

〈技術論文〉

개량된 다채널 임피던스형 측정기에 의한 기포율의 측정

송철화* · 정문기* · 노희천**

(1995년 8월 7일 접수)

Void Fraction Measurement by the Improved Multi-Channel Impedance Void Meter

Chul-Hwa Song, Moon Ki Chung and Hee Cheon No

Key Words : Void Fraction(기포율), Two-Phase Flow(2상유동), Measuring Sensor(측정센서), Reference Sensor(기준센서), Guard Electrode(가드전극), Impedance(임피던스)

Abstract

An improved multi-channel Impedance Void Meter (IVM) is developed to measure an area-averaged void fraction. It consists of a main sensor, a reference sensor and a signal processor. The sensor was designed to be flush-mounted to the inner wall of the test section to avoid the flow disturbances. Guard electrodes are used to obtain evenly distributed electrical field in a measuring volume. A reference sensor is also installed to eliminate the drift in void signal caused by the changes in electrical properties of working fluid. The signal processor with three channels is specially designed so as to minimize the inherent error due to the phase difference between channels. As an example of applications, the mean and fluctuating components of void fraction are measured for bubbly and slug flow regime, and it is shown that IVM has good dynamic resolution which is required to investigate the structural developments of bubbly flow and the propagation of void waves in a flow channel.

기호 설명

C_a : 유전 상수에 의한 커패시턴스 F	K : 컨덕턴스
C_p : 분극화에 의한 커패시턴스 F	R : 저항(Ohm)
C_a : 측정된 기포파 전파속도 (m/s)	T_j : 회로-j의 전달함수
D_b : 체적등가 기포직경 (m, mm)	V : 전압
f : 주파수 (Hz)	\bar{V}_j : 채널-j에서 측정된 평균 기포율 신호
g : 가속도 상수 (m/sec ²)	\hat{V}_j : 순간 기포율 신호 (= $\bar{V}_j + v_j$)
H_i : 축방향 거리 ($\Delta H = H_{i+1} - H_i$)	V_0 : 기포율 0인 경우의 기포율 신호 (= 10 Volts)
I : 전류 (Amphere)	v_j : 기포율 신호의 요동성분 (Volt)
J_f : 액상의 표면속도 (m/s)	Z : 임피던스 (Ohm)
k : 전기전도도	z_j : 기체만이 존재할 경우의 기포율 신호

그리스문자

α : 기포율, 무차원 또는 %

*회원, 한국원자력연구소

**한국과학기술원

- ϕ : CSDF의 위상인자(radian)
- i : 허수
- ρ : 밀도
- ω : 각 속도(radian)

상첨자

- : 평균치
- ~ : 요동성분

하첨자

- C : 커패시턴스성분
- exc : 여자
- e : 유효값
- f : 액상
- I : 허수식
- i : 측정방향 위치
- j : 신호처리기의 채널
- M : 측정치
- o : 기준값
- T : 전체값
- α : 기포율 α 인 경우의 측정치

1. 서 론

서로 다른 두 상이 혼합되어 흐르는 2상유동(two-phase flow)의 유동현상은 단상유동(single-phase flow)의 경우에 비해 매우 복잡하며, 따라서 2상유동이 발생하는 단순 배관내의 유동해석뿐만 아니라 배관계통의 설계를 위해 유동현상을 예측하는 것이 매우 어렵게 된다. 일반적으로 2상유동은 단상유동의 경우와 달리 두 상의 분포양상이 매우 다양하여 유동구조가 복잡하게 되며, 이와 관련된 유동변수로는 각 상의 혼합비율과 관련된 기포율(void fraction) 및 두 상간의 경계면 분포형태를 의미하는 유동양식(flow pattern) 등이 있다. 따라서 공학적 설계를 위해 사용되는 유동모델은 기포율의 크기와 유동양식의 차이가 계통내의 유동현상에 미치는 영향을 충분히 고려해야 하며, 이를 위해서는 기포율의 정확한 측정과 유동양식의 천이한계를 결정하는 것이 필요하게 된다.

2상유동 분야에서 측정기기의 개발에 대한 연구는 지난 20여년간에 걸쳐 꾸준히 진행되어 왔으며, 그 중에서도 기포율은 가장 관심을 많이 받아온 유

동의 매개변수이다. 기포율은 그 측정방법에 따라 국소(local), 선평균(line-averaged), 면적평균(area-averaged), 그리고 체적평균(volume-averaged) 기포율 등으로 구분되며, 이러한 측정결과를 해석결과와 비교하거나 또는 해석에 이용하기 위해서는 해석모델의 차원을 고려하여 그 측정방법이 선정되어야 한다.

본 논문에서 채택된 임피던스 측정법은 2상유동의 임피던스(impedance)가 각 상의 분포와 농도에 따라 달라진다는 사실을 이용하여 기포율을 측정하는 방법으로써, 측정센서가 유동을 교란시키지 않고 면적평균 또는 체적평균 기포율을 측정할 수 있는 적합한 방법으로 알려져 왔다. 이는 Olsen,⁽¹⁾ Merilo 등⁽²⁾에 의해 사용되기 시작하여, 최근에는 여러가지 형태의 전극관이 개발되었다.⁽³⁻⁷⁾

Merilo 등⁽²⁾과 Snell 등⁽³⁾은 폭이 큰 6개의 전극으로 이루어진 측정센서에 회전형 전기장을 공급하여 기포의 분포특성 변화에 따른 기포율 측정기의 응답특성을 개선하였다. Tournaire⁽⁵⁾는 원형관에서의 전극의 접수비 영향에 대한 체계적인 연구를 통하여, 한 쌍의 전극으로 이루어지는 측정센서에 대하여 원호각이 90° 인 경우가 상의 분포특성에 의한 영향이 가장 작음을 밝혔다. 또한 Geraets 등⁽⁶⁾과 Klug와 Mayinger⁽⁷⁾는 2상유동의 커패시턴스(capacitance) 차이를 이용하여 기포율의 측정을 시도하였다. 그러나 기존 연구^(2,3,6,7)에서는 유로내 기포의 분포특성에 따른 기포율 측정기의 출력변화의 민감도를 개선하기 위하여 폭이 큰 전극을 채택함으로써 기포율의 공간분해능이 매우 불량한 결과를 초래하였다. 그리고 Tournaire⁽⁵⁾는 각 상의 분포특성에 의한 영향을 최소화하고 공간분해능을 개선하기 위하여 가드전극을 채택하였으나, 이를 전기적으로 차폐시키지 않아 본래의 목적을 달성하지 못하였다.

따라서 본 논문에서는 유로내 기포의 분포특성의 영향을 최소화하고, 공간분해능을 개선하기 위하여 가드전극 본래의 기능을 채택한 임피던스형 기포율 측정기의 개발내용에 관하여 기술하고자 한다. 본 연구에서 개발된 측정기는 기포율 변화에 대한 동특성 즉, 시간적, 공간적 분해성능이 우수하여 기포유동의 발달구조 규명과 기포파(void waves)의 전파특성 연구에 적합한 것으로 나타났다. 기본적인 측정원리와 이를 적용하여 설계된 측정기의 구조에 대해 살펴본 후, 실제로 수직 원형관내에 물

-공기 혼합물이 존재할 때 발생하는 유동구조의 변화에 대하여 살펴보았으며, 또한 기포파의 전파특성을 측정함으로써 본 측정기의 성능을 확인하였다. 마지막으로 특수한 측정환경에 적용시의 문제점 및 개선방향에 대해 기술하고자 한다.

2. 기포율 측정원리

유로내에 존재하는 2상류 혼합물중 어느 한 상이 차지하고 있는 체적분율(volume fraction)은 두 상의 전기적 성질이 매우 다를 경우 혼합물의 임피던스를 측정함으로써 결정될 수 있다.⁽¹⁾ Fig. 1(a)에서와 같이 임의의 두 전극 사이에 유체가 흐르고 있는 경우 전극간에 존재하는 전기적 성질은 Fig. 1(b)와 같이 표현될 수 있으며, 이 때 두 전극에 의해 측정되는 임피던스(Z)는

$$Z(f) = \left[\frac{1}{R + \frac{1}{i2\pi f C_p}} + i2\pi f C_d \right]^{-1} \quad (1)$$

와 같이 표현된다. 여기서 R 은 유체의 전기전도도(conductivity)에 의한 저항, C_p 는 전극 근처에 위치하는 유체의 분극화(polarization)현상에 기인되는 커패시턴스, C_d 는 유체의 dielectric 상수에 의한 커패시턴스, 그리고 f 는 두 전극에 가해지는 교류전원의 공급 주파수이다.

2상유동의 한 예로서 전극 사이의 유동물질이 기상과 액상이 혼합되어 흐르는 2상류 혼합물인 경우에 기상의 전기전도도와 dielectric 상수가 액상의 값보다 매우 작다고 가정할 때 R, C_p, C_d 는 각각 다음과 같은 성질을 갖게 된다. 즉, 저항 R 은 액상의 전기전도도와 기포율(α)의 변화에 영향을 받고, C_d, C_p 는 기포율 이외에 액상의 dielectric 상수와 공급전원의 주파수(f)에 영향을 받게 된다. 따라서 측정대상 유체가 결정되어서 이들의 전기적 특성을 알 수 있게 되면 측정되는 임피던스는 기포

율에 따라 변화하게 되며, 이러한 원리를 이용하여 기포율을 측정하는 기기를 “임피던스형” 기포율 측정기(impedance void meter)라 한다.

임피던스는 식 (1)로부터 알 수 있는 바와 같이 저항(R)과 커패시턴스(C_p, C_d) 성분으로 구성되어 있으며, 이들 두 성분의 크기는 공급전원 주파수의 선정값에 따라 달라지게 된다. 이 때 저항성분을 크게 하여 기포율을 측정하는 방법을 “저항형” 또는 “컨덕턴스형” 기포율 측정기라 하고, 커패시턴스 성분을 크게 하여 측정하는 방법을 “커패시턴스형” 기포율 측정기라 한다. 물-공기 혼합물의 경우와 같이 액상의 전기전도도가 매우 클 경우 커패시턴스 성분을 측정하기 위해서는 매우 큰 공급 주파수를 필요로 하며, 이 경우 외부의 교란이 측정계통에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 저항성분을 크게 하는 것이 유리하며, 이를 위해서는 커패시턴스 성분(C_d, C_p)의 영향을 최소화시켜야 한다.

두 전극에 의해 측정되는 임피던스는 다음과 같이 저항성분만으로 표현될 수 있으며

$$Z(f) \approx R, \quad (2)$$

이를 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{2\pi f C_p} \ll R \ll \frac{1}{2\pi f C_d} \quad (3)$$

두 전극에 의해 측정되는 임피던스에 영향을 미치는 인자로는 2상류 혼합물의 기포율 이외에 두 상의 분포형태, 유체의 전기적 성질 및 그에 영향을 미치는 인자 등이 있다.

두 전극 사이를 흐르는 2상류 혼합물의 기포율을 측정하는 원리는 Fig. 2와 같은 단순한 회로를 통하여 살펴볼 수 있다. 두 전극 사이에 가해지는 공급전압을 V_{exc} , 전극 사이의 2상류 혼합물에 의해 야기되는 임피던스를 Z_e , 기포율 측정기의 전기회로에 설치되는 저항을 R_M 이라 하면, 회로내를 흐

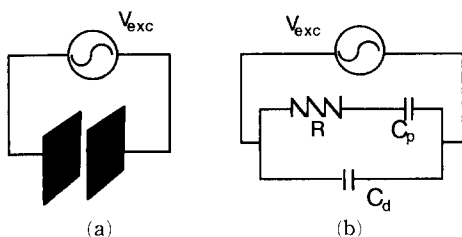


Fig. 1 Electrical properties between electrodes

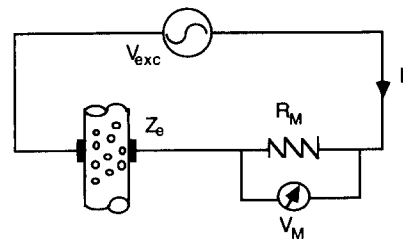


Fig. 2 Simplified diagram showing basic principle of I. V. M.

르는 전류 I 는

$$I = \frac{V_M}{R_M} = \frac{V_{exc}}{|Z_e(f)| + R_M} \quad (4)$$

와 같이 표현되고, 이 때 회로내의 저항(R_M)이 $|Z_e| \gg R_M$ 의 조건을 만족하도록 선택될 때 전류 I 는 2상류 혼합물에 의해 야기되는 임피던스(Z_e)에 의해 변화되며, 따라서 기포율 측정기에 의해 측정되는 전압(V_M)은 전극 사이의 임피던스에 직접 영향을 받게 되고, 결국 측정전압은 기포율과 직접 관련된 정보를 제공하게 되는 것이다.

3. 기포율 측정기의 설계

3.1 측정기의 설계인자

기포율 측정기를 설계하기 위해서는 사전에 측정기의 응답특성과 정확도 등에 영향을 미치는 제반 인자들의 영향을 충분히 파악하고, 측정되는 기포율의 요구특성을 고려하여야 한다. 기포율의 측정에 영향을 끼치는 인자를 요약하면 다음과 같다. 먼저 기하학적 인자로는 유동채널의 형태, 2상류 혼합물을 구성하는 각 상의 분포형태 및 전극의 형태와 크기 등이 있으며, 유체의 전기적 특성과 관련된 인자로는 공급전원의 주파수, 측정대상 혼합물을 구성하는 각 상의 전기적 특성, 유체의 온도 변화, 그리고 전극의 전기적 특성 변화 등이 있다. 또한 측정되는 기포율의 요구특성으로서는 기포율의 공간적 분해능 및 기포율 변화의 시간적 분해능 등을 고려해야 한다. 따라서 기포율의 성능에 영향을 미치는 제반 인자들의 특성을 먼저 살펴보고자 한다.

3.1.1 공급 전원

전극에 가해지는 공급전원으로는 통상 교류전원을 사용하는데, 그 이유로서는 전극과 유동물질 사이의 전기화학반응에 의한 유동물질의 성분변화를 방지하고, 또한 전극 근처에서의 유동물질의 분극화현상을 방지하기 위함이다. 이외에도 측정기의 성능에 영향을 미치는 인자로는 공급전압, 교류전원의 주파수 등이 있다.

교류전원의 주파수는 임피던스형 기포율 측정기의 성격을 결정하고, 그의 기능에 영향을 미치는 가장 중요한 인자이다. 전술한 바와 같이 기포율의 측정방식 즉, 저항형 또는 커패시턴스형에 따라 공

급되는 주파수의 범위가 달라져야 하기 때문이다. 저항형 측정기의 경우 저주파수에서 발생하는 분극화 현상 및 외부의 저주파 교란을 방지하고, 또한 고주파수 영역에서 그 영향이 증대하게 되는 커패시턴스 성분을 최소화하기 위해서는 즉, 식 (3)을 만족하기 위해서는 $2 \text{ kHz} < f \ll 1 \text{ MHz}$ 범위를 갖는 전원이 공급되어야 한다. 본 설계에서는 10~40 kHz의 범위내에서 가변 공급시킬 수 있도록 하여, 그의 영향을 살펴본 후 적정 주파수를 선택하여 사용하였다. 그러나 이러한 적정 주파수 값은 사용된 전극의 크기 및 형상, 채택된 측정회로, 또는 사용된 유동물질의 종류에 따라 달라질 수 있다.

3.1.2 측정센서의 형상

기포율 측정기의 측정센서(measuring sensor)는 여러 개의 전극으로 구성될 수 있으며, 이러한 측정센서의 형상을 결정하는 요소로는 전극의 개수와 폭 등이 있다. 측정센서의 가장 간단한 구성으로는 서로 마주보는 한 쌍의 전극들로 이루어지며, 전극 쌍의 개수를 늘림에 따라 또다른 형상을 갖출 수 있다. Tournaire⁽⁵⁾에 의하면 원호각이 90°인 경우가 분산변수가 최소가 되고, 또한 등전위선(equipotential line)이 가장 고르게 분포됨을 밝혔다. 따라서 한 쌍의 전극으로 이루어진 측정센서의 경우 점수비가 0.5일 때 기포의 분포특성의 영향이 가장 작게 받음을 알 수 있다.

전극의 폭은 측정센서의 측정체적과 직접 관련되는 요소로서, 요구되는 기포율의 공간분해능에 영향을 미친다. 전극의 폭이 크면 클수록 측정체적도 증가하여 측정기로부터 얻어지는 정보는 체적평균값에 해당되며, 이 때 측정값의 공간분해능은 불량하게 된다. 그러나 전극의 폭이 작아지면 측정체적이 작아져서 면적평균값에 해당되는 정보가 얻어지며, 또한 공간분해능도 향상되게 된다. 따라서 측정목적에 따라 전극의 폭이 결정되어야 한다.

그러나 전극의 폭이 매우 작은 경우 전극의 끝단 부근에서 형성되는 에지효과(edge effect)에 의해 측정체적 가장자리에서의 전기장이 휘게 되고, 이러한 휨은 측정체적 중심부의 영향을 과도하게 받는 결과를 초래한다.⁽⁹⁾ 일반적으로 측정체적의 중심부가 가장자리에 비해 국소 기포율이 크므로, 에지효과는 결과적으로 실제의 기포율보다 큰 값을 지시하도록 하게 된다. 전극의 폭이 유로의 유효직경보다 작은 경우에 발생할 수 있는 에지효과는 가

드전극(guard electrode)을 측정전극(detecting electrode)의 좌우에 설치하여, 측정전극 주위의 전기장을 균일하게 함으로써 제거할 수 있다.⁽⁵⁾ 이 때 가드전극에 가해지는 전원은 측정전극의 경우와 동일하게 공급되나, 전기적으로 차폐시킴으로써 측정체적내의 전기장을 균일하게 해야 한다.

그러나 가드전극을 차폐시키지 않는 경우⁽⁶⁾에는 이웃하는 측정전극과의 거리가 가까울 때 전기장이 확대되고, 이로 인해 가드전극과 이웃하는 측정전극 사이에 상호작용(cross-talk)이 발생하여 정확한 기포율 정보를 얻을 수 없게 된다. 따라서 측정되는 기포율의 공간분해능을 향상시키기 위하여 측정전극의 폭을 작게 할 경우는 가드전극을 사용하여 에지효과를 제거할 수 있으며, 이때 가드전극은 반드시 전기적으로 차폐시킴으로써 cross-talk 문제를 제거해야만 한다.

3.1.3 유동매질의 전도도 변화

전기적 물성치가 크게 다른 두 물질이 혼합되어 흐르는 유동물질의 기포율을 측정할 때 전기전도도가 큰 물질의 전도도 값이 시간에 따라 변화하는 경우에는 동일한 기포율을 가진 혼합물이 흐르더라도 시간에 따라 다른 기포율이 측정되게 된다. 이와 같이 유동물질의 전기전도도 변화에 영향을 끼치는 인자로는 유체의 온도변화 및 유체에 포함된 불순물의 농도변화 등이 있다.

이러한 문제는 유로내에 기준센서(reference sensor)를 설치함으로써 해결될 수 있다. 측정센서와 동일한 구조로 된 기준센서는 전기전도도가 큰 유동물질만이 존재하는 유로에 설치되어, 기포율이 zero인 경우의 측정전극간의 저항을 측정하며, 2상류 혼합물이 존재하는 위치에 설치된 측정센서로부터의 신호를 기준센서의 신호로 보정함으로써 시간적으로 변화하는 온도 및 이물질 농도의 영향을 보상할 수 있게 된다. 일반적으로 전도성 유체(예: 물)의 저항은 온도상승에 따라 매우 감소하게 된다. 유동회로내 기준센서의 상류측에 필터를 설치함으로써 기준센서와 측정센서가 설치된 유로내의 유동물질의 이물질 농도가 크게 변하지 않도록 할 수 있다.

3.1.4 전극 및 절연재의 특성

전극물질의 전기적 특성으로는 교류전원의 공급시 전극과 유동물질간의 전기화학적 반응성 여부

와, 반응에 의한 전극표면의 성분변화 등에 의한 전극의 전기적 특성변화 등이 있으며, 이와 같은 전극의 전기적 특성변화는 신호의 불균형을 초래할 수 있다. 따라서 전극의 재질은 부식성, 마모성, 전기화학 반응성 등 전기적 특성의 변화를 초래할 수 있는 사항을 고려하여 선정되어야 한다.

센서가 설치되는 유로부분의 재질이 전기적 절연물질로 되어 있지 않는 경우에는 전극과 이웃하는 전극 사이, 그리고 전극과 유로벽 사이에 전기적 절연물질을 설치함으로써 이들 사이의 전기적 흐름을 차단해야 한다. 이와 같이 절연물질을 사용할 필요가 있는 예로서, 열수력 관련 실험시 고온고압 조건하에서 견딜 수 있도록 전도성 물질을 유로의 재질로 선택하는 경우이다. 이 때 설치되는 전기적 절연물질은 전기적 특성 등의 설계요건 부합여부 이외에 가공 난이도, 마모성, 부식성 및 열충격성 등의 사항을 고려해야 한다.

3.2 센서의 설계

기포율 측정기의 센서는 측정센서와 기준센서로 이루어져 있다. 기포율 센서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 서로 마주보는 한 쌍의 측정전극과 그에 이웃하는 두 쌍의 가드전극으로 구성되어 있다. 이 때 가드전극은 측정전극과 동일한 공급전원이 가해지나, 높은 입력 임피던스에 의해 전기적으로 차폐시킴으로써 측정체적내 균일한 전기장을 제공하는 역할만을 할 뿐, 측정값에 직접 영향을 주지 않도록 하였다.

전극의 원호각은 90°로 하여 전극의 접수비가 0.5가 되도록 하였으며, 전극의 두께는 1 mm로 하였다. 측정전극의 폭은 측정체적의 크기 및 공간분해능에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서, 기포율의 요동성분 변화에 민감하고, 또한 짧은 파장을 갖는 기포파의 전파특성을 측정하기 위해서는 전극의 폭이 좁아야 하므로 10 mm의 값을 택하였다. 그리고 전극의 재질로는 부식 방지를 위해 스테인리스강을 사용하였다. 본 기기의 성능 확인을 위하여 측정센서 세 개가 70 mm의 간격을 두고 연속되어 있는 측정스플을 제작하였는데, 이에 대한 제원과 형상이 Fig. 3에 나타나 있다.

유동물질의 온도 및 불순물의 농도 변화에 의한 영향을 보정하기 위해 기준센서를 설치하였는데, 이는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 스트레이너의 하류측과 기액혼합기의 상류측 사이 즉, 액상만이 존

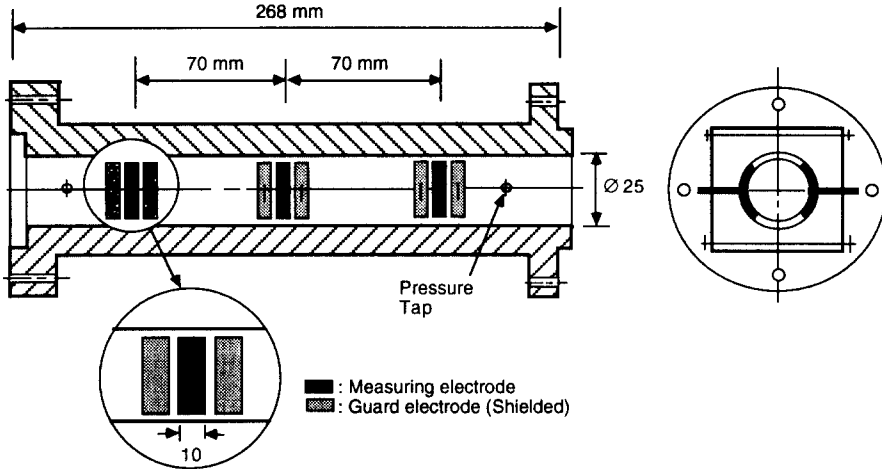


Fig. 3 Cross section of the void meter spool

재하는 곳에 위치하고 있으며, 이에 대한 제원은 측정센서 한 조의 제원과 동일하다.

3.3 신호처리기의 설계

신호처리기는 선택된 공급전원을 측정센서에 공급하고, 측정센서 사이를 흐르는 2상류 혼합물의 기포율 변화에 따른 저항변화를 전압으로 변환하여 기준센서의 출력전압과의 비를 생산하며, 또한 적절한 신호처리 회로를 거친 후 기포율의 시간적 변화로 출력시키는 전기회로 계통이다.

Fig. 2에 나타낸 기본회로를 확장시켜 나타낸

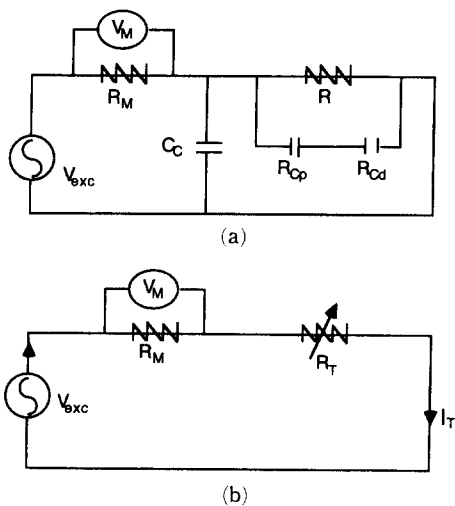


Fig. 4 Equivalent circuit of the I. V. M. signal processor

Fig. 4에서와 같이 전극 사이에 위치한 2상류 혼합물에 의해 야기되는 저항성분 중에서 액상의 전기전도도에 의한 저항을 R , 전극 근처의 분극화 현상에 의한 커패시턴스 성분(C_p)에 대응하는 저항을 R_{cp} 그리고 dielectric상수에 의한 커패시턴스 성분(C_d)에 대응하는 저항을 R_{cd} 라 하면, 전극 사이의 전체 저항(R_T)은 다음과 같이 표현되는데,

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R}} \quad (5)$$

여기서 R_c 는 커패시턴스 성분에 대응하는 저항들의 합이다. 측정회로에 설치된 저항 R_M 에 의해 측정되는 전압은

$$V_M = V_{exc} \left[\frac{R_M}{R_M + R_T} \right] \quad (6)$$

로 표현되는데, 이 때 R_M 이 작을수록 측정전압은 R_T 또는 R 에 민감하게 될 뿐만 아니라, 저항 R_M 에 의해 야기되는 오차를 감소시킬 수 있다. 따라서 두 전극 사이를 흐르는 2상류 혼합물의 기포율 변화를 민감하게 감지하기 위해서 R_M 을 작게 하였다.

기포율 측정기의 신호처리기는 측정센서에 안정된 전원을 공급하는 전원공급계통, 측정센서에서 기포율 변화에 따른 저항변화를 전압으로 변환시켜 증폭시키는 신호 감지/증폭 계통, 그리고 증폭된 신호를 시간 평균치와 요동성분으로 분리시키는 여과계통으로 나뉘어진다.

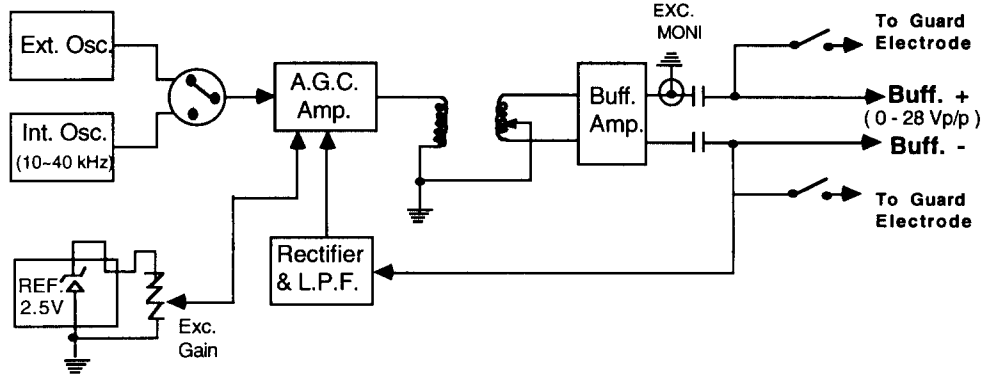


Fig. 5 Sensor driver in signal processing unit

전원공급계통에서는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 10~40 kHz, 1~3 Vrms의 전원을 공급하는 내부 oscillator의 출력 전원과 전압표준기에 의해 발생하는 2.5 V의 전원이 계인 자동조절앰프(A. G. C. Amp.)에 의해 상호 비교되어 측정센서와 기준센서에 안정된 교류전원이 공급된다. 이 때 센서의 가드전극에는 낮은 임피던스를 갖는 버퍼앰프를 설치하여 전기적으로 차폐시킴으로써 측정체적 내부에 균일한 전기장을 공급할 뿐이며, 측정값에는 직접 영향을 끼치지 않게 된다. 측정센서에는 28 Vp/p의 비교적 고전압을 공급함으로써 신호 대 잡음비(SNR)와 기포율 변화에 따른 전압변화의 폭을 크게 하였다. 그리고 가드전극에 전원을 공급하는 회로에는 릴레이 스위치를 설치하여 가드전극 사용여부에 따른 효과를 살필 수 있도록 하였으며, 내부 oscillator 대신에 기존의 신호발생기(function generator)를 사용할 수도 있도록 하였다.

Fig. 6에는 신호 감지/증폭 계통의 계통도가 나타나 있다. 전원공급 계통으로부터 전원을 공급받는 측정전극은 그 사이를 흐르는 2상류 혼합물의 기포율 변화에 따른 저항변화에 의한 신호가

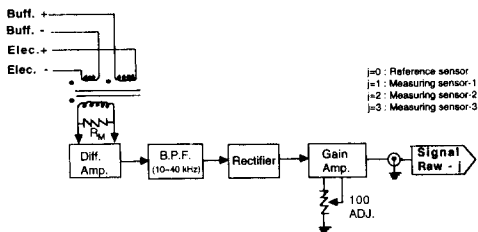


Fig. 6 First stage of the signal processing unit : generation of raw signal

transformer를 거쳐 차동앰프(differential amplifier)에 입력되게 된다. 전극 사이의 전기전도도 변화에 따른 전압변화가 transformer의 권선비에 따라 감소되어 차동앰프로 전달되는데, 이 때 권선비는 측정센서와 신호처리기 사이의 전선(약 5 m)의 임피던스와 매칭시키기 위하여 4:1로 선택되었다. 이와 같이 transformer를 채택함으로써 그라운드를 분리시킬 수 있고, 기준센서와 측정센서로부터 출력되는 두 신호의 합성이 용이하며, CMRR(Common Mode Rejection Ratio)이 커지는 효과를 얻게 될 뿐만 아니라 고주파통과필터(HPF : High-Pass Filter)의 역할을 수행한다.

차동앰프에서 출력된 신호는 공급전원의 고주파 성분(10~40 kHz)과 기포율 변화와 관련된 저주파 성분이 혼합된 신호로서, 대역통과필터(BPF : Band-Pass Filter)를 거쳐서 예상치 못하는 고주파의 잡음을 제거한 후 정류기(rectifier)에 의해 정류되고, 계인앰프(Gain Amplifier)에 의해 출력의 크기가 조절된 후 여과계통으로 전달된다. 이와 같은 신호 감지/증폭 계통은 기준채널 1개와 측정채널 3개에 동일한 방식으로 적용된다.

신호 감지/증폭 계통에서 출력된 기준센서와 측정센서로부터의 신호는 Fig. 7에 나타낸 바와 같은 여과 계통으로 입력된다. Fig. 7은 기포율의 평균치 정보가 얻어지는 여과 계통으로서, 기준센서와 측정센서로부터 나오는 신호가 저주파통과필터(LPF : Low-Pass Filter)를 거친 후 기준센서의 신호에 대한 측정센서 신호의 비가 10배로 증폭되어서 기포율 정보를 최종적으로 출력하게 된다. 기포율의 요동성분만을 분리하여 출력시키는 여과계통에서는 분리된 요동성분이 계인조절 앰프를 통과

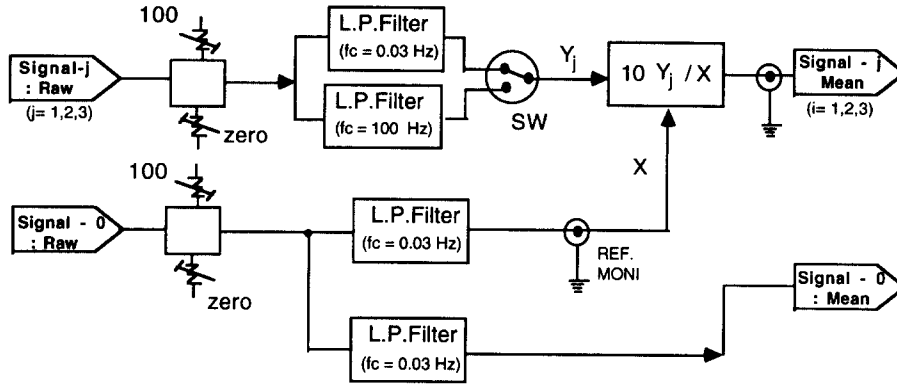


Fig. 7 Second stage of the signal processing unit : generation of the void signal

하면서 출력신호의 크기에 따라 계인이 1, 2, 4, 8로 조절될 수 있도록 하였다.

4. 측정기의 교정

4.1 측정기 출력과 기포율의 관계

기포율 측정기의 신호처리기는 세 채널로 이루어져 있으며, 이 때 각 채널의 출력은 기포율의 평균값 정보(\bar{V}_j)와 요동성분(v_j)으로 분리될 수 있는데, 이들은 일반적으로 다음과 같이 표현될 수 있고,

$$\bar{V}_j = K_{aj} \bar{T}_j V_{exc} + z_j \quad (7)$$

$$v_j = K_{aj} T_j V_{exc} \quad (8)$$

여기서 K_{aj} 는 전극 사이를 흐르는 2상류 혼합물의 콘덕턴스, T_j 는 측정계통의 전달함수, V_{exc} 는 전극에 가해지는 공급전압, 그리고 z_j 는 전극 사이에 기상만이 존재할 때의 출력전압이다. 또한 $\bar{}$ 는 평균값, j 는 측정채널($j=1, 2, 3$)을 의미한다.

액상만이 존재하는 유로에 설치되는 기준센서에 의해 측정되는 콘덕턴스(K_o)와 기포율이 α 인 유로에 설치되는 측정센서(채널- j)에 의해 측정되는 콘덕턴스(K_{aj})의 비는

$$\frac{K_{aj}}{K_o} = \frac{\bar{T}_o}{\bar{T}_j} \left[\frac{\bar{V}_j(\alpha) - z_j}{\bar{V}_o - z_o} \right] \quad (9)$$

와 같이 표현될 수 있으며, 식 (9)로 표시되는 평균 콘덕턴스비는 센서의 형상, 평균기포율($\bar{\alpha}$) 그리고 유로내 기포의 분포특성에 따라 달라지게 된다. 여기서 기준센서 채널과 측정센서 채널- j 간의 전달함수비 \bar{T}_o/\bar{T}_j 는 세 측정채널간의 전기적 특성

차이 즉, 신호처리기, 전원케이블 그리고 측정전극의 특성 등의 차이를 나타내 주는 값으로서, 각 채널간의 차이가 무시될 수 있음을 확인해야 한다.

실제로 측정기의 출력전압(V_{Mj})을 평균 콘덕턴스비와 관련시키기 위해서는 초기조정 절차를 수행함으로써 식 (9)의 좌변항과 V_{Mj} 를 관련지어야 한다. 초기조정절차에서 기포율이 zero, 100%일 때 출력전압이 각각 10 V, 0 V가 되도록 하여 식 (9)의 우변에서 기상만이 존재할 때의 출력을 제거하게 되며, 따라서 0~10 V가 범위의 출력전압은 기포율에 따른 평균 콘덕턴스비에 비례하는 값으로 얻어지게 된다. 이 때 기포율과 평균 콘덕턴스비의 관계는 별도의 교정절차에 의해 결정되게 된다. 이와 같은 초기조정을 통하여 신호처리기 각 채널간 전달함수의 magnitude 차이를 제거할 수 있으나, 전달함수의 위상차(phase delay)는 별도의 확인과정을 거쳐야 한다.

4.2 교정식의 도출

기포율에 따라 변화되는 신호처리기의 출력전압과 기포율 사이의 관계는 측정기의 교정(calibration)과정을 거쳐서 결정되어야 하는데, 이를 위해 기포 모의기(void simulator)를 이용하거나, 또는 측정센서 상·하측의 차압을 이용한 방법⁽⁴⁾ 등이 있다. 여기에서는 후자의 방법을 이용하여 교정식을 도출하였는데, 유로상의 측정센서 상, 하류측 두 지점 H_i, H_{i+1} 사이의 차압은

$$(\Delta P)_{cell} = \bar{\alpha} \rho_f g (H_{i+1} - H_i) \quad (10)$$

와 같이 표현될 수 있다. 이 식은 유동속도가 매우 작아서 유로마찰에 의한 압력강하, 그리고 유로내

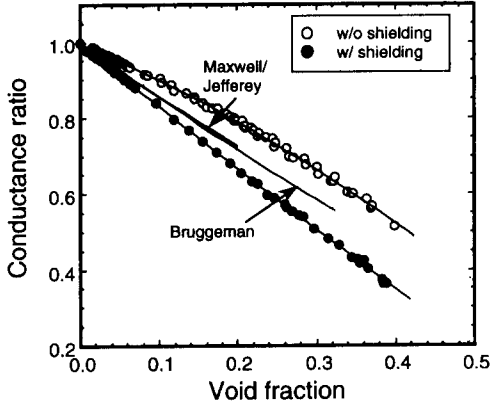


Fig. 8 Calibration curve of the void meter : effect of shielding the guard electrodes

기포율의 축방향 변화로 인한 가속에 의한 압력변화를 무시할 수 있는 가정이 성립할 때만 유효한 관계식이다. 유로상의 두 지점에 차압센서를 설치

하고, 액상의 유속이 느린 조건 ($J_f < 0.2$ m/sec) 하에서 기체의 유량을 증가시키면서 그 때의 기포율 측정기의 신호처리기 출력과 차압센서 측정치로부터 식 (10)에 의해 산출되는 기포율($\bar{\alpha}$)의 관계를

$$\frac{\bar{K}_a}{K_o} = 0.996 - 1.674 \bar{\alpha} + 0.134 \bar{\alpha}^2 \quad (11)$$

와 같은 2차식의 형태로 도출하였으며, 그 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 이 때 유동물질의 성분 차이에 의한 전기전도도의 차이는 교정식의 경사도에 영향을 미칠 수 있다.

5. 측정기의 성능 확인 및 적용 예

본 측정기의 성능을 확인하기 위하여 Fig. 9와 같은 물-공기 2상유동 실험장치를 제작하였다. 실험장치는 시험대, 기액분리기, 기액혼합기, 물 공급배관, 압축공기 공급배관 등으로 이루어져 있다.

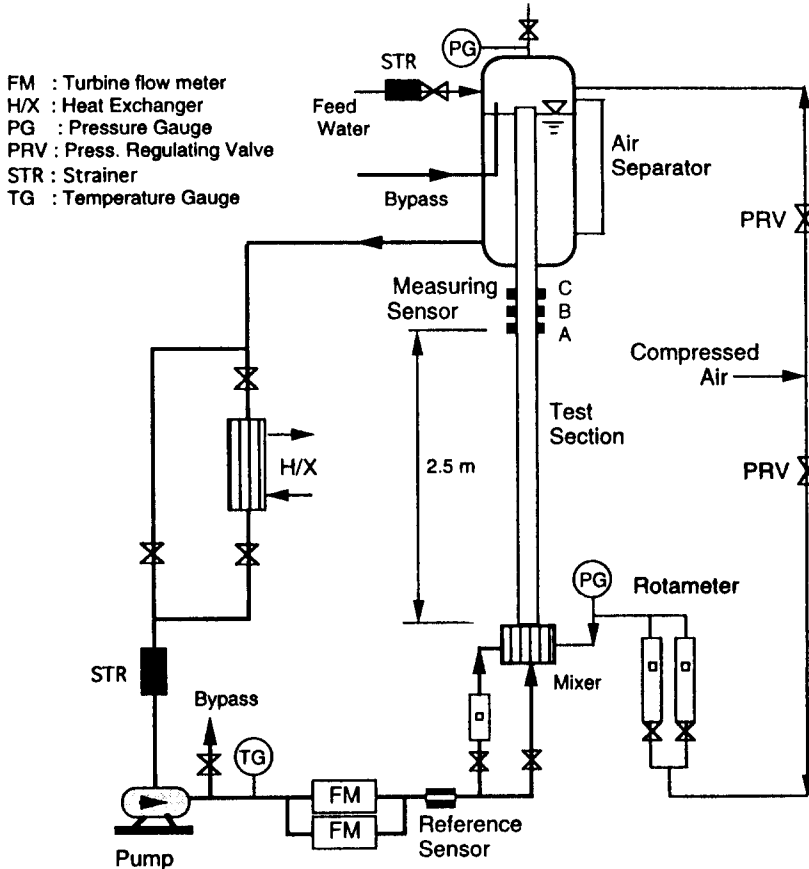


Fig. 9 Schematic diagram of the air-water loop

시험대는 재질이 투명 아크릴인 수직 원관 (내경 25 mm, 길이 3 m)이며, 이에는 다수의 압력탭과 기포율 측정용 센서가 설치되어 있다. 물공급 배관에는 펌프, 열교환기, 스트레이너 등이 설치되어 있으며, 압축공기 공급 배관에는 압력조절밸브, 제습기, 필터 등이 설치되어 있다. 물 공급량은 터빈 유량계로 측정하며, 공기는 로터미터를 이용하여 측정하였다.

본 실험에서는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 시험대의 세 채널(A, B, C) 간의 기포율 신호를 동시에 측정하고, 이에 stochastic해석기법⁽⁸⁾을 적용하여 확률밀도함수(Probability Density Function: PDF), Power-spectral density 함수(PSDF), Cross-correlation 함수, Cross-spectral density 함수(CSDF) 등의 매개변수를 산출하였다.⁽¹⁰⁾

5.1 가드전극의 영향

Fig. 8에는 가드전극을 전기적으로 차폐한 경우 (●)와 하지 않은 경우(○)에 대한 교정결과 및 교정곡선의 차이를 보이고 있다. 또한 교정결과가 다음과 같은 예측식들⁽⁹⁾과 비교되었는데,

● Maxwell : $\frac{\bar{K}_a}{\bar{K}_o} = 1 - \frac{3\bar{\alpha}}{(2+\bar{\alpha})}$ (12)

● Jefferey : $\frac{\bar{K}_a}{\bar{K}_o} = 1 - 1.15\bar{\alpha} + 0.588\bar{\alpha}^2$ (13)

● Bruggeman : $\frac{\bar{K}_a}{\bar{K}_o} = (1 - \bar{\alpha})^{3/2}$ (14)

이러한 이론식들은 기포가 유로내에 균일하게 분포되어 있는 균질 기포유동 가정하에서 도출된 것들이다. Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 가드전극을 차폐시키지 않는 경우가 기포율의 과잉예측을 보이고 있으며, 또한 차폐시킨 경우가 이론식에 의한 예측에 접근함을 알 수 있다. 가드전극을 사용하지 않거나, 또는 사용하더라도 이를 차폐시키지 않는 경우에는 측정센서 주위에 형성되는 측정체적이 유로 중심부에서 회계 되고, 따라서 기포율의 과잉예측이 초래되는 것이다.

기포율 측정신호로부터 도출되는 스펙트럼(spectrum)을 살펴보면 가드전극을 사용하지 않을 경우 30~40 Hz의 고주파 성분이 비교적 크게 나타났다. 그러나 차폐된 가드전극 사용시에는 관심있는 주요 주파수 범위인 0~30 Hz 범위의 저주파 성분이 측정되고, 고주파 성분의 스펙트럼의 강도가 현저히 감소됨을 알 수 있었으며, 또한 기포파의 전파속도 측정시 직접 사용되는 cross-correlation의 최대값이 더욱 명료하게 나타났다. 이와 같이 가드전극의 차폐여부에 따른 차이는 가드전극이 측정체적 형성모양과 측정체적내 전기장의 균일성에 미치는 영향 때문이라 판단된다.

5.2 채널간의 위상차

기포율 측정기의 성능을 확인하기 위한 작업으로서, 각 채널간의 전달함수(\bar{T}_o/\bar{T}_i)의 특성차이를

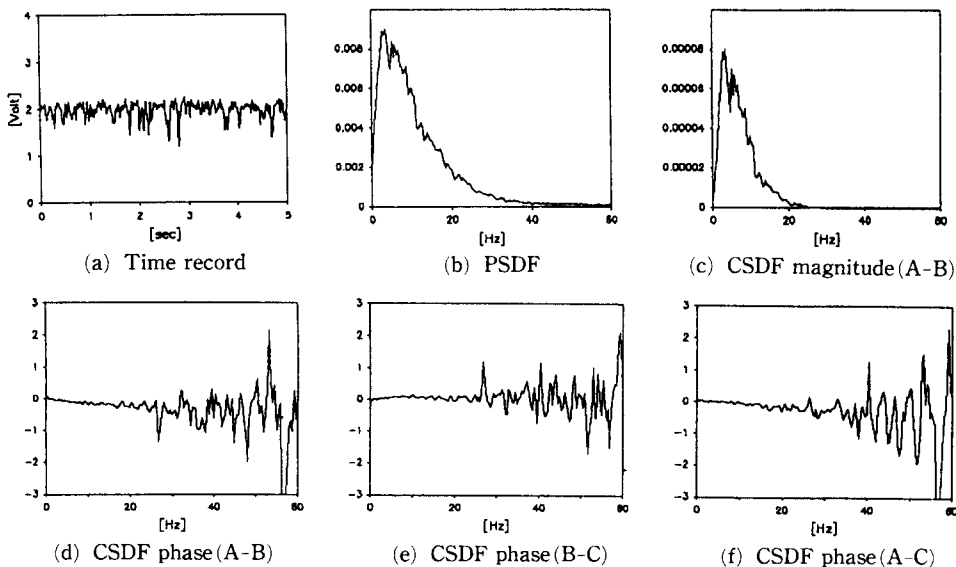
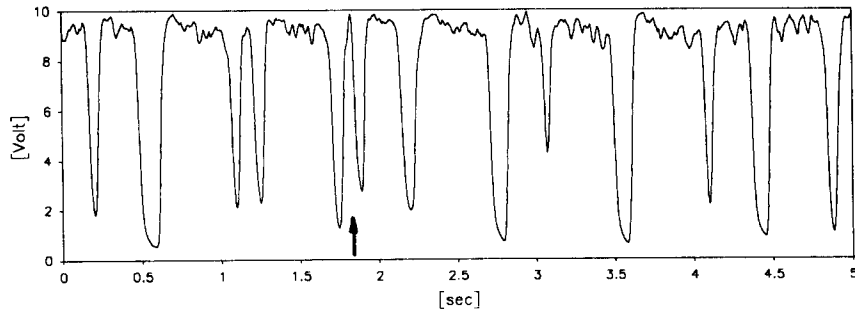


Fig. 10 Phase shifts between void sensor channels

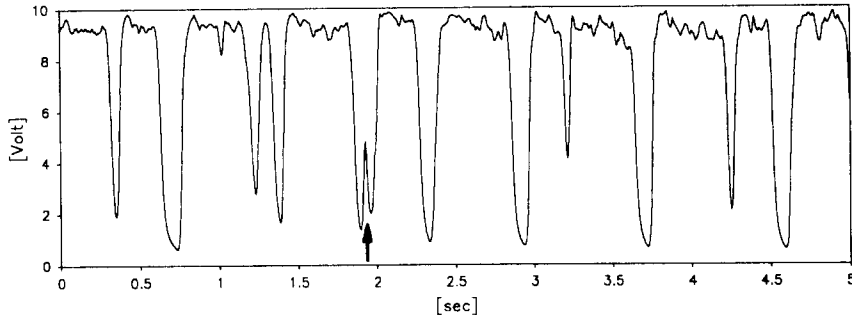
살펴보아야 한다. 초기조정절차를 통하여 신호처리의 각 채널간 전달함수의 **magnitude** 차이는 제거될 수 있으나, 위상차는 제거될 수 없다. 따라서 측정기의 세 채널간의 위상차를 측정하였다. 채널간의 위상차는 기포파의 전파특성 측정시 직접 영향을 미치므로, 채널간 회로 구성부품의 특성 차이에 기인하는 고유의 위상차 크기를 확인하는 작업은 매우 중요하다.

신호처리의 고유 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 10(a)에 나타난 바와 같은 동일한 신호를 신호처

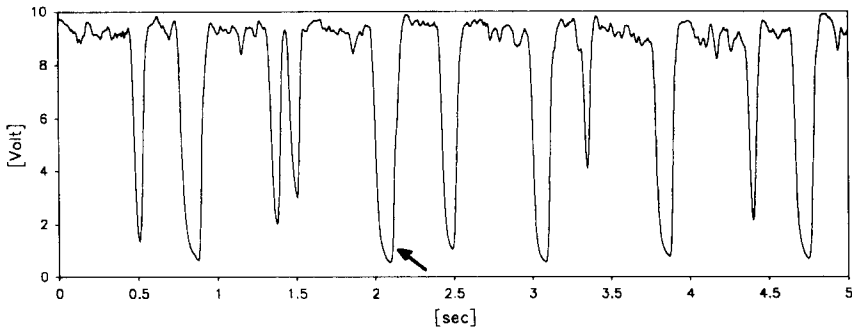
리의 세 채널에서 동시에 측정한 결과로부터 도출한 스펙트럼을 Fig. 10(b)에 보이고 있다. Fig. 10(c)에는 채널-A, B의 기포용 신호로부터 산출되는 CSDF함수의 **magnitude**를 보이고 있으며, 또한 Fig. 10(c), (d), (e)에는 동일한 입력에 대해 생성되는 세 채널(A, B, C)의 출력에 대한 위상차를 보이고 있다. 이러한 위상차는 신호처리 구성부품의 미세한 특성 차이가 종합적으로 반영된 채널의 고유특성으로서, 기포파의 주요 주파수 범위(0~20 Hz)에서 채널간에 매우 작은 차이(0.15% 미만)를



(a) Void sensor-A



(b) Void sensor-B



(c) Void sensor-C

Fig. 11 Axial variation of void signals for slug flow : $\alpha=13.9\%$, $J_r=0.18$ m/s, $D_b=4.8$ mm

보이고 있다. 따라서 기포파의 전파특성 즉, 전파속도와 감쇠율의 측정시 채널간의 고유특성 차이에 의한 영향은 무시될 수 있다.

5.3 기포율의 발달 특성

기포율 측정기를 기포파의 전파특성 규명을 위해 사용하기 위해서는 유동구조의 변화 또는 유동양식의 차이에 따른 기포율 요동성분의 변화를 민감하게 측정할 수 있어야 한다. 따라서 분산 기포유동 (dispersed bubbly flow), 기포군 (bubble cluster) 을 동반하는 비분산 기포유동 (non-dispersed bubbly flow), 그리고 슬러그유동 (slug flow) 에 대한 기포율 변화를 측정하였다. ⁽¹⁰⁾ Fig. 11에는 유속 $J_f=0.18$ m/s, 기포직경 $D_b=4.8$ mm인 경우의 슬러그유동에 대해 유로의 측방향(A, B, C)에 설치된 측정센서로부터 동시에 측정된 기포율의 변화를 보이고 있다. 이에는 두 개의 Taylor 기포가 측방향으로 진행하면서 합쳐지는 과정을 잘 보여주고 있다.

Fig. 12에는 Fig. 11과 동일한 조건하에서 기체의 유량을 증가시키에 따라 나타나는 유동양식의 변화에 따른 기포율 신호의 시간기록과 그의 확률밀도 함수(PDF)를 나타내고 있다. Fig. 12(a)에서 보는 바와 같이 분산 기포유동의 경우는 기포율이 시간에 따라 큰 변화를 보이지 않고 있으며, PDF는 평균기포율이 작은 범위에서 폭이 좁은 형상을 보이고 있다. 비분산 기포유동의 경우는 Fig. 12(b)에서 보는 바와 같이 기포군이 불규칙적으로 통과되는 현상이 기포율의 큰 변화로 나타나며, 기포군 사이의 분산된 기포들의 유동이 작은 변화를 이루며 흐르고 있음을 알 수 있다. 또한 PDF는 높은 기포율 범위에서 긴 꼬리형상을 보이고 있다. 그리고 Fig. 12(c)에서 보는 바와 같이 슬러그유동의 경우는 테일러 기포와 액체 슬러그의 주기적 통과에 따른 두 가지의 명료한 정점을 보이고 있다.

Fig. 13(a)에는 분산기포 유동의 경우에 대한 기포율 신호의 스펙트럼(PSDF, CSDF)을 보이고 있는데, 0~30 Hz의 주파수 성분을 갖는 요동성분의 시간적 변화가 잘 나타나 있다. Fig. 13(b)에는 기포군이 통과되는 비분산 기포유동에 대한 스펙트럼이 0~15 Hz 범위를 보이고 있으며, Fig. 13(c)의 슬러그 유동에 대한 기포율의 스펙트럼에는 0~7 Hz의 주파수 범위를 가진 테일러 기포의 이동이 잘 나타나 있다.

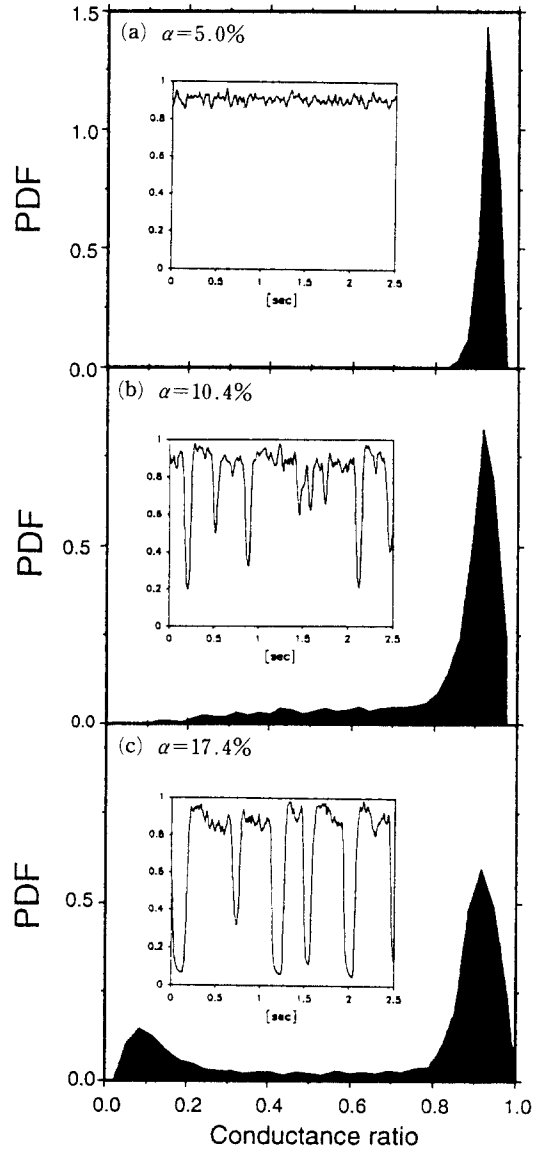
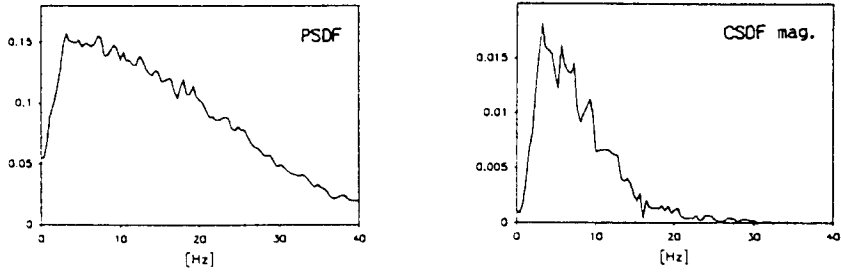


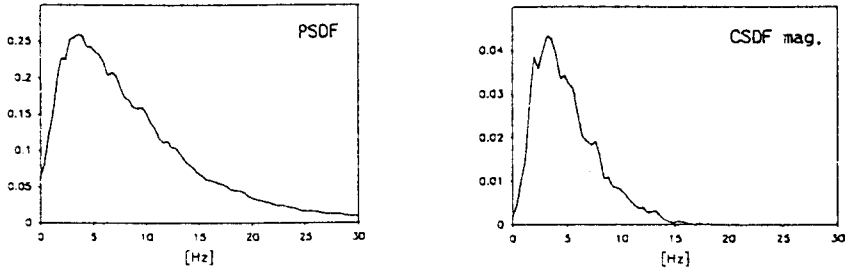
Fig. 12 Time record and PDF for typical flow regimes : $J_f=0.18$ m/s, $D_b=4.8$ mm

5.4 기포파의 전파특성

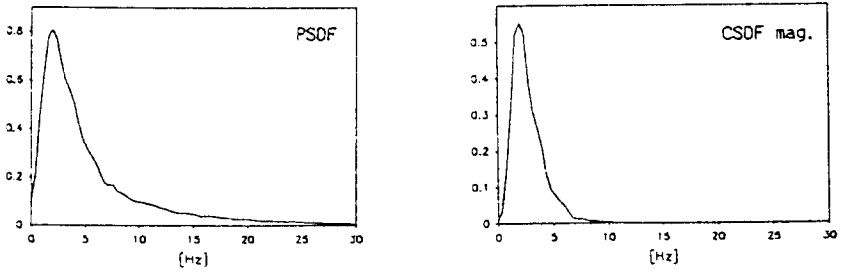
다채널 기포율 측정기의 개발 목적은 유동관내 2상류 혼합물의 유동양식 차이에 따른 기포파의 전파특성 즉, 전파속도와 감쇠율 등을 결정하는데 있으므로, 유동양식에 따른 이들 전파특성을 명확히 규명할 수 있어야 한다. 따라서 수직 원형관내 2상류의 전파특성을 기포유동과 슬러그 유동에 대하여 측정하였다. 이 때 서로 이웃하는 측정센서간의 거



(a) Dispersed bubbly flow : $\alpha=10\%$, $J_f=0.275$ m/s, $D_b=2.7$ mm



(b) Non-dispersed bubbly flow : $\alpha=8.6\%$, $J_f=0.275$ m/s, $D_b=4.8$ mm



(c) Slug flow : $\alpha=17.4\%$, $J_f=0.18$ m/s, $D_b=4.8$ mm

Fig. 13 Typical shape of PSDF and CSDF magnitude

리는 기포파의 전파특성 측정시 중요하게 취급되어야 하는 요소이다. 일반적으로 측정센서간의 거리는 전달 파형의 파장보다 작아야 하는데, 기존 실험⁽¹⁰⁾에 의하면 0.07~0.11 m의 최소파장 범위를 보이고 있다.

기포파의 전파속도(C_α)는 CSDF함수로부터

$$C_\alpha = \frac{2\pi \Delta f \Delta H}{\Delta \phi} \quad (15)$$

와 같이 정의될 수 있으며, 여기서 ΔH 는 선택된 두 측정센서간의 거리, $\Delta \phi$ 는 CSDF함수의 위상변위, Δf 는 위상차 $\Delta \phi$ 를 야기시키는 주파수 범위이다.

식 (15)를 이용하여 분산 기포유동, 기포군을 형성하는 비분산 기포유동, 슬러그 유동에 대한 기포

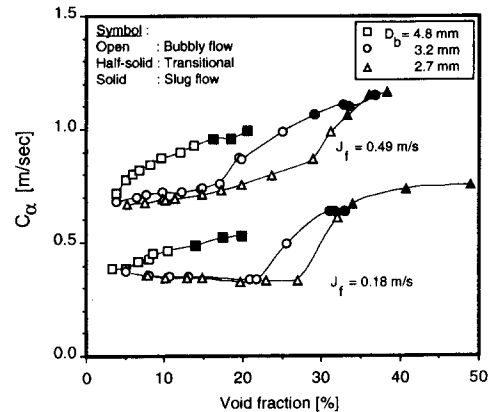


Fig. 14 Variation of the wave speed

파의 전파속도를 산출하였는데, Fig. 14에는 유속 조건 $J_f=0.18, 0.49 \text{ m/s}$ 에서 기포의 크기(D_b)에 따른 유동구조의 발달과정 차이와 액상의 속도에 따른 기포와 전파속도의 전형적인 변화가 잘 나타나 있다.

6. 요약 및 향후 연구과제

2상류 혼합물을 구성하는 두 상의 전기적 특성의 차이를 이용하여 유로단면의 기포율을 측정할 수 있는 다채널 임피던스형 기포율 측정기가 개발되었다. 기포율의 변화를 명료하게 측정할 수 있도록 측정전극의 폭을 작게 하였으며, 이로 인해 발생될 수 있는 상의 분포특성 차이에 따른 응답특성의 변화를 최소화하기 위하여 측정센서에는 가드전극을 설치하고 또한 이를 차폐시켰다. 유동물질의 온도 변화와 불순물의 농도변화 등에 의해 발생될 수 있는 전기적 특성변화의 영향을 보정할 수 있도록 기준센서를 채택하였다. 또한 전압 표준기를 사용하여 안정된 전원이 측정센서에 공급될 수 있도록 하였으며, transformer기능을 채택하여 양호한 신호를 얻을 수 있도록 설계하였다.

개발된 기포율 측정기는 시간적, 공간적 분해능이 매우 우수하여 유동구조의 변화에 따른 기포율의 요동성분을 잘 측정할 수 있으며, 채널간의 고유 위상차를 최소화함으로써 기포파의 전파특성 측정시 채널간의 기능 차이로 인한 오차 발생을 무시할 수 있도록 설계되었다. 그리고 기포측정기의 적용 예로서, 여러 가지 유동양식에 대한 기포율의 변화특성과 기포파의 전파속도를 측정하였다.

임피던스형 기포율 측정기는 다음과 같은 상황에 적용시 그 영향도 충분히 고려하여 설계되어야 할 것이다.

첫째로 환상분무유동(annular-mist flow)에서와 같이 전기전도도가 큰 액상이 연속되어 분포되어 있지 않고, 액적(droplet)의 형태로 기상내에 독립적으로 분포하는 경우 분산된 액상은 측정기의 출력에 전혀 영향을 미치지 못하게 되며, 따라서 기포율 측정시 오차를 유발시키는 근본적인 문제점이 제기된다.

둘째로 측정센서 위치의 2상류 혼합물이 가열작용에 의한 상변화로부터 발생하는 경우처럼 기준센서와 측정센서 위치 사이의 온도 차이가 클 경우에는 기준센서와 측정센서간의 온도 차이에 따른 전

기전도도 차이를 고려함으로써 온도변화를 보정하거나, 또는 유동물질의 전기전도도 차이를 이용한 저항형 측정기를 사용하는 것보다는 커패시턴스형 측정기를 채택하는 것이 좋다.

마지막으로 원형관이 아닌 복잡한 형태를 갖는 유로내의 기포율 측정시에는 측정체적의 형상과 그 내부 전기장의 균일성 등을 고려하여 측정센서를 설계하고, 또한 그의 영향이 신호처리기의 설계시에 고려되어야 한다.

참고문헌

- (1) Olsen, H. O., 1967, "Theoretical and Experimental Investigation of Impedance Void Meters," *Kjeller report KR-118, Inst. for Atomenergi, Norway.*
- (2) Merilo, M., et al., 1977, "Void Fraction Measurement with a Rotating Electric Field Conductance Gauge," *J. Heat Trans.*, Vol. 99, pp 330 ~ 332.
- (3) Snell, C. C., et al., 1979, "Evaluation of a Unique Void Fraction Monitoring System," *EPRI-1019.*
- (4) Delhaye, J. M., et al., 1987, "Experimental Investigation on the Performance of Impedance Sensors of Two and Six Electrodes," *Nat. Heat Transfer Conf., ANS.*
- (5) Tournaire, A., 1986, "Dependence of the Instantaneous Response of Impedance Probes on the Local Distribution of the Void Fraction in a Pipe," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 12, No. 6.
- (6) Geraets, J. J. M., et al., 1988, "A Capacitance Sensor for Two-Phase Void Fraction Measurement and Flow Pattern Identification," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 14.
- (7) Klug, F. and Mayinger, F., 1994, "Impedance Based Flow Reconstruction : A Novel Flow Composition Measuring Technique for Multiphase Flow," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 46.
- (8) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1986, *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*, John Wiley & Sons, 2nd ed.
- (9) Turner, J. C. R., 1979, "Electrical Conductivity of Liquid Fluidized Beds," *AIChE Symp. Series*,

Vol. 69, No. 128.

- (10) Song, C. H., et al., 1993, "Characterization of the Flow Developments in Two-Phase Flow by

the Statistical Signal Analysis," *Proc. KSME Autumn Annual Mtg.*, Ansan.