

# 광학적 방법을 이용한 슬러그 유동의 기공률 측정

김 동 선\*<sup>1)</sup>

충주대학교 기계공학과\*<sup>1)</sup>

## Measurement of the Void Fraction in Slug Flow using an Optical Method

Dong-Seon Kim\*<sup>1)</sup>

Department of Mechanical Engineering, Chungju National University, 50 Daehak-ro, Chungju, Chungbuk 380-702, Korea

(2011.10.28 Received / 2011.11.09 Accepted)

**Abstract** : Void fraction has been measured for the gas-liquid cocurrent slug flow in 8mm vertical acrylic tube using an optical method. Bubble speed, length and period could be measured with the two sets of laser-infrared sensor modules mounted 25mm apart alongside the tube, which were designed to detect variation of light intensities with a time delay when two parallel laser beams were refracted successively by a passing bubble. It was found that the results were in good agreement with the previous studies in the literature suggesting that the method used in this study were sound and accurate.

**Key words** : Nitrogen(질소), Water (물), Slug flow (슬러그유동), Void fraction (기공률)

### Nomenclature

- d : diameter, m
- g : gravitational acceleration, m<sup>2</sup>/s
- L, l : length, m
- Q : volume, m<sup>3</sup>
- t : time, s
- V: velocity, m/s
- ε : void fraction, -

### Subscripts

- b : bubble
- g, l : gas, liquid
- s : slug or superficial velocity

### 1. 서론

최근에 밀리미터 또는 마이크로미터 스케일의 이상 유동 연구가 늘고 있는데 본 연구는 매크로 스케일 모델이 이처럼 작은 스케일의 유동현상을 잘 설명하지 못하며 또한 밀리미터 스케일 이하의 이상 유동에 대한 데이터도 아직은 많이 부족한 상태임<sup>1)</sup>을 인식하고 밀리미터 스케일의 기-액 이상 유동의 특성을 관찰하여 궁극적으로 스케일 문제에 대한 적절한 설명을 찾는 것을 목적으로 한다.

아래에서는 세부 연구과제 중 하나로서 수직관을 흐르는 기-액 슬러그 유동의 가시화 연구 결과의 일부를 소개하고자 한다.

\* Corresponding author. E-mail: dongseonkim@cju.ac.kr

## 2. 실험 장치와 해석 모델

가시화 실험 장치는 Fig. 1a에 도시하였다. 작동유체는 질소와 물을 사용하였는데 장치 하부에서 기어펌프로 이송된 물에 질소가 주입되고 우선 90°도 곡관(L')을 거친 후에 수직관(L)으로 유입하도록 만들어졌다. 곡관과 직관은 모두 투명재질로서 기포의 모양을 관찰할 수 있도록 하였다. 모든 측정은 직관에서 이루어지며 곡관은 어느 정도 발달된 유동이 직관으로 유입함으로써 입구효과를 줄이기 위한 목적으로 설치하였다.

본 연구에서는 내경 8, 5, 2mm의 3개 수직관에 대한 실험이 예정되어 있으며 현재 8mm에 대한 실험이 진행 중이다. 아래에는 8mm의 예비 실험결과를 보고한다.

직관의 중상부에서는 디지털 카메라로 기포의 이미지를 촬영하며 최상부에서 도트레이저와 적외선 센서를 이용해 기포의 속도를 측정한다.

기포속도 측정을 위해서 한 쌍의 도트레이저-적외선 센서를 유동방향으로 l(=25mm)의 간격을 두고 설치하였는데 기포가 지나갈 때에는 Fig. 1b와 같이 두 적외선센서의 출력이 시간차를 두고 검출된다. Fig. 1b의 데이터에서는 3개의 특성치를 볼 수 있는데 이들은 두 센서 출력 간 시간차( $\Delta t_1$ ), 출력 지속시간( $\Delta t_2$ ) 및 주기( $\Delta t_3$ )이다.

우선 두 센서 출력 간 시간차( $\Delta t_1$ )로부터는 다음과 같이 기포의 속도를 추정할 수 있다.

$$V_b = \frac{l}{\Delta t_1} \quad (1)$$

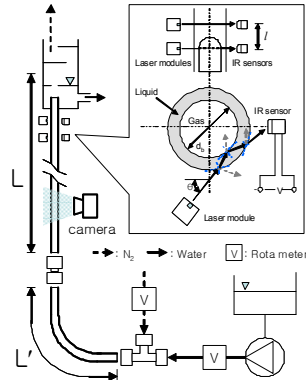
또 출력 지속 시간( $\Delta t_2$ )으로부터는 다음과 같이 기포길이  $L_b$ 를 근사적으로 계산할 수 있으며

$$L_b = V_b \Delta t_2 \quad (2)$$

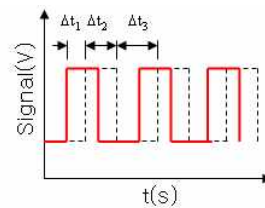
마지막으로 신호의 주기( $\Delta t_3$ )로는 다음과 같이 슬러그의 길이  $L_s$ 를 추정할 수 있다

$$L_s = V_b \Delta t_3 \quad (3)$$

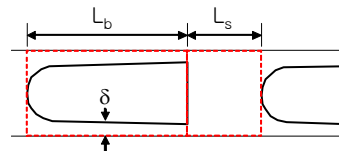
한편 디지털 카메라로 얻은 기포의 이미지를 분석하면 기포의 대략적인 윤곽을 얻을 수 있고 축대칭으로 가정하면 기포의 부피를 추정할 수 있다.



(a) Experimental setup for flow visualization



(b) Output signals from the infrared sensors



(c) Void fraction and bubble shape  
Fig. 1 Bubble velocity measurement

이렇게 얻은 기포의 부피로부터 기공률을 추정하는 것도 가능하다. 하지만 이에 앞서 식(1)~(3)으로부터 다음과 같이 기공률을 추정해 보았다.

잘 발달된 슬러그 유동에서 기포는 Taylor bubble로 불리는데 앞부분이 반구이고 긴 원통형 몸통을 가져 Fig. 1c에서와 같이 흡사 총알처럼 보인다는 것이 잘 알려져 있다.

기포를 반구형 머리를 가지는 원통으로 가정하면 기포의 부피  $Q_b$ 는

$$Q_b = \frac{\pi d_b^3}{12} + \left(L_b - \frac{d_b}{2}\right) \frac{\pi d_b^2}{4} \quad (4)$$

$$= \left(1 - \frac{d_b}{6L_b}\right) \frac{d_b^2}{d^2} \times \frac{\pi d^2 L_b}{4}$$

로 쓸 수 있는데 여기서  $d_b$ 는 기포의 평균직경이고  $d$ 는 관의 내경이다.

한편 슬러그의 길이  $L_s$ 로부터  $Q_s$ 는

$$Q_s = \frac{\pi d^2 L_s}{4} \quad (5)$$

이므로 기공률  $\varepsilon$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= Q_b / (Q_b + Q_s) \\ &= \left(1 - \frac{d_b}{6L_b}\right) \frac{d_b^2}{d^2} / \left[ \left(1 - \frac{d_b}{6L_b}\right) \frac{d_b^2}{d^2} + \frac{L_s}{L_b} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)으로부터 기공률을 계산하기 위해서는  $L_b$ 와  $L_s$  외에 기포의 평균직경  $d_b$ 를 알아야 하는데  $d_b$ 를 정확히 측정하기는 매우 어렵다. 물론 기포 이미지를 분석하여 추정할 수 있으나 여기서는  $d_b=d$  가정하여 다음과 같이 기공률을 추정하였다.

$$\varepsilon \approx \left(1 - \frac{d}{6L_b}\right) / \left[ \left(1 - \frac{d}{6L_b}\right) + \frac{L_s}{L_b} \right] \quad (7)$$

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2에 8mm 관의 결과를 도시하였다. 물과 공기의 유량은 겉보기 속도로 표시하였는데 실험 범위는  $V_{ls}=0.07 \sim 0.2$ m/s,  $V_{gs}=0.1 \sim 0.27$ m/s이다.

물유량이 일정하면 기공률은 공기유량이 증가하면서 대략 선형적으로 비례하여 증가하지만 일정 공기유량에서는 물유량이 증가하면 기공률이 감소하면서 일정한 값으로 수렴하는 듯 보인다.

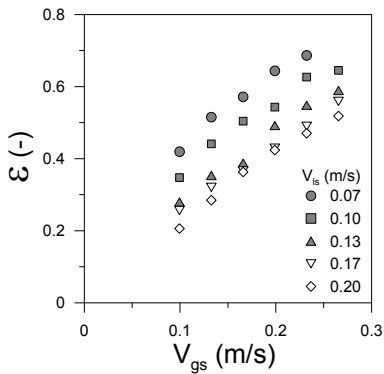


Fig. 2 Void fraction for 8mm tube

Fig. 2의 결과를 기존의 기공률 모델과 비교하여 보았다. Nicklin등<sup>2)</sup>에 의하면 수직관을 흐르는 기액 슬러그 유동에서 기포의 속도는

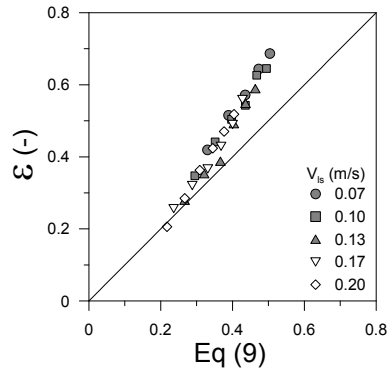
$$V_b = C_1(V_{gs} + V_{ls}) + C_2 \sqrt{gd} \quad (8)$$

로 주어지고 기공률은 다음과 같이 예측할 수 있다고 하였는데

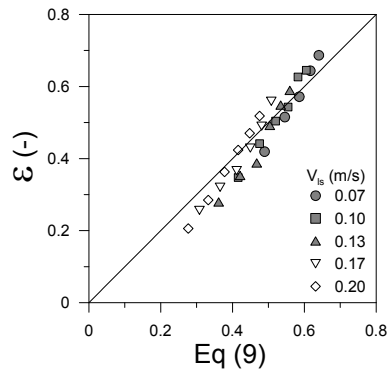
$$\varepsilon = \frac{V_{gs}}{C_1(V_{gs} + V_{ls}) + C_2 \sqrt{gd}} \quad (9)$$

여기서  $C_1$ 과  $C_2$ 는 마크로 스케일 (25mm내외)의 경우  $C_1=1.2$ ,  $C_2=0.35$ 가 일반적으로 쓰인다.

Fig. 2의 기공률과 식(9)로 계산한 기공률을 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3a는 식(9)에서  $C_1=1.2$ ,  $C_2=0.35$ 로 계산한 경우이고 Fig. 3b는  $C_1=1.2$ ,  $C_2=0$ 으로 계산한 경우이다.



(a) Nicklin model with  $C_1=1.2$ ,  $C_2=0.35$



(b) Nicklin model with  $C_1=1.2$ ,  $C_2=0$   
Fig. 3 Comparison with Nicklin model

그림에서 볼 수 있듯이 식(9)에서  $C_2=0$ 인 경우가 실험 결과와 더 잘 일치한다.

식(9)의 계수  $C_1$ 과  $C_2$ 에 대한 환경의 영향은 기존의 연구<sup>3,4)</sup>에서 논의 되었듯이 환경이 작아질 때  $C_1$ 은 1.2로 일정하나  $C_2$ 는 0으로 수렴한다고 알려져 있다. 따라서 실험결과가 Fig. 3b에서 식(9)와 잘 일치한다는 사실은 본 연구의 실험방법과 결과의 정확성이 기존의 연구와 동등한 수준임을 시사한다.

식(6)을 식(7)로 단순화한 과정에서  $d_b=d$ 로 가정한 오차를 기포의 이미지 분석 결과를 반영하여 제거하면 더 정확한 분석이 가능할 것이다.

#### 4. 결 론

투명관의 양쪽에 도트레이저와 적외선센서를 설치하여 기포가 통과하는 순간 센서 출력의 변화를 측정하는 방법으로 밀리미터 스케일의 수직관을 흐르는 기액 슬러그 유동의 기공률을 측정하였다. 측정된 기공률을 기존의 기공률 모델과 비교하여 잘 일치함을 확인하였고 이는 본 연구에서 사용한 광학적 측정법과 해석모델의 정확성이 적절한 수준임을 시사한다.

#### Acknowledgement

본 연구는 교육과학기술부 일반연구자지원사업(2010-0003488)의 지원을 받아 수행되었음.

#### References

1. Cheng, L., Mewes, D., "Review of two-phase flow and flow boiling of mixtures in small and mini channels", Int. J. Multiphase Flow Vol. 32, pp. 183 - 207, 2006.
2. Nicklin, D.J., Wilkes, J.O., Wilkes, J.F., "Two-phase flow in vertical tubes", Trans. Instn Chem. Engrs 40, 61-68, 1962.
3. Mishima, K., Hibiki, T., "Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes", Int. J. Multiphase Flow Vol. 22, pp. 703-712, 1996.
4. Ide, H., Kariyasaki, A., Fukano, T., "Fundamental data on the gas-liquid two-phase flow in minichannels", Int. J. Therm. Sci. 46, 519-530, 2007.