

〈 논문 〉

## Digital Holographic PIV 기법의 개발과 제트유동에의 응용

김 석\* · 이 상 준†

(2004년 8월 26일 접수, 2004년 10월 27일 심사완료)

### Development of Digital Holographic PIV Technique and Its Application

Seok Kim and Sang Joon Lee

**Key Words :** Digital Holographic PIV(디지털 홀로그래픽 입자영상유속계), Numerical Reconstruction(수치적 재구성), Jet Flow(제트 유동)

#### Abstract

A digital in-line holographic particle image velocimetry (HPIV) which can be applied to measure three-dimensional velocity fields of turbulent flows was developed. There are three different implementation methods of HPIV: traditional film-based HPIV, intermediate HPIV and digital HPIV. The traditional film-based HPIV and intermediate HPIV method is rather troublesome to do experiments and takes long calculation time, compared with the digital HPIV. Configuration of the digital in-line HPIV is simple and the data processing routine is similar to conventional 2D PIV methods. The digital HPIV velocity field measurement consists of four steps: recording, numerical reconstruction, particle extraction and velocity extraction. In the velocity extraction process, we improved PTV algorithm to extract the displacement of particle each placed in 3D space. The developed digital in-line HPIV system was applied to a vertical jet flow. The 3D velocity vectors measured by the digital HPIV method in the near field are in a good agreement with 2D PIV results.

#### 기호설명

- $d$  : 제트출구 직경
- $g$  : 회절 kernel
- $k$  : 전파(propagation) 상수
- $G$  : 재생과
- $H$  : 홀로그램 영상 강도
- $O$  : 물체과
- $R$  : 참조과
- $U$  : 스칼라 값
- $\lambda$  : 레이저의 파장
- $\rho$  :  $(x, y, z)$ 에서  $(\xi, \eta, 0)$ 까지의 거리
- $\ominus$  : 기울기 각
- $\Delta x$  : 기록장치의 분해능

#### 1. 서론

기존의 속도장 측정기법인 PIV(particle image velocimetry), PTV(particle tracking velocimetry)와 SPIV(stereoscopic PIV) 등은 2차원 평면에서 2방향 혹은 3방향 속도성분을 측정하는 속도장 측정기법이다. 최근 들어 2D PIV/PTV 기법은 열유체 실험에서 신뢰성 있는 가시화 기법으로 인정받고 있으며, SPIV와 3D PTV 기법 등은 3차원 속도장 정보를 얻기 위해 사용되고 있다. 이밖에 3차원 공간 상에서 3차원 속도장을 측정할 수 있는 홀로그래픽 PIV(holographic particle image velocimetry, 이후 HPIV 약칭함) 기법이 있다. HPIV 기법은 광학적 왜곡이 거의 없이 홀로그램을 기록하고 재생할 수 있다. HPIV는 홀로그래피(holography) 기법을 이용한 진정한 의미의 3차원 속도장 측정이라는 장점이 있지만, 그 실효성에 대한 의문이 있었던 것이 사실이다. 하지만 지난 10여 년간, HPIV 기술도

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과  
E-mail : sjlee@postech.ac.kr  
TEL : (054)279-2169 FAX : (054)279-3199

\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

크게 발전하였으며 다양한 기법이 소개되었다. Meng과 Hussain<sup>(1)</sup>은 간단한 일축(in-line) 방식의 HPIV 기법을 소개하였으며, Pu와 Meng<sup>(2,3)</sup>은 개발된 HPIV 기법을 복잡한 3차원 난류유동에 적용하였다. 그리고 Barnhart,<sup>(4)</sup> Sheng,<sup>(5)</sup> Hermann<sup>(6)</sup> 등은 다양한 형태의 HPIV 시스템을 이용하여 3차원 속도장을 측정하였다.

그러나, HPIV 기법이 3차원 공간 내부의 3차원 속도 정보를 제공하는 하지만 개발과 적용에 있어서 현실적으로 많은 비용과 기술적 제약이 따랐다. 필름을 이용한 초기 HPIV 기법의 경우 이런 단점 이외에 단일 프레임(single-frame)에 이중노출(double-exposure) 측정에 기인한 방향 모호성 문제로 이용이 제한적이었고, 공간상에 재생된 입자의 영상을 취득하기 위해 많은 시간과 노력이 필요하였다. 또한 수 년간 HPIV 기기의 상용화 개발이 뒤따르지 못하여 주변 기술개발과 보급에 제한이 따랐다. 결국, HPIV 기법은 3차원 속도장 측정기법으로 특성상 실험적 경험이 중요하고 많은 노하우가 요구되는 실험기법이다. 이에 따라 HPIV 관련 기본 측정기법의 개발에도 불구하고 실제적인 응용연구는 많이 이루어지지 못했다.

최근 들어 홀로그래픽 필름을 이용한 기존의 HPIV 기법 대신에 디지털 HPIV 기법<sup>(7,8)</sup>이 개발되었다. 디지털 HPIV 기법은 필름을 이용한 HPIV 기법에 비해 2D PIV 기법처럼 시스템 구성이 단순하며 복잡한 기록과정의 대부분이 생략됨에 따라 비용 및 소요시간이 크게 줄어드는 장점을 가지고 있다. 디지털 HPIV 기법에서는 기존의 필름을 이용한 방식에서 사용하던 비축(off-axis) 방식의 광원배치를 사용하지 않고 단일 광원의 일축 방식을 이용한다. 이에 따라 광학장치의 구성이 보다 간단해졌다. 디지털 HPIV는 디지털 영상 기록장치인 CCD 혹은 CMOS 센서 어레이(array)에 시간 연속적인 홀로그램(hologram)을 직접 기록하고 3차원 유동을 수치적으로 재생하는 방식이다. 이에 따라 디지털 HPIV 기법을 통해 보다 많은 유동정보, 특히 4차원(시간, 공간) 정보를 획득할 수 있게 되었다. 그리고, 디지털 CCD 카메라에 two-frame, 이중노출 방식으로 홀로그램을 기록함으로써 기존의 방향 모호성 문제를 쉽게 해결하였다. 앞으로 저장기기 및 기록장치의 지속적인 개발을 통해 HPIV 기법도 2D PIV 기법처럼 보편적으로 사용되는 유동가시화 기법으로 발전할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 디지털 HPIV 시스템을 구축하기 위하여 일축 방식의 디지털 HPIV 기법을 개발하

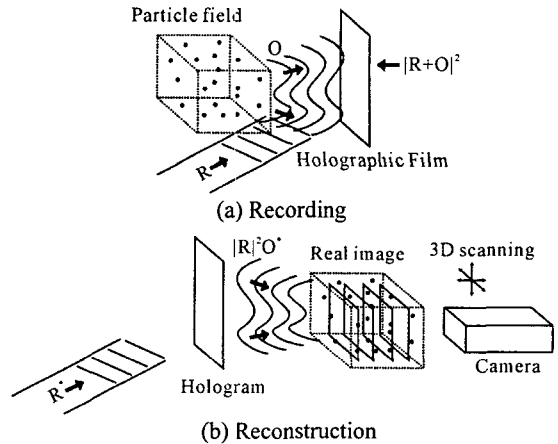


Fig. 1 The traditional film-based HPIV method

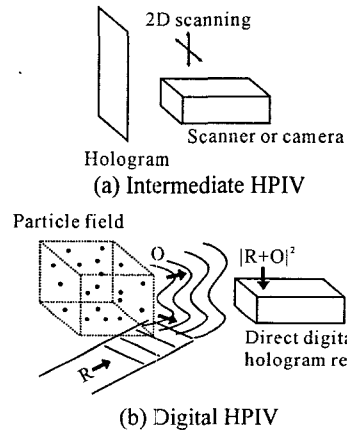


Fig. 2 Intermediate HPIV and digital HPIV methods

고, 개발된 HPIV 기법의 성능을 검증하고 확인하기 위해 제트유동에 적용하였으며 기존의 2D PIV 결과와 비교하여 그 성능을 살펴보았다.

## 2. 홀로그래픽 PIV

### 2.1 HPIV의 원리

HPIV 기법은 유동 내부에 존재하는 추적입자들(tracer particles)의 홀로그래픽 영상을 이용하여 3차원 속도장을 측정하는 계측기법이다. 2D PIV 기법과는 달리 HPIV 기법은 시간 간격이 있는 두 번의 노출을 통해 추적입자의 3차원 홀로그래픽 영상을 취득하고 재생된 입자영상으로부터 3차원 변위를 추출하는 3차원 영상처리인 기법이다. HPIV 기법은 그 개발된 단계에 따라서 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 전통적 방식의 홀로그래픽 필름을 이용한 방법으로 입자영상을 필름에 기록하고 광학적 방식으로 재생하는 것이

다. Fig. 1은 홀로그래픽 필름을 이용한 전통적인 HPIV 기법의 기록과 재생과정을 나타낸 그림이다. 기록과정[Fig. 1(a)]은 물체파(object wave)와 참조파(reference wave)가 서로 비축(off-axis) 방식으로 이루어져 있으며 이들의 간섭으로 생긴 간섭파가 최종적으로 홀로그래픽 필름에 기록되게 된다. Fig. 1(b)는 기록된 필름을 현상처리하여 얻은 홀로그램을 정확히 원래 위치에 고정시킨 후 재생파를 입사하여 공간상에 입자영상을 재생하는 과정을 나타낸다. 공간상에 재생된 입자영상을 3차원 이송장치에 부착된 카메라로 단면영상을 취득하게 된다. 홀로그래픽 필름의 경우 우수한 해상도와 큰 측정영역을 기록할 수 있지만 항상 홀로그램을 얻기 위해 필름을 현상처리하여야 하고, 광학적으로 재구성하기 때문에 재생된 영상을 획득하기 위해 영상 기록장치를 공간상에서 3차원적으로 움직이며 입자영상을 취득해야 하는 어려움이 따른다. 따라서, 결과를 얻는 데까지 걸리는 소요 시간이 길고 비용이 많이 드는 단점이 있다.

두 번째 중간단계 HPIV 기법은 홀로그래픽 필름을 이용하는 것은 같으나 광학적인 재생과정의 번거로움 줄이기 위해 수치적 재생방법(numerical reconstruction)을 이용한다. Fig. 2(a)는 홀로그래픽 필름을 이용하여 기록하고 수치적으로 재생하는 중간단계의 HPIV 기법을 나타낸 것이다. 즉 해상도가 높은 필름을 이용하여 얻어진 홀로그램을 디지털 방식으로 기록하여 수치적으로 재생하는 방법으로 공간상에 재생된 입자영상 대신에 홀로그램을 직접 기록하는 것이다. 이 방식은 3차원적으로 홀로그램을 기록하는 과정 대신에 2차원 평면상의 홀로그램을 기록하여 번거로운 재생과정을 줄이고, 홀로그램을 직접 기록하여 재생 시 참조파를 사용하지 않는 장점이 있다.

Fig. 2(b)는 세 번째 단계인 디지털 HPIV 기법을 나타낸 것이다. 홀로그래픽 필름을 사용하지 않고 바로 디지털 기록장치(CCD/CMOS 카메라)에 기록하고 수치적으로 재생한다. 홀로그래픽 필름을 사용하지 않기 때문에 매번 현상처리에 따른 번거로움이 없으며 시스템 구성이 기존의 일반적인 PIV 기법과 유사하다. 물체파와 참조파에 의해 간섭된 간섭파를 바로 카메라에 기록한 후 홀로그램 영상을 수치적으로 재생하여 입자영상의 3차원 공간분포를 획득하게 된다. 홀로그래픽 필름에 비해 공간해상도와 측정영역의 크기는 상대적으로 줄었지만, 필름방식의 기존 HPIV 기법에 비해 사용이 쉽고 시스템 구성이 간단하며 적은 비용과 시간이 소요되는 것이 큰 장점이다.

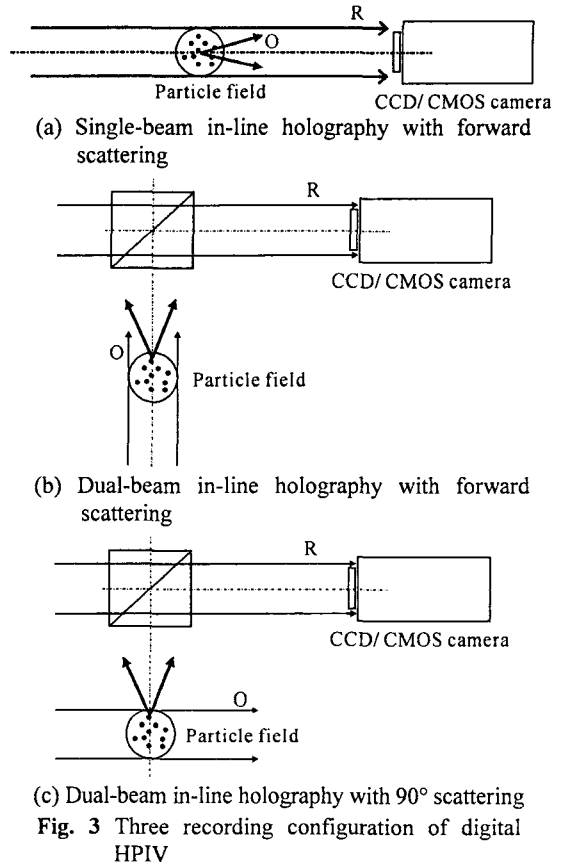


Fig. 3 Three recording configuration of digital HPIV

HPIV 기법은 보다 쉽게 기록하고 재생하는 방법으로 발전해오고 있다. 이것은 홀로그래픽 필름을 이용하는 방법이 매우 까다롭고 복잡한 광학장치를 구성해야 하기 때문이며, 디지털 기록매체의 급속한 발전도 한몫하고 있다. 본 연구에서는 김석 등<sup>(9,10)</sup>이 기존의 홀로그래픽 필름 방식과 디지털 방식의 홀로그래픽 간섭계 연구를 통해 축적한 홀로그래피 기술을 바탕으로 디지털 방식의 HPIV 기법을 완성하였다.

### 2.2 디지털 HPIV의 원리

앞에서 설명했듯이 디지털 HPIV 기법은 CCD 혹은 CMOS 센서에 직접적으로 유동입자의 홀로그램을 two-frame, 이중노출 방식으로 기록한다. 디지털 HPIV 기법에서는 그 특성상 비축 방식으로 기록하지 않는다. 즉, 일축 방식의 기록에서 나타날 수 있는 쌍둥이 영상(twin-image) 문제는 바로 투과하는 투과파를 재생과정에서 디지털 영상처리를 통해 수치적으로 제거할 수 있다. 또한, 기존의 HPIV 기법에서는 방향 모호성 문제를 해결하고 다중의 정보를 기록하기 위해 비축 방식의 여러 참조파를 사용하였다. 그러나, 디지털 HPIV

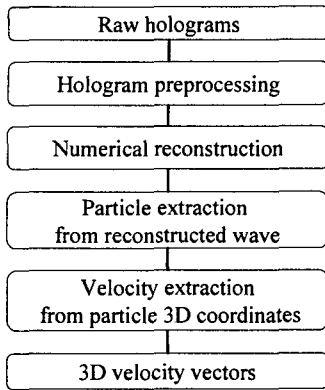


Fig. 4 Flowchart of digital in-line HPIV technique

기법에선 이중노출 기능이 있는 디지털 카메라를 이용함으로써 이 문제를 해결할 수 있으며, 영상 센서 어레이는 필름처럼 다층적 구조가 아니므로 비축 방식을 이용할 필요가 없다.

Fig. 3은 디지털 HPIV 기법에서 구성할 수 있는 세가지 방식의 in-line 기록 방법을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 일축 방식의 디지털 HPIV 기록 방법으로 물체파와 참조파가 단일 광원에서 나오는 단순한 광학장치의 조합으로 이루어져 있다. 여기서 추적입자에 의해 산란된 빛이 물체파이고 산란되지 않고 그대로 통과하는 빛이 참조파가 된다. 그리고 전방산란(forward scattering) 방식을 사용함으로써 강한 산란빛을 얻을 수 있는 장점이 있다. Fig. 3(b)는 단일광원을 이용하지만 물체파와 참조파의 경로가 다르게 구성되어 있는 일축 방식의 디지털 HPIV 구성을 보여주고 있다. 물체파와 참조파가 다른 경로를 이용하므로 깨끗한 참조파를 획득할 수 있다. 즉, 실험장치 창(window)의 굴절율과 공기와 유동의 밀도차 등에 기인한 왜곡 등이 없다. 하지만 물체파와 참조파가 다시 단일 경로로 합쳐져야 하므로 정밀한 광학장치를 구성해야 하고 간섭길이 긴 레이저 광원이 필요하다. 또한, 측정 체적(measurement volume)과 HPIV 구성 장치의 전체적인 구성에 있어서 공간적 제약이 발생하는 단점이 있다. Fig. 3(c)는 Fig. 3(b)와 비슷한 HPIV 시스템 구성이지만 90° 산란방식을 이용하고 있다. 90° 산란방식의 경우, 물체파와 참조파의 강도를 제어하기가 어려우며 큰 세기의 레이저가 필요하다. 하지만, 측정 공간의 위치 및 크기에 제약이 크지 않다는 장점이 있으며, 일반적인 PIV 시스템과 구성이 유사하다.

본 연구에서는 위 세가지 디지털 HPIV 기록 방법 중 구성이 단순하며 강한 산란빛의 홀로그램 영상을 획득할 수 있는 일축 방식의 단일경로를

이용하는 디지털 HPIV 기법을 개발하였다.

### 2.3 디지털 in-line HPIV

Fig. 4는 일축 방식의 디지털 HPIV 기법의 데이터 처리 순서도를 나타낸 것이다. 우선 일축 방식으로 기록된 원시 홀로그램에 들어있는 불완전한 참조파와 배경 노이즈 및 쌍둥이 영상 등을 전처리과정에서 제거한다. 나이프 엣지(knife-edge) 영상처리기법을 이용하여 쌍둥이 영상 및 불완전한 참조파를 제거하였으며, 가우시안 필터를 통해 불필요한 배경을 제거하였다. 노이즈가 제거된 홀로그램으로부터 수치적으로 본래의 물체파를 재생한다. 재생된 정보로부터 입자들의 3차원 공간좌표와 3차원 변위정보를 얻게 되고 이로부터 3차원 속도장 정보를 추출할 수 있다.

수치적 재생과정은 스칼라 회절(scalar diffraction) 이론을 기본으로 하고 있다. 호이겐스의 원리에 따르면 한 평면에서의 wave front를 알고 있다면, 공간상의 어느 평면에서의 wave front도 알 수 있다. 따라서 이를 Rayleigh-Sommerfeld 회절 이론에 따라 수학적으로 서술하면 다음과 같다.

$$U(x, y, z) = \frac{1}{j\lambda} \iint H(\xi, \eta) G(\xi, \eta) \frac{\exp(jk\rho)}{\rho} \cos\Theta d\xi d\eta, \quad (1)$$

여기서  $H(\xi, \eta)$ 는 획득한 홀로그램에서의 영상강도,  $G(\xi, \eta)$ 는 재생파를 나타낸다. 그리고,  $\rho$ 는 공간좌표  $(x, y, z)$ 에서  $(\xi, \eta, 0)$ 까지의 거리이며  $\cos\Theta$ 는 기울어진 정도(obliquity factor)를 나타낸다. 일반적으로 이 값은 1로서 기울어진 각도가 18°를 넘지 않으면 부정확도가 5% 이내인 것으로 알려져 있다. 식 (1)을 해석적으로 유도하기 위해 일반적으로 Fresnel 근사법(approximation) 혹은 on-axis 근사법을 이용하여 단순화한다.

Fresnel 근사법은 측정 공간상의 한 점에서 홀로그램 영상사이의 거리에 대해 홀로그램 영상 평면에서 정보의 크기의 비가 매우 작다는 가정으로 기울어진 정도를 1로 가정할 수 있다. 하지만, 실제의 경우에서 이러한 근사법칙을 이용할 필요는 없다. 식 (1)을  $H(\xi, \eta)G(\xi, \eta)$ 와  $z$ 평면에서의 회절 kernel  $g(x, y)$ 사이의 convolution으로 변환할 수 있기 때문이다. 이때 회절 kernel은 다음과 같이 주어진다.

$$g(x, y) = \frac{1}{j\lambda} \frac{\exp(jk\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (2)$$

각 단면에서의 수치적 재생은 FFT를 이용하여 수행하며 회절 kernel  $g(x, y)$ 의 푸리에 변환은 Goodman<sup>(11,12)</sup>에 의해 제시된 angular 스펙트럼 분

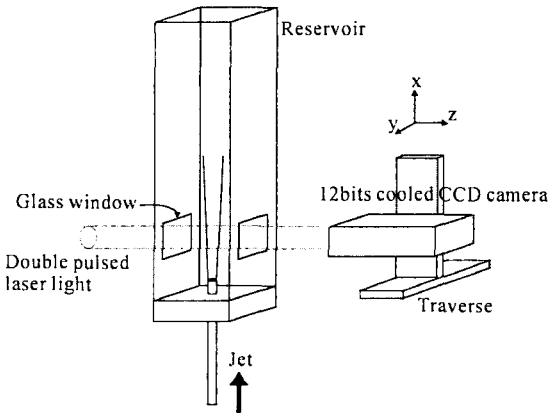


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

석을 이용하여 해석적으로 계산할 수 있다. 결과적으로 식 (1)의 계산시간, 즉 한 평면에서 한 번의 FFT하는데 소요되는 시간은 Fresnel 근사로 단순화된 식을 계산하는데 걸리는 시간과 같다. 그러므로 일반적인 Fresnel 근사법에서 제한되는 기록거리와 홀로그램의 크기에 상관없이 수치적 재생을 이용할 수 있다.

기록된 유동 영상으로부터 수치적 재생을 통해 입자들의 3차원 공간좌표를 획득하고 각 입자들의 3차원 변위를 계산하였다. 입자들의 변위 계산에는 PTV 방식을 이용하였다. 본 연구에서는 일축 홀로그래피 방식을 이용하였기 때문에 입자의 농도가 그리 높지 않았다. 따라서 미소 조사체적 내부의 대표 속도벡터를 구하는 기존의 PIV 방법 대신 각 입자들의 변위를 추출하는 PTV 방식의 알고리즘을 채택하였다. 속도벡터 추적 알고리즘은 본 연구실에서 개발하여 사용하고 있는 일치 확률 방식의 PTV 입자추적방법<sup>(13)</sup>을 3차원으로 개선하여 이용하였으며 평균적인 회복비(recovery ratio)는 본 연구에서 다룬 수직 제트유동에 대한 홀로그램 영상의 경우 약 65%정도였다. 향후 입자농도에 따른 회복비 변화에 대한 연구와 입자추적 알고리즘의 개선 등이 요구되고 있다. 얻어진 3차원 속도장 정보는 통계적 처리 등을 위해서 3차원 보간법(interpolation)을 이용하여 격자상의 속도장 정보로 변환하였다.

### 3. 디지털 in-line HPIV 의 응용

#### 3.1 수직 제트유동에의 적용

개발된 일축 방식의 디지털 HPIV 기법의 성능을 확인하기 위하여 수직 제트유동에 적용하였다. 본 연구에서 사용된 실험장치 계측기기의 구성도를 Fig. 5에 나타내었다. 기본적인 구성은 Fig. 3(a)

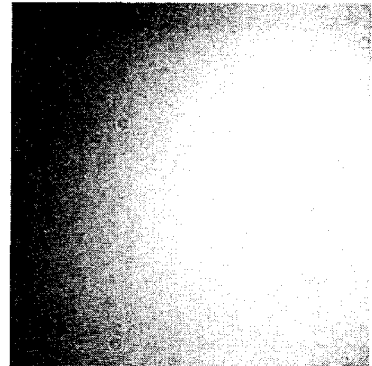


Fig. 6 Typical raw hologram of vertical jet flow in the region  $2 \leq X/d \leq 3, -0.5 \leq Y/d \leq 0.5$

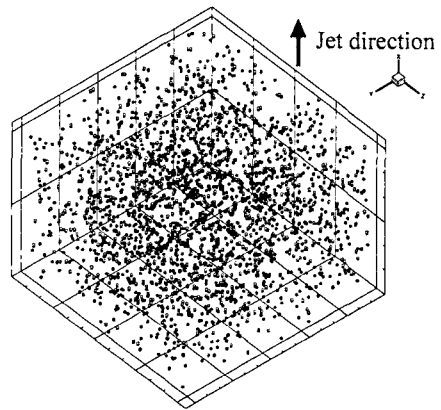
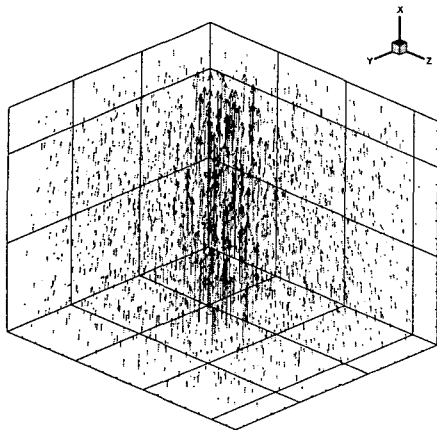


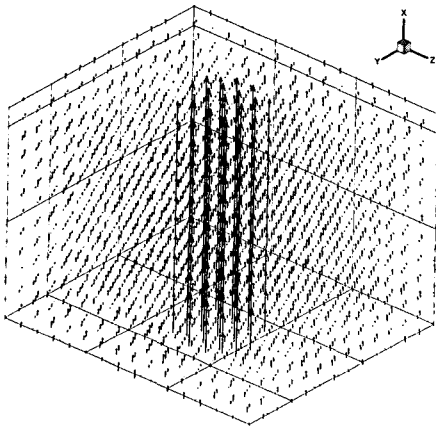
Fig. 7 Reconstructed particles in 3D space

와 같은 전방산란 방식의 단일광원을 이용한 일축 홀로그래피 구성을 보여주고 있으며, 파장이 532nm인 injection seeded Nd:YAG 펄스 레이저를 광원으로 이용하였다. 영상취득 장치로 사용된 12bit cooled CCD 카메라의 해상도는 1280×1024 픽셀이고, 한 픽셀의 크기는 6.7 $\mu$ m이다. 실험에 사용된 수조의 크기는 50×50×600mm<sup>3</sup>이고 제트의 노즐 직경은  $d=1.9$ mm이다. 제트 출구속도에 기인한 레이놀즈 수는  $Re=1,500$ 이다. 측정 위치는 제트 출구로부터 주 유동방향으로 약  $2d$ 만큼 떨어진 근접영역이다. 추적입자로는 직경이 약 10 $\mu$ m인 hollow glass 입자를 사용하였다. 추적입자의 농도는 약 13 particles/mm<sup>3</sup>이며 기록 체적의 크기는 6.5×6×7.5 mm<sup>3</sup>이다.

Fig. 6은 임의의 순간에 기록된 홀로그램 영상을 보여주고 있다. 기록된 홀로그램 영상을 통해 추적입자들의 회절 무늬가 선명하게 기록된 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 기록된 홀로그램 영상에 대해 수치적 재구성 과정을 거침으로써 입자들의 3차원 위치 정보를 획득할 수 있다. Fig. 7은 수치



(a) 3D velocity vectors

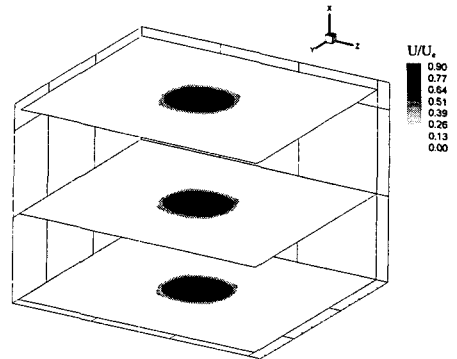


(b) 3D velocity field after 3D interpolation

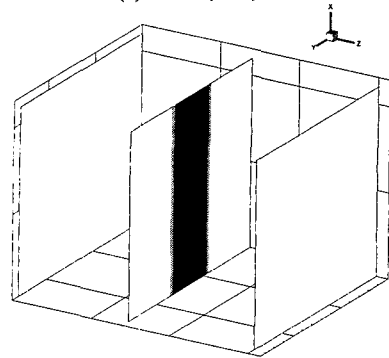
**Fig. 8** Instantaneous velocity vectors obtained by digital in-line HPIV technique

적 재생과정을 통해 획득한 입자들의 3차원 공간 분포를 보여주고 있다. 닫힌 원은 첫 번째 노출에서 재생된 입자들이고 열린 원은 두 번째 노출에서 재생된 입자들을 나타낸다. 재생된 입자영상을 통해 추적입자들이 균일하게 분포하고 있으며, 주유동방향으로 큰 변위가 존재함을 확인할 수 있다. 추적입자의 농도와 기록 체적을 바탕으로 계산한 입자의 개수는 약 4000개이었다. Fig. 7에서 재생된 입자의 개수는 3813개이고, 평균적으로 재생된 입자의 개수는 약 3,800개이었다. 따라서, 수치적 재생과정을 통해 기록 체적내부에 존재하는 약 95%의 입자가 재생됨을 알 수 있다. 재생된 입자들에 개선된 PTV 입자추적 알고리즘을 적용하여 각 입자들의 변위 벡터를 계산하였으며 통계적 처리가 용이하도록 3차원 보간법을 이용하여 격자상의 데이터로 변환하였다.

Fig. 8은 수직 제트 유동에 대해 디지털 HPIV



(a)  $X/d=2, 3.5, 5$



(b)  $Z/d=-1.875, 0, 1.875$

**Fig. 9** Instantaneous velocity field of jet flow

기법으로 추출한 순간 속도벡터의 3차원 공간 분포와 보간과정을 거친 3차원 순간 속도장을 나타낸 것이다. 3차원 기록 체적의 크기는  $2 \leq X/d \leq 5$ ,  $-1.625 \leq Y/d \leq 1.625$ ,  $-1.875 \leq Z/d \leq 1.875$ 이다. PTV 계산과정을 통해 획득한 속도벡터의 개수는 2523개이었다. 본 실험에서는 평균적으로 약 2480개의 속도벡터를 획득하였다. 따라서, 본 연구에서 이용한 PTV 알고리즘의 회복비는 약 65%이다. 3D 보간은 획득된 벡터수를 기준으로 맞추었는데, Fig. 8(b)의 경우 격자수가  $12 \times 14 \times 16$ 개로 2688개의 속도벡터를 얻었다. 3차원 속도벡터의 공간 분포로부터 주유동방향으로 큰 속도값을 갖는 수직 제트유동을 관찰할 수 있다.

Fig. 9는 3차원 속도장 결과로부터 추출한 2차원 단면에서의 속도장 결과를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는  $X/d=2, 3.5, 5$  위치의 수평면에서의 속도장 결과이고, Fig. 9(b)는  $Z/d=-1.875, 0, 1.875$ 의 수직평면에서의 속도장 결과이다. 이로부터 수직 제트 유동의 공간적인 유동구조를 파악할 수 있다. 본 연구에서는 같은 유동조건하에서 50장의 홀로그래프 영상을 획득하고 이들을 수치적으로 재구성하여 3차원 속도장 정보를 획득한 후 이들을 통계적으로

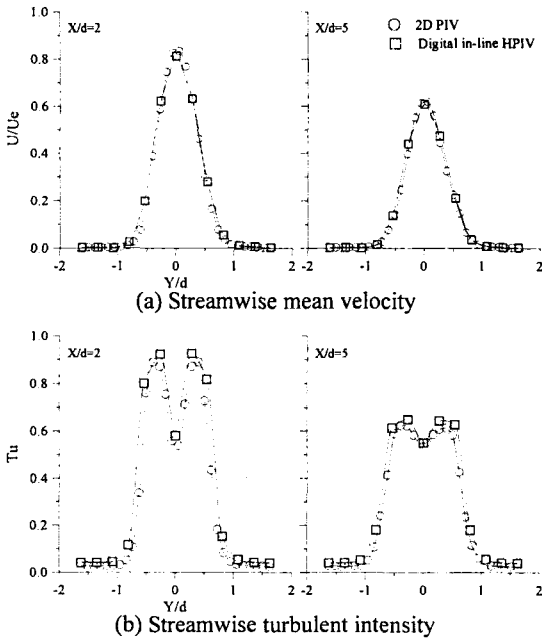


Fig. 10 Comparison between 2D PIV and HPIV at  $Z/d=0$ ,  $X/d=2, 5$

처리하였다.

### 3.2 2D PIV 기법과의 비교

개발된 일축 방식의 디지털 HPIV 기법의 성능을 확인하기 위하여 측정결과를 2D PIV 기법 결과와 비교하였다. 2D PIV 기법을 이용한 수직 제트유동의 측정에 사용된 제트 노즐 직경은 3.5mm 이고 수조의 크기는  $400 \times 400 \times 900 \text{mm}^3$ 이다. 그리고 레이놀즈 수는  $Re=1,500$ 으로 디지털 HPIV 실험과 동일하다. 따라서 수조의 크기 및 제트 노즐 직경이 디지털 HPIV 실험에 비해 크다. 이와 같은 차이는 일반적인 PIV 기법에서 렌즈가 부착된 디지털 카메라를 이용할 때 측정 단면까지의 거리 등을 감안하면 측정영역의 크기를 10mm 이내로 맞추기 힘들기 때문이다. 2D PIV 실험에서는 8bit 1K  $\times$  1K CCD 카메라를 이용하였으며 실험장치의 구성은 일반적인 PIV 구성과 같다.

Fig. 10은 일축 방식의 디지털 HPIV 기법과 2D PIV 기법으로 측정한 수직 제트의 중심 단면 ( $Z/d=0$ )에서 하류방향으로  $X/d=2, 5$  위치에서의 평균속도와 난류강도분포를 비교한 그래프이다. 디지털 HPIV 실험에서는 50장의 순간 속도장을 평균하였으며, 2D PIV 실험에서는 100장의 순간 속도장 결과를 평균하였다. Fig. 10(a)을 보면 주 유동 방향의 평균속도는 두 경우 잘 일치하고 있으나, Fig. 10(b)에 나타낸 난류강도분포의 경우, 일축 방식의 디지털 HPIV 결과가 조금 큰 값을 가지는

것으로 나타났다. 이것은 2D PIV 실험에서 사용된 수조의 크기보다 HPIV 실험에 사용된 수조의 크기가 제트직경에 비해 작기 때문에 주위 유동의 영향을 더 많이 받고 HPIV 결과의 경우 2D PIV보다 상대적으로 보간된 데이터의 개수가 적기 때문으로 생각된다. 현재 디지털 HPIV 기법의 경우 홀로그램을 기록하는 디지털 영상 센서의 프레임 크기가 작음으로 인해 화각(angle of aperture)이 좁아 측정 체적이 작고, 깊이 방향의 길이(depth-of-focus)가 짧아 측정할 수 있는 입자농도가 제한되어 획득된 속도벡터의 개수가 상대적으로 적기 때문이다. 따라서, 보간 시 적은 grid 개수를 사용할 수 밖에 없었다. 이와 같은 측정 체적과 공간해상도 문제는 향후 디지털 기록매체의 지속적인 발전으로 해결될 수 있을 것이다.

본 연구를 통해 3차원 속도장 측정기법인 일축 방식의 디지털 HPIV 기법을 개발하였는데, 기존의 홀로그래픽 필름을 이용한 HPIV 기법에 비해 상대적으로 적은 비용, 간단한 기록과 수치적 재생과정, 그리고 짧은 계산시간과 같은 장점을 가지고 있다. 2D PIV 기법과 비교하였을 때, 기존의 결과와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었지만, 기록매체인 CCD 카메라의 측정 체적의 제한으로 인해 측정할 수 있는 입자농도에 한계가 있었다. 향후 연구에서는 개발된 디지털 HPIV 기법을 보다 복잡한 난류 유동에 적용하기 위해 고해상도 카메라를 사용하고 속도추출 알고리즘을 개선하여 입자농도와 공간해상도를 높이기 위한 연구를 수행할 계획이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 홀로그래피 기술을 이용하여 일축 방식의 디지털 HPIV 기법을 개발하였다. 필름 방식의 기존 HPIV 기법에 비해 디지털 방식의 기록과 디지털 영상처리기법을 이용함으로써 2D PIV처럼 간단하게 시스템을 구성하여 실험을 수행할 수 있었으며, 재생과정 시 소요되는 기록시간을 크게 단축하였다. 또한, 재생된 입자들의 공간좌표로부터 3차원 변위를 구하기 위해 PTV 알고리즘을 개선하였다. 개발된 일축 방식의 디지털 HPIV 기법을 수직 제트유동에 적용한 결과 기존의 2D PIV 기법으로 측정한 결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다.

향후 HPIV 기법의 디지털화는 매우 빠른 속도로 진행될 것이다. CCD 혹은 CMOS 카메라의 공간해상도가 향상되고 센서의 프레임 크기도 커짐에 따라 측정할 수 있는 데이터의 양도 증가할 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 국가지정연구실(NRL)사업의 지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Meng, H. and Hussain, F., 1995, "A In-Line Recording and Off-Axis Viewing(IROV) Technique for Holographic Particle Velocimetry," *Applied Optics*, Vol. 34, pp. 1827~1840.
- (2) Pu, Y. and Meng, H., 2000, "An Advanced Off-Axis Holographic Particle Image Velocimetry(HPIV) System," *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp. 184~197.
- (3) Pu, Y. and Meng, H., 2003, "Intrinsic Aberrations Due to Mie Scattering in Particle Holography," *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 20, pp. 1920~1932.
- (4) Barnhart, D. H., Adrian, R. J., Meinhart, C. D. and Papen, G. C., 1994, "Phase-Conjugate Holographic System for High-Resolution Particle Image Velocimetry," *Applied of Optics*, Vol. 33, pp. 7159~7169.
- (5) Sheng, J. and Meng, H., 1997, "A Genetic Algorithm Approach for 3D Velocity Field Extraction in Holographic Particle Image Velocimetry," *Experiments in Fluids*, Vol. 25, pp. 461~473.
- (6) Hermann, S. F. and Hinsch, K. D., 2003, "Light-in-Flight Holographic PIV(LiFH-PIV) for Wind-Tunnel Applications: Off-Site Reconstruction of Deep-Volume Real Particle Images," *Proc. Int. Workshop on Holographic Metrology in Fluid Mechanics* (Loughborough, UK, 28~30 May 2003).
- (7) Pan, G., 2003, "Digital Holographic Imaging for 3D Particle and Flow Measurement," PhD Thesis, State University of New York at Buffalo.
- (8) Pan, G. and Meng, H., 2003, "Digital Holography of Particle Field: Reconstruction by Use of Complex Amplitude," *Applied Optics*, Vol. 42, pp. 827~833.
- (9) Kim, S. and Lee, S. J., 2001, "Temperature Field Measurements of Hele-Shaw Convection Cell Using a Holographic Interferometry," *Trans. of the Korea Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 25, No. 11, pp. 1624~1631.
- (10) Kim, S. and Lee, S. J., 2004, "Diagnosis of HSC Convective Flow Using a Digital Holographic Interferometry and PIV System," *Trans. of the Korea Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 28, No. 4, pp. 493~499.
- (11) Goodman, J. W., 1967, "Film Grain Noise in Wavefront-Reconstruction Imaging," *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 57, pp. 493~502.
- (12) Goodman, J. W., 1996, "Introduction to Fourier Optics," Newyork, McGraw-Hill.
- (13) 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.