

# Velocity Field Measurement of Internal Flow Using the X-ray Micro-imaging Technique

이상준\* · 김국배\*

## INTRODUCTION

혈액은 화학적으로 복잡한 구조를 가지고 있으며 역학적으로는 고체와 액체의 중간성질을 동시에 지니는 유변학적 특징을 지니고 있다. 이러한 성질은 혈액을 구성하는 여러 가지 요소들간의 힘과 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 혈액은 점성이라는 액체의 특성과 탄성이라는 고체의 특성을 동시에 갖는 점탄성(viscoelasticity)적인 특성을 가지고 있다. 혈액은 혈구에 의해 탄성의 특징을 가지며, 이 탄성체(혈구)는 열의 방출 없이 기계적 에너지를 저장하는 능력을 가지는 반면, 점성 액체(혈장)는 에너지를 방출하는 역할을 하게 된다.

혈관에는 교감신경과 부교감신경이 분포하고 있는데, 이들 혈관운동신경은 자극을 받아 흥분함에 따라 혈관을 수축시켜 혈류량을 감소시키며 또는 그 반대의 작용을 하기도 한다. 혈관은 심장의 운동에 따라 그 자체가 탄성적인 성질을 가지기도 한다.

마지막으로 혈류는 불규칙한 박동성 유동이다. 혈류의 박동성은 개인 - 공간적 위치(거주지역) 및 시간적 상태(연령)에 따른 개인차 - 에 따라 그리고 그 개인의 생물학적 상태에 따라 다르며, 혈관의 위치에 따라 서로 큰 차이를 보여준다.

지금까지 언급한 혈액, 혈관, 혈류의 특성은 혈류역학적 실험에 있어 정확한 실험조건을 모사하기 어렵거나 어려운 지를 보여준다. 혈액의 경우 어떤 물질로 대체 하더라도 혈액의 점탄성적 성질을 모사하기 힘들며, 실험에 있어 혈액을 사용한다고 하더라도 생체내부에 있는 혈액의 상태와는 현저하게 다르게 된다. 혈관의 경우는 불투명하기 때문에 광학을 이용한 일반적인 계측실험에서는 사용할 수 초차도 없다. 혈류의 박동성을 모사하기 위해서는 맥동펌프를 사용하기는 하지만

생체와 같은 복잡한 맥동 profile를 모사하기는 힘들다.

본 연구에서는 실제 혈류 유동을 실험적으로 측정하기 위한 첫 단계 연구로 X선에서 고출력 단색광을 추출하여 외부에서 보이지 않는 물체 내부 유동을 micro-imaging하는 기술을 개발하고자 한다. 본 실험에서 물을 작동유체로 하고 alumina( $Al_2O_3$ ) particle을 미소 크기의 마이크로 튜브에 seeding하여 내부 유동의 속도장 (velocity field)을 구하였다.

## METHODS

본 연구에 사용되어진 light source는 PAL(포항가속기연구소)의 x-ray light source (white-beam)이며, PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정기법을 사용하여 유동의 정량적인 속도값들을 구하였다. Fig.1은 X-ray를 이용한 micro-PIV 속도장 측정시스템을 나타낸 것이다. 유동영상은 high-speed CCD camera를 사용하여 100Hz로 영상을 취득하였으며, 30장의 순간 속도장을 평균하여 평균속도의 공간분포를 측정하였다. 직경이 800 $\mu$ m인 튜브에 평균직경이 3 $\mu$ m인 alumina ( $Al_2O_3$ ) 입자를 tracer particles로 seeding 하였다.

## RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 2는 X-ray micro-imaging 기술로 측정된 튜브 내부 유동의 평균 속도장 결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 관 유동(pipe flow)의 전형적인 유동특성을 보여주고 있다. 본 연구를 수행함에 있어 여러 가지 문제점들이 발생하였다. 첫째, 가속기의 현재 beam system에 있어 마이크로 단위의 유동을 해석할 만큼의 해상도를 확보하기 어려웠다. 이것은 현재의 측정 시스템의 경우, object를 통과한 x-ray가 맺힌 영상을 가시영역에서 확대하여 CCD camera로 확인하는 방법을 사용하기 때문에, x-ray의 짧은 파장을 이용한 눈

\* 포항공대 기계공학과

은 분해능을 제대로 활용하지 못하고 있기 때문이다. 이 문제는 향후 x-ray lens를 개발함에 따라 해결되어 질 것으로 생각되어진다. 다음으로, 일반적인 PIV기법에서 사용하는 light source와는 달리 본 연구에서 사용되는 x-ray light source는 대상을 투과함으로써 생기는 회절과 간섭무늬로 영상을 획득하기 때문에 작동 유체와 seeding된 입자사이에 적당한 밀도차를 가져야만 영상획득이 가능하게 된다. 혈액을 사용한 예비실험 결과, 혈액 내부의 적혈구 영상을 획득함에 있어서는 현재까지는 만족할만한 결과를 얻을 수 없었다. 이 문제 역시 x-ray lens개발에 의한 해상도 향상에 따라 해결될 것으로 보인다. 마지막으로 입자가 x-ray light

를 받게 되면 유동 속에서 gas bubble이 발생하였다. 이것은 입자 내부 결정에 존재하는 수소 및 산소가 x-ray에 의해 기화되면서 발생하는 것으로 생각되어지며 입자를 800°C에서 baking했을 때 bubble이 크게 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 이 문제를 해결하기 위해서는 x-ray light source로부터 고출력 단색광을 추출해 내어야 할 것으로 생각되어진다.

이와 같은 여러 가지 문제점에도 불구하고, 본 연구 결과는 x-ray light source를 이용하여 생체 내부 유동을 직접적으로 imaging하여 해석할 수 있다는 가능성을 제시하고 있다. 향후 본 연구는 동물이나 곤충을 대상으로 진행되어질 예정이다.

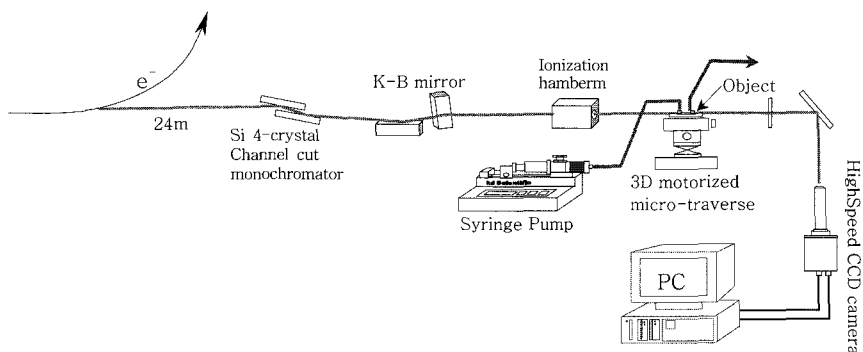


Fig. 1 X-ray를 이용한 micro-imaging 속도장 측정 시스템

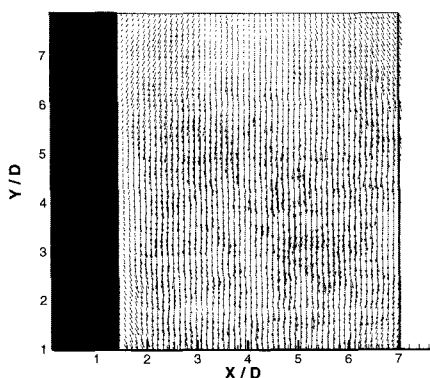


Fig. 2 마이크로 튜브 내부 유동의 평균속도 분포