

디지털 holographic PTV 측정을 위한 디지털 영상처리기법에 관한 연구

김 석[†] · 이 상 준^{*}

Digital image processing techniques of digital holographic PTV measurement

Seok Kim and Sang Joon Lee

Key Words : Digital Holographic PTV(디지털 홀로그래픽 입자추적유속계), Numerical Reconstruction(수치적 재구성), Particle Concentration(입자농도)

Abstract

The digital HPTV 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. Because a digital recording device was used, some factors such as a spatial resolution, numerical aperture, and particle concentration can affect the performance of the digital HPTV. Especially, a particle concentration (C_0) affected the reconstruction efficiency in numerical reconstruction and particle extraction process. In this paper, the reconstruction efficiency was analyzed experimentally with different particle concentration. Optimal reconstruction efficiency was shown in the range of $C_0=13\sim 15$ particles/mm³.

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 장점 때문에 지난 10여 년간 크게 발전하였으며 다양한 기법이 소개되었다. Meng와 Hussain⁽¹⁾은 간단한 일축(in-line) 방식의 HPIV기법을 소개하였으며, Pu와 Meng^(2,3)은 개발된 HPIV기법을 복잡한 3차원 난류 유동에 적용하였다. 그리고 Barnhart⁽⁴⁾, Sheng⁽⁵⁾, Hermann⁽⁶⁾, Kim⁽⁷⁾ 등은 다양한 형태의 HPIV 시스템을 이용하여 3차원 속도장을 측정하였다.

그러나 HPIV기법이 3차원 공간 내부의 3차원

속도 정보를 제공하기는 하지만 개발과 적용에 있어서 현실적으로 많은 비용과 기술적 제약이 따랐다. 필름을 이용한 초기 HPIV기법의 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.

최근 들어 홀로그래픽 필름을 이용한 기존의 HPIV기법 대신에 디지털 HPIV기법^(8,9)이 개발되었다. 디지털 HPIV기법은 필름을 이용한 HPIV기법에 비해 2D PIV기법처럼 시스템 구성이 단순하며 복잡한 기록과정의 대부분이 생략됨에 따라 비용 및 소요시간이 크게 줄어드는 장점을 가지고 있다. 디지털 HPIV기법에서는 기존의 필름을 이용한 방식에서 사용하던 비축(off-axis) 방식의 광원배치를 사용하지 않고 단일 광원의 일축 방식을 이용한다. 이에 따라 광학장치의 구성이 보다 간단해졌다. 디지털 HPIV기법은 디지털 영상 기록장치인 CCD 혹은 CMOS 센서어레이(sensor array)에 시간 연속적인 홀로그램(hologram)을 직접적으로 기록하고 3

[†] 회원, 포항공과대학교 기계공학과 대학원

E-mail : jandi@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2839 FAX : (054)279-3199

^{*} 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

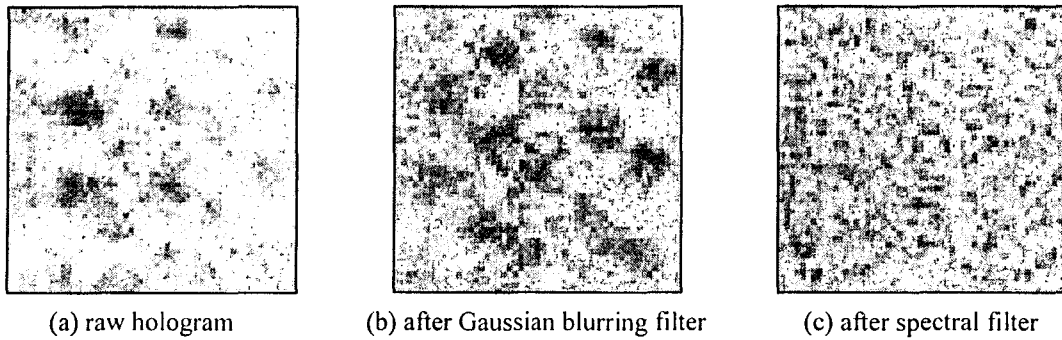


Fig. 1 Comparison of holograms with digital image processing procedures

차원 유동을 수치적으로 재생하는 방식이다.

디지털 홀로그래피의 기록매체인 디지털 센서는 광학적 홀로그래피의 기록매체인 필름과 달리 해상도가 약 1/10정도밖에 되지 않는다. 따라서 기록할 수 있는 개구수(numerical aperture)가 제한되어 성능이 현저하게 저하되는 문제점이 있다. 하지만 필름을 이용한 초기 HPIV기법의 경우 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. 반면에 디지털 홀로그래피는 홀로그래프의 기록과 재생을 모두 수치적으로 나타낼 수 있으므로 저장과 후처리가 용이한 장점이 있다.

디지털 홀로그래픽 PIV 시스템을 구성하기 위해서는 기본적인 네 가지 요소를 고려해야 한다. 첫째는 홀로그래프 영상을 얻기 위해 필요한 디지털 기록장치의 해상도이다. 둘째는 Mie 산란에 의한 입자 홀로그래피의 고유수차(intrinsic aberration)이다. 셋째와 넷째 요소는 수치적 재생과 구현을 위한 수학적 모델과 홀로그래프에 나타나는 스페클(speckle) 노이즈 문제이다. 각각의 고려요소는 디지털 기록에서 나타날 수 있는 가장 기본적인 문제로서 홀로그래픽 PIV 시스템을 구성하는데 있어서 반드시 고려가 되어야 한다. 그리고 홀로그래프 영상의 처리에 있어서 가장 기본이 되는 원시영상의 질(quality)도 중요하다. 기록된 홀로그래프 영상은 입자 홀로그래피 영상뿐만 아니라 원하지 않는 많은 노이즈와 산란영상을 포함하고 있다. 이러한 노이즈들은 레이저광이 지나가는 광학장치와 디지털 카메라의 보호경에서 주로 발생하게 된다. 원하지 않는 노이즈들은 다양한 디지털 영상처리 기법을 통해서 처리될 수 있다. 본 연구에서는 디지털 영상처리 기법을 이용하여 깨끗한 홀로그래프 영상을 얻었으며 수치적 재생을 통해 그 영향을 해석하였다.

또한 입자농도는 홀로그래프 영상의 질에 영향을

미친다. 입자농도가 짙어질수록 입자 홀로그래피 영상은 간섭에 의해 해석이 어려워지기 때문이다. 본 연구에서는 다양한 농도의 입자를 이용하여 개발된 디지털 홀로그래픽 PTV 시스템에 적용하였다.

본 연구에서는 개발된 일축 방식의 디지털 HPTV기법⁽⁷⁾을 이용하여 입자의 농도에 따른 영향과 디지털 영상처리 기법의 성능을 비교하고 살펴 보았다.

2. 홀로그래픽 PTV 시스템

2.1 디지털 영상처리

본 연구에서는 디지털 영상처리 기법을 이용하여 원시 홀로그래프 영상에 포함된 노이즈와 산란영상을 효과적으로 제거하였다. Fig. 1은 원시 홀로그래프 영상과 Gaussian blurring 필터, spectral 필터를 각각 적용한 홀로그래프 영상을 비교한 결과이다. Fig. 1(b)는 Gaussian blurring 필터를 적용한 홀로그래프 영상이다. Gaussian blurring 필터는 영상을 작은 격자로 나누어 각 격자내의 평균값을 계산하여 각 픽셀의 값에서 빼준다. 이를 통해 영상내의 불필요한 낮은 주파수대역의 노이즈들을 제거할 수 있다. 따라서 Gaussian blurring 필터는 고대역 필터(high pass filter)이며 가우시안 윈도우의 크기가 커짐에 따라 보편적으로 사용되고 있는 국소평균차(local-mean subtraction) 필터와 유사하다. 그리하여 다양한 주파수 대역을 가지는 노이즈를 선별적으로 제거할 수 있는 장점이 있다. Fig. 1(c)는 Gaussian blurring 필터를 적용한 영상에 spectral 필터를 적용한 영상이다. Spectral 필터는 홀로그래프 영상에서 원하지 않는 노이즈를 제거하는데 이용된다. 즉 불필요한 노이즈 중에는 규칙적인 패턴을 가지고 있는 노이즈가 있다. 이러한 노이즈는 광학장치나 보호경 같은 구면광학장치에서 주로 발생한다. 이 노이즈들은 power spectrum에서 특징적으로 매우 강한 파수(wave-number) 성분을 보여준다. Spectral

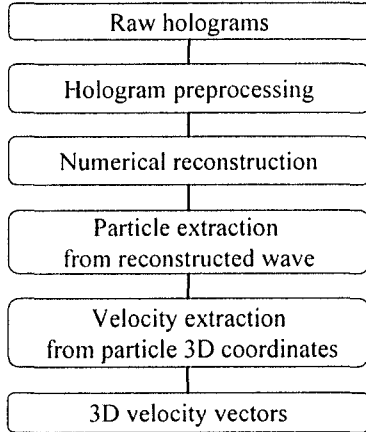


Fig. 2 Flowchart of digital in-line HPIV technique

filter는 이러한 특징적인 성분을 찾아 그 푸리에 계수(Fourier coefficient)를 0으로 하여 원래 영상에서 제거하게 된다. 결과적으로 Fig. 1(a)와 (c)를 비교하여 보면 배경에 존재하는 규칙적인 패턴이 제거되었으며 보다 선명한 입자 홀로그래피 패턴을 확인할 수 있다.

2.2 수치적 재구성

Fig. 2는 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) 영상처리 기법을 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, ρ 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 기울진 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^(10,11)에 의해 제시된 angular 스펙트럼 분석을 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. 미소 조사체적 내부의 대표 속도벡터를 구하는 기존의 PIV 방법 대신 각 입자들의 변위를 추출하는 PTV 방식의 알고리즘을 채택하였다. 속도벡터 추적 알고리즘은 본 연구실에서 개발하여 사용해오고 있는 일치확률 방식의 PTV 입자추적방법⁽¹²⁾을 3차원으로 개선하여 이용하였다. 얻어진 3차원 속도장 정보는 통계적 처리 등을 위해서 3차원 보간법(interpolation)을 이용하여 격자상의 속도장 정보로 변환하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험장치 및 구성

수직 제트유동에 적용한 일축 방식의 디지털 HPTV 시스템을 이용하여 디지털 영상처리 기법의 적용유무와 입자농도에 따른 영향을 실험적으로 해석하였다. 본 연구에서 사용된 실험장치의 구성도를 Fig. 3에 나타내었다. 기본적인 구성은 전방산란 방식의 단일광원을 이용한 일축 홀로그래피

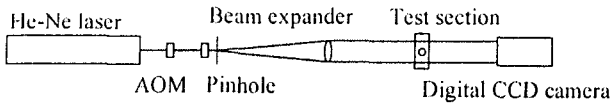


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

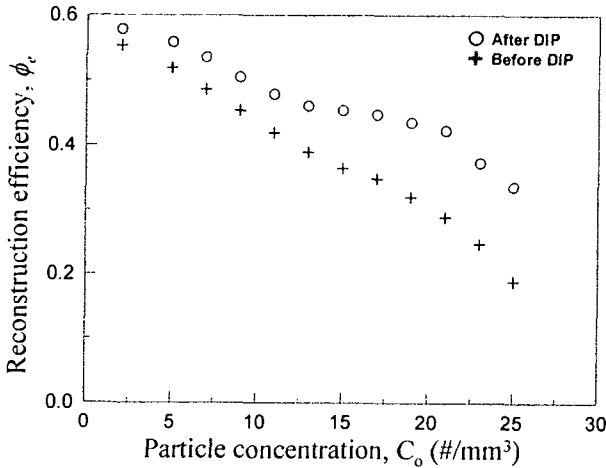


Fig. 4 Comparison of reconstruction efficiency between before and after digital image processing procedure

구성을 보여주고 있으며, 파장이 632.8nm인 He-Ne 레이저를 광원으로 이용하였다. 펄스 광원을 만들기 위하여 레이저 앞에 AOM(acousto-optic modulator)을 설치하였다. 영상취득 장치로 사용된 12bit cooled CCD 카메라의 해상도는 1280×1024 픽셀이고, 한 픽셀의 크기는 6.7 μ m이다. 실험에 사용된 수조의 종횡비는 1:0.1:6이고 제트의 노즐 직경은 $d=1.9$ mm이다. 제트 출구속도에 기인한 레이놀즈 수는 $Re=1,200$ 이다. 측정 위치는 제트 출구로부터 주 유동방향으로 약 3d만큼 떨어진 근접영역이다. 추적입자로는 직경이 약 50 μ m인 hollow glass 입자를 사용하였다. 추적입자의 농도는 $C_0=2\sim 25$ particles/mm³이며 기록 체적의 크기는 8.5×6.8×9mm³이다.

3.2 디지털 영상처리에 따른 영향

본 연구에서는 디지털 영상처리법의 적용유무에 따른 재생률(reconstruction efficiency)을 비교하였다. 재생률 ϕ_c 는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 N_r 은 수치적 재생에 의해 획득된 입자의 개수이고, N_o 는 입자농도로 계산한 입자의 개수이다. Fig. 4는 디지털 PTV 시스템에서 주입된 입자농도에 따른 재생률을 디지털 영상처리법의 유무에 따라 나타낸 결과이다. 결과로부터 Gaussian blurring 필터와 spectral 필터의 적용효과가 입자농

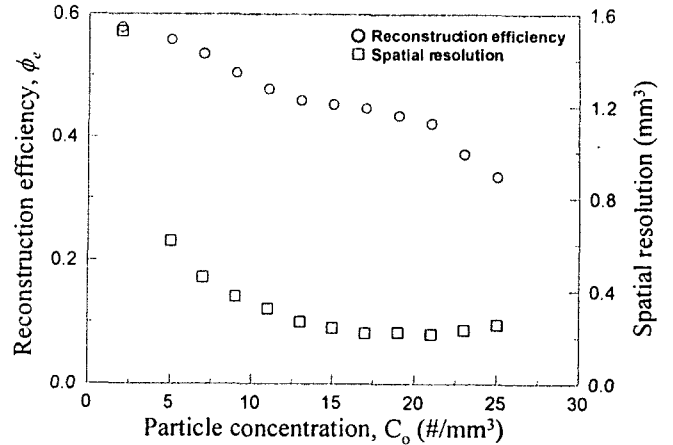


Fig. 5 Comparison of reconstruction efficiency and spatial resolution with different particle concentrations

가가 증가함에 따라 커짐을 알 수 있다. 입자의 농도가 증가할수록 입자간의 간섭이 더욱 증가하게 된다. 간섭된 입자 홀로그래피 영상은 동시에 노이즈의 영향을 받게 되므로 입자농도가 증가할수록 재생률은 감소하게 된다. 따라서 적절한 디지털 영상처리법을 통해서 불필요한 배경을 제거함으로써 디지털 PTV 시스템의 재생률을 높일 수 있다. $C_0=25$ particles/mm³일 경우, 본 연구에서 적용한 디지털 영상처리법에 의해서 약 43%의 재생률 개선효과를 얻었다.

3.3 입자농도에 따른 영향

Fig. 5는 디지털 영상처리법이 적용된 홀로그래피 영상으로부터 각 입자농도에 따라 재생률과 공간해상도를 비교한 결과이다. 그림에서 나타난 공간해상도는 재생된 입자의 개수를 통해 각 입자가 차지하는 공간해상도이다. 입자농도 $C_0=2\sim 10$ particles/mm³일 경우에 재생률은 비교적 높지만 반면에 공간해상도가 매우 낮다. 즉 낮은 입자농도 때문에 재생률은 우수하지만 낮은 입자농도로 인해 하나의 입자가 차지하는 공간해상도가 낮아지게 된다. 반면 입자농도 $C_0=19\sim 25$ particles/mm³일 경우, 공간해상도는 매우 우수하지만 재생률은 매우 낮다. 공간해상도의 경우 입자의 농도가 증가함에 따라 일정해지고 있다. 이는 재생률이 입자농도가 높을수록 감소하여 재생되는 입자의 개수가 일정해지기 때문이다. 결과적으로 본 연구에서는 공간해상도와 수치적 재생시간을 감안하여 최적의 입자농도 $C_0=11\sim 17$ particles/mm³를 선택하였다. 이 영역에서는 공간해상도가 일정하며, 재생률 역시 약 $\phi_c\sim 0.45$ 로 일정한 경향을 보여주고 있다. 이를 통해 본 연구에서 적용한 디지털 HPTV 시스템에서 사용할 수 있는 최적의 입자농도를 실험적으로 비교하여 얻을 수 있었으며, 이 결과는 향후 일축

방식의 디지털 HPTV기법을 이용하는 다양한 응용연구에서 입자농도의 선택에 효과적으로 참고될 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 개발된 디지털 HPTV 시스템의 성능을 개선하기 위해서 다양한 디지털 영상처리 기법을 도입하여 입자농도에 따른 성능을 비교하였다. 적용된 Gaussian blurring 필터와 spectral 필터는 홀로그램 영상에 포함된 불필요한 노이즈와 산란영상을 효과적으로 제거할 수 있음을 보였으며, 입자농도가 증가할수록 효율적임을 알 수 있었다.

입자농도는 직접적으로 재생활에 영향을 미치는 실험조건으로 본 연구에서는 다양한 입자농도를 이용하여 재생활과 공간해상도에 미치는 영향을 비교하였다. 이를 통해 최적의 입자농도를 도출하였다. 디지털 홀로그래피는 구성방법에 따라 매우 상이한 실험조건과 결과를 보여준다. 향후 일축방식의 디지털 HPTV 시스템을 적용하는 많은 응용연구에 있어서 본 연구에서 도출한 최적의 입자농도 결과는 효과적으로 참고되어 이용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부의 BK21사업과 포항 공과대학교의 기술개발사업의 지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

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 Papan, G. C., 1994, "Phase-conjugate Holographic System for High-resolution Particle Image Velocimetry," *Applied Optics*, Vol. 33, pp. 715 9~7169.

(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) 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.

(8) Pan, G., 2003, "Digital Holographic Imaging for 3D Particle and Flow Measurement," PhD Thesis, State University of New York at Buffalo.

(9) Pan, G., and Meng, H., 2003, "Digital Holography of Particle Field: Reconstruction by use of Complex Amplitude," *Applied Optics*, Vol. 42, pp. 827~833.

(10) Goodman, J. W., 1967, "Film Grain Noise in Wavefront-reconstruction Imaging," *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 57, pp. 493~502.

(11) Goodman, J. W., 1996, "Introduction to Fourier Optics," New York, McGraw-Hill.

(12) 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.