

# 단상 및 이상유동 유량 계측을 위한 평균 양방향 유동 튜브 개발

윤병조\* · 강경호\*\* · 어동진\*\*\* · 백원필\*\*\*\*

## Development of an Average Bi-directional Flow Tube for the Measurement of Single and Two phase Flow Rate

Byong-Jo Yun\*, Kyong-Ho Kang\*\*, Dong-Jin Euh\*\*\*, Won-Pil Baek\*\*\*\*

*Key Words* : Bi-directional flow tube(양방향 유동 튜브), Pitot tube(피토관), Momentum exchange factor(모멘텀 교환 인자)

### ABSTRACT

**Average** Bi-directional flow tube was suggested to measure single and two phase flow rate. Its working principle is similar with Pitot tube, however, it makes it possible to eliminate the cooling system which is normally needed to prevent from flashing in the pressure impulse line of Pitot tube when it is used in the depressurization condition. The suggested instrumentation was tested in the air-water vertical test section which has 80mm inner diameter and 10m length. The flow tube was installed at 120 of L/D from inlet of test section. From the test, single air and water flow rate was measured successfully. For the emasurement of two phase flow rate, Chexal drift-flux correlation was used. In the test a new correlation of momentum exchange factor was suggested. The test result shows that the suggested instrumentation using the measured void fraction and Chexal drift-flux correlation can predict the mass flow rates within 10% error of measured data.

### 1. 서 론

단상 및 이상유동이 발생하는 유체 시스템에서 유체의 질량 유량을 계측하는 것은 대단히 중요하다. 이러한 질량 유량의 계측에는 다양한 작동 원리를 가진 유량계가 사용되었다. 압력 발생식 유량계, Drag body, Pitot관, turbine 유량계 등이 이러한 것으로, 이를 이상유동에 적용하여 이상유동 질량 유량을 계측하기 위해서는 각상의 모멘텀 정보를 얻기 위해 물리적

모델을 사용하거나 이러한 계측기기를 2개 이상 조합하여 질량 유량을 계측하였다.

본 연구에서는 단상 및 이상유동이 발생하는 유로에서의 평균 질량 유속을 계측하기 위하여 기존의 국소 양방향 유동 튜브가 가지는 특성을 갖는 평균 양방향 유동 튜브를 새롭게 제시하고자 한다.

평균 양방향 유동 튜브의 근간이 되는 국소 양방향 유동 튜브는 Heskestad(1973)에 의해 최초로 제시되어 국소적 화염속도 계측에 사용되었다(그림 1)[1].

McCaffery등(1976)은 이를 저속의 공기 유동 조건에서 적용하였다. McCaffery의 연구에 의하면 국소 양

\* 한국원자력 연구소 열수력 안전 연구부

\*\* 대전시 유성구 덕진동 150번지

E-mail : bjun@kaeri.re.kr

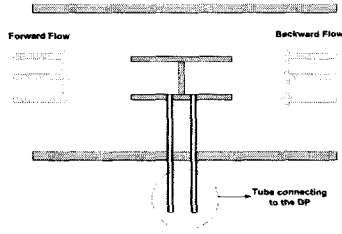


Fig 1 Conceptual diagram of local bi-directional flow tube[2,3]

방향 유동 튜브의 직경 12.7mm-25.4mm에서 직경에 무관하게 동일한 속도 교정 커브를 얻을 수 있음을 보였다. 또한, 유체의 입사각이 ±50°까지 변화해도 큰 오차 없이 정확한 유동정보 얻을 수 있고, 또한 양방향 유동의 계측이 가능한 특성을 보여주었다[2].

Liu(1990)는 보다 작은 크기의 국소 튜브를 개발하고자 공기 유동조건에서 4.7-8.8mm의 튜브 직경을 갖는 국소 양방향 유동 튜브를 개발하였다. 연구 결과에 의하면 국소 양방향 유동 튜브의 교정커브는 튜브 직경에 무관함을 보였다. 그러나 저속의 유동에서 발생하는 압력 강하 값은 McCaffery에 의해 제시된 압력 강하 값보다 작다[3].

Kang(2003)등은 국소 양방향 튜브를 단상의 물 유동에 적용하기 위해 Fluent코드를 이용하여 그 적용성을 평가하였다. Kang의 해석 결과에 의하면 국소 양방향 유동튜브의 교정 커브는 물과 공기등 유체 및 온도, 압력의 변화에 무관하게 Re수에 의해 fitting할 수 있음을 보였다[4].

상기 연구자들의 연구 결과를 종합하면 국소 양방향 유동 튜브는 비교적 저속의 유동조건에서 유체의 입사각의 변화에 무관하게 양방향의 속도를 계측할 수 있는 특성을 보여준다.

본 연구에서는 이러한 국소 양방향 유동 튜브의 저유량 및 양방향 유동 계측 특성을 갖는 평균 양방향 유동 튜브를 단상 및 이상유동 유동 조건에 적용하여 질량 유량을 계측하는 방법론을 제시하고자 하였다. 그림 2는 유로내 평균 유동을 계측할 수 있는 평균 양방향 유동 튜브의 개념 설계를 보여준다. 제시된 양방향 유동 튜브는 감압이 발생하는 유로에 적용할 경우 압력 튜브에서 발생이 예상되는 상변화가 발생되지 않아 이를 피하기 위해 별도의 냉각장치를 필요로 하는 Pitot관 방식에 비해 그 적용이 유리하다.

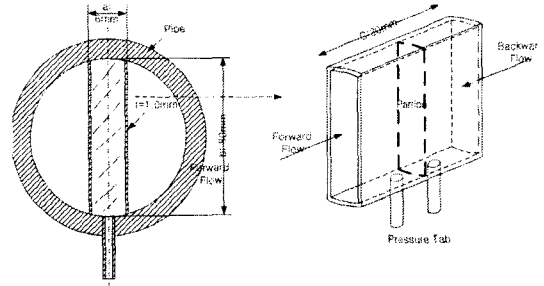


Fig 2 Schematics of average bi-directional flow tube

## 2. 평균 양방향 유동 튜브의 작동원리

양방향 유동 튜브의 작동 원리는 Pitot 튜브와 유사하다. 유동이 있는 배관 내에 튜브가 설치되는 경우 튜브 전단에서 측정되는 압력은 총 압력(total pressure)과 동일하다. 반면 튜브 후단에서 측정되는 배압은 튜브 후방으로 향하는 유동에 의한 흡입 효과(suction effect) 인해 정압(static pressure)보다 다소 작다[3]. 따라서 양방향 유동 튜브의 전, 후단에서 측정된 압력의 차이는 유동의 동압(dynamic pressure)보다 약간 커지게 되며 이를 압력 증배 계수(amplification factor), K로 표현하면 다음 식 (1)과 같다.

$$K \equiv \frac{\sqrt{2\Delta p/\rho}}{V} \quad (1)$$

여기에서

$\Delta p$  : 유동튜브에서의 압력 계측값

$\rho$  : 유체의 밀도

$V$  : 유체의 속도

식 (1)에서와 같이 양방향 유동 튜브의 전, 후단에서의 차압을 측정함으로써 유동의 속도를 계산할 수 있다. 이때, 식(1)의 압력 증배 계수 K는 실험에서 얻어지는 교정 상수이다.

## 3. 실험 장치

본 연구에서는 양방향 유동 튜브의 압력 증배 계수 K를 얻기 위해 단상의 공기 및 물 유동에서 실험을 수행하였다. 이렇게 얻어진 단상유동 증배 계수 K는 물-공기의 이상유동 유량 계측에 적용된다. 실험은 물-공기 실험장치에서 수행되었다. 물-공기 실험장치는 기포 생성용 노즐에 주입되는 공기 주입량의 제어를 통해 단상의 물, 공기 또는 물-공기 이상유동 조건을 임의적으로 만들 수 있다.

실험장치는 그림 3에서와 같이 실린더형 test

section, 물 저장 탱크, 기포 발생기, 예열기, 물 및 공기 공급 장치, 압력 조절 장치 그리고 계측기기 및 DAS로 구성된다. Test section은 가시화가 가능하게 투명한 아크릴로 만들어졌으며, 내경은 80mm, 길이는 10m의 수직관이다. Test section 입구 하부에 설치된 기포 발생장치는 유로에 주입되는 기포의 양 및 기포의 크기 조절이 가능하다. 주입된 물-공기 이상유체는 물 저장탱크에서 분리되며, 공기는 외부로 방출된다. 이때 유로내 압력은 외부로 방출되는 공기 유량을 조절하여 조절한다.

Test section에서 평균 기포 계수를 계측하기 위해 유로 입구 배관에는 보정용 IVM 센서가 그리고 측방향으로 총 3개의 IVM(Impedance Void Meter)가 설치되었다. IVM에서 계측된 평균 기포계수의 계측오차는 측정값의 2%이다. 평균 양방향 유동 튜브는 최상단에 설치된 IVM의 후단에(L/D=120) 설치되었다. 이때, 정압은 IVM과 평균 양방향 유동 튜브사이에서 계측된다. 사용된 정압계와 차압계의 계측오차는 최대 측정 범위의 0.11%이다.

Test section 입구 배관에는 물과 공기용의 Coriolis 질량 유량계가 설치되어 유로에 주입되는 물과 공기의 각각의 질량 유량 계측에 사용된다. Coriolis 유량계의 계측오차는 물인 경우 0.6% , 공기 유량의 경우 0.4%이다. 유체온도는 입구에 설치된 RTD에 의해 계측되며 계측 오차는 0.5도이다.

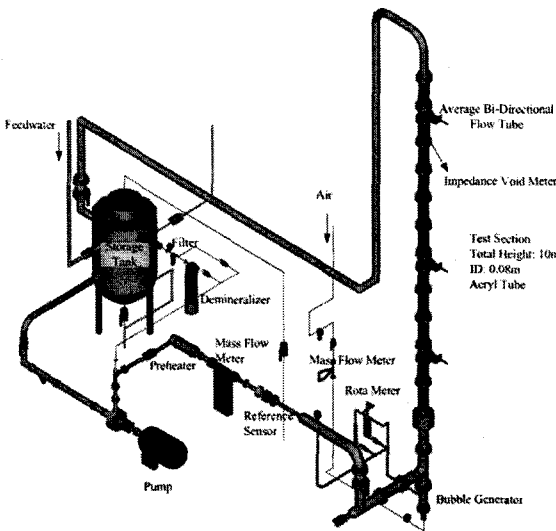


Fig 3 Bird's eye view of air/water loop

## 4. 실험 및 결과

### 4.1. 물 및 공기 단상 유동 실험

교정 커브를 얻기 위해 단상의 공기 및 물 유동 조건에서 교정 실험을 수행하였다. 실험에서 양방향 유동 튜브에서 발생된 차압은 Rosemount 3051C SMART Type 차압계(Full span - 25")에 의해 계측되었다. 실험에서 물 속도는 0.06m/s-2.5m/s, 공기 속도는 0.07m/s-3.4m/s 까지 변화되었다. 그림 4는 유체의 평균 속도에 따른  $\sqrt{2\Delta P/\rho}$ 의 변화를 보여준다. 그림에서와 같이 물 유동에서  $\sqrt{2\Delta P/\rho}$ 와 속도의 선형의 관계를 보여준다. 그러나 공기 유동의 경우 물 유동과 달리 저속에서의 선형성이 떨어지며, 선형으로 근사 했을 경우 기울기 및 y절편 값이 물 유동에서의 값과 다르다. 이러한 교정 커브를 물과 공기등의 작동 유체 및 물성치의 변화에 무관하게 얻기 위해 그림 5에서와 같이 Re 수에 따라 K값을 도출하였다. 이때,  $Re(= \rho D_h V/\mu)$ 수는 평균 양방향 유동 튜브의 기하학적 형상에 의해 정의된 다음의 수학적 직경에 의해 계산된다.

$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (2)$$

여기에서 a,b는 양방향 튜브의 가로 및 세로이다. 그림 5에서와 같이 물 또는 공기 유체의 K값은 Re수에 의해 단일 곡선으로 fitting되거나 구간별 내삽법(Piecewise Interpolation)에 의해 구해질 수 있다. 단상 유동에서 얻어진 이러한 K값은 이상유동에서 각 상의 유량 환산에 사용되는 교정 값으로 사용된다. 본 연구에서는 이상유동 유량 계측을 위해 소구간 별 최소 자승법을 적용하여 K값을 구한다.

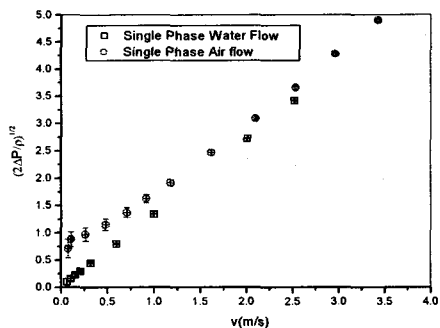


Fig 4  $\sqrt{2\Delta P/\rho}$  against average velocity

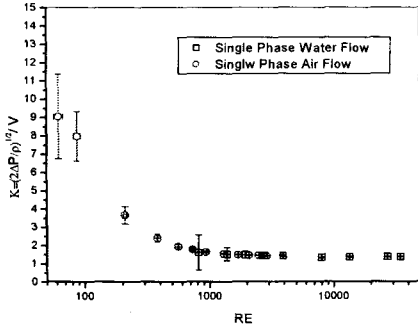


Fig 5 Amplification factor K against Reynolds number

## 4.2 물-공기 이상유동 실험

### 4.2.1. 이상유동 유량 계산 모델

평균 양방향 유동 튜브를 이상유동에 적용할 경우 유량 계산에 필요한 해석 모델을 개발하고 그 적용성을 평가하기 위해 물-공기 조건에서 실험을 수행하였다. 실험 이루어진 유동조건은 기포 계수 2.8-42%, 물 및 공기 유동의 최대 길보기 속도는 각각 2.5m/s 및 1.5m/s이며 압력은 1-2기압으로, 이때, 유동 양식은 버블리, 슬러그 그리고 천 유동이다.

이상유동에서 적용된 평균 양방향 유동 튜브의 압력강하 값을 유량으로 환산하기 위해서는 물리적 모델링이 필요하다. 양방향 유동 튜브의 기본 원리는 Pitot 관의 원리와 유사하며, 따라서 Pitot관의 압력 강하 값에서 이상유동 유량을 예측하는 모델링 기법을 응용하는 것이 타당하다. 혼합 유동 및 성층류 유동 등 여러 가지 이상유동 양식에 적용 가능한 일반식을 유도하기 위해 양방향 유동 튜브에서 발생하는 압력 강하 식을 다음과 같은 일반식으로 표현할 수 있다.

$$k^2 \equiv \frac{\Delta p}{\rho_e v_{tp}^2/2} = \frac{2\Delta p}{G^2/\rho_e} \quad (3)$$

여기에서

$$G \equiv \rho_e v_{tp} = (1-a)\rho_f v_f + a\rho_g v_g = \rho_f j_f + \rho_g j_g \quad (4)$$

$$\frac{1}{\rho_e} = \frac{x^2}{a\rho_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-a)\rho_f} \quad (5)$$

식 (4)로부터 이상유체의 평균 속도는 다음과 같이 구해진다.

$$v_{tp} = \frac{(1-a)\rho_f v_f + a\rho_g v_g}{\rho_e} = \frac{\rho_f j_f + \rho_g j_g}{\rho_e} \quad (6)$$

식(3)에 이상유동시에 발생하는 상간의 모멘텀 교환 인자  $J$  및 단상유동에서 얻어진 증배계수  $k$ 를 도입하여 정리하면 최종적으로 다음의 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{1}{2\rho_e} [k_f \cdot \sqrt{J} (1-a)\rho_f v_f + k_g \cdot a\rho_g v_g]^2 \\ &= \frac{1}{2\rho_e} [k_f \cdot \sqrt{J} (1-a)\rho_f v_f + k_g \cdot a\rho_g v_g]^2 \quad (7) \end{aligned}$$

식 (7)에서와 같이 이상유동 조건에서 평균 양방향 유동 튜브에서의 압력 강하 값과 이때의 기포계수 값을 예측하게 되면 각 상의 속도  $v_g, v_f$  관계식을 얻게 된다. 이때, 각 상의 속도를 각각 얻기 위해서는 두 상의 속도 중 하나가 따로 예측되거나 상간의 속도를 연결짓는 보조 상관식이 필요하다. 본 연구에서는 Chexal[6]에 의해 제시된 Drift-flux 상관식을 이용하여 각 상의 속도를 계산하였다. Chexal 모델은 유동 양식에 무관하게 수직관 및 수평관에 적용할 수 있는 범용 drift-flux model 모델로 상향 유동, 하향 유동 그리고 반류 유동에 적용이 가능하다. Chexal 모델의 또 다른 장점은 광범위한 실험자료에 의해 검증되었다는 점이다. 주어진 유동 조건에서 예측된  $\alpha$ ,  $W_{total}(=f(\Delta P)), P, T_g, T_f$  및 단상유동 실험에서 얻어진  $K$  값에 Chexal모델을 이용하여 계산을 수행하면  $C_o$  &  $V_{gj}$ 를 얻게 되고 이를 다음의 식에 적용하면 각상의 길보기 속도 및 상의 속도를 구할 수 있다.

$$j_f = (1-a)u_f = \frac{(1-aC_o)[\frac{w}{A} - \frac{a\rho_g V_{gj}}{1-aC_o}]}{\rho_f [1-aC_o(1-\frac{\rho_g}{\rho_f})]} \quad (8)$$

$$j_g = \alpha u_g = \frac{\alpha(C_o j_f + V_{gj})}{1-aC_o} \quad (9)$$

여기에서

$$w_x = \rho_x A j_x \quad (10)$$

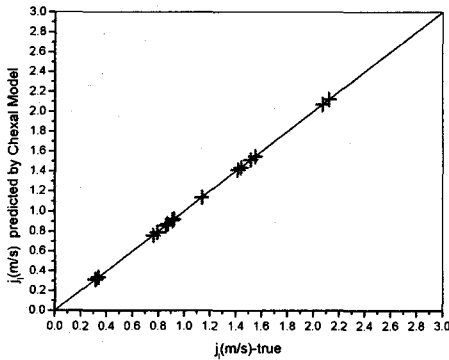
식(7)-(10)을 이용하여 반복 계산을 수행하여 계산된 길보기 속도값이 일정한 값에 도달하면 계산을 종료한다. 상기 질량 유량 계산에 사용되는 Chexal Drift-flux model의 예측 능력 및 모멘텀 교환 인자  $J$ 는 계산된 질량 유량의 정확도에 직접적으로 영향을 준다. 따라서, 본 실험

조건에 대한 Chexal 모델의 예측 능력 및 모멘텀 교환인자  $J$ 에 따른 양방향 유동튜브의 이상유동 유량 예측 능력을 평가할 필요가 있다.

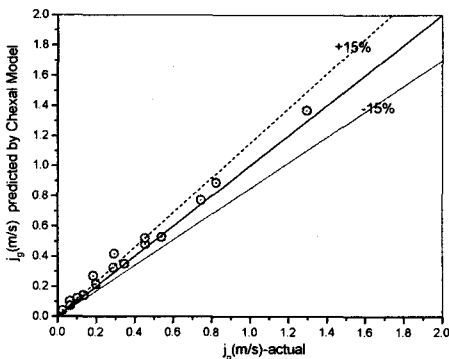
#### 4.2.2. Chexal Drift-Flux 모델 평가

실험에서는 유로 입구에 설치된 Coriolis 유량계에 의해 물 및 공기의 유량이 각각 측정되었다. 본 실험이 이루어진 유동조건에서 Chexal 모델의 적용성 및 예측 능력을 평가하기 위해 실험에서 측정된 질량 유량 및 온도 압력 값을 이용하여 각 상의 겹보기 속도를 구하고 이를 Chexal 모델에서 예측된 각 상의 겹보기 속도 값을 비교하였다. Chexal 모델의 계산에 사용된 입력 변수는 유로 입구에서 측정된 각 상의 질량 유량의 합인 총 질량 유량  $w_t (= w_g + w_f)$ , 양방향 유

동 튜브가 설치된 측정 단면에서의 기포 계수  $\alpha$  그리고 각종 물성치 계산을 위한 온도, 압력 측정값이다. 그림 6은 계산된 각 상의 겹보기 속도의 결과를 보여준다. 그림에서와 같이 Chexal 모델은 본 실험에서 측정된 물의 겹보기 속도는 최대 3% 공기의 겹보기 속도는 최대 15%의 범위에서 예측할 수 있음을 보여준다. 실험이 이루어진 유동조건은 대기압에 가까운 저압 조건으로 밀도 차에 의한 상간의 속도 차가 최대인 유동 영역에 해당된다. 이러한 유동 영역은 기존의 이상유동 유량 계측에서 상간의 속도를 얻기 위해 널리 사용되어온 균질 유체 모델(homogeneous)을 적용할 경우 그 오차가 최대가 되는 조건에 해당된다. 그림에서와 같이 Chexal 모델은 본 실험 결과를 잘 예측할 수 있음을 확인하였다.



(a) Liquid superficial velocity



(b) Air superficial velocity

Fig 6 Comparison of measured and predicted phasic superficial velocity

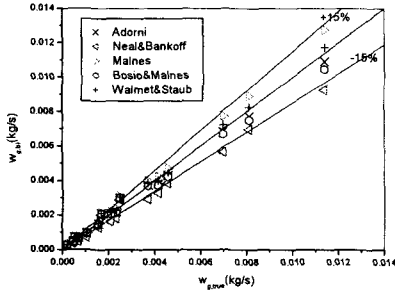
#### 4.2.3. 이상유동 유량 계산

기포 계수가 낮은 유동 조건에서와 같이 유로내의 기포의 크기가 센서의 직경에 비해 충분히 작고 유동 튜브 전단에서 유선을 따라 기포가 입사해오면 상간의 모멘텀 교환은 무시될 수 있다. 그러나, 기포의 크기가 큰 고기포 계수 영역에서는 상간의 모멘텀 교환이 크게 발생되어 측정된 차압 값을 유량으로 환산할 때 이를 고려해야 한다. 모멘텀 교환 인자는 저 기포 계수영역에서는 1, droplet 유동에서는 2임이 알려져 있다. 표 1에는 Pitot관에 널리 적용되는 기존의 모멘텀 교환 인자  $J$ 를 정리하였다[5].

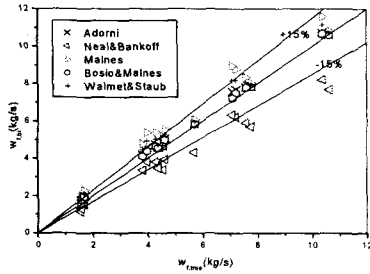
그림 7에는 평균 양방향 유동 튜브에서 얻어진 차압정보와 Chexal 모델을 이용하여 수직관에서 적용 가능한 모멘텀 교환 인자  $J$ 에 따른 각 상의 질량 유량을 계산하여 Coriolis에서 측정된 물 및 공기의 주입 질량 값을 비교 도시 하였다. 그림 7에서와 같이 계산된 질량 유량 값은 각 모멘텀 교환 모델에 따라 크게

Table 1 Model for Momentum Exchange Factor  $J$  [5].

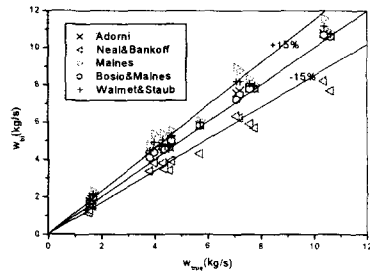
Authors	$J$
Adorni et al.(1961)	$1 + \alpha$
Neal & Bankoff(1965)	2.0
Malnes(1966)	1
Bosio & Malnes(1968)	$(1 - 0.5\alpha^2) / (1 - \alpha)$
Walmet & Staub(1969)	$1 + \alpha/2$
Davis(1979)	$1 < J = f(\alpha) < 1.75$



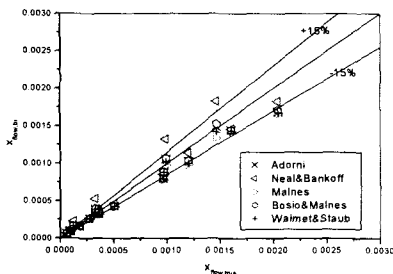
(a) Gas mass flow rate



(b) Water mass flow rate



(c) Total mass flow rate



(d) Flow quality

Fig 7 Comparison of measured two-phase flow parameters with true values according to the J

차이가 난다. Adorni 모델에 의해 계측된 공기의 질량 유량은 실제 값보다 크나 총 질량 유량 및 유동건도는 비교적 정확하게 예측되었다. Neal&Bankoff의 모델은 물 및 공기의 질량 유량을 낮게 예측하며, 측정된 유동 건도의 산포도도 크다. Malnes 모델은 각 상의 질량 유량을 과도하게 예측하고, 계측된 유동건도는 실제값보다 낮게 예측한다. Walmet&Staub 모델은 공기의 질량 유량은 잘 예측하나, 물의 질량 유량은 크게 예측한다.

제시된 모델중 Bosio&Malnes 모델은 본 실험 데이터의 이상유동 변수들을 비교적 잘 예측한다. 그림에서와 같이 Bosio&Malnes 모델에 의해 예측된 이상유동 변수는 참값과 비교시 15%의 계측오차를 갖는다. 그림 8에서와 같이 Bosio&Malnes에 의해 계산된 모멘텀 교환인자 J의 범위는 1.0-1.5사이였으며, 이는 Davis의 모델과 일치하는 결과이다. 그러나, Bosio&Malnes 모델의 모멘텀 교환인자는 기포계수가 1에 접근하면 급격히 증가하며, 따라서 기포계수가 큰 유동 조건에 적용하기 위해서는 검증이 필요하다.

#### 4.2.4. 새로운 모멘텀 교환인자

주입된 물 및 공기의 질량 유량을 이용하여 각 상의 속도를 구하고 이를 식(7)에 대입하면 모멘텀 교환인자를 얻게 된다. 그림 8에는 이렇게 얻어진 모멘텀 교환인자를 기존에 제시된 모멘텀 교환인자 상관식에 의해 계산된 값과 비교 도시하였다. 그림에서와 같이 실험이 이루어진 기포 계수 0.4 이하의 영역에서 기존의 모델에 의해 계산된 모멘텀 교환인자는 본 실험에서 얻어진 모멘텀 교환인자보다 작게 예측하고 있다. 구해진 모멘텀 교환인자는 유동의 변화에 무관하고 기포 계수만의 함수였으며, 다음의 상관식에 의해 상관식화 되었다.

$$J(a) = 2 - \frac{1.25}{1 + e^{(a-0.22)/0.15}} \quad (11)$$

그림 8에서와 같이 식(11)의 실험 상관식은 실험에서 얻어진 모멘텀 교환인자를 최대 10% 오차범위에서 예측할 수 있다.

양방향 유동 튜브에서 얻어진 차압 값으로부터 보다 정교한 이상유동 질량유량 계산을 위해 식(11)의 모멘텀 교환인자를 사용할 수 있다. 그림 9는 Chexal

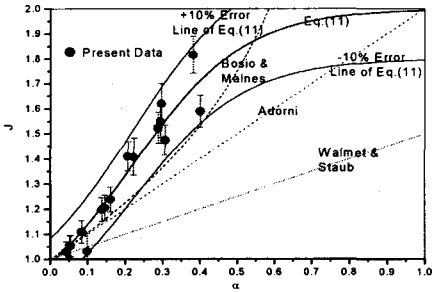


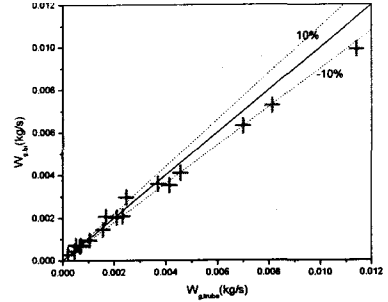
Fig. 8 Plot of momentum exchange factor

drift-flux model과 식(11)에 의해 계산된 이상유동 변수 값을 보여준다. 그림에서와 같이 새로이 제시된 모멘텀 교환인자를 사용하여 이상유동 유량을 계산한 결과 각 상의 질량 유량은 10% 범위에서 계측이 가능하다. 이는 Bosio&Malnes모델에 의해 계산된 값과 비교하면 제시된 새로운 모멘텀 교환 인자가 Bosio&Malnes모델에 비해 이상유동 질량 유량을 5% 정확하게 예측하게 할 수 있음을 보여준다.

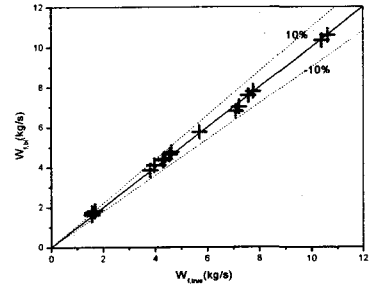
## 5. 결론

단상 및 이상유동 조건에서 질량유량을 계측할 수 있는 평균 양방향 유동 튜브를 제시하였다. 평균 양방향 유동 튜브는 비교적 저속의 양방향 유동에 적용할 수 있는 특성이 있다. 양방향 유동 튜브에서 발생하는 차압 값은 튜브 후방에서 형성되는 유동에 의한 흡입 효과로 기존의 Pitot관에서 발생하는 차압 값 보다 크다. 이러한 압력 발생 값에 따른 증배 계수를 얻기 위해 단상의 물 및 공기 유동 조건에서 교정 실험을 하였다. 교정 실험에 의하면 증배 계수 K는 물과 공기등 유체의 종류에 무관하게 Re 무차원수에 의해 교정 커브로 얻어질 수 있다.

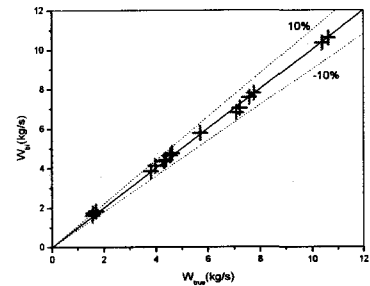
또한, 제시된 양방향 유동 튜브를 이상유동 조건에 적용하여 질량 유량을 예측하는 해석 모델을 제시하였다. 해석 모델에는 Chexal의 Drift-flux 모델과 상간의 모멘텀 교환인자 J가 도입되었다. 이상유동에서 수행된 실험 결과 값과 비교한 결과 Chexal의 Drift-flux모델은 본 실험데이터를 잘 예측할 수 있으며, 모멘텀 교환인자는 기존 모델 중 Bosio & Malnes모델이 가장 적합한 것으로 판명되었다. 그러나, 보다 정확한 질량 유량 예측을 위하여 본 실험 데이터에서 얻어진 모멘텀 교환인자를 이용하여 새로운 상관식을 제시하였다.



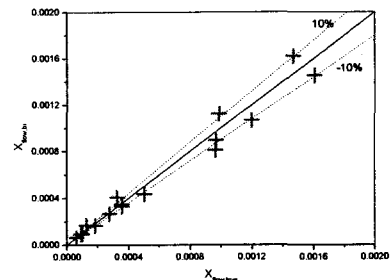
(a) Gas mass flow rate



(b) Water mass flow rate



(c) Total mass flow rate



(d) Flow quality

Fig. 9 Calculated two-phase flow parameters using present momentum exchange model

제시된 모멘텀 교환 인자를 사용하여 질량 유량을 계산한 결과 기존의 Bosio&Malnes 모델보다 정확한 질량 유량을 얻을 수 있음을 확인하였다.

향후 평균 양방향 튜브를 수평관에 적용하여 성층류가 발생하는 이상유동 조건에서 이상유동 질량 유량을 예측하기 위한 연구가 수행될 예정이다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구, 개발사업의 일환으로 수행되었다.

### 참고문헌

- (1) G.Heskestad, "Bidirectional Flow Tube for Fire Induced Vent Flows", Appendix K in Croce, P.A., and Emmons H.W., The Large-Scale Bed Room Fire Tests, July 11, 1973, Factory Mutual Research, FMRC S/N 210114.4, July 1974
- (2) B.J.Mccaffrey, G.Heskestad, "A Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application", Combustion and Flame vol. 26. pp125-127(1976)
- (3) C.Y.Liu, Y.W.Wong, W.K. Chan and T.C. Gan, "Note on the Robust Bidirectional Low Velocity Probe", Experiments in Fluids 9, pp356-354(1990)
- (4) K.H.Kang, B.J.Yun, W.P.Baek "Flow Analyses using FLUENT 5.4 Code for the Bi-directional Flow Tube" KSME '03 Autumn Meeting Korea, (2003)
- (5) J.Reimann, H.Kusterer and H.John, "Two-phase Mass flow Rate Measurements with Pitot Tube and Density Measurements", Measuring Techniques in gas-Liquid Two-Phase Flows, Symposium, Nancy, France (1983)
- (6) B.Chexal et al. "A Void Fraction Correlation for Generalized Applications" Progress in Nuclear Energy, vol. 27 No.4 pp.255-295(1992)