

Time-resolved PIV와 POD기법을 이용한 유량에 따른 단일노즐 버블링 유동 특성에 관한 연구

이승재* · 김종욱* · 김현동* · 김경천†

Characteristics of Bubble-driven Flow with Varying Flow Rates by Using Time-resolved PIV and POD Technique

Seung Jae Yi, Jong Wook Kim, Hyun Dong Kim and Kyung Chun Kim

Abstract. In this paper, the recirculation flow motion and mixing characteristics driven by air bubble flow in a rectangular water tank is studied. The Time-resolved PIV technique is adopted for the quantitative visualization and analysis. 532 nm Diode CW laser is used for illumination and orange fluorescent particle images are acquired by a PCO 10bit high-speed camera. To obtain clean particle images, 545 nm long pass optical filter and an image intensifier are employed and the flow rates of compressed air is changed from 2 l/min to 4 l/min at 0.5 MPa. The recirculation and mixing flow field is further investigated by the POD analysis technique. It is observed that the large scale counterclockwise rotation and main vortex is generated in the upper half depth from the free surface and one quarter width from the sidewall. When the flow rates are increased, the main vortex core is moved to the side and bottom wall direction.

Key Words: Flow Visualization(유동가시화), Time-resolved PIV(시분할 입자영상유속계), Proper Orthogonal Decomposition(적합직교분해), Bubble Mixing(기포혼합)

1. 서 론

전통적인 혼합에서 생체화학, 폴리머, 액체로의 기체분산 등 다양한 형태의 혼합 문제는 화학공학 분야와 산업 분야에서 중요한 이슈가 되고 있다. 혼합 효율은 제품의 품질과 생산성에 직결되는 것으로서, 교반기 내부 재료들 사이에 혼합을 원활하게 하여 반응속도를 높이고, 제품의 균일성을 향상시킨다. 특히 공기 방울을 이용한 혼합방법은 물질과 열전달을 향상시키고, 고온, 고점성의 작업환경에서의 유리한 혼합법이다. 버블링을 이용한 혼합에는 다양한 매개 변수들이 관계하며, 매개 변수간의 관계를 규명하여 혼합 효율을 향상시키기 위해 다양한 방법의 연구가 진행되어 왔다. Snabre⁽¹⁾는 고점성 유체 속에서 기포의 크기와 상승속

도, 점성의 변화, 모세관의 직경의 변화에 의한 영향을 연구하였으며, Tirto⁽²⁾는 물속에서 증기의 유량과 온도 변화가 증기기포의 크기에 중대한 영향을 미치며, 모세관의 직경이 기포의 크기를 결정하는 중요 변수임을 밝혔다. Choi⁽³⁾는 PIV 기법과 PTV 기법을 적용하여 상승 기포와 원형입자의 거동 특성과 이들이 주변 유동장에 미치는 영향을 비교하였으며, Yi⁽⁴⁾는 단일노즐에 대해 Time-resolved PIV측정과 POD해석을 수행하여 수조 내 유동장의 동적 해석을 수행하였다. Montante⁽⁵⁾은 교반기에서 난류이상유동과 버블크기분포를 연구하기 위해 실험과 CFD전산해석을 병행하였다. 그의 Kim⁽⁶⁾과 Tu⁽⁷⁾에 의해 버블에 의한 유동장 특성관련연구가 수행되었다.

본 연구에서는 공기유량이 수조 내 유동 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 단일 노즐의 버블링 시스템에 유량을 변화시키고, 그로 인해 발생하는 유동을 Time-resolved PIV 시스템으로 측정하고, 유동의 동적 구조를 해석, 비교하기 위해 POD 기법을 적용하였다.

† 부산대학교 기계공학부
E-mail : kckim@pusan.ac.kr

*부산대학교 기계공학부

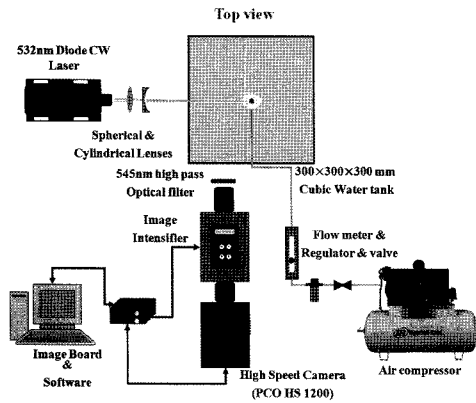


Fig. 1. Experimental apparatus for bubbling mixer.

2. 실험장치 및 방법

2.1 단일 노즐 발생장치구성 및 유동장 측정

Fig. 1과 같이 공기방울에 의한 유동 구조 가시화 및 분석을 위해 2차원 Time-resolved PIV 시스템을 적용하였다. 하단 중심부에 직경 10 mm의 단일노즐 ($D_N = 10$ mm)이 있는 $300 \times 300 \times 300$ mm 크기의 사각 수조에 150 mm 높이의 정제된 물을 채우고, 0.5 Mpa 압력의 2, 3, 4 l/min 유량의 압축공기를 하단부 단일노즐을 통해 유입시켰다. 아크릴 수조의 외벽과 버블에 의한 난반사의 영향을 제거하고, 좀 더 나은 이미지를 얻기 위해 오렌지 빛의 형광입자($D_p = 10 \mu\text{m}$, $\lambda_{ex} = 540$ nm, $\lambda_{em} = 584$ nm)를 사용하였다.

형광입자의 이미지를 획득하기 위해 PCO 10bit highspeed CCD 카메라 (1 Kx1 K)를 사용하였고, 초당 80 frame으로 버블링을 촬영하였다. 532 nm Diode CW 레이저에서 나온 레이저 소스는 구형렌즈와 원통형렌즈에 의해 2 mm 두께의 레이저 평면광으로 만들어진다. 이렇게 만들어진 평면광은 공기방울이 유입되는 노즐의 중심을 조사하고, 이 때 측정장의 크기는 노즐 좌측에 $100 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 인데, 측정장 우측에 상승 버블이 생성되어 이로 인해 반 시계방향의 재순환이 생성된다. 측정장의 상단부는 물의 자유표면과, 좌측면은 탱크 좌측벽과 거의 맞닿아있다. Highspeed CCD 카메라로 측정된 데이터에서 최종 벡터장을 추출하기 위해 자체 개발된 PIV-ACE 프로그램을 사용하였다.

2.2 Proper Orthogonal Decomposition

POD(Proper Orthogonal Decomposition)은 선형 분

해 기법 중의 하나로 최적성(optimality)으로 특징지어진다. 최적성이란 급수의 부분합의 평균제곱오차를 최소화하여 수렴시간을 단축시키는 것을 의미하고, 수학적 표현으로는 2차 평균(quadratic mean)의 관점에서 벡터장 u 를 공간모드 ϕ 로의 정규화 평균 투사(normalized averaged projection)를 최대화하는 공간모드 ϕ 를 선택하는 것을 말하며, 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\text{Max} \left(\frac{\langle u, \phi \rangle^2}{\|\phi\|^2} \right) \quad (1)$$

POD 해석에서 유한한 물리적 공간 x 와 유한한 시간에서 정의되는 벡터함수 u 는 다음과 같은 선형급수로 표현될 수 있다.

$$u(x, t) = \sum_n a^{(n)}(t) \phi^{(n)}(x) \quad (2)$$

여기서 $\phi^{(n)}(x)$ 는 최적 직교 공간 모드(optimal orthogonal spatial modes), $a^{(n)}(t)$ 는 최적 직교 시간 모드(optimal orthogonal temporal modes)이며, n 은 n 번째 모드를 나타낸다. 위에서 말한 최적성을 고유치 문제로 변환하여 해를 구할 수 있다. 가장 큰 고유치를 가지는 경우, 상응하는 고유모드는 가장 지배적인 유동구조를 나타낸다. 기존에 제시된 POD 기법은 상당한 계산량과 계산시간을 필요로 하였으나, Sirovich⁽⁸⁾가 제안한 스냅샷 방법을 이용하면 계산량을 줄일 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 각각의 유량에 따라 생성되는 유동장의 평균속도장을 보여준다. 그림에서 $X=0$ 의 위치는 탱크 좌측 벽면의 위치이고, $Y=0$ 는 바닥벽면의 위치이다. 노즐(우측하단, $X/D_N=15$)에서 발생하는 버블에 의해 전체적으로 반시계방향의 유동장이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 탱크의 중심부($X/D_N=15$) 하단에서는 버블상승으로 유체가 유입(entrainment)되고 있는 현상을 관찰할 수 있으며, 와의 우측면 영역에서 가장 빠른 상승유동이 발생함을 알 수 있다. 각 유량별 평균속도장 (a), (b), (c)를 비교해보면, 평균속도장 내에 존재하는 가장 큰 와의 중심 위치가 이동하는 것을 확인할 수 있다. 유량이 2 l/min인 (a)의 경우, 와의 중심이 $X/$

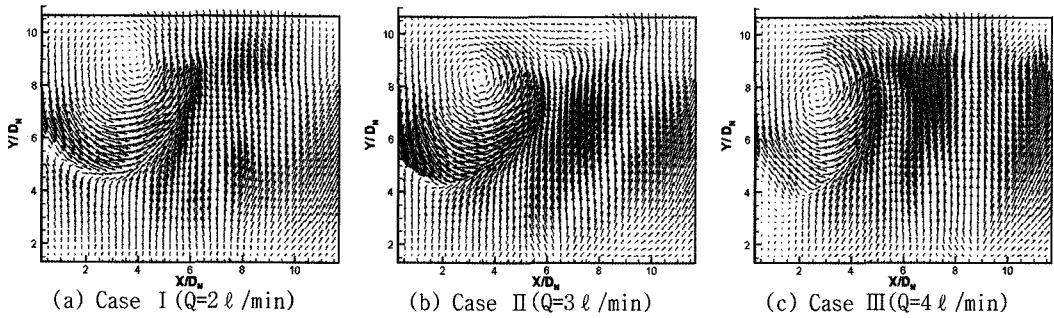
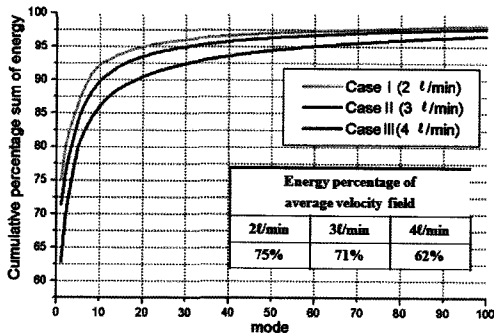
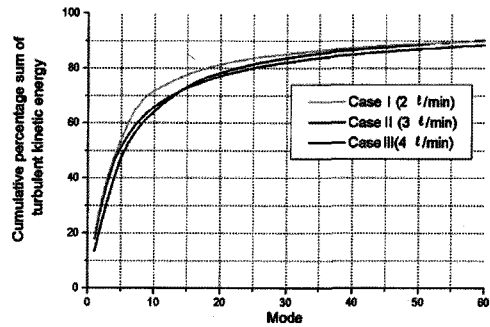


Fig. 2. Mean velocity vector plot for each cases



(a) Cumulative percentage sum of energy



(b) Cumulative percentage sum of turbulent kinetic energy

Fig. 3. Energy distribution of sum of each mode.

$D_N=3.7$, $X/D_N=9.0$ 에 위치한다. 마찬가지로 유량이 3 l/min인 (b)의 경우, 와의 중심은 $X/D_N=3.4$, $X/D_N=8.3$, 4 l/min인 (c)의 경우 $X/D_N=2.7$, $X/D_N=7.7$ 에 와의 중심이 위치하는 것을 볼 수 있다. 이처럼 와의 중심위치는 좌측 하단으로 이동하는 것을 볼 수 있는데, 이는 공기유량이 증가함에 따라 버블의 상승에너지가 증가하여 큰 와의 중심이 이동하는 것으로 판단된다.

Fig. 3의 그래프는 POD 해석으로 얻어진 고유모드들에 따른 누적 에너지의 백분율을 보여준다. Fig. 3의 (a)는 전체 운동 에너지에 대한 POD해석 결과를 보여주며, 첫 번째 고유모드는 각 케이스별 mode1의 고유값(eigenvalue)을 포함하는 수치이지만 평균속도장과의 일치한다. 2 l/min의 경우 평균유동장의 운동에너지가 전체유동장의 75%를 차지하고, 3 l/min은 71%, 4 l/min은 62%의 에너지를 차지하며, 나머지 에너지 비율은 Fig. 3의 (b)와 같은 난류운동에너지로 나타난다. 유량이 증가할수록 난류운동에너지의 비율이 커지

는 것을 확인할 수 있는데, 이는 유량이 증가함으로 인해 생성 버블의 수와 버블의 진동이 증가하여 난류성분이 증가하기 때문이다.

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6은 난류 유동장에 대한 POD 해석을 통해 각각의 케이스별로 얻어진 고유모드를 대표할 수 있는 초기 4개의 공간모드와 시간모드를 보여준다. Fig. 4는 유량이 2 l/min 일 때의 초기 고유모드들을 보여주는데, (a)는 첫 번째 공간모드로 가장 큰 난류에너지를 포함하고 있다. (a)와 (b)의 공간모드를 살펴보면 우측의 상승버블에 의한 유동현상을 확인할 수 있고, 측정장에 부분적으로 와들이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 와들은 Fig. 2에서는 볼 수 없었던 것으로, 실제 유동장은 이러한 와들이 평균유동장에 영향을 끼친 형태로 나타난다. 그리고 (c), (d)와 같이 세, 네 번째 공간모드로 갈수록 와가 분화되어 작은 와들이 많아지는 것을 확인할 수 있다. (c)와 (d)는 (a), (b)에 비해 전체 유동장에 미치는 영향이 적지만, 와의 분화에 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. Fig. 5는

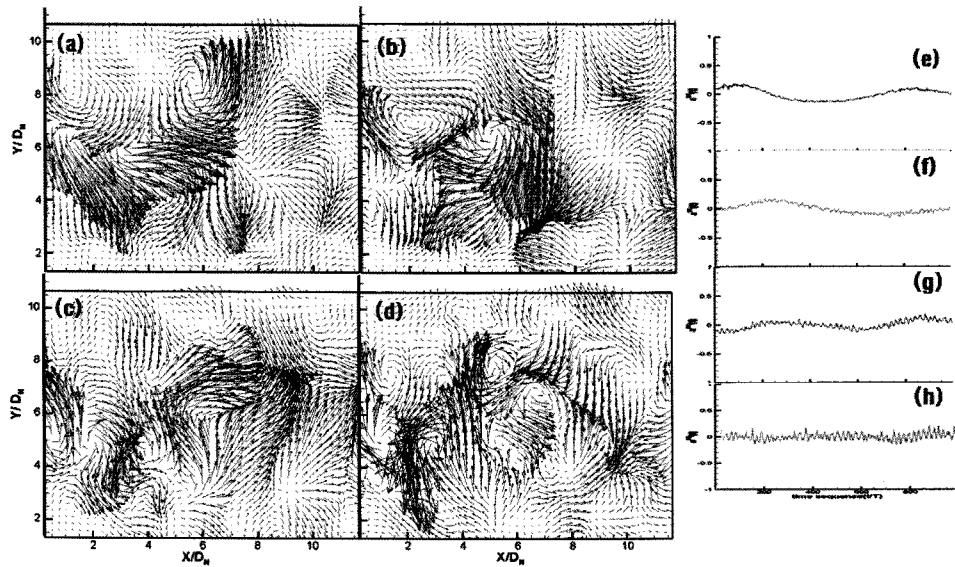


Fig. 4. Velocity vector plots of eigen modes at $Q=2$ l/min; (a) 1st spatial mode, (b) 2nd spatial mode, (c) 3rd spatial mode, (d) 4th spatial mode, (e) 1st temporal mode, (f) 2nd temporal mode, (g) 3rd temporal mode, (h) 4th temporal mode

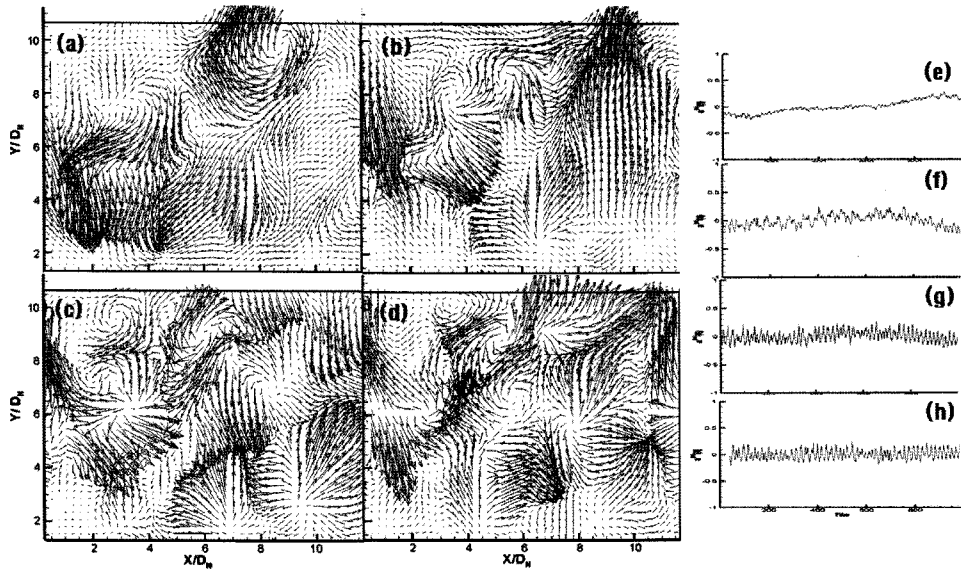


Fig. 5. Velocity vector plots of eigen modes at $Q=3$ l/min; (a) 1st spatial mode, (b) 2nd spatial mode, (c) 3rd spatial mode, (d) 4th spatial mode, (e) 1st temporal mode, (f) 2nd temporal mode, (g) 3rd temporal mode, (h) 4th temporal mode

유량이 3 l/min 일 때의 초기 고유모드들을 보여주는데, Fig. 4에 비해 우측 상승버블에 의한 유동현상과 상단 자유표면에서 큰 와가 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

이는 유량이 증가함에 따라 버블 상승속도가 빨라지

고, 버블의 진동이 커져서 난류 성분이 증가하였기 때문이다. 또한 버블의 상승에너지 증가는 상부 자유표면의 진동을 증가시켜, Fig. 5의 (a), (b)에서와 같이 상부에 강한 상승유동과 와의 생성을 발생시킨다. Fig. 6

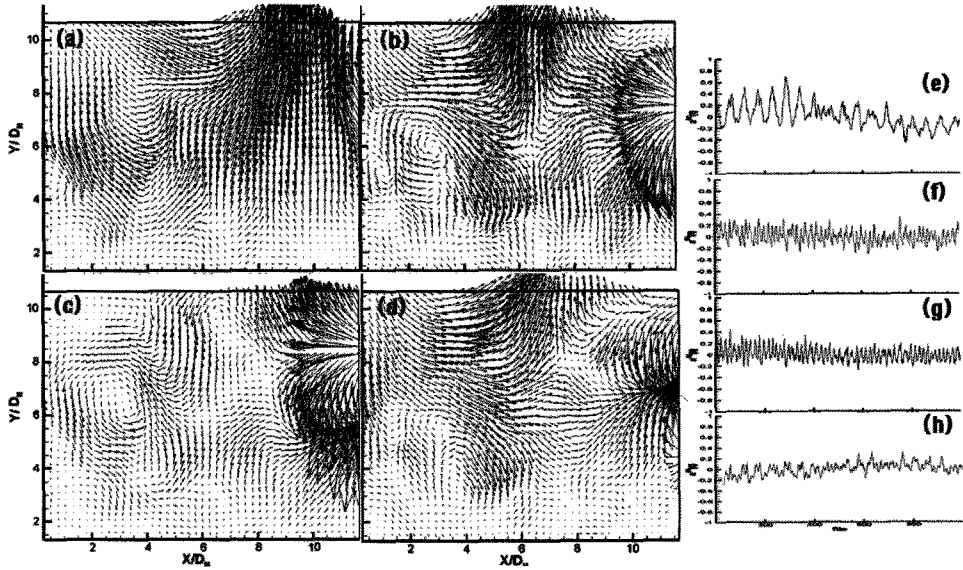


Fig. 6. Velocity vector plots of eigen modes at $Q=4$ l/min; (a) 1st spatial mode, (b) 2nd spatial mode, (c) 3rd spatial mode, (d) 4th spatial mode, (e) 1st temporal mode, (f) 2nd temporal mode, (g) 3rd temporal mode, (h) 4th temporal mode

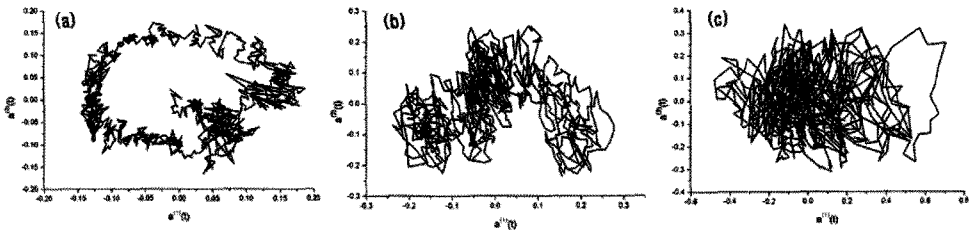


Fig. 7. Phase space projection of 1st temporal mode and 2nd temporal mode; (a) $Q=2$ l/min, (b) $Q=3$ l/min, (c) $Q=4$ l/min

은 유량이 4 l/min 일 때의 초기 고유모드들을 보여주는데, Fig. 4와 Fig. 5에 비해 단순한 형태의 공간모드를 보여준다. (a), (b), (c), (d) 모두 우측 버블 상승 영역과 상단 자유표면에서 큰 유동을 보여주었고, 상대적으로 축경장 내부에서의 와의 생성과 분화는 크게 보이지 않는다. 이는 버블의 상승에 의한 상류효과가 너무 커서, 상대적으로 내부에서의 변화는 작게 보이는 것이다. 각각의 공간모드에 따른 시간모드(e-h)는 공간모드가 시간에 따라 어떻게 영향을 주는지 보여준다. 유량이 증가할수록 시간모드의 자체진동이 커지는 것을 볼 수 있는데, 이는 유량의 변화로 인해 버블의 생성시간이 짧아지고, 상승속도가 증가하여 버블자체의 진동이 증가하기 때문이다. 유량에 따른 공간모드와

시간모드의 영향을 정리해보면, 유량이 적을수록 공간모드의 기하학적 복잡성은 크나 시간모드에 따른 에너지 변동은 적고, 반대로 유량이 증가할수록 공간모드의 기하학적 복잡성은 단순하나 시간모드에 따른 에너지 변동이 큰 것을 확인할 수 있다.

Yi⁽⁴⁾의 연구에 따르면, 가장 큰 영향력이 큰 첫 번째, 두 번째 모드의 위상은 180°정도 차이가 나는 조화함수 형태를 지닌다고 하였다. 여기서 2 l/min의 첫 번째, 두 번째 시간모드의 위상이 180°정도 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 3 l/min과 4 l/min의 경우 첫 번째, 두 번째 시간모드의 위상차는 명확히 확인되지 않았다. 이를 비교해보기 위해 Fig. 7에 세가지 경우의 첫 번째, 두 번째 시간모드의 관계를 나타내었다.

(a)의 경우 원형의 조화함수 형태를 보여주었고, (b)의 경우 반원형, (c)는 한 점의 형태를 보여주었다. 3 l/min와 4 l/min은 2 l/min의 조화함수 형태와는 다른 형태의 상관관계를 보여주며, 이는 유량증가에 의한 버블수와 버블진동의 증가로 난류성분이 증가한 것이 반영되었기 때문으로, 두 경우의 시간모드 상관관계를 알아보기 위해서는 적절한 frame rate의 조정이 필요하다.

4. 결 론

유량에 따른 수조 내 유동 특성을 알아보기 위해 하단 중심에 노즐이 위치한 300 mm×300 mm 크기의 사각 수조를 이용하였고, 유량을 2 l/min, 3 l/min, 4 l/min로 변화시켜 Time-resolved PIV로 정량적 가시화를 하였다. 이렇게 얻어진 유동장 데이터에 POD 기법을 적용하여 유량에 따라 달라지는 수조 내 유동장의 동적 구조 해석을 하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

세 경우 모두 측정장의 우측하단에서 발생하는 버블에 의해 반시계방향의 유동장이 나타났으며, 좌측상단에 큰 와가 형성되었다. 유량이 증가할수록 버블의 상승에너지가 커져, 큰 와의 중심이 좌측하단으로 이동하는 것을 확인하였다.

POD 해석으로 얻어진 평균속도장은 2 l/min의 유량에선 전체 에너지의 75%를, 3 l/min의 유량에선 71%, 4 l/min의 유량에선 62%의 비율을 차지하는 것을 확인할 수 있었고, 평균속도장의 에너지 비율이 유량이 증가할수록 감소하는 이유는 생성 버블의 수와 자체진동이 늘어나면서 난류성분이 증가하였기 때문이다.

유량의 증가로 인해 버블의 생성시간이 짧아지고, 상승 진동이 증가하여 시간모드의 자체 진동이 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 2 l/min의 첫 번째, 두 번째 시간모드는 조화함수의 형태를 지닌다.

후 기

이 논문은 2008년도 2단계 두뇌한국(BK)21 사업과

한국과학재단 특정기초연구 (R01-2006-000 -10742-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- 1) Snabre, P., and Magnifotcham, F., 1998, "Formation and Rise of a Bubble Stream in a Viscous Liquid", *Eur. Phys. J. B.*, Vol. 4, pp. 369-377.
- 2) Tirta, P., Koichi, T., and Hideki, T., 2001, "Effect of Operating Conditions on Two-Phase Bubble Formation Behavior at Single Nozzle Submerged in Water", *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 34, No. 2, pp. 114-120.
- 3) Choi, H. M., Kurihara, T., Monji, H., and Matsui, G., 2002, "Measurement of Particle/Bubble Motion and Turbulence around It by Hybrid PIV", *Flow Meas. Inst.*, Vol. 12, pp. 421-428.
- 4) S. J. Yi, J. W. Kim, H. D. Kim, K. C. Kim, 2008, "Characteristics of Bubble-driven Flow by Using Time-resolved PIV and POD Technique", *The Korea Society of Visualization*, Vol. 6, No. 1, pp.41~46.
- 5) Montante, G, Horn, D., Paglianti, A., 2008, "Gas-liquid flow and bubble size distribution in stirred tanks", *Chemical engineering science*, Vol 63, No. 8, pp.2107-2118.
- 6) Kim, K. C., Min, Y. U., Oh, S. J., An, N. H., Seoudi, B., Chun, H. H., Lee, I., 2007, "Time-Resolved PIV Investigation on the Unsteadiness of a Low Reynolds Number Confined Impinging Jet", *Journal of visualization*, Vol. 10, No.4 , pp.367-380.
- 7) Tu, X., Trägårdh, C., 2002, "Methodology development for the analysis of velocity particle image velocimetry images of turbulent, bubbly gas-liquid flows", *Measurement Science & Technology*, Vol. 13, No.7, pp.1079-1086.
- 8) Sirovich, L., 1987, "Turbulence and The Dynamics of Coherent Structures PART I : Coherent Structures", *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 45, pp.561-571.