

X-ray PIV 기법의 개발과 적용연구

이상준[†] · 김국배* · 김석* · 김양민*

Development of X-ray PIV Technique and Its Applications

Sang Joon Lee[†], Guk Bae Kim*, Seok Kim* and Yang-Min Kim*

Abstract. An x-ray PIV (Particle Image Velocimetry) technique was developed for measuring quantitative information on flows inside opaque conduits and/or opaque-fluid flows. To check the performance of the x-ray PIV technique developed, it was applied to a liquid flow in an opaque Teflon tube. To acquire x-ray images suitable for PIV velocity field measurements, the refraction-based edge enhancement mechanism was employed with seeding detectable tracer particles. The amassed velocity field data obtained were in a reasonable agreement with the theoretical prediction. The x-ray PIV technique was also applied to get velocity fields of blood flow and to measure size and velocity of micro-bubbles simultaneously, and to visualize the water refilling process in bamboo leaves. The x-ray PIV was found to be a powerful transmission-type flow imaging technique for measuring quantitative information of flows inside opaque objects and various opaque-fluid flows.

Key Words : X-ray imaging technique (x선 영상기법), PIV (입자영상유속계), Opaque tube (불투명한 튜브), Blood flow (혈액 유동), Micro-bubbles (미세기포), Water refilling (물의 재충진)

1. 서 론

정량적 유동가시화 기법 중 하나인 PIV (particle image velocimetry) 기법은 종래 점측정 방식과는 달리 입자영상으로부터 전체 속도장 정보를 획득할 수 있는 측정기법이다⁽¹⁾. 일반적인 PIV 기법은 유동 내부에 시딩(seeding)된 추적입자를 조명하기 위해 레이저와 같은 가시영역의 광원을 사용하기 때문에, 투명한 작동유체와 투명한 창(window)을 필요로 한다. 따라서 불투명한 물체 내부의 유체 유동이나 불투명한 유체흐름에 적용할 수 없다. 이러한 PIV 기법의 한계를 극복하기 위해, 본 연구에서는 x선을 광원으로 하는 x-ray PIV 기법을 개발하였다. 이 첨단 유동가시화 기법의 경우 x선 영상기법의 원리, 추종입자의 선정, 선명한 x선 입자영상을 얻기 위한 메커니즘 등에 관한 많은 고찰이 요구되고 있다.

본 연구실에서는 포항방사광가속기연구소(Pohang accelerator laboratory, PAL)의 가속기 x선을 광원으로 사용하였다. 가속기 x선은 임상용 혹은 비파괴검사용 x선에 비해 코히어런스(coherence) 특성이 매우 우수하여 다양한 방사선학(radiology) 연구에 사용되고 있다⁽²⁻⁴⁾. 본 연구에서 사용하고 있는 x선 위상대비(phase contrast) 영상기법⁽⁵⁻⁹⁾은 일반적인 코히어런스가 상대적으로 낮은 의료용 x선으로는 불가능하다.

의료계에 사용되고 있는 임상용 x선 장비들은 x선의 흡수대비(absorption contrast) 영상기법을 이용하고 있는데, 이는 샘플을 구성하는 내부 물질들이 갖는 x선량의 흡수율 차이를 이용하여 내부 구조를 가시화하는 방법이다. 그러나, 인체나 생체 내부 유체의 경우 주위 물질들의 x선 흡수율이 유사하여 흡수대비 영상기법을 적용하기 어렵다. 반면에, 가속기 x선을 이용한 위상 대비 영상기법은 생체 내부 구성 물질들의 경계(interface) 부분에서 발생하는 x선의 위상 차이를 이용하여 영상대비를 획득하는 방법으로, 흡수 대비 영상기법에 비해 보다 적은 x선 선량(dose)으로

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

*포항공과대학교 기계공학과 대학원

선명한 영상을 얻을 수 있다. 이러한 위상 대비 영상 기법은 x선의 굴절 및 Fresnel 회절(diffraction) 메커니즘을 이용하고 있는데⁽²⁻⁴⁾, 굴절과 Fresnel 회절의 상대적인 비중은 실험조건 및 샘플의 종류에 의해서 결정된다⁽¹⁰⁾.

2. X-ray PIV 기법의 개발

본 실험은 PAL의 1B2 빔라인에서 수행되었으며, Fig. 1은 구축된 x-ray PIV 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 가속기 저장링(storage ring)에서 나오는 x선은 샘플을 투과한 후 신틸레이터(scintillator, CdWO₄)에 도달하게 된다. 신틸레이터는 눈에 보이지 않는 x선을 가시영역의 빛으로 바꾸어 주는 역할을 하는 결정체(crystal)로 여기에 맺힌 x선 영상은 10배 대물렌즈가 장착된 CCD 카메라로 취득하였다. 가속기 x선은 연속적으로 공급되기 때문에 원하는 순간에 펄스 형태의 x선을 생성하기 위해 기계식 셔터를 사용하였다. 그리고, CCD 카메라와 셔터를 동기시켜 연속된 두 장의 입자영상을 취득하고, 상호상관 방식의 PIV 알고리즘을 적용하여 속도장을 구하였다.

X-ray PIV 기법의 개발에 있어서 해결해야 하는 문제점들 중의 하나는 x선 영상기법과 PIV 기법을 동시에 만족시킬 수 있는 추적입자를 선정하는 일이다. X-ray PIV용 추적입자에 요구되는 사항은 다음과 같다. 먼저, x선 영상기법을 적용하였을 때 선명한 x선 입자영상을 제공하여야 하며, 조사되는 x선에 대해서 안정성을 가져야 한다. 그리고 유체 유동에 대한 추종성이 우수하여야 한다. 본 연구에서는 미세 크기의 폴리스틸렌(polystyrene) 입자, 유리구슬, 미세기포, 폴

리머(polymer) 입자, 알루미나(Al₂O₃) 입자 등을 대상으로 추적 입자로서의 적합성을 검토한 결과, 알루미나 입자, 미세기포, 폴리머 입자 등이 적합한 것으로 나타났다. 특히, 알루미나 입자는 x선에 대해 높은 안정성과 높은 흡수율을 가지며, 경계부분에서 우수한 위상대비 영상을 유도하여 선명한 x선 입자영상을 제공하였다.

개발된 x-ray PIV 기법의 성능과 유용성을 확인하기 위해, 불투명한 물체 내부의 유체 유동에 적용하여 정량적인 속도장 정보를 구하였다. 실험에 사용된 알루미나 입자의 직경은 3 μm, 밀도는 3.965 g/cm³이며, 유동에 대한 추종성을 고려하여 글리세린(glycerin, ρ=1.260 g/cm³)을 작동유체로 사용하였다. 내경이 750 μm인 불투명한 테프론 재질의 튜브에 주사기 펌프로 위에서 아래방향으로 작동유체를 흘려 주었다. 관측영역의 크기는 1.5 × 1.5 mm²이며, 상호상관 방식의 PIV 알고리즘을 사용하여 12.3 × 12.3 μm²의 공간분해능으로 속도장을 측정하였다.

Fig. 2는 x-ray PIV 기법을 이용하여 측정된 100장의 순간 속도장을 앙상블 평균하여 구한 주유동방향 속도성분의 평균속도분포를 나타낸 것이다. 벽면 부근에서 유속이 느리고 중심 부분의 속도가 빠른 관류동의 전형적인 유동특성을 보여주고 있다. 이로부터 x-ray PIV 기법을 이용하여 불투명한 물체 내부 유체

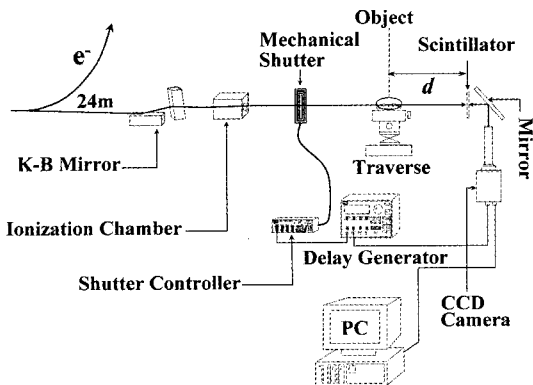


Fig. 1. Schematic diagram of x-ray PIV system.

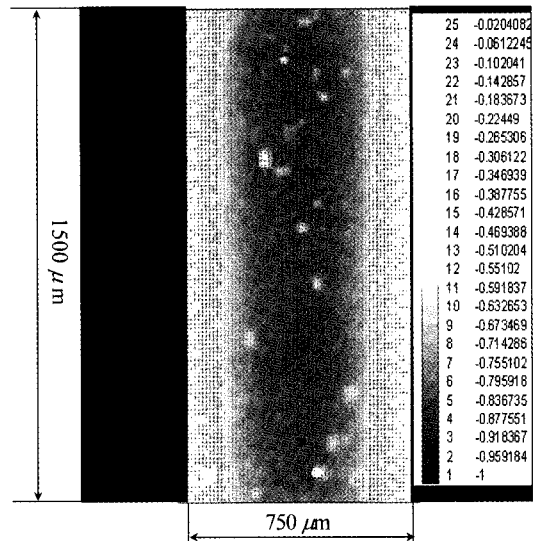


Fig. 2. Ensemble-averaged streamwise mean velocity field.

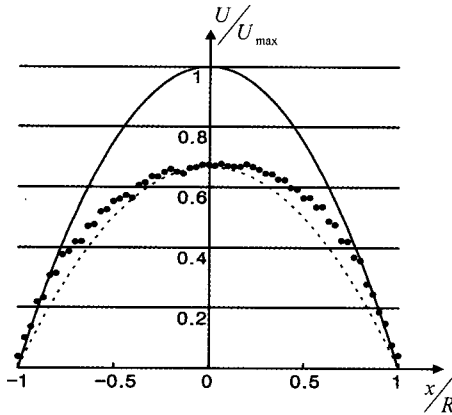


Fig. 3. Comparison of streamwise mean velocity profiles; —: theoretical velocity profile at center section, ---: theoretical amassed velocity profile, ... : measured amassed velocity profile.

유동의 정량적인 속도장 정보를 구할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 2에서 나타나 있는 점 모양의 영역들은 신틸레이터 표면의 흠집에 의한 것으로, 깨끗한 신틸레이터를 사용하면 해결할 수 있는 문제이다.

Fig. 3은 평균 속도장 결과로부터 임의의 단면에서의 평균속도 분포를 추출하고, 이를 이론값과 비교한 것이다. 실선은 관 내부 중앙 단면에서의 이론적인 유속분포를 나타내며 점선은 빔 방향으로 누적된 속도성분을 이론적으로 계산한 값이다. 그리고, 점들은 본 실험에서 x-ray PIV 기법으로 측정된 속도분포를 나타낸다.

전체적으로 실험결과가 이론값들과 비교적 잘 일치하고 있다. 그런데 자세히 보면 벽면 근처에서 측정값이 이론값보다 다소 큰 값을 가지는데, 이것은 추종입자인 알루미늄의 밀도가 작동유체보다 크기 때문인 것으로 생각되어 진다. 즉, 밀도차이에 기인한 추종입자와 작동유체 사이의 속도차이는 상대적으로 속도가 낮은 벽면 근처에서 보다 두드러지게 나타난다. 결과적으로, 기존의 유동가시화 기법으로 측정이 불가능하였던 불투명한 물체 내부 유동을 x-ray PIV 기법을 이용하여 정량적으로 측정하는 것이 가능하게 되었다⁽¹¹⁾.

3. X-ray PIV 기법의 적용 연구

3.1 혈액유동의 정량적 가시화

본 연구에서 개발한 x-ray PIV 기법을 수 mm 두께의 불투명한 혈액유동에 적용하여 정량적인 속도장

정보를 획득하였다⁽¹²⁾. 이를 위해, 혈액의 x선 회절 및 간섭 기반의 영상 메커니즘들을 이용하여 혈류의 프린지 패턴(fringe pattern)을 얻고, 이로부터 유동정보를 구하였다. 코히어런스 특성이 우수한 가속기 x선은 샘플의 경계(edge)에서 Fresnel 회절 패턴을 제공하는데, 이러한 회절패턴은 샘플을 투과하면서 발생하는 파동 간의 위상 차이에 기인해 유도되게 된다. Fresnel 회절 패턴은 샘플과 신틸레이터 사이의 거리(d)가 증가함에 따라 뚜렷해진다. 본 연구에서는 먼저 이러한 회절 기반의 영상패턴을 최적화하였다. 다음으로 혈액을 구성하는 혈구들에 의한 간섭 기반의 x선 영상 패턴이 유도됨을 발견하였으며, 혈액 샘플의 두께(t)를 조절함으로써 간섭에 의해 유도되는 혈류 패턴을 최적화하였다. 이렇게 최적화된 실험조건으로 얻은 혈액 유동의 x선 영상에 PIV 기법을 적용하여 정량적인 속도장 정보를 획득하였다.

본 연구에 사용된 관은 폭 $490 \mu\text{m}$, 깊이 $1390 \mu\text{m}$, 길이 20 mm 이며, x선이 깊이 방향으로 투과하게 되므로 혈액 샘플의 두께(t)는 $1390 \mu\text{m}$ 가 된다. 샘플과 카메라 사이 거리(d)는 40 cm 이며, 관측영역의 크기는 $686 \mu\text{m} \times 514 \mu\text{m}$ 이다. 추적입자 및 조영제(contrast medium) 등은 전혀 주입하지 않았으며, 전혈(whole blood)을 작동유체로 사용하였다. 작동유체는 주사기 펌프를 이용하여 위에서 수직 아래 방향으로 흘러가도록 하였다.

Fig. 4은 200장의 순간 속도장 결과를 앙상블 평균

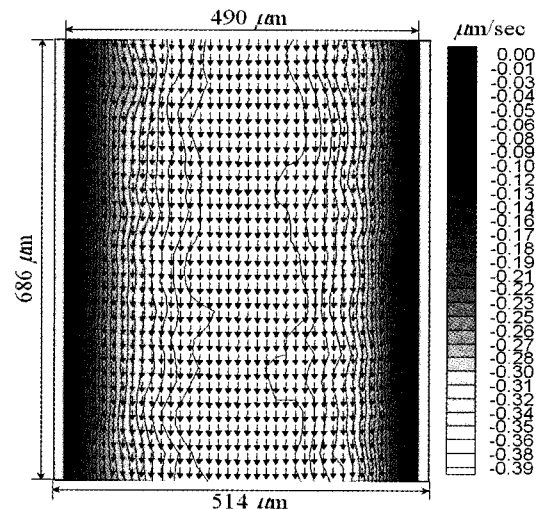


Fig. 4. Streamwise mean velocity field of blood flow in a microchannel.

하여 구한 주유동 방향의 평균 속도장 결과를 보여주고 있다. 전체적으로 벽면 근처에서 유속이 느리고 중앙 부분에서 빠른 관 유동의 전형적인 유동특성을 보여주고 있다. 이 결과는 불투명한 액체인 혈액 자체를 추적입자 없이 가시화했다는 측면과 혈구들의 회절 패턴 영상에 PIV 기법을 적용하여 혈류의 속도장 정보를 획득하였다는 측면에서 큰 의미를 가진다. X-ray PIV 기법을 이용한 혈액 유동의 계측 기술은 향후 생체 내부 유동 연구에 크게 공헌할 것으로 기대된다.

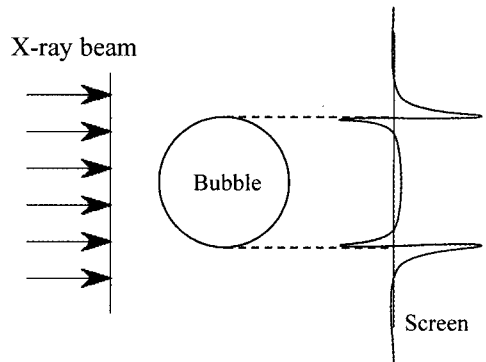
3.2 미세기포의 크기 및 속도장 동시측정

일반적으로 가시광선을 이용한 기포의 크기 측정에 있어서, 기포의 중심으로부터 산란파의 일정부분까지를 기포의 크기로 가정하거나 기포나 액적 주위의 회절무늬를 이용하여 크기를 측정하고 있다. 따라서 기포의 크기 측정에는 오차가 존재하며 기포의 크기가 작을수록 측정오차가 커지게 된다. Lim 등⁽¹³⁾은 백색광을 이용하여 직경이 40 μm 이하인 액적을 측정할 경우 측정오차가 10% 이상이라고 하였다.

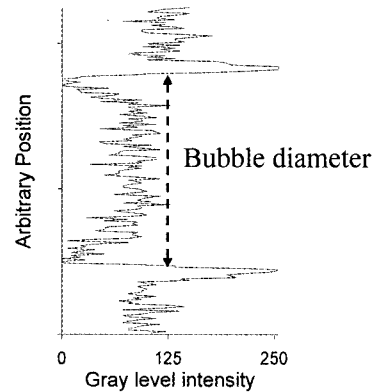
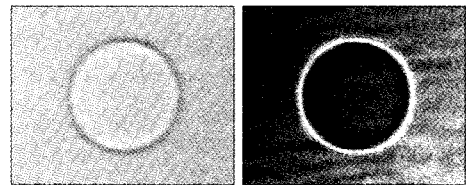
가시광선을 이용한 기존의 측정방법들의 경우 광원의 분해능에 따라 측정할 수 있는 미세기포의 크기에 제한을 받는다. 반면에 x선은 투과성이 있어 불투명한 물체 내부를 관찰할 수 있으며, 실험대상인 미세기포는 물에 비해 x선 흡수가 매우 작아 대비(contrast)가 뚜렷한 영상을 얻을 수 있다. 따라서 x선 미세영상기법을 이용하여 미세기포의 크기를 정확하게 측정할 수 있으며 겹쳐진 기포들도 측정할 수 있다.

Fig. 5는 x선을 이용하여 미세기포의 영상을 측정하는 원리를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 일반적인 x선 회절특성을 나타낸 것으로, x선은 직진성이 매우 우수하지만, 밀도가 다른 매질과의 계면(interface)에서 Fresnel 회절이 발생하게 된다. 획득된 미세기포의 강도분포(Fig. 5(b))를 보면, Fresnel 회절무늬가 기포의 크기를 잘 나타내고 있다.

본 연구에서는 가느다란 니켈 선 양단에 전압을 걸어 열을 가함으로써 미소기포가 발생하도록 하였다. 작동유체로는 3차 증류수를 이용하였다. 발생된 미세기포는 직경 2.7 mm의 빨대(straw) 내부에서 부력에 의해 수직 상승한다. X선 영상을 취득한 측정단면은 기포 발생위치로부터 수직 방향으로 약 12 cm 위쪽에 위치하고 있다. 실험 샘플과 CCD 카메라 사이의



(a) Theoretical Fresnel diffraction pattern



(b) Real Fresnel diffraction pattern

Fig. 5. X-ray diffraction pattern of micro-bubbles.

거리는 약 30 cm이며, 노출시간은 10 ms이었다.

기포의 형상은 노이즈가 제거된 x선 영상에 edge-detection 방법을 적용하여 구하였다. 그리고 기포의 크기를 구하기 위한 탐색함수로 Fresnel 회절 무늬를 모사한 Fresnel 적분함수를 이용하였다. 취득한 기포 영상에 대해 탐색함수를 가로방향과 세로방향으로 적용하여 기포의 형상과 크기를 측정하고 기포의 중심을 구하였다. 미세기포의 속도장은 본 연구실에서 개발한 2-프레임 PTV 기법⁽¹⁴⁾을 적용하여 측정하였다.

Fig. 6은 임의 순간에 측정된 미세기포의 크기와 속도벡터를 나타낸 결과이다. 측정부의 크기는 858 × 686 μm^2 이며 미세기포의 상승속도에 기초한 레이놀

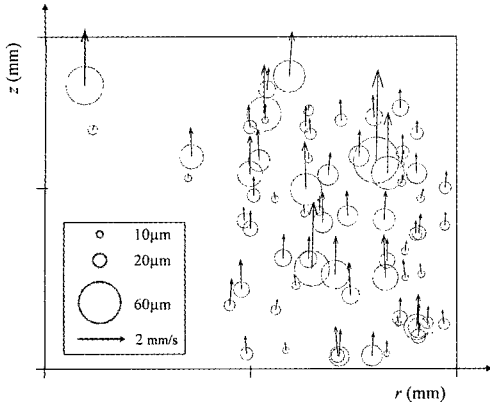


Fig. 6. Distribution of size and velocity of micro-bubbles.

즈 수는 0.5이하이다. 튜브 내에는 다양한 크기의 미세기포가 존재하며 대략적으로 직 경이 20~60 µm이다. 그리고, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 겹쳐진 미세기포들에 대해서도 크기 및 속도벡터를 정확하게 측정할 수 있었다. 결론적으로 본 연구에서 개발한 x-ray PIV 기법은 기존의 측정기법에 비해 보다 작은 크기의 미세기포의 크기와 속도를 높은 분해능으로 동시에 측정할 수 있었다⁽¹⁵⁾.

3.3 식물 목질부 내부 수액 유동

또 다른 응용으로 x-ray PIV 기법을 이용하여 식물 내부의 물관에서 물이 충전되는 과정을 관찰하였다. 본 기법은 염료(dye)를 수액에 첨가하지 않아도 되며, 이 분야 연구에 사용되고 있는 기존의 다른 해석기법들에 비해 공간분해능이 우수하고, 실시간 영상취득이 가능하다.

Fig. 7은 대나무 잎의 내부를 보여주는 x선 영상이다. 이 x-ray 영상으로부터 대나무 잎 내부 물관 조직에 대한 정보와 함께 원으로 표시한 부분에서 물관을 채워나가고 있는 수액 거동을 관찰할 수 있다. 그리고 연속적으로 취득한 x선 영상을 통해 물관의 모양, 물기 등의 선단(water front)의 거동에 관한 유동정보를 얻을 수 있다.

Fig. 8은 x-ray 영상을 해석하여 물관을 따라 수액의 이동속도를 보여주는 결과이다. 여기서 보면, 30.7 µm/s의 일정 속도로 움직이는 구간이 세 군데 존재하고, 그 사이 구간에서는 보다 빠른 속도로 수액이 이동하고 있다. 이러한 결과로부터 물의 이동에 있어서 어떤 일정한 규칙성이 있음을 유추할 수 있다.

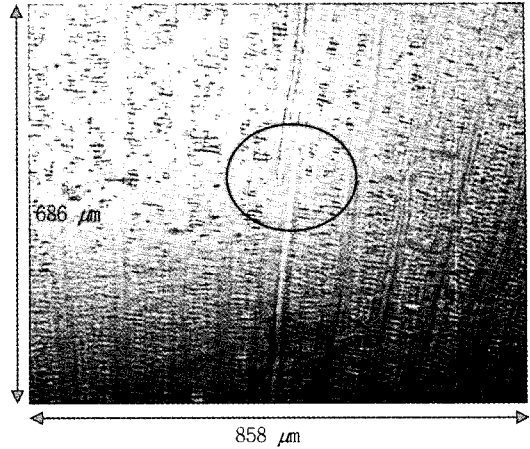


Fig. 7. A typical X-ray image of bamboo leaf.

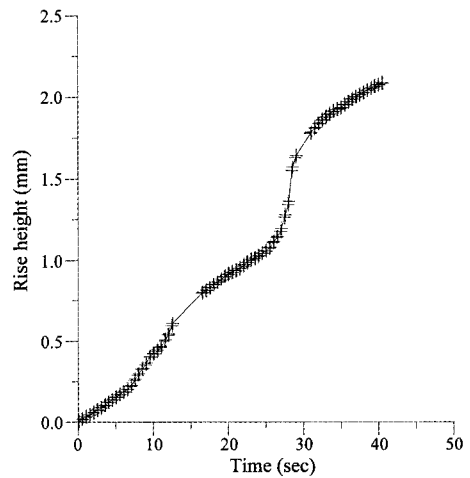


Fig. 8. Water-rise kinetics in a xylem vessel of tested bamboo leaf.

이처럼 x-ray PIV 기법은 식물과 같은 생체의 내부 구조와 함께 생체 내부를 흘러가는 유체 유동에 대한 정보를 제공함으로써, 이 분야 연구에 크게 공헌할 수 있을 것으로 기대된다⁽⁹⁾.

4. 결 론

기존의 방법으로는 측정이 불가능하였던 불투명한 물체 내부 유동과 불투명한 유체 유동을 정량적으로 가시화할 수 있는 x-ray PIV 기법을 개발하였다. 개발된 x-ray PIV 기법의 신뢰성과 유용성을 확인하기 위해, 불투명한 튜브 내부 유동에 적용하여 정량적인 속도장 결과를 획득한 결과, 측정값과 이론값이 서로

잘 일치하였다.

응용연구로 여러 가지 x선 영상기법들을 최적화하여, 불투명한 혈액 유동을 추적적자 없이 가시화하였으며, 취득한 혈류 패턴 영상으로부터 정량적인 속도장 정보를 구하였다.

그리고 x-ray PIV 기법을 이용하여 불투명한 튜브 내에서 상승하는 미세기포들의 크기와 속도를 동시 측정하였다. 기존의 가시광선을 이용한 측정기법에 비해 높은 분해능으로 수십 μm 크기의 미세한 기포를 정확히 측정할 수 있었으며, 겹쳐진 미세기포들에 대해서도 크기와 속도를 정확하게 측정할 수 있었다. 또 다른 응용으로 대나무 잎 내부구조와 수액의 이동과정을 실시간으로 관찰하였다.

본 x-ray PIV 기법은 기존의 가시화 기법으로는 해석할 수 없었던 비가시영역의 유체 유동을 정량적으로 가시화하는데 유용하며, 생체 내부 순환기 및 물질대사 거동에 대한 정량적 해석연구에 크게 도움이 될 것이다.

후 기

본 연구는 포항 방사광 가속기 연구소의 IB2 빔라인에서 수행되었으며, 포항 방사광 가속기에서의 실험은 과학기술처와 포항공대의 지원을 받았습니다. 본 논문은 과기부(과학재단)에서 지원한 특정기초연구(과제번호:R01-2004-000-10500-0)와 시스템 바이오다이나믹스 연구센터의 연구 결과물이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Adrian, R. J., 1991, "Particle-imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," Annual Rev. of Fluid Mech., Vol.23, pp.261-304.
- 2) Snigirev, A., Snigireva, I., Kohn, V., Kuznetsov S. and Schelokov, I., 1995, "On the Possibilities of X-ray Phase Contrast Microimaging by Coherent High-energy Synchrotron Radiation," Rev. of Sci. Instrum., Vol.66, pp.5486-5492.
- 3) Nugent, K. A., Gureyev, T. E., Cookson, D. F., Paganin, D. and Bamea, Z., 1996, "Quantitative Phase Imaging Using Hard X rays," Phys. Rev. Lett., Vol. 77, pp.2961-2964.
- 4) Margaritondo, G. and Tromba, G., 1999, "Coherence-based Edge Diffraction Sharpening of X-ray Images: A simple model," J. Applied Physics, Vol.85, pp. 3406-3408.
- 5) Raven, C., Snigirev, A., Snigireva, I., Spanne, P., Souvorov, A. and Kohn, V., 1996, "Phase-contrast Microtomography with Coherent High-energy Synchrotron X rays," Applied Physics Lett., Vol.69, pp.1826-1828.
- 6) Hu, Z. H., Thomas, P. A., Snigirev, A., Snigireva, I., Souvorov, A., Smith, P. G. R., Ross, G. W. and Teat, S., 1998, "Phase-mapping of Periodically Domain-inverted LiNbO3 with Coherent X-rays," Nature, Vol.392, pp.690-693.
- 7) Spanne, P., Raven, C., Snigireva, I. and Snigirev, A., 1999, "In-line Holography and Phase-contrast Microtomography with High Energy X-rays," Phys. in Med. and Biology, Vol.44, pp.741-749.
- 8) Gureyev, T. E., Raven, C., Snigirev, A., Snigireva, I. and Wilkins, S. W., 1999, "Hard X-ray Quantitative Non-interferometric Phase-contrast Microscopy," J. Physics D, Vol.32, pp.563-567.
- 9) Kim, Y. M. and Lee, S. J., 2003, "In Vivo Visualization of Flow in Xylem Vessels of a Bamboo Leaf Using Synchrotron X-ray Micro Imaging Technique," KSME J., Vol.27, pp.1612-1617.
- 10) Hwu, Y., Hsieh, H. H., Lu, M. J., Tsai, W. L., Lin, H. M., Goh, W. C., Lai, B., Je, J. H., Kim, C. K., Noh, D. Y. Youn, H. S., Tromba, G. and Margaritondo, G., 1999, "Coherence-enhanced Synchrotron Radiology: Refraction versus Diffraction Mechanisms," J. Applied Physics, Vol.86, pp.4613-4618.
- 11) Lee, S. J. and Kim, G. B., 2003, "X-ray Particle image Velocimetry for Measuring Quantitative Flow Information inside Opaque Objects," J. Applied Physics, Vol.94(5), pp.3620-3623.
- 12) Lee, S. J. and Kim, G. B., 2005, "Synchrotron Micro-imaging Technique for Measuring the Velocity Fields of Real Blood Flows," J. Applied Physics, Vol.97, 064701.
- 13) Lim, B., Khil, T., Jung, K. and Yoon, Y., 2003, "Drop Size Measurement Using Image Processing Method under High Ambient Pressure Condition," Proc. of 2nd KSV Conf., pp.111-114.
- 14) Baek, S. J. and Lee, S. J., 1996, "A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," Exp. in Fluids, Vol.22(1), pp.23-32.
- 15) Lee, S. J. and Kim, S., 2005, "Simultaneous Micro-imaging of Size and Velocity of Micro-bubbles Moving in an Opaque Tube," Exp. in Fluids, in press.