

Holographic Velocimetry 시스템의 연구 개발 전망

강 보 선*

1. 서 론

유동의 특성을 파악하기 위해서는 유동의 속도장을 측정할 수 있는 시스템이 절대적으로 필요하며, 다양한 속도 측정 방법 및 제품 등이 사용되고 있다. 특히, 유동장에 영향을 주지 않는 광학적 측정 시스템은 레이저와 컴퓨터의 발전에 힘입어, 날로 새로워지고 있다. 1980년대 초반부터 가장 보편적으로 사용되고 있는 LDV를 비롯하여, 1980년대 후반부터는 점측정의 한계를 극복하여 2차원적인 면측정이 가능한 PIV(Particle Image Velocimetry) 시스템이 등장하여, 많은 상용 제품과 함께 활발한 연구가 진행되고 있다. 최근에는, 속도장 측정의 궁극적인 목표인, 3차원적 측정이 가능한 Stereoscopic PIV나 Holographic PIV 시스템 개발에 많은 관심이 쏟아지고 있다.

또한, 분무 유동 해석에 필수적인 분무 입경 측정을 위한 광학적 계측 시스템에는 크게 광산란법을 이용하는 Malvern Particle Analyzer 나 위상 도플러 기법을 이용하는 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) 등이 있다. 하지만 이러한 측정 시스템들은, 노즐에서 분사되는 분무의 하류 영역같이, 입자가 희박하게 분포되어 있고, 거의 구형에 가까울 경우에는, 신뢰성이 있는 측정 결과를 얻을 수 있지만, 입자가 과밀하게 분포할 뿐만 아니라, 크기도 크고, 모양도 매우 불규칙적인 노즐 출구와 가까운 지역에서는, 측정의 정확성이 떨어지는 문제점이 있다. 또한, 입경의 공간적 분포를 파악하기에는 한계가 있다.

3차원 물체를 있는 그대로 재생시킬 수 있는 홀로그래피는 오래 전부터 입자 직경 측정 분야에서는 많은 연구가 진행되어 왔다⁽¹⁾. 최

근에는 3차원적 재현의 장점을 최대한 활용하여, 입자 속도 측정 분야에서도 홀로그래피를 이용한 기법에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 이에 본 해설에서는 홀로그래피의 원리를 간단히 살펴 보고, 입자의 크기 및 속도 측정에 홀로그래피를 어떻게 적용시킬 수 있는지, 속도 측정을 위해 발표된 대표적 홀로그래피 시스템들의 특징들을 살펴 보았다.

2. 홀로그래피의 원리

2.1 홀로그래피의 원리

빛에 반응하는 대부분의 기록 물질은 빛의 강도에만 반응하기 때문에, 빛이 지닌 위상과 관련된 정보는 기록될 수가 없어, 3차원적인 효과는 사라진 평면적인 사진만을 얻을 수 있다. 따라서, 빛의 위상을 기록하기 위해서는, 위상과 관련된 정보를 적당한 방법에 의하여 빛의 강도로 변화시켜주어야 한다. 이러한 목적으로 이용되는 방법이 빛의 간섭 현상이다. 즉, Fig. 1 (a)에 나타낸 것처럼, 기록하고자 하는 물체를 통과한 물체광(object wave)에, 기준광(reference wave)을 더하여, 두 광의 간섭 패턴을 필름에 기록하게 된다. 현상된 홀로그램(hologram)을, Fig. 1 (b)와 같이, 기록할 때와 같은 방향의 기준광을 비추면, 기록할 당시의 물체광이 그대로 재현되기 때문에, 물체가 이전 위치에 존재하지 않더라도, 실제 존재하는 것처럼, 3차원적으로 관찰할 수 있게 된다.

Fig. 1 (a)에서의 기준광과 물체광을 수학적 으로 표시하면 아래와 같다.

$$U_r(x, y) = A_r(x, y) e^{-j\alpha_r(x, y)} \quad (1)$$

$$U_o(x, y) = A_o(x, y) e^{-j\alpha_o(x, y)} \quad (2)$$

* 전남대학교 자동차공학부

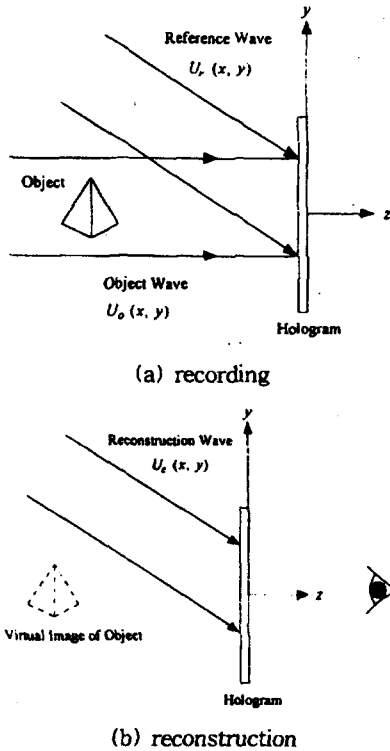


Fig. 1 Principle of holography.

여기서 A , α 는 빛의 진폭과 위상이다. 기준광, 물체광에 동시에 비추어진 홀로그램의 강도는

$$\begin{aligned}
 I(x,y) &= (U_o + U_r)(U_o^* + U_r^*) \\
 &= U_o U_o^* + U_r U_r^* + U_o U_r^* + U_r U_o^* \quad (3) \\
 &= A_o^2 + A_r^2 + 2A_o A_r \cos[\alpha_o(x,y) - \alpha_r(x,y)]
 \end{aligned}$$

로 표시된다. 상첨자 *는 각 광의 켈레 복소수 (complex conjugate)를 표시한다. 식 (3)에서 알 수 있듯이 물체광의 위상과 관련된 정보가 중괄호 안에 포함되게 된다. 현상 처리된 홀로그램의 투과 함수(transmittance function)는, 식 (3)의 빛의 강도에 비례하며, 다음과 같이 표시된다.

$$t(x,y) = t_b + c_1 [A_o^2 + U_o U_r^* + U_r U_o^*] \quad (4)$$

홀로그램의 재생을 위하여 기록할 때의 기준광과 같은 방향의 기준광을 이용하면,

$$U_c(x,y) = A_c(x,y) e^{-j\alpha_c(x,y)} \quad (5)$$

이 되고, 홀로그램을 통과한 이후의 빛은

$$\begin{aligned}
 U_1(x,y) &= t(x,y) U_c(x,y) \quad (6) \\
 &= t_b U_c + c_1 [A_o^2 U_c + U_r U_o^* U_c + U_o U_r^* U_c]
 \end{aligned}$$

로 표시된다. 식 (6)의 네 번째 항이 상수만 변화된 본래의 물체광이 되어, 기록 당시의 물체를 3차원적으로 관찰할 수 있게 된다.

2.2. 홀로그램 기록 방법

홀로그램의 기록 방법에는 기준광과 물체광이 동일한 in-line 방식과 Fig. 1과 같이 기준광이 물체광과 다른 경로로 필름에 도달하는 off-axis 방식이 있다.

2.2.1. In-line 방식

이 방식은 기준광과 물체광이 동일한 것으로, 한 방향의 광으로 입자에 의해 산란되는 광은 물체광으로, 산란되지 않은 빛은 기준광으로 사용하기 때문에 광학적 시스템이 매우 단순하다. 입자에 의해 전면 방향으로 산란되는 빛을 사용하기 때문에 낮은 레이저 출력으로도 가능하다. 하지만, 입자 밀도가 너무 높게 되면 기준광으로 사용될 수 있는 빛이 너무 줄어들게 되기 때문에 공간해상도에 한계가 있다. 또한, 공간해상도를 결정하는 유효 각도가 작은 것, 재생시에 물체의 실상과 허상이 동시에 재생되어 광학적 잡음(speckle noise)에 의해 깨끗한 입자 영상 확보가 쉽지 않은 점이 단점이 될 수 있다.

2.2.2 Off-axis 방식

이 방식은 물체광과 기준광이 경사진 각도를 이루고 서로 다른 광 경로를 거쳐 입자 영상을 기록하게 되며 레이저의 가간섭성(coherence)이 매우 좋아야 한다. 반면에, 재생시에 실상과 허상이 분리되기 때문에 높은 SNR(Signal to Noise Ratio)을 가질 수 있어, 깨끗한 입자 영상을 얻을 수 있다.

3. HV 시스템

HV(Holographic Velocimetry)는 3차원 입자 정보를 홀로그래피를 이용하여 저장한 뒤, 이를 재생하여 입자 변위를 측정, 속도장을 도출하는 모든 홀로그래피 시스템으로 정의할 수 있다. 지금까지 발표된 HV 시스템을 크게 분류해 보면, 입자 이미지 자체를 영상 처리하여 크기와 변위를 구하는 방식과, 변위를 직접 구하지 않고 2D PIV에서 사용하는 상관관계를 3차원으로 확장하는 Holographic PIV 방식으로 구별할 수 있다. 현재까지는 전자를 이용하는 방식은 많지 않고, 후자 방식인 Holographic PIV가 상용화를 위해 많이 연구되고 있다.

3.1 입자 이미지 처리 방식

이 방식은 두 순간의 비교적 큰 크기의 입자 이미지를 획득한 후, 이를 적절히 이미지 처리하여, 입자의 크기, 모양, 3차원 공간에서의 좌표 등의 데이터를 추출해내는 방법이다. 각 입자의 3차원 공간 좌표가 구해지면, 알고 있는 펄스 간격과 함께 3차원 속도 분포가 구해진다. 대표적인 연구진은 뮌헨 공대의 Mayinger 교수 그룹으로써, 사용된 홀로그래피 기록 시스템⁽²⁾은 Fig. 2와 같다. 시스템은 기본적으로 off-axis 구조이며, 특징은 실험 체적을 두 방향에서 볼 수 있도록 두 개의 홀로그래피가 기록된다는 것이다. 재생은 각 방향으로 광축을 따라 진행하면서 입자의 2차원적 이미지를 기록하고, 이를 이미지 처리한 다음, 2차원 변위를 측정한다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이

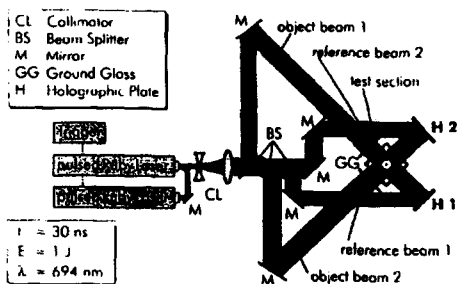


Fig. 2 Stereoscopic HPV.

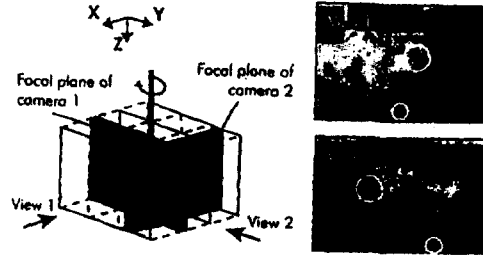


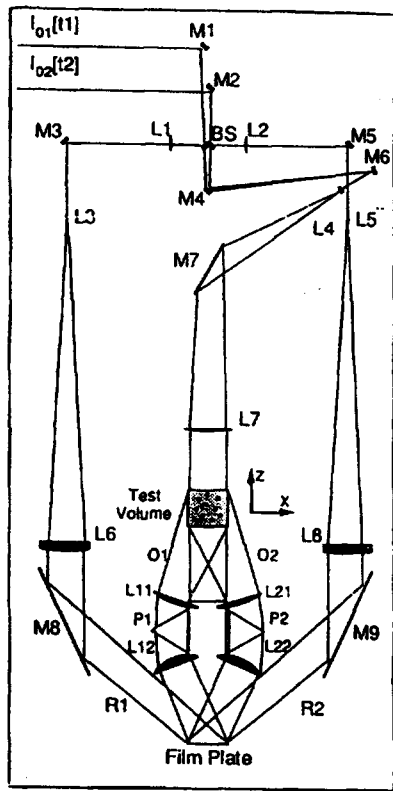
Fig. 3 Physical model for the stereo-matching algorithm.

View 1을 통해서 입자의 Y, Z 방향의 변위를 알 수 있게 되고, View 2를 통해서 X, Z 방향의 변위가 파악되어, 결과적으로 입자의 3방향으로의 변위를 알 수 있게 된다.

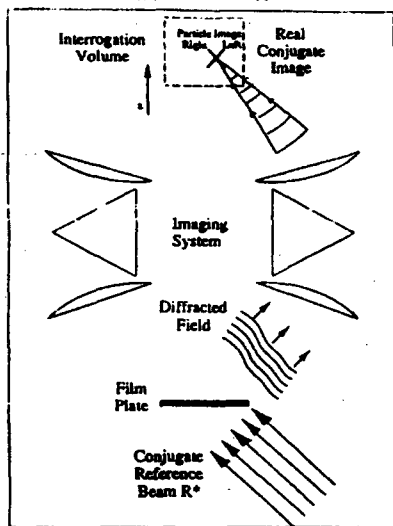
3.2 Holographic PIV 방식

3.2.1 Phase-conjugate HPIV

이 시스템은 Univ. of Illinois의 Barnhart et al.⁽³⁾에 의해서 제안되었으며, 기록 및 재생 시스템을 Fig. 4에 나타내었다. 기록 시스템은 기본적으로 off-axis 구조이며, 시간 t1, t2에서의 기준광의 방향이 서로 다르다. 즉, 첫 번째 펄스의 기준광은 R1 방향으로, 두 번째 펄스의 기준광은 R2 방향으로 진행하여 홀로그래피 필름에 도달하게 된다. 따라서, 각 펄스의 입자 이미지가 분리되어 재생되기 때문에, 입자 이동 방향에 대한 모호성 문제가 없어지게 된다. 물체광은 실험 체적을 통과하여 직진하는 빛은 차단되고, 입자에 의해 산란되는 빛을 두 방향에서 수집하여 필름으로 진행하게 된다. 따라서, 각 펄스 시간마다 실험 체적을 두 방향에서 바라볼 수 있는 입자 이미지를 재생할 수 있다. Fig. 4 (b)에 나타낸 재생 시스템의 특징은 입자 이미지의 기록에 의해 사용된 광학 요소들의 광학적 수차(aberrations)를 보상하기 위하여, 기록 당시에 사용한 기준광의 결래 기준광(Phase-conjugate reference beam)을 사용하여 입자의 실상을 형성하는 것이다. 축방향 속도 성분 추출은 한 방향에서 바라본 입자 이미지를 통하여 2차원 변위를 구하고, 같은 방법으로 다른 방향에서 바라본 입자 이



(a) recording



(b) reconstruction

Fig. 4 Phase-conjugate HPIV system.

미지의 2차원 변위를 구하여, 입체 PIV(Stereoscopic PIV)에 적용되는 원리를 이용하여 구해진다.

3.2.2 Hybrid HPIV

Johns Hopkins Univ.의 Zhang & Katz⁽⁴⁾는, in-line holography와 off-axis holography의 단점은 배제하고, 장점만을 조합한 Hybrid HPIV 시스템을 제안하였다. 기본 구조는 Fig. 5에 나타낸 것처럼, off-axis holography이지만, 옆면 방향으로 산란되는 빛을 물체광으로 이용하는 다른 시스템과 다르게 앞 방향으로 산란되는 빛을 물체광으로 사용하였다. 또한, 이 시스템의 가장 큰 특징은 물체광에 포함되어 있는 입자에 의해 반사되지 않은 빛들을 제거한 점이다. 즉, 그림과 같이 2 개의 동일한 relay lens를 각 렌즈의 초점거리의 2 배만큼 떨어뜨린 후 첫 번째 렌즈의 초점 거리에 매우 작은 직경(D=2 mm)의 핀(high pass filter)을 설치한다. 따라서, 물체광 중에서 입자에 의해 반사되지 않은 성분(DC 성분)들은 첫 번째 렌즈에 의해 초점에 모아지게 되고, 초점에 위치한 핀에 의하여 막아지게 된다. 반면에 입자들에 의해서 산란된 빛(AC 성분)은 relay lens를 통과하여 holographic film에 도달하게 된다. 이러한, 공간적인 High Pass Filtering에 의하여, 매우 높은 SNR을 달성할 수 있었다.

3.2.3 IROV(In-line Recording and Off-axis Viewing)

이 시스템은 Univ. of Houston의 Meng & Hussain⁽⁵⁾에 의해서 제안되었으며, 기록 시에는 in-line holography의 단순한 광학적 구성

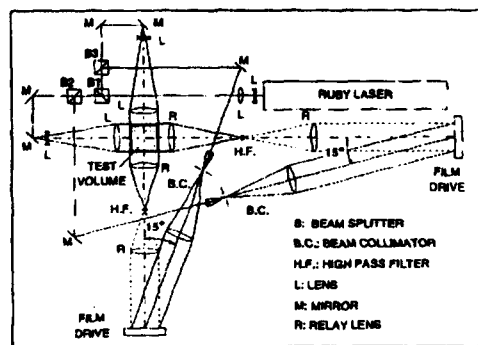


Fig. 5 Recording setup of hybrid HPIV.

을 활용하면서도, 재생할 때는 off-axis 관찰을 수행하여, off-axis holography의 장점인 높은 SNR, 짧은 심도깊이를 확보할 수 있는 장점을 지니고 있다. Fig. 6에 나타낸 것처럼, in-line으로 기록된 홀로그램을 in-line으로 관찰하게 되면, 입자에서 전면 산란(forward scattering)되는 빛(low frequency)에 의해 입자를 재생하면서, 허상파(virtual image wave), 실상파(real image wave), 방해받지 않은 기준광 등이 중첩이 되기 때문에 많은 speckle noise가 발생하게 된다. 하지만, 입자 관찰 방향을 in-line에서 off-axis로 바꾸면, in-line 관찰시 나타나는 여러 단점들을 제거하면서, 입자로부터 측면 산란되는 빛(high frequency)에 의해 입자 재생도 가능하게 된다. 재생된 입자 이미지로부터 축방향 속도 성분의 추출은 축방향으로 여러 평면에서의 입자 이미지를 기록하여, 3차원 이동 변위를 측정하는 방법과 2대의 카메라를 이용하여 입체적 관찰(stereoscopic viewing)하는 방법에 의하여 구해진다.

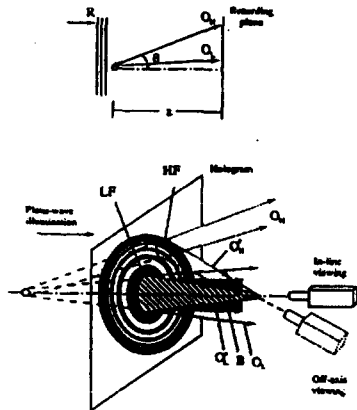


Fig. 6 Principle of IROV System

3.2.4 Multibeam HV

이 시스템은 Zimin et al.⁽⁶⁾에 의해 제안되었으며, 기본 원리는 두 빔을 사용하여 산란조리개각(scattering aperture angle, Ω)을 크게 하여 speckle 크기를 작게 만든 것이다. 즉, speckle 크기 $s = 2\lambda/\Omega$ 이기 때문에 speckle 크기를 최소화시키기 위해서는 Ω 를 크게 해야 한다. 단일 빔에 의해서는 Fig. 7 (a)에 나타낸

것처럼, Ω 가 매우 작지만, 여러 빔을 쓰게 되면 Fig. 7 (b)처럼 Ω 가 커짐으로써 발생되는 speckle의 크기를 작게 만들 수 있다. 이 원리를 이용한 기록 시스템은 Fig. 8과 같다. 물체광은 거울을 통과하여 두 방향에서 실험 체적을 통과한다. 전면 산란된 물체광은 렌즈에 의해서 holographic film 앞에 입자 이미지를 형성한다. 이 때, 실험 체적에서 입자에 의해 산란되지 않은 빛들은 High Pass Filter에 의하여 막아진다. 기준광은 물체광과의 광로차를 줄이기 위하여 물체광과 마찬가지로 실험 체적을 통과하지만, 입자에 의해 산란된 빛들은 Low Pass Filter에 의하여 제거되어 필름에 도달하게 된다.

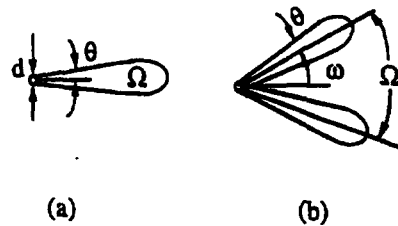


Fig. 7 Scattering aperture angle for (a) single beam illumination (b) multibeam illumination

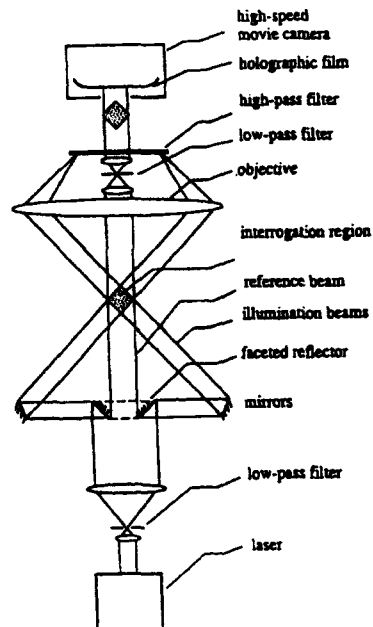


Fig. 8 Multibeam HPV

4. HV의 전망

실험 유체역학 분야의 많은 연구자들의 궁극적 목표인 3차원 속도장의 시간적, 공간적 분포를 계측할 수 있는 시스템은, 날로 발전하는 컴퓨터, 전자 기술, 광학 부품들 덕택에 이제는 꿈이 아닌 현실로 구현할 수 있는 단계에 이르렀다고 볼 수 있다. 그 구현 방식에는 여러 가지가 있을 수 있지만, 홀로그래피를 이용한 방식은 3차원 이미지를 있는 그대로 기록, 재생할 수 있기 때문에 다른 방식에 비교하여 매우 유리하다고 볼 수 있다. 특히, 2차원 PIV의 많은 연구 결과들을 그대로 3차원으로 확장, 적용시킬 수 있는 Holographic PIV는 현 시점에서 상업화하기가 적절한 시스템으로 볼 수 있다. 입자 이미지 처리 방식은 입자 크기 측정 또한 중요한 분무 연구 영역에 적절한 시스템으로 간주된다. 하지만, 홀로그래피 시스템이 보다 더 쉽게 이용되기 위해서는 복잡한 기록, 재생 광학 시스템의 단순화, 필름의 화학적 처리 과정의 생략, 보다 순간적으로 이미지 처리 과정을 마칠 수 있는 프로그램의 개발 등, 앞으로도 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Vikram, C. S., *Particle Field Holography*, Cambridge University Press.
2. Feldmann, O., *Short-Time Holography and Holographic PIV Applied to Engineering Problems*, *Applied Optical Measurements*, Springer-Verlag, 1999.
3. Barnhart, D.H., Adrian, R.J., Papen, G.C., "Phase-Conjugate Holographic System for High-Resolution Particle-Image Velocimetry", *Applied Optics*, Vol 33, Iss 30, pp. 7159-7170, 1994.
4. J. Zhang, B. Tao, J. Katz, "Turbulent Flow Measurement in a Square Duct with Hybrid Holographic PIV", *Experiments in Fluids*, Vol. 23, No. 5, pp. 373-381, 1997.
5. Meng, H., Hussain, F., "In-Line Recording and Off-Axis Viewing Technique for Holographic Particle Velocimetry", *Applied Optics*, Vol 34, Iss 11, pp. 1827-1840, 1995.
6. Zimin, V., Meng, H., Hussain, F., "Innovative Holographic Particle Velocimeter; A Multibeam Technique", *Optical Letters*, Vol. 18, No. 13, pp. 1101-1103, 1993.