

기체가 주입된 원통형 용기내에서 기포유동에 관한 연구

서동표*, 박근욱**, 오을권***

A Study on Bubbles Flow in the Gas-injected Cylindrical Bath

Seo, Dong-Pyo*, Park, Keun-Uk** Oh, Yool-Kwon

Key Words : Bubbles Flow(기포유동), Electroconductivity probe(전기전도도프로브), Gas volume fraction(기체체적률), Bubble frequency(기포빈도수), Two-phase plume(이상기동)

Abstract

Submerged gas-injected system can be applied to various industrial field such as metallurgical and chemical processes. So this study aims at presenting the relevant relationship between gas phase and liquid phase in a gas-injected bath. In a cylindrical bath, local gas volume fraction and bubble frequency were measured by electroconductivity probe and oscilloscope. The temperature of each phase was measured using thermocouple and data acquisition system.

In vertical gas injection system, gas-liquid two phase plume was formed, being symmetry to the axial direction of injection nozzle and in a shape of con.

Local gas-liquid flow becomes irregular around the injection nozzle due to kinetic energy of gas and the flow variables show radical change at the vicinity of gas[air] injection nozzle. As most of the kinetic energy of gas was transferred to liquid in this region, liquid started to circulate. In this reason, this region was defined as "developing flow region" The Bubble was taking a form of churn flow at the vicinity of nozzle. Sometimes smaller bubbles formed by the collapse of bubbles were observed.

The gas injected into liquid bath lost its kinetic energy and then was governed by the effect of buoyancy. In this region the bubbles which lost their kinetic energy move upward with relatively uniform velocity and separate.

Near the gas nozzle, gas concentration was the highest. But it started to decrease as the axial distance increased, showing a Gaussian distribution.

1. 서론

많은 산업 현장에서 응용되어 있거나 액상의 금속에 기체를 주입하는 형식의 시스템은 특히 야금학적 처리과정이나 화학공정에서 흔히 볼 수 있다. 야금학에서 오랫동안 기체주입시스템이 사용되고 있지만 이상유동에서 발생하는 현상들은 매우 복잡하기 때문에 대부분이 실험을 통해서 이루어지고 있고 물리적인 현상을 적절하게 해석하기란 쉽지 않다. 최근 기체산화제를 주입한 액체상태의 금속의 연소가 많은 관심의 대상이 되고 있으며 이에 다상(multiphase)유동에서의 물리적인 이해가 필요하게 되었다.

Andreine 등은 층류유동 조건하에서 오리피스 부근에서의 기포상승속도를 실험하여 기포가 개개의 속도성분을 가지고 상승하는 것 보다 무리를 지어 훨씬 더 복잡하게 상승한다는 것을 발견하였다.¹⁾

Sahai와 Guthrie는 노즐에서 기포가 유체역학적으로 불안정하기 때문에 노즐에서 가까운 부분에서 작은 기포들로 붕괴되고 다시 합성되는 현상을 보고하였다.²⁾

Castillejos와 Brimacombe는 기-액 이상영역과 이 영역에서

의 기포집중분포에 관한 실험적인 상호관계를 아르곤이 주입된 용융 금속속에 적용시켜 연구하였으며 액상의 유동 지배방정식으로 미분방정식을 사용하였고 액상에서의 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.^{3,5)}

이런 기체 주입시스템이 오랫동안 적용되어 왔지만 문제의 복잡한 특성 때문에 상세하게 해석된 정량적인 연구는 아직까지는 미흡하며 일반적으로 모델실험을 통해서 유동을 연구하였다. 실험장치에 사용된 작동유체는 실제 용융금속-기체 모델을 사용해야 하나 실험조건상 많은 어려움이 따르게 되므로 공기와 물을 이용하였다.

2. 이론해석

이상유동이 발생하는 용기속에서 기체와 액체의 반응은 보통 상들의 계면에서 일어난다. 이러한 반응은 기포의 체류시간 및 물질전달계수에 의존하게 되며 기포가 개별적으로 움직이든지 아니면 무리를 지어 움직이든지 운동을 지배하는 법칙들을 이해해야 한다.

Fig. 1은 용기 속에서의 기포기동이 전체 용기 단면적의 부분을 차지하고 액체를 혼합하는 형태를 보여주고 있다. 일은 기체에서 액체로의 운동에너지의 전달의 결과로 노즐에서 행하여지고 또 기체가 팽창하면서 기포기동에서 일을 하게된다. 기체가 가열될 때 기체의 팽창은 가역등압 하에서 온도상승에 의해

*조선대학교 정밀기계공학과, pyo4021@yahoo.co.kr

**여수공업대학 기계자동차과, kupark@mail.yosut.ac.kr

***조선대학교 기계공학부, ygoh@mail.chosun.ac.kr

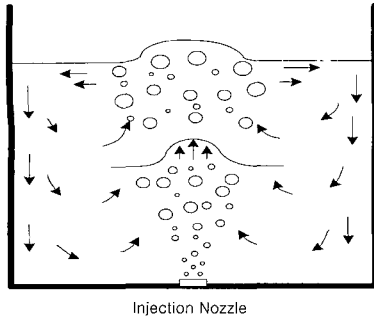


Fig. 1 Schematic diagram for bubble plume and circulation in ladle.

나타나고 임의의 압력에 대해 기체는 팽창함으로 일을 한다. 단위 시간당 한 일은 다음과 같다.

$$\dot{W} = \frac{\dot{V}_G}{V_N} R(T_2 - T_1) \quad (1)$$

여기서 \dot{V}_G 는 단위시간당 기체의 유속, V_N 은 표준체적이다. 기체운동에너지를 고려하면 용기 속에 투입된 양 \dot{m}_G 에 대해 단위시간당 운동에너지는 노즐 직경의 4승에 반비례한다⁶⁾.

$$E_{kin} = 8 \frac{\dot{m}_G^3}{\rho_G^2 \pi^2 d^4} \quad (2)$$

기체가 상승 할 때 기체의 운동 에너지는 팽창에너지와 비교하면 매우 작기 때문에 기포기동 속에서 혼합 에너지는 기체의 팽창만이 남게되고 단위시간당 에너지 전달률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{V}_G R T}{V_N} \ln \frac{p_1}{p_0} \quad (3)$$

p_1 은 노즐에서의 기체압력이고 p_0 은 기포기동의 상부에서의 압력으로 일반적으로 대기압에 해당된다. 기포의 속도를 계산하기 위해 다음과 같이 가정하였다^{7,9)}.

- ① 기포기동에서 속도 u 와 기체체적의 분포는 Gaussian 분포 함수를 따른다.
- ② 기포기동은 정적인 상태에서 상승한다.
- ③ 기체의 부력은 액체에서의 관성력과 평형을 이룬다.

가정①에서 속도와 기체체적은 기포기동의 반경의 함수로 쓸 수 있다^{7,9)}.

$$\frac{u}{u_{max}} = \exp\left(-\frac{r^2}{b_u^2}\right)$$

$$\frac{\chi}{\chi_{max}} = \exp\left(-\frac{r^2}{b_x^2}\right) \quad (4)$$

b_x/b_u 의 비는 λ 로 표시되고 $\lambda = 0.7$ 이다¹⁰⁾. 가정③에 의하여 관성력은 유체의 운동량과 일치하며 다음과 같다.

$$I = \int_0^\infty u^2(1-\chi)\rho_L 2\pi r dr \quad (5)$$

그리고 용기속에서 작용하는 부력을 계산하면 다음과 같다.

$$dF = g(\rho_L - \rho_G) dV \quad (6)$$

위의 식들을 이용하여 기포기동 중심에서의 기포속도를 구하면 다음과 같다.

$$u_m = \left[-\frac{2}{\pi} \frac{p_0 T_L}{T_0 f_L \rho_L b^2 u} \frac{\ln(1 - \frac{z}{z^*})}{1 - \frac{2\lambda^2}{1 + 2\lambda^2} \chi_m} \dot{V}_G \right]^{1/3} \quad (7)$$

이 식은 액체가 가장자리로부터 기포기동 속으로 이동해가고 폭은 자유표면 쪽으로 갈수록 증가하여 기포기동이 원뿔모양의 형상을 가진다는 것이다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험은 원통형 용기의 바닥에서 기체를 주입하여 기체 체적률과 기포빈도수를 측정하여 기포의 거동을 파악하기 위해 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 원통형 용기는 직경과 높이가 각각 300 mm인 아크릴로 제작하였고 용기의 외부에는 단열과 가시화를 목적으로 사각으로 아크릴을 설치하였으며 그 사이에 작동유체와 같은 물을 채웠다. 원통형 용기 바닥 중앙에 설치한 노즐은 압축기로부터 공급받은 공기를 게이트밸브로 유량을 조절하면서 용기 내에 주입되도록 하였고 압축기의 압력은 600 kPa 이상으로 유지되도록 하였다.

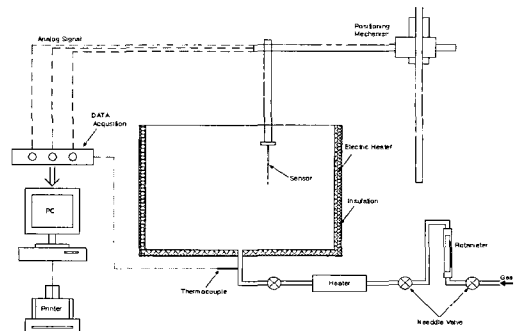


Fig.2 Schematic of experimental facility

기포의 거동을 살펴보기 위하여 전기전도도프로브와 오일로스코프를 이용하여 기체체적률과 기포빈도수를 측정하였고 프로브의 작동은 기체가 주입되는 축방향과 반경방향으로 위치를 변화시켜가면서 수행하였다. Fig.3은 본 연구에서 기포의 거동을 추적하기 위해 사용된 전기전도도프로브의 형상을 보여주고 있다.

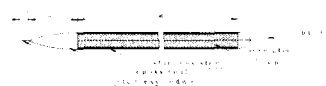


Fig.3 A Shape of Electro-conductivity probe.

데이터의 신뢰성을 위해 프로브의 위치를 정확히 제어할 필요가 있으므로 위치 제어 장치는 축방향과 반경방향에 대하여

정밀하게 제어할 수 있도록 제작하였다.

실험은 상온 대기압에서 같은 시간 간격으로 일정시간 동안 측정하여 그 전기적 신호를 계산하여 체적률과 기포 빈도수를 계산하였다.

$$R_G = \frac{\tau_G}{\tau} \quad , \quad f_B = \frac{N}{\tau} \quad (8)$$

여기서 τ_G 는 시간주기를 나타내고 τ 는 측정 총시간, N은 기포의 총 수를 의미한다.

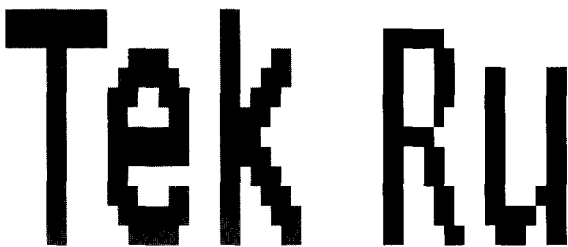
4. 결과 및 고찰

본 실험은 Air-Water 모델로 실험장치를 구성하여 Table.1에 나타낸 바와 같이 두 경우의 유량률 조건에서 수행하였다.

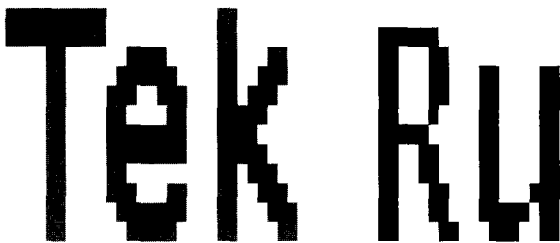
Table.1 Experimental conditions for the flow variables measurements.

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

용기 내의 물에 5V의 전압을 흐르게 하고 전기전도프로브를 오실로스코프에 연결하였다. 프로브에서 기포의 자취를 전기적 신호로 감지하여 Fig.4에서와 같이 모니터에 파형으로 표시되도록 하였다.



(a) Z = 10mm



(b) Z = 50mm

Fig. 4 Electrical signals of bubble flow captured by an oscilloscope.

4.1 기체체적률(Gas volume fraction)

기-액 기포 기동의 구조적 형상 및 유동 변수들을 분석하기 위해 축방향과 반경방향에 따라 기포체적률을 Fig. 5에 도시하였다. 기체체적률은 노즐 주입축을 중심으로 좌우 대칭이며 노즐 출구로부터 축거리가 상승할수록 기체 체적률은 감소하지만 노즐에서 멀어질수록 유동은 비교적 안정적인 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 유량률 변화에 따른 기체체적률의 변화를 보여주고 있다. 유량률이 증가하면 기체체적률이 증가하지만 노즐로부터 축 방향으로 약 60 mm 이상에서는 유량률의 변화에 무관함을 알 수 있다.

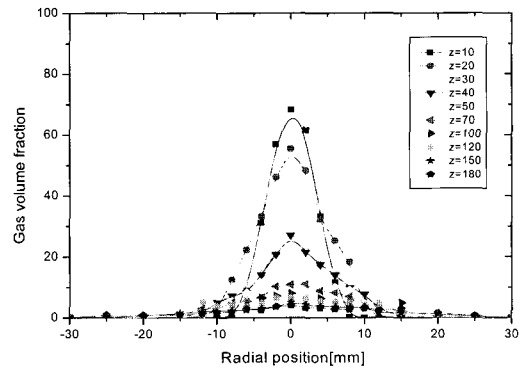


Fig. 5 Radial profiles of the gas volume fraction at different cross-sections $Q = 0.6283 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

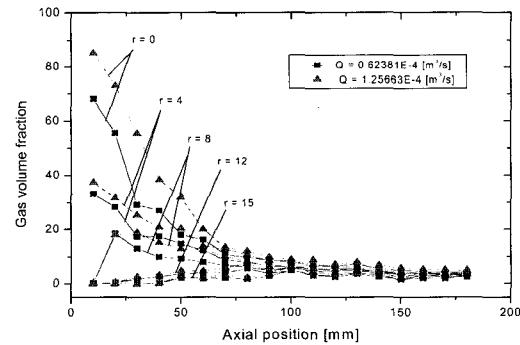


Fig. 6 Axial profiles of the gas volume fraction on vertical plane at differential point for two flow rates.

4.2 기포빈도수(Bubble frequency)

Fig.7에서 기포빈도수는 축방향과 반경방향으로 멀어질수록 드물게 나타났으며 주입 노즐축에 대하여 대칭을 이루었다.

유량률 변화에 따른 기포빈도수의 분포를 알아보고자 두 가지의 유량률 조건에 대한 기포빈도수를 Fig.8에 나타내었다. 유량률이 클수록 빈도수는 크게 나타났으며 기체 체적률과 마찬가지로 축방향으로 약 60 mm 정도에선 유량률에 큰 영향을 받지 않는다. 이것은 기포가 주입구로부터 멀지 않은 곳에서 운동에너지를 상실하고 부력에 의해 비교적 안정적인 운동을 하기 때문이다. 이 영역에서 기포는 붕괴현상이 일어나 작은 기포들이 관찰되었다.

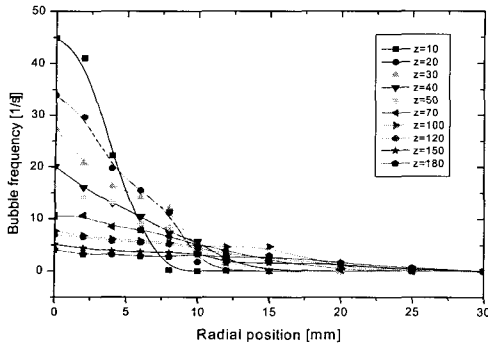


Fig. 7 Radial profiles of the bubble frequency at different cross-sections $Q = 1.2566 \times 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$

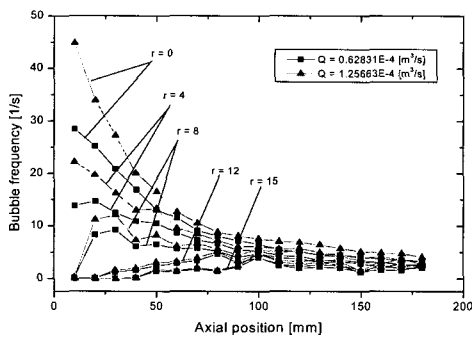


Fig. 8 Axial profiles of the Bubble frequency on vertical plane at differential point for two flow rates.

5. 결론

원통형 용기 내에 물을 채우고 바닥 중앙에서 수직 방향으로 공기를 주입하는 Air-Water 모델에 대한 실험을 수행하여 아래의 결론에 도달하였다.

1. 기체를 수직 방향으로 주입하는 시스템에서 체적률 분포는 주입노즐의 축에 대해 좌우 대칭이었고 원뿔모양의 형상을 이루었다.

2. 기포빈도수는 노즐출구에서 기포가 집중되는 부분이므로 크게 증가하지만 노즐로부터 축 방향 및 반경방향의 거리가 증가함에 따라 감소하는 것을 확인하였다.

3. 기체가 주입될 때 노즐 주입구 부근에서는 기체가 주를 이루는 유동, 즉 기체유동현상을 볼 수 있으며 기포가 운동에너지를 상실하고 부력에 지배를 받는 영역에 도달하면 기포는 팽창력에 의해 기포가 부서지는 기포붕괴현상이 일어나며 크기가 비교적 작은 형태의 기포를 많이 관찰할 수 있었다.

4. 유량률변화에 따른 기체체적률이나 기포빈도수는 유량률을

증가시켰을 경우 증가하지만 노즐 주입구로부터 약 60 mm 이상에서는 유량률변화에 무관하게 비슷한 값을 나타내었다.

기체 주입시스템에 관한 연구는 이상유동이라는 특수성 때문에 많은 연구가 실험에 의존하고 있지만 아직까지는 실험이나 이론에 있어서 미흡한 실정이다. 따라서 다양한 조건에서의 더 많은 실험연구와 기포와 액체간의 물질전달이나 열전달, 난류이론 등 이론적인 연구 또한 병행하여 수행하여야 하겠다.

참고문헌

- [1] Andreine, R. J., Forster, J. S. and Callen R. W., 1977, "Characterization of Gas Bubbles Injected into Molten Metals Under Laminar Flow Conditions," Metallurgical Transactions B, Vol. 8B, pp. 625-631
- [2] Sahai, Y. and Guthrie, R. I. L., 1982, "Hydrodynamics of Gas Stirred Melts: Part I Gas-liquid Coupling," Metallurgical Transaction B, Vol. 13B, pp. 193-202.
- [3] 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
- [4] Castillejos, A. H. and Brimacombe, J. K., 1987a, "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.
- [5] Castillejos, A. H. and Brimacombe, J. K., 1987b, "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.
- [6] Ashman, D.W. and Makelliget, J. W., Brimacombe, J. K. 1981, "Mathematical model of Bubble formation at the tuyeres of a copper Converter. Can. Metall. Q. 20 pp 387-395.
- [7] Hsiao, T. C. and Lehner, T. and Kjellberg, B. 1980. "Fluid flow in ladles-experimental results." Scand. J. Metall. 9, pp 105-110
- [8] Sano, M and Mori, K 1983, " Fluid flow and mixing characteristics in gas-stirred molten metal bath. Trans. Iron Steel Inst. Jpn. 23, pp 169-175
- [9] Xie, Y. K and Orsten, S. 1990, " Fluid flow and bubble size distribution in gas-stirred liquid. Wood's Metal. Proc. 6th Int. iron Steel Congr. Oct. 21-26.
- [10] Tekeli, S. and Maxwell, W.H.C., 1978, "Behaviour of air bubble screens. Tech. Rep. Dept. Civ. Eng., Univ. of Illinois, Urbana.