortion of flow in real time by placing electrodes on the walls of the tubes. Coney analytically studied a ring-type impedance meter, which can be employed in a circular tube. The aim of this study is to experimentally verify the robustness of a three-ring impedance meter to variations in the electric conductivity of the fluid; this robustness was suggested by Coney but was not experimentally verified.

- 기호설명 -

a : 전극 간격
f : 오차인수
G : 실제 전기전도도 (Ω^{-1})
G^* : 무차원 전기전도도
ΔG^* : 무차원 전기전도도 오차
h : 무차원 액막 두께
Δh : 액막 두께 오차
I : 전류
$K(m)$: 제1종 완전타원적분, 식 (6) 참조
l : 전극의 길이(m)
m_1 : 상수, 식(7) 참조
R : 튜브 반경 (m)
t : 액막 두께 (m)
w : 복소평면 ($u+iv$)
z : 복소평면 ($x+iy$)
z' : 복소평면 ($x'+iy'$)

† Corresponding Author, mhkim@postech.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

β : 상수, 식(15) 참조
σ : 액체의 전기전도율 ($\Omega^{-1}m^{-1}$)
λ : 전극 위치
λ_s : 전극 분할 위치

1. 서 론

기체와 액체가 동시에 흐르는 2상유동 현상은 전자기 발전, 원자력 발전, 철강 산업 등 유체 시스템에 자주 나타나는 현상으로, 2상유동의 특성을 파악하는 것은 유체 시스템의 안정성 확보 및 성능 향상을 위해 필수 조건이다. 2상유동 특성 중 기공률은 압력강하와 열전달 성능을 결정하는 주요 인자로서 이를 측정, 제어하는 기술의 확보는 매우 중요하다. 이를 측정하기 위한 기술에는 급폐법(quick-closing method), 방사선감쇠법(radiation attenuation method), 초음파법(ultrasonic method), 임피던스법(impedance method) 등이 있다. 급폐법은 측정하고자 하는 유동을 측정용 챔버(Chamber) 등에 받아 부피나 질량을 측정하여 기공률을 산정하는 방법으로, 이 방법은 측정하는 동안 관내 유동을 측정용 챔버에 흘려야 하기 때문에 연속적으로 작동하는 시스템 적용할 수 없으며, 시간평균된 기공률이 계측되기 때문에 슬러그류와 같이 기공률이 변하는 유동에서는 적용할 수 없다. 방사선 감쇠법은 중성자나 X-ray 등을 측정하고자 하는 부분에 방사시키고 투과된 방사선을 반대쪽에서 측정하여 기공률을 산정하는 방법이다. 방사선 감쇠법은 방사선을 생성하기 위한 부대장치가 필요하고, 이를 설치하기 위해 많은 공간이 필요하기 때문에 공간적으로 복잡한 산업현장에서 쓰기에는 적합하지 않다. 초음파법은 관 외벽에 초음파원과 초음파센서를 부착하여 초음파원에서 발생한 초음파가 관을 통과하는 동안 반사되는 신호를 측정하여 기공률을 산정하는 방법이다. 초음파법은 기존 관의 절단 등과 같은 장치의 수정 없이 기공률을 측정할 수 있는 장점이 있지만, 기포류와 같이 기-액 경계면이 복잡한 유동에 적용할 수 없는 단점이 있다. 임피던스법은 2상유동에서 유동의 임피던스를 측정하여 기공률을 산정하는 방법이다. 이 방법은 전기적 특성을 이용하기 때문에 반응속도가 빨라 실시간 측정이 가능하며, 유동관 벽에 전극을 설치할 경우 유동 교란없이 측정할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 대부분 유체 시스템이 갖고 있는 관내 유동에서의 실시간 기공률 측정에 적합한 임피던스법에 대해 연구하고자 한다. 임피던스법과 관련하여 Coney[1]는 2개의 평판형 전극을 적용한 임피던스미터의 기초 이론을 발전시키고 실험적으로 검증하였다. 또한, 원형 관에 적용할 수 있는 ring 임피던스미터의 이론을 발전시켰다. 2개의 전극을 적용한 임피던스미터의 경우, 온도에 변화에 따라 변하는 액체의 전기전도도에 영향을 받기 때문에 이를 피할 수 있는 3개의 전극을 이용한 임피던스미터를 제안하고 이론해를 구하였다. Asali 등[2]은 처음으로 2-ring 임피던스미터를 적용하여, 수직관내 환상류를 측정하였다. Andreussi 등[3]은 수평관을 흐르는 환상류, 성층류, 기포류에서 2-ring 임피던스미터를 적용하여, 전극 사이의 간격이 신호에 미치는 영향을 실험적으로 확인하였고, 슬러그류에서 임피던스미터의 신호를 획득하였다. Tshochatzidis 등[4]은 2-ring 임피던스미터가 서로 다른 전극 간격을 갖는 경우에 대한 이론치와 실험결과를 비교하여 전극 간격에 관계없이 이론치와 실험결과가 잘 일치함을 보였다. 그리고 성층류에서 액막의 불균일성이 임피던스미터의 신호에 미치는 영향을 실험적으로 보였다. Fossa[5]는 환상류와 기포류에서 2-ring 임피던스미터가 서로 다른 전극 간격을 갖는 경우와 서로 다른 직경을 갖는 경우에 대한 실험을 통하여 Coney[1]의 이론치와 잘 일치하는 것을 확인하였다.

Coney[1]에 의해 제안된 3-ring 임피던스미터는 앞서 언급했듯이 온도에 변화에 따라 변하는 액체의 전기전도도에 영향 받지 않는 것으로 알려져 있다. 기존에는 2개의 전극을 이용한 임피던스미터를 사용할 때, 유체의 온도와 전기전도도 변화를 보정하기 위한 별도의 장치를 설치해야만 했다. 하지만, Coney의 이론과 같이 3개의 전극을 이용하여 온도에 대해 독립적으로 측정가능 하다면 별도의 보정 장치 및 보정 과정이 불필요하게 되므로 측정 시스템이 단순해 질 수 있다. 하지만, 지금까지 유체의 전기전도도 변화에 따른 독립성에 대한 실험적 검증이 이루어지지 않았다. 그래서 본 연구에서는 3-ring 임피던스미터의 액체 전기전도도에 대한 독립성을 실험적으로 검증하였다. 실험에 앞서 임피던스미터에 대해 정리하도록 하겠다. 자세한 내용은 참고문헌 [1]에서 술되어 있다.

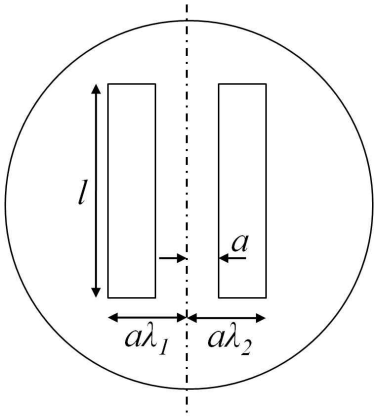


Fig. 1 Geometry of flat conductance meter

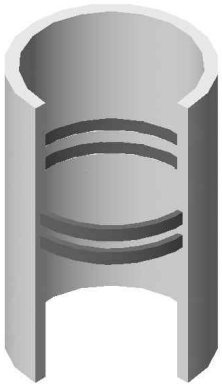


Fig. 3 Scheme of two-ring-type conductance meter

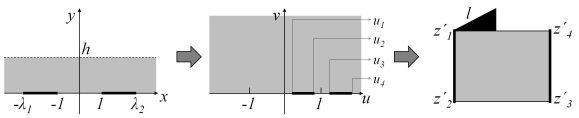


Fig. 2 Conformal transformation for uniform film

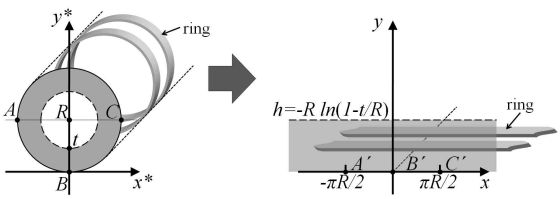


Fig. 4 Conformal transformation for curved surface

1.1 평판형 임피던스미터

Fig. 1과 같은 평판형 전극에 대한 해석은 등각사상법(conformal transformation method)을 통하여 곡면형 전극에 적용할 수 있다.[1] 평판형 임피던스미터의 전형적인 구조는 Fig. 1과 같이 두 전극을 나란히 배치하고, 전극 위로 유체가 존재할 때, 두 전극 사이의 유체 두께에 따른 전기전도도를 측정하는 구조이다.

전극의 구조가 Fig. 1과 같고 전극의 길이가 무한할 때와 같이 말단효과(end effect)가 없다고 가정하면, Fig. 2에 나타나 있는 것과 같이 두 번의 등각사상을 통하여 전극사이의 전기전도도를 계산할 수 있다. 계산의 편의를 위하여 a=1로 정하고 계산하였다. Fig. 2에서의 무차원 액막두께 h는 이후 ring 임피던스미터에 대한 설명에서 언급하겠다. 먼저, 전극의 실제 형상을 나타내는 z-복소평면 ($z=x+iy$) 을 w-복소평면 ($w=u+iv$) 으로 사상하면, 식 (1)을 만족하며 ($0 \le y \le h$) 는 ($u \ge 0$) 으로 사상된다.

$$w = e^{\pi z/h} \tag{1}$$

사상된 w-복소평면을 식 (2)에 따라 z'-복소평면 ($z'=x'+iy'$) 으로 사상시킨다. z'-복소평면의 실수축과 허수축은 각각 전위차와 전류장을 나타낸다.

$$\frac{dw}{dz'} = (u_1 - w)^{1/2}(u_2 - w)^{1/2}(u_3 - w)^{1/2}(u_4 - w)^{1/2} \tag{2}$$

이 때, u_1, u_2, u_3, u_4는 식 (1)에 다음 값들을 대입하여 얻어진 값이다.

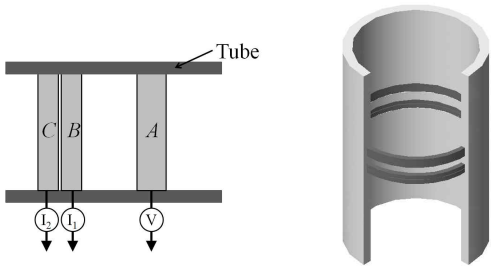
$$z_1 = -\lambda_1,\ z_2 = -1,\ z_3 = +1,\ z_4 = \lambda_2 \tag{3}$$

전류는 u_1과 u_2 사이에서 식 (2)를 적분한 값이고, 전위차는 u_2와 u_3사이에서 식 (2)를 적분한 값이 된다. 이 결과는 타원적분(elliptic integrals)의 항으로 표현되고, 식 (4)처럼 정의 되는 무차원화된 전기전도도(dimensionless electrical conductance) G^*를 도입하면 식 (5)로 표현된다.

$$G^* = G/\sigma l \tag{4}$$

$$G^* = \frac{K(m_1)}{K(1-m_1)} \tag{5}$$

이 때, G는 실제 전기전도도(actual electrical conductance, Ω^{-1}), l은 분리된 전극의 길이(m), σ는 액체의 전기전도율(electrical conductivity, $\Omega^{-1}m^{-1}$)을 나타내고, $K(m)$은 식 (6)으로 정의되는 제1종 완



(a) (b)

Fig. 5 Scheme of 3-ring-type conductance meter

전타원적분, m_1은 식 (7)로 정의되는 변수이다.

$$K(m)=\int_0^{\pi/2}(1-m\sin^2\theta)^{-1/2}d\theta \tag{6}$$

$$m_1=\frac{(u_4-u_3)(u_2-u_1)}{(u_4-u_2)(u_3-u_1)} \tag{7}$$

식 (1), (3), (7)로 부터 다음을 얻을 수 있다.

$$m_1=\frac{\sinh\frac{1}{2}\frac{\pi}{h}(\lambda_2-1)\sinh\frac{1}{2}\frac{\pi}{h}(\lambda_1-1)}{\sinh\frac{1}{2}\frac{\pi}{h}(\lambda_2+1)\sinh\frac{1}{2}\frac{\pi}{h}(\lambda_1+1)} \tag{8}$$

Abramowitz와 Stegun[6]에 의해 주어진 *K(m)*에 대한 수치해석적 근사를 통하여 식 (5)와 식 (8)을 계산함으로써, 임의의 전극형상에 대한 특성을 계산해 낼 수 있다.

1.2 Ring 임피던스미터

앞에서 도출한 평면형 전극에 대한 결과를 Fig. 3 과 같은 원형 관에 적용하기 위하여, Fig. 4의 z^*-복소평면을 z-복소평면으로 사상시킨다. 이 때 변환은 식 (9)를 따른다.

$$z=-iR\ln(1+iz^*/R) \tag{9}$$

원형 관 단면의 환상류 액막 두께가 t로 일정하다면, t는 z-복소평면의 일정한 무차원 액막 두께 h로 등가된다.

$$h=-R\ln(1-t/R) \tag{10}$$

사상된 결과를 앞에서 언급한 평면형 전극(Fig. 2)에 대한 해석을 이용하면 h로부터 G^*를 계산할 수 있다.

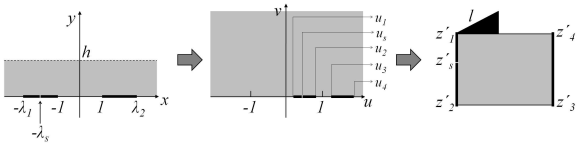


Fig. 6 Conformal transformation for three-ring-type conductance meter

전극의 적합한 측정 범위는 액막이 두꺼울 때, 요구되는 민감도와 전극으로 측정되는 전기전도도의 오차에 따라 결정된다. 이 때, 식 (11)을 따르는 오차인수(error factor)를 정의하는 것이 유용하다.

$$f=\frac{G^*}{h}\frac{dh}{dG^*} \tag{11}$$

액막 두께 오차 Δh는 식 (12)처럼 전극에 측정되는 전기전도도 오차 ΔG^*의 관계를 갖는다.

$$\frac{\Delta h}{h}=f\frac{\Delta G^*}{G^*} \tag{12}$$

오차인수 f는 각각 다른 전극의 적합한 측정범위를 비교하는데 쓸 수 있다. 예를 들어, 전기전도도가 3% 공차를 갖는 상수 값을 갖고 있으면, 10%의 h 공차는 그 전극의 특성 곡선상의 f=3.33에 해당하는 측정 범위를 결정짓는다. $f(h)$의 계산에는 식 (5), (8), (11)이 사용된다.

1.3 3-ring 임피던스미터

일반적으로 물의 온도가 1℃ 상승할 경우 전기전도율(conductivity)은 약 2.5% 상승한다. 따라서 동일한 액막에 대하여 온도가 다른 경우 측정되는 전기전도도가 일정하지 않게 된다. 이를 보정하기 위해서 기포가 발생하는 전단에 기준 전극을 설치하여 액체의 전기전도도를 보정하는 방법이 있다. 하지만, 이 방법은 기준 전극을 추가로 설치해야 하는 단점이 있고, 기준 전극을 설치할 수 없는 경우에는 임피던스미터를 사용할 수 없다. 별도의 추가 장치 없이 온도의 영향을 피하는 방법이 3-ring 임피던스미터를 사용하는 것이다. 3-ring 임피던스미터는 Fig. 5와 같이 전압인가용 전극(A)과 전류 측정용 전극(B, C)으로 구성된다. B, C 전극은 매우 얇은 절연막을 이용하여 전기적으로 절연된다. B, C 전극을 통하여 각

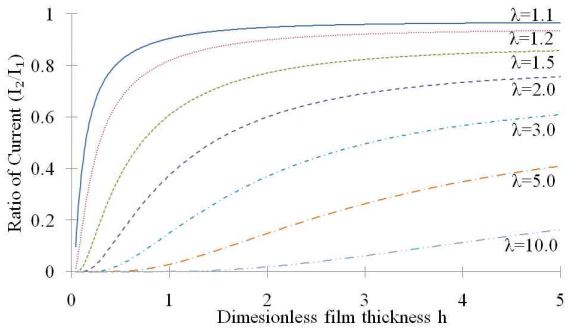


Fig. 7 The characteristics of probes with different values of $\lambda(\lambda=\lambda_1=\lambda_2)$ for three-ring-type impedance meter

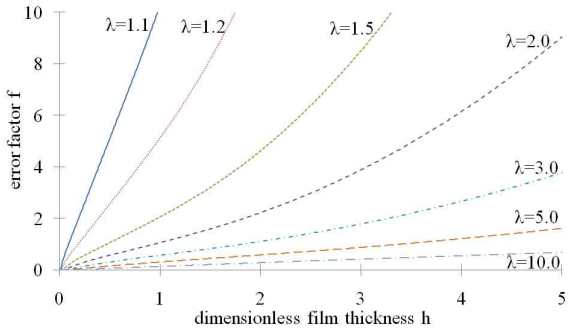


Fig. 8 The variation of the error factor f with h in cases of various $\lambda(\lambda=\lambda_1=\lambda_2)$ for three-ring-type conductance meter

각 전류 I_1과 I_2가 측정된다. 두 전류(I_1, I_2)의 비는 액막 두께에 따라 변하고, 온도에는 영향을 받지 않는다. 전류의 비가 온도의 영향을 받지 않는 이유는 A-B, A-C 사이에는 동일한 전압이 인가되므로, 옴의 법칙에 따라 전류의 비는 곧 A-B와 A-C의 전기저항비의 역수가 되어 전기전도율의 변화에 의한 영향이 상쇄되기 때문이다. 자세히 설명하면, A-B와 A-C의 각 저항은 전류가 흐르는 경로와 전류가 흐르는 물질(물)의 전기전도도에 의해 결정된다. 온도가 변하면 물의 전기전도율이 변하지만, A-B와 A-C의 전기전도율이 함께 변하므로 두 저항이 각각 분자, 분모에 위치하는 저항비는 전기전도율의 변화가 상쇄되어 온도에 영향을 받지 않게 되는 것이다.

두 전류 I_1과 I_2의 비는 다음과 같이 주어지고,

$$\frac{I_2}{I_1}=\frac{F(\beta,m_1)}{F\left(\frac{1}{2}\pi,m_1\right)-F(\beta,m_1)} \tag{13}$$

여기에서 $F(\beta, m_1)$은 아래와 같이 정의되는 제1종 완전타원적분이다.

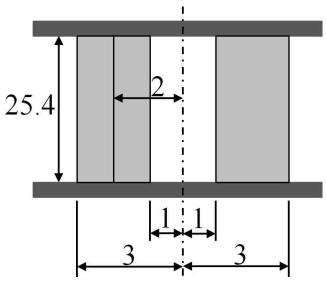


Fig. 9 Scheme of conductance meter(unit:mm)

Fig. 10 A set of conductance meter

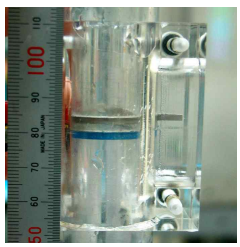


Fig. 11 Picture of conductance meter and guide block

$$F(\beta,m_1)=\int_0^{\beta}\left(1-m_1\sin^2\alpha\right)^{-1/2}d\alpha \tag{14}$$

그리고 m_1은 Fig. 6의 u_1, u_2, u_3, u_4와 식 (7)로 주어지고, β는 식 (15)으로 주어진다.

$$\sin^2\beta=\frac{(u_4-u_2)(u_s-u_1)}{(u_2-u_1)(u_4-u_s)} \tag{15}$$

위의 과정에 따라 3-ring 임피던스미터를 2-ring의 해석 과정과 동일한 과정으로 해석을 수행할 수 있다.

Fig. 7은 각 λ에 대한 무차원 액막두께 h와 3-ring 임피던스미터의 전류비를 해석한 결과이고, Fig. 8은 각 λ에 대한 h와 오차 인수 f를 해석한 결과이다. 전극의 분할 지점인 λ_s는 본 연구에서 전극의 중간지점인 (λ-1)/2로 하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치

Fig. 7의 결과와 같이 λ에 따라 임피던스미터 의적합한 측정 범위가 다르게 된다. 따라서 실험

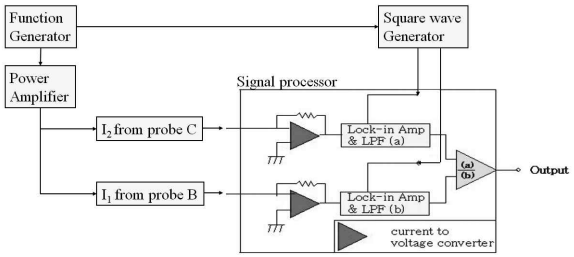


Fig. 12 Scheme of electric circuit for conductance meters

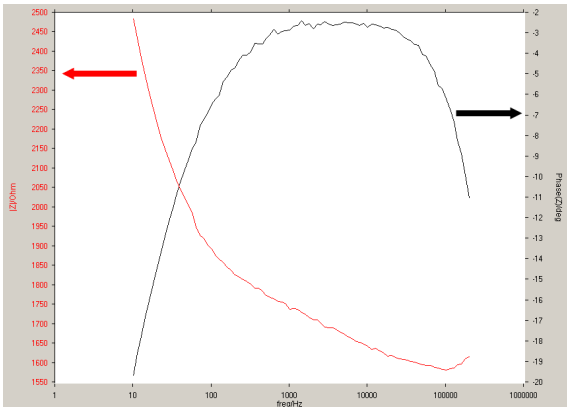


Fig. 13 Result of impedance measuring for conductance meter

조건에 맞게 λ를 결정해야 한다. 본 연구에서는 액막두께 0~2.5mm (h ~5)를 갖는 환상류에 대해 선형적 특성과 분해능을 동시에 만족하면서, error factor 3이하를 갖는 λ=3.0을 결정하였다. 실험부 제작의 용이성과 국부영역의 측정을 고려하여 Fig. 9와 같이 전극을 설계하였다. Fig. 10은 SUS316으로 제작된 전극의 개략도이다. 내경은 25.4mm이고 신호선과 연결하기 위해 링 한쪽에 작은 막대모양이 있도록 만들었다. 3-ring 임피던스미터의 이론은 전류 측정용 전극 사이가 간격 없이 절연되어 있다고 가정하지만 현실적으로 구현하는 것은 불가능하다. 그래서 본 실험에서는 20㎛의 두께를 갖는 절연테이프를 사용하여 Fig. 10과 같이 두 전극을 절연시켰다. 전압 인가용 전극과 전류 측정용 전극사이는 두께 2㎜의 아크릴(acryl) 링을 삽입하였다. 이렇게 제작한 임피던스미터는 내경 25.4mm의 아크릴 관에 조립되었고, 전극의 부식을 방지하기 위하여 아크릴 관과 플랜지 사이에 알루미늄 링을 넣었다. 각 부품을 조립할 때에는 누수방지를 위하여 실리콘을 사용하였다. 완성된 테스트부를 외부 충격으로부터

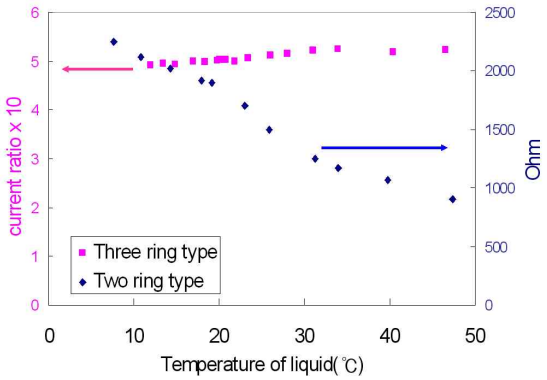


Fig. 14 Effect of temperature for three-ring-type and two-ring-type conductance meters (void fraction 0.533)

보호하기 위하여 보호대를 설치하였다. Fig. 11은 완성된 테스트부와 보호대를 설치한 사진이다. 3-ring 임피던스미터의 신호를 분석하기 위하여 Fig. 12와 같이 전기 회로를 구성하여 테스트부의 전극과 연결하였다.

2.1 실험결과 및 해석

임피던스미터의 이론은 임피던스미터가 저항성분만을 측정한다는 가정에서 시작한다. 따라서 실제 실험은 리액턴스 성분이 임피던스미터의 출력신호에 영향을 주지 않는 조건에서 이루어지도록 해야 한다. 본 연구에서는 이 조건을 찾기 위하여 스펙트로스코피(Bio-Logic SA, VMP2)를 이용하여 임피던스미터의 임피던스를 측정하였다.

Fig. 13은 상온에서 기공률이 0(zero)일 때 3-ring 임피던스미터의 임피던스를 스펙트로스코피를 이용하여 측정한 결과이다. 임피던스미터에 인가되는 전압의 주파수가 4kHz 부근에서 위상이 0(zero)에 가장 가까운 결과를 보였다. 이는 임피던스미터에 4kHz 부근의 주파수를 갖는 전원을 인가하면, 리액턴스 성분의 영향이 최소가 되는 것을 의미한다. 이 실험의 결과를 바탕으로 실험에 인가해 주는 전압은 4kHz의 주파수를 갖도록 하였다.

임피던스미터의 신호와 액체 온도와의 관계를 3-ring 임피던스미터와 2-ring 임피던스미터에 대하여 각각 실험하여 비교하였다.

3-ring 임피던스미터의 신호는 Fig. 12의 회로로 측정하였다. 2-ring 임피던스미터 실험에서는 3-ring 임피던스미터의 전류 측정용 두 전극을 하나로 연결하여 2-ring 임피던스미터로 작동할 수

있도록 하고, 앞서 설명한 스펙트로스코피로 측정하였다.

실험부의 아래쪽을 막고 임의의 기공률 0.533에 해당되는 아크릴 봉을 관 중심에 고정시켰다. 고온의 물을 실험부에 채운 후, 물이 냉각되는 동안 신호를 획득하였다. 저온영역의 실험은 가열한 물을 냉각시킨 후, 고온영역 실험과 동일한 방법으로 진행하였다. 물을 가열 후 냉각 시킨 것은 물에 녹아 있는 기체 조성차이에 의한 오차를 줄이기 위함이다.

Fig. 14는 물의 온도(10℃~45℃)에 따른 임피던스미터의 신호를 측정한 결과이다. 2-ring 임피던스미터의 신호에서 최소값과 최대값의 비가 0.42이고, 3-ring 임피던스미터의 경우에는 최소값과 최대값의 비가 0.92로 나타났다. 이 결과로부터 3-ring 임피던스미터가 2-ring 임피던스미터에 비해 온도 변화에 영향을 적게 받는 것을 확인 할 수 있었다.

3-ring 임피던스미터에서 온도에 따른 영향이 미세하게 나타나는 것은 Fig. 13의 실험결과에서 보듯이 임피던스의 위상이 0(zero)가 아니기 때문에 리액턴스 성분의 영향으로 발생한 결과로 예상된다.

3. 결 론

본 연구에서는 3-ring 임피던스미터의 유체 온도 변화에 대한 독립성을 실험적으로 검증하였다. 물의 온도가 10℃에서 45℃로 변화하는 동안 2-ring 임피던스미터의 신호에서 최소값과 최대값의 비가 0.42를 보였고, 3-ring 임피던스미터의 경우에는 최소값과 최대값의 비가 0.92로 나타났다. 이를 통해 3-ring 임피던스미터가 기준 전극 설치 등의 별도의 추가 장비 없이 유체의 온도에 영향에 독립적으로 작동할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술국제화사업 연구임 (M60602000005-06E0200-00410)

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, pp. 903~910.

(2) Asali, J.C., Hanratty, T.J. and Andreussi, P., 1985, "Interfacial Drag and Film Height for Vertical Annular Flow," *AIChE J.* 31, pp. 895~902.

(3) Andreussi, P., Di Donfrancesco, A. and 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. and 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) Abramowitz M. and Stegun I.A., 1964, Handbook of Mathematical Functions, Dover, New York.