

사각탱크 내부의 기포구동유동에 대한 동특성 연구

김상문* · 이승재* · 김현동* · 김종욱* · 김정천†

Dynamic Analysis of Bubble-Driven Liquid Flows in a Rectangular Tank

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

Abstract. An experimental study to evaluate dynamic structures of flow and turbulence characteristics in bubble-driven liquid flow in a rectangular tank with a varying flow rate of compressed air is conducted. Liquid flow fields are measured by time-resolved particle image velocimetry (PIV) with fluorescent tracer particles to eliminate diffused reflections, and by an image intensifier to acquire enhanced clean particle images. Instantaneous vector fields are investigated by using the two frame cross-correlation function and bad vectors are eliminated by magnitude difference technique. By proper orthogonal decomposition (POD) analysis, the energy distributions of spatial and temporal modes are acquired. When Reynolds number increases, bubble-induced turbulent motion becomes dominant rather than the recirculating flow near the side wall. The total kinetic energy transferred to the liquid from the rising bubbles shows a nonlinear relation regarding the energy input because of the interaction between bubbles and free surface.

Key Words: Bubble-driven flow(기포구동 유동), Time-resolved PIV(시간분해 입자영상유속계), POD(적합직교분해), Recirculation flow(재순환 유동)

1. 서 론

Bubble-driven flow(기포구동 유동)은 방사성 폐기물 처리, 생화학 반응기, 제강산업등 여러 산업공정에서 널리 이용되며, 화공학분야의 적용에서, 분말살포, 고체 혼합, 액체내로의 가스혼합과 같은 공정들은 아주 흔하지만, 생산되는 제품의 품질과 생산성이 혼합과정에 의해 크게 좌우되기 때문에 매우 중요한 문제들이다⁽¹⁻³⁾. 이러한 기본적인 유동 현상의 광범위한 응용에도 불구하고, 이와 같은 시스템들의 설계는 주로 경험적인 기법들과 시행착오에 기초하고 있다. 따라서 질량, 운동량, 그리고 에너지 전달의 정확한 고찰이 여러 분야의 산업공정의 설계를 개선하고 최적화시키는 데 필수적이다. 그러나, 기포의 합체, 분리, 분산 등과 함께 동반되는 난류, 3차원, 2상유동과 같은 유체 역학적 복잡성 때문에 종합적인 모델링 과정을 고안하

고 설계기준을 확립하기가 어려운데, 이와 관련한 난류 기포유동연구에는 두 가지 주 관심사가 있다. 첫째는 기포에 의한 난류구조의 변화이고 둘째는 기포에 의해 구동되는 액체 유동에 의한 난류 혼합현상이다. 난류구조 변형에 대한 이전의 연구들은 분산되는 기포들이 액체상의 난류유동에너지를 증가시키거나 감소시킬 수도 있다는 것을 보였다^(4,5). Fujiwara⁽⁶⁾는 PIV/LIF, Projecting shadow image 기법을 이용하여 분산되는 기포가 주입되는 수직 관내유동에 대한 실험적 연구를 수행하였고, 벽근처의 높은 기포 분포는 액상의 변동속도크기의 감소를 야기하는 것을 발견하였다. 그렇다 하더라도, 기포에 의해 영향을 받는 외력은 난류 에너지 생성에 기여하는 것으로 생각된다.

버블링메커니즘과 이에 의해 유도되는 혼합과정은 아주 광범위한 다상유동 시스템에서 발생한다. 많은 기포주입으로부터 발생하는 난류는 그 유동내의 열전달이나 물질전달의 특성을 변경시키는데, 지금까지는 기포구동에 의한 난류유동에 대한 연구가 실험적이든 수치적이든 별로 활발히 연구되지 않았다. Durst^(7,8)는 LDV를 이용하여 기포의 거동과 액체 순환 유동을 측

†부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

*부산대학교 대학원 기계공학부

정하여 기포구동 층류유동에 대한 실험적 연구를 수행하였고, 액상의 순환 형태가 보이드올의 실제 형태에 민감하지 않음을 관찰하였고, Johansen⁽⁹⁾은 액상의 측방향, 반경방향의 평균속도와 변동성분을 측정하기 위해 LDV로 기포에 의해 교반되는 레들(Ladle)에서의 유동을 연구하였다. 최근에, Montante⁽¹⁰⁾는 2 Phase PIV기법과 경계기준(threshold criterion)에 기초한 디지털 영상처리기법을 사용하여 공기가 공급되는 교반 탱크내의 기포 크기분포와 난류 기체-액체유동을 측정하였지만, 실험이 순전히 기포에 의해 유도되는 유동이라기보다 탱크내에서 Rushton 터빈에 의한 유동이 었다. Yi⁽¹¹⁻¹²⁾는 사각탱크 중심에 위치한 단일 노즐에서 발생하는 상승 버블에 의해 생성되는 혼합 유동장을 Time-resolved PIV기법을 이용하여 정량적으로 가시화하였다. 그리고, 유량변화에 따른 유동특성을 비교하여 유량이 증가될수록 난류에너지가 증가되어 평균속도장의 운동에너지가 감소하는 것을 확인하였다.

그러나 기포구동 혼합유동에 대한 상세한 실험결과와 부족 때문에, 적절한 시간분해능과 공간분해능에 따른 정확한 유동장 데이터가 요구된다. 기포구동 난류 액체유동에서의 혼합특성은 유동장의 큰 규모의 운동에 의해 강하게 지배되기 때문에, 혼합메커니즘을 이해하기 위해서는 큰 규모의 동역학적인 분석이 요구된다. 이에 본 연구에서는 Time-resolved PIV기법과 POD기법을 이용하여 사각탱크내 기포구동 액체유동의 전체 유동장을 측정하였고 큰 규모의 동적 구조와 난류특성을 분석하였다. 지금까지 대부분의 기포구동 액체유동은 축소대수 구조에서 연구되어 왔지만, 본 연구에서는 시간 분해 PIV기법에 의한 동적 유동구조를 파악하는 것이 주 목적이며, 더욱 정밀한 정량적 가시화가 요구된다. 따라서 더욱 깨끗하고 왜곡없는 영상을 획득하기 위하여 사각수조가 채택되었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 유동장 측정

Fig. 1에 보여지듯이, 투명한 아크릴판으로 제작된 수조에 필터를 거친 정제수를 자유표면의 높이가 바닥면으로부터 0.15 m 되도록 채웠다. 구경, D_N 이 5 mm인 노즐이 바닥면 중앙에 놓였고, 노즐 출구의 높이는 바닥면으로부터 42 mm이다. 압축공기는 레귤레이터와 유량계를 거쳐서 공급되고, 유량은 2 L/min에서 4 L/min까

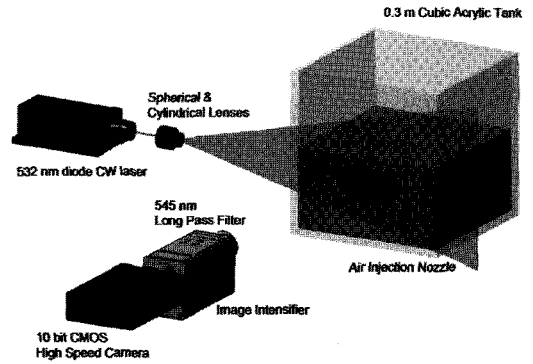


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

지 공급되도록 유량계를 이용하여 조절하였다.

기포와 노즐로부터 반사되는 산란광을 감소시키기 위해, 형광입자(Dantec Dynamics, $D_p = 10 \mu\text{m}$, $\lambda_{\text{ex}} = 550 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{em}} = 590 \text{ nm}$)를 사용하였다. 532 nm 다이오드 CW 레이저로부터 생성되는 직경 5 mm의 조사광이 구형렌즈와 원통형렌즈를 거쳐 2 mm 두께의 레이저 평면광으로 변하여 투명한 측벽을 통하여 측정면에 조사되도록 하였고, 10 비트 고속CMOS카메라(PCO, pco.1200 hs, 1280×1024픽셀)를 사용하여 영상들을 기록하였다. 산란되는 반사광을 제거하기 위해 545 nm의 롱패스 광학필터를 카메라 렌즈앞에 장착하였다. 그러나 광학필터의 사용과 짧은 노출시간으로 인하여 획득되는 입자영상은 매우 어둡기 때문에, 향상된 깨끗한 입자영상을 얻기 위해 영상강화장치(Invisible Vision Ltd., uvi 507)를 고속카메라와 렌즈사이에 장착하였다.

본 연구에 채택된 측정영역과 좌표계가 Fig. 2에 나와있다. 측정면의 크기는 120 mm×100 mm이며, 광학적인 교란을 피하기 위해 진동하는 자유표면 아래와

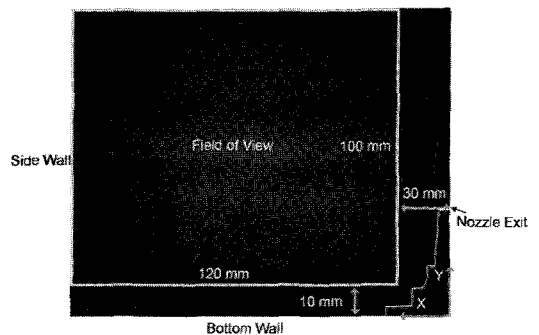


Fig. 2. Coordinate system and field-of-view of the measurement section.

기포 유동의 측면에서 기포구동 액체유동의 전체 영역이 포함될 수 있도록 선택되었다. 전형적인 이차원 시간분할 PIV 시스템을 채택하였고, 각 실험 경우에 대해 1,000장의 영상을 획득하고 분석하였다. 각 영상간의 시간간격은 12.5 ms(80 fps)이고, 순차적인 영상들은 two frame cross-correlation 기법으로 분석되었다. 조사창의 크기는 48×48픽셀이며, 조사창 오버랩은 50% 이다. 계산된 원본 벡터는 validation과정을 거치는데, 본 연구에서는 주변 벡터와 magnitude difference가 80%이상인 경우를 bad 벡터로 처리하였고, 3×3 Gaussian 함수로 삭제된 bad 벡터를 보간하였다.

2.2 Proper Orthogonal Decomposition

유동장의 동적 정보는 POD기법에 의해 효과적으로 설명될 수 있는데, POD기법으로부터 상대적인 에너지 분포가 획득된다. POD기법을 사용하면, 유동장은 최적의 직교 공간모드와 최적의 직교 시간모드로 분해될 수 있다.

$$u(x, t) = \sum_n a^{(n)}(t)\phi^{(n)}(x) \quad (1)$$

최적성(optimality)란 POD가 전개식의 어떤 부분합의 평균제곱오차를 최소화하는 것을 의미한다. 반대로 말하면, POD에 의해 얻어지는 기수항들의 전개식이 Fourier 분해와 같은 다른 원리에 의한 전개식보다 더 빨리 수렴한다. 공간모드 $\phi^{(n)}(x)$ 는 다음의 적분방정식을 풀어서 얻어진다.

$$\int R(x, x')\phi^{(n)}(x')dx = \lambda^{(n)}\phi^{(n)}(x) \quad (2)$$

여기서, λ 는 고유치(eigenvalue)이고, $R(x, x')$ 는 ensemble-averaged two point correlation function, $\langle u(x)u(x') \rangle$ 이다. 공간기수와 시간기수의 직교성은 다음 식으로 표현된다.

$$(\phi^{(n)}(x), \phi^{(m)}(x')) = \delta_{nm}, \langle a^{(n)}(t), a^{(m)}(t) \rangle = \lambda^{(n)} \delta_{nm} \quad (3)$$

전통적인 직접기법은 대규모의 계산을 요구하므로 많은 시간이 소요되지만, Sirovich⁽¹³⁾는 시간을 절약하기 위한 snapshot 기법을 제안하였다. 본 연구에서는, 동적 구조를 밝히기 위해, snapshot기법과 PIV 데이터로부터 획득된 순간 변동 속도장을 사용하여 POD분

Table 1. Parameters and dimensionless numbers

Case	D_N [mm]	D_B [mm]	V_B [m/s]	Bubble Frequency [Hz]	Re	Eo
I	5	21.8	0.31	13.5	6,744	64
II	5	24.0	0.39	14.0	9,341	77
III	5	25.0	0.53	15.0	13,223	84

석을 수행하였다.

$$u(x, t) = \bar{u}(x) + u'(x, t) = \bar{u}(x) + \sum_{m=1}^M a^{(m)}(t)\phi^{(m)}(x) \quad (4)$$

계산된 고유모드를 사용하여 난류운동에너지 분포를 추출하였고, 최초 여러 모드의 합계를 사용하여 대규모 구조와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

우선, 기포의 평균직경과 속도를 기록된 유동가시화 영상을 통해 계산하였고, 노출출구로부터 분리되는 기포의 주파수도 같이 계산하였다. 무차원수인 Reynolds 수와 Eötvös수를 계산하였고, 이렇게 구해진 값들이 표 1에 보여진다.

Fig. 3은 수조에서의 자유표면 진동과 기포 유동의 유동가시화 영상을 보여준다. 공기 기포는 자유표면에서 대기로 사라지기 때문에, 측정영역에는 기체상이

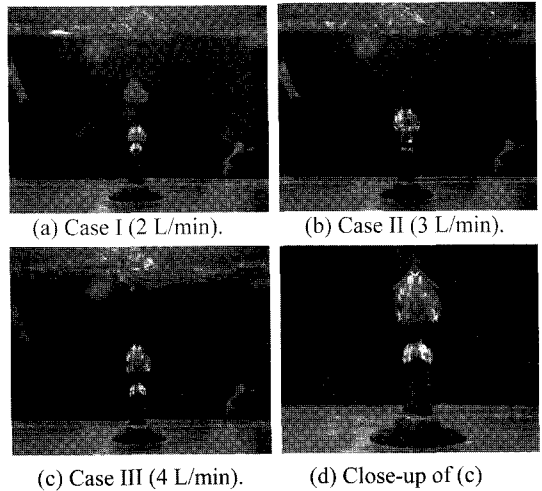


Fig. 3. Flow visualization image of bubble stream and free surface fluctuation in the tank. (a) Case I (2 L/min), (b) Case II (3 L/min), (c) Case III (4 L/min), and (d).

서 대기로 사라지기 때문에, 측정영역에는 기체상이 존재하지 않는다. 노즐출구에서 분리되는 기포의 직경은 노즐출구의 약 2배정도이나, 자유표면 근처에서의 최종적인 크기는 4~5배가 된다. 표 1에서 보여지듯이, 유량이 증가될수록 기포의 평균직경(D_B)과 평균속도(V_B)가 증가되었음을 확인할 수 있다.

$$V_B = \left[\frac{4\rho_{\text{water}} - \rho_{\text{air}} g D_B}{3 \rho_{\text{water}} C_D} \right]^{1/2} \quad (5)$$

성장된 기포의 형태는 Fig. 3에서처럼 원뿔형태로, 기포의 종단속도는 다음의 식을 통해서 계산될 수 있다. Case III에 대해 항력계수 C_D 를 1.15(Fig. 3(d), $\theta = 90^\circ$ 인 원뿔)로 가정하면, 계산되는 종단속도는 0.59 m/s로 측정치와 잘 일치하는 것을 보여준다. 세가지 실험의 Re수와 Eo 수가 기포형태 도표⁽¹⁴⁾에 표시될 경우 모두 “구형 캡(spherical cap)”영역에 위치되고 Fig. 3을 통해 기포의 형태가 이와 유사함을 확인할 수 있다.

평균유동장이 Fig. 4에 보여지는데, 와류구조의 중심이 압축공기의 유량이 증가함에 따라 바깥쪽 아래로 움직였다. 이는 증가된 압축공기의 유량이 더욱 큰 윗방향의 운동에너지를 액체로 전달하고, 작업유체의 관성력이 커짐에 따라 와류 구조가 밀리면서 좁아진다.

따라서 와류의 중심이 바깥쪽으로 이동하고, 자유표면과 수조 측벽의 존재로 인하여 중심이 아래로 이동한 것으로 판단된다. $Y/D_N = 15$ 인 지점의 평균속도 구배가 Fig. 4(d)에 보여진다. 이 지점은 거의 와류중심을 근처로 수평속도성분 U 는 모든 경우에 유사한 거동을 보이지만, 수직속도성분 V 는 기체유량에 따라 변하는 것을 볼 수 있다. 유량이 증가할수록, 기포에 의해 유도되는 수직성분이 더욱 강해지고 넓어지는 것을 볼 수 있다. 기포의 상승속도(0.31~0.53 m/s)와 비교하여 수직속도성분 값이 매우 낮은 것(0.015~0.020 m/s)을 볼 수 있는데, 압축공기의 유량이 증가할수록 기포의 속도는 증가하지만, 점성에 의해 유도되는 수직속도 값은 높은 Re수 영역에서도 별로 크지 않음을 확인하였다.

평균속도장의 전체운동에너지, $(U^2+V^2)/2$ 의 합을 비교하면, Case I, II, 그리고 III의 값은 각각 $0.069 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $0.096 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $0.098 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 이다. Case II의 경우 Case I에 비해 압축공기의 유량이 1.5배, 전체운동에너지는 1.39배이다. 그러나 Case III의 경우, 유량이 2배가 되어도 전체운동에너지는 Case I의 1.42배이다. 이 결과로, 압축공기로부터 기포구동 액체유동으로의 에너지 전달은 매우 비선형적이고, 기포구동 혼합기의 효율적인 혼합과정에 대한 최적의 조건이 존재할 것으로 판단된다.

혼합과정을 이해하기 위해서는, 평균속도장뿐만 아니라 다양한 유동 조건과 연관되는 난류특성 또한 조사될 필요가 있다. Fig. 4에서 각 Case에 대한 난류운동에너지, $(u^2+v^2)/2$ 의 합은 각각 $0.022 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $0.036 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $0.071 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 인데, 압축공기의 유량이 증가할수록, 난류운동에너지는 전체 측정영역에 걸쳐서 크게 증가되었다. 측정영역에서의 전체운동에너지는 평균운동에너지와 난류운동에너지의 합으로 구해지는데, 그 결과치는 각각 $0.091 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $0.132 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $0.170 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 으로, Case II, III의 전체운동에너지는 Case I에 비해 상대적으로 1.45배, 1.86배 더 크다. 이 증가치는 압축 공기 유량의 상대적인 증가치와 비교될 수 있으며, 약간의 차이가 나는 이유는 자유표면의 진동에 따른 입력에너지의 손실에 따른 것으로 생각될 수 있다.

Case I에서, 최대 난류운동에너지는 재순환영역에 위치하지만, Case III에서는 기포유동근처인 오른쪽에 위치한다. Case II에서는 난류운동에너지의 최대값들이 자유표면근처의 재순환영역과 기포유동부근에서

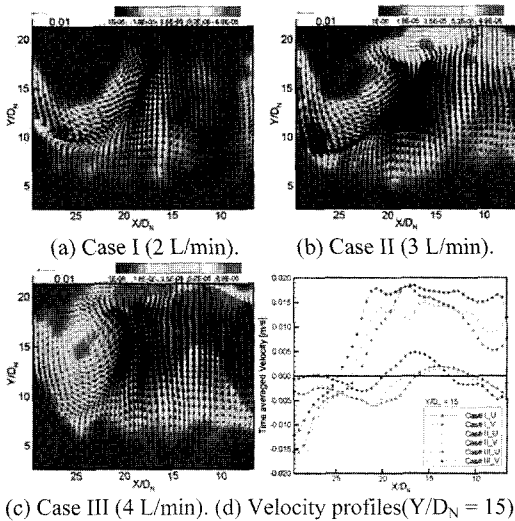


Fig. 4. Mean velocity vector fields with turbulent kinetic energy contour for each case. (a) Case I (2 L/min), (b) Case II (3 L/min), (c) Case III (4 L/min), and (d) velocity profiles at $Y/D_N = 15$.

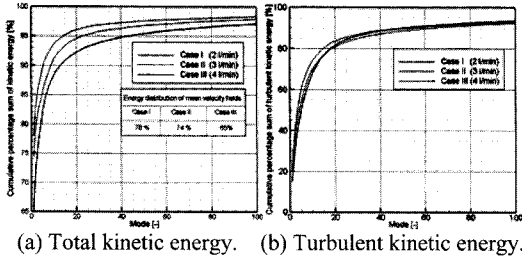


Fig. 5. Cumulative energy distributions of each case. (a) Cumulative percentage sum of total kinetic energy, and (b) cumulative percentage sum of turbulent kinetic energy.

발견된다. 이를 통해 난류발생의 지배적인 메커니즘은 기포구동 액체유동의 Re수에 강하게 지배된다고 판단된다. Fig. 3의 가시화 결과로, 압축공기의 유량이 증가할수록, 기포가 더욱 격렬히 뒤섞이고 자유표면의 변동도 더욱 강해짐을 확인하였다.

급속한 스칼라 혼합이 큰 규모의 난류거동에 지배된다는 사실은 잘 알려져 있다. 따라서 큰 규모의 난류거동들을 POD기법에 의해 분석하였고, 공간적 거동과 시간적 거동의 항목들이 논의되었다. 본 POD 분석에서, 고유치는 각 모드들의 난류운동에너지 나타내며, Fig. 5는 모드에 따른 전체 운동에너지 분포와 난류운동에너지 분포를 누적합의 형태로 나타내고 있다.

전체 PIV데이터가 POD분석에 이용되었기 때문에 전체 모드는 999개이다. Case I의 시간평균유동장은 Fig. 5(a)에 보여지듯이 전체운동에너지의 약 78%를 가지는데, 순간속도장에서 가장 지배적인 구조이다.

난류운동에너지의 대부분이 초기모드들에 집중되어 있음을 알 수 있는데, 그 예로, Case I에서는 초기의 20개 모드(총 모드의 처음 2%)가 전체 난류운동에너지의 83.6%(Fig. 5(b)), 전체 운동에너지의 96.1%(Fig. 5(a))를 가지고 있다.

Fig. 6부터 Fig. 8은 초기 4개의 공간모드와 시간모드를 나타내는데, 시간모드는 대응되는 공간모드의 크기(강도)의 시간변화를 나타낸다. Case I의 1st 시간모드는 0.08 Hz의 매우 느린 사인곡선을 나타내고, 2nd 시간모드는 같은 진동주파수를 가지지만, 1st 시간모드와 위상지연이 있다. 이러한 낮은 주파수의 불안정성은 한정된 벽면에 대한 낮은 Reynolds 수의 층류제트에서도 관찰되었다⁽¹⁵⁾.

자유표면에 대해 상승하는 기포유동이 수직벽에 대

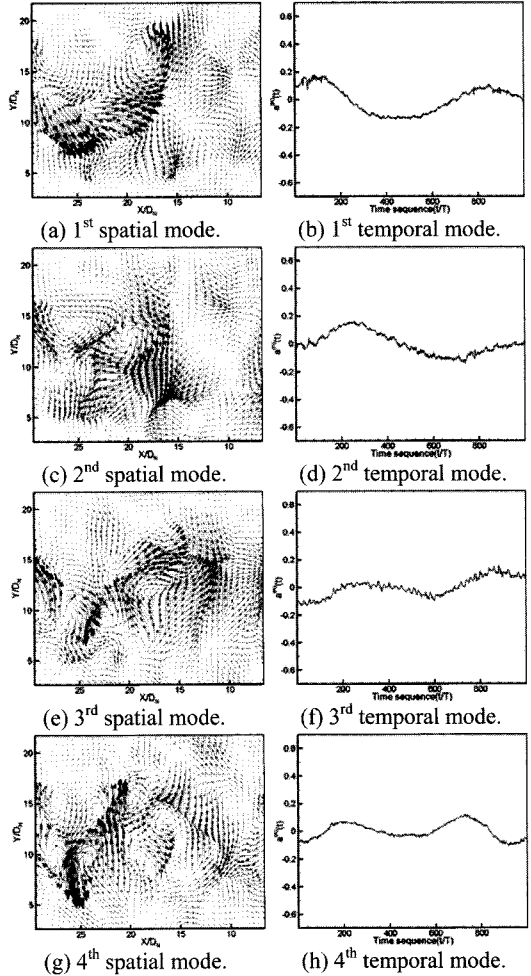


Fig. 6. The first four eigenmodes of case I. (a) 1st spatial mode, (b) 1st temporal mode, (c) 2nd spatial mode, (d) 2nd temporal mode, (e) 3rd spatial mode, (f) 3rd temporal mode, (g) 4th spatial mode, and (h) 4th temporal mode.

한 층류제트와 유사하기 때문에, 낮은 주파수의 진동은 자유표면 또는 기포들의 출렁거림으로 설명될 수 있다. 평균유동장의 속도분포와 유선의 궤적으로부터 구해진 와류순환시간은 약 18초인데, POD해석으로부터의 저주파 피크인 Fig. 9의 12.5초(0.08 HZ)의 진동주기와 비교될만한 오더이다. Fig. 6(e), 6(g)는 3rd, 4th 공간모드인데, 큰 규모의 구조들이 난류에너지 cascading을 거쳐 더욱 작은 규모의 구조들로 바뀌는 것을 보여준다. 3rd 공간모드에는 Fig. 4(a)에서 보여지는 높은 난류 운동에너지영역을 따라 4개의 와류가 있

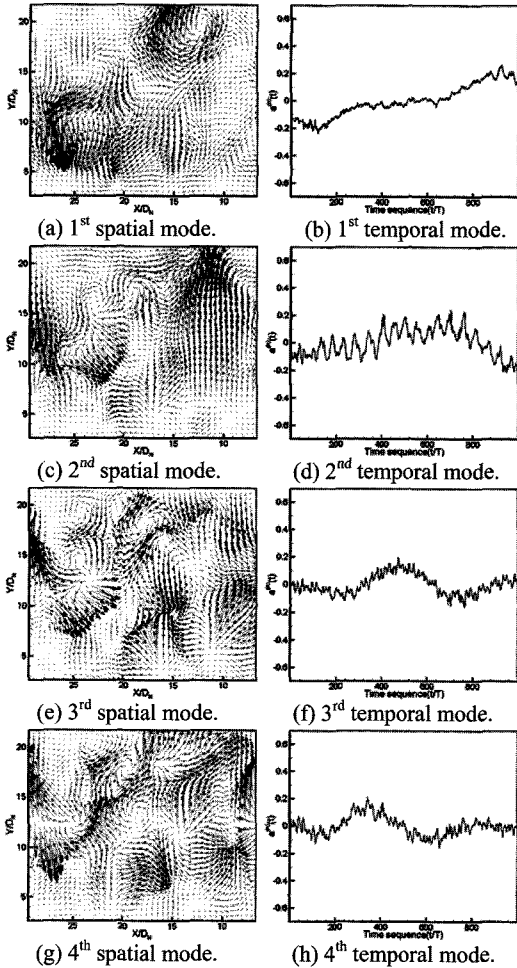


Fig. 7. The first four eigenmodes of case II: (a) 1st spatial mode, (b) 1st temporal mode, (c) 2nd spatial mode, (d) 2nd temporal mode, (e) 3rd spatial mode, (f) 3rd temporal mode, (g) 4th spatial mode, and (h) 4th temporal mode.

고, 4th 공간모드에는 평균 재순환 영역의 가장자리를 따라 8개의

더욱 작은 와류들이 존재한다. 3rd 시간모드와 4th 시간모드는 같은 주파수와 위상을 가지지만, 주파수가 앞선 모드들의 두 배이다. Fig. 7은 Case II의 모드로서, 1st 공간모드의 두드러진 특징은 Fig. 4(b)에 보여지는 높은 난류 운동에너지 영역과 일치하는 고 운동량 영역이다. 3rd, 4th 공간모드에서 많은 saddle 점들이 발견되는데, 이것은 Case I에 비교되는 증가된 큰 규모 와류들의 3차원 거동을 의미한다. Fig. 10의 각 시간모드들의 FFT결과는 Case I과 동일한 피크들을 가

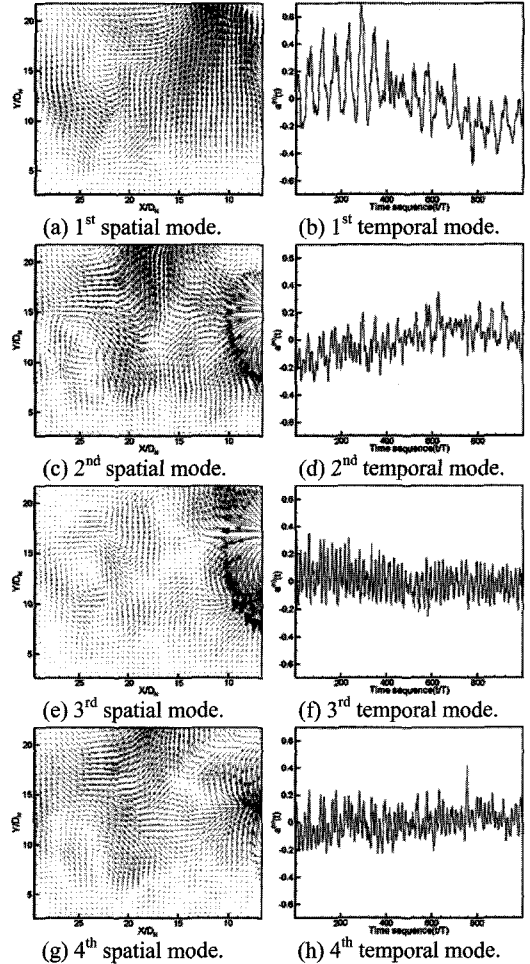


Fig. 8. The first 4 eigenmodes of case III: (a) 1st spatial mode, (b) 1st temporal mode, (c) 2nd spatial mode, (d) 2nd temporal mode, (e) 3rd spatial mode, (f) 3rd temporal mode, (g) 4th spatial mode, (h) 4th temporal mode.

진다.

Fig. 8은 Case III의 모드로서, Fig. 6과 Fig. 7의 모드들과 비교할 때, 공간모드와 시간모드 모두 꽤 다른 양상을 보인다. 1st 공간모드(Fig. 8(a))는 자유표면 근처의 상승하는 기포에 따른 높은 운동량의 위쪽 방향의 수직유동을 보여주고, 그 위치는 Fig. 4(c)에서 보여지는 고 난류운동에너지 영역과 일치한다. 1st 시간모드는 0.08 Hz와 1.523 Hz의 두 주파수에서 진동하였다 (Fig. 11).

낮은 주파수는 측벽근처에서 재순환하는 유동에 기여하는 것으로 판단되고, 그 값은 Case I과 같다. 높은

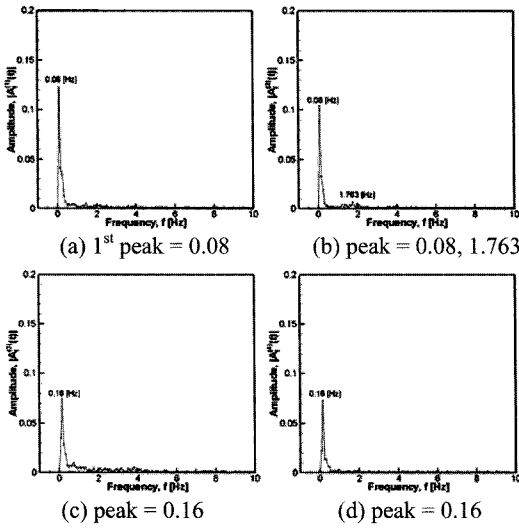


Fig. 9. FFT results of case I(2 L/min); (a) 1st temporal mode, (b) 2nd temporal mode, (c) 3rd temporal mode, and (d) 4th temporal mode.

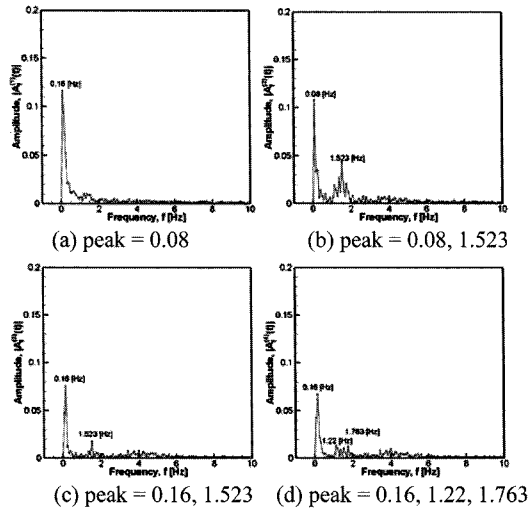


Fig. 10. FFT results of case II (3 L/min); (a) 1st temporal mode, (b) 2nd temporal mode, (c) 3rd temporal mode, and (d) 4th temporal mode.

주파수의 진동은 상승하는 기포들과 상호작용하는 자유표면의 진동과 관계될 것이라고 추측된다. 4th 공간 모드에서는 상승하는 기포에 의한 흡입유동이 보인다.

4. 결 론

3가지 다른 유량에 따른 기포구동 액체유동의 동적

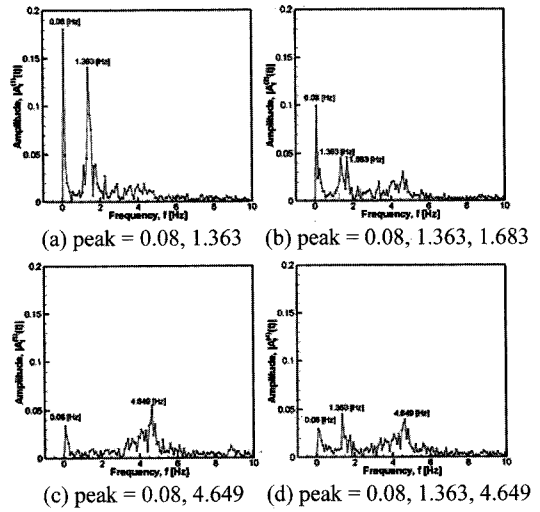


Fig. 11. FFT results of case III(4 L/min); (a) 1st temporal mode, (b) 2nd temporal mode, (c) 3rd temporal mode, and (d) 4th temporal mode.

특성을 조사하기 위해 시간분해 PIV기법과 POD기법을 이용한 실험적 연구를 수행하였다. 시간평균된 유동장은 모든 Case에 대해 유사한 유동 형태를 나타내었지만 큰 규모의 난류거동의 동적인 특성은 기포의 Re수에 따라 상당히 구별됨을 확인하였다. 압축공기의 유량이 1.5배, 2.0배 증가될 때, 기포상승속도는 1.3배, 1.7배 증가되었고 전체운동에너지의 크기는 각각 1.45배, 1.86배 증가됨을 분석하였다.

지배적인 난류생성 메커니즘으로 기포에 의해 유도되는 난류, 자유표면 진동, 그리고 재순환 와류 이렇게 3가지가 밝혀졌다. Case I에서, 대부분의 난류운동에너지와 대규모 거동은 평균 재순환영역에 집중되어 있었고, 1st, 2nd 시간모드는 재순환유동의 turn-over시간의 주파수로 조화진동을 하면서, 서로 크게 관계됨을 확인하였다. 기포의 Re수가 증가됨에 따라, 주된 난류거동은 기포들에 의해 생성되었다. Case III에서 얻어진 처음의 4 공간모드들은 불안정한 기포 거동 때문에 바깥으로의, 그리고 안으로의 유동 구조를 선명하게 설명하였고, 1st, 2nd 시간 모드는 위상이 관련되지 않고, 무작위의 성질을 보이는 것을 확인하였다. 진동하는 자유표면의 존재로 인하여 압축공기에서 기포구동 액체유동으로의 에너지 전달은 뚜렷한 비선형적인 거동을 가지는 것을 확인하였고, 따라서 상승기포와 자유표면간의 상호작용을 조사하기 위한 더욱 상세한 연구

들이 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(2009-0080 535)지원으로 수행 되었음. 이 논문은 2009년도 2단계 두뇌한국(BK)21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- 1) Luewisuthichat, W., Tsutsumi, A., Yoshida, K., 1997, "Chaotic Hydrodynamics of Continuous Single-Bubble Flow Systems", *Chemical Engineering Science*, Vol.52, pp.3685~3691.
- 2) Tirta, P., Koichi, T., Hideki, T., 2001, "Effect of Operating Conditions on Two-Phase Bubble Formation Behavior at Single Nozzle Submerged in Water", *Journal of Chemical Engineering*, Vol.34, pp.114~120.
- 3) 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, pp.1079~1086.
- 4) Theofanous, T.G., Sullivan, J., 1982, "Turbulence in Two-phase Dispersed Flows", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.116, pp.343~362.
- 5) Wang, S. K., Lee, S. J., Jones Jr., O. C., Lahey Jr., R. T., 1987, "Turbulence Structure and Phase Distribution Measurements in Bubbly Two-phase Flows", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.13, pp.327~343.
- 6) Fujiwara, A., Minato, D., Hishida, K., 2004, "Effect of Bubble Diameter on Modification of Turbulence in an Upward Pipe Flow", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.25, pp.481~488.
- 7) Durst, F., Taylor, A.M.K.P., Whitelaw, J. H., 1984, "Experimental and Numerical Investigation of Bubble-driven Laminar Flow in an Axisymmetric Vessel", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.10, pp.557~569.
- 8) Durst, F., Schönung, B., Selanger, K., Winter, M., 1986, "Bubble-driven liquid flows", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.170, pp.53~82.
- 9) Johansen, S.T., Robertson, D.G.C., Woje, K., Engh, T.A., 1988, "Fluid Dynamics in Bubble Stirred Ladles: Part I. Experiments", *Metallurgical Transactions*, Vol.19B, pp.745~754.
- 10) Montante, G., Horn, D., Paglianti, A., 2008, "Gas-liquid Flow and Bubble Size Distribution in Stirred Tanks", *Chemical Engineering Science*, Vol.63, pp.2107~2118.
- 11) S. J. Yi, J. W. Kim, H. D. Kim, and K. C. Kim, 2008, "Characteristics of Bubble-driven Flow by Using Time-resolved PIV and POD Technique", *Journal of the Korean society of visualization*, Vol.6, No.1, pp.41~46.
- 12) S. J. Yi, J. W. Kim, H. D. Kim, and K. C. Kim, 2008, "Characteristics of Bubble-driven Flow with Varying Flow Rates by Using Time-resolved PIV and POD Technique", *Journal of the Korean society of visualization*, Vol.6, No.2, pp.14~19.
- 13) Sirovich, L., 1987, "Turbulence and The Dynamics of Coherent Structures PART I : Coherent Structures", *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol.45, pp.561~571.
- 14) Clift, R., Grace, J. R., Weber, M. E., 1978, "Bubbles, Drops and Particles", Academic press, New York, pp.27.
- 15) 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, pp.367~380.