

Air-Water 모델에서 기포특성에 관한 실험적 연구

오을권[†] · 서동표

조선대학교 기계공학부

(2002. 8. 22. 접수 / 2002. 12. 24. 채택)

An Experimental Study on the Characteristics of Bubbles in Air-Water Model

Yool-Kwon Oh[†] · Dong-pyo Seo

Department of mechanical Engineering, Chosun University

(Received August 22, 2002 / Accepted December 24, 2002)

Abstract : The structural development of air-water bubble plumes has been measured under different condition on air flow rate in a cylindrical bath. The time-averaged structure of plumes has been measured with an oscilloscope and an electro-conductivity probe. The temperature of bubbles was also obtained by a thermal-infrared camera. Gas volume fraction and bubble frequency were high since bubbles concentrated on the nozzle. In general, their axial and radial values tended to decrease with increasing distance. Bubble temperature reached water temperature within a short time. The present study showed that thermal equilibrium between bubbles and water was completed before bubbles flow became stable.

Key Words : bubbles-liquid flow, gas volume fraction, bubble frequency, electro-conductivity probe

1. 서 론

많은 산업현장에서 물성치가 다른 2개 이상의 유체가 섞여 흐르는 다상유동을 볼 수 있다. 특히 응용되어 있거나 액상의 금속에 기체를 주입하는 시스템은 야금학적 처리과정이나 화학적 공정에서 흔히 사용되고 있다. 야금학적 처리과정에서 기체를 주입하는 것은 혼합영역과 온도분포를 균일하게 하기위한 것은 물론 합금이나 화학반응에서 열에너지원을 첨가하고자 할 때 메카니즘을 제공하기도 한다.

Andreine¹⁾ 등은 증류유동 조건에서 노즐부근에서의 기포유동을 실험하여 기포는 개개의 성분으로 상승하는 것 이상으로 무리를 지어 훨씬 더 복잡하게 상승한다는 것을 발견하였다.

Sahai와 Guthrie²⁾는 노즐에서 보이는 커다란 기포가 유체역학적으로 불안정하기 때문에 노즐에서 가까운 부분에서 작은 기포들로 부서지고 이런 기포

들은 계속해서 붕괴되고 합성되는 현상을 보고하였다. 이들은 래들내에서 액체가 순환하는 것이 기포와 인접한 액체와의 어떤 전단운동에 의한 것보다는 기포 개개의 운동에 더 영향을 받는다고 하였다.

Castillejos³⁾ 및 Brimacombe^{4,6)}는 기-액 이상영역과 이 영역에서의 기포집중분포에 관한 실험적인 상호관계를 아르곤이 주입된 용융 금속조에 적용시켜 연구하였다.

Farouk와 Turkoglu⁷⁾ 및 Turkoglu⁸⁾은 Microthermocouple을 이용하여 기상과 액상에 대해서 온도분포를 연구하였고, 기포의 온도는 노즐을 통과한 후 얼마 지나지 않아서 기포자신의 열에너지를 상실하고 액상과 열평형에 도달하였다.

이런 기체주입시스템에서 기포-액체 특성에 관한 해석은 기포유동이 매우 빠르고 복잡하기 때문에 기포의 거동이나 온도를 추적하는 데는 상당한 어려움이 따른다.

따라서 본 연구에서는 원통형 용기 바닥 중앙에서 공기를 주입하여 반복적인 실험을 통하여 기포의 특성을 규명하고 수치시뮬레이션 해석 등을 위

[†]To whom correspondence should be addressed.
ygoh@mail.chosun.ac.kr

해 이상유동에 관한 유용한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 실험장치

본 실험장치는 크게 테스트섹션인 원통형 용기, 기체주입시스템, 데이터처리장치, 위치제어시스템, 프로브로 구성되어 있다.

2.1. 테스트 섹션

원통형 용기는 높이와 직경이 300mm인 투명 아크릴로 제작하였으며 단열과 가시화를 목적으로 원통형 외곽에 같은 재질인 사각의 아크릴을 설치하였다. 원통형 용기내에는 작동유체인 물을 높이 200mm까지 채우고 용기 바닥 중앙에는 노즐을 설치하였으며 압축기로부터 공기가 용기내로 주입되도록 하였다. 공기의 유량변동을 최소화하기 위하여 공기가 통과하는 파이프 내에 공기압 조정 유닛을 설치하여 항상 일정한 압력이 유지되도록 하였다.

2.2. 전기전도 프로브

원통형 용기내에 기체를 주입하게 되면 용기내에는 기포가 발생하여 이상유동이 형성된다. 이때 기포의 거동을 살펴보기 위하여 전기전도프로브를 제작하였으며 용기 내에는 5V의 전기를 흐르게 하였

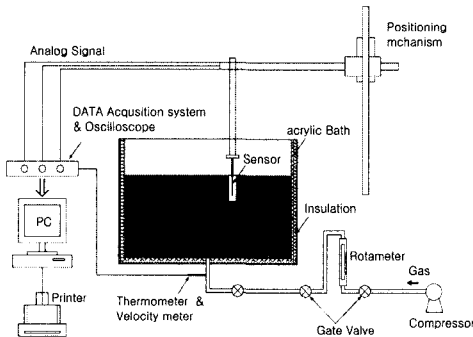


Fig.1. Schematic diagram of experimental facility.

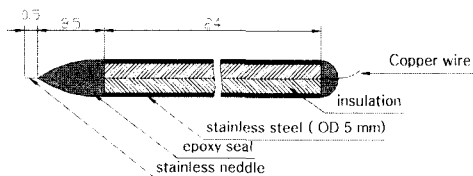


Fig. 2. Schematic of electro-conductivity probe

Table 1. Experimental conditions for the flow variables measurement

	Nozzle Dia. [mm]	Vessel Dia. [mm]	Bath Depth [mm]	Gas flow [m ³ /s]
1	1.00	300	200	0.6283×10^{-4}
2	1.00	300	200	1.2566×10^{-4}

다. 프로브는 기포의 전기적신호를 획득하여 오실로스코프를 통해서 나타나도록 하였다. Fig. 2는 전기전도프로브의 형상을 보여주고 있다.

2.3. 제어장치 및 데이터처리장치

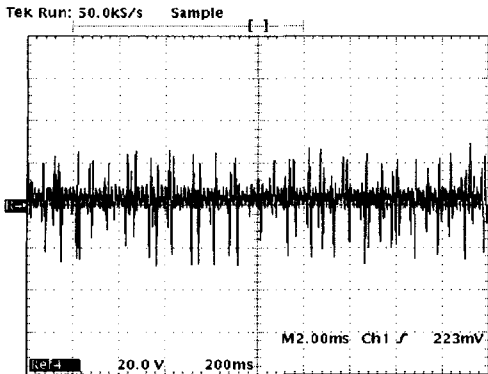
실험은 동일한 위치에서 반복적으로 실험을 수행해야 되기 때문에 정확한 위치를 제어할 필요가 있다. 따라서 실험데이터의 신뢰성을 높이고 축방향과 반경방향의 위치를 제어하기 위해 0.1mm까지 제어가 가능한 위치제어시스템을 주문 제작하였고 전기전도 프로브의 전기적 신호는 오실로스코프를 이용하여 획득하였으며 열화상카메라를 이용하여 상승하는 기포의 온도를 측정하였다. 그리고 다점 풍속계를 이용하여 기체가 용기 내에 주입되기 직전에서 공기의 온도와 속도를 측정하였으며 이런 일련의 데이터는 PC에 저장하였다.

3. 실험결과 및 고찰

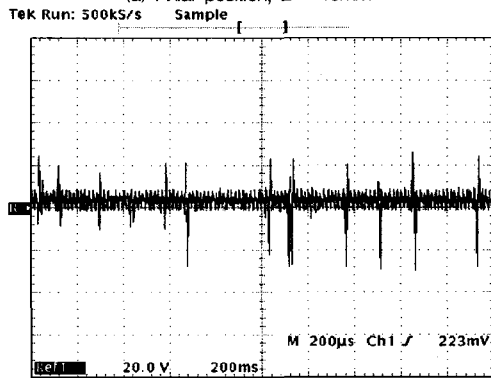
기체 주입시스템을 Air-Water 모델로 실험장치를 구성하였고 이상유동에서 기포빈도수, 기체체적률, 상온도 등의 데이터를 획득하여 이상유동의 특성을 파악하고자 Table 1과 같이 두 가지의 유량 조건에서 실험을 수행하였다.

3.1. 기포의 신호 응답 특성

원통형 용기내에 있는 물에 5V의 전기를 흐르게 하고 전기전도프로브를 축방향과 반경방향에 따라 위치를 변화시켜 가면서 기포의 거동을 추적하여 오실로스코프를 통해서 Fig. 3과 같이 파형을 구하여 기체체적률(Gas volume fraction)과 기포빈도수(Bubbles frequency)를 계산하였다. 노즐을 통과한 기포는 매우 빠르고 불규칙하기 때문에 일정시간 동안 반복적으로 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 오실로스코프에서 최고 30초의 간격으로 5번씩 총 150초 동안의 기포의 신호를 추적하여 평균하였다. Fig. 3의 (a)는 노즐 축으로부터 축방향의 위치



(a) Axial position, z = 10mm



(b) Axial position, z = 50mm

Fig. 3. Electrical signals of bubble flow captured by an oscilloscope.

z=10mm에서의 기포의 신호를 보여주고 있고 (b)는 z=50mm에서 기포의 신호를 나타내고 있다. (a)는 노즐을 통과한 기포가 집중되어 있는 곳이므로 기포의 신호가 많이 보이지만 (b)는 기포가 운동에너지의 상실과 팽창력에 의해서 붕괴되어 반경방향으로 퍼지기 때문에 그 신호가 비교적 적게 나타나고 있다.

3.2. 기체체적률과 기포빈도수

실험은 상온 대기압하에서 같은 시간간격(30sec)으로 일정시간동안 반복 수행하였으며 오실로스코프로 획득한 파형을 식(1)을 기준으로 하여 기체체적률과 기포빈도수를 계산하였다.

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

여기서, τ_g 와 f_B 는 기체체적률과 기포빈도수를 각각 나타내고, t_g 는 실험 총 시간 t 동안에 프로브의

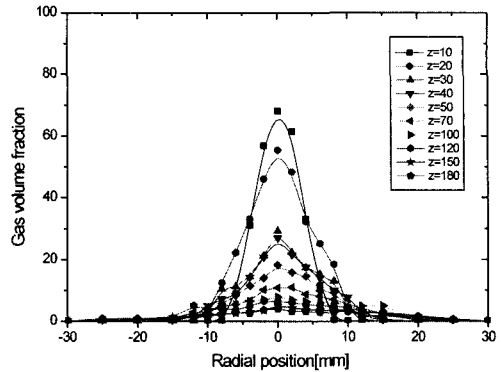


Fig. 4. Radial profiles of the gas volume fraction at different cross-sections $Q = 0.63 \times 10^{-4} [m^3/s]$

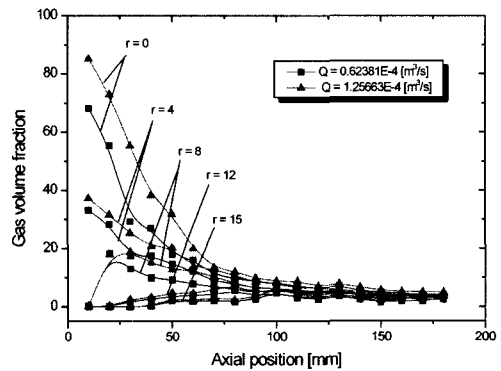


Fig. 5. Axial profiles of the gas volume fraction at differential point for two case.

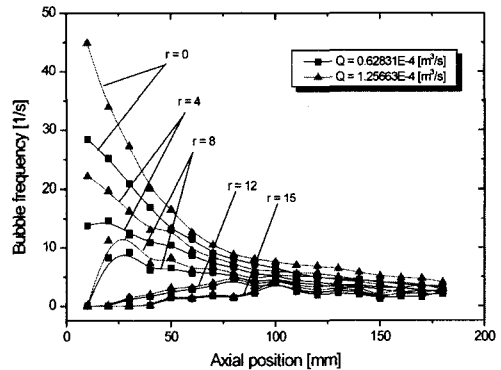


Fig. 6. Axial profiles of the bubble frequency at differential point for two case.

끝을 통과하는 기포의 시간, N 은 총 시간 동안 통과하는 기포의 총 수를 의미한다.

가액 기포 기동의 구조적 형상 및 유동 변수들을 분석하기 위해 축방향과 반경방향에 따라 기체체적률을 Fig. 4에 도시하였다. 기체체적률은 노즐

주입축을 중심으로 좌우 대칭이며 노즐 출구로부터 축거리가 상승할수록 기체 체적률은 감소하지만 노즐에서 멀어질수록 유동변화가 적게 일어남을 관찰할 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 두 가지의 비교적 낮은 유량조건에서 기체 체적률과 기포빈도수를 나타내고 있다. 기체체적률과 기포빈도수는 노즐 출구에서 가까운 곳에서 기체가 집중되기 때문에 높게 나타나고 있지만 축방향과 반경방향으로 거리가 증가할수록 일정한 형태를 나타내고 있으며 이러한 일정한 형태는 기포가 더 안정적으로 유동하고 있음을 의미한다.

유량 변화에 따른 유동변수를 살펴보면 유량이 증가하면 기체체적률과 기포빈도수는 증가하였으나 노즐로부터 축방향으로 약 60mm 이상에서는 유량을 증가하더라도 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

노즐 출구부근에서는 기포가 집중되어 있고 운동에너지가 상당히 크므로 매우 불규칙하게 유동을 하지만 노즐출구로부터 멀어질수록 기포는 운동에너지를 상실하게 되고, 팽창하고 붕괴되어 반경방향으로 퍼지기 때문에 축방향의 위치가 약 60mm 이상에서는 유동변수들의 변화량이 거의 일정하였다.

3.3 기포의 온도분포

노즐을 통해서 주입된 기체는 매우 빠르게 상승하기 때문에 상승하는 기체의 온도를 측정하기 위해 열화상카메라를 이용하였다.

본 실험에서는 작동유체인 물의 온도를 60°C로 유지하였고 유입 공기의 온도는 상온인 22°C였다.

Fig. 7은 축방향의 두 위치에서의 온도분포를 나타내고 있다. (a)는 z=10mm에서 기포의 온도를 측정하는 것으로 중심부에 있는 검은 점이 기포의 형상과 상계면에서의 온도를 나타낸다. 노즐을 통과한 기포는 매우 짧은 거리에서 빠른 열전달이 발생하여 (b)에서와 같이 z=50mm인 곳에 이르면 거의 물의 온도와 비슷하게 됨을 알 수 있다.

Fig.8은 노즐 출구에서 축방향의 위치 z=70mm까지의 위치별 기포의 온도분포를 나타내고 있으며 Fig.9는 z=0에서 z=200mm까지의 축방향의 거리의 증가에 따른 기포의 온도변화 추이를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 기포의 온도는 매우 짧은 거리에서 열평형에 도달하게 된다.

본 실험 조건에 따라 실험을 수행한 결과 기체 체적률과 기포빈도수는 운동에너지가 상실되고 기포의 팽창력에 의해 붕괴되어 축방향의 위치가

60mm 이상에서 안정적인 유동을 나타내었으며 기포의 온도는 축방향의 위치가 50mm 이상에서부터 액체와 거의 열평형을 이루었다.

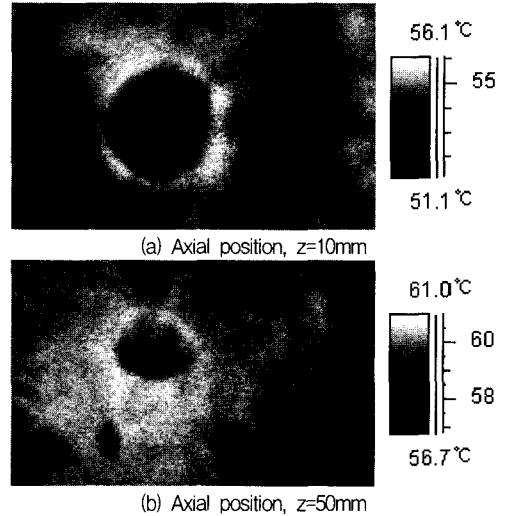


Fig. 7. A distribution of Bubbles temperature on the axial position.

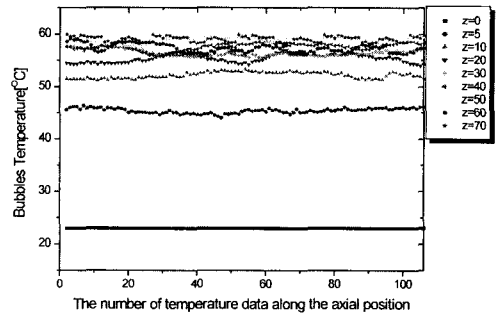


Fig. 8. Distribution of Bubbles temperature at the different axial position.

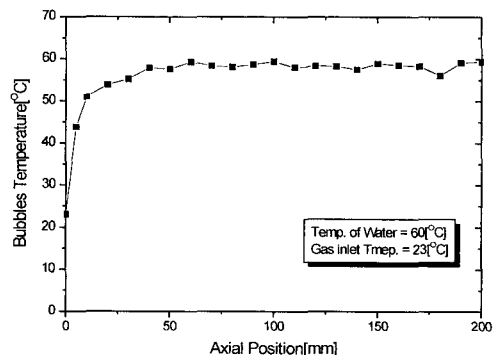


Fig. 9. Characteristics of bubbles temperature at the axial position.

4. 결론

물이 채워진 원통형 용기의 바닥 중앙에서 공기를 주입하여 기포의 유동과 온도를 실험을 통하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 노즐출구 부근에서는 기포가 집중되는 곳으로 기체체적률과 기포빈도수는 높게 나타나지만 축방향과 반경방향으로 증가할수록 감소하였다.

2) 유량을 증가시키면 기체 체적률과 기포빈도수도 같이 증가하지만 축방향의 위치 $z = 60\text{mm}$ 부근에 이르면 유량변화와 무관하게 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

3) 축방향의 위치에 따른 기포의 온도는 짧은 거리내에서 액체의 온도에 도달하게 되고 $z = 50\text{mm}$ 에 이르렀을 때 액체와 열평형을 이루었다.

4) 본 실험조건에서 기포의 붕괴현상이 일어나기 전에 기포는 액체와 열평형을 이루었다. 따라서 기포는 팽창에 의한 붕괴보다 열전달 현상이 더 빠르게 일어나는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1) R. J. Andreine, J. S. Forster, and R. W. Callen, "Characterization of Gas Bubbles Injected into Molten Metals Under Laminar Flow Conditions," Metallurgical Transactions B, Vol. 8B, pp. 625-631, 1977.
 2) Y. Sahai, and R. I. L. Guthrie, "Hydrodynamics of

Gas Stirred Melts: Part I Gas-liquid Coupling," Metallurgical Transaction B, Vol. 13B, pp. 193-202. 1982.
 3) A. H. Castillejos, "A Study of the Fluid Dynamic Characteristics of Turbulent Gas-Liquid Bubble Plumes," Ph.d. Thesis, The University of British Columbia, Canada, 1986.
 4) A. H. Castillejos, and J. K. Brimacombe, "Measurement of Physical Characteristics of Bubbles in Gas-Liquid plumes; Part I. An Improved Electroresistivity probe Technique," Metallurgical Transactions B, Vol. 18B, pp 649-658, 1987 a.
 5) A. H. Castillejos, and J. K. Brimacombe, "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. 1987b.
 6) A. H. Castillejos, and J. K. Brimacombe, "Physical Characteristics of Gas Jets Injected Vertically Upward into Liquid Metal," Metallurgical Transactions B, Vol. 20B, pp 595-601. 1989.
 7) B. Farouk, and H. Turkoglu, "Characteristics of Flow Fields in Liquid Metal Baths due to Vertically Injected Gas Jets : A Numerical Study," International Journal of Engineering Fluid Mechanics, 1990.
 8) H. Turkoglu, "Transport Processes in Gas-Injected Liquid Baths," Ph. D. Thesis, Drexel University, Philadelphia. 1990.