

수직상향 기체 주입에 따른 기포 및 액상의 유동분석

서 동 표, · 오 울 권*
조선대학교 대학원, *조선대학교 기전공학과

Flow Analysis of Bubble and Liquid Phase by Vertical Upward Gas Injection

Dong-Pyo Seo, Yool-Kwon Oh*
Graduate School, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea
*Department of Mechatronics Engineering, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea
(Received April 14, 2003; revision received July 25, 2003)

ABSTRACT: In the present study, a PIV measurement and image processing technique were applied in order to investigate the flow characteristics in the gas injected liquid bath. The circulation of liquid was induced by upward bubble flow. Due to the centrifugal force, the flow was well developed near both wall sides than in the center of a bath. The vortex flow irregularly repeated generation and disappearance which helped to accelerate the mixing process. The bubble rise velocity in the bottom region was relatively lower than in the upper region because the energy generated by bubbles' behavior in the region near the nozzle was almost converted into kinetic energy. But bubble rise velocity increases with the increase of the axial distance since kinetic energy of rising bubbles is added to buoyancy force. In conclusion, the flow increased bubble rise velocity and the flow of the bottom region became more active.

Key words: Two-phase plume(이상기둥), Bubble rise velocity(기포의 상승속도)

1. 서 론

제강산업이나 야금학 공정에서 래들 형상의 용기 내에 기체를 주입하여 액상에 섞여 있는 불순물을 제거하고 균일한 온도장을 형성하는 물론, 화학성분들을 균질하게 하는 것은 제품의 품질향상에 매우 중요하다. 이러한 연구는 기포가 액상 내에서 매우 불규칙적이고 복잡하게 상승하기 때문에 그 특성해석이 쉽지 않다. 따라서 대부분의 연구들이 모델장치를 구성하여 유동특성을 실험을 통해서 규명하고 있다. 기체 주입에 따른 2상 유동의 연구는 시스템에 관한 장치의 설계나 성능향상을 위해서 정확한 이해가 필요하다. 이러

한 진보된 유동해석을 위해 많은 연구자들이 장치를 공기-물 모델에 적용하여 유동특성을 연구하였다.

Castillejos and Brimacombe^(1,2)는 기포의 특성들을 측정하기 위해 전기전도 프로브를 이용하였고, 특히 기포의 상승속도를 측정하기 위해 마이크로컴퓨터와 결합된 2요소 전기전도 프로브를 이용하였다.

Tacke et al.⁽³⁾은 기포의 신호들을 가시적으로 확인할 수 있도록 오실로스코프를 사용하였으며, 연속적으로 발생하는 신호의 지연시간으로부터 기포의 상승속도를 구하는 2위치 신호법(two-state signal method)을 이용하였다.

Johansen et al.^(4,5)은 기-액 이상기둥(two-phase plume) 영역에서 분산현상의 구조와 속도성분의 측정을 위하여 LDV를 사용하였으며, 기체유량이 증가하며 기둥은 넓게 성장하고 중심부에서 속

† Corresponding author

Tel.: +82-62-230-7014; fax: +82-62-230-7014
E-mail address: ygoh@mail.chosun.ac.kr

도가 약간 증가한다는 것을 발견하였다.

기체 주입시스템에 관한 연구는 기체가 주입될 때 기-액 기둥에서 기포의 거동을 추적하는 연구와 액상의 유동구조를 파악하는 연구로 구분할 수 있겠다. 따라서 본 연구에서는 기-액 기둥에서 상승하는 기포의 속도를 측정하기 위해 고속 CCD 카메라를 이용한 영상기법을 이용하였으며 액상의 유동구조를 알아보기 위하여 PIV 시스템을 이용하였다.

2. 실험장치

기체 주입으로 형성된 수직상향 2상 유동현상을 알아보기 위하여 Fig. 1과 같이 두 종류의 실험장치를 구성하였다. 우선, 시험부를 중심으로 기포의 속도를 측정하는 영상시스템 ①과 액상의 유동구조를 분석하기 위한 PIV 시스템 ②를 구분하여 도시하였다.

실험장치에서 시험부는 높이와 직경이 각각 300 mm인 투명 아크릴로 제작하였으며, 가시화를 목적으로 원통형 외곽에 같은 재질로 사각의 아크릴을 설치하였다. 용기 내에는 작동유체인 물을 높이 200 mm까지 채우고 용기 바닥 중앙에 노즐을 설치하여 압축기로부터 공급받은 공기가 액체 내로 주입되도록 하였다. 파이프 내의 공기압을 49 kPa(게이지압)로 일정하게 유지하고, 공기압의

맥동으로 인한 유량변화를 최소화하기 위해 공기압조정유닛을 설치하였다.

PIV 시스템에 대한 실험조건으로 우선 대기의 온도가 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 인 상태에서 실험을 수행하였으며 가시화입자는 입자가 유동장에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 물의 밀도와 거의 비슷한 Nylon 12를 사용하였다. 그리고 조명으로는 아르곤 이온 레이저(LEXEL社 7W)를 시험부의 측면에서 비추도록 설치하였고 레이저의 직진광을 시험부에 단면광으로 형성되도록 LLS 프로브를 이용하였다. PIV 실험에 사용된 고속 카메라(photron-240 pps)는 레이저 조명과 수직으로 설치하고 프레임 속도를 30 fps로 설정하였다.

기포의 상승 속도를 측정하기 위한 고속 CCD 카메라(XC-HR300)는 1초에 55프레임을 촬영되도록 세팅되었으며 프레임간의 균일한 시간간격($\Delta t=18\text{ ms}$)을 위해서 신호발생기(function generator)를 이용하여 5[V], 55[Hz]의 신호를 공급하였다. 액상 내에서 상승하는 기포의 이미지를 저장할 수 있도록 프로그래밍하였고 저장된 이미지를 분석하여 기포의 상승 속도를 구하였다.

기포의 상승 속도를 측정하기 위해 시험부를 노즐부분(노즐 $\sim 70\text{ mm}$), 중간부분(50 $\sim 130\text{ mm}$), 그리고 자유표면부분(110 $\sim 200\text{ mm}$)의 3부분으로 나누어 촬영하여 순간 상승 속도를 구하였다.

PIV 실험과 기포의 상승 속도 실험은 두 가지

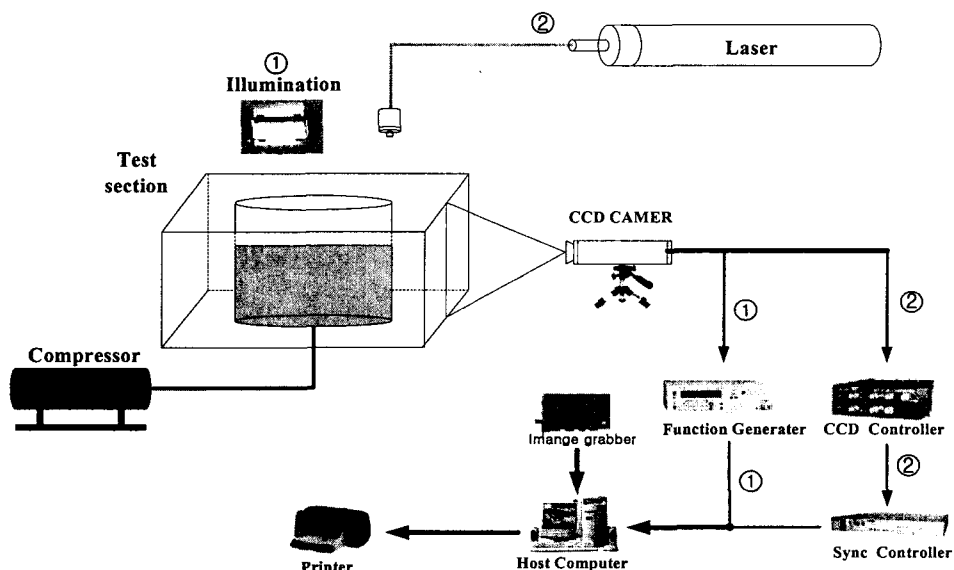


Fig. 1 Schematic diagrams of image processing equipment and PIV system.

의 유량 조건(Case I 과 Case II)에서 수행하였다. Case I 의 경우 유량이 $0.6283 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 이고, Case II 의 경우 유량은 $1.2566 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 기체 주입 노즐은 직경이 1 mm이다.

3. 실험결과 및 고찰

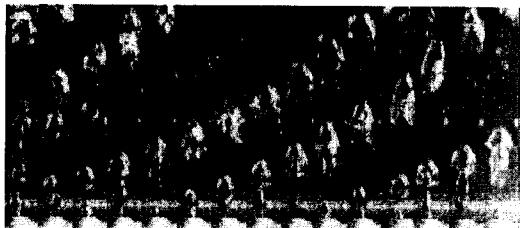
원통형 용기 내에 기체를 주입하여 수직상향 유동하는 기포의 유동과 기포 유동으로 인해 발생하는 액상의 유동구조에 대하여 두 가지의 유량 조건에서 분석하였다.

3.1 Case I 의 경우

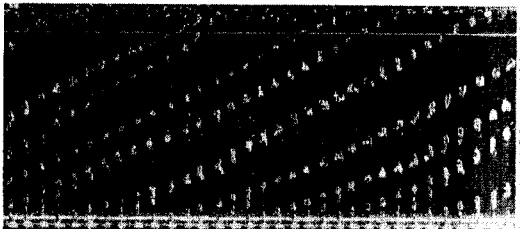
Fig. 2는 Case I 의 경우에 대하여 상승하는 기포의 형상을 보여주고 있다. (a)는 노즐부분에서 상승하는 기포이고, (b)는 시험부 전체에서 촬영된 기포의 이미지이며 중간부분과 자유표면 부근에서도 (a)와 같은 방법으로 촬영하였다.

기포의 상승속도를 분석하기 위해서 기포는 붕괴되지 않고 상승하는 기포를 채택하였으며 후속 기포가 속도에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 노즐로부터 이탈하여 단독으로 상승하는 기포를 선택하였다.

Case I 에 대하여 부분별 평균 속도를 살펴보면



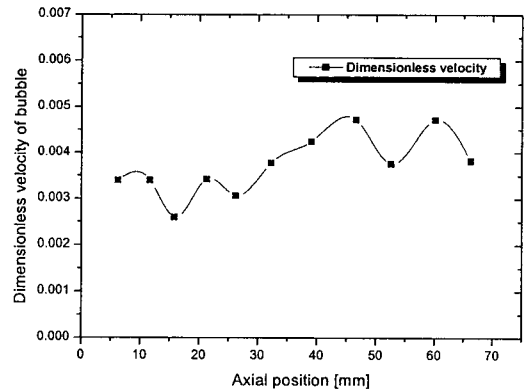
(a) Bubbles at the nozzle



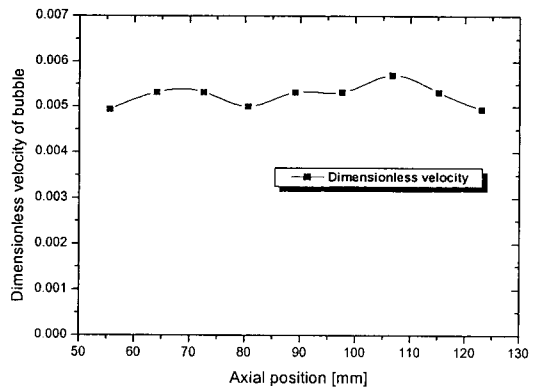
(b) bubbles on the whole

Fig. 2 The bubble rise velocity and their shape in the Case I.

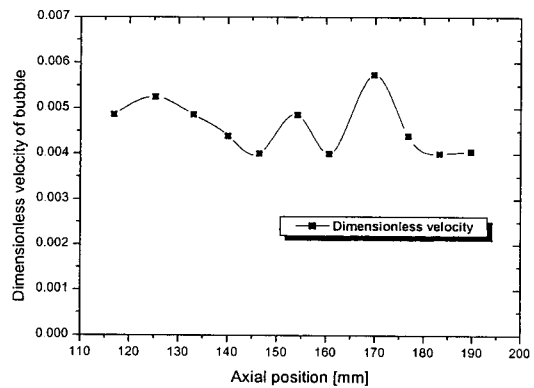
노즐 부근에서 기포의 평균 속도는 32.11 cm/s로 상승하며 중간부분에서는 47.85 cm/s, 자유표면 부근에서는 39.88 cm/s로 나타났다. 그러나 자유표면 부근에서는 자유표면 유동으로 속도변화가 유



(a) A part of nozzle



(b) A part of middle



(c) A part of free surface

Fig. 3 Dimensionless velocity of bubble in the Case I.

동적이었으며 중간부분에서도 그 영향이 미치는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 2의 (b)의 경우 노즐에서부터 자유표면까지의 평균 속도는 33.33 cm/s로 계산할 수 있었다.

Fig. 3은 Case I에서 구간별 기포의 무차원화된 상승 속도를 보여주고 있다. 무차원속도는 기포의 순간 상승 속도를 노즐에서의 기체의 속도의 비로 나타내었다.

노즐을 통과한 기포의 속도분포는 노즐 부근에서는 주로 초기에 주어진 운동에너지에 의해 상승하나 거리가 증가하면서 부력과 액상의 순환으로 액상영역에서 형성된 와류의 영향을 받게 되어 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 (a)에서 순간 상승 속도가 증감하는 부분은 기포의 형상과 관련지을 수 있다. 노즐에서 이탈한 기포는 액상의 항력과 기포 내부에서의 유동으로 인하여 그 형상이 변하게 되며 그 형상에 따라서 액상의 항력이 다르기 때문에 순간 속도는 증감하는 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 3의 (c)의 경우 상승 속도가 증감하는 것은 형상에 기인한 원인도 있겠지만 자유표면 유동 영향이 더 클 것으로 판단된다.

Fig. 4는 Case I의 경우에서 PIV 시스템을 이용한 기포유동으로 인해 발생하는 액상의 유동구조를 보여주고 있다.

그림에서 보듯이 기포의 상향 유동으로 액체상은 노즐 축을 중심으로 외벽 쪽으로 순환을 하게 되고 유동장의 외벽면 가까이에서 와가 발생하는 것을 볼 수 있다.

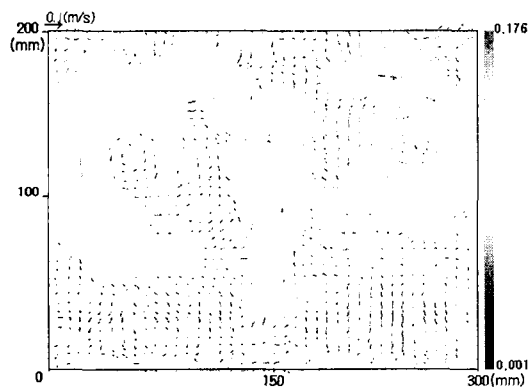


Fig. 4 Velocity vectors of the circulation flow of the liquid phase using PIV system at the case I.

액상에서 순환 속도 분포는 0.1~17.6 cm/s 내에 존재하며 유동장의 상부와 외벽면에서 더 발달한 것을 볼 수 있다. 시험부의 하부에는 유동이 매우 약한 부분이 존재하는데 이것을 “Dead zone”이라 한다.⁽⁶⁾

기포가 상승하는 노즐 축의 가운데 부분을 보면 유동이 휘어지는 것을 볼 수 있다. 이는 기포가 상승하면서 붕괴되고 다시 합체되는 과정에서 수직 상승하는 유동방향에 변화를 주고, 또 액상에서 형성되는 와의 크기에 따라서 영향을 받는 것으로 판단된다.

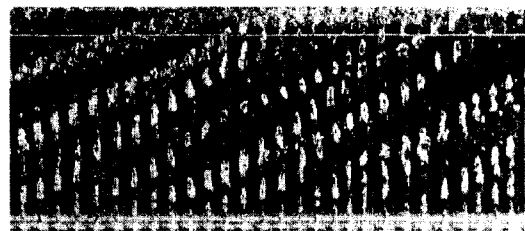
Dead zone은 기포의 상승 유동으로 액체상에 원심력을 발생시키고 이로 인해 상부에서 와가 형성되어 결과적으로 하부에는 유동이 약하게 나타나는 것으로 생각할 수 있다.

3.2 Case II의 경우

Fig. 5는 Case II에서 기포가 상승하는 것을 보여주고 있으며, (a)는 노즐부분에서의 유동으로 42.68 cm/s로 상승하며 중간부분과 자유표면 부근은 약 50 cm/s인 것으로 계산되었으나 이 부분은 자유표면 유동의 영향을 많이 받으므로 속도 값은 유동적이라 할 수 있다.



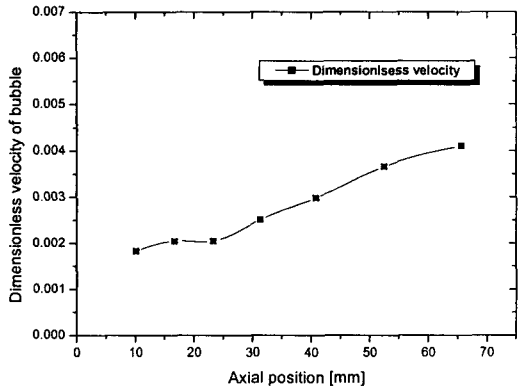
(a) Bubbles at the nozzle



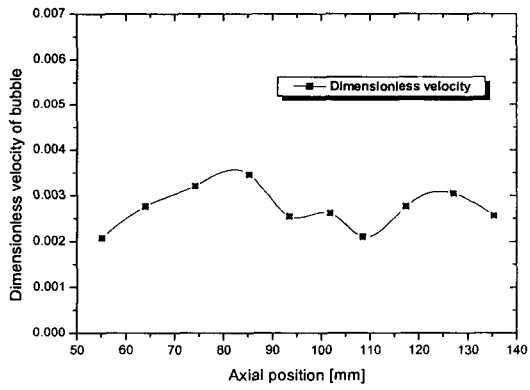
(b) Bubbles on the whole

Fig. 5 The bubble rise velocity and their shape in the Case II.

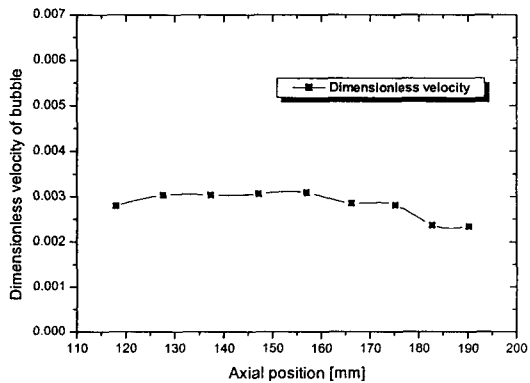
유량을 증가시키게 되면 자유표면 유동은 더욱 거칠어지고 그로 인해 내부의 기포운동은 매우 불규칙적으로 되고 그 값을 예측하는 것은 쉽지



(a) A part of nozzle



(b) A part of middle



(c) A part of free surface

Fig. 6 Dimensionless velocity of bubble in the Case II.

않다. Fig. 5의 (b)는 전구간에 대해서 촬영한 것으로 그 평균 속도는 51.98 cm/s로 계산할 수 있었다.

Fig. 6은 Case II에서 상승 속도를 구간별로 보여주고 있으며, (a)에서 보듯이 노즐 부근 영역에서는 노즐 축방향으로 거리가 증가하면서 부력과 액상에서 형성되는 와의 영향으로 그 속도가 증가하는 것으로 볼 수 있다. 액상 내에 공기가 주입될 때 액상영역에서 형성되는 와는 생성과 변형, 소멸을 반복하면서 액상을 혼합하게 된다. 때문에 와가 생성되어 발달될 때는 기포 속도를 증가시키게 되나 (b)에서의 속도 증감과 (c)의 경우에도 와의 발달과정이 상승 속도에 많은 영향을 미치는 것으로 판단되고 또한 액상의 항력과 자유표면에서의 표면유동의 영향도 있을 것이다.

Fig. 7은 Case II의 조건에서 액상의 순환구조를 보여주고 있다. 액상의 순환구조를 살펴보면 Case I과 마찬가지로 외벽 가까이에서 활발한 와가 형성되어 액상을 혼합하는 것을 볼 수 있다. 액상의 속도분포는 0.4~18.5 cm/s 내에서 순환하고 있으며 유량을 증가시켰더니 Case I의 경우와 비교해 볼 때 Dead zone이 상당부분이 감소한 것을 알 수 있다. 유량을 증가시켰을 경우 액상의 속도 분포범위를 Case I과 비교해 보면 증가는 하였으나 그 차이는 작은 것을 알 수 있다.

기포가 시험부의 중심에서 상승하게 되면 자유표면에서 유동은 반경방향으로 운동을 진행하게 되고 액상에는 원심력이 발생하게 되어 외벽의 영향을 받은 와가 형성된다.

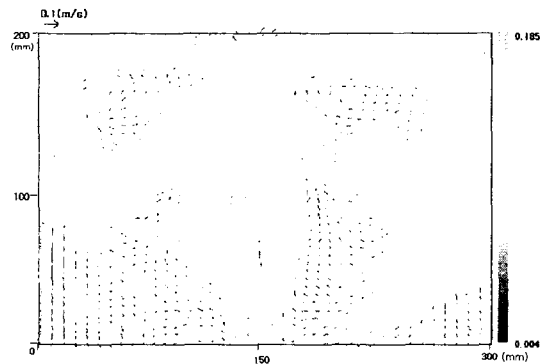


Fig. 7 Velocity vectors of the circulation flow of the liquid phase using PIV system at the Case II.

4. 결 론

기체 주입시스템을 공기-물 시스템에 적용하여 기포의 운동과 액상의 유동구조를 실험하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 노즐 가까이에서 기포는 운동에너지에 의해 상승하나 측방향으로 30 mm 이상에서는 부력과 액상의 관성이 더해져 속도가 증가한다.

(2) 유량을 증가시키면 기포의 평균 상승 속도는 증가하였으나 반면에 자유표면 유동이 거칠어져서 기포의 상승 속도에 영향을 미치게 되므로 기포운동의 예측이 어렵게 된다.

(3) 액상의 유동은 외벽 상부 쪽에서 발달한 와를 볼 수 있으며 이로 인해 액상은 혼합의 역할을 하게 된다. 그러나 시험부의 하단에는 유동이 약한 Dead zone이 형성되었고 유량을 증가시키면 Dead zone이 감소하였다.

(4) 유량이 증가하였을 때 기포의 평균 상승 속도는 증가하였으나 액상의 속도벡터는 큰 차이가 없었다.

참고문헌

1. Castillejos, A. H. and Brimacombe, J. K., 1987, 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.
2. Castillejos, A. H. and Brimacombe, J. K., 1987, 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.
3. Tacke, K. H., Schubert, H. G., Weber, D. J. and Schwerdtfeger, K., 1985, Characteristics of round vertical gas bubble jets, Metallurgical Transactions B, Vol. 16B, pp. 263-275.
4. Johansen, S. T., Robertson, D. G. C., Woje, K. and Engh, T. A., 1988, Fluid dynamics in bubble stirred ladles; Part I. Experiments, Metall. Trans. B. Vol. 19B, pp. 745-754.
5. 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.
6. Choi, C. R. and Kim, C. N., 1988, A simulation on the two-phase flow characteristics in gas bubble driven circulation systems, The Korea Society for Simulation, Vol. 7, pp. 17-30.