

# Air-Water 모델에서 액상의 유동특성에 관한 연구

오을권<sup>†</sup> · 서동표 · 박설현

조선대학교 기전공학과

(2003. 8. 11. 접수 / 2004. 1. 10. 채택)

## A Study on the Flow Characteristics of Liquid Phase in Air-Water Model

Yool-Kwon Oh<sup>†</sup> · Dong-pyo Seo · Seol-Hyun Park

Department of mechatronics Engineering, Chosun University

(Received August 11, 2003 / Accepted January 10, 2004)

**Abstract :** In the present study, the gas injection system based on air-water model was designed to investigate the flow characteristics of liquid phase. A PIV system was applied to analyze the flow pattern in a ladle which gas started to rise upward from the bottom. Gas flow is one of most important factors which could feature a flow pattern in a gas injection system. As the gas injected into the liquid, the kinetic energy of bubble transfer to liquid phase and a strong circulation flow develops in the liquid phase. Such a flow in the liquid develops vortex and improve the mixing process. Due to the centrifugal force, circulation flow was well developed near both wall sides and upper region respectively. Increasing gas flow was helpful to remove dead zone but, weak flow zone still exists in spite of the increasement of gas flow rate.

**Key Words :** PIV, liquid phase, centrifugal force, vortex, dead zone

### 1. 서 론

액상에 기체를 주입하여 불순물을 제거하거나 혼합영역을 균일하게 하는 기체주입시스템이 관심의 대상이 되고 있으나 이상유동의 불규칙적이고 복잡한 특성으로 인하여 대부분 실험에 의존하고 있다.

기체가 주입될 때 노즐에서 보이는 커다란 기포는 유체역학적으로 불안정하기 때문에 노즐에서 가까운 부분에서 작은 기포들로 부서지고 이런 기포들은 계속해서 붕괴되고 합성되는 현상을 보이면서 액상으로 에너지를 전달하여 액상영역에서의 순환 유동이 형성되고 이런 유동은 기포와 인접한 액체와의 어떤 전단운동에 의한 것보다는 기포 개개의 운동에 더 영향을 받는다<sup>1)</sup>.

기체 액체가 혼합되어 상향 유동하는 기-액 기동 영역과 액체가 하향 유동하는 환상영역의 두 가지 영역의 기체교반 용기를 가정하여 노즐 주입구 근처에서 온도와 압력으로 인한 확산일과 기체에서 액체로 전해지는 운동에너지 전달, 액체를 통과하면서 기

포가 한 일로 구분하여 연구하였다. 노즐주입구 근처에서 일어나는 확산일과 운동에너지 전달은 액체의 순환에 큰 영향을 미치지 않는다. 시스템에 입력되는 에너지와 에너지 소산이 같다는 것으로부터 기동에서의 액체의 속도, 환상영역에서의 액체의 속도에너지가 발생하여 혼합이 이루어진다고 보고하였다<sup>2,3)</sup>.

기체주입시스템에 관한 대부분의 연구는 기체가 주입될 때 기체체적률이나 기포빈도수 또는 기포의 상승속도 등 기포의 특성을 분석하는 연구들로 집중되었다. 그러나 기체주입시스템에서 액상영역은 실질적으로 혼합의 역할을 수행하는 부분이기 때문에 액상영역에서의 유동구조에 관한 연구가 필요하다<sup>4)</sup>.

따라서 본 연구에서는 원통형 용기 바닥 중앙에서 공기를 주입하여 아르곤 이온 레이저 조명을 이용한 PIV 시스템을 통하여 액상영역에서의 유동장을 가시화하고 유동구조를 분석하여 실질적인 유동 형상을 규명하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

시험부 내에서 발생하는 실제 유동을 유체역학적

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
ygoh@mail.chosun.ac.kr

으로 분석하기 위해 PIV 실험을 수행하였다. Fig. 1 은 PIV시스템을 개략적으로 나타낸 그림이다.

테스트 섹션인 원통형 용기는 높이와 직경이 300mm인 투명 아크릴로 제작하였으며 가시화를 목적으로 원통형 외곽에 같은 재질인 사각의 아크릴을 설치하였다. 원통형 용기내에는 작동유체인 물을 높이 200mm까지 채우고 용기 바닥 중앙에 노즐을 설치하여 공기를 주입하였다.

실험은 상온 대기압 하에서 수행하였고 시험부 내에 공기가 일정하게 주입되도록 하였다. 유동의 가시화를 위한 산란입자로 물의 밀도와 거의 비슷한 Nylon 12를 시험부 내에 주입하여 가시화 입자로 인한 유동장의 영향이 거의 없도록 하였으며 실험은 입자의 주입 후 유동이 충분히 발달되도록 한 다음 수행하였다. 가시화 입자를 산란시키기 위한 조명으로는 아르곤 이온 레이저(LEXEL-7W)를 사용하였다. 조명은 자유표면의 파동으로 인한 영향을 피하기 위해 시험부 측면에서 수직으로 비추게 하였으며 고속카메라(Photron, 640×240 Pixel)를 가시광 레이저 조명과 수직으로 설치하고 프레임속도를 30~60fps로 촬영하여 고속카메라 컨트롤러의 자체 메모리에 이미지파일을 임시 저장하였다. 레이저 조명의 직진성을 단면광으로 바꾸기 위해 LLS probe가 설치되어 있고 저장된 유동장 연속영상을 이미지보드인 DT-3152Board(Data Translation)가 장착된 컴퓨터와 고속카메라 컨트롤러를 연결하여 이진 원시파일로 변환하여 저장하고 이론속도, 운동에너지 분포를 해석하였다. Table 1은 PIV시스템의 실험조건들을 보여주고 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Table 2는 기체주입에 따른 액상영역의 유동을 가시화하기 위한 조건을 나타내고 있다.

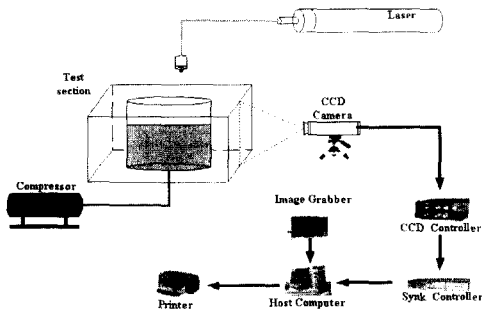


Fig. 1. Schematic diagrams of PIV system

Table 1. Experimental conditions of PIV system

	Item	Specification
Visualization equipment	Light source	Argon-Ion laser
	Sheet light	LLS probe
	Image board	DT3152 (640×480pixel)
	Image Processing	Cactus'2000
Measuring condition	working fluid	Air & water
	Temp.	25°C ± 1
	Particle	nylon 12
	Calculation time	30 frame / sec

Table 2. Injection conditions for the visual studies in air-injected water ladle

	Gas flow [m <sup>3</sup> /s]	Gas velocity [m/s]	Temp. of air
Case I	0.6283×10 <sup>-4</sup>	80.21	22°C
Case II	1.2566×10 <sup>-4</sup>	160.43	22°C
Case III	2.703×10 <sup>-4</sup>	442.2	22°C

Fig. 2는 PIV 실험과 같은 조건에서 일반 수동 카메라를 이용하여 촬영한 것으로 액상의 유동구조의 형상을 알아보았다.

가시화 입자가 유동장내에서 액체의 순환에 따라 유동하고 조명은 시험부의 측면에 설치하여 유동장을 비추게 하였다. 가시화입자는 레이저조명을 받아 산란하고 그 산란된 빛을 카메라 셔터속도 1/8초와 적절한 조리개 값을 가지고 촬영하였다.

Fig. 2에서 액체의 순환영역에서는 와류가 국부적으로 또는 전체적으로 형성되어 있고 외벽 상부에서 발달되어 있는 것을 볼 수 있다.

액상영역에서 발생하는 와류는 국부적인 형태와 유동장 전체에 걸친 와류가 발생, 변형, 소멸되면서 액체영역을 혼잡하고 이런 유동이 불규칙적으로 반복되는 것을 관찰할 수 있었다. 또 액상영역의 하부에는 유동이 약하게 나타나는 부분이 존재한다. 이것을 "Dead zone"이라 한다. 유량을 증가시키면 (b)에서와 같이 Dead zone은 감소하지만 여전히 용기의 바닥에는 유동이 약하게 나타나는 것을 알 수 있다. (c)에서와 같이 유량을 크게 증가시키면 유동장은 더욱더 불규칙적으로 변하게 된다. 유량을 증가시켰을 때 와류의 형태는 국부적인 와류보다는 전체적인 와류가 주를 이루며 유동하는 것을 볼 수 있었다.

PIV 실험은 같은 조건에서 반복 촬영하여 획득한 영상을 평균한 것이다.

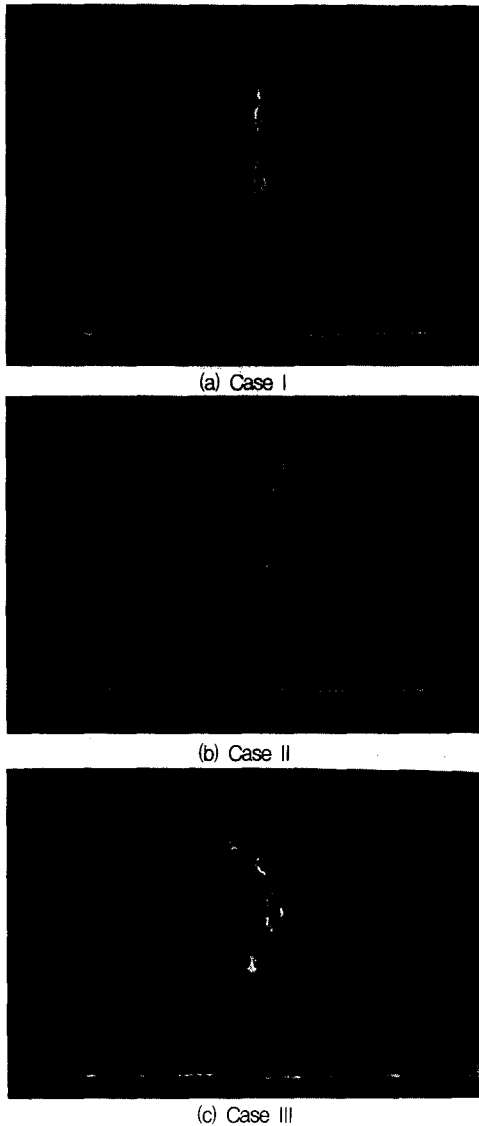


Fig. 2. Analysis on the circulation of liquid using camera technique

Fig. 3의 (a)는 Case I에서의 속도와 유동구조이다. Case I의 유량조건에서 속도는 0.001에서 0.176m/s까지 분포하고 있으며 유동은 상부에서 그리고 외벽 쪽에서 많이 발달함을 보여주고 있다. 이것은 기포 주입으로 인해 노즐 축에서 발생하는 유동을 주유동이라 하면 외벽면 가까이에서는 원심력이 발생하게 되고 주유동이 커질수록 원심력이 크게 작용하여 원심력에 의해 외벽면의 속도가 증가하기 때문이라고 판단된다<sup>7)</sup>.

(b)는 Case II에서의 속도와 유동구조이며 속도는 0.004에서 0.185m/s까지 Case I보다 다소 증가하였다. 기체 유입유량이 증가함에 따라 Dead zone의 영역은 감소한다는 사실을 알 수 있다. (c)는 Case III에서의 유동장으로서 유동속도를 살펴보면 0.001m/s에서 0.257m/s로 분포하고 있으며 Case II와 비교해 볼 때 최저속도 성분은 감소하였다.

Fig. 4는 평균 운동에너지의 분포를 가시적으로 보여주고 있다.

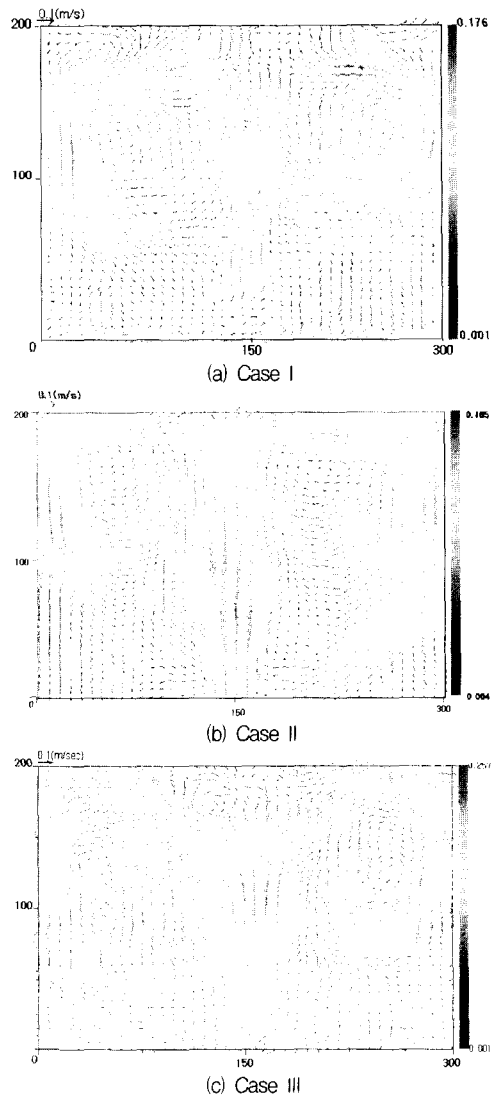


Fig. 3. Velocity vector on the circulation of liquid using PIV system

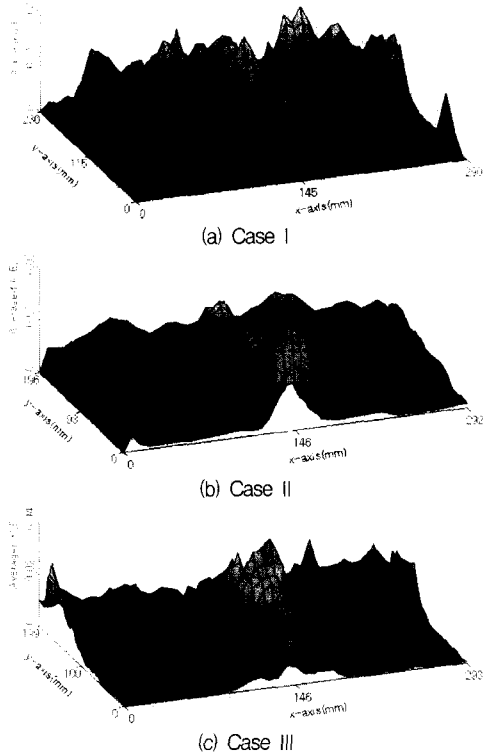


Fig. 4. Averaged kinetic energy on the circulation of liquid using PIV system

Case I의 경우 평균 운동에너지는 최고 0.02까지 분포하고 있으며 Case II 경우는 0.03, Case III의 경우는 0.04로 분포하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 평균운동에너지분포는 기동-자유표면-외벽의 상부에 주로 분포하고 있음을 확인 할 수 있다. 기동과 외벽 사이에는 운동에너지가 작게 나타나는 것을 볼 수 있고 이것은 원심력에 의해 외벽 상부에서 발달한 와류가 소멸되어 가는 부분이기 때문으로 판단된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 앞에서 언급한 PIV 계측을 통하여 획득한 액상영역에서의 속도를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 5는 노즐로부터 기체주입방향으로 25 mm인 곳에서의 속도를 보여주고 있고 이 부분은 유동장의 하부에 속하는 Dead zone에 해당하므로 그 속도가 매우 적은 것을 볼 수 있다.

Fig. 5의 (b)와 (c)의 중앙부분에서는 속도의 크기가 다소 크게 나타나는데 이는 기포가 상승하는 부분으로 기포의 영향의 받은 부분이라 판단된다. (a)의 경우는 기포가 노즐에서 이탈한 후 후속기포가 나오기 직전의 상태에서 촬영된 것이기 때문에 기포의 영향이 적은 부분이라 판단된다.

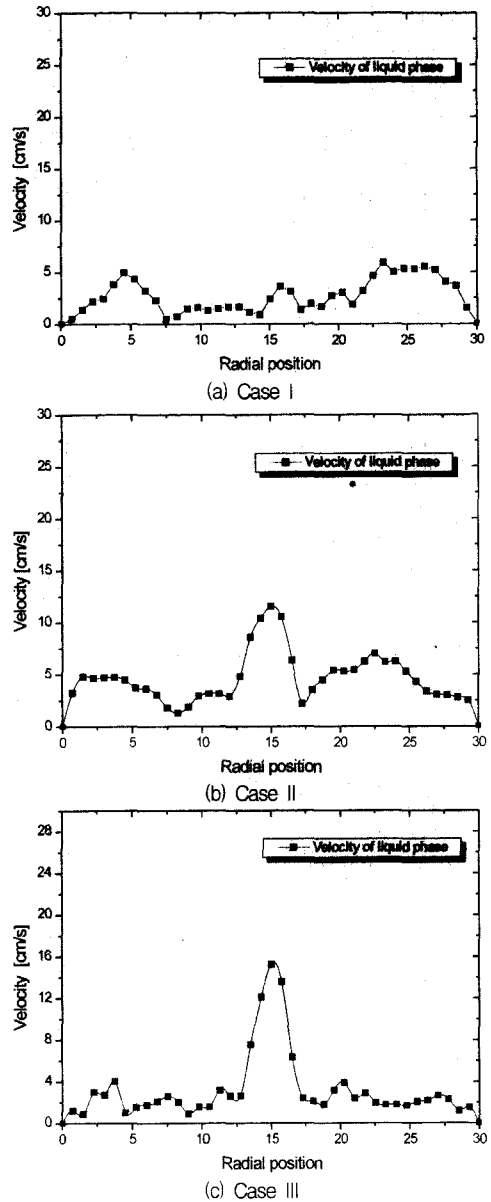


Fig. 5. Velocity of liquid phase at z=25mm

Fig. 6은 노즐로부터 100mm인 곳에서의 속도를 보여주고 있다. Fig. 6의 (a), (b)를 보면 Fig. 5의 (a), (b)와 비교해볼 때 축 방향의 위치가 증가할수록 외벽 쪽에서의 속도성분이 증가하는 것을 확인할 수 있고 특히 외벽 가까운 곳에서 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. (c)의 경우는 기체유량 크기 때문에 가운데 부분 즉 기포가 상승하는 부분에서 속도가 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 부분

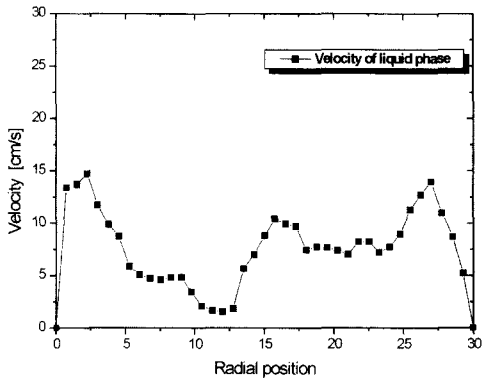
은 외벽상부 유동장에서 원심력이 형성되어 강한 하강류가 형성되어 유동을 발달시킨 것으로 볼 수 있다.

역의 유동을 해석하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

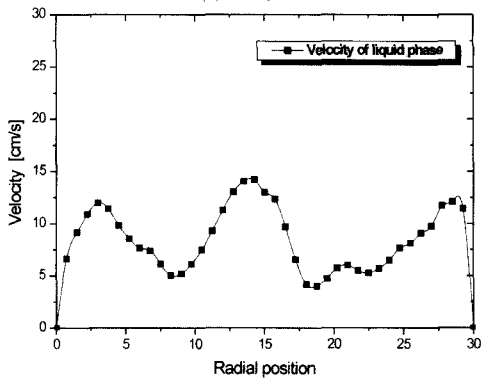
- 1) 액체순환 영역에는 국부적인 와류에서부터 전 유동장에 걸친 와류까지 형성이 되고 이런 와류로 인해서 유동장을 균일하게 혼합하게 된다.
- 2) 액체순환 영역에서는 원심력에 의해 유동이 기둥에서보다 벽 쪽에서 더 발달되고 용기의 하부에서보다 상부에서 더 발달하는 것을 확인하였다.
- 3) 유동장의 하부에는 Dead zone이 존재하고 유량을 증가시키면 감소하였으나 하부에는 여전히 유동이 약한 부분이 형성되었다.

### 참고문헌

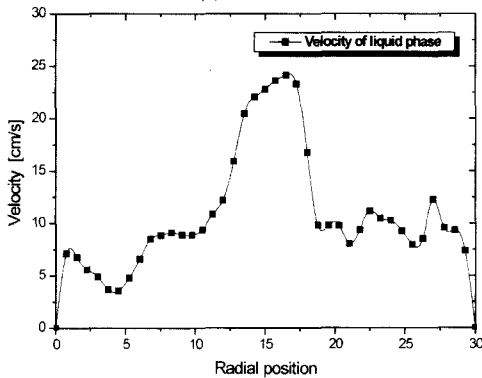
- 1) Sahai, Y. and Guthrie, R. I. L., "Hydro-dynamics of Gas Stirred Melts: Part I Gas-liquid Coupling", Metallurgical Transaction B, Vol. 13.B, pp. 193~202, 1982.
- 2) Sano, M. and Mori, K., "Dynamics of Bubble Swarms in Liquid Metals", Transactions of ISIJ, Vol. 20, pp. 668~674, 1980.
- 3) Sano, M. and Mori, K., "Fluid Flow and Mixing Characteristics in Gas Stirred Molten Metal Bath". Transaction ISIJ, Vol. 23, pp. 169~175, 1983.
- 4) 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.
- 5) H. Turkoglu, "Transport Processes in Gas-Injected Liquid Baths," Ph. D. Thesis, Drexel University, Philadelphia. 1990.
- 6) 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.
- 7) Sohn, H. C., "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. 2000.



(a) Case I



(b) Case II



(c) Case III

Fig. 6. Velocity of liquid phase at z=100mm

### 4. 결 론

물과 공기를 기체주입시스템에 적용하여 액상영