

디지털 Micro Holographic PTV기법을 이용한 미세 곡관 내부 3차원 유동 측정

김 석* · 이 상 준†

Measurement of 3-D Flow inside a Micro Curved-tube using Digital Micro Holographic Particle Tracking Velocimetry

Seok Kim and Sang Joon Lee

Key Words : Digital Holographic PTV(디지털 홀로그래픽 입자추적유속계), Numerical Reconstruction(수치적 재구성), Curved-tube (곡관)

Abstract

A digital micro holographic particle tracking velocimetry (HPTV) system consisting of a high-speed camera and a single laser with acoustic optical modulator (AOM) chopper was established. The digital micro HPTV system was applied to water flow in a micro curved-tube for measuring instantaneous 3-D velocity field data consecutively. The micro curved-tube is using to reproduce the dorsal aorta or utilize in various lap-on-a-chip. The temporal evolution of a three-dimensional water flow in the micro curved-tube (the curvature, $\kappa=1/\theta, 2/\theta, 4/\theta, 8/\theta$) of 100 μm and 300 μm inner diameters was obtained and mean velocity field distribution was obtained by statistical-averaging the instantaneous velocity fields.

1. 서 론

3차원 공간상에서 3차원 속도장을 측정할 수 있는 홀로그래픽 PIV(holographic particle image velocimetry, 이후 HPIV 약칭함)기법은 광학적 왜곡이 거의 없이 홀로그램을 기록하고 재생할 수 있다. HPIV는 홀로그래피(holography) 기법을 이용한 진정한 의미의 3차원 속도장 측정이라는 장점에 지난 10여 년간 크게 발전하였으며 다양한 기법이 소개되었다. Meng과 Hussain⁽¹⁾은 간단한 일축(in-line) 방식의 HPIV기법을 소개하였으며, Pu와 Meng⁽²⁾은 개발된 HPIV기법을 복잡한 3차원 난류 유동에 적용하였다. 그리고 Barnhart⁽³⁾, Sheng⁽⁴⁾, Hermann⁽⁵⁾, Kim⁽⁶⁾ 등은 다양한 형태의 HPIV 시스템을 이용하여 3차원 유동의 속도장을 측정하였다.

그러나 HPIV기법이 3차원 공간 내부의 3차원 속도 정보를 제공하는 이상적인 속도장 측정기법 이기는 하지만 현실적으로 많은 비용과 기술적 제약이 따랐다. 필름을 이용한 HPIV기법의 경우 이런 단점 이외에 단일 프레임(single-frame)에 이중 노출(double-exposure) 방식의 측정에 기인하여 방향 모호성 문제가 있으며, 공간상에 재생된 입자들로부터 속도정보를 취득하기 위해 많은 시간과 노력이 필요하였다.

최근 들어 홀로그래픽 필름을 이용한 기존의 HPIV기법 대신에 디지털 HPIV기법⁽⁷⁾이 개발되었다. 디지털 HPIV기법은 필름방식의 기존 HPIV기법에 비해 시스템 구성이 간단하며 복잡한 기록과 정의 대부분이 생략됨에 따라 비용 및 실험에 소요되는 시간이 크게 줄어드는 장점을 가지고 있다. 디지털 HPIV기법에서는 기존의 필름 방식 HPIV에서 많이 사용되던 비축(off-axis) 방식의 광원배치를 사용하지 않고 단일 광원의 일축 방식을 주로 이용함에 따라 광학장치의 구성이 보다 간단해졌다. 디지털 HPIV기법은 디지털 영상 기록장치

† 책임저자, 회원, 포스텍 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

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

* 포스텍 기계공학과

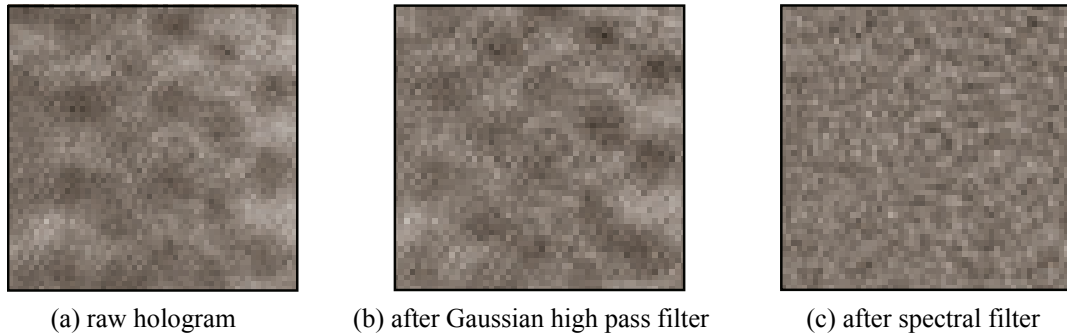


Fig. 1 Comparison of holograms obtained with different digital image processing procedures

인 CCD 혹은 CMOS 센서 어레이(sensor array)에 시간 연속적인 홀로그램(hologram)을 직접적으로 기록하고 3차원 유동을 수치적으로 재생하는 방식이다.

디지털 홀로그래피의 기록매체인 디지털 센서는 광학적 홀로그래피의 기록매체인 필름에 비해 해상도가 약 1/10정도 밖에 되지 않는다. 따라서 기록할 수 있는 개구수(numerical aperture)가 제한되어 속도장 측정 성능이 다소 저하되는 문제점이 있다. 하지만 필름방식의 초기 HPIV기법의 경우, 단일 프레임(single-frame)에 이중노출(double-exposure) 측정에 기인한 방향 모호성 문제로 이용이 제한적이었고, 공간상에 재생된 입자들의 위치정보를 취득하기 위해 많은 시간과 노력이 필요하였다. 반면에 디지털 홀로그래피 방식은 홀로그램의 기록과 재생과정을 모두 수치적으로 나타낼 수 있으므로 저장과 후처리가 용이하다는 장점이 있다.

디지털 HPIV 시스템을 구성하기 위해서는 기본적으로 다음의 네 가지 요소들을 고려하여야 한다. 첫째는 홀로그램 영상을 얻는데 사용되는 디지털 기록장치의 공간 해상도이다. 둘째는 Mie 산란에 의한 입자 홀로그래피의 고유 수차(intrinsic aberration)이다. 셋째와 넷째 요소는 수치적 재생과 구현을 위한 수학적 모델과 홀로그램에 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 홀로그램 영상의 처리과정에 있어서 원시영상의 품질(quality)도 중요하다. 기록된 홀로그램 영상은 입자 홀로그래피 영상뿐만 아니라 많은 노이즈와 산란영상을 포함하고 있다. 이러한 노이즈들은 레이저광이 지나는 광학장치와 디지털 카메라에서 주로 발생하게 된다. 원하지 않는 노이즈들은 다양한 디지털 영상처리기법을 통해서 제거할 수 있다.

본 연구에서는 몇 가지 디지털 영상처리기법을 이용하여 깨끗한 홀로그램 영상을 얻었으며 수치적 재생을 통해 그 영향을 해석하였다. 또한 입자 농도는 홀로그램 영상의 품질에 크게 영향을 미친다. 왜냐하면 입자 농도가 짙어질수록 입자 홀로그래피 영상은 간섭에 의해 해석이 어려워지기 때문이다. 본 연구에서는 개발된 일축 방식의 디지털 HPTV기법⁽⁷⁾을 이용하여 동일한 입자 크기에서의 입자 농도가 속도장 측정성능에 미치는 영향과 디지털 영상처리기법의 성능을 비교 검출하였다.

2. 홀로그래픽 PTV 시스템

2.1 디지털 영상처리 기법

본 연구에서는 디지털 영상처리기법을 이용하여 원시 홀로그램 영상에 포함된 노이즈와 산란영상을 효과적으로 제거하였다. Fig. 1은 원시 홀로그램 영상, Gaussian 고대역 필터와 spectral 필터를 적용한 홀로그램 영상을 비교하여 나타낸 것이다. Gaussian 고대역 필터는 영상을 작은 크기의 격자로 나누고 각 격자들의 평균값을 계산한 후 각 픽셀에 기록된 값에서 빼준다. 이와 같은 영상처리 과정을 통해 불필요한 낮은 주파수대역의 노이즈들을 제거할 수 있었다. 따라서 본 연구에 사용된 Gaussian 고대역 필터는 가우시안 윈도우의 크기가 클 경우 보편적으로 사용되고 있는 국소 평균차(local-mean subtraction) 필터와 유사하다. 이 필터는 다양한 주파수 대역을 가지는 노이즈를 선별적으로 제거할 수 있다는 장점을 가지고 있다. Fig. 1(c)는 Gaussian 고대역 필터를 적용한 영상에 spectral 필터를 한번 더 추가적으로 적용한 영상이다. Spectral 필터는 홀로그램 영상에서 원하지 않는 노이즈를 제거하는데 이용된다. 불필요한 노이즈 중에는 규칙적인 패턴을 가지고 있는 노이즈가 있는데 이들은 주로 광학장치나 보호경 같은 구면광학장치에서 발생한다. 이 노이즈들은 파워

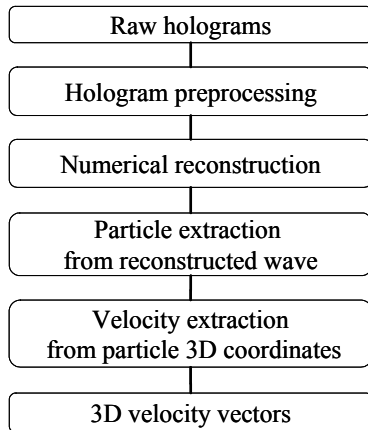


Fig. 2 Flowchart of digital in-line HPTV technique

스펙트럼(power spectrum)에서 특징적으로 매우 큰 파수(wave-number) 성분을 가진다. Spectral 필터는 이러한 특징적인 노이즈 성분을 찾아 푸리에 계수(Fourier coefficient)를 0으로 설정하여 원시 홀로그래프 영상에서 제거하게 된다. 결과적으로 Fig. 1(a)와 (c)를 비교하여 보면 배경에 존재하는 규칙적인 패턴이 제거되어 보다 선명한 입자 홀로그래프 패턴을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

2.2 디지털 HPTV 기법

Fig. 2는 일축 방식의 디지털 HPTV 기법의 데이터 처리 계층도를 나타낸 것이다. 우선 일축 방식으로 기록된 원시 홀로그래프 영상에 들어있는 불완전한 참조파와 배경 노이즈 및 쌍둥이 영상 등을 전처리(pre-processing)과정에서 제거한다. 쌍둥이 영상 및 불완전한 참조파는 나이프 엣지(knife-edge) 영상처리 기법을 이용하여 제거하였으며, Gaussian 고대역 필터와 spectral 필터 디지털 영상 처리 기법을 사용하여 불필요한 배경을 제거하였다. 원시 홀로그래프로부터 노이즈를 제거하고 나면 다음 단계로 본래의 물체파를 수치적으로 재생한다. 재생된 입자 영상정보로부터 입자들의 3차원 공간좌표와 3차원 변위정보를 얻게 되고 이로부터 3차원 속도장 정보를 추출하게 된다.

수치적 재생과정은 스칼라 회절(scalar diffraction) 이론을 기본으로 하고 있다. 호이겐스의 원리에 따르면 한 평면에서의 파면을 알고 있다면, 같은 공간상의 임의 평면에서의 wave front도 알 수 있다. Rayleigh-Sommerfeld 회절 이론에 따라 이를 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 홀로그래프에서의 영상강도,

$G(\xi, \eta)$ 는 재생파를 나타낸다. 그리고, ρ 는 공간좌표 (x, y, z) 에서 $(\xi, \eta, 0)$ 까지의 거리이며, $\cos\Theta$ 는 기울어진 정도(obliquity factor)를 나타낸다. 일반적으로 $\cos\Theta$ 값은 1로 주어지며 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 단순화하게 된다.

Fresnel 근사법칙을 바로 이용하기 보다는 식 (1)을 $H(\xi, \eta)G(\xi, \eta)$ 와 z 평면에서의 회절 kernel $g(x, y)$ 사이의 합성곱(convolution)으로 변환하여 사용하는 것이 실제적으로 용이하다. 회절 kernel $g(x, y)$ 는 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 재생 과정은 FFT(fast Fourier transformation)를 이용하여 수행하며 회절 kernel $g(x, y)$ 의 푸리에 변환은 Goodman⁽⁸⁾에 의해 제시된 angular 스펙트럼 분석을 이용하여 해석적으로 계산할 수 있다. 결과적으로 식(1)을 계산하는데 소요되는 시간, 즉 한 평면에서 1번 FFT하는데 경과되는 시간은 Fresnel 근사로 단순화된 식을 계산하는데 걸리는 시간과 같다. 따라서 일반적인 Fresnel 근사법의 경우 기록거리와 홀로그래프의 크기에 제한이 따르나 회절 kernel 방식을 이용하는 경우 이들에 상관없이 수치적 재생할 수 있다.

기록된 홀로그래프 영상으로부터 수치적 재생과정을 거쳐 입자들의 3차원 공간좌표를 획득하고 각 입자들의 3차원 변위를 계산하였다. 입자들의 3차원 변위는 전체 측정구간을 여러 개의 미소 조사체적으로 나누고 각각의 미소 조사체적 내부의 대표 속도를 구하는 기존의 PIV 기법 대신에 각 입자들의 Lagrangian 변위 정보를 추출하는 PTV 방식의 알고리즘을 채택하였다. 속도벡터 추적 알고리즘은 본 연구실에서 개발하여 사용해오고 있는 일치확률 방식의 2-frame PTV 입자추적방법⁽⁹⁾을 3차원으로 개선하여 이용하였다. 각각의 입자 위치에서 통계적 방법으로 난류 통계치를 구하기 위하여 구한 3차원 순간 속도장 정보를 3차원 보간법(interpolation)을 이용하여 격자상의 속도장 정보로 변환하였다.

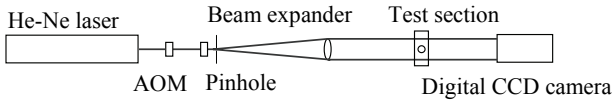


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

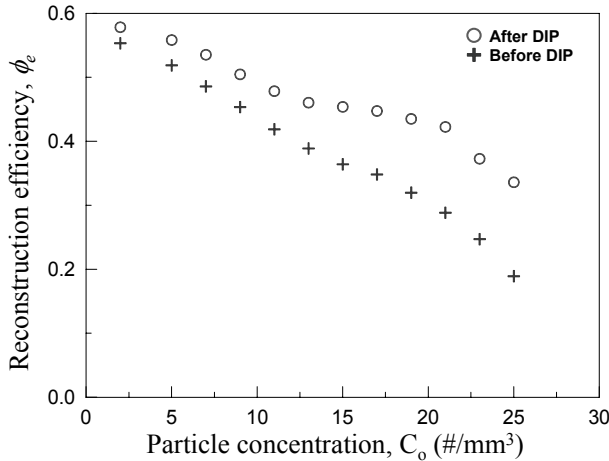


Fig. 4 Comparison of reconstruction efficiency with and without digital image processing procedure

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험장치 및 구성

디지털 영상처리기술의 적용유무와 입자 농도에 따른 영향을 실험적으로 해석하기 위하여 개발된 일축 방식의 디지털 HPTV 시스템을 수직 제트유동에 적용하였다. 본 연구에서 사용된 실험장치의 구성도를 Fig. 3에 나타내었다. 기본적으로 전방산란 방식의 단일광원을 이용한 일축 홀로그래피 구성을 보여주고 있으며, 파장이 632.8nm인 20mW He-Ne 레이저를 광원으로 이용하였다. 펄스 방식의 광원을 만들기 위하여 레이저 앞에 AOM(acousto-optic modulator)을 설치하였다. 두 프레임 사이의 시간간격을 $\Delta t=20\text{ms}$ 으로 설정하였으며, 하나의 프레임에서 레이저광에 노출되는 시간은 약 $10\mu\text{s}$ 이었다. 영상취득 장치로 사용된 12bit cooled CCD 카메라의 해상도는 1280×1024 픽셀이고, 픽셀의 크기는 $6.7\mu\text{m}$ 이었다. 실험에 사용된 수조의 가로, 세로, 높이 비가 1:0.1:6이고 제트 노즐의 직경은 $d=1.9\text{mm}$ 이었다. 제트 출구속도에 기인한 레이놀즈 수는 약 $Re=1,200$ 이다. 측정 위치는 제트 출구로부터 주 유동방향으로 약 $3d$ 만큼 떨어진 근접영역이다. 추적입자로는 직경이 약 $50\mu\text{m}$ 인 hollow glass 입자를 사용하였다. 추적입자의 농도는

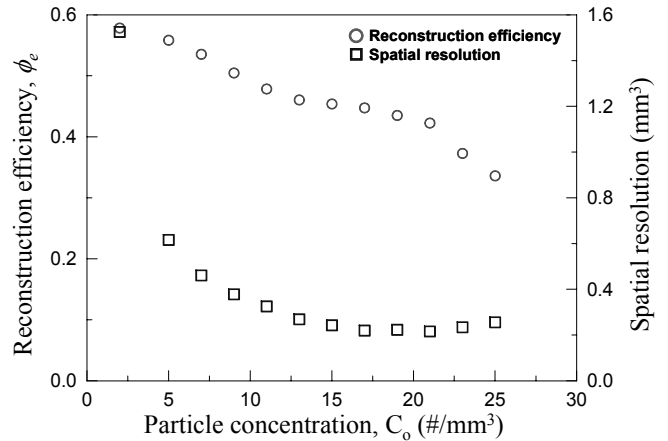


Fig. 5 Variation of reconstruction efficiency and spatial resolution with respect to particle concentration

$C_o=2\sim 25$ particles/mm³이며, 기록 체적의 크기는 $8.5 \times 6.8 \times 9\text{mm}^3$ 이었다. 추적 입자의 농도값은 제조사에서 제공한 단위 부피당 입자의 개수를 이용하였으며, 그 오차는 $\pm 1.5\%$ 이다.

3.2 디지털 영상처리기술의 영향

디지털 영상처리기술의 영향을 비교하기 위하여 이의 적용유무에 따른 재생률(reconstruction efficiency)을 비교하였다. 여기서 재생률 ϕ_e 는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi_e = \frac{N_r}{N_o} \quad (3)$$

여기서 N_r 은 수치적 재생기법으로 실제 획득된 입자의 개수이고, N_o 는 입자 농도로부터 계산한 입자의 개수이다. Fig. 4는 입자들의 농도변화에 따른 재생률을 나타낸 결과이다. 이 결과로부터 입자 농도가 증가할수록 Gaussian 고대역 필터와 spectral 필터의 적용효과가 커짐을 알 수 있다. 입자 농도가 증가하면 입자간의 간섭이 더욱 증가하고 간섭된 입자 홀로그래피 영상은 동시에 노이즈의 영향을 받게 되므로 입자 농도가 증가할수록 재생률은 감소하게 된다. 따라서 적절한 디지털 영상처리기술을 이용하여 불필요한 노이즈와 배경을 제거함으로써 디지털 HPTV 시스템의 재생 성능을 향상시킬 수 있다. 입자 농도가 $C_o=25$ particles/mm³인 조건하에서 디지털 영상처리기술을 적용함으로써 약 43%의 재생률 개선효과를 얻었다. 주기적인 배경 노이즈를 제거하는 spectral 필터만을 적용할 경우 약 37%의 재생률 개선효과가 있다. 따라서 주기적인 배경 노이즈가 수치적 재생과정에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 입자 홀로그램 영상에 포함된 노이즈를 효과적으로 제거할 수 있는 디지털 영상처리기술의 개발이 매

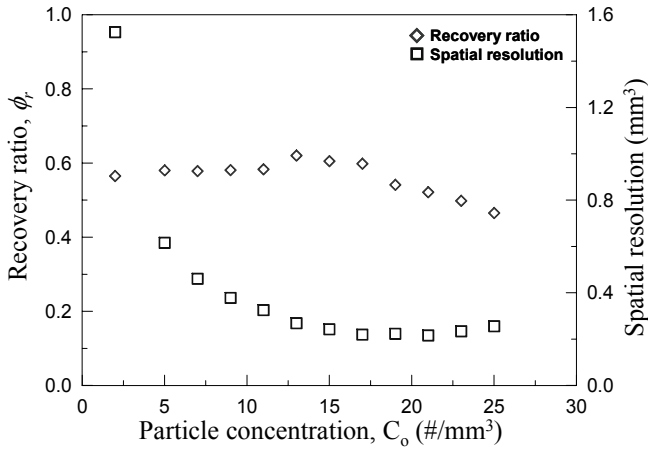


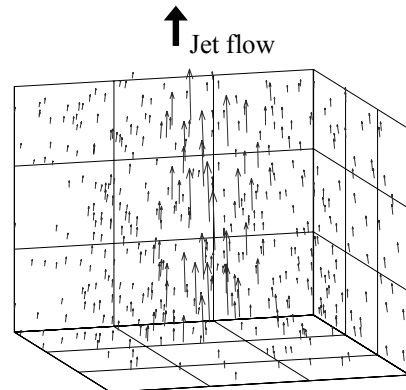
Fig. 6 Variation of recovery ratio and spatial resolution with respect to particle concentrations

우 중요함을 알 수 있다.

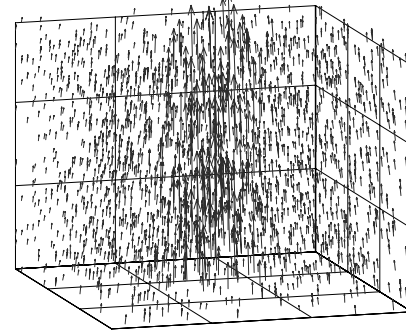
3.3 입자 농도의 영향

Fig. 5는 디지털 영상처리기법을 적용하여 노이즈가 제거된 홀로그래프 영상으로부터 구한 재생률과 공간해상도를 입자 농도의 함수로 나타낸 결과이다. 그림에 표시한 공간해상도는 재생된 입자들의 개수로 측정 공간의 크기를 나누어 입자 하나가 차지하는 공간의 크기를 나타낸다. 입자 농도 $C_0=2\sim 10$ particles/mm³인 경우, 재생률은 비교적 높지만 공간해상도는 매우 낮은 것으로 나타났다. 이것은 입자 농도가 낮아서 노이즈 발생이 상대적으로 적어 재생률은 우수하지만 하나의 입자가 차지하는 공간이 커져 공간해상도가 낮기 때문이다. 반면 입자 농도 $C_0=19\sim 25$ particles/mm³인 조건에서는 공간해상도는 매우 우수하나 재생률은 매우 낮다. 전체적으로 공간해상도는 입자 농도가 상관없이 거의 일정한 값을 가지나 재생률은 입자 농도의 증가에 따라 감소한다. 입자 농도가 높을수록 재생률이 감소하여 재생되는 입자의 개수가 일정해지기 때문이다. 그러나 $C_0=11\sim 17$ particles/mm³인 조건에서는 재생률과 공간해상도가 거의 일정한 값을 가지는 것으로 나타났다. 이것은 디지털 영상처리기법의 적용으로 노이즈를 효과적으로 제거하여 많은 추적입자를 재생하였기 때문으로 보인다.

Fig. 6은 입자 농도에 따른 PTV기법의 회복비(recovery ratio)와 공간해상도 변화를 나타낸 결과이다. 본 연구의 경우 3차원 속도벡터를 PTV기법으로 추출하였기 때문에 따라서 입자 농도에 따른 회복비는 적용된 HPTV 시스템의 성능을 파악할 수 있는 주요 변수이다. 본 연구에서는 회복비 ϕ_r 를 다음과 같이 정의하였다.



(a) $C_0=2$ ($N_c\sim 379$)



(b) $C_0=13$ ($N_c\sim 2152$)

Fig. 7 Instantaneous velocity vectors for different particle concentrations

$$\phi_r = \frac{N_c}{N_r} \quad (4)$$

여기서 N_c 는 PTV과정을 통해 회복된 속도벡터의 개수이고, N_r 는 수치적 재생과정에서 획득된 입자들의 개수를 나타낸다. 입자 농도가 $C_0=2\sim 10$ particles/mm³인 경우, 회복비는 입자 농도가 증가하여도 거의 일정한 값을 가졌다. 이것은 입자 농도가 낮아서 입자 하나가 차지하는 공간이 넓어 공간해상도가 나쁘며, 연속된 두 프레임 사이에서 입자들 사이의 평균거리가 커져 개별 입자들의 추적이 어렵기 때문이다.

반면에 입자 농도가 $C_0=19\sim 25$ particles/mm³인 경우, 공간해상도는 매우 우수하지만 회복비는 입자 농도 증가에 따라 점차 감소하고 있다. 이것은 입자 농도가 증가할수록 재생률이 감소하여 수치적 재생과정을 통해 얻어지는 입자의 개수가 적어지기 때문이다. Fig. 5의 재생률의 경우와 마찬가지로 $C_0=11\sim 17$ particles/mm³인 조건에서 가장 높은 약 0.6정도의 회복비를 가진다.

결과로부터 본 연구에서 다른 실험 조건하에서 공간해상도, 회복비를 감안할 때, 최적의 입자 농도는 $C_0=11\sim 17$ particles/mm³임을 알 수 있다. 이와 같은 입자 농도 조건하에서 공간해상도가 우수하

며, 재생률은 약 $\phi_e \sim 0.45$ 정도로 일정하고 회복비는 $\phi_r \sim 0.6$ 으로 최대값을 가진다.

본 연구에서는 디지털 HPTV 실험에 적용할 수 있는 최적의 입자 농도를 실험적으로 구하였으며, 이 결과는 향후 일측방식의 디지털 HPTV 기법을 이용한 응용연구에서 입자 농도 선정에 크게 도움이 될 수 있을 것으로 생각되어진다.

4. 결 론

본 연구에서는 개발된 디지털 HPTV 시스템의 성능을 개선하기 위해서 다양한 디지털 영상처리 기법을 도입하여 노이즈를 제거하고 입자 농도에 따른 속도측정 성능을 비교하였다. 적용된 Gaussian 고대역 필터와 spectral 필터는 홀로그래프 영상에 포함된 노이즈와 산란영상을 효과적으로 제거하였으며, 입자 농도가 증가할수록 그 효과가 향상되었다.

입자 농도가 재생률과 공간해상도에 미치는 영향을 비교한 결과 입자 농도는 속도벡터 재생률에 크게 영향을 미치며, 본 연구에서 다룬 디지털 HPTV 시스템의 경우 최적의 입자 농도는 11~17 particles/mm³이었다. 향후 일측방식의 디지털 HPTV 시스템을 이용한 응용연구에 있어서 본 연구에서 도출한 입자 농도 결과는 중요한 참고자료로 이용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2006년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행되었으며(No.M10600000276-06J0000-27610), 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Pu, Y., and Meng, H., 2000, "An Advanced Off-axis Holographic Particle Image Velocimetry System," *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp. 184~197.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Hermann, S. F., and Hinsch, K. D., 2003, "Light-in-flight Holographic PIV or 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.
- (6) Kim, S., and Lee, S. J., 2005, "Development of Digital Holographic PIV Technique and Its Application," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 29(1), pp.123~130.
- (7) Pan, G., and Meng, H., 2003, "Digital Holography of Particle Field: Reconstruction by Use of Complex Amplitude," *Applied Optics*, Vol. 42, pp. 827~833.
- (8) Goodman, J. W., 1967, "Film Grain Noise in Wavefront-reconstruction Imaging," *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 57, pp. 493~502.
- (9) 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. 387, pp.353-396.