

< 논문 >

## X-ray PIV 기법의 개발과 혈액 유동에의 적용연구

김 국 배\* · 이 상 준†

(2005년 3월 4일 접수, 2005년 10월 19일 심사완료)

### Development of X-ray PIV Technique and its Application to Blood Flow

Guk Bae Kim and Sang Joon Lee

**Key Words :** X-ray Imaging Technique(x선 영상기법), PIV Technique(PIV 기법), X-ray PIV Technique(x-ray PIV 기법), Opaque Tube(불투명한 튜브), Blood Flow(혈액 유동)

#### Abstract

An x-ray PIV (Particle Image Velocimetry) technique was developed to measure quantitative information on flows inside opaque conduits and on opaque-fluid flows. At first, the developed x-ray PIV technique was applied to flow in an opaque Teflon tube. To acquire x-ray images suitable for PIV velocity field measurements, refraction-based edge enhancement mechanism was employed using detectable tracer particles. The optimal distance between with the sample and detector was experimentally determined. The resulting amassed velocity field data were in reasonable agreement with the theoretical prediction. The x-ray PIV technique was also applied to blood flow in a microchannel. The flow pattern of blood was visualized by enhancing the diffraction/interference-based characteristics of blood cells on synchrotron x-rays without any contrast agent or tracer particles. That is, the flow-pattern image of blood was achieved by optimizing the sample (blood) to detector distance and the sample thickness. Quantitative velocity field information was obtained by applying PIV algorithm to the enhanced x-ray flow images. The measured velocity field data show a typical flow structure of flow in a macro-scale channel.

#### 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.<sup>(1-2)</sup> 일반 PIV 기법은 유동 내부 추적입자를 조명하기 위해 레이저와 같은 가시영역의 광원을 사용하고 있기 때문에, 투명한 작동유체와 투명한 창(window)을 필요로 한다. 따라서 불투명한 물체 내부의 유체 유동이나 불투명한 유체에 적용할 수 없다. 이러한 PIV 기법의 한계를 극복하기 위해, 본 연구에서는 x선을 광원으로 하는 x-ray PIV 기법을 개발하였다. 이 첨단 유

동가시화 기법 개발 과정에서 x선 영상기법의 원리, 추종입자의 선정, 선명한 x선 입자영상을 얻기 위한 메커니즘들에 관한 많은 고찰이 요구되었다.

본 연구진에서는 3세대 방사광가속기인 포항방사광가속기연구소(Pohang Accelerator Laboratory, PAL)의 가속기 x선을 광원으로 사용하였다. 가속기 x선은 임상용/비파괴검사용 x선에 비해 코히어런스(coherence)가 매우 우수하여 다양한 방사선학(radiology) 연구에 사용되어 왔다.<sup>(3-7)</sup> 본 연구에서 사용하고 있는 x선 위상대비(phase contrast) 영상기법<sup>(8-12)</sup>은 가속기 x선으로만 가능하다.

일반적으로 임상용으로 사용되는 x선의 경우 가속기 x선에 비해 파장은 짧고, 광량은 적다. 따라서 임상용 x선은 적은 피폭량으로 인체와 같은 두꺼운 생체 샘플을 투과하여 내부 영상을 획득할 수 있다는 장점을 지니는 반면, x선 발생장치의 경우 광원의 크기가 커서 위상 대비법과 같은 다양한 광학적 기법을 사용할 수 없게 된다. 가속기 x

\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

TEL: (054) 279-2169 FAX: (054) 279-3199

선의 경우 다양한 광학기법을 적용할 수 있다는 장점은 있으나, 광량이 많기 때문에 샘플에 대한 피폭량이 매우 크다는 단점이 있다. 본 x-ray PIV 시스템에서는 PIV 기법의 적용을 위해 매우 짧은 시간(10ms) 동안만 x선을 샘플에 조사하기 때문에 샘플에 대한 피폭량은 매우 적다. 그러나 가속기 x선을 사용하기 때문에 x선의 투과성이 낮아 두꺼운 생체 샘플에는 적용할 수 없다는 단점은 여전히 존재하게 된다.

광학기법의 측면에서, 일반적으로 임상용 x선 장비들은 x선의 흡수대비(absorption contrast)법을 이용하고 있는데, 이는 샘플을 구성하는 내부 물질들이 갖는 x선량의 흡수율 차이를 이용하여 내부 구조를 가시화하는 방법이다. 그러나, 인체나 생체 내부 유체 유동의 경우 주위 물질과의 x선 흡수율이 유사하여 이러한 흡수대비 영상기법을 적용하기 어렵다. 반면에, 가속기 x선을 이용한 위상 대비 영상기법은 생물 내부 구성 물질들의 경계(interface) 부분에서 발생하는 x선의 위상 차를 이용하여 영상대비를 획득하는 방법으로, 흡수 대비 영상기법에 비해 보다 적은 x선 선량(dose)으로 선명한 영상을 얻을 수 있다. 이러한 위상 대비 영상기법은 x선의 굴절 및 Fresnel 회절(diffraction) 메커니즘을 이용하고 있으며,<sup>(3-7)</sup> 실제 굴절과 Fresnel 회절의 상대적인 비중은 실험조건 및 샘플의 종류에 의해서 결정된다.<sup>(13)</sup>

## 2. X-ray PIV 기법 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,  $CdWO_4$ )에 도달하게 된다. 신틸레이터는 x선을 가시영역의 빛으로 바꾸어 주는 역할을 하는 결정체(crystal)로 여기에 맺힌 x선 영상은 10배 대물렌즈가 장착된 CCD 카메라를 통해 기록된다. 가속기 x선은 연속적으로 공급되기 때문에 수 ms 단위로 제어되는 기계식 셔터를 사용하여 원하는 순간에 펄스 형태의 x선을 만들었다. 그리고, CCD 카메라와 셔터를 동기시켜 two 프레임 상호상관 방식의 PIV 알고리즘을 적용할 수 있도록 연속된 두 장의 입자영상을 취득하였다.

가속기 x선을 광원으로 하는 x-ray PIV 기법을 개발하고 개발된 x-ray PIV 기법의 성능과 유용성을 확인하기 위해, 일반 PIV 기법으로는 적용 불가능한 불투명한 물체 내부의 유체 유동에 적용하여 정량적인 속도장 정보를 구하였다.

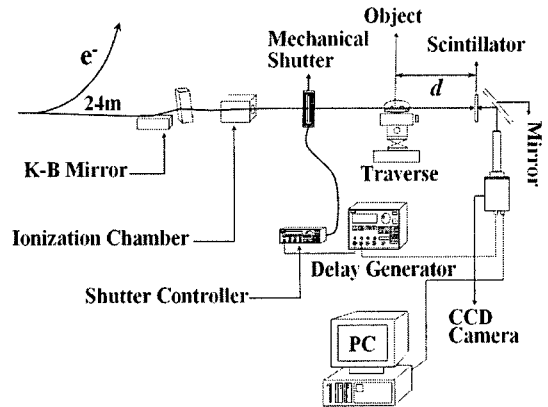


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for the x-ray PIV measurements

### 2.1 실험장치 및 구성

X-ray PIV 기법개발에 있어 해결하여야 하는 문제 중의 하나는 x선 영상기법과 PIV 기법을 동시에 만족하는 추적 입자를 선정하는 일이다. X-ray PIV 용 추적입자에 요구되는 사항은 다음과 같다. 먼저, x선 영상기법을 적용하였을 때 선명한 x선 입자영상을 제공하여야 하며, 조사되는 x선에 대해서 안정성을 가져야 한다. 그리고 유체 유동에 대해서 추종성이 우수하여야 한다. 본 연구에서는 미세 크기의 폴리스티렌(polystyrene) 입자, 유리구슬(glass bead), 미세 기포, 폴리머(polymer) 입자, 알루미나(alumina,  $Al_2O_3$ ) 입자 등을 대상으로 추적 입자로서의 적합성을 검토한 결과, 알루미나 입자를 선정하였다.

알루미나 입자는 x선에 대해 높은 안정성을 지닌다. 일반적으로 x선에 대해 높은 흡수율을 갖기 위해서는 그 물질은 비교적 높은 원자량 및 분자량을 가져야 한다. 그러나 높은 원자량을 갖는 금속계열의 물질의 경우, 유체 내부에 녹아있는 상태에서 x선을 가하게 되면 물질 표면 및 내부에 함유되어있는 공기들이 미세기포의 형태로 성장하게 된다. 그리고 x선에 안정하지 않은 물질의 경우 미세기포에 의한 유동의 교란을 유발할 수 밖에 없게 된다. 알루미나 입자의 경우 이러한 미세기포의 발생이 거의 없다는 측면에서 x선에 대해 매우 안정하다고 볼 수 있다. 또한, 알루미나 입자는 x선에 대해 높은 흡수율을 가지며, 경계부분에서 우수한 위상대비 영상을 유도함으로써 다른 입자들과 비교했을 때, 선명한 x선 입자영상을 제공하였다. 그리고 샘플과 CCD 카메라 사이의 거리를 조절함으로써 알루미나 입자영상을 얻을 수 있도록 실험조건을 최적화 하였다.

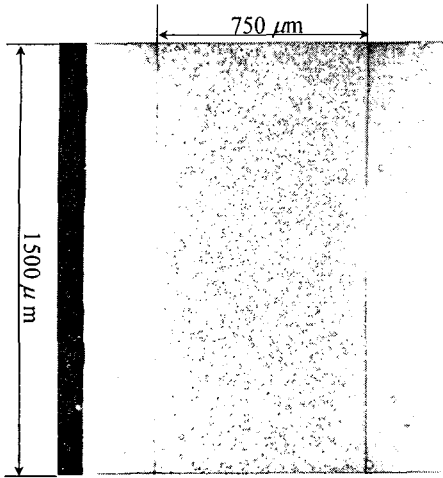


Fig. 2 Raw x-ray image of alumina particles inside an opaque Teflon tube

실험에 사용된 알루미나 입자의 직경은  $3 \mu\text{m}$ , 밀도는  $3.965 \text{ g/cm}^3$ 이며, 유동에 대한 추종성을 고려하여 글리세린(glycerin,  $\rho=1.260 \text{ g/cm}^3$ )을 작동유체로 사용하였다. 내경이  $750 \mu\text{m}$ 인 불투명한 테프론(Teflon) 재질의 튜브에 주사기 펌프를 사용하여 위에서 아래방향으로 작동유체를 흘려 주었다. 관측영역(field of view)의 크기는  $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ 이며, 상호상관 방식의 PIV 알고리즘을 사용하여  $12.3 \mu\text{m} \times 12.3 \mu\text{m}$ 의 공간분해능으로 속도장을 구하였다.

2.2 결과 및 토의

Fig. 2는 샘플과 CCD 카메라 사이의 거리를 30 cm로 하여 취득한 x선 입자영상이다. 수직으로 놓여진  $750 \mu\text{m}$  내경의 테프론 튜브를 가득 채우고 있는 작고 검은 점들이 알루미나 입자이며, 상대적으로 큰 어두운 얼룩 무늬 및 작고 밝은 점들은 신틸레이터 표면에 있는 흠집들이다. 이러한 x선 원시영상을 디지털 영상처리 한 후, PIV 알고리즘을 적용하였다.

Fig. 3은 x-ray PIV 기법을 이용하여 구한 100장의 순간 속도장을 앙상블 평균하여 얻은 주유동방향의 평균 속도장결과를 나타낸 것이다. 벽면 근처에서 유속이 느리고 중심 부분의 속도가 빠른 관유동의 전형적인 속도장 분포를 볼 수 있다. 이로부터 x-ray PIV 기법을 이용하여 불투명한 물체 내부 유체 유동을 가시화할 수 있으며, 유동의 정량적인 속도장 정보도 구할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 3의 중간 중간에 위치해 있는 점 모양의 영역들은 앞서 언급한 신틸레이터 표면의 흠집에 의한 것이다.

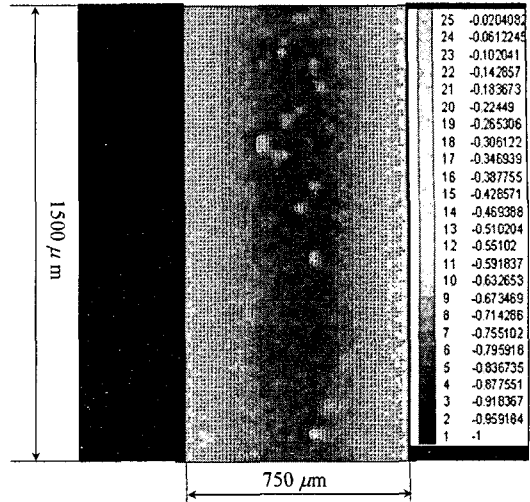


Fig. 3 Ensemble-averaged streamwise mean velocity field

일반적인 x선 촬영장비의 경우, x선 영상은 x선이 지나가면서 얻게 되는 모든 정보를 누적한 상태로 취득하게 된다. 마찬가지로 x-ray PIV 기법에서 획득된 x선 입자영상들 역시 x선 경로에 놓여진 모든 입자들의 정보가 누적된 상태를 의미한다. 이러한 x선 영상 특성은 내부 구조 관측 측면에서는 단점이 될 수도 있지만, 유동을 가시화함에 있어서는 체적 유동 정보를 한꺼번에 획득할 수 있다는 장점이 될 수도 있다.

본 연구에서 수행한 원형관 내부 유동과 같은 축대칭(azi-symmetric) 유동의 경우, 실험 결과를 간단한 수식을 이용하여 구한 이론값과 비교할 수 있다. X선 영상기법의 이러한 누적 정보 특성을 보완하고, x-ray PIV 기법으로 3차원 유동을 재구성하기 위해서는 향후 tomography 기법이나 holography 기법을 도입하여야 할 것이다.

Fig. 4는 원형 단면의 관 유동에서 누적된 입자들의 위치정보에 기인하여 나타나는 속도분포를 간략하게 도식화한 것이다. Navier-Stokes 방정식과 Poiseuille 법칙에 따라 수직방향으로 흐르는 원형관 내부 층류유동의 속도 분도,  $U(r)$ 는 다음과 같다.

$$U(r) = \frac{R^2}{4\mu} \left( \frac{\Delta p}{l} + \rho g \right) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] = V_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

여기서,  $R$ 은 관의 반지름,  $\mu$ 는 유체의 점성계수,  $\Delta p$ 는 관에 걸리는 압력 차,  $l$ 은 관의 길이,  $\rho$ 는 유체 밀도,  $g$ 는 중력가속도이다. X선 경로인  $y$ 방향으로 2차원적으로 누적된 속도분포,  $U_{\text{Amassed}}(x)$ 는  $r^2 = x^2 +$

$y^2$ 의 관계를 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$U_{Amassed}(x) = \frac{2 \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} V_{max} \left[ 1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2 - \left(\frac{y}{R}\right)^2 \right] dy}{2\sqrt{R^2-x^2}} = \frac{2}{3} V_{max} \left[ 1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2 \right]$$

즉, 포물선 모양의 3차원 속도분포를 갖는  $U(r)$ 와 비교했을 때, 무차원화된  $U_{Amassed}(x)$ 는 속도 분포의 형상에는 차이가 없으나 크기가 2/3로 감소된 속도분포를 가짐을 알 수 있다.

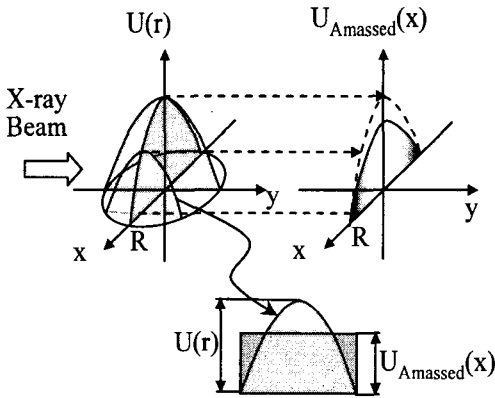


Fig. 4 Amassed velocity distribution for a circular pipe flow

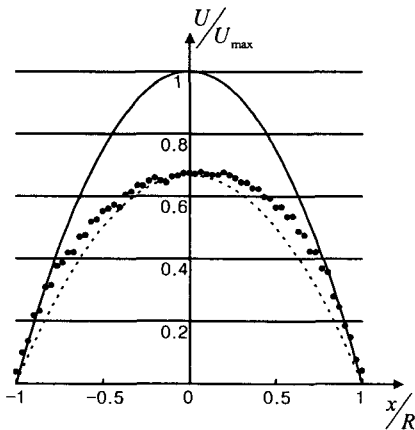


Fig. 5 Comparison of streamwise mean velocity profiles;  
 —: theoretical velocity profile at center section  
 - - -: theoretical amassed velocity profile  
 ●●●: measured amassed velocity profile

Fig. 5는 앞서 획득한 평균 속도장 결과로부터 유동방향의 평균속도 분포를 추출한 후, 이를 이론값과 비교한 것이다. 실선은 관 내부 중앙 단면에서의 유속분포로 나타내며 점선은 앞서 계산한  $U_{Amassed}(x)$ 를 도식화한 것으로 누적된 속도분포의 이론값을 의미한다. 그리고, 점들은 본 실험에서 x-ray PIV 기법으로 측정된 속도분포를 나타내며, 전체적으로 포물선의 추이를 잘 따르며 이론치인  $U_{Amassed}(x)$ 와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 하지만 벽면 근처에서 측정값이 이론값보다 약간 큰 값을 가지는데, 이것은 추종입자인 알루미늄의 밀도가 작동유체보다 크기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 밀도차이에 기인한 추적입자와 작동유체 사이의 속도차이는 상대적으로 속도가 낮은 벽면 근처에서 보다 두드러지게 나타난다. 결과적으로, x-ray PIV 기법을 이용하여 기존의 유동가시화 기법으로 측정 불가능했던 불투명한 물체 내부 유동을 정량적으로 측정하는 것이 가능하게 되었다.

### 3. 혈액 유동에의 적용 연구

현재 사용되고 있는 대부분의 유동가시화 기법들은 가시영역의 광원을 사용하기 때문에 투명한 유체에만 적용할 수 있다. 혈액은 적혈구가 37-45%의 부피비를 갖는 붉은 색의 불투명한 액체로 혈액 내부에 추적입자를 넣거나 가시광선을 사용하여 혈액흐름의 입자영상을 획득하기가 거의 불가능하다. 현미경을 사용한 미세 혈액 유동을 측정하는 경우를 제외하고 수 mm 이상 두께의 혈액 유동을 가시화할 수 있는 방법은 거의 없다고 할 수 있다. 더군다나, 인체 내 심혈관계 질환의 대부분이 수 mm 내경의 혈관에서 발생하기 때문에, 수 mm 두께의 혈액 샘플을 바로 가시화할 수 있다는 것은 혈액 유동 연구에 있어서 매우 중요하다.

따라서 혈액 유동과 관련된 대부분의 실험적 연구는 점성계수를 맞춘 투명한 대체물질을 작동유체로 사용하여 수행되어오고 있다. 그러나 non-Newtonian 특성 및 혈구를 포함한 생체 유체라는 특성을 갖는 혈액을 투명한 물질(혈장 및 혈구의 대체물질)로 대체하여 얻게 된 실험결과를 바탕으로 혈액 유동을 제대로 이해하기에는 아직까지 여러 가지 어려움이 따르고 있다.

본 연구에서는 수 mm 두께의 불투명한 혈액유동에 x-ray PIV 기법을 적용하여 정량적인 속도장 정보를 획득하였다.

3.1 실험과정

혈액유동을 대상으로 x-ray PIV 기법을 적용하기 위해서는 다음과 같은 문제점들을 해결해야만 한다. 먼저, 인위적인 추종입자의 사용여부이다. X-ray PIV 기법을 포함한 모든 PIV 기법의 기본적인 개념은 유동과 함께 흘러가는 입자들의 영상정보로부터 속도장 정보를 계산해 낸다는 것이다. 그러나 혈액을 사용하여 수행한 몇 번의 테스트 결과, 혈액에 어떤 인공적인 입자를 섞게 되면 혈액의 생물학적 특성을 변화시키게 되고, 입자끼리 혹은 입자와 혈구끼리 응집하는 성질 때문에 점성계수와 같은 혈액의 유체역학적 특성도 달라지게 됨을 알 수 있었다. X선 영상기법으로 가시화가 가능한 입자들 중에서 혈액의 생화학적 특성에 영향을 주지 않는 입자를 찾기는 힘들었다. 따라서, 혈액유동에 x-ray PIV 기법 적용 시, 인위적인 추종입자의 사용은 불가능하다라는 제한점을 해결해야만 한다.

다른 문제점으로는 혈액을 구성하는 혈장 및 혈구 등의 구성성분들 간의 밀도차이가 거의 없다는 것이다. 가시광선을 이용한 현미경으로는 혈액 내 적혈구를 쉽게 볼 수 있지만, x선 영상기법으로는 적혈구의 밀도가 주변 물질과 크게 차이가 나지 않기 때문에 뚜렷하게 보이지 않는다. 따라서 현재의 x선 영상기법 및 장비로는 혈장 내부 혈구들의 개별적인 영상을 깨끗하게 얻는 것은 거의 불가능하다.

본 연구에서는 개별적인 혈구들의 x선 영상이 아닌 혈액의 x선 회절 및 간섭 기반의 영상 메커니즘들을 이용하여 혈류의 프린지 패턴(fringe pattern)을 구하고, 이를 이용하여 유속정보를 구하였다. 회절 및 간섭 기반의 x선 영상 메커니즘은 다음과 같다. 먼저, 코히어런스 특성이 우수한 가속기 x선은 샘플의 경계(edge)에서 Fresnel 회절 패턴을 제공하는데, 이러한 패턴은 샘플을 투과하면서 발생하는 파동 간의 위상 차이에 기인해 유도된다. Fresnel 회절 패턴은 샘플과 카메라 사이의 거리가 증가함에 따라 점차 뚜렷해지는데, 본 연구에서는 먼저 이러한 회절 기반의 패턴을 최적화하였다. 다음으로 혈액을 구성하는 혈구들에 의해 간섭 기반의 x선 영상 패턴이 유도됨을 발견하였으며, 혈액 샘플의 두께를 조절함으로써 간섭에 의해 유도되는 혈류 패턴을 최적화할 수 있었다. 이러한 x선 회절 및 간섭 기반의 영상 메커니즘들을 기반으로 한 혈류 패턴을 이용하여 혈액 유동을 가시화하였으며, PIV 기법을 적용하여 정량적인 속도장 정보를 획득할 수 있었다.

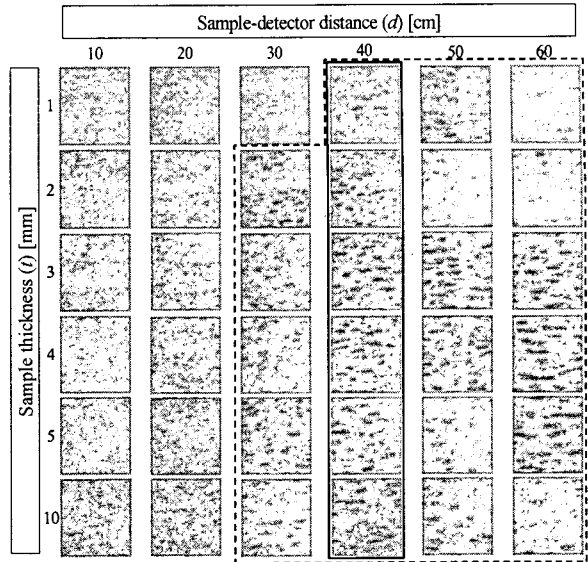


Fig. 6 X-ray image of blood flow captured using the diffraction and interference-based enhancement

3.2 결과 및 토의

X선 회절 및 간섭을 기반으로 하여 깨끗한 혈류 패턴을 얻을 수 있는 실험조건을 최적화하기 위해, 혈액샘플과 카메라 사이의 거리( $d$ )와 혈액샘플의 두께( $t$ )를 조절하면서 x선 영상을 획득하였다. 먼저 거리  $d$ 를 10, 20, 30, 40, 50, 60 cm로 조절하면서 최적화된 회절 패턴 조건을 찾았으며, 두께  $t$ 가 1, 2, 3, 4, 5, 10 mm인 혈액 샘플들을 관측함으로써 최적의 간섭 패턴 조건을 찾았다(Fig. 6). 혈액샘플의 두께가 1 mm 이하일 경우는  $d$ 에 상관없이 혈류 패턴이 잘 유도되지 않았다.<sup>(14)</sup>

샘플과 카메라 사이 거리  $d$ 가 짧은 경우에는 혈류 패턴이 유도되지 않았다( $d=10, 20$  cm). 그러나  $d$ 가 30 cm보다 커지게 되면 혈액 패턴이 점차 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 회절 메커니즘을 기반으로 한 혈액 패턴이 유도되기 때문이다. 그러나  $d$ 가 50 cm를 넘어가게 되면 과도한 회절 유도에 기인하여 혈류 패턴이 가로방향으로 퍼지는 현상이 관찰되었다.

본 연구에서 다른 1~10 mm 두께의 혈액 샘플 대해 간섭을 기반으로 하는 혈액 패턴은 모두 다 유도되었다. 즉, x 선 간섭에 의한 혈류 패턴 유도는 두께 1 mm 이상의 혈액 샘플에 대해서 가능함을 알 수 있었으며, 이는 내경이 1 mm 이상인 어떠한 혈관에 대해서도 본 x 선 영상기법이 유효함을 알 수 있다. 여기서 한가지 중요한 사항은 10 mm 두께의 혈류 패턴 영상을 무리 없이 획득했다는 것이다. 이것은 본 가시화 기법을 대동맥이

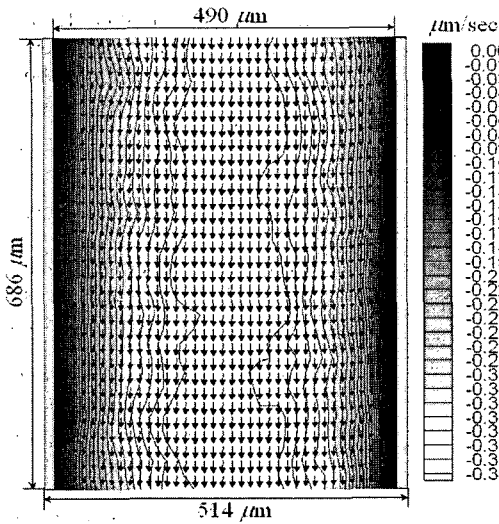


Fig. 7 Streamwise mean velocity field of blood flow in a microchannel.

나 심장 내부 혈액과 같은 보다 두꺼운 혈액 샘플에 대해서도 적용이 가능함을 나타낸다. Fig. 6은  $d$  및  $t$ 의 변화에 따른 혈류 패턴 유도에 대한 실험 결과를 정리한 것으로 점선 안쪽은 혈류 패턴이 가시화되는 조건을 나타내며,  $d$ 가 40 cm에 해당하는 실선 내부는 PIV 기법을 적용하여 속도장 결과를 얻기에 적합한 실험조건을 나타내고 있다.

PIV 기법의 적용이 가능한 혈액 유동가시화 조건들을 바탕으로, 사각 단면을 갖는 관 내부 혈액 유동에 대해서 x-ray PIV 기법을 적용하였다. 사용된 관은 폭 490  $\mu\text{m}$ , 깊이 1390  $\mu\text{m}$ , 길이 20 mm이며, x선이 깊이 방향으로 투과하게 되므로 혈액 샘플의 두께( $t$ )는 1390  $\mu\text{m}$ 가 된다. 샘플과 카메라 사이 거리( $d$ )는 40 cm이며, 관측영역의 크기는 686  $\mu\text{m} \times 514 \mu\text{m}$ 이다. 추적입자 및 조영제(contrast medium) 등은 전혀 사용하지 않았으며, 전혈(whole blood)을 작동유체로 사용하였다. 작동유체는 주사기 펌프에 의해 구동하였으며, 수직 아래 방향으로 흘러가도록 하였다.

X-ray PIV 기법을 사용하여 관 내부 혈액 유동의 패턴 영상을 획득하였으며, 이로부터 순간 속도장 정보를 얻었다. Fig. 7은 200장의 순간 속도장을 앙상블 평균하여 구한 주유동 방향의 평균 속도장 결과를 보여주고 있다. 전체적으로 벽면 근처에서 유속이 느리고 중앙 부분에서 빠른 관 유동의 전형적인 속도 분포를 보여 주고 있다. 이 결과는 x-ray PIV 기법을 사용하여 불투명한 혈액 유동을 정량적으로 가시화할 수 있다는 점에서 큰 의미를 가진다고 할 수 있다.

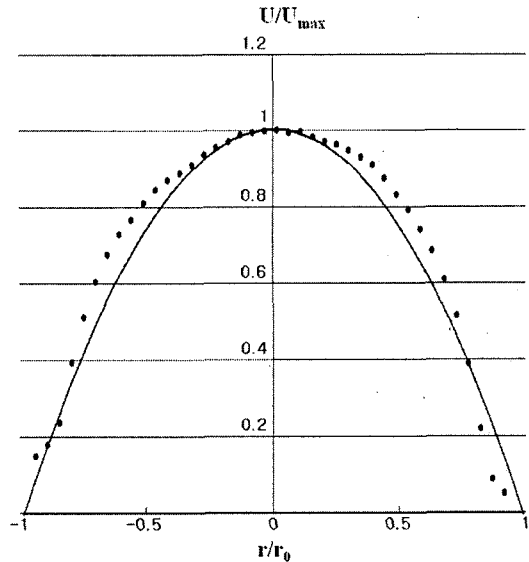


Fig. 8 Comparison of streamwise mean velocity profile;

●●●: measured amassed velocity profile  
—: theoretical amassed velocity profile

Fig. 8은 위의 평균 속도장 결과로부터 유동방향의 평균속도 분포를 추출한 후, 이를 이론적인 값과 비교한 것이다. 포물선 형태의 실선은 원형 단면의 관 유동에 대한 이론값을 나타내며, 점들은 본 실험에서 측정된 주유동방향의 평균속도 분포를 표시한 것이다. 측정결과는 포물선 형태의 속도분포를 가지며 전체적으로 이론값을 유사하게 따르고 있음을 알 수 있다. 벽면 근처에서 이론값과 측정값이 다소 차이를 보이고 있다.

이와 같은 오차는 이론치가 점성유체를 가정으로 유도된 값인 반면에 실험값은 non-Newtonian 유체인 혈액을 구성하고 있는 적혈구 거동으로부터 구하였기 때문으로 사료된다.

본 연구는 불투명한 액체인 혈액 자체를 추적입자 없이 가시화했다는 측면과 혈류 패턴 영상에 PIV 기법에 적용하여 혈류의 정량적인 속도장 정보를 획득하였다는 측면에서 큰 의미를 가진다. 본 연구를 통해 개발한 x-ray PIV 기법은 향후 혈액 유동을 실험적으로 해석하는데 있어서 크게 도움이 될 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 x선 미세 영상기법과 PIV 유동가시화 기법을 조합한 x-ray PIV 기법을 개발하였다. X-ray PIV 기법은 x선의 투과력과 PIV 기법의 정량적 가시화 기능을 동시에 적용한 것으로, 기

존의 영상기법으로는 측정이 불가능했던 불투명한 물체 내부 유동 및 불투명한 유체 유동을 정량적으로 가시화할 수 있는 새로운 측정기법이다. 개발된 x-ray PIV 기법의 신뢰성과 유용성을 확인하기 위해, 먼저 불투명한 테프론 튜브 내부 유동에 적용하여 정량적인 속도장 결과를 획득하였으며, 측정값과 이론값이 서로 잘 일치함을 확인하였다. 다음으로 불투명한 혈액 유동을 추적입자 없이 정량적으로 가시화하는데 성공하였으며, 가시화한 혈류 패턴 영상으로부터 정량적인 속도장 정보를 구할 수 있었다. 이러한 개발과정에서 x선의 흡수 대비법/위상대비법 및 회절-간섭 기반의 메커니즘 등 여러 가지 x선 영상기법들을 최적화하였다.

X-ray PIV 기법은 기존의 가시화 기법으로는 해결할 수 없었던 비가시영역의 유체 유동을 정량적으로 가시화하는데 폭넓게 적용될 것이며, 생체 내부 순환기 및 물질대사 거동을 정량적으로 해석함에 있어서 크게 도움이 될 것이다.

## 후 기

본 연구는 포항 방사광 가속기 연구소의 1B2 빔라인에서 수행되었으며, 포항 방사광 가속기에서의 실험은 과학기술처와 포항공대의 지원을 받았습니다. 본 연구는 과학재단 특정기초연구(R01-2004-000-10500-0)와 Systems Bio-dynamics NCRC 연구센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Adrian, R. J., 1991, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 23, pp. 261~304.
- (2) Baek, S. J. and Lee, S. J., 1996, "A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," *Experiments in Fluids*, Vol. 22, pp. 23~32.
- (3) 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," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 66, pp. 5486~5492.
- (4) Chapman, D., Thomlinson, W. Johnston, R. E., Washburn, D., Pisano, E., Gmur, N., Zhong, Z., Menk, R., Arfelli, F. and Sayers, D., 1997, "Diffraction Enhanced X-Ray Imaging," *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 42, pp. 2015~2025.
- (5) Pogany, A., Gao, D. and Wilkins, S. W., 1997, "Contrast and Resolution In Imaging With a Microfocus X-Ray Source," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 68, pp. 2774~2782.
- (6) Nugent, K. A., Gureyev, T. E., Cookson, D. F., Paganin, D. and Barnea, Z., 1996, "Quantitative Phase Imaging Using Hard X Rays," *Physical Review Letters*, Vol. 77, pp. 2961~2964.
- (7) Margaritondo, G. and Tromba, G., 1999, "Coherence-Based Edge Diffraction Sharpening of X-Ray Images: A Simple Model," *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, pp. 3406~3408.
- (8) 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 Letters*, Vol. 69, pp. 1826~1828.
- (9) 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 (London)*, Vol. 392, pp. 690~693.
- (10) Spanne, P., Raven, C., Snigireva, I. and Snigirev, A., 1999, "In-Line Holography and Phase-Contrast Microtomography with High Energy X-Rays," *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 44, pp. 741~749.
- (11) Gureyev, T. E., Raven, C., Snigirev, A., Snigireva, I. and Wilkins, S. W., 1999, "Hard X-Ray Quantitative Non-Interferometric Phase-Contrast Microscopy," *Journal of Physics D*, Vol. 32, pp. 563~567.
- (12) 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 Journal*, Vol. 27, pp. 1612~1617.
- (13) 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," *Journal of Applied Physics*, Vol. 86, pp. 4613~4618.
- (14) Lee, S. J. and Kim, G. B., 2005, "Synchrotron Microimaging Technique for Measuring The Velocity Fields of Real Blood Flows," *Journal of Applied Physics*, Vol. 97, 064701.