

# X-ray 미세 영상기법을 이용한 미세기포의 크기 및 속도 동시 측정기술 개발

김 석\* · 이 상 준†

(2003년 12월 18일 접수, 2004년 4월 17일 심사완료)

## X-ray Micro-Imaging Technique for Simultaneous Measurement of Size and Velocity of Micro-Bubbles

Seok Kim and Sang Joon Lee

**Key Words :** X-ray Micro-Imaging(X선 미세영상), Phase Contrast(위상 대비), Micro-Bubble(미세기포), Two-Phase Flow(이상유동), Contrast Agent(조영제)

### Abstract

It is important to measure precisely the size and velocity of micro-bubbles used in various field. The synchrotron X-ray micro-imaging technique was employed to measure the size and velocity of micro-bubbles moving in an opaque tube simultaneously. Phase contrast images were obtained at interfaces of micro-bubbles between water and air due to their different refractive indices. The X-ray micro-imaging technique was found to measure an optical fiber with an accuracy of 0.2%. Micro-bubbles of 20~60 $\mu$ m diameter moving upward in an opaque tube ( $\phi=2.7$ mm) were tested to measure bubble size and up-rising velocity. For DI water, the measured velocity of micro-bubbles is nearly proportional to the square of bubble size, agreed well with the theoretical result. In addition, the synchrotron X-ray micro-imaging technique can measure accurately the size and velocity of several overlapped micro-bubbles.

### 기호설명

- $n$  : X선의 굴절률
- $r$  :  $r$ 방향 좌표계
- $r_0$  : 샘플과 검출장치 사이의 거리
- $R_r$  :  $r$ 방향의 기포 크기
- $R_z$  :  $z$ 방향의 기포 크기
- $z$  :  $z$ 방향 좌표계
- $\beta$  : 흡수율
- $\delta$  : 굴절률
- $\lambda$  : X선의 파장
- $\theta$  : 광원의 입사각
- $\Delta z$  : 검출장치의 분해능

### 1. 서론

미세기포(micro-bubble)는 난류 유동제어를 통한 항력 감소에 응용되고 있으며, 이상유동(two-phase)에서 전열특성 향상에도 이용되고 있다. 최근에는 초음파를 이용한 몸 속 내부의 질환이나 혈류유동 계측 시 미세기포를 조영제(contrast agent)로 활용하고 있다.<sup>(1,2)</sup> 따라서, 유동과 함께 움직이는 미세기포의 크기와 속도를 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다.

여태까지는 대부분 후면조명(back illumination)으로 측정 유동부를 비추고 취득한 기포들의 영상을 통해 크기 및 속도를 측정해오고 있다. 최근 들어 Hassan 등<sup>(3)</sup>이 새도영상 속도계(shadow image velocimetry) 기법을 적용하여 기포의 3차원 나선 유동패턴 및 기포 형상을 측정하였지만, 비교적 큰 기포에 유용하다. Maeda 등<sup>(4)</sup>은 레이저를 이용한 간섭계 방식의 측정기법을 개발하여 미세기포

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과  
E-mail : sjlee@postech.ac.kr  
TEL : (054)279-2169 FAX : (054)279-3199

\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

의 크기를 측정하였으나, 겹쳐진 기포를 구별하여 측정하기 어렵다는 단점이 있다. 즉, 대부분의 기존 연구들은 가시광선을 광원으로 이용하여 산란 혹은 간섭무늬를 통해 측정하였으나, 측정된 크기에 오차가 존재하며 겹쳐진 기포를 구별하는데 별도의 디지털 영상처리 과정이 필요하다.<sup>(5,6)</sup>

가시광선을 이용한 기포실험에서 발생하는 이와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 투과성이 우수한 방사광을 이용하였다. 방사광 X선은 공간 및 시간 응집성(coherence)이 우수하며, 높은 공간 분해능을 가지고 있다. 또한, 불투명한 물체 내부에 적용할 수 있을 만큼 큰 에너지를 가지고 있다. 따라서, 불투명한 물체 내부의 미세기포의 거동을 측정하는 것이 가능하다.

X선 영상기법은 재료과학, 생물학, 의학분야 등에서 비파괴적으로 물체의 내부 구조를 밝히는데 많이 이용되고 있다. 그러나 이들은 주로 흡수(absorption) 차이에 의한 대비영상(contrast image)을 제공하여 공간 분해능이 10~100 $\mu\text{m}$  정도이다. 그런데, 보다 미세한 물체 내부 구조나 기포를 측정하기 위해서는 분해능을 수  $\mu\text{m}$  이하로 낮추어야 한다. 이와 같은 필요에 따라 방사광 X선을 이용한 위상대비(phase contrast) 미세영상(micro-imaging) 기법이 개발되었다.

일반적으로 생체조직이나 낮은 전자밀도를 가진 물질의 내부구조를 검사함에 있어서 soft X선보다 hard X선이 유리하며, 이것은 두꺼운 표본일수록 낮은 흡수선량(absorbed dose)으로 실험하기 때문이다. X선의 굴절률  $n$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$n = 1 - \delta + i\beta \quad (1)$$

여기서  $\delta$ 는 굴절률이고  $\beta$ 는 흡수율이다. 실제 높은 에너지의 X선에서 흡수율  $\beta$ 는 거의 1이고 원자량에 따라 미소하게 변하므로 거의 흡수대비가 일어나지 않는다. 따라서 굴절률  $\delta$ 의 변화로부터 파동(wave)의 위상을 정확하게 검출하게 되면 보다 우수한 분해능으로 측정할 수 있다. 그러나 빛의 위상 변화를 기록매체에 바로 기록할 수 없으므로 다음과 같은 다양한 방법이 이용되고 있다. 예로서 soft X선은 홀로그래피나 존 플레이트(zone plate)를 이용하고 hard X선은 간섭계(interferometry)와 analyzer 크리스탈을 이용하고 있다. 최근 들어 방사광 가속기에서 나오는 높은 에너지를 가진 X선의 응집(coherent) 특성을 이용한 in-line 홀로그래피 기법이 개발되어, 우수한 공간 분해능을 가진 위상대비 영상의 측정이 가능하게 되었다.<sup>(7)</sup>

본 연구에서는 포항 방사광 가속기(PAL)의 1B2 미세탐침(micro-probe) 빔 라인에서 나오는 hard X

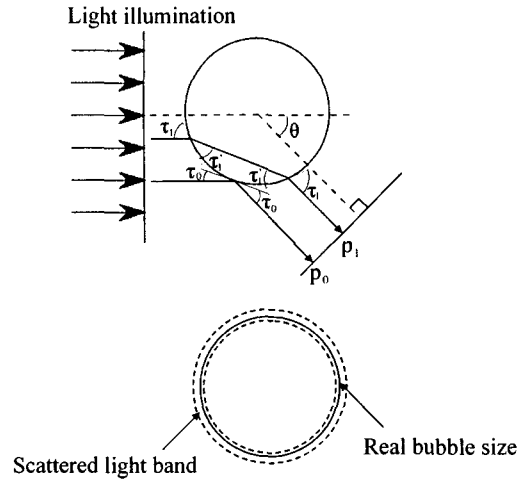


Fig. 1 The optical path for external refraction

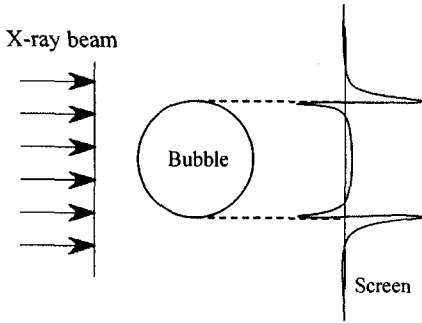
선을 이용하여 위상대비 영상기법을 적용하고, 미세기포의 크기 및 속도를 동시에 계측할 수 있는 측정 기법을 개발하였다.

## 2. 방사광 X선 미세영상 기법

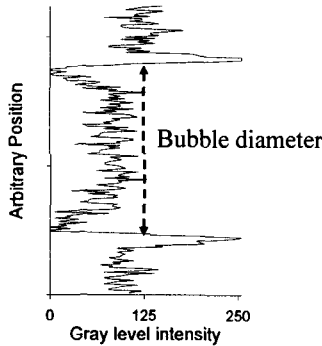
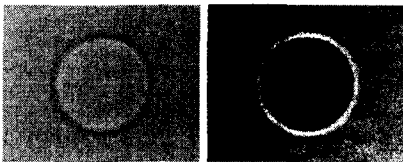
### 2.1 가시광선을 이용한 기포의 크기 측정

광원이 임의의 각도  $\theta$ 로 기포를 비출 때, 기포의 표면 및 내부에서의 광경로(optical path)를 Fig. 1에 나타내었다. 일반적으로 기포는 투명하며, 기포 내부를 통과하는 빛은 밀도차이에 기인하여 굴절된다. 그런데, 기포 표면에서는 빛이 굴절되지 않고 반사되며 산란이 일어난다( $p_0$ ). 또한,  $p_0$  주변부 위에서도 산란이 이루어지며 두꺼운 산란띠(scattered light band)를 생성시킨다( $p_0-p_1$ ). 따라서, 실제 기포의 크기를 나타내는 기포의 edge 영상이 산란띠에 가려지게 되어 직경을 정확하게 측정하는 것이 어렵게 된다. 기포가 불투명한 경우에도 이와 같은 산란띠는 존재한다.

일반적으로 가시광선을 이용한 기포 크기 측정에 있어서, 기포의 중심부터 산란띠의 일정부분까지를 기포의 크기로 가정하거나 기포나 액적 주위의 회절무늬를 이용하여 크기를 측정하고 있다. 이에 따라 기포의 크기 측정에는 오차가 존재하며 미세한 기포나 액적의 경우 측정오차는 더욱 커지게 된다. 임병직 등<sup>(8)</sup>은 백색광을 이용하여 분무액적의 크기를 측정하였는데, 40 $\mu\text{m}$  이하의 액적의 경우 10% 이상의 측정 오차가 생긴다고 보고하였다. 즉, 기포의 크기가 작을수록 측정오차가 커지고 사용한 광원의 분해능에 따라 측정 한계가 존재함을 알 수 있다.



(a) Theoretical Fresnel-diffraction pattern



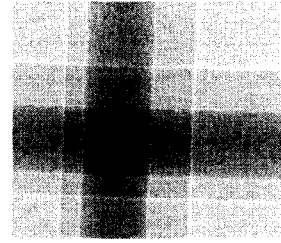
(b) Real Fresnel-diffraction pattern

Fig. 2 X-ray diffraction pattern of micro-bubbles

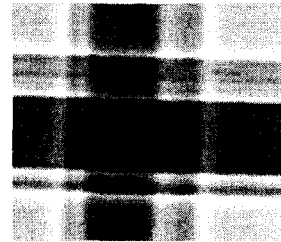
또한, PDPA(phase doppler particle analyzer)<sup>(9)</sup>와 Malvern 입자분석기<sup>(10)</sup>와 같은 레이저를 이용한 방법도 널리 이용되고 있으며 정확도가 상대적으로 우수하다. 그러나, 정확히 측정할 수 있는 기포나 액적의 크기가 수 mm정도이거나 겹쳐진 기포들의 크기 측정에 있어서 어려움이 따르고 기포의 크기와 속도를 동시에 측정하기 어렵다는 단점이 있다.

2.2 방사광 X 선을 이용한 영상 획득

앞에서 설명한 바와 같이 기존의 일반적인 가시광선을 이용한 측정 방법들은 측정할 수 있는 미세기포의 크기에 제한을 받으며 미세기포나 액적의 경우 상대적으로 큰 측정오차를 가지게 된다. 반면에 기존의 가시광선과 달리 X선은 투과성이 있어 불투명한 물체 내부를 관찰할 수 있으며, 실험대상인 미세기포는 물에 비해 X선 흡수정도(absorption rate)가 매우 작아 대비(contrast)가 뚜렷한 영상을 얻을 수 있다. 따라서 X선 미세영상기



(a)  $r_o=0.10m$



(b)  $r_o=0.30m$

Fig. 3 Fresnel diffraction images captured at different distances between the sample and detector for an optic fiber

법의 경우, 미세기포의 크기를 정확하게 측정할 수 있으며 겹쳐진 기포들의 크기 측정도 가능하다.

Fig. 2는 방사광 X선을 이용하여 미세기포의 영상을 측정하는 원리를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 일반적인 X선의 회절특성을 나타낸 것으로, X선은 직진성이 매우 강하지만, 밀도가 다른 매질과의 계면(interface)에서는 프레넬(Fresnel) 회절이 발생하게 된다. 획득된 미세기포의 중심 단면에서의 강도분포[Fig. 2(b)]를 보게 되면, 프레넬 회절무늬가 기포의 크기를 잘 나타내고 있음을 볼 수 있으며, 이 X선 영상으로부터 기포의 크기를 정확히 측정할 수 있다.

Fig. 3은 광섬유를 대상으로 X선 미세영상기법으로 얻은 프레넬 회절무늬로, 샘플과 검출장치 사이의 거리  $r_o$ 에 따라 흡수대비[Fig. 3(a)]와 위상대비[Fig. 3(b)] 영상으로 구분된다. 일반적으로 회절 형상을 획득할 수 있는  $r_o$ 값은 다음의 식으로 표현된다.

$$r_o \geq \frac{(\Delta z)^2}{\lambda} \tag{2}$$

여기서,  $\Delta z$ 는 검출장치의 분해능,  $\lambda$ 는 사용한 X선의 파장이다. 본 연구에서 검출장치의 분해능  $\Delta z$ 는  $6.7\mu m$ 이고 X선의 파장  $\lambda$ 는  $1.55\text{\AA}$ 이다. 따라서, 회절무늬를 얻기 위해서는 샘플과 검출장치 사이의 거리를  $25cm$  이상으로 유지하여야 함을 알 수 있다. 본 연구에서는 샘플과 검출장치 사이의 거리를  $r_o=0.3m$ 로 고정하고 X선 미세영상기법으로

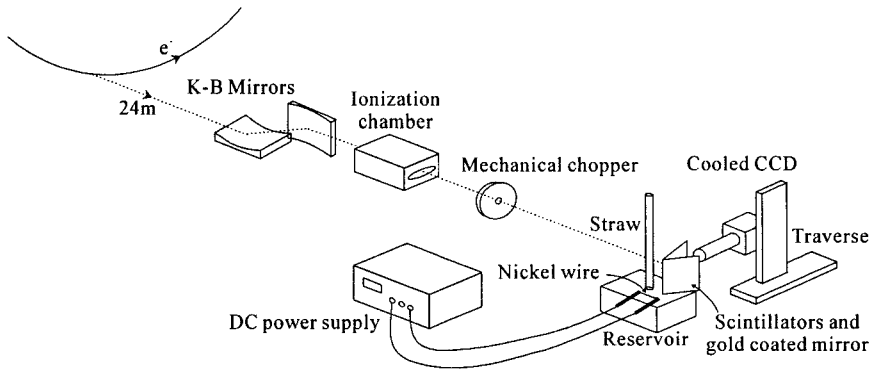


Fig. 4 Schematics of experimental setups for measuring the size and velocity of micro-bubbles

미세기포의 위상대비 영상을 취득하였다.

### 3. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 광원으로는 포항 방사광 가속기의 1B2 빔 라인의 백색광(white beam)을 이용하였으며 빔 포트(beam port)에서 실험장치까지의 거리는 약 26m이다. 실험 샘플과 영상 획득장치인 CCD 카메라 사이의 거리는 약 30cm이다. 저장링에서 접선방향으로 나온 전자는 K-B 미러에서 집속되어지며 이온 챔버(ionization chamber)는 통과하는 X선을 모니터링한다. 기계식 초퍼(mechanical chopper)를 사용하여 실험하는 순간에만 X선 빔이 펄스 형태로 측정 샘플을 투과하도록 하였다.

미세기포는 단위길이당 저항이  $530\Omega$ 인 니켈 선을 사용하여 양단에 전압을 걸어 열을 가함으로써 주위의 유체가 기화 혹은 폭발을 일으켜 미세기포가 발생하도록 하였다. 작동 유체로는 3차 증류수를 이용하였다. 발생된 미세기포는 직경 2.7mm의 고분자 물질로 만들어진 빨대(straw) 내부에서 부력에 의해 수직 상승한다. X선 영상을 취득한 측정 단면은 기포 발생위치에서 수직 방향으로 약 12cm 위치이다. 실제 X선은 가시광선 영역이 아니어서 실제 눈으로 볼 수 없다. 따라서 방사선 형광체로 일종의 단결정인 신틸레이터(scintillator)를 이용하여 X선을 최대 파장이 475nm인 가시광선으로 바꾼다. 그리고 해상도가  $1280 \times 1024$  픽셀인 cooled CCD 카메라를 이용하여 영상을 취득하였다. CCD 카메라 앞부분에 10배의 대물렌즈를 부착하여 확대된 영상을 획득하였으며, 이 때 한 픽셀의 공간분해능은 약  $0.67\mu\text{m}$ 이었다. 미세기포의 이동속도를 측정하기 위하여 기계식 초퍼를 사용하였으며, 노출시간은 10ms이었다.

X선 미세영상기법으로 획득한 미세기포의 X선

영상은 Fig. 2(b)와 같으며 그 크기를 측정하기 위하여 본 연구에서는 디지털 영상처리기법을 도입하였다. 원시 영상이 고해상도이고 비교적 선명하지만 영상에 포함된 노이즈와 불필요한 배경을 제거하기 위해 저대역 필터(low-pass filter)인 가우시안(Gaussian) 필터를 이용하였다.

노이즈가 제거된 X선 영상에 edge-detection 방법을 적용하여 기포의 형상을 찾는다. 그리고 기포의 크기를 구하기 위해 탐색함수로서 프레넬 회절 무늬를 모사한 프레넬 적분함수를 이용하였다. 기포영상에 대해 탐색함수를 가로방향( $r$ )과 세로방향( $z$ )으로 적용하여 기포의 형상과 크기( $R_r$ ,  $R_z$ )를 측정하였다.<sup>(11)</sup>

미세기포의 속도장 측정에는 본 연구실에서 개발한 2-프레임 PTV 기법<sup>(12)</sup>을 적용하였다. 미세기포의 크기를 측정하면서 구한  $R_r$ 과  $R_z$  정보를 이용하여 기포의 중심을 구하고, 이 입자의 중심에 임의의 크기의 흑색 원형 마스크(masking)를 입혔다. 그리고 이 영상을 반전(inverting)시켜 PTV 속도장 측정 알고리즘을 적용할 수 있는 입자영상으로 만든다. 일정시간간격( $\Delta t$ )으로 취득한 2장의 입자영상에 대해 2-프레임 PTV 기법을 적용하여 각 기포의 속도벡터를 구하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

미세기포의 크기 측정의 정확도를 알아보기 위하여 미리 굵기를 알고 있는 광섬유의 X선 영상을 획득하여, 측정된 결과와 비교 분석하였다. 직경이  $190\mu\text{m}$ 인 광섬유의 회절영상에 대해 디지털 영상처리과정을 통해 광섬유의 직경은 약 0.2%의 매우 작은 오차를 가지며, 이는 약 0.56픽셀에 해당한다. 이러한 오차는 고해상도 CCD 카메라를 사용하면 더욱 줄일 수 있을 것이다.

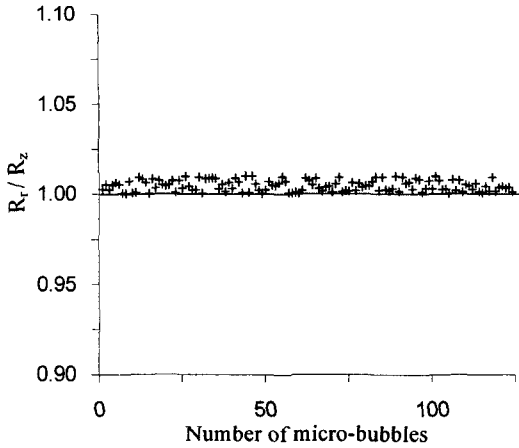


Fig. 5 The ratio of  $R_r$  to  $R_z$  with micro-bubbles numbers

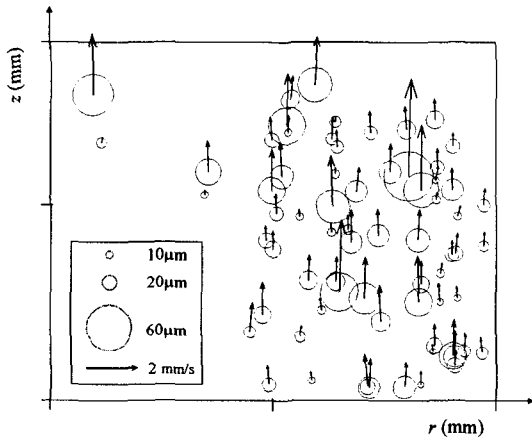


Fig. 6 Instantaneous distribution of the size and velocity of micro-bubbles

Fig. 5는 측정된 미세기포의  $r$ 방향 크기( $R_r$ )와  $z$ 방향크기( $R_z$ )의 비를 나타낸 것으로  $R_r/R_z$ 이 거의 1에 가까운 값을 가지고 있다. 이것은 미세기포일 수록 표면에 존재하는 장력(tension)에 상관없이 구 모양을 이룬다는 기존의 결과와 잘 일치한다. 전체적으로 평균값은 약 1.012정도이고, 표준편차는 약 0.45%이다.  $R_r/R_z$ 가 1보다 조금 큰 값을 가지는 것은 본 연구에 사용된 X선 빔의 특성으로서 수직방향( $z$ )의 퍼짐정도보다 수평방향( $r$ )의 퍼짐정도가 크기 때문이다. 실제 수평방향의 프레넬 회절무늬에서 첫번째 피크(peak) 사이의 폭이 수직방향 폭보다 약간 넓게 측정된다.

Fig. 6은 임의 순간에 동시에 측정된 미세기포의 크기와 속도벡터를 나타낸 결과이다. 측정부의 크기는  $858 \times 686 \mu\text{m}^2$ 이며 미세기포의 상승속도에 기초한 레이놀즈 수는 0.5 이하이다. 그림에 나타난

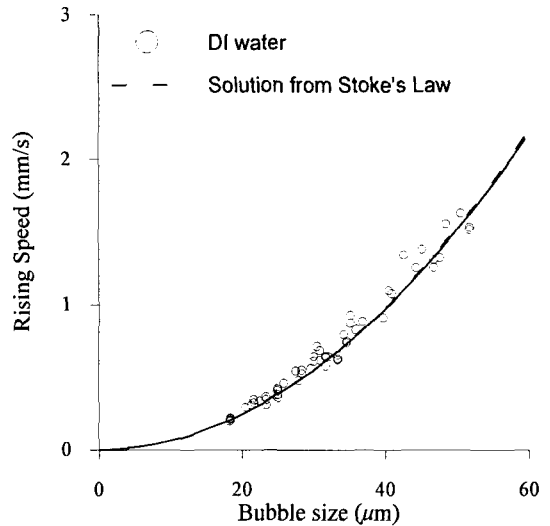


Fig. 7 Relationship between the bubble size and moving velocity

바와 같이 튜브 내에는 다양한 크기의 미세기포가 존재하며 대략적으로 직경이  $20 \mu\text{m} \sim 60 \mu\text{m}$ 이다. 미세기포들의 순간 속도장 결과로부터 미세기포가 피치(pitch)가 큰 나선 운동을 하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 서로 겹쳐진 미세기포들에 대해서도 크기 및 속도벡터를 정확하게 획득할 수 있었다. 이것으로부터 기존의 가시광선 영역의 빛을 이용한 기법이 가지고 있던 문제점들을 X선 미세영상 기법은 해결할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 측정된 기포의 크기에 따른 상승속도 변화를 나타낸 것이다. 미세기포의 X선 영상을 획득하는 동안 작동유체의 온도는 평균  $35^\circ\text{C}$ 이었다. 작동유체로 사용한 3차 증류수의 경우, 미세기포의 상승 속도( $U_T$ )는 기포크기( $d_b$ )의 제곱에 비례하며 기존의 이론식인 Hadamard-Rybczynski식에 Stokes 법칙을 적용한 아래의 공식<sup>(13)</sup>과 잘 일치하고 있다.

$$U_T = \frac{gd_b^2}{18\mu} \Delta\rho \quad (3)$$

여기서,  $\mu$ 와  $\rho$ 는 작동유체의 점성계수와 밀도를 나타낸다. Stokes 법칙을 적용한 것은 미세기포를 강체로 가정한 것으로서, 기포의 크기가 작을수록 이러한 가정이 잘 맞는다고 알려져 있다.

결론적으로 본 연구에서 개발한 X선 미세영상 기법은 가시광선 영역의 광원을 이용하는 기존의 측정기법에 비해 보다 작은 크기의 미세기포의 크기와 속도를 높은 분해능으로 동시에 측정할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 방사광 X선 미세영상 기법을 이용하여 미세기포의 크기와 속도를 동시에 측정할 수 있는 측정 기법을 개발하고, 이를 불투명한 튜브 내부에서 상승하는 미세기포에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) X선 미세영상기법을 개발하여 기존의 가시광선을 이용한 기포측정 기법에 비해 높은 분해능으로 수 십  $\mu\text{m}$  크기의 미세한 기포를 정확히 측정할 수 있었다.

(2) 서로 겹쳐진 미세기포들에 대해서도 크기와 속도를 동시에 정확히 측정할 수 있었다.

(3) 불투명 튜브 내부를 상승하는 미세기포의 속도는 기포의 크기의 제곱에 비례하였으며, 기존의 결과와 잘 일치하였다.

## 후 기

본 연구는 국가지정연구실(NRL)사업의 지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kevin, W., Skyba, D. M. and Firschke, C., 1997, "Interactions Between Microbubbles and Ultrasound: In Vitro and In Vivo Observations," *Journal of the American College of Cardiology*, Vol. 29, pp. 1081~1088.
- (2) 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.
- (3) Hassan, Y. A., Ortiz-Villafuerte, J. and Schmidl, W. D., 2001, "Three-Dimensional Measurements of Single

Bubble Dynamics in a Small Diameter Pipe Using Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 27, pp. 817~842.

- (4) 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.
- (5) Hassan, Y. A., Ortiz-Villafuerte, J. and Schmidl, W., 1999, "Measurements of a Rising Single Bubble in Stagnant Liquid," *Journal Flow Visualization and Image Processing*, Vol. 6, pp. 129~137.
- (6) Leavers, V. F., 1992, "Shape Detection in Computer Vision Using the Hough Transform," Springer, London.
- (7) Hwu, Y., Tsai, W., Grosio, A., Margaritondo, G. and Je, J. H., 2002, "Coherence-Enhanced Synchrotron Radiology: Simple Theory and Practical Application," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 35, pp. R105~R120.
- (8) Lim, B., Khil, T., Jung, K. and Yoon, Y., 2003, "Drop Size Measurement Using Image Processing Method under High Ambient Pressure Condition," *Proceeding of 2<sup>nd</sup> KSV Conference*, POSTECH, Pohang, Korea, Nov. 14, pp. 111~114.
- (9) Brenn, G., Braeske, H. and Durst, F., 1961, "Investigation of the Unsteady Two-phase Flow with Small Bubbles in a Model Bubble Column Using Phase-Doppler Anemometry," *Chemical Engineering Science*, Vol. 57, pp. 5143~5159.
- (10) Dodge, L. G., 1984, "Calibration of Malvern Particle Sizer," *Applied Optics*, Vol. 23, pp. 2415~2419.
- (11) Moore, R., 1999, "Optimal Edge-Based Shape Detection," *Mathematics Dept.*, Macquarie University, Sydney.
- (12) Baek, S. J. and Lee, S. J., 1996, "A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," *Experiments in Fluids*, Vol. 22(1), pp. 23~32.
- (13) Clift, R., 1978, "Bubbles, Drops, and Particles," *Academic*, New York.