

평균 양방향 튜브의 설계 최적화를 위한 FLUENT 코드해석

강경호* · 윤병조* · 어동진* · 백원필*

FLUENT Code Analyses for Design Optimization of an Average Bi-directional Flow Tube

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

Key Words: Bi-directional flow tube(양방향 유동 튜브), Flow analyses(유동해석)

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. 3-dimensional steady state flow analyses using FLUENT 5.4 code were performed to validate the application of the average bi-directional flow tube in case of water and air flow. In this study, sensitivity studies have been performed to optimize the design features of the average bi-directional flow tube which can be applied for the various experimental conditions. For Re numbers above 1000, the k values are nearly constant regardless of the Re numbers and flow types and calculation results and experimental data coincides quite well. The current FLUENT calculation results suggest that linearity of the k values in various design features of the average BDFT is highly promising, which means that it is quite reasonable to select the typical design of the average BDFT for the convenience of the experimental conditions.

1. 서론

단상 및 이상유동이 발생하는 유체 시스템에서 유체의 질량 유량을 계측하는 것은 유동 영역을 해석하는데 있어 매우 중요하다. 이러한 질량 유량의 계측을 위해 다양한 작동 원리를 이용한 유량계의 개발이 이어져왔다. 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 유로에서 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 국소적 화염속도를 계측하기 위해 Heskestad가 최초로 고안하였다⁽¹⁾.

McCaffery 등은 국소 양방향 유동 튜브를 저속의

* 한국원자력 연구소 열수력 안전 연구부
책임저자 E-mail : khkang@kaeri.re.kr

공기 유동 조건에 적용하였다⁽²⁾. McCaffery의 연구에 의하면 국소 양방향 유동 튜브의 직경 12.7 mm ~ 25.4 mm에서 직경에 무관하게 동일한 속도 교정 커브를 얻을 수 있음을 보였다. 또한, 유체의 입사각이 ±50°까지 변화해도 큰 오차 없이 정확한 유동 정보를 얻을 수 있고, 양방향 유동의 계측이 가능한 특성을 보여주었다.

Liu 등은 보다 작은 크기의 국소 양방향 유동 튜브를 개발하고자 공기 유동조건에서 4.7~8.8 mm의 튜브 직경을 갖는 국소 양방향 유동 튜브를 개발하였다. 연구 결과에 의하면 국소 양방향 유동 튜브의 교정 커브는 튜브 직경에 무관함을 보였다. 그러나 저속의 유동에서 발생하는 압력 강하 값은 McCaffery에 의해 제시된 압력강하 값보다 작게 나타났다⁽³⁾.

Kang 등은 국소 양방향 튜브를 단상의 물 유동에 적용하기 위해 FLUENT 코드를 이용하여 그 적용성을 평가하였다. Kang의 해석 결과에 의하면 국소 양방향 유동 튜브의 교정 커브는 물과 공기 등 유체 및 온도, 압력의 변화에 무관하게 Re 수에 의해 fitting 할 수 있음을 보였다⁽⁴⁾.

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

본 연구에서는 단상 공기 및 물 유동에 대한 양방향 유동 튜브의 적용성을 검증하기 위하여 FLUENT 5.4 코드를 이용한 유동해석을 수행하였다. 유동 해석 결과를 단상 유동에 대한 실험 결과와 비교하였다. 그리고 다양한 실험 조건에 적용할 수 있는 평균 양방향 유동 튜브의 설계 최적화를 위한 민감도 분석을 수행하였다.

2. 평균 양방향 유동 튜브의 작동원리

Fig. 1은 유로 내 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.

양방향 유동 튜브의 작동 원리는 Pitot 튜브와 유사하다. 유동이 있는 배관 내에 튜브가 설치되는 경우 튜브 전단에서 측정되는 압력은 총 압력(total pres-

sure)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.

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

여기서

Δp : 유동튜브에서의 압력 계측값

ρ : 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. 단상 유동에 대한 교정 실험

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 실험 장치에서 수행되었다. 물 공기 실험 장치는 기포 생성용 노즐에 주입되는 공기 주입량의 제어를 통해 단상의 물, 공기 또는 물-공기 이상유동 조건을 임의적으로 만들 수 있다.

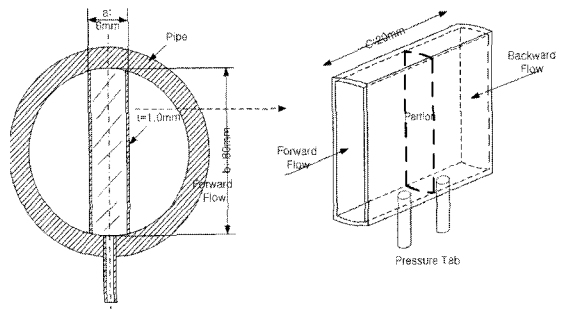


Fig. 1 Schematics of average bi-directional flow tube

실험장치는 Fig. 2에서와 같이 실린더형 test section, 물 저장 탱크, 기포 발생기, 예열기, 물 및 공기 공급 장치, 압력 조절 장치 그리고 계측기기 및 DAS 로 구성된다. Test section은 가시화가 가능하게 투명한 아크릴로 만들어 졌으며, 내경은 80 mm, 길이는 10 m의 수직관이다. Test section 입구 하부에 설치된 기포 발생장치는 유로에 주입되는 기포의 양 및 기포의 크기 조절이 가능하다. 주입된 물-공기 이상 유체는 물 저장탱크에서 분리되며, 공기는 외부로 방출된다. 이때 유로 내 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 측정범위의 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.

단상 유동에 대한 교정 실험을 통해 증배 계수 K를

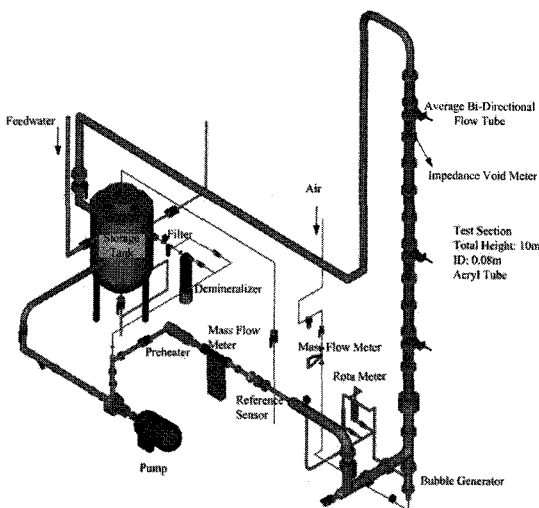


Fig. 2 Bird's eye view of air/water loop

공기 유동과 물 유동 조건에 대해 각각 구하였다. 자세한 실험 결과는 기존 논문에 자세하게 기술되어 있다⁽⁵⁾. 본 연구에서는 단상 유동 실험 결과를 FLUENT 코드를 이용한 유동 해석 결과와 비교하였다.

4. FLUENT 코드를 이용한 유동 해석

4.1 유동 해석 방법론

상용 전산 코드인 FLUENT 5.4 코드를 이용하여 3차원 정상 상태에 대한 유동 해석을 수행하였다. 운동장 방정식을 풀기 위해 second order upwind scheme을 이용하였고 압력-속도장의 coupling을 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 본 유동 해석에서는 Re 수의 범위에 따라 층류와 난류 유동을 각각 모의하였고 기준 Re 수는 2600을 적용하였다⁽⁶⁾. 표준 k-ε 모델을 사용하여 난류 유동을 해석하였다. 배관 직경을 고려하여 난류 강도는 5%, 수력학적 직경은 0.04 m을 각각 적용하여 난류 유동을 정의하였다. 유동 튜브 전, 후단의 압력 홀에서 차압을 계산하여 증배 계수 K 값을 결정하였다. 그리고 Re수에 따른 K 값을 변화를 분석하였다.

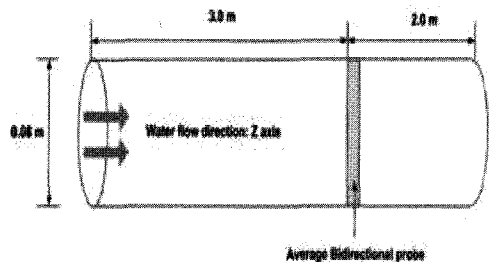


Fig. 3 Schematic diagram of FLUENT calculation

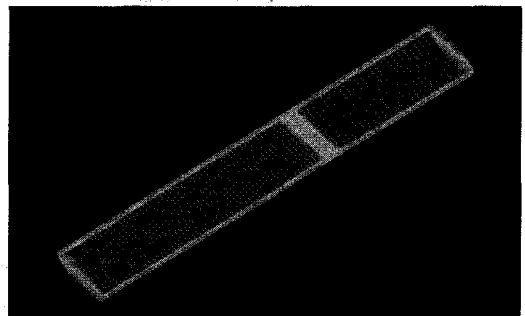


Fig. 4 Mesh for the FLUENT calculation

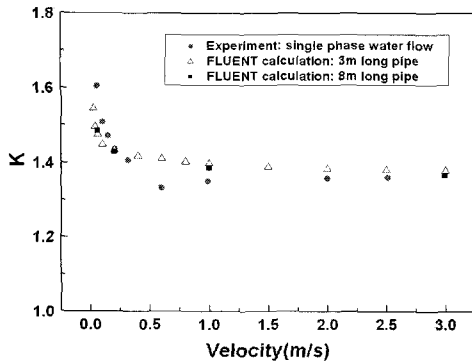


Fig. 5 K values according to the inlet water velocity

직경 0.08 m, 높이 3 m (혹은 8 m) 규격의 수직 배관에 대하여 단상 공기 유동과 물 유동을 모의하여 해석하였다. 배관 및 배관 내 유동, 평균 양방향 유동 튜브는 약 35만 개의 hexahedron cell로 격자화하였다. 물 유동의 경우 입구 속도는 0.02~3.0 m/s였고 공기 유동의 경우 0.07~3.5 m/s의 범위로 설정하였다. Fig. 3과 4는 유동 해석을 위한 개념도와 격자의 모습을 각각 보여준다. 실제 실험에 사용한 배관의 수직 길이는 8 m 였다. 본 연구에서는 8 m 와 3 m 배관 길이에 대하여 동일한 해석 조건에 대한 계산을 수행하여 그 결과가 유사함을 확인하였다. 따라서 코드 계산의 효율성을 높이기 위해 8 m 배관 길이 대신에 3 m 배관 길이에 대한 해석을 주로 수행하였다.

4.2 FLUENT 코드를 이용한 유동 해석 결과

4.2.1 교정 실험에 대한 검증 해석

단상 공기 및 물 유동에 대한 양방향 유동 튜브의 적용성을 검증하기 위하여 유동 해석 결과를 단상 유동에 대한 실험 결과와 비교하였다. Fig. 5와 6은 수직 단상 물 유동 및 공기 유동 실험에서 얻어진 K 값과 계산에서 얻어진 K 값을 각각 비교한 그림이다. Fig. 5와 6을 보면, 3 m 와 8 m 배관 길이에 대한 계산 결과가 유사함을 확인할 수 있다. 수직 단상 물 유동에 대한 계산에서 얻어진 K 값은 실험에서 얻어진 K 값보다 근소하게 크게 나타났지만 최대 3%의 오차 범위를 보여서 실험 결과를 비교적 잘 예측하였음을 알 수 있다.

수직 단상 공기 유동에 대한 해석 결과를 보면 입구

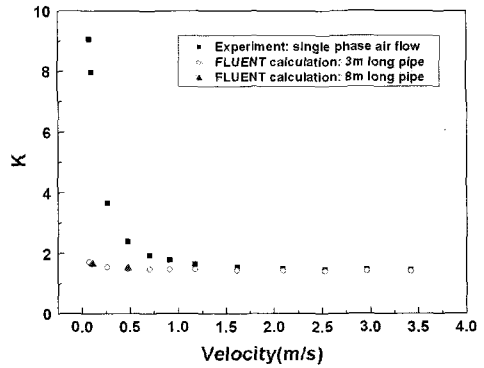


Fig. 6 K values according to the inlet air velocity

공기 속도가 1.0 m/s 이상의 유동 조건에서는 FLUENT 계산 결과와 실험 결과를 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다. 반면, 저속 유동 조건에서는 해석 결과와 실험 결과가 매우 큰 편차를 나타낸다. 이 같은 결과는 FLUENT 코드와 같은 상용 CFD 코드가 저속 유동 조건을 모의하는 경우 피할 수 없는 코드의 한계로 여겨진다.

Fig. 7은 수직 단상 물 및 공기 유동에 대한 해석 결과를 Re의 함수로 표현한 것이다. Re 수가 1000 이하의 수직 단상 공기 유동의 경우 실험 결과와 계산 결과가 큰 편차를 보이지만 양방향 유동 튜브의 상용화 및 일반적으로 유동 실험 장치에 적용할 경우 관심 있는 영역인 Re 수가 1,000 이상의 유동 조건에서는 실험 결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 FLUENT 계산 결과는 FLUENT가 추후 단상 유동에서 K 값의 교정 커브를 얻는데 성공적으로 사용될 수 있음을 보여준다.

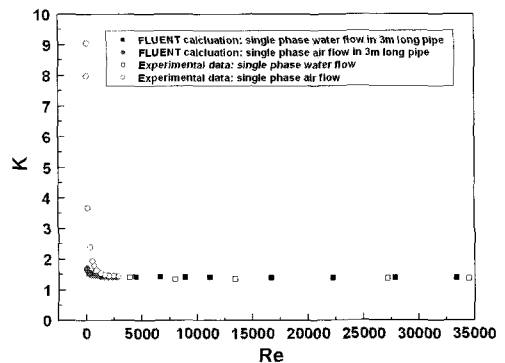


Fig. 7 K values according to the Re number

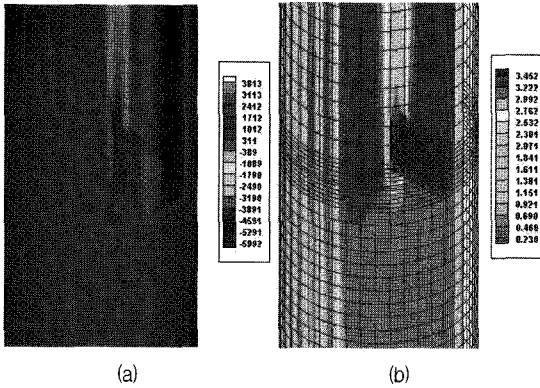


Fig. 8 Pressure and velocity contours (water velocity=3.0 m/s) : (a) pressure (Pa) and (b) velocity (m/s)

Fig. 9는 수직 단상 물 유동에 대한 계산에서 얻어진 전형적인 압력 및 속도장을 보여준다. 입구 속도는 3.0 m/s 였고 압력 분포 값은 초기 압력인 0.1 MPa에 대한 상대 값을 표시한 것이다. 속도장 및 압력장의 특성은 Local 양방향 유동튜브의 계산 결과와 동일한 경향을 보여주며 유동 튜브 후단에서 흡입 효과에 의한 back pressure를 명확히 확인할 수 있다.

4.2.2 양방향 유동 튜브의 설계 최적화

다양한 실험 조건에 적용하기 위하여 양방향 유동 튜브의 설계 최적화를 위한 민감도 해석을 수행하였다. Fig. 9는 평균 양방향 유동 튜브의 설계 변수에 대한 개념도를 보여준다. 본 연구에서는 유동 튜브의 규격을 달리한 경우에도 유동 튜브의 계측 특성이 유지되는 지를 확인하고자 설계 변수를 달리하여 계산을 수행하였다.

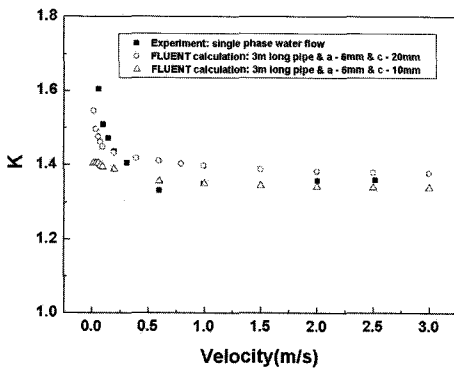


Fig. 10 Variations of K: effect of tube length(c)

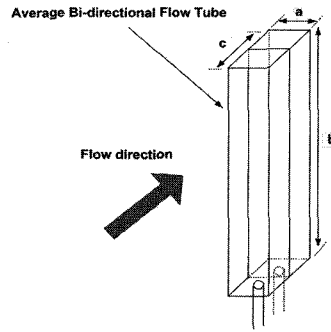


Fig. 9 Design parameters of the flow tube

Figs. 10과 11은 수직 단상 물 유동과 공기 유동에 대하여 평균 양방향 유동 튜브의 규격을 달리한 경우에 대한 해석 결과와 실험 결과를 비교한 그림들이다. Figs. 10과 11을 보면 평균 양방향 유동 튜브의 규격이 K 값에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 유동 튜브의 길이(c)가 짧은 경우에는 K 값이 입구 속도의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 그리고 유동 튜브의 폭(a)이 작은 경우에 K 값이 증가하였다. 설계 변수에 따른 양방향 유동 튜브의 성능 면에서는 길이(c)가 짧고, 폭(a)이 넓은 경우가 본 실험 결과를 가장 잘 예측함을 확인하였다.

Fig. 12는 Re 수에 따른 K 값의 변화에 대한 계산 결과를 보여준다. Fig. 12를 보면 Re 수가 1000 이상인 유동 영역에서는 Re 수 및 유체 종류 그리고 유동 튜브의 규격에 상관없이 K 값이 상수를 유지함을 알 수 있으며 이 같은 계산 결과는 원하는 실험 조건에 따라 다양한 규격의 유동 튜브를 제작하여 유량을 측정할 수 있음을 보여준다.

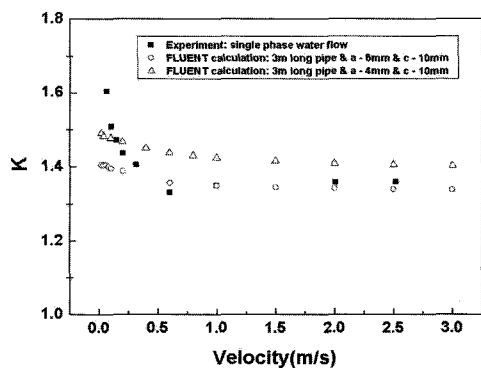


Fig. 11 Variations of K: effect of tube width(a)

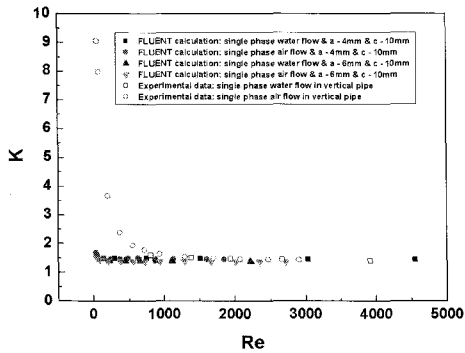


Fig. 12 K values according to Re numbers in all the cases

5. 결론

단상 및 이상유동 조건에서 질량유량을 측정할 수 있는 평균 양방향 유동 튜브를 제시하였다. 본 연구에서는 단상 공기 및 물 유동에 대한 평균 양방향 유동 튜브의 적용성을 평가하기 위하여 FLUENT 5.4 코드를 이용한 유동 해석을 수행하였다. 해석 결과, Re 수가 1,000 이상인 유동 영역에서는 Re 수 및 유체 종류 그리고 유동 튜브의 규격에 상관없이 K 값이 상수를 유지함을 알 수 있었으며 실험 결과를 비교적 정확히 예측함을 확인하였다. 이 같은 계산 결과는 원하는 실험 조건에 따라 다양한 규격의 유동 튜브를 제작하여 유량을 측정할 수 있음을 보여준다.

향후 평균 양방향 튜브를 수평관에 적용하여 상층류가 발생하는 이상유동 조건에서 이상유동 질량 유량을 측정하기 위한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구, 개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) G.. Heskestad, 1974, 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*.
- (2) B. J. Mccaffrey, G. Heskestad, 1976, A Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application, *Combustion and Flame*, Volume 26, pp. 125~127.
- (3) C. Y. Liu et al., 1990, Note on the Robust Bidirectional Low Velocity Probe, *Experiments in Fluids*, Volume 9, pp. 356~354.
- (4) K. H. Kang, B. J. Yun and W. P. Baik, Flow Analyses using FLUENT 5.4 Code for the Bidirectional Flow Tube, *KSME '03 Autumn Meeting Korea*, 2003.
- (5) B. J. Yun et al., A New Method for the Measurement of Two-phase Mass Flow Rate using Average Bi-directional Flow Tube, *KSME '04 Spring Meeting Korea*, 2004.
- (6) F. M. White, 1986, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Book Company, Singapore.