

작은 수직관을 흐르는 기-액 슬러그 유동의 유동특성 Flow Characteristics of a Gas-Liquid Slug Flow in Small Vertical Tubes

계석현(Seok-Hyun Kye)¹, 김동선(Dong-Seon Kim)^{2*}

¹한국교통대학교 대학원 기계공학과, ²한국교통대학교 기계공학과

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea National University of Transportation, Chungbuk 380-702, Republic of Korea.

²Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungbuk 380-702, Republic of Korea

(Received February 19, 2013; revision received March 13, 2013)

Abstract Some characteristics of nitrogen-water slug flow were optically measured, in vertical acrylic tubes of 2, 5 and 8 mm diameter. Bubble velocity, bubble and unit cell lengths were measured, by analyzing the light intensity signals from two sets of dot laser-infrared sensor modules mounted along the transparent tubes. Optical images of the bubbles were also taken and analyzed, to measure bubble shapes and liquid film thickness. It was found that the measured bubble velocities were in good agreement with the empirical models in the literature, except for those measured under high superficial velocity condition in the 2 mm tube. Bubble length was found to be the longest in the 2 mm tube, being 4 to 5 times those of the other tubes. Liquid film was found to have developed early in the 2 mm tube, which made the blunt shape of the bubble head. Liquid film thickness in the 8 mm tube was measured at almost twice those of the other tubes.

Key words Slug flow(슬러그 유동), Tube diameter(관경), Bubble velocity(기포 속도), Bubble length(기포 길이), Film thickness(액막 두께)

* Corresponding author, E-mail: dongseonkim@ut.ac.kr

기호설명

d : 직경 [m]
 Eo : Eötvös 수, $\rho g d^2 / \sigma$ [-]
 g : 중력가속도 [m^2/s]
 L, l : 길이 [m]
 Re : Reynolds 수, $\rho V d / \mu$ [-]
 r : 반경방향 좌표 [m]
 V : 속도 [m/s]
 z : 기포 길이방향 좌표 [m]

f : 액막
 g : 기체
 l : 액체
 s : 걸보기 속도 또는 액상 슬러그
 UC : 단위 셀(Unit cell)

1. 서 론

본 연구는 작은 직경의 수직관을 흐르는 이산화탄소-물 슬러그 유동에서의 물질전달계수를 측정된 Lee and Kim⁽¹⁾의 실험연구와 관련하여 슬러그 유동의 유동특성을 관측하기 위해 수행하였다. Lee and Kim⁽¹⁾은 2~8 mm의 직경범위에서 슬러그 유동의 물질전달계수에 대한 관경의 영향이 크음을 보고하면서 그 원인이 기포의 크기, 속도를 포함한 슬러그 유동의 유동특성과 관련 있을 것으로 판단하였는데 본 연구를 통해 물질전달 현상과 유동특성 간의 상관관계를 파악하는데 필요한 기본적 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

그리스 문자

Δt : 시간차 [s]
 δ : 액막두께 [m]
 μ : 점성계수 [$Pa \cdot s$]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 σ : 표면장력 [$Pa \cdot m$]

하첨자

b : 기포

작은 스케일의 기-액 이상 유동에 대한 연구는 아직 기초 데이터가 많이 부족⁽²⁾하기 때문에 전달현상의 모델을 개발하는 데에도 어려움이 많다. 예를 들어 van Basten and Krishna⁽³⁾ 포함한 침투이론(penetration theory) 모델들^(4,5)은 기포 및 액상 슬러그의 길이, 기포를 둘러싼 액막 두께 등의 정보를 필요로 하지만 문헌에서 필요한 실측 데이터를 얻기는 매우 힘들다. Vandu et al.⁽⁴⁾은 직경 1, 2, 3 mm의 Pyrex glass 수직관 내부를 흐르는 공기-물 슬러그 유동을 촬영, 분석한 결과를 이용하여 침투이론 모델로 계산한 물질전달계수와 실측 결과를 비교하였는데 접촉시간(contact time)이 충분히 짧아 액막 두께의 영향을 무시할 수 있다고 가정하고 액막 두께를 측정하지 않았다. 또한 1.5, 2.5, 3.1 mm의 세 종류 수직관에 대해 두 대의 튜브펌프(peristaltic pump)를 이용하여 기상과 액상 슬러그의 길이를 능동적으로 조절해가며 물질전달계수를 측정한 Bercic and Pintar⁽⁵⁾에서도 마찬가지로 액막 두께는 무시되었다. 그러나 액막 두께의 영향은 기포의 길이가 매우 짧은 경우에만 무시할 수 있으며 본 연구에서처럼 기포의 길이가 길게 형성되는 경우에는 무시할 수 없다. 또 기포의 길이는 가스를 주입하는 방법에 따라 달라지기 때문에 실험 장치에 따라 커다란 차이를 보이므로⁽⁶⁾ 다른 실험 장치에서 측정한 결과를 사용하기도 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Lee and Kim⁽¹⁾과 동일한 실험장치에서 슬러그의 길이뿐 아니라 액막 두께까지 측정하여 Lee and Kim⁽¹⁾의 결과를 해석하는데 필요한 정보를 얻는 동시에 작은 스케일의 기-액 이상 유동을 더 잘 이해하기 위해 필요한 기초 연구 결과를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1의 실험 장치는 Lee and Kim⁽¹⁾의 장치와 동일하며 시험부는 관측을 위해 투명한 재질로 제작하였다. 실험장치의 하부에 위치한 기-액 혼합기는 단순한 T자형 이음관으로서 질소와 물을 혼합하여 시험부로 공급한다(단, T자형 이음관에서 가스주입구의 방향은 그림에서처럼 수직이 아니라 수평면 아래로 약 5~10° 기울어져 있음). 시험부는 상류의 곡관(L')과 하류의 수직관(L)으로 구성되는데 곡관은 우레탄, 수직관은 아크릴 재질이다. 실험에는 공칭직경 2, 5, 8 mm(실측 직경 2.2, 5, 8 mm)의 세 종류 관을 사용하였는데 각각의 경우에 곡관과 직관부의 길이는 공칭직경을 기준으로 $L' = 63 d$, $L = 175 d$ 로 일정하게 고정하였다. 본 연구에서는 다음 절에서 정리한 바와 같이 첫째, 도트레이저와 광학 센서를 사용하여 기포속도 등을 측정하

였고 둘째, 광학 카메라를 사용하여 기포의 형상을 측정하였다.

2.2 실험 및 해석방법

2.2.1 기포 속도

Fig. 1의 수직관 상부에 설치한 레이저-센서 모듈의 상세도를 Fig. 2(a)에 도시하였다.

기포속도 측정을 위한 도트레이저-광학센서 장치는 그림에서 수직관의 최상부 즉, 기-액 분리기 바로 아래에 두 세트를 설치하였는데 자세한 내용은 다음절에서 설명하겠다. 수직관의 하부는 윗면이 개방된 아크릴 재질의 사각박스로 둘러싸고 사각박스과 수직관 사이의 공간을 아크릴의 광굴절률(1.49)과 유사한 광굴절률을 갖는 보정유체로 채워서 카메라로 획득한 이미지가 크게

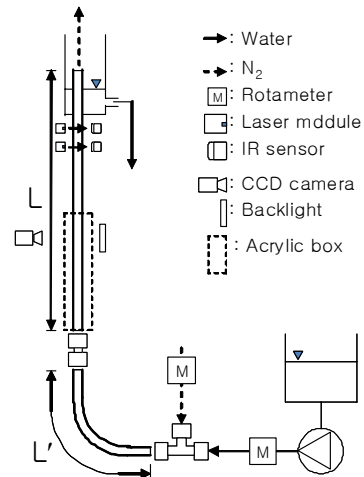
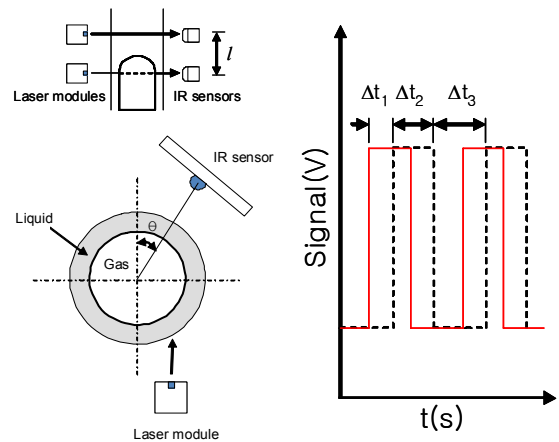


Fig. 1 Schematic diagram of test setup.



(a) Laser-sensor module (b) Output signals
Fig. 2 Principle of bubble velocity measurement.

왜곡되는 것을 방지하려 하였다.

실험은 액상 걸보기속도 범위 $V_{ls} = 30 \sim 260$ mm/s에서 선택한 6개 속도와 기상 걸보기속도 범위 $V_{gs} = 80 \sim 300$ mm/s에서 선택한 6개 속도의 조합인 최대 36개 유량에 대해 실온조건에서 수행하였다. 액상과 기상 모두 유량계는 로터미터($\pm 4\%$ full scale)를 사용하였다. 속도측정에 사용된 도트레이저 모듈은 적색(58 mW, peak 650 nm)에 빔 직경이 1~1.5 mm이고 광학 센서는 적외선 포토트랜지스터(ST-1KLA; 500~1050 nm, peak 880 nm)를 사용하였다. 광학 이미지는 1 M급 해상도(15 FPS)의 CCD 카메라와 4x4" 백색 LED 백라이트를 동조시켜 촬영하였다. 실험 장치와 방법에 대한 더 자세한 내용은 Kye⁽⁷⁾를 참고하기 바란다.

Fig. 2(a)에 나타난 것처럼 두 쌍의 레이저-센서 모듈을 유동방향으로 $l (= 30$ mm)의 간격을 두고 설치하였으며 기포가 지나갈 때 적외선센서의 출력이 최대가 되도록 레이저와 센서의 각도($\theta = 15 \sim 20^\circ$)를 조절하였다. 기포가 l 의 간격을 두고 설치한 두 개의 레이저 빔을 차례로 지나가면서 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 동일한 형태의 출력 신호가 Δt_1 의 시차를 두고 검출되므로 기포속도 V_b 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

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

또한 그림에서 Δt_2 와 Δt_3 로 표시한 최고, 최저 출력 지속시간은 각각 기포와 액상 슬러그가 두 센서 사이의 거리(l)를 지나는데 걸린 시간을 나타내므로 기포길이 L_b 와 단위 셀(Unit cell) 길이 즉, 기포(L_b)와 액상 슬러그 길이(L_s)의 합인 $L_{uc} (= L_b + L_s)$ 를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$L_b = V_b \Delta t_2 = l \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \quad (2)$$

$$L_{uc} = V_b (\Delta t_2 + \Delta t_3) = l \frac{\Delta t_2 + \Delta t_3}{\Delta t_1} \quad (3)$$

실험은 미리 정한 유량조건에 맞추어 유량을 조절하고 유동이 충분히 안정되었다고 판단한 후 1분간 1 ms 간격으로 출력신호를 기록하였고 동일 조건에서 최소 3회 반복 측정하였다.

2.2.2 기포 형상

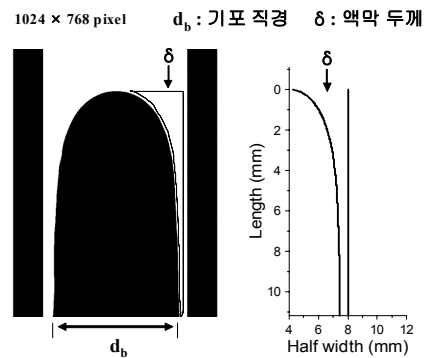
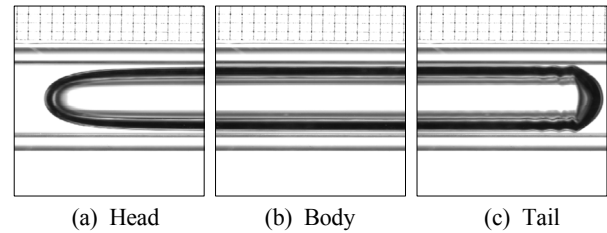
우선 예비실험에서 Fig. 1의 보정박스에 공기(광굴절률 1), 물(1.33), 글리세롤(1.47)를 채우고 촬영한 이미지를 비교하였는데 물과 글리세롤 간의 차이가 미미하여 더 다루기 쉬운 물을 보정유체로 사용하였다. 보정유체를 사용해도 이미지의 왜곡을 완전히 방지할 수

없기 때문에 물을 채운 수직관 내부에 미리 알고 있는 직경의 작은 관을 삽입하고 촬영한 이미지를 분석함으로써 픽셀의 평균 크기와 최대오차를 추정하였다. 분석 결과 픽셀의 평균 크기는 8, 5, 2 mm관의 경우 각각 20.3, 18.3, 10.3 μm 이며 최대오차는 6.6, 8.5, 5%인 것으로 추정된다.

실험은 기포속도 측정과 동일한 방법으로 수행하였으며 15 FPS의 속도로 촬영하여 각 유량 조건에서 Fig. 3(a)~Fig. 3(c)에 예시한 바와 같은 기포 선단, 중간, 후미의 이미지들을 획득하였다. 예시한 이미지는 8 mm 관 유동을 촬영한 것이며 기포 우측에 나타난 격자의 한 눈금 크기는 1 mm이다.

Fig. 3(d)에는 Fig. 3(a)의 이미지 분석결과를 예시하였다. 영상처리 과정에서 Fig. 3(d)의 좌측과 같이 관벽과 기포가 차지하는 공간의 픽셀에 그레이 스케일 0 (검은색)을 지정하고 그 픽셀의 수를 세어 기포의 직경을 추정하였다. 최종적으로는 Fig. 3(d) 우측에 도시한 그래프와 같이 기포의 길이 방향으로 기포경계의 위치 분포를 얻었다. 자세한 영상 처리과정은 Kye⁽⁷⁾를 참고하기 바란다.

비록 연구에는 직진성이 우수한 백라이트 조명을 사용하였지만 기-액 경계면에서 빛의 산란을 완전히 억제할 수는 없으므로 기포경계를 정확히 측정하는 것은 불가능하다. 또한 다른 방법으로 측정한 결과를 사용할 수 없기 때문에 본 연구 결과의 상대적 오차를



8 mm : $V_{ls} = 0.066$ m/s, $V_{gs} = 0.099$ m/s
(d) Example of image analysis

Fig. 3 Images of a bubble(8 mm tube).

추정하기도 어렵다. 따라서 현재로서는 예비실험에서 확인한 픽셀 크기의 최대 오차 수준(5~8.5%)보다는 클 것으로 추정한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기포 속도

우선 기포속도 측정결과와 비교하기 위하여 다음과 같이 Nicklin⁽⁸⁾의 모델을 고려하였다.

$$V_b = C_1(V_{gs} + V_{ls}) + C_2\sqrt{gd} \quad (4)$$

식(4)에서 C_1 과 C_2 는 관경의 함수로서 1" 내외의 큰 관경에 대해서는 각각 약 1.2, 0.35의 값을 가지는 것으로 알려져 있으며 본 연구에서는 Mishima and Hibiki⁽⁹⁾와 Vianna et al.⁽¹⁰⁾이 제안한 다음의 경험식을 사용하였다.

$$C_1 = 1.2 + 0.51e^{-691d} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{0.34}{(1 + 3805Eo^{-3.06})^{0.58}} \quad (6)$$

식(6)에서 Eo 수는 $Eo = gpd^2/\sigma$ 로 정의되며 부력과 표면장력의 비를 의미한다. 참고로 20°C 공기-물 시스템에서의 Eo 수는 2, 5, 8 mm관이 각각 0.54, 3.4, 8.6이고 이때 식(6)으로 계산한 C_2 값은 각각 9.5×10^{-4} , 2.5×10^{-2} , 1.2×10^{-1} 이다. 따라서 식(4)에서 C_2 를 계수로 가진 항 (terminal or rise velocity)은 본 연구의 2, 5 mm의 관에 대해서는 무시할 수 있을 정도로 작다. Fig. 4에 기포속도 측정결과와 식(4)를 비교하였다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 8 mm와 5 mm관의 결과는 식(4)와 표준편차 10% 수준으로 잘 일치하였다. 그러나 Fig. 4(c)에서 2 mm의 경우에는 표준편차가 21%로 매우 큰데 이는 $V_b = 0.5$ m/s를 기준으로 이보다 더 크게 측정된 실험결과들이 식(4)의 예측값보다 크기 때문이다. 그림에서 $V_b > 0.5$ m/s인 결과는 $V_{ls} \geq 0.14$ m/s의 조건에서 측정되었는데 이들은 식(4)와는 크게 다른 기울기(C_1)를 가지며 이들을 제외한 식(4)와의 표준편차는 9.5%로서 이는 다른 관경의 결과와 비슷한 수준이다.

Fig. 4에서 식(4)는 2 mm관의 $V_b > 0.5$ m/s를 제외한 모든 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 많은 문헌에서 식(4)가 슬러그 영역에서 정확하다고 보고되었고 또 Fig. 4에서도 본 연구의 실험결과와 대부분 잘 일치하므로 2 mm관에서 $V_b > 0.5$ m/s인 결과들은 슬러그 유동이 아닌 영역에서 측정하였거나 또는 측정에 오류가 있을 가능성이 크다. 결론적으로 말해 2 mm관에서 V_b

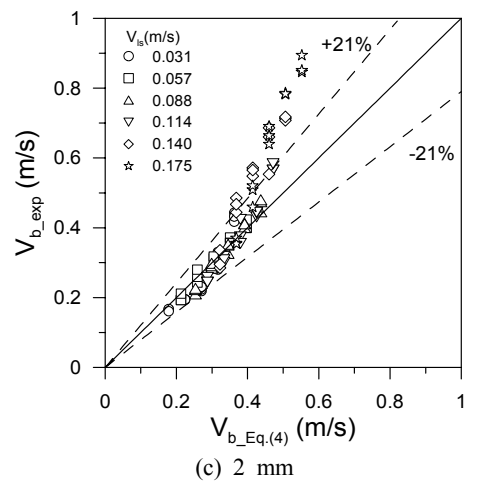
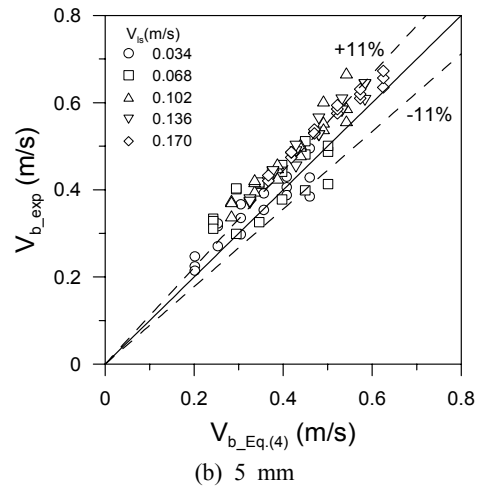
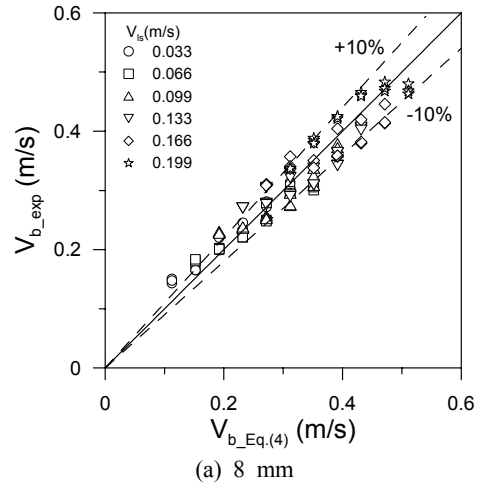
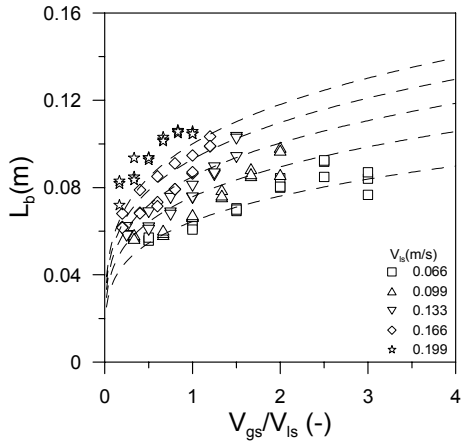


Fig. 4 Measured bubble velocity and Eq.(4).

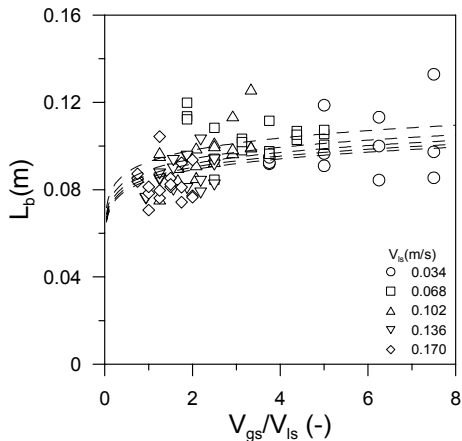
> 0.5 m/s인 결과들은 슬러그-환상류(slug-annular) 영역에서 측정된 것으로 보인다. 이 문제는 아래에서 기포

길이 측정결과를 설명하면서 다시 논의하였다.

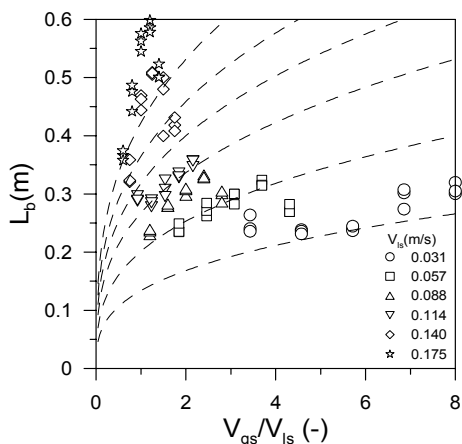
Fig. 5에는 실험결과를 이용하여 식(2)로 계산한 기



(a) 8 mm



(b) 5 mm



(c) 2 mm

Fig. 5 Measured bubble length.

포의 길이 L_b 를 걸보기 속도비 V_{gs}/V_{ls} 에 대해 도시하였다. 그림에서 실험결과는 심볼, 실험결과를 회귀분석 하여 만든 아래의 식(7)을 파선으로 표시하였다.

Fig. 5(a)에서 8 mm관의 L_b 를 보면 실험한 유량범위에서 54~106 mm(7 d~13 d)의 길이를 가지며 V_{ls} 와 V_{gs} 가 증가할수록 증가하는 모습을 보인다. 한편 Fig. 5(b)에서 5 mm관의 L_b 는 실험한 유량범위에서 71~133 mm(14 d~27 d)의 범위 내에 있다. 측정값의 산포도가 커서 그 경향을 한눈에 알아보기 어렵다. 대신 파선으로 나타낸 경험식의 경향을 보면 L_b 는 V_{ls} 와 V_{gs} 에 비례하지만 8 mm에 비해 V_{ls} 의 영향이 매우 작은 것을 볼 수 있다. 마지막으로 Fig. 5(c)에서 2 mm관의 L_b 를 보면 우선 V_{ls} 와 V_{gs} 의 영향이 다른 관경에 비해 매우 크고 길이도 235~587 mm(120 d~290 d)로 다른 관경의 4~5 배 정도로 길다. Lee and Kim⁽¹⁾은 2 mm관에서 입구효과 크기가 다른 관에 비해 매우 큰 것을 확인하고 입구영역의 크기가 기포길이에 비해한다는 가정 하에 2 mm관의 기포길이가 길 것으로 예측하였는데 Fig. 5(c)는 그 가설에 타당성이 있음을 보여주고 있다.

Fig. 4(c)에서 $V_b > 0.5$ m/s인 결과들은 슬러그-환상류 영역에서 측정된 듯 보인다고 하였는데 그 이유는 2 mm관에서의 기포길이가 관련 있다고 생각된다. 전술하였듯이 Fig. 1의 실험 장치에서 수직관의 길이는 모든 관경에 대해 동일하게 $L = 175$ d로 고정했으므로 2 mm관의 경우에 수직관의 길이는 350 mm이다. 따라서 L_b 가 350 mm보다 길면 수직관 내에 평균적으로 1개보다 적은 기포가 존재하는 셈이 되고 기포길이가 길어질수록 그 유동 특성이 슬러그 유동보다는 환상(annular)유동에 더 가까울 것이다. 즉, L_b 가 350 mm보다 긴 경우에는 슬러그유동과 환상유동의 특성을 동시에 가질 것으로 기대할 수 있는데 Fig. 5(c)를 보면 $V_{ls} \geq 0.14$ m/s에서 측정된 결과의 대부분이 여기에 해당하고 흥미롭게도 같은 조건에서 측정된 기포속도들이 Fig. 4(c)에서 식(4)와 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 Lee and Kim⁽¹⁾이 2 mm관을 대상으로 $V_{ls} \geq 0.14$ m/s

Table 1 Coefficients in Eq.(7)

L (mm)	d (mm)	C (-)	m (-)	n (-)	Std. dev. (%)
L _b	8	0.658	0.40	0.24	9
	5	25.2	-0.06	0.08	11
	2.2*	3.803	0.66	0.33	16
LUC	8	1.407	0.40	-0.03	8
	5	26.1	0.02	0.10	10
	2.2*	12.7	0.53	0.07	16

Note) * Actual diameter of 2 mm tube.

의 영역에서 측정된 실험결과도 슬러그 영역을 벗어나 측정되었으며 이 때문에 2 mm관 결과의 특이성이 관측되었을 가능성이 있다. 물론 단순히 두 연구에서 공통적으로 관측된 특이성만으로 이와 같이 단정 지을 수는 없으므로 향후 적절한 모델을 이용하여 두 연구의 결과를 함께 분석하고 보고하도록 하겠다. 식(3)으로 계산한 L_{uc} 에 대해서도 유사한 분석을 수행하였으나 지면상 제약으로 아래에 결과만 제시하였다. 본 연구에서는 L_b 와 L_{uc} 에 대해 공통적으로 Reynolds수와 겔보기속도비의 함수 형태로 다음과 같은 경험식을 개발하였다.

$$\frac{L}{d} = C \times Re_l^m \left(\frac{V_{gs}}{V_{ls}} \right)^n \quad (7)$$

여기서 Re_l 은 액상 Reynolds수로서 다음과 같이 정의된다.

$$Re_l = \frac{\rho_l V_{ls} d}{\mu_l} \quad (8)$$

식(7)의 실험상수 C , m , n 은 L_b 와 L_{uc} 의 각각에 대해 Table 1에 정리하였다. Table 1의 맨 우측 열에는 실험결과와 식(7)의 표준편차를 정리하였는데 L_b 의 경우 8mm관 결과와의 표준편차는 9%, 5 mm는 11%, 2 mm는 16%이며 L_{uc} 와의 표준편차는 8 mm의 경우 8%, 5 mm는 10%, 2 mm는 16%인 것으로 나타났다. 다른 관경에 비해 2 mm 결과의 편차가 큰데 이는 Fig. 5(c)의 $V_{ls} \geq 0.14$ m/s의 영역에서 기포길이가 매우 길게 측정되었기 때문으로 $V_{ls} < 0.14$ m/s의 결과만 고려하면 L_b 와 L_{uc} 는 식(7)과 각각 12%, 13% 수준에서 일치한다.

Fig. 5의 결과만 놓고 보면 관경이 기포길이를 결정짓는다고 잘못 판단할 수 있다. 예비실험 중에 몇 가지 형태의 기-액 혼합기를 시험하면서 기포길이는 관경이 아닌 기-액 혼합기에 따라 달라진다는 점을 확인하였다. 예를 들어 초기에 가스주입기로 사용했던 주사바늘들은 관경과 무관하게 직경 수 mm의 작은 기포를 빠른 주기로 만들었기 때문에 유사한 가스주입기를 사용한 Hibiki et al.^[11]과 같이 슬러그가 아닌 버블유동(bubbly flow)이 형성되는 것을 확인한 바 있다.

따라서 Fig. 5의 결과는 Fig. 1에서 보인 것처럼 기-액 혼합기로 사용한 T자형 이음관의 특성이라는 점에 주의하기 바란다. 또한 Fig. 4와 Fig. 5에 제시한 결과를 검증하기 위한 별도의 연구를 수행하지 않았다. 따라서 Fig. 4와 Fig. 5의 결과는 측정값 자체의 분산도보다 더 큰 수준의 불확실성을 포함한다는 사실에 유의하기 바란다.

3.2 기포 형상

제 2.2.2절에서 설명한 바와 같이 다양한 유량 조건에서 획득한 이미지를 분석하여 기포의 경계를 찾아내었으며 아래에 기포 선단의 형상과 기포를 둘러싼 액막의 두께를 제시하였다. 기포의 형상에 관해서는 일찍이 Dumitrescu^[12]가 비점성 액체가 채워진 수직관에서 부상하는 단일 기포에 대해 포텐셜 유동(potential flow)을 가정하여 다음과 같은 이론적 형상 함수를 유도한 바 있다.

Nose region($z/d \leq 0.25$) :

$$\frac{z}{d} = 0.375 \left[1 - \sqrt{1 - 7.112 \left(\frac{r}{d} \right)^2} \right] \quad (9a)$$

Film region($0.25 \leq z/d$) :

$$\frac{z}{d} = 0.0615 \left[1 - 4 \left(\frac{r}{d} \right)^2 \right]^{-2} \quad (9b)$$

식(9)에서 r 은 Fig. 6에 도시하였듯이 기포선단($z = 0$)을 기준으로 하류로 $+z$ 만큼 떨어진 위치에 있는 기포 경계의 반경방향 좌표이다.

Nogueira et al.^[13]는 글리세롤 수용액이 채워진 직경 32 mm의 아크릴재 수직관 내부에서 부상하는 기포의 형상을 측정하여 수용액의 유량과 점성의 영향을 보고하였는데 수용액 유량이 크거나 점성이 클수록 측정결과와 식(9)의 차이가 크다고 보고하였다.

Fig. 7에 본 연구에서 측정된 기포의 형상을 식(9)와 비교하였다. 그림의 결과들은 각 관경에 대해 $V_{ls} = 130$ mm/s 조건에서 V_{gs} 를 변화시켜가며 측정된 결과들이다. 전술하였듯이 식(9)는 정제된 비점성 유체 중에서 부상하는 단일 기포에 대한 것이기 때문에 정량적인 오차를 논의하는 것은 큰 의미가 없지만 그림의 측정 결과는 식(9)로 계산한 기포의 부피를 기준으로 8 mm의 경우 77~83%, 5 mm는 89~107%, 2 mm는 84~95%의 범위에 있다. 측정결과의 경향을 살펴보면 우선 8 mm를 제외한 모든 관경에서 V_{gs} 가 증가(그림에

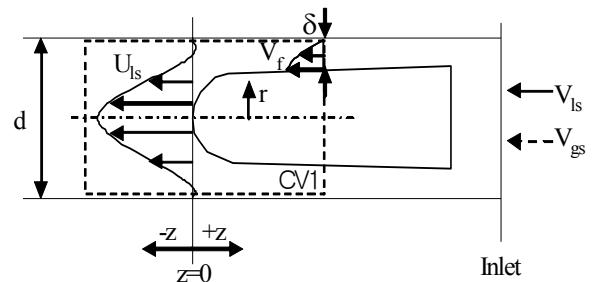


Fig. 6 Velocity distribution around a bubble.

서 ○ → ☆)할수록 액막이 두꺼워지는 것을 명확하게 볼 수 있다. Nogueira et al.^[12]는 수용액 유량을 변화시

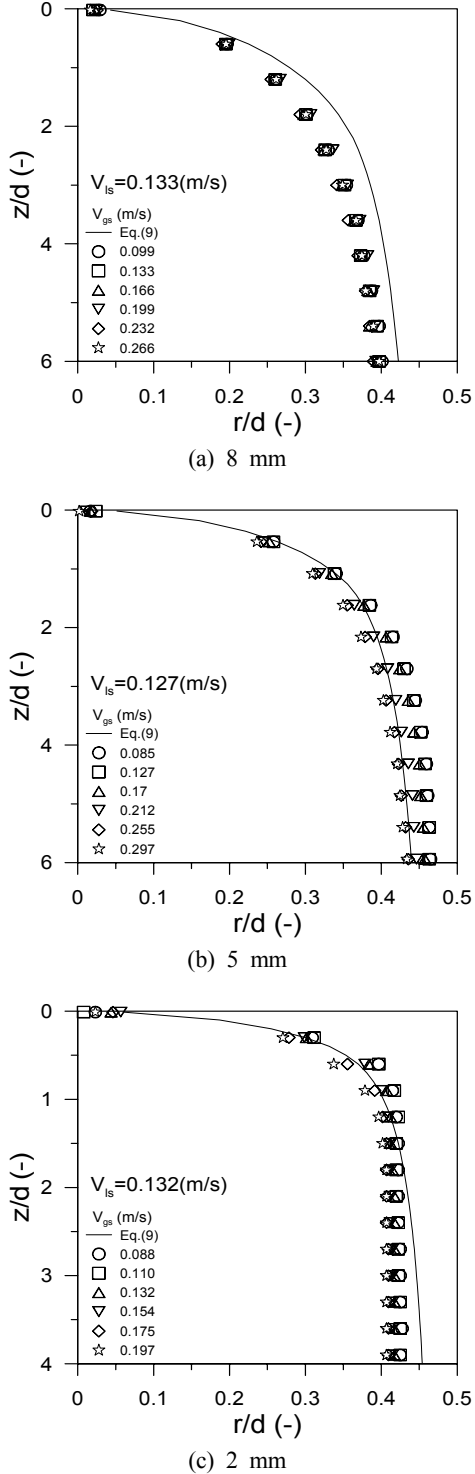


Fig. 7 Measured bubble profiles and Eq.(9).

키며 얻은 실험결과를 분석하여 수용액 유량이 증가하면 기포속도가 증가하면서 기포를 둘러싼 액막을 통해 반대방향으로 밀려나는 액유량이 늘어 액막의 두께가 두꺼워진다고 하였다. 그러나 액체 유량뿐 아니라 기체의 유량이 증가해도 기포속도는 증가하므로 Nogueira et al.^[13]의 설명에 따르면 Fig. 7의 모든 관경에서 V_{gs} 가 증가함에 따라 액막이 두꺼워지는 현상이 관측되어야 하는데 유독 8 mm관에서만 그러한 경향이 잘 보이지 않는 것이 특이하다. 이 문제는 아래에서 액막 두께의 측정결과를 제시하면서 다시 논의하고자 한다. Fig. 7에서 또 한 가지 흥미로운 점은 식(9)와 2 mm 프로필의 차이가 두드러져 보인다는 점이다. 2 mm관의 경우에는 Fig. 7(c)에서 액막의 두께가 일정해지는 지점이 약 $z = 1.5d$ 로서 기포 선단에서 매우 가까운 반면에 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에서는 $0 < z < 6d$ 의 영역에서 액막의 두께가 일정해지는 지점이 존재하지 않는다. 이는 다른 관경에 비해 2 mm관에서 액막이 매우 빨리 발달함을 의미하며 이 때문에 기포의 앞부분이 뭉툭해 보인다. 비록 Fig. 7의 결과는 단일 V_{ls} 조건에서 측정하였지만 그 경향은 본 연구에서 고려한 V_{ls} 범위에서 동일하게 관측되었다.

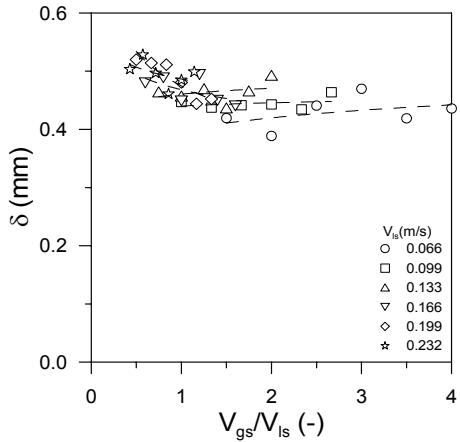
액막 두께는 Fig. 3(b), Fig. 3(c)와 같이 기포의 중간과 후미를 촬영한 이미지를 분석하여 얻은 기포경계면의 분포를 평균하여 Fig. 8에 제시하였다(8 mm의 경우에는 Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯이 기포 후미 경계면에 파동이 존재하지만 액막 두께의 평균값은 기포 중간과 큰 차이가 없다). 우선 Fig. 8(a)의 8 mm 결과와 나머지 관경의 결과가 다른 경향을 보이는 것을 볼 수 있다. Fig. 8(b)에서 5 mm의 액막 두께는 V_{ls} 와 V_{gs} 에 모두 비례하여 증가한다. 또한 Fig. 8(c)에서 2 mm의 액막 두께도 $V_{ls} > 0.14$ m/s의 조건에서 측정된 결과(◇, ☆)를 제외하면 동일한 경향을 보이고 있다.

그러나 Fig. 8(a)의 8 mm 액막 두께는 작은 V_{ls} 의 조건 ($V_{ls} \leq 0.133$ m/s; ○, □, △)에서는 V_{gs} 에 약하게 비례하는 반면 큰 V_{ls} 조건($V_{ls} \geq 0.166$ m/s; ▽, ◇, ☆)에서는 V_{gs} 에 반비례하는 듯한 경향이 보인다. 또한 그림에서 액막 두께의 절대적 크기는 8 mm는 0.39~0.53 mm, 5 mm는 0.11~0.25 mm, 2 mm는 0.15~0.18 mm 범위에서 측정되어 8 mm관의 액막이 동일한 겉보기 속도 조건에서 다른 관경에 비해 2배 이상으로 두꺼운 것으로 나타났다.

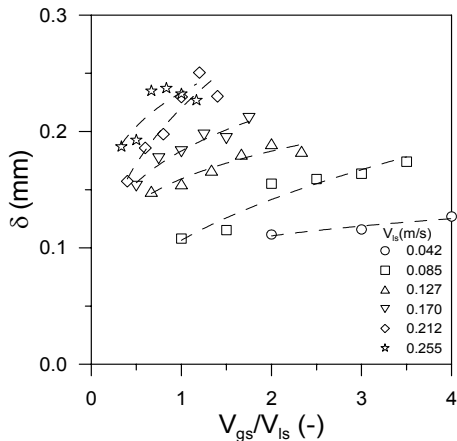
슬러그 유동에서 기포를 둘러싼 액막의 두께 δ 와 내부 평균 유속 V_f 사이에는 Fig. 6에서 CV1으로 표시한 제어체적에서 체적 보존을 고려하면 다음과 같은 관계가 존재한다.

$$V_f = \frac{(V_{gs} + V_{ls})d^2 - V_b(d-2\delta)^2}{d^2 - (d-2\delta)^2} \quad (10)$$

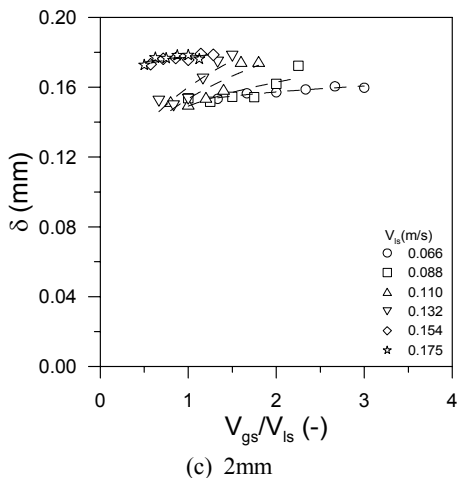
식(10)에서 V_r 는 기포속도와 동일한 방향일 때 (+) 부호를 가짐에 유의하기 바란다. 만약 V_r 와 δ 의 함수



(a) 8 mm



(b) 5 mm



(c) 2mm

Fig. 8 Measured film thickness.

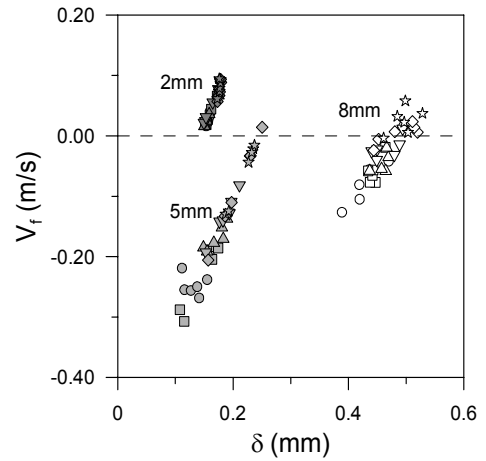


Fig. 9 Thickness and velocity of liquid film.

관계가 주어진다면 식(10)에 대입하여 δ 또는 V_r 를 계산해 낼 수 있으며 실제 여러 연구에서 유하 액막(falling film) 또는 환상(annular) 유동으로 가정하여 문제를 풀어낸 바 있다.^[14, 15] V_r 와 δ 는 침투이론 모델⁽³⁾을 이용하여 전달현상을 해석하는데 필수적인 정보로서 여기서는 Fig. 8의 δ 와 식(4)의 V_b 를 식(10)에 대입하여 계산한 V_r 를 Fig. 9에 도시하였다(Fig. 9에서 각 관경에 대한 결과의 유량조건은 Fig. 8에서 해당 관경에 대해 제시한 범례를 참고하기 바란다). 흥미롭게도 본 연구에서 측정된 유량 조건에서 2 mm관에서 액막내 유동은 (+) 방향 즉, 기포와 같은 방향으로 흐르고 5 mm관에서는 그 반대방향으로 흐르며 8 mm관에서는 두 경우가 모두 존재하는 것으로 나타났다. 또 한 가지 Fig. 9에서 흥미로운 결과는 다른 관에서는 낮은 걸보기속도 조건에서 V_r 가 (-)인 반면 2 mm관에서는 모든 조건에서 (+)로 예측된 것이다.

유사한 걸보기 속도조건에서 측정하였음에도 불구하고 Fig. 8과 Fig. 9에서와 같이 관경에 따라 상이한 경향이 나타나는 이유를 현재로서는 명확하게 설명할 수 없다. V_r 와 δ 에 대한 정보는 액막 내부의 전달현상을 해석하는데 필수적이므로 향후 적절한 유동 모델을 이용하여 Fig. 8의 결과를 해석하는 작업이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 직경 8, 5, 2 mm의 수직관을 흐르는 질소-물 슬러그 유동의 특성을 관측한 결과를 보고하였다. 기포가 두 개의 레이저빔을 가로지르며 발생시키는 광신호의 산란 주기를 분석하여 기포 속도, 기포 길이 및 단위 셀의 길이를 측정하였으며 CCD 카메라로 획득한 광학 이미지를 분석하여 기포 선단의 형상과 기포를 둘러싼 액막의 두께를 측정하였다. 8 mm와

5 mm 관의 기포의 속도는 기존의 모델과 10% 표준편차 수준으로 잘 일치하였으나 2 mm관의 경우에는 액상 걸보기 속도가 0.14 m/s 이상인 조건에서 기존 모델의 예측값보다 크게 측정되었다. 기포의 길이는 8 mm와 2 mm관에서는 걸보기 속도의 영향이 큰 반면 5 mm관에서는 그 영향이 적었다. 2mm관의 기포길이는 다른 관경의 4~5배 정도로 길게 나타났는데 특히 액상 걸보기 속도가 0.14 m/s 이상인 조건에서는 2 mm 직관의 길이인 350 mm보다 더 길게 측정되어서 이 조건에서 유동은 슬러그와 환상유동의 경계영역에 속한 것으로 보이고 이 때문에 기포 속도가 매우 크게 측정된 것으로 판단하였다. 기포와 단위 셀의 길이에 대해서는 액상 Reynolds수와 걸보기 속도비의 함수 형태로 경험식을 개발하여 제시하였다. 기포의 광학이미지를 분석한 결과 8 mm와 5 mm관에서의 기포 선단의 형상은 이론적 형상과 유사했지만 2 mm관에서는 액막이 일찍 발달하여 이론적 형상과의 차이가 컸다. 5 mm와 2 mm관에서 액막의 두께는 걸보기 속도에 비례하여 증가하였으나 8 mm관에서는 액상 걸보기 속도의 크기에 따라 그 경향이 다르게 나타났다. 액막 두께는 8mm관에서 0.39~0.53 mm, 5 mm관에서 0.11~0.25 mm, 2 mm관에서 0.15~0.18 mm 범위에서 측정되어 8 mm관의 액막이 동일한 걸보기 속도 조건에서 다른 관경에 비해 2배 이상으로 두꺼운 것으로 나타났다. 향후에는 적절한 모델을 사용하여 본 실험 결과를 해석하고 그 결과를 보고하도록 하겠다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 일반연구자지원사업(2010-0003488)의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한 본 연구에 많은 도움을 주신 한국교통대학교 정성엽 교수님께도 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, K. J. and Kim, D. S., 2012, Mass transfer characteristics of the carbon dioxide-water slug flow in vertical small-bore tubes, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 401-408.
2. Cheng, L. and Mewes, D., 2006, Review of two-phase flow and flow boiling of mixtures in small and mini channels, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 32, pp. 183-207.
3. van Baten, J. M. and Krishna, R., 2004, CFD simulations of mass transfer from Taylor bubbles rising in circular capillaries, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 59, pp. 2535-2545.
4. Vandu, C. O., Liu, H., and Krishna, R., 2005, Mass transfer from Taylor bubbles rising in single capillaries, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 60, pp. 6430-6437.
5. Bercic, G. and Pintar, A., 1997, The role of gas bubbles and liquid slug lengths on mass transport in the Taylor flow through capillaries, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 52, pp. 3709-3719.
6. Liu, H., Vandu, C. O., and Krishna, R., 2005, Hydrodynamics of Taylor Flow in Vertical Capillaries : Flow Regimes, Bubble Rise Velocity, Liquid Slug Length, and Pressure Drop, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 44, pp. 4884-4897.
7. Kye, S. H., 2013, A study on the flow characteristics of gas-liquid slug flow in vertical mini-channels, M. E. thesis, Korea National University of Transportation.
8. Nicklin, D. J., Wilkes, J. O., and Davidson, J. F., 1962, Two-phase flow in vertical tubes, *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, Vol. 40, pp. 61-68.
9. Mishima, K. and Hibiki, T., 1996, Some characteristics of air-water two phase flow in small diameter vertical tube, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, pp. 703-712.
10. Viana, F., Pardo, R., Yanez, R., Trallero, J. L., and Joseph, D. D., 2003, Universal correlation for the rise velocity of long gas bubbles in round pipes. *J. Fluid Mech.*, Vol. 494, pp. 379-398.
11. Hibiki, T., Hazuku, T., Takamasa, T., and shii, M., 2007, Some characteristics of developing bubbly flow in a vertical mini pipe, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 1034-1048.
12. Dumitrescu, D. T., 1943, Stromung an einer Luftblase im Senkrechten Rohr, *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 23, pp. 139-149.
13. Nogueira, S., Riethmuler, M. L., Campos, J. B. L. M., and Pinto, A. M. F. R., 2006, Flow in the nose region and annular film around a Taylor bubble rising through vertical columns of stagnant and flowing Newtonian liquids, *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, pp. 845-857.
14. Brown, R. A. S., 1965, The mechanics of large gas bubbles in tubes-I. Bubble velocities in stagnant liquids, *Canadian J. Chem. Eng.*, pp. 217-223.
15. Fernandez-Seara, J., Sieres, J., Rodriguez, C., and Vazquez, M., 2005, Ammonia-water absorption in vertical tubular absorbers, *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 44, pp. 277-288.