

# 디지털 Holographic PIV 기법

김 석 · 포스텍 기계공학과, 박사과정  
이 상 준 · 포스텍 기계공학과, 교수

\_e-mail : jandi@postech.ac.kr

\_e-mail : sjlee@postech.ac.kr

이 글에서는 3차원 속도장 측정기법인 홀로그래픽(holographic) PIV 기법의 개발과 수직 제트유동, 미세튜브 유동 등에의 적용사례를 소개하고자 한다.

디지털 화상처리기법을 이용한 PIV(Particle Image Velocimetry)와 PTV(Particle Tracking Velocimetry)와 같은 2차원 PIV/PTV 측정기법은 2차원 평면에서 2방향 속도성분을 계측하는 속도장 측정기법으로 최근 들어 열유체 실험에서 신뢰성 있는 가시화 기법으로 인정받고 있다. 그리고 SPIV(Stereoscopic PIV)와 3D PTV 기법은 각각 2차원 혹은 3차원 공간에서 유체흐름의 3차원 속도장 정보를 얻기 위해 활용되고 있다. 이 밖에 3차원 공간상에서 3차원 속도성분을 측정할 수 있는 이상적인 속도장 측정기

법으로 홀로그래픽 PIV(Holographic Particle Image Velocimetry, 이후 HPIV 약칭함) 기법이 있다. HPIV 기법은 광학적 왜곡이 거의 없이 홀로그래를 기록하고 재생할 수 있다. HPIV는 홀로그래피(holography) 기법을 이용한 진정한 의미의 3차원 속도장 측정이라는 장점이 있지만, 그 실효성에 대해 의문이 있어왔던 것이 사실이다. 하지만 지난 10여 년간, 디지털 화상처리 기술과 고성능 카메라와 같은 기록매체의 개발에 따라 HPIV 기술도 크게 발전하였다. 이 글에서는 디지털 HPIV 3차원 속도장 측정기법의 개발과 이를 이용한

첨단 유동가시화기법 적용 사례에 대해서 소개하고자 한다.

## 홀로그래피 기법

HPIV 기법은 3차원 공간 내부의 3차원 속도 정보를 제공하기는 하지만 그 개발과 적용에 있어서 많은 비용과 기술적 제약이 따랐다. 필름을 이용한 초기 HPIV 기법의 경우 이런 단점 이외에도 단일 프레임(single-frame)에 이중노출(double-exposure) 측정에 기인한 방향 모호성(directional ambiguity) 문제가 있으며, 공간상에 재생된 입자들의 2차원 단면(slice) 영상

을 취득하기 위해 많은 시간과 노력을 필요로 하였다. 또한 HPIV 기기의 상용화기술 개발이 뒤따르지 못하여 주변 기술의 개발과 보급에도 제한이 따랐다. 이에 따라 필름방식의 HPIV 기법은 3차원 속도장 측정기법의 특성상 실험적 경험이 중요하고 많은 노하우가 요구되게 되었다. 이러한 이유로 이론적인 측면에서 가장 이상적인 HPIV 측정기법의 개발에도 불구하고 실제적인 응용연구는 많이 이루어지지 못하였다. 홀로그래픽 필름을 이용한 HPIV 기법은 기록과정과 재생과정으로 나뉘며, 물체파(object wave)와 참조파(reference wave)의 간섭으로 생긴 간섭파가 홀로그래픽 필름에 기록되게 된다. 재생(reconstruction) 과정은 기록된 필름을 현상(development) 처리하여 얻은 홀로그램을 정확히 원래 위치에 고정시킨 후 재생파를 입사하여 3차원 공간상에 입자영상을 재현하게 된다. 공간상에 재생된 입자영상을 3차원 이송장치에 부착된 카메라로 단면영상을 취득한다. 홀로그래픽 필름의 경우 해상도가 우수하고 측정영역이 크다는 장점이 있지만 홀로그램을 얻기 위해 필름을 현상 처리하고, 광학적으로 재구성하여야 하며 재생된 영상으로부터 단면영상을 획득하기 위해 카메라를 3차원적으로 이송하여야 하는 어려움이 따른다. 따라서 속도장 결과를 얻는

디지털 HPIV 기법은 직접 기록장치에 3차원 유동의 입자영상을 기록하고 수치적으로 이를 재생한다. 홀로그래픽 필름을 사용하지 않아 현상처리나 광학적 재구성에 따른 번거로움이 없으며 시스템 구성이 일반적인 PIV 기법과 유사하다.

데까지 걸리는 소요 시간이 길고 비용이 많이 드는 단점이 있다. 실제로 초기 홀로그래피를 이용한 연구는 속도장 측정보다는 간섭계를 이용한 변형률이나 온도장을 측정하는 연구가 대부분이었다.

최근 들어 홀로그래픽 필름을 이용한 기존의 HPIV 기법 대신에 디지털 HPIV 기법이 개발되었다. 디지털 HPIV 기법은 필름방식의 HPIV 기법에 비해 시스템 구성이 간단하며 복잡한 기록과정의 대부분이 생략됨에 따라 실험에 소요되는 경비와 시간이 크게 줄일 수 있게 되었다. 디지털 HPIV 기법에서는 기존의 필름 방식에서 사용하던 비축(off-axis) 방식의 광원배치 대신에 단일 광원을 이용한 인라인(in-line) 방식을 이용하며, 이에 따라 광학장치의 구성이 매우 간단하다. 디지털 HPIV는 디지털 영상 기록장치인 CCD 혹은 CMOS 센서 어레이(array)에 홀로그램(hologram)을 연속적으로 기록하고 이로부터 시간에 따라 변화하는 3차원 유동정보를 수치적으로 재생하는 방식이다. 이에 따라 디지털 HPIV 기법을 통해

보다 많은 유동정보, 특히 4차원(시간, 공간) 유동정보를 획득할 수 있다. 그리고 CCD 카메라에 이중프레임(two-frame), 이중노출 방식으로 홀로그램을 기록함으로써 방향 모호성 문제도 발생하지 않는다. 최근 들어 HPIV 기법은 유동의 입자영상을 보다 쉽게 기록하고 재생하는 방향으로 발전해 나아가고 있다. 이것은 홀로그래픽 필름을 이용한 기존의 HPIV 방법이 복잡한 광학적 지식을 요구하고 실험과정에서 매우 까다롭기 때문이며, 디지털 기록매체의 급속한 발전도 이에 한 몫하고 있다. 향후 저장기기 및 기록매체의 지속적인 개발에 힘입어 HPIV 기법도 2D PIV 기법처럼 보편적으로 사용되는 유동가시화 기법의 하나로 발전해 나아갈 것으로 생각된다.

## 디지털 HPIV 기법의 원리

디지털 HPIV 기법은 CCD 혹은 CMOS 카메라 센서 어레이에 유동입자의 홀로그램을 바로 기록한다. 디지털 HPIV 기법에서는 그 특성상 비축 방식이 아니

라 인라인(in-line) 방식으로 기록하게 된다. 인라인 방식의 기록에서 나타날 수 있는 쌍둥이 영상(twin-image) 문제는 투과파를 재생 처리하는 과정에서 디지털 영상기법을 활용하여 수치적으로 제거할 수 있다. 또한, 기존의 HPIV 기법에서는 비축 방식의 참조파를 사용하여 방향 모호성 문제를 해결하고 다중의 정보를 기록하였다. 그러나 디지털 HPIV 기법에서는 이중노출 기능이 있는 디지털 카메라를 이용함으로써 이러한 문제점을 해결하였으며, 카메라 센서 어레이는 필름처럼 다층적 구조가 아니므로 비축 방식을 이용할 필요가 없다.

그림 1에 나타난 것처럼 디지털 HPIV 기법의 인라인 기록 방법은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 물체파와 참조파가 단일 광원에서 나오는 단순한 광학 장치의 조합으로 이루어진 인라인 방식의 기록 방법이다. 여기서 추적입자에 의해 산란된 빛이 물체파이고 산란되지 않고 그대로 통과하는 빛이 참조파가 된다. 그리고 전방산란(forward scattering) 방식을 사용함으로써 강한 산란빛을 얻을 수 있다는 장점이 있다.

두 번째 방법은 단일 광원을 이용하지만 물체파와 참조파의 경로가 다르게 구성되어 있는 인라인 방식이다. 이 경우 물체파와 참조파가 다른 경로를 이용하

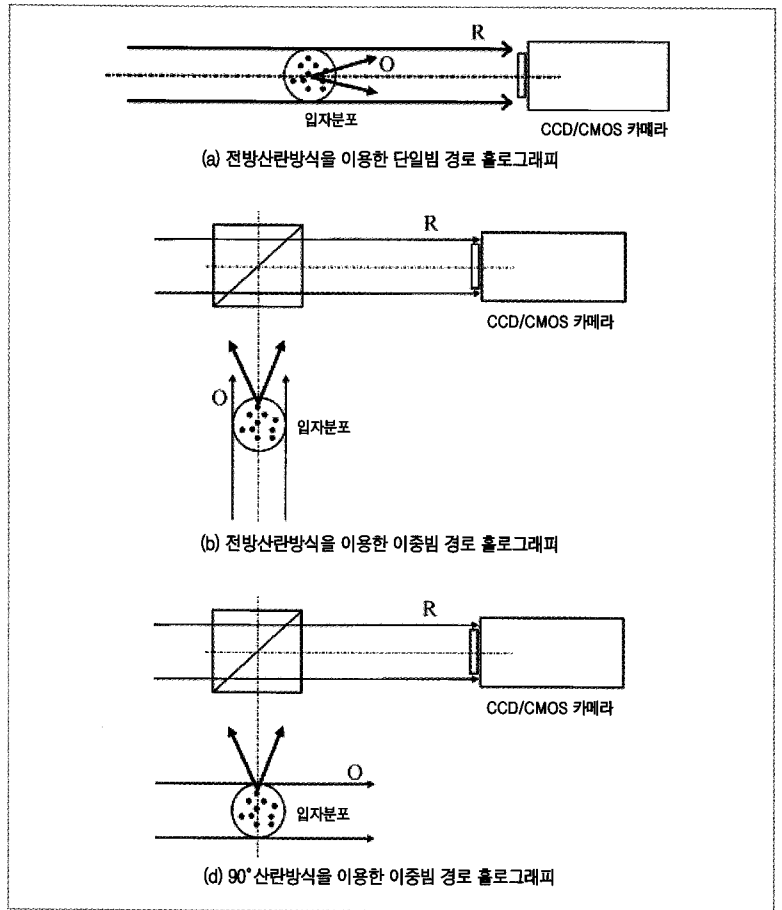


그림 1 디지털 HPIV 시스템 구성 방법

로 깨끗한 참조파를 획득할 수 있다. 즉, 실험장치 창(window)의 굴절률이나 공기와 유동 사이의 밀도차 등에 기인한 왜곡 등이 발생하지 않는다. 하지만 물체파와 참조파가 다시 단일 경로로 합쳐져야 하므로 광학장치를 정밀하게 조정하여야 하고 간섭길이가 긴 레이저 광원이 필요하다. 또한, 측정체적(measurement volume)과 HPIV 시스템의 전체적인 구성에 있어서 공간적 제약이 발생하는 단점이 있다. 마지막

방법은 90° 산란방식의 HPIV 구성으로, 물체파와 참조파의 강도를 조절하기가 어려우며 큰 출력의 레이저를 필요로 한다. 하지만 측정공간의 위치 및 크기에 제약이 크지 않다는 장점이 있으며, 일반적인 PIV 시스템과 구성이 유사하다.

디지털 HPIV 기법의 데이터 처리는 다음과 같다. 인라인 방식으로 기록된 원시 홀로그램에 들어있는 불완전한 참조파, 배경 노이즈 및 쌍둥이 영상 등을 먼저

리과정에서 제거한다. 쌍둥이 영상 및 불완전한 참조파는 디지털 영상처리기법을 이용하여 제거하며, 가우시안(Gaussian) 필터를 통해 불필요한 배경을 제거한다. 노이즈가 제거된 홀로그래姆으로부터 수치적 방식으로 본래의 물체 파를 재생한다. 재생된 정보로부터 입자들의 3차원 공간좌표와 3차원 변위정보를 얻고 이로부터 3차원 속도장 정보를 추출할 수 있다. 수치적 재생과정은 스칼라 회절(diffraction) 이론에 기초하고 있다. 호이겐스의 원리에 따르면 한 평면에서의 파면(wave front)을 알고 있다면, 공간상의 임의 평면에서의 파면도 알 수 있다. 즉 Rayleigh-Sommerfeld 회절 이론에 따라 공간상의 입자 정보를 수치적으로 재생하게 된다. 각 단면에서의 수치적 재생은 FFT 푸리에 변환을 이용하여 수행하며 한 평면에서 한 번의 FFT에 소요되는 시간은 Fresnel 근사로 단순화된 식을 계산하는 데 걸리는 시간과 같다. 그러므로 일반적인 Fresnel 근사법에서 제한되는 기록거리와 홀로그래姆의 크기에 상관없이 수치적 재생을 이용할 수 있다. 수치적 재생과정을 통해 입자들의 3차원 공간좌표를 획득하고 이들로부터 각 입자들의 3차원 변위를 계산한다. 그런데, 디지털 HPIV 기법을 이용한 대부분의 실험에서 입자농도가 높지 않기 때문에 입자들의 변위 계산에는

PIV 방식 대신에 개개 입자들의 변위정보를 추출하여 속도벡터를 구하는 PTV 방식을 채택하였다.

### 적용사례 1 : 입자농도가 HPIV 시스템 성능에 미치는 영향

디지털 HPIV 시스템을 구성하기 위해서는 기본적으로 다음의 네 가지 요소들을 고려하여야 한다. 첫째는 홀로그래姆 영상을 얻는데 사용되는 디지털 기록장치의 공간 해상도이다. 둘째는 Mie 산란에 의한 입자 홀로그래피의 고유수차(intrinsic aberration)이다. 셋째와 넷째는 수치적 재생과 구현을 위한 수학적 모델과 홀로그래姆에 나타나는 스펙클(speckle) 노이즈 문제이다. 이들 네 가지 고려요소들은 디지털 방식의 영상 기록과정에서 나타날 수 있는 가장 기본적인 문제들로서 HPIV

시스템을 구성할 때 반드시 고려하여야 한다. 그리고 취득한 홀로그래姆 영상의 처리과정에 있어서 원시영상의 품질도 중요하다. 기록된 홀로그래姆은 입자들의 홀로그래피 영상뿐만 아니라 많은 노이즈와 산란영상을 포함하고 있다. 이러한 노이즈들은 레이저광이 지나가는 광학장치와 카메라에서 주로 발생하게 된다. 최종적으로 이러한 네 가지 요소에 가장 큰 영향을 주는 인자는 입자농도이다. 입자농도는 홀로그래姆 영상의 품질에 크게 영향을 미치는데, 입자농도가 클수록 입자 홀로그래피 영상은 간섭에 의해 해석이 어려워지게 된다.

먼저 개발된 인라인 방식의 디지털 HPIV 기법을 이용하여 입자농도가 속도장 측정성능에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 여기서 입자 크기는 동일하다. 그림 2를 보면 입자농도가

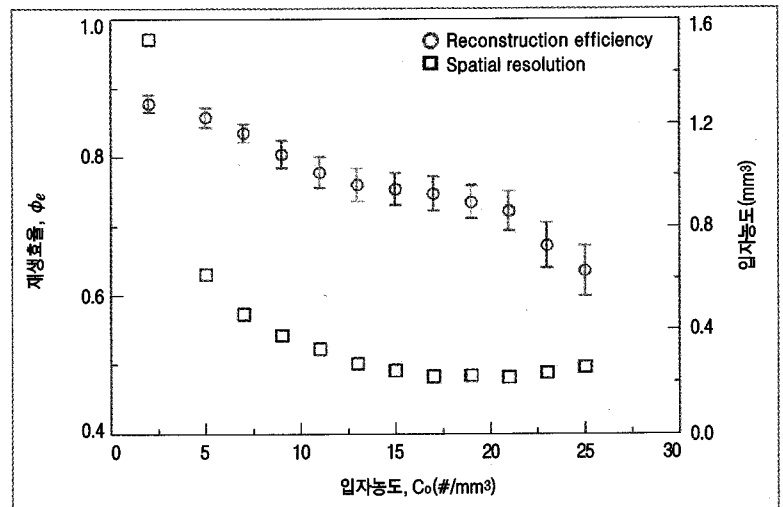


그림 2 입자농도에 따른 재생률과 공간해상도의 변화

낮은 경우, 재생률(reconstruction rate)은 비교적 높지만 공간해상도는 매우 낮게 나타났다. 이것은 입자농도가 낮아서 노이즈 발생이 상대적으로 적어 재생률은 우수하지만 하나의 입자가 차지하는 공간이 커져 공간해상도가 낮아지기 때문이다. 반면 입자농도 큰 조건에서는 공간해상도는 우수하며 입자 농도가 상관없이 거의 일정한 값을 가지나 재생률은 입자 농도의 증가에 따라 크게 감소한다. 이것은 입자농도가 높을수록 재생률이 감소하여 재생되는 입자의 개수가 일정해지기 때문이다. 입자농도가  $C_0=13\sim17\text{particles/mm}^3$ 인 조건에서는 재생률과 공간해상도가 거의 일정한 값을 가져 실험하기 좋은 조건인 것으로 나타났다.

### 적용사례 II : 수직제트 유동의 3차원 속도장 측정

인라인 방식의 디지털 HPIV 기법을 이용하여 수직 제트유동

의 3차원 속도장 측정에 적용하였다. 본 연구에 사용된 실험장치의 구성은 전방산란 방식의 단일 광원을 이용한 인라인 홀로그래피이다. 파장이 532nm인 인젝션 시드(injection seeded) 방식의 Nd:YAG 펄스 레이저를 광원으로 이용하였으며, 영상취득 장치로는 12bit cooled CCD 카메라를 사용하였다. 이 카메라의 해상도는  $1,280\times 1,024$  픽셀이고, 한 픽셀의 크기는  $6.7\mu\text{m}$ 이다. 제트노즐 직경  $d$ 와 출구속도에 기초한 레이놀즈 수는  $Re=1,500$ 이다. 측정 위치는 제트 출구로부터 주 유동방향으로 약 2d만큼 떨어진 근접영역이다. 추적입자는 직경이 약  $10\mu\text{m}$ 인 속이 빈 유리(hollow glass)입자를 사용하였다. 추적입자의 농도는 약  $13\text{particles/mm}^3$ 이며 기록 체적의 크기는  $6.5\times 6\times 7.5\text{mm}^3$ 이다.

기록된 홀로그램 영상에 대해 수치적 재구성 과정을 거치고 이로부터 입자들의 3차원 위치 정

보를 획득하였다. 재생된 입자들에 PTV 입자추적 알고리즘을 적용하여 각 입자들의 변위 벡터를 계산하고, 통계적 처리가 용이하도록 3차원 보간법을 이용하여 격자상의 데이터로 변환하였다. 3차원 속도벡터의 공간 분포로부터 주 유동방향으로 큰 속도값을 가지는 수직제트의 3차원 유동특성을 파악할 수 있다.

### 적용사례 III : 미세튜브 내부 유동의 3차원 속도장 측정

디지털 HPIV 기법의 또 다른 적용연구로 미세튜브 내부의 3차원 속도장을 측정하였다. 기존의 마이크로 PIV 기법의 경우 대물렌즈 초점면에 위치한 2차원 평면 내부의 속도장 정보만을 취득할 수 있다. 초기 미세유동 연구에서는 2차원 마이크로 PIV 기법이 주로 사용되어 왔으나, 바이오칩, Lab-on-a-chip, DNA칩 등에서 나타나는 복잡한 미세 구조물 내부의 유동현상을 이해하기 위해서는 3차원 속도장 측정이 필요하다. 이를 위해 HPIV 기법을 미세유동 측정에 용이하도록 마이크로 디지털 HPIV 기법으로 개발하였다. 마이크로 디지털 HPIV 기법은 3차원 측정체적 내부 유동정보를 한꺼번에 기록함으로써 기존의 2차원 속도장 해석이 안고 있던 한계점을 극복하고, 3차원 속도장 정보를 정확

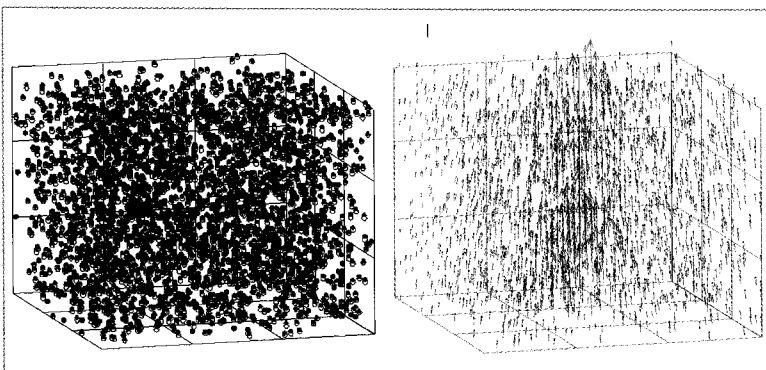


그림 3 수직제트 유동의 3차원 입자정보 및 3차원 속도장

하게 제공하게 된다. 본 적용 연구에서는 직경이  $100\mu\text{m}$ 인 미세 튜브 내부 유동의 3차원 속도장 정보를 마이크로 디지털 HPIV 기법을 이용하여 계측하였다. 기존의 HPIV 기법으로는 깊이 방향으로 약  $40\mu\text{m}$  두께 정도만 계측이 가능하였지만, 본 연구에서는 큰 개구수(Numerical Aperture; NA)를 가지는 대물렌즈와 디지털 영상처리기법을 접목하여 약  $100\mu\text{m}$  두께의 깊이방향 속도장 정보를 취득할 수 있었다. 이로부터 향후 다양한 미세유동분야 연구에 마이크로 디지털 HPIV 기법을 매우 유용하게 적용할 수 있음을 알 수 있다.

또 다른 적용사례로 아메바나 짚신벌레와 같은 원생동물의 3차원 유영 궤적을 추적하여 다양한 운동 모드를 정량적으로 구분할 수 있다. 짚신벌레의 섬모운동은 주변 환경에 따라 매우 빠르게 변화하여 운동속도나 이동범위가 매우 가변적이다. 이러한 운동성을 측정하기 위해서는 3차원 속도장 측정기법인 디지털 HPIV 기법이 적격이다. 이와 같은 마이크로 디지털 HPIV 기법을 이용

디지털 HPIV 기법은 그 구성이 간단하고 수치적 재생과정을 통해 3차원 속도장 정보를 취득하며, 복잡한 3차원 난류유동 뿐만 아니라 미세 유동이나 생체유동의 3차원 유동현상을 정량적으로 측정할 수 있는 유용한 첨단 유동가시화 기법이다.

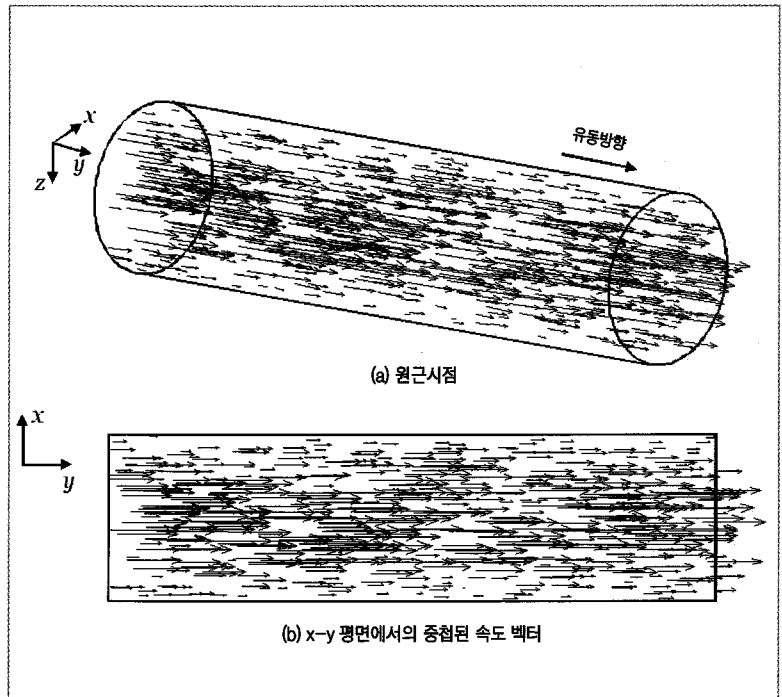


그림 4 미세튜브 내부 3차원 유동 분포

한 미세유동 및 생체 주위 유동 관측에의 적용연구는 향후 다양한 미세/생체 연구에 있어 많은

기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.