

## 마이크로 홀로그래픽 PTV를 이용한 미세곡관 내부 Dean 유동의 3차원 유동해석

김석\* · 이상준\*\*

### Micro Holographic PTV Analysis of Three-dimensional Dean Flows in a Curved Micro-tube

Seok Kim\* and Sang Joon Lee\*\*

**Keywords :** Digital holography(디지털 홀로그래피), Dean flow (Dean 유동), Particle tracking velocimetry(입자추적유속계)

#### Abstract

In the present study, a micro holographic PTV (HPTV) system was used to experimentally investigate the structure of 3D flow within a curved micro-tube with varying Dean number. The employed HPTV system incorporated a high-speed digital camera to measure the temporal evolution of the 3D velocity fields of micro-scale fluid flows. With increasing Dean number, flow in the curved tube is transformed from a steady flow to a secondary flow with two counter-rotating vortices. In this study, to analyze the 3D flow characteristics in the curved section of tube at a high Dean number, the trajectories of fluid particles were obtained experimentally using the whole 3D velocity field data obtained by the micro HPTV technique. The mean velocity field distribution was then obtained by ensemble averaging the instantaneous velocity fields. These results would be helpful in the design of various passages within micro-scale devices or micro-chips and in understanding the mixing phenomena that occur in curved conduits along the trajectories of fluid particles.

#### 1. 서론

최근 들어 컴퓨터와 화상처리기술의 발달로 유동의 3차원 속도장을 구할 수 있는 다양한 측정기법이 개발되어 이 분야 연구에 큰 전환점을 맞고 있다. 이미 디지털 화상처리를 이용한 정량적인 유동가시화기술은 기존의 속도 측정기법을 획기적으로 개선한 첨단 기술로써, 현재 국내에서도 활발하게 연구 개발 및 응용하고 있다. 이러한 첨단 유동가시화기술은 2차원 난류 열유동의 시간에 따른 속도의 공간적인 변화를 측정할 수 있으며, 연속적으로 구한 속도장과 온도장들을 통계 처리하여 주어진 유동의 난류구조까지도 정확히 해석할 수 있는 열유체 분야의 핵심기술이다.

개발된 디지털 화상처리를 이용한 첨단 유동가시화 기술은 자동차산업, 항공 및 우주산업, 에너지산업, 철강산업, 전자산업과 같은 모든 산업 전반에 걸쳐 나타나는 열유체 문제 뿐만 아니라, 심각한 사회문제로 대두되고 있는 대기오염이나 해양오염, 황사나 비산먼지 같은 환경 관련 열유체 문제 해석에 있어서도 필수적인 핵심 기반기술이다. 또한 차세대 사업으로 각광받고 있는 미세가공기술 응용분야, DNA chip과 Bio-fluid와 같은 생명과학 분야에 화상처리를 이용한 정량적인 유동장 해석 기술을 적용할 경우, 기존의 계측기술로는 측정이 불가능했던 유동을 정확하게 해석할 수 있다. 하지만 개발된 대부분의 정량적 유동가시화기법의 경우 2차원 속도장 측정기법으로

서 복잡한 난류열유동과 미지의 미세유동 및 생체유동을 규명하기에는 한계가 있다. 따라서 현재 3차원 속도장 측정이 가능한 많은 기법들이 개발되고 있으며 세계적으로도 매우 경쟁적으로 연구개발에 임하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 어떤 복잡한 난류 열유동도 해석할 수 있는 3차원 첨단 유동가시화 기술인 디지털 홀로그래픽 PTV(HPTV)기법을 이용하여 미세곡관 내부유동의 3차원 속도장 측정을 위한 마이크로 HPTV 시스템을 구축하고 그 정확성을 확인하고자 한다. 그리고 마이크로 HPTV기법을 지금까지 밝혀지지 못했던 미세 열유동 및 생체유동에 적용할 수 있도록 그 유용성을 검증하고자 한다.

#### 2. 마이크로 HPTV 시스템

홀로그래픽 PIV(holographic particle image velocimetry)기법은 진정한 의미의 3차원 속도장 측정이라는 장점 때문에 지난 10여 년간 크게 발전하였으며 다양한 기법이 소개되었다. 최근에는 디지털 영상처리기법을 도입하여 다양한 실험적 구성에 대해 연구하였으며, 입자농도에 따른 영향을 실험적으로 분석하였다[1-3]. 최근 디지털 영상기록장치의 사양과 구성 광학장치에 의해 측정 가능한 3차원 공간 사이즈는 매우 한정적이다. 기존의 2차원 속도장 기법으로 해석할 수 없었던 3차원 유동 구조를 명확히 밝힐 수 있는 장점은 있지만 해석 처리에 소요되는 시간과 비용이 막대하고 여전히 실험자의 경험이 중요한 기법이라는 단점이 있다. 이러한 문제점은 향후 디지털 영상 기록장치의 획기적인 개발을 통해 해결될 것으로 기대되고 있다. 결국 현재 디지털 HPIV기법을 이용한 난류열유동 해석은

\* 포항공과대학교 기계공학과, jandi@postech.ac.kr

\*\* 포항공과대학교 기계공학과, sjlee@postech.ac.kr

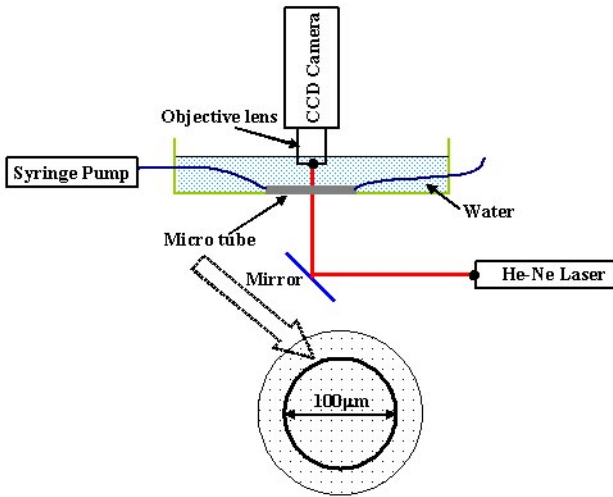


Fig. 1 Schematic diagram of digital HPTV system for measuring 3D flow inside micro curved tube

그 측정 볼륨의 한계로 인해 적용이 제한적인 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는 한정된 측정 공간 크기에 알맞은 미세유동과 생체유동에 적용이 가능한 마이크로 HPTV 시스템을 개발하였다. 기존의 HPTV 시스템과 달리 현미경을 이용함에 따라 대물렌즈의 배율에 의해 측정 영역의 크기가 정해지고, 렌즈의 NA값에 의해 깊이방향의 획득 가능한 유동 정보도 정해진다. 이는 기존의 일반적인 HPTV 시스템의 경우 같은 실험구성 장치를 이용함에도 불구하고 최종적으로 매우 상이한 결과를 보여주는 것과 달리 동일한 현미경과 대물렌즈를 사용한다면 최종적인 공간해상도와 획득된 입자의 개수는 매우 일정하다. 따라서 구축된 시스템의 정확성 및 유용성이 일반적인 HPTV 시스템보다는 높을 것으로 기대된다.

Fig. 1은 디지털 HPTV기법을 이용한 미세곡관 내부의 3차원 속도장 측정 시스템의 개략도이다. 일반적인 HPIV 시스템과 다르게 현미경을 이용하게 되며 광원은 단일 광경로를 이용한 단일 빔( $\lambda=632.8\text{nm}$ )을 사용하였다. 미세곡관과 공기와의 굴절율을 보상하기 위해 물과 굴절율이 같은 재질(FEP)의 미세튜브를 이용하였다. 현미경에 부착된 대물렌즈는 20배( $NA=1.1$ )를 사용하였으며, 입자의 크기는 직경이 약  $2\mu\text{m}$ 인 폴리머 입자를 사용하였다. 회절된 입자의 영상은 초고속 카메라를 이용하여  $1024 \times 1024$  픽셀 해상도로 초당 2,000장씩 획득하였다. 레이저의 노출시간은 약 66ns이다. 미세곡관의 곡률반경에 따라 본 연구를 수행하였으며, 곡률반경과 Re수의 곱으로 나타내는 De수를 정의하고, De=5, 50, 100으로 변화시키면서 홀로그램 영상을 취득하였다.

취득된 홀로그램 영상은 디지털 영상처리기법을 이용하여 불필요한 노이즈 및 배경 영상을 제거하였다. 또한 기존의 Fresnel diffraction formula를 이용할 경우 발생하는 에러를 줄이기 위해 angular spectrum method를 적용하였다.

Fig. 2는 곡관 곡률방향의  $\theta=\pi/2$ 위치에서의 De수에 따른 곡관 내부의 순간 2차유동 contour이다. De=5인 경우, 곡관 내부의 유동은 직관유동과 유사하게 매끄럽게 곡관영역을 흐르고 있다. 따라서 2차유동의 contour가 나타나지 않으며, De수가 증가함에 따라 곡관내부에 2차유동이 생성되고 있다. De=50인 경우, 곡관 평단면 상부와 하부에 한쌍의 서로 다른 방향으로 회전하는 2차유동이 발생되었다. 2차유동의 중심은 고정되어 있으며, 하부와 상부의 2차유동의 크기도 변화가 없다. De=100

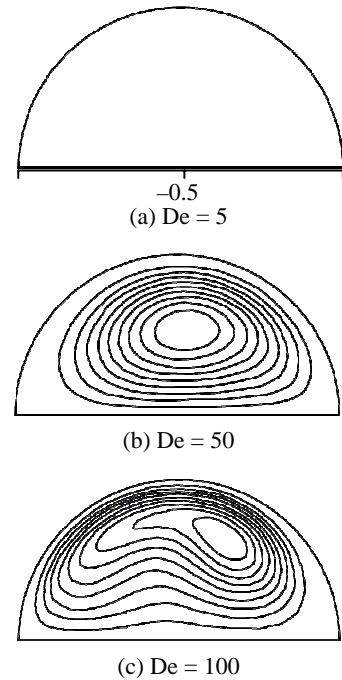


Fig. 2 Instantaneous contours of secondary flow at  $\theta=\pi/2$ .

인 경우, 곡관 내부유동의 관성이 점차 커짐에 따라 유동의 중심이 외벽면으로 이동하고 있다. 이에 따라 곡관의 중심에서 유동이 외벽면으로 상승하게 된다.

향후 본 시스템을 이용하여 지금까지 밝히기 힘들었던 다양한 형상의 미세구조 내부의 3차원 마이크로 스케일 유동의 측정에 이용될 것으로 기대한다.

### 3. 결론

본 연구에서는 지금까지 규명하기 힘들었던 미세유동과 생체유동을 3차원적으로 해석할 수 있는 마이크로 HPTV 시스템을 구축하고 그 정확성과 유용성을 검증하였다. 개발된 시스템은 큰 NA값을 가지는 대물렌즈와 효과적인 디지털 영상처리를 통해 정확한 3차원 속도장 정보를 확인할 수 있었으며, 깊이방향의 측정크기가 약  $160\mu\text{m}$ 로 기존의 다른 마이크로 HPIV기법에 비해 약 1.8~2.5배의 성능을 향상시켰다. 향후 본 시스템을 이용하여 다양한 미세구조에서의 유동과 생체유동 현상을 규명하는데 이용할 계획이다.

### 후기

본 연구는 과기부(한국과학재단)에서 지원한 국가지정연구실(NRL)사업(R0A-2006-000-10276-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- Meng, H., and Hussain, F., 1995, "A In-line Recording and Off-axis Viewing Technique for Holographic Particle Velocimetry," Applied Optics, Vol. 34, pp. 1827~1840.
- Pu, Y., and Meng, H., 2000, "An Advanced Off-axis Holographic Particle Image Velocimetry System," Experiments in Fluids, Vol. 29, pp. 184~197.
- Kim, S., and Lee, S. J., 2007, "Measurement of 3D Laminar Flow inside a Micro Tube using Micro Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry," Journal of Micromech. Microeng., Vol. 17, pp.2157~2162.