

임피던스 방법을 이용한 기공율 측정에 대한 연구

김무환*, 양훈철**, 송철화, 정문기***

Void Fraction Measurements Using the Impedance Method

M.H. Kim, H.C. Yang, C.H. Song and M.K. Jung

Key Words : Void fraction, Two-phase flow, Impedance, Resistance, Capacitance, Electrode shape, Maxwell equation

Abstract

Impedance method was carried out to design the electrode that can measure the void fraction of the bubbly flow in pool reservoir. To find out the optimum electrode shape, Styrofoam-tests were performed in a specially designed acrylic reservoir. Three kinds of electrodes were designed to compare the characteristics of water-air flow. The resistance was increased as the void fraction increased and the capacitance was decreased as the void fraction increased. The resistance is a main parameter to express the nature of the water-air flow in impedance method. Almost all the values of impedance were involved in resistance. The degree of deviation from the mean-resistance values showed reasonable results. Electrode type-I expressed excellent results among the three electrode shapes. The impedance values in void fraction 0-10% were similar to those of Maxwell's equation. But the impedance values in void fraction 10-20% were not similar to those of Maxwell' equation because of the edge effect near electrode.

기호설명

D	: 전극의 직경	[mm]
DT	: 온도차	[K]
DV	: 전압차	[V]
I	: 전류	[A]
K	: 열전도도	[W/m.K]
r	: 전극의 반경	[mm]
R	: 저항	[Ω]
R*	: 무차원 저항비	
s	: 전기전도도	[Siemens/m]
S	: 형상계수	[m ⁻¹]
V	: 체적	[m ³]
W	: 전극간 거리	[mm]
α	: 기공율	
ε	: 유전율	

1. 서론

원자력을 비롯한 여러 유체기기에서 2 상유동의 올바른 이해와 측정방법의 개발은 많은 연구자들의 오랜 목표이었다. 이에 따라 이를 위한 기초 실험 연구는 그 중요성이 날로 부각되고 있으며 여러 기초실험 가운데서도 2 상 유동의 중요변수를 측정하는 기법의 개발 및 검증이 시급히 요구되고 있다.

본 임피던스 방법을 이용한 기공율 측정에 대한 연구는 특정 형태의 검침을 이용하여 2 상 유동장의 전기전도도나 커패시턴스의 값을 측정함으로써 유동장의 기공율이나 수위 등을 산정하는 방법이다. 일반적으로 물과 같은 전도성 물질의 경우에는 물-공기의 기공율, 액막 두께 그리고 수위 측정을 위해 전기전도도 방법(Electric conductivity method)⁽¹⁾을 이용한다. 그리고 HFC, HCFC 등의 냉매나 오일 같은 유체의 유동 시에는 전기전도도 방법이 곤란하며 이러한 물질의 기공율 측정 시에는 커패시턴스 방법(Capacitance method)을 이용한

* 포항공과대학교 기계공학과

** 포항공과대학교 기계공학과

*** 한국원자력연구소 열수력안전연구팀

다. 물과 같이 전기전도도가 큰 경우에 커패시턴스 방법을 적용하는 경우에는 그 적용에 신중을 기해야 한다.

임피던스를 이용한 측정방법²⁾은 크게 수위 검침법(Level probe method), 바늘 검침법(Needle probe method) 그리고 벽면 검침법(Wall probe method)으로 구분된다. 바늘 검침법은 2상 유동 시 액막의 두께를 측정하기 위해 벽면에서 유동쪽으로 수직하게 검침을 삽입하는 방법이다. 수위 검침법은 물의 수위측정 등에 이용할 수 있으며 이는 용기 안에 검침을 삽입하여 수위증가에 따라 전류의 값이 증가하는 원리를 이용한다. 벽면 검침법은 벽면에 검침이 들출되지 않도록 고안된 것으로 유동을 교란하지 않는 장점이 있다.

본 연구는 전기전도도 방식을 이용한 것으로 이 방법을 이용한 기공율 측정 시에는 액체-기체의 유동양식에 따라 기공율 측정센서의 성능이 차이가 나며, 이러한 단점을 보완하기 위하여 유동양식에 대한 의존도가 작은 센서형상 설계의 연구³⁾가 진행되어 오고 있는 실정이다.

본 연구는 2상 유동장의 전기전도도 값이 단상 유동장의 전기전도도 값과 비교하였을 때 변화하는 특성을 이용하는 방법을 응용한 것이다. 본 연구에서는 실제 유동에서 얻을 수 있는 결과들을 검증하기 위한 기초연구로서 유전율의 값이 매우 작아 공기를 모사할 수 있는 스티로폼을 이용하여 기공율 변화에 따른 임피던스 값의 변화 시험을 수행하였다. 또한 물-공기에 대한 기포류 시험장치를 구성하여 기공율 변화에 대한 임피던스 변화 시험을 수행하였다. 이는 동일한 축상에 중심을 갖는 두개의 실린더 형태로 고안된 3 가지 형태의 전극을 기포류가 발생하는 유동자에 삽입하여 기공율이 변화하는 경우에 대한 임피던스 값을 측정함으로써 기포류 측정에 적합한 전극형태를 선정하고 전극의 신뢰성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 스티로폼 모사장치 이용한 예비 실험

우선 스티로폼을 이용한 모의실험장치를 Fig. 1,2 와 같이 구성하였다. 이는 유전율의 값이 공기와 유사한 스티로폼을 이용하여 수조 내에 기포류의 상태를 모사하고 이 상태에서의 임피던스 값을 측정하여 실제 물-공기 유동에서 기공율을 측정할 수 있는 최적의 센서를 선정하기 위한 것이다.

2.1 기공율 측정기법

기공율은 2상유동 해석에 있어서 가장 기초적인 물리량으로서 기-액 2상유동의 전체체적 중의 기상의 체적비이며 식(1) 과 같이 표시된다.

$$\alpha = \text{기체체적} / \text{전체체적} \quad (1)$$

이러한 2 상유동 기공율의 측정방법으로는 순간개폐밸브 방법(Quick closing valve method), 저항검침법(Resistance method), 광학 검침법(Optical probe method)⁴⁾등 여러 가지 종류가 있다. 이들 중 본 연구에서 채택한 임피던스 방법을 이용한 기공율 측정방법(저항검침법)은 부가적인 후처리 과정이 필요 없고 반응속도도 빠른 장점이 있다.

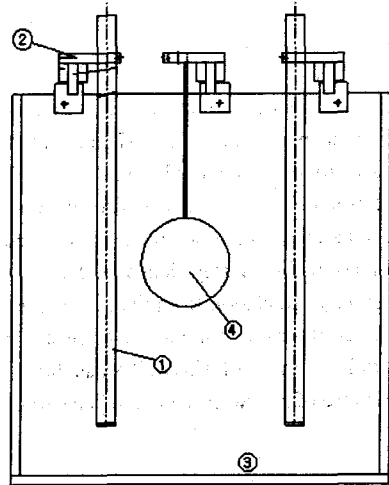


Fig.1 Schematic diagram of the Styrofoam simulator [①electrode ②traverse ③reservoir ④Styrofoam]

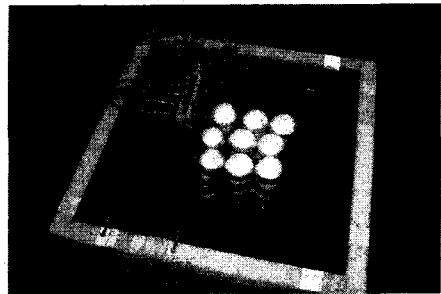


Fig.2 Photograph of the Styrofoam simulator

2.2 스티로폼 모사장치

2.2.1 주 시험부

Fig.1 은 스티로폼 기포 모사장치의 개략도를 나타낸 것이다. 이는 가로x세로x높이 각각 400x400x452mm 의 아크릴로 제작되었다. Fig.1 의 가

운데 부분에 있는 스티로폼 기포는 기포를 모사하기 위해 사용된다. 임피던스의 측정은 LCR-meter (모델명:HP-4285A)를 사용한다. LCR-meter는 2m의 보정용 케이블을 갖고 있으며 이를 통하여 본체와 임의의 거리를 두고 떨어져 있는 주 시험부까지 센서를 자유롭게 설치할 수 있다.

Fig.2는 실제 주 시험부를 사진 촬영한 것으로 상단부분에 LCR-meter로부터 연결되는 케이블의 끝단을 볼 수 있으며 이 부분이 전극과 연결되어 있다. 기포를 모사하는 스티로폼은 물 속에 잠겨 있는 형태이며 중심부와 외곽에 전극이 설치된 형태이다. Fig.2는 9개의 스티로폼 다발이 전극 사이에 배치되어 있는 형태이다. 스티로폼의 삽입 개수가 변함에 따라 물의 높이가 변화하므로 물의 높이를 일정하게 유지하도록 물의 양을 조절하였다.

2.2.2 스티로폼 기포 및 전극

Fig.3은 스티로폼 기포 모사시험에 사용된 스티로폼 기포와 전극의 사진을 나타낸다. 스티로폼 기포는 지름 50mm를 갖는 7개의 스티로폼을 실로 연결하고 그 끝에 고리를 연결하여 수조의 바닥에 고정하는 형태이다. 전극의 종류는 평판형, 7자형, 사각형이며 이를 스티로폼 주위에 설치하여 시험하였다. Fig.3의 ②, ③의 사각형 전극 그림은 사각형 전극의 상면, 측면에서 촬영한 사진을 나타낸다. Table 1은 전극의 형태를 비교한 것이다. 전극과 물의 높이는 350mm로 일정하게 유지하였다.

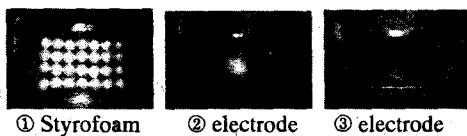


Fig.3 Photograph of Styrofoam & rectangular electrode

	평판형	7자형	사각형
전극 형태		□	□

Table 1 Electrodes used in Styrofoam simulation

2.3 전극 형상별 임피던스 측정

평판형, 7자형, 사각형의 전극을 이용하여 수조에서 스티로폼으로 기공율을 조정해 가면서 임피던스를 측정하였다. Fig.4는 사각형 전극에서 임피던스 측정 시 스티로폼의 개수, 위치 변화에 대해 상측에서 본 모습을 나타낸 것이다.

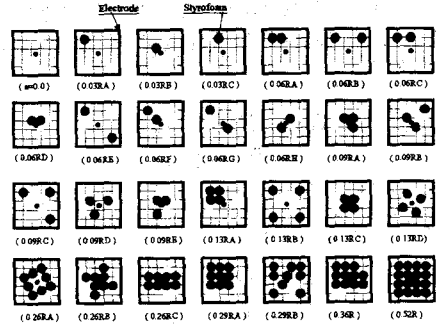


Fig.4 Styrofoam array distribution representing void fraction in rectangular electrode

2.4 주파수별 임피던스 측정

전극사이에서 물의 저항 성분을 LCR-meter를 이용하여 측정하였다. 측정범위는 주파수 75kHz ~ 30MHz이며 이 때 나타난 임피던스 성분의 값은 Fig.5에 나타내었다. 저항 성분은 1,000kHz 이하에서 거의 일정한 저항 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그리고 이보다 큰 주파수를 갖는 범위에서는 커패시턴스 성분이 점차 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 기포 모사시험은 계측기의 주파수를 75kHz에서 고정하여 측정함으로써 Resistance 성분이 지배적인 구간에서 데이터간의 비교를 할 수 있도록 하였다.

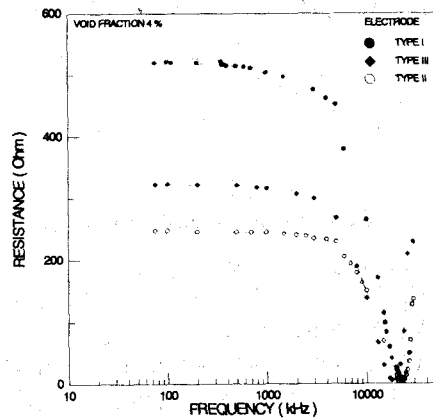


Fig.5 Impedance measurements with frequency

2.5 물의 전기전도도 측정

우선 물의 전기전도도를 측정하기 위하여 Fig.1과 같은 수조에서 물만 채워져 있는 경우의 저항을 측정하였다. 물은 순수한 전도성 물질로 생각하였다. Fig.6과 같이 실린더형 구리전극을 사용하여 지름과 전극간의 거리의 변화에 대한 물의 저항 값을 측정하였다. 전기전도도 계산을 위해 실린더 모양의 형상에 대한 형상계수를 계산하였고 이는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

여기서 전기전도도는 전극의 설치형상에 따른 형상계수를 계산하고 전류값과 전압값을 측정하면 계산할 수 있다.

$$I = S \cdot s \cdot DV \quad (2)$$

여기서 $S = 2\pi H / \cosh^{-1}[(W^2 - 2r^2)/2r^2]$

아래 식은 전기전도도 모형을 열전도 모형과 비교하여 나타낸 것이다.

$$Q = S \cdot k \cdot DT \quad (3)$$

$$I = S \cdot s \cdot DV \quad (4)$$

전기전도도를 계산한 결과 Fig.7 과 같이 물의 전기전도도가 일정하게 나타난다.

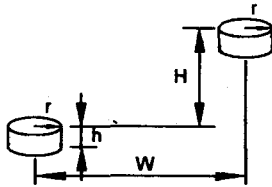


Fig.6 Electrode used in electric conductivity measurement of water

[$r=6.35\text{mm}$, $H=320\text{mm}$, $W/D=2\sim 20$]

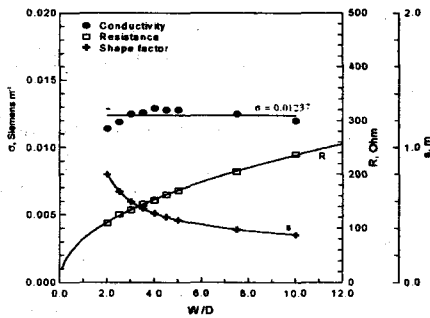


Fig.7 Electric conductivity of water

2.6 스티로폼 모사장치 시험 분석

수조에 기포를 가한 스티로폼 기포를 사용하여 기공율을 측정하는 경우 스티로폼 기포의 유전율($\epsilon=1.03$)은 물의 유전율($\epsilon=78.0$)에 비하여 무시할 정도로 작으므로 스티로폼을 공기로 모사할 수 있다고 가정한다. 전극 형상에 따른 임피던스 변화를 관찰함으로써 실제 물-공기 기포류 시험에 대한 기초정보를 제공하고 기공율을 효과적으로 검출할 수 있는 전극형태를 선정할 수 있다.

2.6.1 전극형태에 따른 임피던스 변화

전극형태에 따른 임피던스 변화에 대한 결과를 Fig.8 에 나타내었다. 이는 평판형, T자형, 사각형의 전극에 대한 비교실험 데이터를 선형적으로 나타낸 것이다. 평판형(이점쇄선), T자형(일점쇄선)의 무차원 저항값의 변화는 Maxwell equation(점

선)⁽⁶⁾상으로부터 벗어나 있으며 사각형의 전극의 결과(실선)가 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 이 실험에서의 고려할 점은 수조 안을 일정한 기공율로 유지하기 위해서는 수조 내의 모든 부분이 스티로폼으로 채워져 있어야 하지만 실험의 제약 때문에 전극형상의 내부에만 스티로폼을 부착한 것이다.

이로부터 사각형 형태의 전극 즉 동심축 상에 하나의 전극을 갖고 실린더 혹은 사각형의 또 다른 전극을 갖는 형태가 기공율 측정에 적절한 것으로 판단할 수 있다.

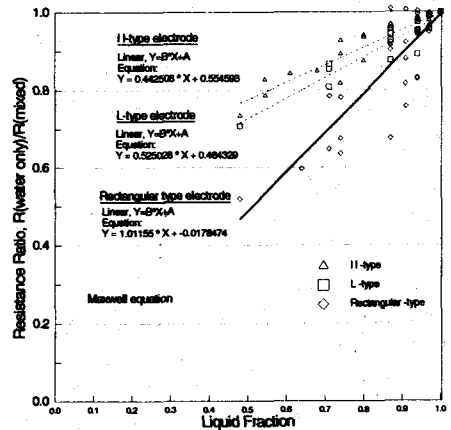


Fig.8 Resistance ratio with electrode shapes in Styrofoam simulator

3. 물-공기 기공율 측정 및 결과

본 장에는 스티로폼 기포 모사장치 실험을 통해 선정된 전극형태에 대해 3 가지의 변형된 모습을 제작하였다. 그리고 이 3 가지 전극형태에 대해 Fig.9 와 같은 물-공기 기포류 시험장치를 통하여 임피던스 측정실험을 함으로써 기공율을 효율적으로 측정하는 센서를 얻을 수 있다.

3.1 물-공기 기포류 시험장치

스티로폼 기포 모사장치 실험을 통해 선정된 전극형태에 대해 Fig. 10 과 같이 3 가지의 변형된 모습을 제작하였다. 또한 Fig.9 와 같은 물-공기 기포류 시험장치 제작을 통해 이 3 가지 전극 형태의 임피던스 측정실험을 함으로써 가장 효율적인 전극을 선정할 수 있다.

3.1.1 주 시험부

우선 실제 유동상황에 근접한 형태로 모사하기 위하여 ORNL/NUREG-65 report⁽⁶⁾에서 제시된 시험장치를 개선하여 Fig. 5 와 같이 물-공기 기포

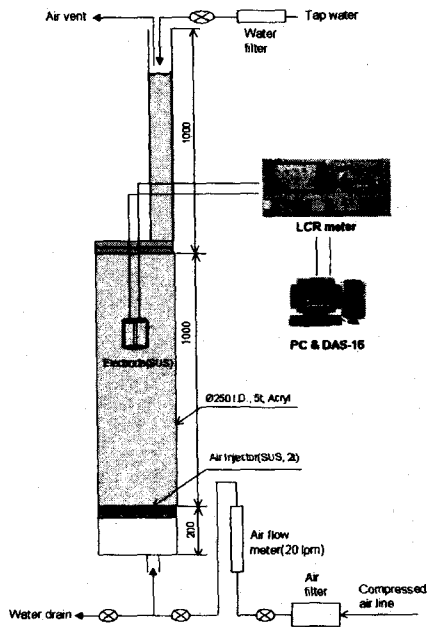


Fig.9 Schematic diagram of water-air flow

류 시험장치를 설계, 제작하였다. 실험에 사용된 수조는 내경 250mm, 두께 10mm, 높이 1m의 아크릴 수조이며, 수조의 하단부에 공기 기포의 주입을 위한 천공형 노즐이 원판형의 형태로 제작되었다. 공기노즐의 형상은 2mm 두께의 SUS로 가공되어 있으며 직경이 1mm인 천공노즐이 방사형으로 균일하게 49개 가공되어 있다.

노즐을 통한 공기의 주입은 약 10기압의 공기 공급원으로부터 수조하단의 공기 공급부 (air chamber)로 공급되도록 하였고 균일한 공기의 주입을 위해 총 4개의 주입부를 90° 간격으로 분산시켜 원판 주위에서 주입하도록 설계하였다. 또한 주입공기의 청정도를 유지하기 위하여 공기필터를 공기주입 전단부에 설치하였으며, 주입공기의 유량을 계측하기 위한 공기유량계가 설치되어 실제 공기의 유량을 계측하였다. 이것은 실제 기공율의 보정을 위한 보조장치로 구성하였다.

수조의 상단부에는 기공율의 정밀계측을 위한 수위상승부가 역시 아크릴로 제작되어 설치되었으며, 내경 60mm, 두께 10mm, 높이 1m로 구성되었다. 실험에 사용된 전극은 수조 윗면의 플랜지에 설치되어 있는 SUS 지지판의 하단부에 접촉체를 이용하여 고정하였고 전극의 연결선은 SUS 관내로 유도되어 전기저항을 계측하기 위한 LCR-meter에 수조 윗면을 통하여 연결하였다.

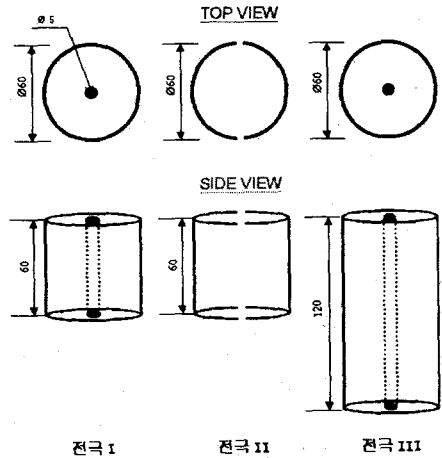


Fig.10 Void fraction sensors

3.1.2 전극

실험에 사용된 전극의 형상은 총 3종이며 이의 형상을 Fig.10에 나타내었다. 이 중 전극 I과 III은 동심원형으로 구성되어 있고 SUS로 제작되었으며 전극 II는 구리재질로 구성된 띠형 전극이다.

3.2 실험 방법

계측전극 주위에 2상 유동의 상황을 모사하기 위하여 수조 하단의 공기 주입부로부터 일정량의 공기가 천공노즐을 통하여 주입되며, 주입된 공기의 양, 즉 기공율은 공기유량계와 수위상승의 보정 곡선으로부터 얻어진다.

본 실험에서 행한 2상 유동의 유동양식은 기포류(bubbly flow)이며, 따라서 유동이 안정화 되는 위치인 50cm 이상에 실험전극을 설치하여 균일한 흐름에서의 전기신호를 얻어내었다. 설치 전극으로부터 유도되는 전기신호는 리드선을 통하여 LCR-meter에서 수치화되며, 이 중 저항, 커패시턴스 및 임피던스의 계측값을 시간 평균하여 측정값으로 하였다. 이로부터 기공율의 변화에 따른 전기저항의 변화량을 도식화하여 상관식을 얻어내었다. 공기의 주입에 따라서 수위는 상승하게 되며 수위의 증가에 따른 정압의 변화를 없애기 위하여 모든 실험은 수위가 상승하였을 경우 수조의

변수	범위
공기 유량	0~55 lpm
기공율	0~20 %
수온	25 °C
압력	1 atm
입력주파수	75 kHz

Table 2 Experimental parameters in water-air flow

상단, 즉 1m의 높이에 수위가 형성될 수 있도록 하였고 공기는 수조의 상단으로 배출되도록 하였다. 따라서 본 실험에서 제시하는 데이터는 정지 유체를 흐르는 공기기포의 정상상태 유동시의 설치 전극 간에 유도되는 저항성분이며, 실험 결과는 3종의 전극에 대한 측정값을 비교한 것이다. Table 2는 본 실험에서 사용된 실험변수의 범위가 나타나 있다.

3.3 물-공기 기포류 시험 분석

3.3.1 유량계 눈금 보정

물-공기 기포류 시험에서는 우선 사용하는 유량계 눈금과 기공율의 보정 곡선을 구하였다. 이 결과는 Fig.11에 나타나 있다. 기공율(혹은 수위 상승)은 유량계의 눈금증가에 대해 2차 곡선으로 나타나며 이러한 보정 곡선식을 이용하여 실제 기공율을 파악하였다.(수위상승법; Level swell method)

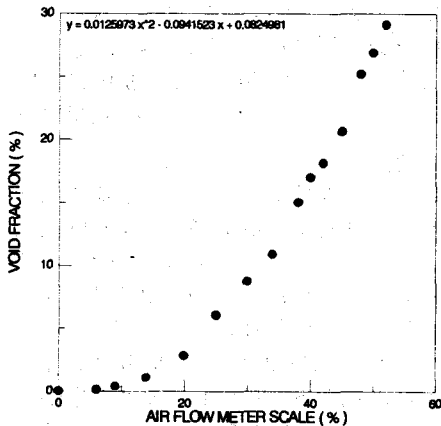


Fig.11 Correlation curve of void fraction

3.3.2 임피던스의 계측 오차

각 전극의 계측오차는 유동의 난동에 따라서 조금씩 달라질 수 있는데 본 실험의 경우에는 해석데이터의 난동이 전극 3종 모두 계측값의 0.5% 미만으로 신뢰할 수 있는 데이터를 보여주었다.

3.3.3 전극형태에 따른 임피던스 변화

기포류 2상 유동 상황에서 각 전극 형상별 임피던스 성분의 변화를 Fig.12, 13, 14에 나타내었다. Fig.12는 기공율의 변화에 따라 전극양단에 유도되는 전기저항의 변화이다. 기공율의 증가에 대해 전기저항 성분은 증가한다. 전극 I의 경우에는 기공율의 변화에 대해 전기저항 변화의 폭이 전극 II, III에 비해 2배정도 크게 나타나며 본 실험의 목적에 가장 부합되는 전극으로 볼 수 있다.

Fig.13은 기공율의 변화에 대한 전극양단에 유도되는 커패시턴스 성분의 변화를 보여주고 있으며 기공율의 증가에 대해 거의 직선적으로 감소하였다. 전극 II, III은 전극 I의 경우에 비해 데이터 분산정도가 크고 따라서 전극 I의 형상이 가장 적절한 전극형상임을 보여준다. 그러나 전체 임피던스 성분 중에 커패시턴스 성분이 차지하는 비율은 저항성분에 비해 거의 무시할 만하다. 따라서 전극 전체로 볼 때 전극간에 형성되는 임피던스 성분은 거의 모두가 전기저항 성분이 차지한다. 전극별로 전기저항 성분을 정밀 계측하여 기공율 상관식을 얻어내는 것이 안정된 데이터의 획득에 유리할 것으로 판단할 수 있다.

전극간에 형성되는 전기저항 성분은 작동 유체인 물과 공기의 전기전도도 차이에 의해 결정되며, 이 중에서 특히 물의 전기전도도는 계측값에 중요한 변수로 작용하게 된다. 본 실험에서 사용된 물은 일반 상용수이며 이는 공급원의 화학처리 방법에 따라 성질이 달라질 수 있다. 이 때에는 기공율 0의 값이 달라짐을 의미하며 전체적으로 상향 혹은 하향 조정된 결과를 보여 주게 될 것이다. 따라서 본 실험의 결과를 무차원 비교해석 하기 위하여 기포가 형성되어 있지 않은 순수액만의 저항에 대한 2상 유동 작동액 간의 저항성분비를 비교함으로써 기공율의 변화에 따른 전기저항 성분의 특성을 해석하고자 하였다.

$$R^* = R(\text{water}) / R(\text{mixture}) \quad (5)$$

$$R^* = 3a / (2 + a) \quad (6)$$

Fig.14는 기공율의 변화에 대한 이들 저항비(식 (5))의 값을 비교한 것이다. 전극 3종 모두 유사한 결과를 보여주며, 기공율의 증가에 대해 균일 구형 기포류의 이론해인 막스웰 방정식(식 (6))과 유사한 결과를 보여 주고 있다. 기공율이 10% 이상의 경우에 대해서는 실험값이 이론값에 비해 약간 벗어나는 결과를 보여 주고 있는데 이는 설치전극의 끝단 효과(edge effect)에 의한 결과로 파악된다.

시험결과에서 보면 무차원 저항값(R*)의 증가비율은 각각의 기공율이 0인 상태의 기준저항값을 기준으로 보면 모두 비슷하게 나타난다. 그러나 전극 I의 저항값은 전극 II, 전극 III의 저항값보다 절대값이 크게 나타난다. 그리고 저항의 값을 측정하여 기공율을 계산하는 방식에서는 저항의 절대값이 큰 전극 형태인 전극 I이 계측기의 정밀도와 전극 내부의 유동현상의 변화 및 커패시턴스 값의 변화 등을 고려할 때 다른 전극에 비해 측정의 정확도가 높은 것으로 판단된다.

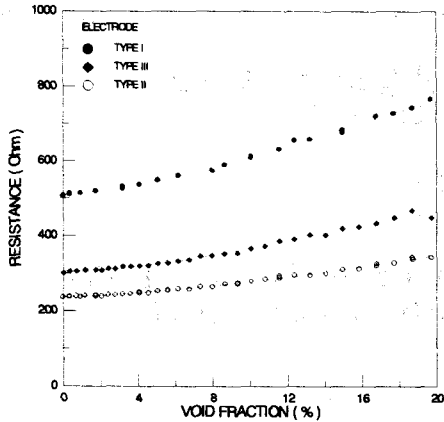


Fig.12 Resistance with void fraction in water-air flow

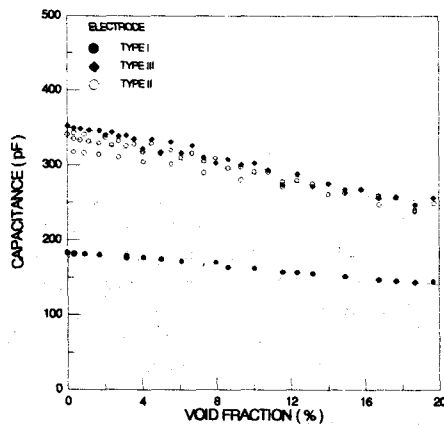


Fig.13 Capacitance with void fraction in water-air flow

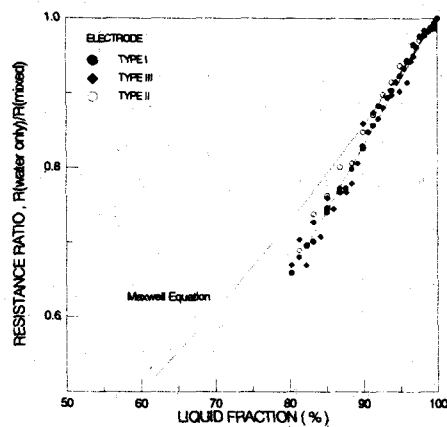


Fig.14 Resistance ratio with void fraction in water-air flow

4. 결론

정지유체 내를 수직으로 상향유동 하는 기포류의 기공율을 계측하기 위한 전극 형태별 임피던스 계측방법을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기공율의 증가에 대해 전기저항 성분은 증가하며, 커패시턴스 성분은 감소한다.
- 2) 전기저항 성분은 커패시턴스 성분에 비해 임피던스의 대부분을 차지하며 데이터의 분산정도 면에서도 우수한 값을 나타낸다.
- 3) 3종의 전극 형상 중 동심원형의 전극 I 이 가장 우수한 기공율 계측성능을 나타낸다.
- 4) 본 연구에서 고안된 전극을 사용하면 기공율 0%의 전기저항에 대한 2상유동의 전기저항비는 균일 기포류 가정에 의한 이론적인 맥스웰방정식에 기공율 0~10% 까지 근사한 결과를 나타낸다. 그 이후의 기공율 증가에 대해서는 전극형상의 끝단효과(edge effect)에 의해 약간 벗어나는 결과를 나타낸다.
- 5) 유전율이 낮은 스티로폼으로 공기를 모사하는 스티로폼 모사시험은 구형의 기포를 실험적으로 표현하는데 적절한 것으로 판단한다.

후기

본 연구는 원자력 증강기 연구 Program 의 일환으로 한국원자력연구소(KAERI)의 지원하에 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) 이상용, 김병주, 김무환, 1993, 이상유동열전달, 대영사
- (2) Kang, H. C. and Kim, M. H. 1992, "The Development of a Flush-Wire Probe and Calibration" International Journal of Multiphase Flow, Vol 18, No. 3, pp. 423~438.
- (3) Costigan, G. and Whalley, P. B., 1997, "Slug Flow Regime Identification from Dynamic Void Fraction Measurements in Vertical Air-Water Flows", International Journal of Multiphase Flow, Vol.23, No. 2, pp. 263~282.
- (4) 권정태, 1993, 커패시턴스 기법을 이용한 기공율 측정 및 유동양식 판별에 관한 연구, 포항공과대학교 석사학위논문.
- (5) Maxwell, J. C., 1873, A Treatise on Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford.
- (6) Moorhead, A. J., et al., 1980, "Fabrication of Sensors for High-Temperature Steam Instrumentation Systems", ORNL/NUREG-65 report.