

# 수직상향 기체주입시 기포거동에 관한 연구

서동표<sup>†</sup> · 오을권<sup>\*</sup>

## A Study on the Bubble Behavior in the Vertical-upward Gas Injection

Dong-Pyo Seo, Yool-Kwon Oh

**Key Words:** Gas volume fraction(기체체적률), Bubble rise velocity(기포상승속도)

### Abstract

In the present study, the gas injection system based on air-water model was designed to investigate the behavior characteristics of bubbles injected into a ladle. The parameters such as gas volume fraction and bubble rise velocity were experimentally measured in a gas-liquid flow region. To measure gas volume fraction, an electro-conductivity probe was used and bubble rise velocity was obtained by a high speed CCD camera. Gas volume fraction was symmetric to the axis of nozzle secured on the bottom of a ladle. The bubble rise velocity was calculated for two different experimental conditions. That is, gas flow conditions were following two case : 1)  $Q = 0.63 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , 2)  $1.26 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . As a gas injected into the liquid ladle, the liquid-phase region is circulated by bubbles' behavior. The bubble rise velocity was influenced of the circulation flow of liquid phase. As a result, the bubble rise velocity was appeared higher middle region of ladle than near the nozzle.

### 1. 서 론

액체상 내에 기체를 주입하여 형성되는 2 상유동에 관한 연구는 야금학이나 화학적 공정에서 흔히 볼 수 있으며 이는 액상영역에 포함되어 있는 불순물을 제거함은 물론 균일한 온도분포와 혼합영역을 형성하여 양질의 제품을 생산하는 데 있다. 이에 다상(multiphase) 유동에서의 물리적인 이해가 필요하고 특히, 기체 주입시스템에 대한 구체적인 연구가 필요하게 되었다.

Oryall 과 Brimacombe<sup>1,2)</sup>는 전기저항 프로브를 이용하여 수은 용기 내에 공기를 수평으로 주입하여 기체체적률과 기포빈도수를 측정하였고 제트가 노즐부근에서 극도로 팽창한다는 것을 발견

하였다.

Andreine<sup>3)</sup> 등은 층류유동 조건하에서 오리피스 부근에서의 기포상승속도를 실험하여 기포가 개개의 속도성분을 가지고 상승하는 것 보다 무리를 지어 훨씬 더 복잡하게 상승한다는 것을 발견하였다.

Kawakami<sup>4)</sup> 등은 이중 전기저항프로브를 이용하여 선철 내에 질소를 주입하여 질소의 상승속도를 측정하였다. 이들의 측정에 의하면 낮은 유량률에서 반경방향에 따라 기체의 속도를 측정하였으며, 기체주입률이 10~20Nℓ/s일 때 주입구 중앙부분에서 기포의 상승 속도가 0.5~3.5m/s의 범위에 있었다.

야금학에서 오랫동안 기체주입시스템이 사용되고 있지만 기체가 주입되어 용기내에서 발생하는 현상들은 매우 복잡하므로 아직까지는 미흡하다. 이상유동에 관한 연구는 대부분이 실험을 통해서 이루어지고 있고 실험을 통한 연구에서도 이상유동의 물리적인 현상을 적절하게 해석하기란 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 기체주입실험에서

<sup>†</sup> 조선대학교 대학원

E-mail : pyo4021@yahoo.co.kr

TEL : (062)230-7010

FAX : (062)232-9218

<sup>\*</sup> 조선대학교 기계공학부

일반적으로 사용하는 작동유체는 물과 공기를 사용하여 기포의 특성을 알아 보았다.

## 2. 실험

본 실험장치를 구성하는 요소로 크게 이상유동이 형성되는 시험부와 시험부 내에 공기를 주입하는 기체 공급시스템으로 구성되어 있다. 시험부 내에서 설정된 값을 제어하기 위한 제어장치 및 데이터 처리장치, 기포의 신호를 받기 위한 센서로 구성되어 있고 기포의 상승속도를 측정하기 위해 고속 CCD카메라를 이용하였다. Fig. 1은 실험장치의 구성요소를 개략적으로 보여주고 있다.

시험부는 2-상 유동이 형성되는 곳으로 높이와 직경이 각각 300mm인 투명 아크릴 용기로 되어 있으며 가시화를 위하여 원통형 용기 외곽에는 같은 재질로 직육면체형태로 설치하였다. 원통형 용기 내에는 작동유체인 물을 높이 200mm까지 채우고 용기 바닥 중앙에 노즐을 설치하여 압축기로부터 공기가 용기 내로 주입되도록 하였다.

노즐은 재질이 스테인레스 스틸로 내경이 1mm 이고 아크릴 용기 바닥에 노즐 주입구와 용기의 바닥이 높이가 같게 설치하였다. 원통형 투명 아크릴의 경우 굴절 현상으로 정확한 유동을 촬영할 수 없기 때문에 원통형 아크릴 바깥부분에 사각의 투명 아크릴을 설치하여 작동유체와 같은 물로 채워 촬영 시 굴절의 영향이 없도록 하였다.

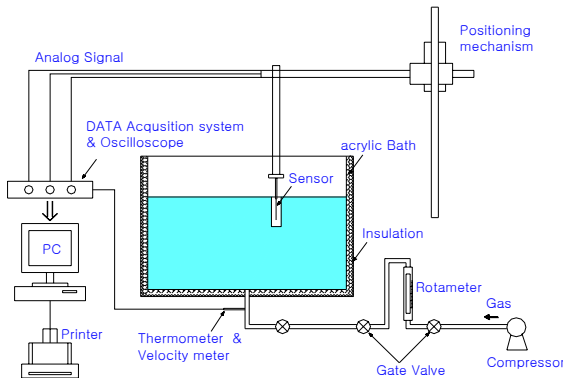


Fig. 1 Schematic of diagram experimental facility

압축기로부터 공급된 공기는 유량조절밸브와 공기압 조정 유닛을 통과하여 솔레노이드 밸브와 노즐을 통해 시험부 내로 주입된다. 압축기 저장

탱크의 압력은 620.5kPa로 유지하도록하고 토출측에 설치되어 있는 압력계를 이용하여 일정한 압력으로 토출되도록 하였다.

시험부 내의 기포의 거동을 살펴보기 위해 전기전도도프로브를 설치하였으며 작동유체에는 5V 상당의 전기를 흐르게 하였다. 프로브는 기포의 전기적신호를 감지하여 오실로스코프를 통해서 디스플레이 되도록 하였으며 파형의 형태로 저장하였다. 실험은 노즐 축방향으로는 공기 주입구로부터 자유표면까지 10mm간격으로 180mm까지 측정을 하였고 반경방향으로는 중심에서 간격을 적절하게 조절(2~5mm)하면서 30mm까지 측정하였다.

기포의 상승속도를 측정하기 위하여 고속 CCD 카메라(XC-HR300)를 이용하였다. CCD카메라는 1초에 55프레임을 촬영되도록 세팅되었으며 프레임간의 균일한 시간간격을 위해서 신호발생기(Function generator)를 이용하여 5[V], 55[Hz]의 신호를 공급하였다. 액상내에서 상승하는 기포의 이미지를 저장할 수 있도록 프로그래밍하였고 저장된 이미지를 분석하여 기포의 상승속도를 구하였다.

Fig. 2는 기포의 속도를 분석하기 위한 모델실험장치의 구성을 보여주고 있다.

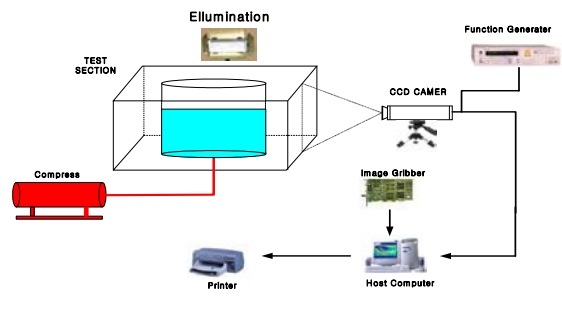


Fig.2 Schematic diagram of experimental facility.

실험은 두가지 조건에서 수행하였으며 Case I 은 유량이  $0.63 \times 10^4$ 이고 Case II는  $1.26 \times 10^4$ 이다. 용기 내에 주입된 기체는 다양한 기포의 형태로 자유표면까지 상승하게 되고 기포의 상승속도는 매우 빠르고 불규칙하기 때문에 순간적인 기포의 거동을 분석하는 것은 쉽지 않다.

따라서 기포의 상승하는 속도를 측정하기 위하여 시험부를 3-부분 즉, 노즐부근과 중간부분 그리고 자유표면부근으로 나누어서 촬영하여 기포

의 국부 순간 상승속도를 촬영하였다. 기포는 상승하면서 후속 기포와 합쳐지기도 또 붕괴하는 현상들이 관찰된다. 이런 경우 기포의 거동에 큰 변화를 줄 뿐 아니라 기포의 형상에도 크게 영향을 미치게 되고 기포의 형상이나 크기에 따라서 액상의 항력의 영향이 다르게 되고 결국 기포의 속도에 변화를 주게된다. 따라서 기포의 속도를 측정하는데는 후속기포의 영향을 받지 않는 단일 기포로 상승하는 기포를 선별하여 속도를 구하였다. Fig. 3 은 Case I 의 조건에서 상승하는 기포를 노즐부근에서 촬영한 것으로 상승하는 기포의 형태를 대표적으로 보여주고 있다.

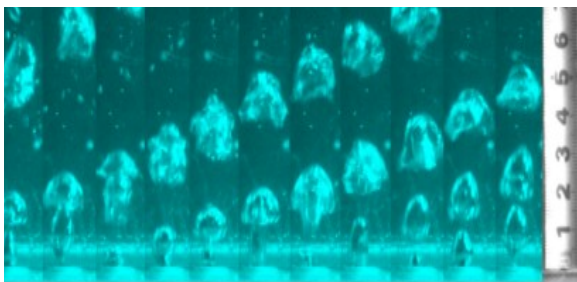


Fig.3 Shape of rising bubbles in Case I .

### 3. 결과 및 고찰

기체 체적률을 알아보기 위해 같은 시간 간격으로 일정시간(80second)동안 반복실험을 하여 기포와 액상의 전기적 신호 차이를 오실로스코프를 이용하여 PC에 저장하였다. 기체체적률은 측정하는 동안에 걸리는 총시간과 기포가 프로브 끝을 접촉하여 통과하는 시간의 비로 정의할 수 있다. 기체체적률은 공기 주입측에 따라서 좌우 대칭이며 Gaussian분포를 나타내고 있다. Fig. 4는 Case II에서 기체체적률을 보여주고 있으며 그림에서 알 수 있듯이 노즐부근에서 기체체적률은 급격하게 감소하고 노즐로부터 멀어질수록 그 감소량이 적어지는 것을 볼 수 있다. 이는 노즐 출구에서는 기체가 제트의 형태를 띠고 노즐로부터 이탈한 기포는 출구부근에서 기포가 집중되어 있고 축방향으로 거리가 증가하면서 기포는 붕괴현상을 보이면서 반경방향으로 확산해 나가기 때문이다. Fig. 5는 노즐로부터 10mm떨어진 부근에서 Case I 과 Case II에서의 기체체적률을 비교한 것이다.

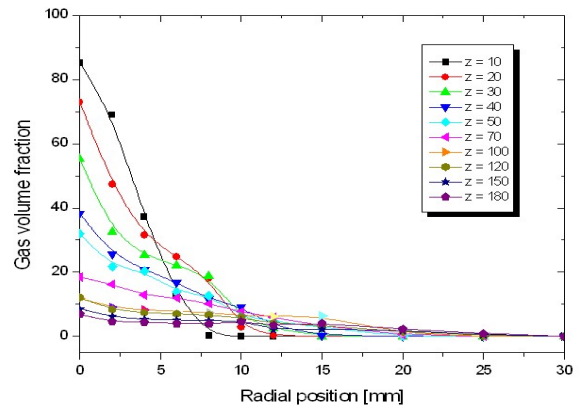


Fig. 4 Radial profiles of the gas volume fraction in Case II

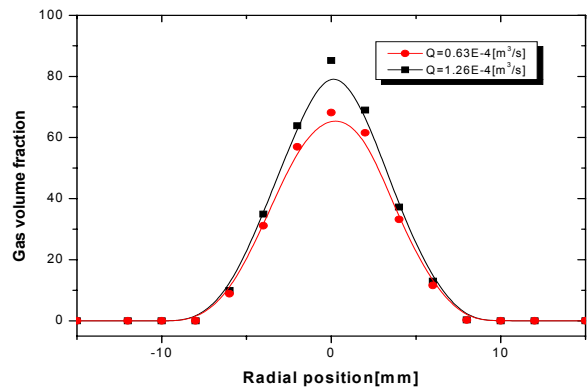
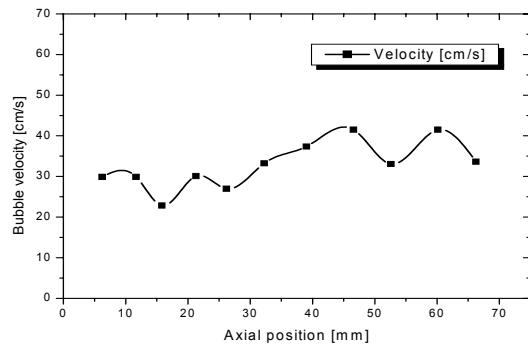
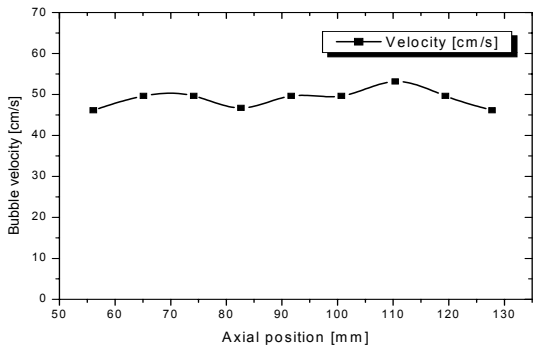


Fig. 5 Gas fraction in vertical plane at z=10mm for two case.

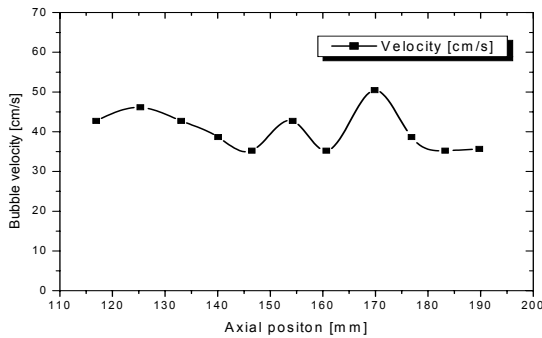
Fig. 6은 Case I에서 기포의 순간 상승속도를 계산한 것을 도시적으로 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 상승속도는 축방향으로 40mm 이상에서부터 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 노즐부근에서는 초기에 가해진 운동에너지에 의해서만 영향을 받는다.



(a) near the nozzle



(b) middle prat

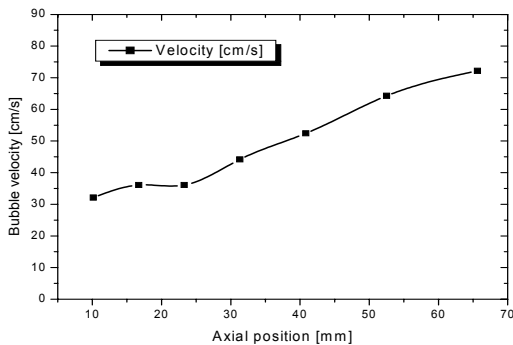


(c) near the surface

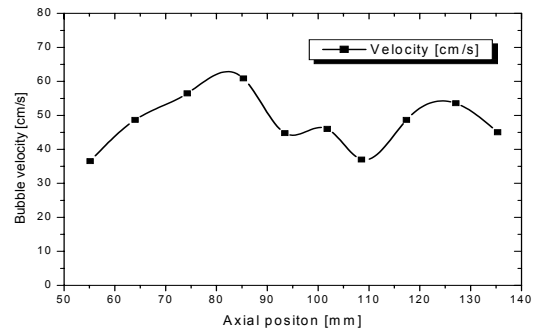
Fig. 6 The bubble rise velocity in the case I .

하지만 그 이상이 되면 운동에너지에 액체의 순환유동의 영향이 가해져서 속도가 증가하는 것으로 이해할 수 있다. 또한 자유표면부근에서 속도가 증감하는 현상은 자유표면에서 형성되는 파도의 영향때문으로 생각할 수 있다. 때문에 자유표면에서 유동은 매우 불규칙적이므로 기포의 거동을 예측하는 것은 매우 어렵다.

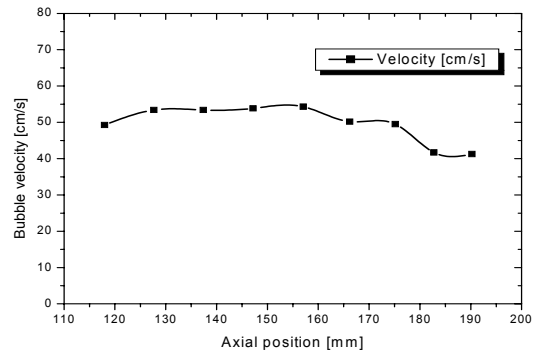
Fig. 7은 Case II에서의 기포의 상승속도를 보여주고 있다.



(a) near the nozzle



(b) middle prat



(c) near the surface

Fig. 7 Bubble rise velocity in the Case II

Fig. 6과 비교해볼 때 경향은 비슷하게 나타나지만 유량이 증가하였을 때 노즐 출구에서의 속도는 크게 다르지 않지만 40mm이후에서 속도가 더 커지는 것을 알 수 있다. 이는 기체의 유량이 증가하면서 액상의 순환이 더 발달하게 되고 때문에 상승 속도기 더 커지는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

액상영역 내에 수직 상향으로 기체를 주입하여 기체의 체적률과 기포의 상승속도에 관한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시험부에서 기체체적률은 주입노즐의 축에 대해 좌우 대칭이었고 Gaussian 분포를 이루었다.
2. 기포의 상승속도는 액상의 순환 유동으로 노즐영역에서 보다 중간영역에서 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Oryall, G. N. and Brimacombe J. K., "The Physical Behavior of Gas Jet Injected Horizontally into Liquid Metal", *Met. Trans, B, Vol. 7B*, pp. 391-403, 1976.
- (2) Andreini, R. J. , Forster, J. S. and Callen R. W., "Characterization of Gas Bubbles Injected into Molten Metals Under Laminar Flow Conditions", *Metallurgical Transactions B, Vol. 8B*, pp, 625-631, 1977.
- (3) Kawakami, M., Kitazawa, Y., Nakamura, T., Miyake, T., and Ito, K., "Dispersion of Bubbles in Molten Iron and the Nitrogen Transfer in the Bubble Dispersion Zone at 1250 °C, " *Trans. ISIJ, Vol. 25*, pp. 394-402, 1985.
- (4) A. H. Castillejos, and J. K. Brimac- ombe, "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.
- (5) K. H. Tacke, and H. G. Schubert, and D. J. Weber and Klaus Schwerdtfeger, " Characteristics of Round Vertical Gas Bubble Jets" *Metallurgical Transactions B, Vol. 16B*, pp. 263-275, 1985