

X-ray 미세 영상기법을 이용한 불투명 튜브 내부 미세기포의 크기 및 속도 동시 측정

김석* · 이상준†

Simultaneous measurement of size and velocity of micro-bubbles in an opaque tube using X-ray micro-imaging technique

Seok Kim and Sang Joon Lee

Abstract

The 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 different refractive index. Micro-bubbles of 20~120 μm diameter moving upward in an opaque tube ($\phi=2.7\text{mm}$) were tested. For two different working fluids of tap water and DI water, the measured velocity of micro-bubbles is roughly proportional to the square of bubble size.

Key Words : X-ray micro-imaging(X선 미세영상), Phase contrast(위상 대비), Micro-Bubble(미세기포), Two-phase flow(이상유동)

1. 서 론

접촉 방사선(contact radiography), 투사 현미경(projection microscopy), X선 단층촬영법(tomography)과 같은 X선 영상기법은 재료과학, 생물학, 의학 분야 등에서 비파괴적으로 물체의 내부 구조를 밝히는데 이용되어 오고 있다. 그러나 이러한 방법들은 주로 흡수(absorption) 차이에 의한 대비영상(contrast image)을 제공하여 응용되는 분야에 따라서 분해능이 10~100 μm 정도이다. 따라서, 보다 미세한 구조나 유동특성을 밝히기 위해서는 분해능이 수 μm 이하가 되어야 한다. 이와 같은 필요에 따라 위상 대비(phase contrast) 영상기법이 개발되었다. 일반적으로 생체조직이나 낮은 전자밀도를

가진 물질의 내부구조를 검사함에 있어서 soft X-ray보다 hard X-ray가 유리하다. 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 δ 는 굴절률이고 β 는 흡수율이다. 실제 높은 에너지의 X선에서 β 는 거의 1이고 원자량에 따라 미소하게 변하므로 거의 흡수대비가 일어나지 않는다. 따라서 굴절률 δ 의 변화로부터 파동(wave)의 위상을 검출하여 보다 높은 분해능으로 측정할 수 있다. 그러나 빛의 위상은 기록매체에 바로 기록할 수 없으므로 이를 위해 여러가지 다양한 방법이 이용되고 있다. 예로서 Soft X-ray는 홀로그래피나 zone plate를 이용하고 hard X-ray는 간섭계(interferometry)와 analyzer crystal을 이용하고 있다. 최근에는 방사광 가속기에서 나오는 높은 에너지를 가진 X선의 응집(coherent) 특성을 이용한 in-line 홀로그래피 기법으로 위상 대비 영상을 측정하고 있다.

* 포항공과대학교, 기계공학과 대학원

E-mail : jandi@postech.ac.kr

† 포항공과대학교, 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

본 연구에서는 포항 방사광 가속기(PAL)의 1B2 micro-probe 라인을 이용하여 위상 대비 영상 기법을 이용하여 미세기포 영상을 취득하고 이미 지 처리과정을 거쳐 기포의 크기와 이동 속도를 동시에 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

미세기포는 단위길이 당 저항이 530Ω인 니켈 선을 사용하여 순간적으로 열을 가해 발생시켰다. 발생된 미세기포는 부력에 의해 수직 상승하여 고 분자 물질로 만들어진 직경 2.7mm의 빨대(straw)를 지난다. 고분자 물질로 만들어진 빨대는 불투 명하여 내부 유동흐름을 눈으로 볼 수 없다. X선 영상을 취득한 실험 단면은 기포 발생위치로부터 수직 방향으로 약 8cm 위치이다. X선은 가시광선 영역이 아니어서 일종의 크리스탈인 방사선 형광체(scintillator)를 이용하여 X선을 최대 파장이 475nm인 가시광선으로 변환시킨다. 이를 Cooled CCD 카메라를 이용하여 실시간으로 취득하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 측정된 기포의 크기에 따른 상승 속도 결과를 나타낸 것이다. 작동유체로는 수돗물과 전 해질이 없는 증류수를 사용하여 그 결과를 비교하였다. 측정된 기포의 크기는 대략 18~60μm이며 속도와 크기에 기초한 레이놀즈수는 최대 1 미만으로 저속 유동에 해당한다. 미세기포의 경우 기 포 내부에 채우고 있는 유체(가스 혹은 액체)에 상관없이 강성체(rigid body)로 해석할 수 있다. Hadamard-Rybczynski 공식⁽²⁾에 의해 최종 속도 (terminal velocity), U 는 다음과 같이 주어진다.

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

여기서, r_o 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.

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

따라서, 최종속도는 기포 크기의 제곱에 비례하게 된다. 특히, 증류수보다는 수돗물이 보다 이론값에 가까운 결과를 보였으며, 기포의 크기가 작을 수록 작동유체의 오염이나 이온물질의 포함 정도

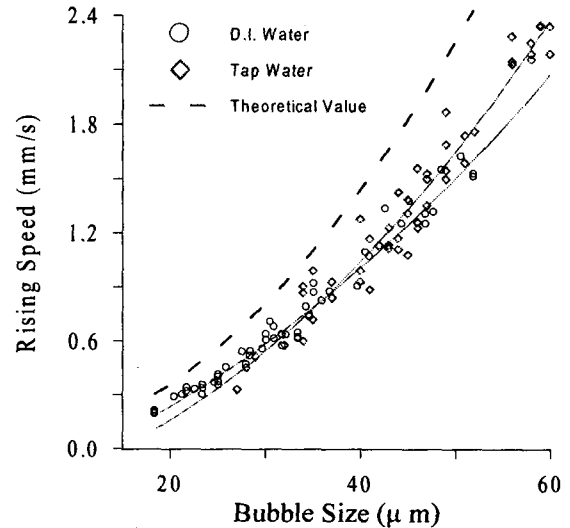


Fig. 1 Relationship between the bubble size and moving velocity

에도 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구에서 구한 측정결과는 위의 이론값과 유사한 경향을 보여주고 있다.

4. 결 론

방사광 가속기의 백색광을 이용하여 불투명 튜브 내부를 상승하는 미세기포의 크기와 속도를 동 시 측정하였다. 미세기포의 상승 속도는 기포 크 기의 제곱에 비례하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 1) Raven, C., Snigirev, A., et al., 1996, "Phase-Contrast Microtomography with Coherent High Energy Synchrotron X Rays," Appl. Phys. Lett., Vol. 69, pp. 1826~1828.
- 2) Blake, J.R., Boulton-Stone, J.M., 1993, "Bubble Dynamics and Interface Phenomena," in Proceedings of an IUTAM Symposium, Birmingham, U.K., Kluwer Academic Publishers.
- 3) Clift et al., 1978, "Bubbles, Drops, and Particles," Academic, Newyork.