

X-ray PTV기법을 이용한 불투명 튜브 내부의 미세기포의 크기 및 속도 동시 측정

김 석* · 이상준†

Simultaneous Measurement of Size and Velocity of Microbubbles inside Opaque Tube Using X-ray PTV Technique

Seok Kim* and Sang Joon Lee†

Abstract. The microbubbles were used in various fields, such as turbulent control, drag reduction, material science and life science. The X-ray PTV using X-ray micro-imaging technique was employed to measure the size and velocity of micro-bubbles moving in an opaque tube simultaneously. Micro-bubbles of 10~60 μm diameter moving upward in an opaque tube ($\phi=2.7\text{mm}$) were tested. Due to the different refractive indices of water and air, phase contrast X-ray images clearly show the exact size and shape of overlapped microbubbles. In all of the working fluids tested (deionized water, tap water, 0.01 and 0.10M NaCl solutions), the measured terminal velocity of the microbubbles rising through the solution was proportional to the square of the bubble diameter. The rising velocity was increased with increasing mole concentration. The microbubble can be useful as contrast agent or tracer in life science and biology. The X-ray PTV technique should be able to extract useful information on the behavior of various bio/microscale fluid flows that are not amenable to analysis using conventional methods.

Key Words : X-ray PTV(X선 입자추적유속계), Phase Contrast(위상 대비), Micro-Bubble(미세기포), Contrast Agent(조영제), Electrolyte(전해질)

기호설명

- n: X선의 굴절률
- r_0 : 샘플과 검출장치 사이의 거리
- R_r : r방향의 기포 크기
- R_z : z방향의 기포 크기
- β : 흡수율
- δ : 굴절률
- λ : X선의 파장
- θ : 광원의 입사각
- Δz : 검출장치의 분해능

1. 서 론

유체역학분야에서 미세기포(micro-bubble)는 항력 감소에 응용되고 있다. 특히 난류경계층에 유입된 미세기포는 표면마찰을 상당히 줄이는 역할을 하는 것으로 알려져 있으며, 이를 이용하여 선박 등 다양한 난류제어 분야에서 이용되고 있다. 그리고 이상유동의 경우 주위 유체와 기포 사이의 열전달 특성 연구가 많이 이루어 지고 있다^(1,2). 또한 생명과학 분야와 생물학 분야에서는 최근에 빠른 속도로 발달하고 있는 X선 광학기술을 이용하여 고분해능의 X선 미세영상을 얻으려는 노력을 하고 있다. 나아가 방사광의 X선을 원하는 단색광 파장에 정확히 맞출 수 있게 되면, 세포와 같은 생물 조직체를 건조, 염색, 절단 등의 과정을 거치지 않고 살아있는 생체내부에 대한 투과현미경 영상을 얻을 수 있다. 이것은 생명 조직체를 투과하면서 내부 조직의 모든 경계 정보를 실시간

†포항공과대학교 기계공학과
E-mail : sjlee@postech.ac.kr

*포항공과대학교 기계공학과 대학원

으로 가시화할 수 있다는 것을 나타낸다. 이것은 종전의 전자현미경이나 광학현미경 등으로는 불가능한 것이다. 또한 X선의 파장영역이 수 Å 크기의 값을 가지므로 X선 확대기술을 이용하게 되면 생체 내부를 Å단위의 분해능으로 가시화할 수 있게 된다. 앞으로 X선의 특성을 잘 이해하고 적절하게 응용하여, 인체 내부구조에 적합한 단파장과 X선 광학기술을 개발 및 조합한다면 인체 내부구조를 더 높은 분해능으로 그리고 실시간으로 가시화할 수 있을 것으로 예상된다.

최근 들어 생명공학분야에서는 초음파를 이용하여 몸속 내부의 질환 및 혈류유동을 측정하고 있으며, 미세기포를 조영제(contrast agent)로 활용하고 있다^(3,4). 이러한 미세기포는 크기가 약 3~4 μm로 단백질로 코팅되어 인체에 무해할 뿐만 아니라 일정 시간이 지나면 자연적으로 소멸하여 효과적으로 내부 질환을 진단할 수 있다. 그러나 초음파는 몸 내부에 침투할 수 있는 깊이에 한계가 있고 공간 분해능이 우수하지 못한 단점이 있다. 따라서 인체내부를 높은 공간 분해능을 가지고 투과하고 큰 대비영상을 획득하기 위해 방사광 X선을 이용할 수 있다.

기존의 대표적인 기포 및 미세기포의 측정방법으로는 측정 유동부의 후면에서 조명을 비추어서 생기는 영상을 통해 크기 및 속도를 측정하는 것이다. 최근에는 Hassan 등⁽⁵⁾이 기포의 3차원 나선 유동패턴 및 기포형상을 측정하기 위해 shadow image velocimetry 기법을 적용하였지만, 비교적 큰 기포에 적용되었다. Maeda 등⁽⁶⁾은 간섭계 방식의 측정기법을 개발하여 미세기포의 크기를 측정하였다. 하지만 겹쳐진 기포를 구별하여 크기를 측정할 수 없는 단점이 있다. 위의 기존 연구들은 가시광선 영역의 광원을 이용함으로써 산란 혹은 간섭무늬를 통해 해석되었으나, 크기 측정에 오차가 있었으며 겹쳐진 기포를 구별하는데 별도의 이미지 처리과정이 필요했다.

따라서 본 연구에서는 기존의 가시광선의 산란 및 간섭방식이 아닌 투과성이 우수한 광원을 이용함으로써 기존의 문제점을 해결할 수 있는 기법을 적용하였다. 방사광 X선은 공간 및 시간에 대해 응집성(coherence)이 우수하며, 생체 및 유동현상에 적용할 수 있을 만큼 큰 에너지를 가지고 있다. 또한 높은 공간분해능을 가지고 있다. 따라서 불투명한 내부의 미세기포의 측정 및 생체 내부 조직 등도 관찰이 가능하다. 그리하여 방사광 X선을 이용하여 미세기포가 우수한 조영제

혹은 유동추적입자로 이용될 수 있는 가능성이 충분하다고 할 수 있다.

본 연구는 포항 방사광 가속기연구소(PAL)의 1B2 미세탐침(micro-probe) 라인에서 X-ray PTV기법을 이용하여 3차 증류수 및 NaCl 수용액 등 다양한 주위 유체가 담긴 불투명 튜브 내부에서 상승하는 미세기포의 크기 및 속도를 동시에 측정하였다.

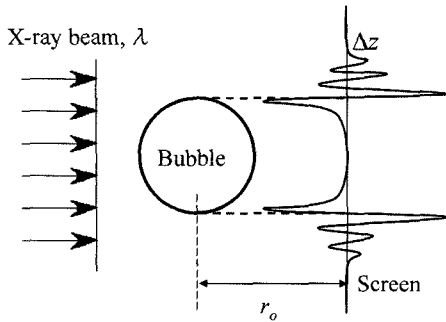
2. 실험장치 및 방법

2.1 방사광 X선을 이용한 영상 획득

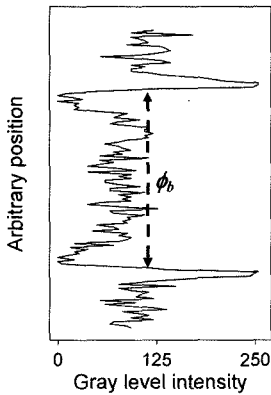
기존의 일반적인 가시광선 및 레이저를 이용한 미세기포의 영상획득방법은 그 방법에 따라서 간단하거나 복잡한 특성이 있지만, 공통적으로 측정할 수 있는 미세기포의 크기가 제한적이며 작은 기포나 액적의 경우 많은 에러를 포함하였다. 하지만 방사광 X선 미세영상기법의 경우 기포의 크기에 영향을 받지 않으며, 서로 다른 크기의 겹쳐진 기포에 대해서도 정확한 측정이 가능하다.

본 연구에서는 방사광 X선 미세영상기법을 이용한 X-ray PTV기법^(7,8)을 이용하였다. X-ray PTV기법은 X선 미세영상기법과 PTV기법을 결합한 새로운 유동 가시화 기법이다. 방사광 X선 미세영상기법은 위상 대비기법을 이용하는 방법으로 프레넬(Fresnel) 회절 무늬가 생성되는 영역에서 영상을 획득하는 것이다. Fig. 1은 방사광 X선을 이용하여 미세기포의 영상이 생성되는 원리를 나타낸 그림이다. Fig. 1(a)는 일반적인 X선의 회절특성을 나타낸 것으로, X선은 일반적으로 굴절률 δ 이 매우 작아 매질에 상관없이 직진한다. 그러나 서로 다른 밀도를 가지는 매질의 계면(interface)에서는 회절이 발생하게 된다. 이러한 회절은 근접영역에서의 프레넬 회절로서 해석할 수 있다. 획득된 미세기포의 중심에서의 강도분포(Fig. 1(b))를 보게 되면 프레넬 회절무늬가 잘 나타나고 있음을 볼 수 있으며, 이를 직접적으로 해석함으로써 기포의 크기(ϕ_0) 및 상승속도를 상대적으로 간단하면서도 정확히 측정할 수 있다.

또한 본 연구에서 사용한 백색광은 8 KeV($\lambda=1.55\text{\AA}$)에서 최대 에너지를 가진다. 이 파장 영역에서 공기의 경우 X선이 거의 완벽하게 투과되지만 물의 경우 90% 이상이 흡수 된다. 따라서 이와 같은 흡수되는 정도의 차이와 주위 유체와 기포의 계면에서 발생하는 프레



(a) Theoretical Fresnel-diffraction pattern



(b) Real Fresnel-diffraction pattern

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of micro-bubbles.

넬 회절에 의하여 미세기포의 크기를 측정하게 된다.

2.2 인체 전해질 구성

사람의 몸을 구성하는 대부분은 물이다. 물은 여러 종류의 생리활성 물질인 영양소와 무기질들을 녹이며, 세포 내 생화학적 반응을 매개하기도 한다. 또한, 폐나 피부로부터의 수분 증발이나 땀에 의한 체온조절

에도 관여하고 있다. 체내 수분을 총칭해서 체액이라고 부르는데, 보통 크게 세포내액과 세포외액으로 나누어진다. 세포외액은 다시 혈장과 세포간액으로 구분되며, 세포외액 중 혈장은 혈액으로부터 유형성분인 혈구(적혈구, 백혈구 및 혈소판 등)를 제외한 액체 성분이다. 혈장의 91~92%는 물로서 여러 종류의 유기물과 무기물이 함유되어 있다. 혈장 전해질에는 Na⁺과 Ca²⁺이 비교적 많이 함유되어 있고, K⁺와 Mg²⁺ 함유량은 비교적 적다. 이밖에 Fe, Cu, I 등의 무기질이 미량 함유되어 있다. 따라서 본 연구에서는 전해질과 이온이 전혀 없는 3차 증류수를 기본으로 인체 내부 전해질 용액을 모사한 서로 다른 몰(mole)농도의 NaCl 수용액을 대상으로 미세기포의 크기 및 속도를 측정하였다.

2.3 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 광원으로는 포항 방사광 가속기 연구소의 1B2 라인의 백색광(white beam)을 이용 하였으며 빔 포트(beam port)에서 실험장치까지의 거리는 약 26 m이고, 실험 단면에서 이미지 획득 장치까지의 거리는 약 30 cm이다. 저장링에서 접선 방향으로 나온 전자는 K-B미러에서 집속되고 ionization chamber는 통과하는 X선을 모니터링한다.

미세기포는 단위길이당 저항이 530Ω이고 굵기가 150 μm인 니켈선을 사용하여 양단에 전압을 걸어 순간적으로 열을 가해 주위의 유체가 기화 혹은 폭발을 일으킴으로써 발생시켰다. 발생된 미세기포는 부력에 의해 수직 상승하여 고분자 물질로 만들어진 직경 φ=2.7 mm의 튜브를 지난다. 본 실험에서는 우리 주위에서 쉽게 구할 수 있는 빨대(straw)를 사용했다.

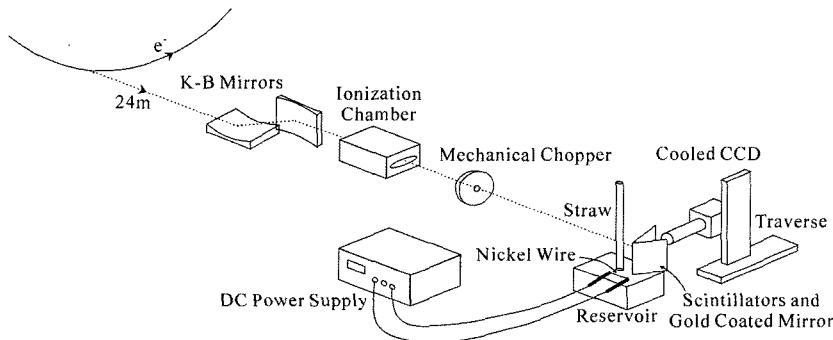


Fig. 2. Schematics of experimental setups for measuring the size and velocity of micro-bubbles.

상승하는 기포가 오직 부력의 영향만 받도록 튜브의 끝을 막았다. X-ray 영상을 취득한 실험 단면은 기포 발생위치에서 수직 방향으로 약 12 cm 위치이다. 실험 단면을 지난 X선은 가시광선 영역이 아니어서 실제 눈으로 볼 수 없다. 따라서 방사선 형광체(scintillator)를 이용하여 X선을 최대 파장이 475 nm인 가시광선으로 바꾼다. 이를 해상도가 1280×1024 픽셀의 cooled CCD 카메라를 이용하여 영상을 취득하였다. CCD 앞쪽에 10개의 대물 렌즈를 이용하여 미세기포를 확대된 영상으로 획득하였으며, 한 픽셀의 공간분해능은 약 $0.67 \mu\text{m}$ 이다. 미세기포의 속도를 측정하기 위하여 mechanical chopper를 이용하였으며, 노출시간은 최대 10 ms이었다.

Fig. 3은 3차 증류수에서 생성된 미세기포들의 순간영상과 X선 영상기법의 개략도를 나타낸 것이다. 본 연구에 이용된 방사광 X선의 단면적은 약 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 이다. Fig. 3(a)의 X선 영상은 X선 진행경로 상

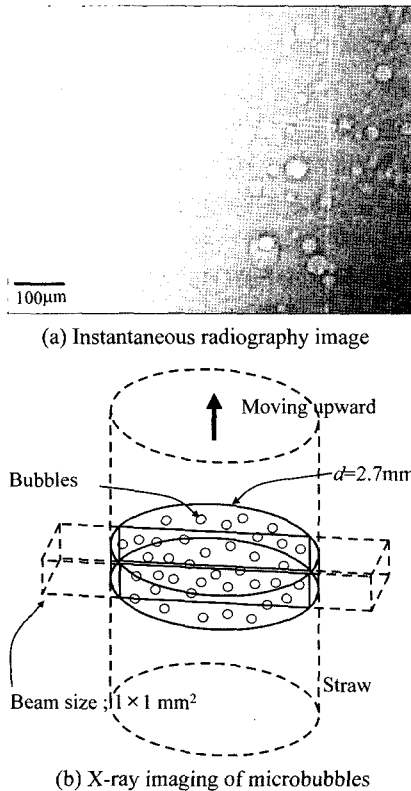


Fig. 3. A typical instantaneous radiography image and schematic diagram of X-ray imaging of microbubbles.

에 있는 모든 미세기포의 회절무늬를 포함하고 있으므로 광경로의 체적 맵핑(volume mapping)이다. 따라서 X선이 지나가는 체적 내부에 위치하고 있는 미세기포들의 정보가 2차원 평면에 기록되게 되고, 기록된 회절무늬로부터 미세기포의 크기와 속도를 동시에 측정하게 되는 것이다. 본 연구에서 이용한 X-ray PTV기법은 미세기포의 3차원 공간분포를 나타내지 않으며, 향후 연구에서 tomography기법을 이용하여 이 문제를 해결할 예정이다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 임의의 순간에 취득한 X선 영상에서의 겹쳐진 미세기포들의 크기와 속도벡터를 나타낸 것이다. 영상의 크기는 $140 \times 112 \mu\text{m}^2$ 이며 10~60 μm 크기의 미세기포가 서로 겹쳐져 있으며, 이들 겹쳐진 미세기포에 대해서도 크기 및 속도벡터를 우수한 공간분해능으로 측정할 수 있었다. 기존의 광학적 측정기법으로는 겹쳐진 미세기포들을 구별하여 측정하기는 매우 어렵다.

측정의 정확도를 확인하기 위해 우선 알고 있는 굵기의 광섬유의 회절 영상을 획득하였다. 디지털 이미지 처리과정을 통해 계산된 광섬유의 크기는 알려진 크기에 대해 약 0.2%의 차이를 가지며, 이 크기는 0.56픽셀 차이를 뜻한다. 이러한 오차는 보다 고해상도의 카메라를 이용하면 더욱 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 5는 측정된 기포의 크기에 따른 상승 속도 결과를 나타낸 것이다. 작동유체로는 수돗물과 전해질

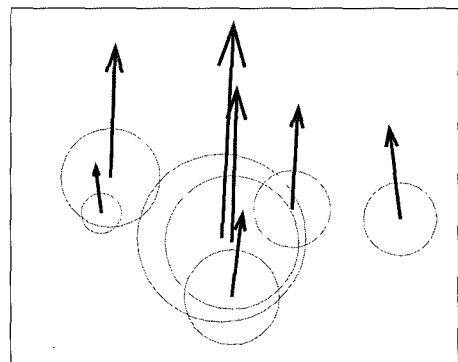


Fig. 4. Instantaneous distribution of the size and velocity of micro-bubbles.

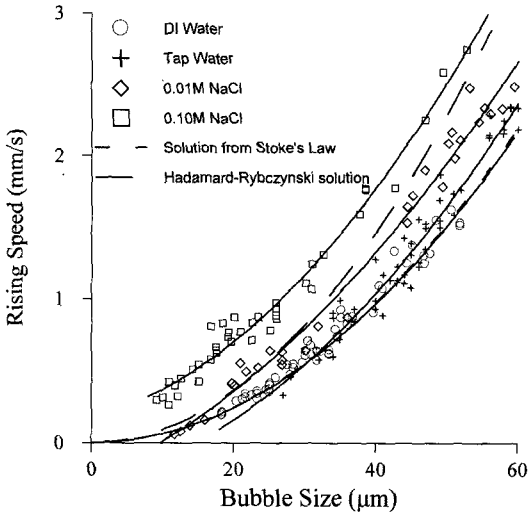


Fig. 5. Relationship between the bubble size and moving velocity.

이 없는 3차 증류수, 0.01 M과 0.1 M의 NaCl 수용액을 사용하여 그 결과를 비교하였다. 미세기포의 경우 기포 내부를 채우고 있는 유체(가스 혹은 액체)에 상관없이 강성체(rigid body)로 해석할 수 있다. 기포 혹은 액적의 경우 Hadamard-Rybczynski 공식⁽⁹⁾에 의해 최종 속도 (terminal velocity), U 는 다음과 같이 주어진다.

$$U = \frac{1}{3}\mu r_0^2(\rho' - \rho) \left[\frac{1 + \sigma}{1 + \frac{2}{3}\sigma} \right], \sigma = \frac{\mu}{\mu'} \quad (1)$$

여기서, r_0 는 초기 기포의 크기, ρ 는 주위 유체의 밀도, μ 는 점성계수이며, 프라임은 기포의 밀도를 나타낸다. 만약 기포 내부가 가스라면 σ 를 무한대로 가정하여 최종속도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U = \frac{2}{3}\mu r_0^2 \Delta\rho, U \propto r_0^2 \quad (2)$$

식 (2)는 Hadamard-Rybczynski 공식에 의해 유도된 최종속도로서 기존 연구⁽⁹⁾에 따르면 비교적 큰 기포와 일치한다. 즉 기포의 크기가 작을수록 다른 경향을 가지게 된다. 그리하여 미세기포의 경우 수정된 이론식을 사용하게 된다. 미세기포의 경우에는 항력계수를 고려할 때에 표면마찰과 형상에 의한 드래그

만을 고려하고 normal stress는 고려하지 않은 Stokes's Law를 이용한다. 따라서 Stokes's Law에 의해 주어지는 항력계수는 다음과 같으며,

$$C_{D_{St}} = 24/Re \quad (3)$$

식 (2)를 정리하면 결과적으로 미세기포의 최종 속도는 다음과 같다⁽⁹⁾.

$$U_{TST} = \frac{2gr_0^2}{9\mu} \Delta\rho_0 \quad (4)$$

식 (2)와 식 (4)를 비교하면 Stokes's Law를 이용한 식의 경우 실제 이론식에 비해 약 40%정도 작은 값을 가진다. Fig. 5의 결과에서도 역시 이와 비슷한 정도의 차이를 가지고 있다. 식 (2)와 식 (4)에서 미세기포의 상승속도는 기포 크기의 제곱에 비례하며 실험결과에서 확인 할 수 있다. 3차 증류수와 수돗물의 경우 이론값에 가까운 결과를 보였으며, NaCl 수용액의 경우 몰 농도가 커질수록 상승속도가 증가함을 알 수 있다. 결과를 정량적으로 비교하기 위하여 식 (4)에서 구한 3차 증류수 경우의 최종속도로 다른 유체에서의 미세기포 상승속도를 무차원화하여 Fig. 6에 나타내었다. 미세기포의 크기에 상관없이 3차 증류수의 경우 거의 이론식과 잘 일치함을 알 수 있으며, 0.01 M NaCl 수용액의 경우 3차 증류수에 대해 약 40%정도 속도가 증가하였고 0.1 M NaCl 수용액은 속도가 약 2배가 되었다. 그러나 수돗물의 경우 비선형적인 결과를 보이고 있다. 이는 수돗물의 조성이 나머지 액체에 비해 복잡하며 다양한 전해질과 이온, 불

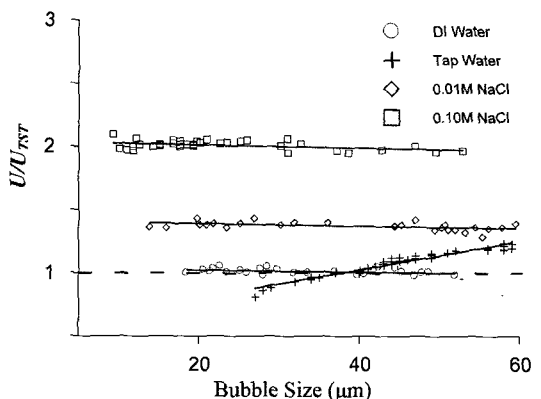


Fig. 6. Normalized velocity with micro-bubble size.

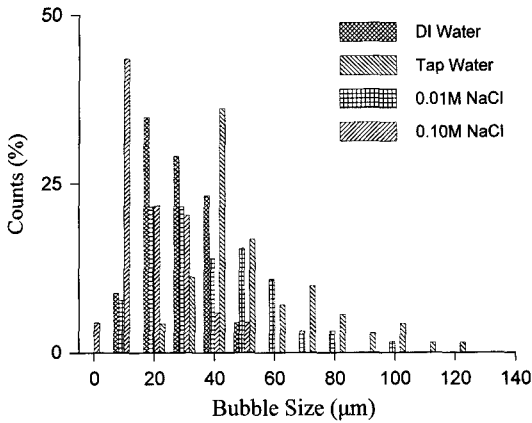


Fig. 7. Distribution of bubble size for different working fluids.

순물이 포함되어 미세기포의 상승속도에 영향을 준 것으로 사료된다.

Fig. 7은 각 주위유체에 대하여 같은 파워를 공급하여 생성된 미세기포의 크기 분포를 비교한 그래프이다. 3차 증류수의 경우 20 μm ~40 μm 사이의 미세기포가 전체의 약 80%를 차지한 반면, 0.1 M NaCl 수용액은 10 μm ~20 μm 사이의 미세기포가 대부분인 것을 확인할 수 있다. 즉 물 농도가 높을수록 상대적으로 작은 기포가 많이 생성되고 있음을 볼 수 있다. 수돗물의 경우 40 μm 이상의 기포가 고르게 분포함을 알 수 있다.

결과적으로 기존의 가시광선영역의 광원을 이용하는 방법에 비해 보다 작은 미세기포에 대해서 높은 분해능으로 크기를 측정할 수 있는 방사광 X선 미세영상기법을 이용하여 불투명한 튜브 내부의 미세기포의 크기 및 속도를 동시에 측정하였다. 물농도가 증가할수록 속도는 비례하여 증가하였으며, 생성되는 미세기포의 크기는 대체적으로 작아졌다. 반면 수돗물의 경우 3차 증류수와 전해질 용액에 대해 비선형적인 특성을 가지고 있으며 생성되는 미세기포의 크기 역시 편중되지 않고 고르게 분포되는 특성을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 불투명 튜브 내부 미세기포의 크기 및 속도를 동시에 측정할 수 있는 방사광 X선 미세영상기법을 적용하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 기존의 가시광선 영역의 기포측정 방법에 비해 높은 분해능을 가진 X선을 이용하여 보다 미세한 크기의 기포를 측정할 수 있었다.

(2) 불투명 튜브 내부의 미세기포 상승속도는 기포의 크기의 제곱에 비례하였으며, 물농도가 증가할수록 상승속도는 비례하여 증가하였다. 또한, 생성되는 미세기포의 크기도 물 농도가 증가할수록 작아진다.

(3) 방사광 X선을 이용한 생체 내부 유동관찰을 위한 조영제 혹은 추적입자로서의 가능성을 확인하였으며, 향후 식물이나 곤충과 같은 생체에 적용하는 연구를 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 포항 방사광 가속기연구소의 1B2 빔라인에서 수행되었으며, 포항 방사광 가속기 연구소에서의 실험은 과학기술처와 포항공대의 지원을 받았습니다. 본 연구는 과기부(한국과학재단)에서 지원한 특정기초연구(과제 번호: R01-2004-000-10500-0)와 2단계 국가지정연구실 사업(과제번호: M1060000276-06J0000-27610)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) Kato, H., Miyanaga, Y., Haramoto, Y. and Guin, M. M., 1994, "Frictional Drag Reduction by Injecting Bubbly Water into Turbulent Boundary Layer," Cavitation and Gas-Liquid Flow in Fluid Machinery and Devices, FED-Vol. 190, pp. 185-194.
- 2) Yoshida, Y., Takahashi, Y., Kato, H. and Guin, M. M., 1998, "Distribution of Void Fraction in Bubbly Flow through a Horizontal Channel: Bubbly Boundary Layer Flow, 2nd Report", J. Mar. Sci. Technol., Vol. 3, pp. 30-36.
- 3) Kevin, W., Skyba, D. M. and Firschke, C., 1997, "Interactions Between Microbubbles and Ultrasound: In Vitro and In Vivo Observations", J. of the American College of Cardiology, Vol. 29, pp. 1081-1088.
- 4) Veltman, J., Goossen, T., Laguna, P., Wijkstra, H. and Rosette, J., 2002, "New Technical Improvements for TRUS in the Diagnosis of Prostate Cancer", European Urology Supplements, Vol. 1, pp. 8-14.
- 5) Hassan, Y. A., Ortiz-Villafuerte, J. and Schmidl, W.,

- 1999, "Measurements of a Rising Single Bubble in Stagnant Liquid", J. Flow Visualization & Image Processing, Vol. 6, pp. 129-137.
- 6) Maeda, M., Kawaguchi, T. and Hishida, K., 2000, "Novel Interferometric Measurement of Size and Velocity Distributions of Spherical Particles in Fluid Flows", Measurement Science and Technology, Vol. 11, pp. L13-L18.
- 7) Kim, S. and Lee, S. J., 2004, "X-ray Micro-Imaging Technique for Simultaneous Measurement of Size and Velocity of Micro-Bubbles", Trans. of the Korea Society of Mechanical Engineers (B), Vol. 28, No. 6, pp. 659-664.
- 8) Lee, S. J. and Kim, S., 2005, "Simultaneous Measurement of Size and Velocity of Microbubbles moving in an Opaque Tube Using an X-ray Particle Tracking Velocimetry Technique", Experiments in Fluids, Vol. 39, pp. 492-497.
- 9) Clift et al., 1978, "Bubbles, Drops, and Particles", Academic, Newyork. Kim, H. G. and Bezerghi, A., 1995, "A New Flow Animation Technique Using a Computerized Tomography", J. Fluid Mech., Vol. 20(5), pp. 449-464.