

기포운동에 따른 2상유동 특성에 관한 연구

서 동 표, 오 울 권*

조선대학교 대학원, *조선대학교 기계공학부

A Study on the Characteristics of Two-Phase Flow by Driven Bubbles

Dong-Pyo Seo, Yool-Kwon Oh*

Graduate School, Chosun University, Gwang-ju 501-759, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwang-ju 501-759, Korea

(Received November 4, 2002; revision received February 27, 2003)

ABSTRACT: In the present study, the characteristics of upward bubble flow were experimentally investigated in a liquid bath. An electro-conductivity probe was used to measure local volume fraction and bubble frequency. Since the gas is concentrated at the near nozzle, the flow parameters are high near the nozzle. In general their axial and radial values tended to decrease with increasing distance. For visualization of flow characteristics, a Particle Image Velocimetry (P.I.V) and a thermo-vision camera were used in the present study. The experimental results show that heat transfer from bubble surface to water is largely completed within $z=10$ mm from the nozzle, and then the temperature of bubble surface reaches that of water rapidly. Due to the centrifugal force, the flow was more developed near the wall than at bubble-water plume. Vortex flow in the bottom region was relatively weaker than that in the upper region.

Key words: Electro-conductivity probe(전기전도도 프로브), Local volume fraction(국부 기체체적률), Bubble frequency(기포빈도수), Thermo vision camera(열화상카메라)

기 호 설 명

- f_B : 기포빈도수(bubble frequency) [s^{-1}]
- N : 기포의 총수(total number of bubbles)
- t : 측정시간(total time) [s]
- t_g : 시간(time period) [s]

그 리 스 문 자

- τ_g : 기체체적률(gas volume fraction)

1. 서 론

액상의 급속에 기체를 주입하는 시스템은 야금학적 공정에서 일반적으로 적용되어 왔다. 야금학적 공정이나 화학공정 산업에서 기체를 주입하는 것은 불순물을 제거하고 균일한 온도유지, 화학원소의 균질화, 반응비 향상 등 혼합을 효과적으로 하여 양질의 제품을 생산하도록 함은 물론 합금이나 화학반응에서 열적 에너지를 첨가하고자 할 때 메카니즘을 제공하기도 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 실험장치를 구성하여 노즐을 통해서 액체 상으로 채워진 래들 내로 기체를 분사한 실험을 수행하였다. 래들 내에 기체를 주입하는 형식의 연구는 기포의 불규칙적인 운동이나 유동의 복잡성 등으로 그 특성해석이 쉽지 않

† Corresponding author

Tel.: +82-62-230-7014; fax: +82-62-230-7014

E-mail address: ygoh@mail.chosun.ac.kr

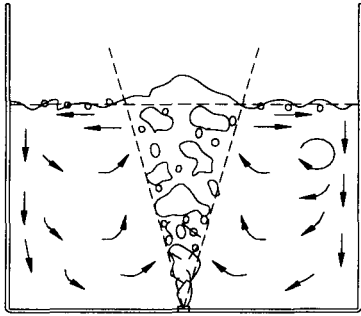


Fig. 1 Schematic diagram for bubble plume and circulation in a bath.

다. 따라서 많은 연구들이 모델장치를 구성하여 유동 특성을 실험을 통해서 해석하고 있다. 2상 유동 내에서 유체역학적 유동을 정확히 이해하는 것은 장치의 설계와 성능을 향상시키는 데 도움이 된다. 이 연구를 해석하기 위해 많은 연구자들이 장치를 공기-물 모델에 적용하여 기-액 유동 특성을 연구하였다. Fig. 1은 시험부 내에서의 유동현상을 개략적으로 보여주고 있다.

Turkoglu⁽¹⁾는 전기저항 프로브를 이용하여 기체체적률과 기포빈도수를 측정하였고 미소열전대를 제작하여 기포와 액체의 온도변화를 연구하였다. 이 연구에 의하면 노즐을 통과한 기상은 짧은 거리 내에서 액상에 도달하게 된다.

Castillejos and Brimacombe⁽²⁻⁴⁾는 공기-물 모델에서 기-액 기둥에서의 기포의 물리적 특성을 연구하여 위치별 및 유량별 기체체적률과 기포빈도수를 측정하였다. 또한 기포의 거동을 추적하기 위해 향상된 전기저항프로브를 고안하여 기포의 상승속도를 측정하였다.

Johansen et al.^(5,6)는 기-액 2상기둥 영역에서 분산현상의 구조와 속도성분의 측정을 위하여 LDV를 사용하여 기체유량이 증가하면 기-액 기둥은 더 넓게 성장하고 중심에서의 축방향의 속도가 약간 증가한다는 것을 발견하였다.

본 연구에서는 원통형 래들의 바닥 중앙에서 공기를 주입하여 유동의 특성을 실험과 가시화를 통해 분석하여 2상유동에 관한 유용한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험장치는 (1) 시험부와 기체공급라인, (2)

Table 1 Experimental conditions for the flow variables measurements

Case	Nozzle dia. [mm]	Vessel dia. [mm]	Bath depth [mm]	Gas flow [m ³ /s]
I	1.00	300	200	0.6283×10^{-4}
II	1.00	300	200	1.2566×10^{-4}

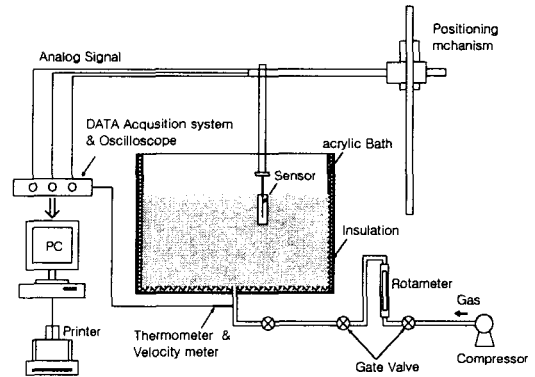


Fig. 2 Schematic of diagram experimental facility.

데이터 처리장치 및 PC, 그리고 (3) 위치제어시스템과 프로브, (4) P.I.V. 시스템으로 구성되어 있다.

실험은 Table 1과 같은 조건으로 수행하였으며 Fig. 2는 실험장치의 주요 구성요소를 개략적으로 보여주고 있다.

2.1 시험부와 기체공급라인

본 실험장치에서 유동이 형성되는 래들은 높이와 직경이 각각 300 mm인 투명 아크릴로 제작하였으며 단열과 가시화를 목적으로 원통형 외곽에 같은 재질로 사각의 아크릴을 설치하였다. 원통형 래들 내에는 작동유체인 물을 높이 200 mm까지 채우고 용기 바닥 중앙에는 노즐을 설치하였으며 압축기로부터 공기가 래들 내로 주입되도록 하였다. 압축기로부터 공급된 공기는 유량조절밸브와 공기압 조정유닛을 통해 래들 내로 주입된다. 공기압 조정유닛은 파이프 내의 공기압을 0.5 기압(게이지압)으로 일정하게 유지하여 공기압의 맥동으로 인한 유량변화를 최소화하여 일정하게 주입되도록 설치하였다.

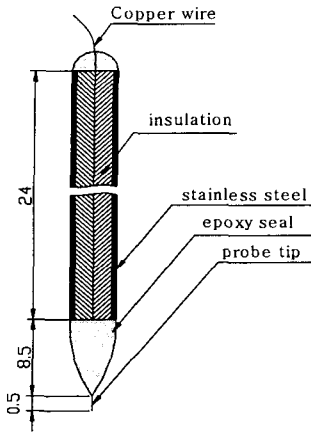


Fig. 3 Schematic diagram of the electro-conductivity probe.

2.2 전기전도도 프로브

래들 내에 기체를 주입하게 되면 2상유동이 형성되고 이때 기포에 대한 유동변수들을 살펴보기 위하여 기 연구와 유사한 방법으로 전기전도도 프로브(Electro-conductivity probe)를 제작하였으며 작동유체에는 5V 상당의 전기를 흐르게 하였다. 프로브는 액상과 기포에서의 전기적 신호 차이를 감지하여 오실로스코프를 통해서 디스플레이되도록 하였다. 프로브의 끝과 몸체는 스테인레스강으로 되어 있고 프로브의 끝과 오실로스코프는 전기가 잘 통하도록 1.0mm의 구리선으로 연결하여 기포의 신호를 저장하도록 하였다. Fig. 3은 전기전도도 프로브의 형상을 보여주고 있다.

2.3 제어장치 및 데이터 처리장치

같은 위치에서 반복적인 실험을 수행하여 데이터를 획득하기 위해서 정확하고 정밀하게 위치가 제어되어야 한다. 따라서 실험데이터의 신뢰성을 향상시키고 측방향과 방경방향의 위치를 제어하기 위해 0.1 mm까지 제어가 가능한 위치 제어장치를 제작하였다.

프로브가 감지한 기포의 전기적 신호는 오실로스코프를 이용하여 파형과 데이터 파일로 저장하였다. 기포의 온도를 측정하기 위해 사용된 적외선 열화상카메라는 빛이 물체에 방사되어 나오는 각종 파장 중에서 적외선 부분을 검출해 내어 온

Table 2 Experimental condition of P.I.V

	Item	Specification
Visualization equipment	Light source	Argon-ion laser
	Sheet light	LLS probe
Measuring condition	Working fluid	Air & water
	Temp.	25°C ± 1
	Particle	Nylon 12

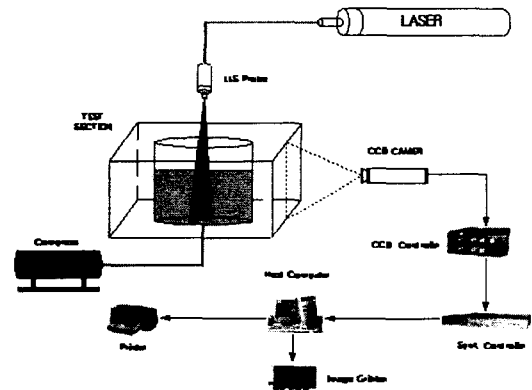


Fig. 4 Schematic diagram of the P.I.V. system.

도분포를 측정하도록 되어 있다. 또한 노즐 바로 아래에 다점풍속계를 설치하여 공기가 용기 내에 들어가기 직전에서 속도와 온도를 측정하였으며 이런 일련의 데이터는 PC에 저장하였다.

2.4 P.I.V. 계측실험

시험부인 래들내에서 형성되는 2상유동을 가시화하기 위하여 P.I.V.를 Table 2와 같은 실험조건으로 구성하였다. 물의 밀도와 거의 비슷한 nylon 12를 유동입자로 사용하여 Fig. 4와 같이 구성하여 촬영하였다. 조명은 아르곤 가시광 레이저를 래들 상부에서 2상유동이 형성되는 중앙에 비추게 하고 고속카메라를 가시광 레이저와 직각방향에 배치하여 30 pps의 프레임 속도로 설정하고 촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

기체주입시스템을 위의 실험장치와 조건들로 구성하여 유동변수들을 측정하고 유동 특성들을 가시적으로 해석하였다.

3.1 유동변수 측정

래들 내에 기포의 거동을 추적하고자 5V의 전기를 흐르게 하고 전기전도도 프로브와 오실로스코프를 이용하여 기포의 신호를 파형의 형태로 출력하여 기포빈도수와 국부 기체체적률을 분석하였다. 실험에 사용된 오실로스코프는 프로브의 센싱부를 통과한 기포의 전기적 신호를 1회에 30초 동안 저장하도록 조정하였으며 같은 위치에서 5번씩 총 150초 동안 실험하여 평균하였다.

실험은 축방향(z-방향)으로 10 mm 간격으로 180 mm까지, 반경방향으로는 중심부에서부터 좌우로 4, 8, 12, 15 mm에서 각각 수행하였다.

Fig. 5는 기포의 전기적 신호의 일부를 디스플레이한 것으로 축방향의 위치 z=50 mm에서 실험한 것이다.

실험은 상온대기압 하에서 같은 시간간격으로 일정시간 동안 반복 수행하여 오실로스코프를 통해서 획득한 파형을 식(1), 식(2)를 기준으로 국부 기체체적률과 기포빈도수를 계산하였다.

$$\tau_g = \frac{t_g}{t} \quad (1)$$

$$f_B = \frac{N}{t} \quad (2)$$

여기서 기체체적률은 측정시간 동안에 프로브의 끝을 통과하는 기포의 시간을 의미하며 기포빈도수는 측정시간 동안 프로브의 끝을 통과하는 기포의 총수를 의미한다.

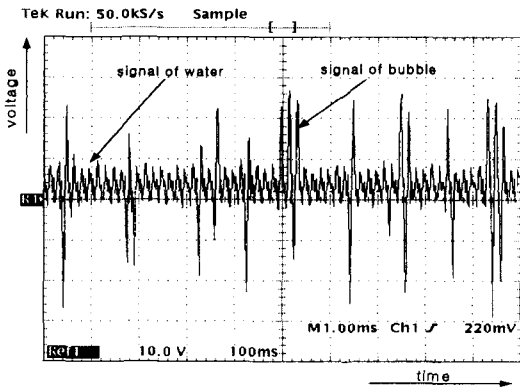


Fig. 5 Electrical signals of bubble captured by an oscilloscope.

유량을 변화시켰을 때 반경방향에 따른 국부 기체체적률과 기포빈도수의 변화를 알아보기 위해 노즐로부터 축방향으로 10 mm인 위치에 프로브를 고정하여 실험한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 도시하였다. 국부 기체체적률과 기포빈도수는 노즐 축을 기준으로 좌우 대칭을 이루고 중

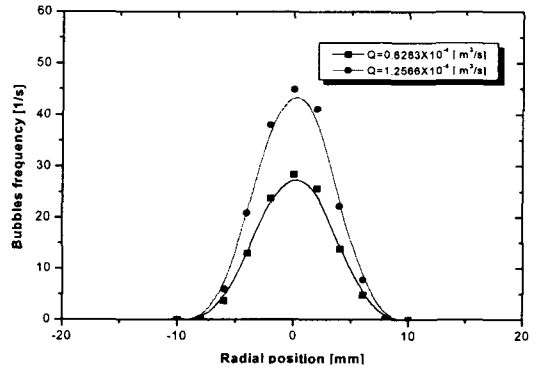


Fig. 6 Bubbles frequency at z=10 mm.

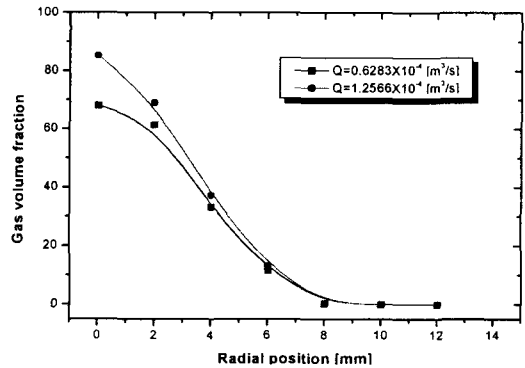


Fig. 7 Gas volume fraction at z=10 mm.

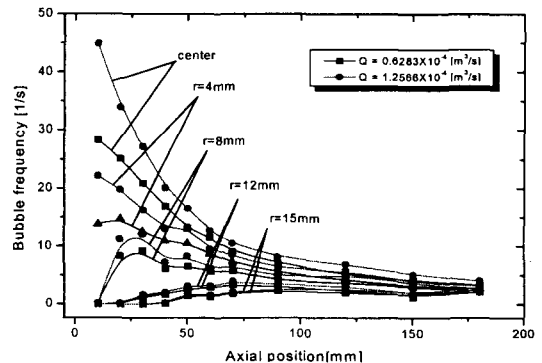


Fig. 8 Axial profiles of the bubble frequency.

(bell) 형상을 이루고 있다.

유량변화에 따른 기체체적률의 변화를 살펴보면 Case I의 경우 68.16%이고 Case II의 경우는 85.215%로 나타났으며 기포빈도수는 Case I과 Case II의 경우에 각각 28.4 s^{-1} 와 44.85 s^{-1} 로 유량증가와 함께 증가하였다.

Fig. 8은 축방향과 반경방향에 따른 기포빈도수의 분포를 보여주고 있다. 유량의 증가에 따라 기포빈도수는 증가하지만 축방향으로 60 mm 이상에서는 그 변화량이 거의 비슷함을 알 수 있다.

Turkoglu⁽¹⁾의 결과와 비교해 볼 때 약간의 차이는 존재하지만 노즐구경의 차이(1 mm와 1.58 mm)와 공기주입량을 고려해 보면 유사한 형상 및 결과를 나타내었다.

3.2 기포와 물의 온도 특성

래들 내에 주입된 기체는 노즐을 통과한 이후

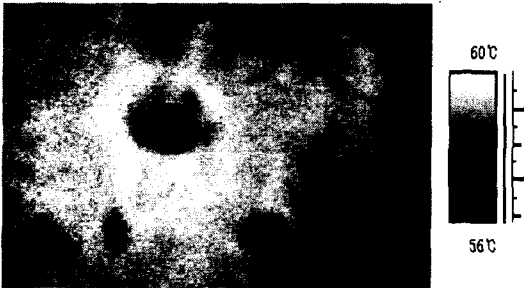


Fig. 9 A distribution of Bubble temperature at $z=50\text{ mm}$.

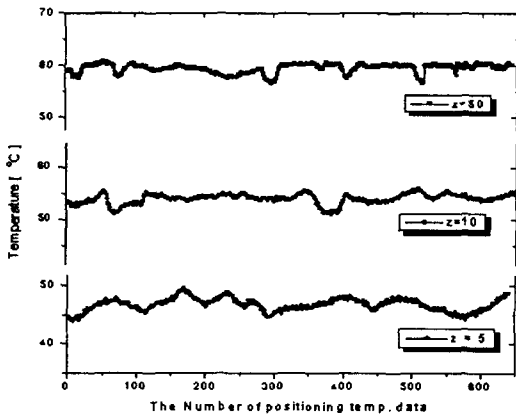


Fig. 10 Distribution of Bubbles temperature at different axial position.

기체는 기포덩어리의 형태로 자유표면으로 상승하게 되고 기포의 상승속도는 매우 빠르고 불규칙하기 때문에 순간적인 기포의 온도를 측정하는데 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 열화상카메라를 이용하여 기포의 온도를 추적하였고, Fig. 9에 측정결과의 일부를 나타내었다. 그림에서 중심부의 검은 점이 기포의 형상과 상계면에서의 온도를 의미한다.

본 실험에서 물의 초기온도를 60°C 로 유지하였고 기체인 공기의 온도는 상온(25°C)에서 실험을 수행하였으나 노즐을 통과하면서 교축작용으로 강하하여 공기의 초기온도는 22°C 였다.

열화상카메라는 피사체로부터 1 m 떨어진 곳에 위치하였으며 방사율은 0.85였다.

기체주입구로부터 축방향의 위치에 따라 기포의 온도분포를 Fig. 10에 도시하였다. 그래프를 살펴보

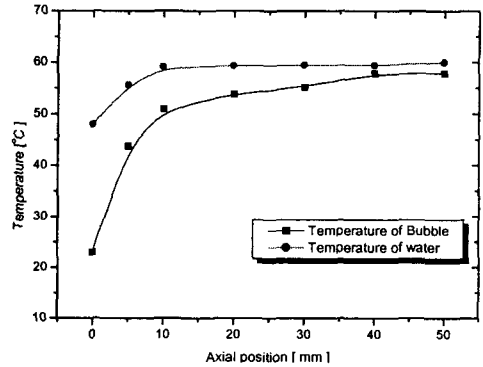


Fig. 11 Liquid and gas temperature profiles along the axis of the injection nozzle.

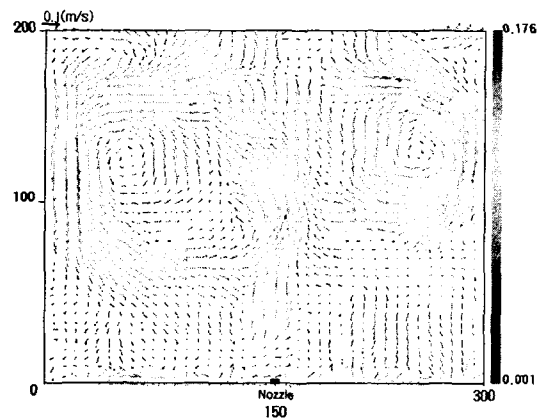


Fig. 12 Velocity vectors in the flow field using PIV system.

면 $z=5\text{ mm}$ 에서 기포의 온도는 45°C 까지 상승하였고, $z=10\text{ mm}$ 에서는 53°C 정도까지 상승하였다.

Fig. 11은 기포와 물의 온도를 축방향 위치에 따라 도시한 것으로 기포계면을 통한 열전달현상은 노즐출구에서부터 10 mm 이내에서 대부분 일어나고 $10\sim 40\text{ mm}$ 에서는 열전달이 둔화되다가 그 이상에서는 물과 거의 같은 58°C 에 이르렀다.

Fig. 12는 P.I.V. 시스템을 이용하여 유동을 가시화한 것으로 유동은 기둥 주위에서보다 외벽 쪽에서 더 발달한 것을 볼 수 있고 래들의 상부에서 더 많이 발달한 것을 알 수 있다. 이것은 기포주입으로 인해 노즐 축에서 발생하는 유동을 주유동이라 하면 외벽면 가까이에서는 원심력이 발생하게 되고 주유동이 커질수록 원심력이 크게 작용하여 원심력에 의해 외벽면의 속도가 증가하기 때문이라고 판단된다.⁽⁷⁾ 따라서 유동은 외벽면에서 더 발달하게 되고 2개의 와가 발생하게 된다. 그리고 래들의 하부에는 유동이 비교적 약하게 나타남을 알 수 있다. 이 부분에 관해서는 더 많은 연구가 필요하다.

4. 결 론

물이 채워진 래들 내에 공기를 주입하여 실험한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 유량증가에 따른 기체체적률이나 기포빈도수는 유량증가에 따라 증가하였지만 축방향의 위치가 60 mm 이상이 되면 거의 비슷하였다.

(2) 기포 계면을 통한 열전달현상은 축방향의 위치 10 mm 이내에서 가장 많이 일어나고 50 mm 이상이 되면 액체의 온도와 거의 평형을 이루었다.

(3) 유동은 기둥에서 보다 용기의 벽쪽에서 더 발달한 것을 볼 수 있으며 래들의 하부에서보다 상부에서 더 발달하였으며 유동이 적은 하부에 관한 연구는 계속 진행되어야 하겠다.

차후 마찰력이나 판성력 등에 따른 기포의 상승속도나 형상변화, 기체주입률과 기하학적인 연

구를 통한 래들 내에서의 유동구조에 관한 해석이 더 있어야 할 것이다.

참고문헌

1. Turkoglu, H., 1990, Transport Processes in Gas-Injected Liquid Baths, Ph.D. Thesis, Drexel University, Philadelphia.
2. Castillejos, A., 1986, A Study of the Fluid-Dynamic Characteristics of Turbulent Gas-Liquid Bubble Plumes, Ph.D. Thesis, The University of British Columbia, Canada.
3. Castillejos, A. H. and Brimacombe, J. K., 1986a, Measurement of Physical Characteristics of Bubbles in Gas-Liquid plumes; Part I. An Improved Electro-resistivity probe Technique, Metallurgical Transactions B, Vol. 18B, pp. 649-658.
4. Castillejos, A. H. and Brimacombe, J. K., 1986b, Measurement of Physical Characteristics of Bubbles in Gas-Liquid plumes; Part II. Local Properties of Turbulent Air-Water Plumes in vertically Injected Jets, Metallurgical Transactions B, Vol. 18B, pp. 659-971.
5. Johansen, S. T., Robertson, D. G. C., Woje, K. and Engh, T. A., 1988, Fluid Dynamics in Bubble Stirred Ladles; Part I. Experiments, Metallurgical Transactions B, Vol. 19B, pp. 745-754.
6. Johansen, S. T. and Boysan, F., 1988, Fluid Dynamics in Bubble Stirred Ladles; Part II. Mathematical Modeling, Metallurgical Transactions B, Vol. 19B, pp. 755-764.
7. Sohn, H. C., 2000, A study on the flow characteristics of developing turbulent steady, turbulent oscillatory and turbulent pulsating flows in the entrance region of a curved duct, Ph.D Thesis, Chosun University, Kwang-ju, Korea.