

# FLUENT 5.4 코드를 이용한 양방향 유동 튜브에 대한 유동해석

강경호<sup>†</sup> · 윤병조\* · 백원필\*\*

## Flow Analyses using FLUENT 5.4 Code for the Bi-directional Flow Tube

Kyoung-Ho Kang, Byung-Jo Yun and Won-Pil Baek

**Key Words :** Flow Analyses(유동 해석), Bi-directional Flow Tube(양방향 유동 튜브)

### Abstract

Flow analyses using FLUENT 5.4 code were performed to validate the application of the local 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 bi-directional flow tube which can be applied for the various experimental conditions. 2-dimensional axisymmetric steady state flow analyses have been performed. By calculating the differential pressure at both the front and the rear hole of the flow tube, K values were evaluated. The K values show good linearity regardless of the tube sizes and the Re numbers in both water and air flow. And system pressure and water subcooling didn't affect the K values. Under the elevated pressure of 80bar with 80K water subcooling, the K value indicates a similar trend with the case of 2bar with 80K water subcooling.

### 기호설명

K	압력 증배 계수
P	양방향 유동 튜브의 전, 후단 압력 차이
$P_d$	동압
V	유체 속도 유체 밀도

### 1. 서론

유동 방향이 복잡한 국소적 화염속도를 계측하기 위하여 양방향 유동 튜브(Bi-directional Flow Tube)가 고안되어 사용되고 있다[1,2]. 양방향 유동 튜브의 원리는 피토 튜브(Pitot tube)와 동일하나 유체의 입사각이 50° 까지 큰 오차 없이 유동 속도를 측정할 수 있고 양방향 유동의 계측이 가능한 장

점을 갖고 있다.

McCaffery 는 양방향 유동 튜브를 저속의 공기 유동에 적용하여 국소적 유동 속도를 계측하였다 [1]. McCaffery 의 실험 결과 튜브 직경 12.7 ~ 25.4mm 에서 직경에 무관하게 동일한 속도 교정 곡선을 얻을 수 있음을 보였다.

Liu 는 McCaffery 가 사용한 튜브의 직경 보다 작은 크기의 양방향 유동 튜브를 개발하여 공기 유동 조건에서 실험을 수행하였다. Liu 는 직경 4.7 ~ 8.8mm 의 유동 튜브를 이용하였으며 실험 결과 국소적 양방향 유동 튜브의 교정 곡선은 튜브 직경에 따른 Re 수에 무관함을 보였다. 그러나 저속에서 양방향 유동 튜브에서 발생하는 압력 강하 값이 McCaffery 의 연구 결과의 압력 강하 값보다 작게 나타났다.

한국원자력연구소에서는 한국형 차세대 원전(APR1400)의 열수력 현상을 모의, 실험하기 위한 열수력 종합 실험 장치인 ATLAS 를 개발하였다. ATLAS 실험 장치의 1 차 계통 배관에서 유량을 계측하기 위하여 국소적 양방향 유동 튜브(Local Bi-directional Flow Tube)를 개발하였다. 본 연구에서는 기존 양방향 유동 튜브 연구 결과를 확인하고 새로 개발한 국소적 양방향 유동 튜브의 적용

<sup>†</sup> 한국원자력연구소 열수력 안전연구부  
E-mail : khkang@kaeri.re.kr  
TEL : (042)868-2665 FAX : (042)861-2574

\* 한국원자력연구소 열수력 안전연구부

\*\* 한국원자력연구소 열수력 안전연구부

가능성을 검증하고 튜브 설계를 최적화하기 위하여 FLUENT 5.4 코드를 이용한 유동 해석을 수행하였다.

## 2. 양방향 유동 튜브의 원리

전형적인 국소적 양방향 유동 튜브의 개념도는 그림 1 과 같다. 양방향 유동 튜브의 작동 원리는 피토 튜브와 동일하다. 유동이 있는 배관 내에 튜브가 설치되는 경우 튜브 전단에서 측정되는 압력은 총 압력(total pressure)과 동일하다. 반면 튜브 후단에서 측정되는 압력은 유동의 정압(static pressure)보다 다소 작다. 따라서 양방향 유동 튜브의 전, 후단에서 측정된 압력의 차이는 유동의 동압(dynamic pressure)보다 약간 크게 되며 이를 압력 증배 계수(amplification factor), K 로 표현하면 식 1 과 같다.

$$K = \sqrt{\frac{P}{P_d}} = \frac{\sqrt{2 P / \rho V^2}}{1} \quad (1)$$

식 (1)의 압력 증배 계수, K가 선형성을 가지면 원하는 유동 조건에서 양방향 유동 튜브의 전, 후단에서 차압을 측정함으로써 유동의 속도를 계산할 수 있다.

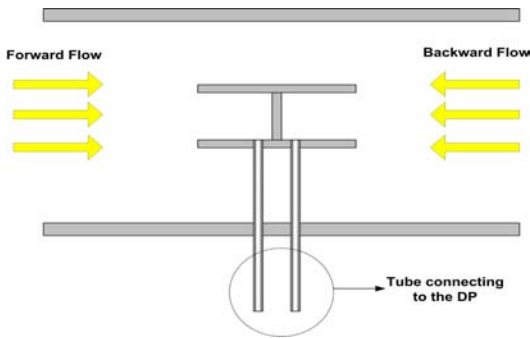


Fig. 1 Schematic diagram of local bi-directional flow tube

## 3. FLUENT 코드를 이용한 유동해석

### 3.1 기존 국소적 양방향 유동 튜브 평가

상용 CFD 코드인 FLUENT 5.4 코드를 이용하여 기존 McCaffery 와 Liu 의 실험 결과를 분석하였다. 이를 통하여 FLUENT 5.4 코드의 단상 유동 예측 능력을 평가하고 양방향 유동 튜브 개발을 위한

적용성을 검증하고자 하였다. 계산은 실험이 이루어진 유동 조건과 동일한 해석 조건에서 수행하였고 실험 결과와 비교하였다.

### 3.1.1 Liu 실험 평가

Liu 실험 결과를 평가하기 위해 튜브 직경 4.7, 6.4, 8.8mm 와 길이 20mm 의 국소적 양방향 유동 튜브에 대한 유동 해석을 수행하였다. 배관 내 공기 유동의 입구 속도는 실험 조건을 고려하여 0.3 ~ 2.5 m/s 로 설정하였다. 2 차원 축대칭, 정상 상태 유동 해석을 수행하였고 운동 방정식은 2 차 upwind scheme 에 의해 계산하였고 압력-속도 조합은 SIMPLE algorithm 을 사용하였다. 계산에서 층류와 난류의 경계점은 Re 수 2300 에서 결정하였고 난류 모델은 k-ε 모델을 사용하였다. 양방향 유동 튜브의 전, 후단에서 압력 차이를 계산하여 K 값을 유도하였다. 그림 2 는 Liu 실험 계산을 위한 유로 개념도를 보여준다. 그림 3 은 계산에 사용된 격자 구조를 보여준다.

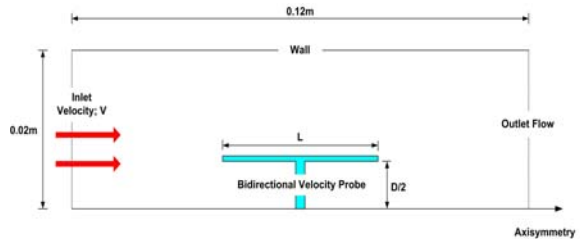


Fig. 2 Schematic diagram of flow path in the simulation for the Liu's experiment

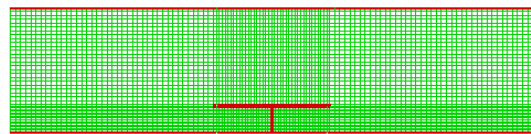


Fig. 3 Mesh in the simulation for the Liu's experiment

그림 4 는 튜브 직경 8.8mm 에 대한 유로 내 속도 분포를 보여준다. 그림 4 에서와 같이 양방향 유동 튜브 후방에서는 역 기압이 걸려서 총 압력 강하 값을 증가시키게 된다. 이러한 효과는 저속에서 차압 측정을 용이하게 할 수 있다. 그림 5 는 Liu 실험 결과와 FLUENT 코드 계산 결과를 보여주며, 그림 6 은 Re 수에 따른 K 값의 변화를 보여준다. 그림 5 를 보면 FLUENT 계산 결과가 Liu 의 실험 결과를 잘 예측함을 알 수 있다. 그림 6

에서 Re 수는 입구 속도와 튜브 직경에 의해 달라지며, 교정 곡선의 경향은 Re 수에 무관하게 동일함을 보여준다. 이러한 비교 계산을 통하여 FLUENT 코드가 단상 유동 조건에서 국소적 양방향 유동 튜브의 거동을 잘 예측한다는 사실을 확인하였다.

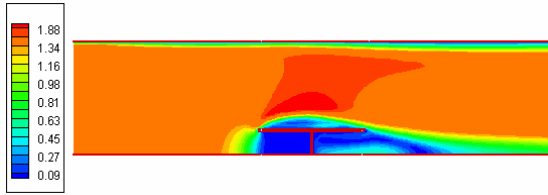


Fig. 4 Velocity contour in the simulation for the Liu's experiment

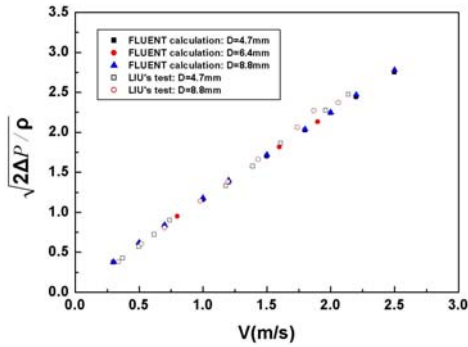


Fig. 5 Evaluations of K value in the simulation for the Liu's experiment

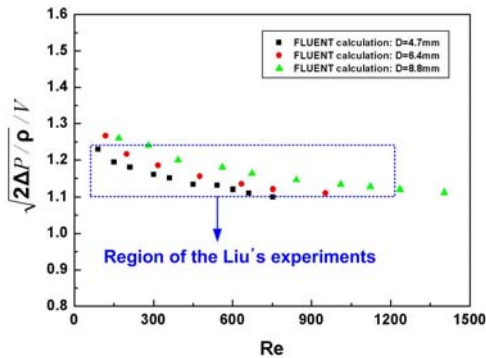


Fig. 6 Dependencies of K value on the Re # in the simulation for the Liu's experiment

### 3.1.2 McCaffery 실험 평가

McCaffery 가 사용한 국소적 양방향 유동 튜브의 직경은 Liu 가 사용한 것에 비해 크다. 튜브 직경 12.7, 15.9, 25.4mm 와 0.1 ~ 3.0m/s 범위의 공기

입구 속도에 대하여 FLUENT 유동 해석을 수행하였다. 계산에 사용된 가정 및 계산 방식은 Liu 실험 해석과 동일하다. 그림 7 은 K 값의 선형성을 보여주며 그림 8 은 Re 수에 따른 K 값의 변화에 대한 FLUENT 코드 계산 결과와 McCaffery 실험 결과를 보여준다. 그림 7 을 보면 K 값은 비교적 선형성을 갖고 있음을 알 수 있다. 그러나, 그림 8 의 Re 수에 따른 K 값의 변화를 보면 McCaffery 실험 결과는 코드 계산 결과와 차이를 나타낸다. 이는 Liu 의 지적과 같이 국소적 양방향 유동 튜브의 L/D 효과가 아닌 McCaffery 실험에서 계측상의 오차로 보여진다.

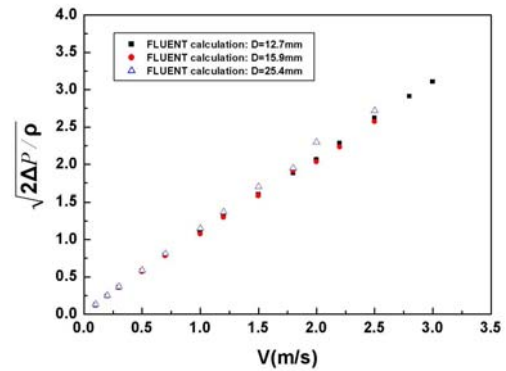


Fig. 7 Evaluations of K value in the simulation for the McCaffery's experiment

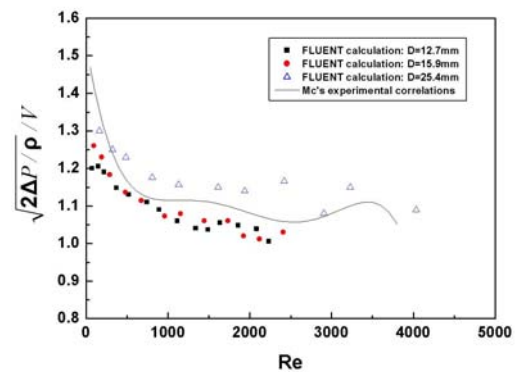


Fig. 8 Dependencies of K value on the Re # in the simulation for the McCaffery's experiment

### 3.2 단상 물 유동에 대한 적용성 평가

Liu 와 McCaffery 는 단상 공기 유동에 대하여 국소적 양방향 유동 튜브의 적용 가능성을 실험하였다. 그러나 본 연구는 공기보다는 단상 물 유동을 사용하여 실험하는 경우가 주가 되므로 단상

물 유동에 대한 국소적 양방향 유동 튜브의 적용성을 평가하기 위하여 FLUENT 코드 해석을 수행하였다. 단상 물 유동 해석에서는 Liu의 실험 해석에 사용한 유로 및 격자 구조를 적용하였다.

그림 9는 입구의 평균 물속도 1 m/s, 압력 2 기압 조건에서 계산된 압력 및 속도 분포를 보여준다. 그림 9를 보면 튜브 후방 센서에는 역 기압이 걸리는 것을 확인할 수 있다. 속도 분포는 튜브 내부에서 정체 유동이 발생됨을 보여준다. 이 같은 결과는 국소적 양방향 유동 튜브를 이상 유동 조건에 사용하더라도 기포가 튜브 내부로 침투할 수 없음을 나타낸다.

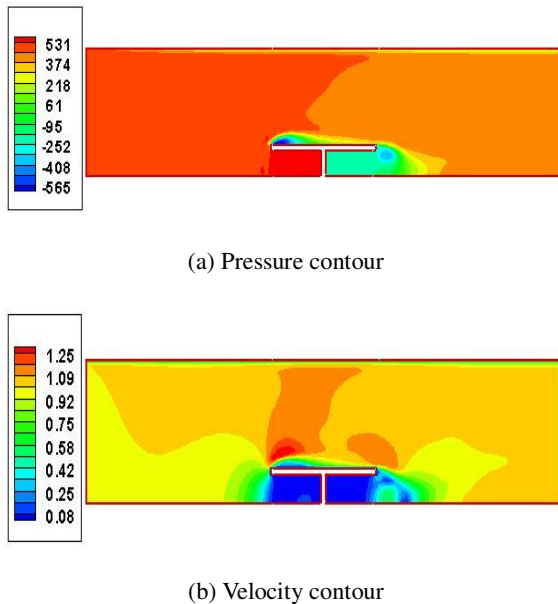


Fig. 9 Pressure and velocity contours in case of water flow

그림 10은 단상 물 유동과 단상 공기 유동에 대한 K 값의 선형성을 보여준다. 그림 10을 보면 단상 물 유동에서도 공기 유동에서와 동일하게 속도와 압력 강하 값의 제곱근이 선형의 관계가 있음을 알 수 있다. 그림 11은 단상 물 유동과 단상 공기 유동에서 Re 수에 따른 K 값의 변화를 보여준다. 그림 11에서와 같이 국소적 양방향 유동 튜브는 물 또는 공기의 유체 종류에 관계없이 Re 수에 따라 동일한 유동 특성을 보여준다. 이 같은 결과는 단상의 물 또는 공기 유동에서 얻어진 교정 곡선을 이용하여 각 유체에 따른 속도 계산에 적용할 수 있음을 보여준다.

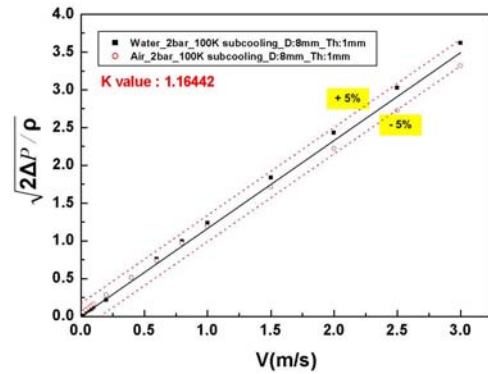


Fig. 10 Evaluations of K value in the air and water flow

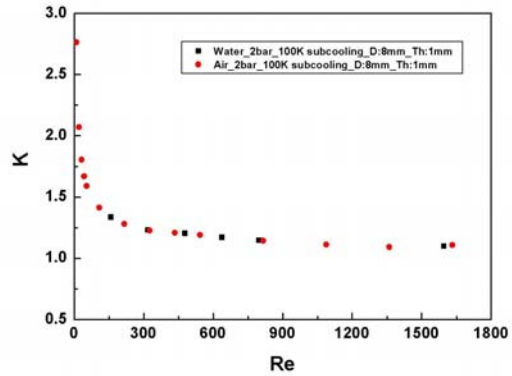


Fig. 11 Dependencies of K value on the Re # in the air and water flow

### 3.3 계통 압력과 냉각수 아냉도의 영향 평가

ATLAS 실험장치는 원자로 계통을 모의하는 실험에 사용될 예정이므로 실험의 계통 압력은 수십 기압 이상의 고압 상태를 나타낸다. 기존에 사용된 국소적 양방향 유동 튜브는 주로 대기압 조건에서 사용되었기 때문에, 국소적 양방향 유동 튜브가 고압 조건에도 적용할 수 있는지를 확인하는 것은 국소적 양방향 튜브를 ATLAS 실험장치에 부착하여 유동 변수를 측정하기 위하여 필수적인 사안이다. 고압 조건에서 국소적 양방향 튜브의 적용성을 직접 확인하기 위해서는 고압 실험 루프를 형성한 후 튜브를 장착하여 실제 유동 변수를 측정하는 것이 직접적인 방법이지만 고압 루프를 제작하기에는 소요 경비가 많이 들고, 실험 수행 면에도 어려움이 따르기 때문에 FLUENT 코드를 이용한 유동 해석을 수행하여 고압 조건에서 국소적 양방향 튜브의 적용성을 조사하였다.

그림 12 는 2 기압 80K 아냉도 조건과 80 기압 80K 아냉도 조건에 대하여 동일한 국소적 양방향 튜브를 적용하여 계산한 속도 변화에 따른 K 값의 선형성을 보여준다. 그림 12 를 보면 계통 압력에 상관없이 K 값은 비교적 선형성을 갖고 있음을 알 수 있다

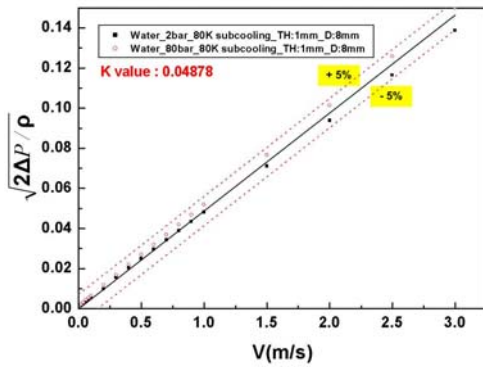


Fig. 12 Evaluations of K value according to the system pressure

#### 4. 결 론

FLUENT 코드를 이용하여 국소적 양방향 유동 튜브에 대한 유동 해석을 수행하였다. 국소적 양방향 유동 튜브를 이용하여 실험을 수행한 Liu 와 McCaffery 실험을 해석하여 FLUENT 코드의 적용 가능성을 확인하였다. FLUENT 코드 해석 결과가 Liu 와 McCaffery 의 실험 결과와 유사한 경향을 나타내어 FLUENT 코드를 이용하여 국소적 양방향 유동 튜브에 대한 유동 해석이 타당함을 확인 하였다. 단상 물 유동에 대한 계산 결과를 보면 국소적 양방향 유동 튜브는 물 또는 공기의 유체 종류에 관계없이 Re 수에 따라 동일한 유동 특성을 나타냄을 알 수 있다. 이 같은 결과는 단상의 물 또는 공기 유동에서 얻어진 교정 곡선을 이용하여 각 유체에 따른 속도 계산에 적용할 수 있음을 보여준다. 계통 압력에 대한 영향 평가 결과, 계통 압력에 상관없이 K 값은 비교적 선형성을 갖고 있음을 알 수 있었으며, 이는 국소적 양방향 유동 튜브가 고압 조건의 실험에도 적용할 수 있음을 보여준다.

본 연구에서는 궁극적으로 물-증기의 이상 유동 조건에서 국소적 양방향 유동 튜브를 적용하기 위하여 FLUENT 코드를 이용한 이상 유동 조건의 유동 해석을 추가로 수행할 계획이다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 사업의 일환으로 수행하였습니다.

#### 참고문헌

- (1) B. J. McCaffrey and G. Heskestad, 1976, A Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application, Combustion and Flame, Vol. 26, 125 – 127.
- (2) C. Y. Liu, Y. W. Wong, W. K. Chan and T. C. Gan, 1990, Note on the robust bidirectional low velocity probe, Experiments in Fluids, Vol. 9, 354 – 356.