

X-ray Micro-Imaging 기법 소개 및 불투명 튜브 내부의 마이크로 버블 가시화 연구

이상준[†] · 김석* · 백부근*

X-ray Micro-Imaging Technique and Its Application to Micro-Bubbles in an Opaque Tube

Sang-Joon Lee · Seok Kim · Bu-Geun Paik

Abstract

Imaging techniques using x-ray beam at high energies (>6KeV) such as contact radiography, projection microscopy, and tomography have been used to nondestructively discern internal structure of objects in material science, biology, and medicine. This paper introduces the x-ray micro-imaging method using 1B2 micro-probe line of PAL (Pohang Accelerator Laboratory). Cross-sectional information on low electron density materials can be obtained by probing a sample with coherent synchrotron x-ray beam in an in-line holography setup. Living organism such as plants, insects are practically transparent to high energy x-rays and create phase shift images of x-ray wave front. X-ray micro-images of micro-bubbles of 20~120 μm diameter in an opaque tube were recorded. Clear phase contrast images were obtained at interfaces between bubbles and surrounding liquid due to different decrements of refractive index.

Key Words : X-ray Micro-Imaging(X선 마이크로 이미징), Phase Contrast(위상 대비), Micro-Bubble(미세기포)

1. 서 론

접촉 방사선(contact radiography), 투사 현미경법(projection microscopy), X선 단층촬영법(tomography)과 같은 높은 에너지를 이용한 X선 이미징 기법은 재료과학, 생물학, 의학분야 등에서 비파괴적으로 물체의 내부 구조를 밝히는데 이

용되어 오고 있다. 그러나 이러한 방법은 주로 흡수차이에 의한 대비영상(contrast image)으로서 응용되는 분야에 따라서는 분해능이 10~100 μm 정도이다. 따라서, 보다 미세한 구조나 유동특성을 밝히기 위해서는 분해능이 수 μm 이하가 되어야 한다. 이와 같은 필요에 따라 위상 대비 이미징(phase contrast imaging) 기법이 개발되었다. 일반적으로 생체조직이나 낮은 전자밀도를 가진 물질의 내부구조 검사에 있어서 soft x-ray보다 hard x-ray가 보다 유리하다. 이것은 두꺼운 표본일수록 낮은 흡수선량(absorbed dose)으로 실험하기 때문이다. X선에서의 굴절률 n 은 다음과 같이 주어진다.

* 포항공과대학교, 기계공학과 대학원
E-mail : jandi@postech.ac.kr

[†] 회원, 포항공과대학교, 기계공학과
E-mail : sjlee@postech.ac.kr

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

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 감소량으로부터 파동(wave)의 위상을 검출하여 보다 높은 분해능으로 측정할 수 있다. 그러나 빛의 위상은 직접적으로 기록매체에 기록할 수 없다. 그리하여 Gabor 이후 많은 방법이 개발되어 이용되고 있다. Soft x-ray는 홀로그래피나 zone plate를 이용하고 hard x-ray는 두 빔 간섭계(two-beam interferometry)와 analyzer crystal을 이용하고 있다. 최근 들어서는 제3세대 방사광 가속기에서 나오는 높은 에너지를 가진 X선의 응집(coherent) 특성을 이용한 in-line 홀로그래피를 이용하여 위상 대비 영상을 측정하고 있다.

본 연구에서는 포항 방사광 가속기(PAL)의 1B2 micro-probe 라인을 이용하여 위상 대비 이미징 기법을 통해 미세기포를 측정하고 이미지 처리과정을 통해 기포의 이동 속도를 측정하였으며, 제브라 피쉬(zebra fish)의 내부구조를 관찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 광원으로는 포항 방사광 가속기의 1B2 라인의 백색광(white beam)을 이용하였으며 광원의 크기는 대략 $640\mu\text{m} \times 480\mu\text{m}$ 이며 빔 포트(beam port)에서 실험장치까지의 거리는 약 26m이고, 실험 단면에서 이미지 획득장치까지의 거리는 약 20cm이다. 저장링에서 접선방향으로 나온 전자는 K-B 미러에서 집속되고 ionization chamber는 통과하는 X선을 모니터링한다.

미세기포는 단위길이당 저항이 530Ω 인 니켈 선을 사용하여 양단에 전압을 걸어 순간적으로 열을 가해 주위의 유체가 기화 혹은 폭발을 일으키므로써 발생시켰다. 발생된 미세기포는 부력에 의해 수직 상승하여 고분자 물질로 만들어진 직경 2.7mm의 튜브를 지난다. 본 실험에서는 우리 주위에서 쉽게 구할 수 있는 빨대(straw)를 사용했다. X-ray 영상을 취득한 실험 단면은 기포 발생 위치에서 수직 방향으로 약 8cm 위치이다. 실험 단면을 지난 X선은 가시광선 영역이 아니어서 실재 눈으로 볼 수 없다. 따라서 방사선 형광체(scintillator)를 이용하여 X선을 최대 파장이 475nm인 가시광선으로 바꾼다. 이를 아날로그 CCD 카메라를 이용하여 실시간으로 영상을 취득

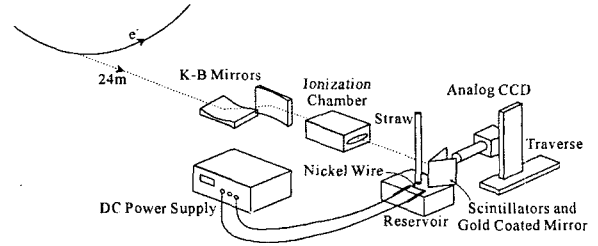


Fig. 1 Schematic diagram of x-ray micro imaging experimental setup

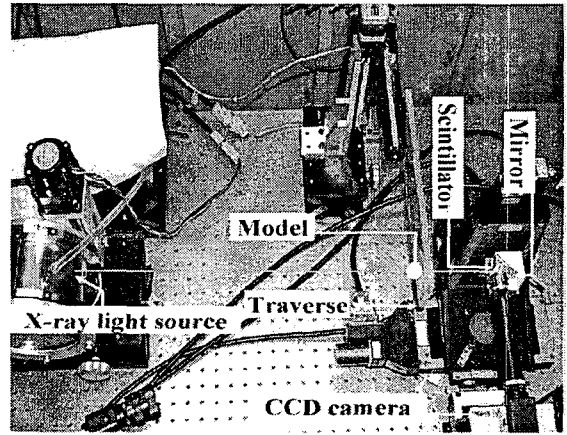
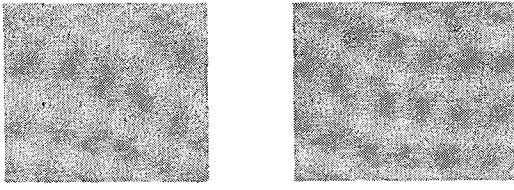


Fig. 2 Photograph of x-ray micro imaging experiment setup

하였다. 엄밀한 의미에서 위상 대비 기법을 적용하기 위해서는 K-B 미러 전방에 Si 4-crystal channel cut monochromator를 설치하여 단색광(mono-beam)을 만들어야 한다. 1B2 라인에서 이용하고 있는 단색화장치(monochromator)에서 만들어진 단색광의 에너지는 8KeV로서 파장은 약 1.6 이다. 이 에너지에서 기포나 버블에 대한 흡수율은 물보다 50배 정도 작다. Snigirev 등^(1, 2)의 연구에서 사용한 단색광은 10~60KeV로써 본 연구의 단색광에 비해서 매우 강한 에너지의 X선을 이용하였다. 본 연구에 사용된 작동유체는 물로서 200nm이하의 파장의 빛은 거의 모두 흡수하는 특징을 가지고 있다. 따라서 매우 작은 에너지의 단색광과 긴 광경로로 인해 실제로 얻은 위상대비 영상은 상대적으로 매우 흐리다. 이 때문에 본 연구에서는 단색화장치를 사용하지 않고 백색광을 이용하였다. 백색광을 이용함으로써 물과 기포가 뚜렷이 구분되는 영상을 획득할 수 있었으며, 속도를 구하기 위한 영사처리도 용이하였다.

제브라 피쉬는 열대성 담수어류로 유전자의 기능연구에 적합한 척추동물 모델로 많이 이용되고 있다. Fig. 2는 제브라 피쉬 내부구조를 관찰하기



(a) Mono-beam (b) White beam
Fig. 3 Image quality comparison between mono beam and white beam

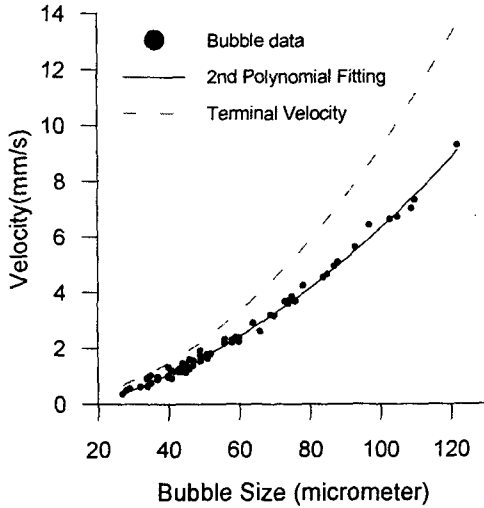


Fig. 4 Relationship between the bubble size and moving velocity

위한 실험장치의 구성사진이다. 기본 구성은 Fig. 1과 동일하며 제브라 피쉬를 고정한 이송장치를 움직이면서 제브라 피쉬의 내부구조에 대한 X-ray 영상을 취득하였다. 내부구조의 영상취득은 1K×1K CCD 카메라를 이용하였으며 취득된 영상의 크기는 1500×1500 μm²이다.

3.3 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 단색광과 백색광을 이용하여 얻은 기포의 영상을 비교한 것이다. 단색광을 이용한 경우(Fig. 3(a)), 백색광을 이용했을 경우(Fig. 3(b))에 비해 영상이 흐리고 구별하기 어렵다. 또한 사용한 아날로그 CCD 카메라의 해상도는 640×480 pixel²로 한 픽셀당 1μm의 분해능을 가져 실제 기포의 크기에 비해 분해능이 떨어진다. 따라서 이미지 처리를 이용한 기포 크기 측정에 있어서 정확한 경계를 정하기가 어렵게 된다.

Fig. 4는 본 연구에서 측정된 기포의 크기에 따른 상승 속도 결과이다. 측정된 기포의 크기는 대략 25~120μm이며 속도에 따른 레이놀즈수는 최

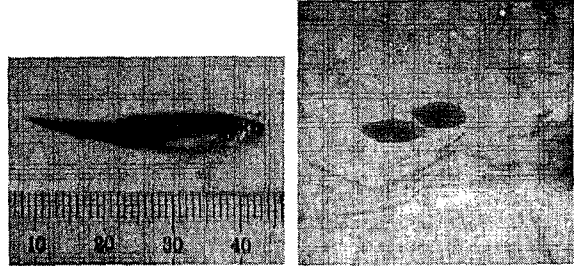


Fig. 5 Zebra fish and its internal structure image

대 1.3미만으로 매우 낮은 레이놀즈수의 저속 유동이다. 미세기포의 경우 내부가 가스 혹은 액체와 상관없이 강성체(rigid body)와 같이 해석할 수 있다. Hadamard-Rybczynski 공식⁽³⁾에 의해 최종 속도(terminal velocity), U 는 다음과 같이 주어진다.

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

여기서, r_o 는 초기 기포의 크기, ρ 는 주위 유체의 밀도, μ 는 점성계수이다. 프라임은 기포의 밀도를 나타낸다. 기포 내부가 가스라면 σ 를 무한대로 가정하여 최종속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

결국, 최종속도는 기포 크기의 제곱에 비례하게 된다. Fig. 4의 결과는 식(3)의 경향을 잘 보여주고 있다. 하지만 이론식으로 구한 최종속도와는 다소 차이가 있다.

최종속도에 이르는 데까지 걸리는 시간은 계산에 의하면 대략 400μs 이내이므로 테스트 단면을 지나기 전에 충분히 최종속도에 이르게 된다. 최종속도에 대한 이론값과 실험값의 이러한 차이는 기포의 3차원 운동이나 기포 표면의 오염에 의한 것으로 볼 수 있다. 실제로 Cliff 등⁽⁴⁾은 식(2)와 실제 기포의 상승속도를 실험적으로 비교하여 비교적 큰 기포의 경우 식(2)를 잘 만족하지만 매우 작은 크기의 기포의 경우에는 결과가 다르게 나온다고 밝혔다. 이러한 이유로 그들은 작은 크기의 기포 혹은 구형체는 크기는 작지만 internal circulation을 보이고 강성체 정도의 항력을 가지고 있다고 하였다. 또 다른 원인으로는 기포와 주위 유체와의 경계인 표면에서 표면활성분자(surface-active molecules)가 축적되기 때문이 아닌가 한다. 기포가 유체를 지나게 될 때, 오염된 분자들이 표면에 모이게 되고 표면에서의 점성

특성이 바뀌게 되는 것이다. 기포의 형상이 작은 구형일수록 면적이 상대적으로 더 작게 되므로 이러한 영향이 보다 크게 나타날 것으로 본다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용한 제브라 피쉬의 모습과 취득한 내부구조 영상이다. 백색광을 이용하여 위상대비 영상과 흡수대비 영상을 통해 제브라 피쉬 내부구조를 확인할 수 있었다. 그림에서 보는 바와 같이 흡수대비에는 물에 흡수된 X선 에너지에 기인하여 위상대비 영상으로 관찰 가능한 일부 내부구조나 기관이 보이지 않고 있다. 향후 보다 높은 에너지의 단색광을 이용하거나 분해능을 높일 수 있는 방법을 개발하게 된다면 보다 뚜렷한 내부구조 영상을 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결 론

본 연구에서는 포항 방사광 가속기의 단색광과 백색광을 이용하여 불투명 튜브 내부에 상승하는 미세기포의 속도와 제브라 피쉬의 내부구조를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 위상 대비를 이용한 X선 이미징 기법은 보이지 않는 불투명한 내부의 유동현상과 구조를 측정할 수 있다.

(2) 백색광을 이용한 위상 대비와 흡수율 차이를 이용한 X선 마이크로 이미징 기법은 작동유체가 물이고 측정대상이 공기일 경우 유용하였다.

(3) 측정된 미세기포의 속도는 크기의 제곱에 비례하였으며 미세한 기포일수록 작동유체의 오염이나 이온물질의 포함 정도에 영향을 받음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 POSRIP(Postech Research Initiative Program) 지원사업을 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) Snigirev, A., Snigireva, I., et al., 1995, "On the Possibilities of X-Ray Phase Contrast Micro imaging by Coherent High Energy Synchrotron Radiation," Rev. Sci. Instrum., Vol. 66, No. 12, pp. 5486~5492.

- (3) 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
- (4) Clift et al., 1978, "Bubbles, Drops, and Particles," Academic, Newyork.