

# 홀로그래피 입자속도 측정시스템의 개발과 분무 액적에의 적용

## Development of Holographic Particle Velocimetry System and Its Application to Spray Droplets

추연준\*, 강보선\*\*  
Y. J. Choo and B. S. Kang

### ABSTRACT

The Holographic Particle Velocimetry system can be a promising optical tool for the measurements of three dimensional particle velocities. In this study, diffused illumination holographic system to measure the sizes and 3D velocities of moving particles based on automatic image processing was developed. First of all, basic optical systems for pulse laser recording, continuous laser reconstruction, and image acquisition, were constructed. To determine the position of particles in the optical axis, new three auto-focusing parameters(AFP), namely, Correlation Coefficient, Sharpness Index, and Depth Intensity were introduced and verified. The developed system was applied to spray droplets to validate the capability of the system. Three dimensional positions of particles viewed from two sides were decided using AFP and then 3D velocities of particles were extracted by particle tracking algorithm. Comparison of measurement results of sizes and 3D velocities of particles with those obtained by laser instrument, PDPA, showed good consistency of the developed holographic system.

**Key Words:** Holographic Velocimetry(홀로그래피 속도계), Diffused Illuminaiton Holography(산란 광 홀로그래피), Particle Tracking(입자 추적), Focusing Parameter(초점 변수), 3D Particle Position(3차원 입자 위치)

### 1. 서론

유동장 측정을 위해 인위적으로 미세 입자가 첨가되거나, 원래 입자를 포함하는 유동 현상이든지, 입자를 측정 대상으로 할 경우에 가장 많이 이용되는 방법이 레이저를 이용한 광계측 기법이다. 주로 많이 이용되는 광계측 시스템으로는 LDV, PDPA, PIV, 영상처리 기법, 홀로그래피 기법 등이 있다. 이러한 방법들은 적용 대상, 측정 방법, 측정하려는 물리량에 따라 차이점이 있으며, 각각 장단점을 가지고 있다.

LDV와 PIV는 유동장에 영향을 주지 않는 한도 내에서 인위적으로 미세 입자를 첨가하고 입자의 산란 정보를 해석한다. LDV는 대량의 샘플링이 가능하여 신뢰성이 높은 측정이 가능하고, 3차원 속도 벡터를 얻을 수 있지만, 점 측정이라는 단점이 있고, PIV는 간단한 측정 원리로 면 측정이 가능하지만, 2차원 속도 측정에 국한된다.

이와 달리 다상 유동, 분무 액적, 기포 등과 관련된 분야에서는, 입자의 속도뿐만 아니라 크기와 형상과 같은 정보를 동시에 요구하며, 이러한 목적으로 PDA, IPI(Interferometric Particle Imaging), 영상처리 기법 등이 활용되

\* 전남대학교 기계공학과 대학원

\*\* 전남대학교 기계시스템공학부

고 있다. PDA는 속도 측정의 원리는 LDV와 같지만, 입자의 크기와 형상을 측정하기 위해서 서로 다른 각도에서 입자에 의해 굴절된 빛의 위상 정보를 해석한다. 최근에 개발된 IPI는 PIV와 입자에 의해 굴절된 빛의 간섭을 이용하여 입자의 속도와 크기를 동시에 측정하고, 영상처리 기법은 입자의 이미지를 획득하여 입자의 속도와 크기를 구하는 간단한 원리를 이용한다. PDA는 LDV와 같이 점 측정이며, IPI, 영상처리 기법은 주로 2차원 속도 성분의 측정이 가능하며, 면 측정이라는 특성이 있다.

위와 같은 광계측 기법들이 가지는 단점들을 해결할 수 있는 이상적인 계측 방법으로, 기록 공간의 3차원 재현성이 뛰어난 홀로그래피 기법이 있다. 홀로그래피 기법은 3차원 공간에 대해서 3차원 속도 벡터를 얻을 수 있으며, 크게 유동장 해석을 목적으로 2차원 PIV에서 사용하는 상관관계를 3차원으로 확장시킨 HPIV와, 개별 입자들의 위치 좌표를 결정하는 PTV(Particle Tracking Velocimetry)와 접목하여, 유동장 및 입자 특성 해석도 가능한 HPTV로 구별된다. 계측 기법으로 홀로그래피가 이용되기 시작했던 1960년대부터, 많은 연구자들이 입자 해석을 목적으로 홀로그래피를 이용한 접근을 시도하였다. 초기에는 주로 입자의 크기, 가시화와 관련된 연구가 주를 이루었으나, 근래에는 컴퓨터 프로세서와 영상처리 기법의 발달로 인해, 입자의 크기뿐만 아니라 속도 측정을 위한 자동화된 시스템이 가능해졌다.

본 연구와 관련이 있는 입자추적방식의 주요 연구 결과로, Hausman 등<sup>(1)</sup>은 펄스 루비 레이저와 산란판(scatter plate, diffuser)을 이용하여 산란된 물체광을 적용하여 기포 특성을 해석하였으며, 영상처리 기법을 통해 입자의 크기와 3차원 위치 결정을 위한 자동 초점 변수를 소개하였다. Feldmann 등<sup>(2)</sup>은 확산 물체광을 이용하여 양방향에서 분무 액적을 기록한 후, 양방향에서 본 입자들의 좌표를 결정하고 스테레오매칭 알고리즘을 통해서 3차원 속도를 결정하였다. Tao 등<sup>(3)</sup>은 양방향 홀로그래피를 사용하여, 각 방향에서 입자 영상 상관관계를 이용하여 2차원 속도 벡터를 구하고, 양방향

매칭 기법을 이용하여, 3차원 속도 벡터를 구하였다. 또한, 한 방향만의 기록으로 입자의 3차원 좌표를 얻을 수 있는지에 대한 연구도 수행하였다. 즉, 한 방향에서 광축 방향으로의 입자의 밝기 분포 중 최대 밝기로 광축 방향 위치를 결정하고, 다른 방향에서 구한 좌표와 비교하는 방식으로 검증하였으며, 입자의 깊은 축방향 심도(depth of focus)에 의해 야기되는 부정확성을 해결하기 위한 방법이 요구된다는 결론을 내렸다. Yamakawa 등<sup>(4)</sup>은 직접분사식 분무에 대한 입자의 크기와 3차원 분포해석을 위해 재생된 입자의 경계 선명도를 이용한 자동화된 입자 추적기법을 개발하였고, 수동 해석을 통한 결과와 비교하였다.

본 연구에서는 입자의 3차원적 거동과 직경 정보를 측정할 수 있는 자동화된 이미지 처리 방식에 의한 홀로그래피 속도계를 개발하였고, 이를 분무 액적에 적용하여, 액적의 3차원 속도와 직경을 측정하였다. 재생된 영상의 해상도를 높이기 위해, 한 필름에 다중 노출시킨 기존 방법과 달리, 서로 수직인 양 방향에 위치한 필름에 단일 노출시키는 방법을 이용하였다. 또한, 개별 분무 입자의 광축 방향 위치를 결정할 수 있는 새로운 입자 초점면 판단 기준들을 개발, 적용하였다. 개별적으로 인식된 입자들의 3차원 위치 정보를 이용하여, 입자 추적 알고리즘을 적용하여 개별 입자들의 3차원적 속도를 추출하였으며, 측정 결과의 검증을 위해 PDA를 이용한 계측 결과와 비교하였다.

## 2. 홀로그램 기록 및 재생

### 2.1 기록시스템

입자의 속도 측정을 위해서는 동일 입자의 최소한 두 순간의 위치 정보를 필요로 하며, 단일 방향 이중 펄스에 의한 기록이 가장 많이 이용되어 왔다. 이 방법은 두 순간의 입자가 단일 좌표계에서 기록, 재생되어, 측정 좌표의 수정 없이 속도를 구할 수 있지만, 필름의 이중 노출로 재생 영상의 질이 현저하게 저하되며, 각 펄스의 입자 구별이 어려운 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 단점들을 해결하기

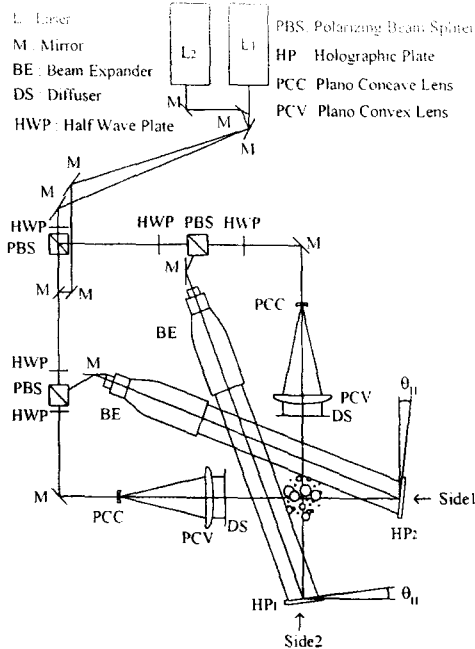


Fig. 1 Holographic recording system

위해서, Fig. 1과 같은 수직 양 방향 이중 펄스 시스템을 구성하였다. 즉, 서로 수직인 방향으로 각각의 동일한 기록 조건을 갖는 두 쌍의 광학계가 배치되어 있으며, 두 홀로그램에 각기 다른 한 순간만을 기록하도록 하였다. 기록 시스템은 전형적인 off-axis 방법이며, 심도를 줄이기 위해 산란판 조사(diffuser illumination)를 이용하였고, 비점 수차의 영향을 줄이기 위해, 홀로그래피 필름이 물체광과 참조광이 이루는 각의 이등분각과 수직하도록 위치하였다.

양 방향 홀로그래피에서 유의하여야 할 점은, 두 홀로그램에서 재생된 입자 영상의 좌표가 서로 일치하여야 한다는 것이다. 홀로그램 기록, 재생 및 재생 영상 기록 과정에서 발생할 수 있는 다양한 오차의 수정을 위해서 양 방향 단일 펄스 홀로그래피 실험이 선행되었다. 이를 통하여 양 방향에서 결정한 입자들의 좌표를 수정하는 좌표변환행렬을 구하고, 이를 양 방향 이중 펄스 홀로그래피에 적용함으로써, 양 방향 좌표 불일치 문제를 해결하였다.

## 2.2 재생시스템

재생시스템은 영상을 획득하는 CCD 카메라

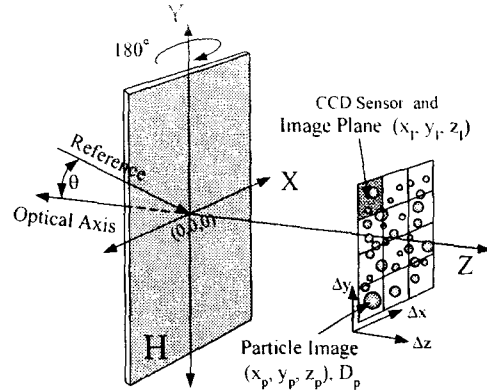


Fig. 2 Coordinates of reconstruction system

와 이를 정교하게 이송할 수 있는 이송장치로 이루어져 있으며, Fig. 2는 재생시스템의 좌표 축을 나타낸 그림이다. 기록시 감광필름, 재생시 홀로그램의 중심을 원점(O)으로 물체광의 진행 방향이 Z축, Z축에 수직인 평면이 XY평면이다. 기록된 필름은 현상 후, 왜곡이 없는 실상의 재현을 위해, 기록시 이용된 광학계를 그대로 유지하고 Y축을 중심으로 홀로그램을 180° 회전하여, 홀로그램 오른쪽 공간에 공액기준광에 의한 실상을 재현하였다. 재생 입자의 초점에서의 좌표는  $(x_p, y_p, z_p)$ , 이미지를 획득하는 센서의 화소 좌표는  $(x_I, y_I, z_I)$ 이다. 또한, 개별 입자의 좌표와 위치를 결정하기 위해서는, 전 해석영역에서 한 입자의 영상만을 추적해야 하는데, 해석을 위해 분리된 한 입자만의 영상을 입자해석영역(ROI, Region of Interest)으로 정의한다. ROI의 크기는 배경의 면적이 입자의 면적과 같도록, 입자의 종횡비에 비례하는 직사각형으로 잘라 내었다.

CCD 카메라 (Kodak MegaPlus ES1.0)는  $1,008 \times 1,018$  개의 픽셀 배열을 가지며, 픽셀 크기는  $9 \times 9 \mu\text{m}^2$  이다. 재생 영상의 기록시, 렌즈에 의해 발생하는 2차 심도의 영향을 배제하고, 렌즈의 제한된 구경(aperture)에 의한 스페클의 크기를 줄이기 위하여, 렌즈를 이용하지 않고, CCD 센서를 재생되는 영상 공간에 직접 노출시키는 방법을 이용하였다. 따라서, 획득 영상의 크기와 해상도는 CCD 센서의 규격에 의해서만 결정된다. CCD 센서의 이동은

DC 모터에 의해 제어되고, 최소 이송 거리가 33 nm인 3축 이송장치(PI Inc.)를 이용하였다. 이미지 획득은 광축과 직각인 평면에서 카메라를 수직, 수평 방향으로 이동하며 획득된 영상들을 조합하여 한 평면에서의 영상으로 간주하고, 동일 작업을 광축 방향 즉, 깊이 방향( $Z$ )을 따라서 주사간격( $\Delta Z$ )으로 이동하며 획득한 영상을 조합하여 3차원 영상을 복원하였다.

재생 입자 해석은 실시간 또는 저장 후 해석할 수 있는데, 본 연구에서는 실시간 처리시 장치의 장시간 작동을 피하기 위하여, 해석 공간을 일정한 주사간격으로 이동하며 저장한 후 일괄 처리하는 방식을 택하였다. 따라서, 주사간격이 광축 방향 최저 해상도가 되고, 해석 과정의 효율성, 저장 공간과 초점 결정 과정에서 발생할 수 있는 오차 등을 고려한 적절한 주사간격의 설정이 중요하며, 본 연구에서는 측정하려는 가장 작은 입자의 광축 방향 심도를 고려하여, 이송장치의 최소 이송거리의 약 1000 배에 해당하는 33  $\mu\text{m}$ 로 설정하였다.

### 3. 재생 영상의 해석

#### 3.1 재생 영상의 정성적 특성

재생 영상의 질에 영향을 미치는 인자들 중에서 중요한 것은, 재생 과정의 수차와 특히 산란 물체광 홀로그래피에서 문제가 되는 스펙클이다. 수차는 재생 파면이 일정한 양의 변위를 가지고 원래의 위치에서 벗어나 다른 곳으로 왜곡되는 현상으로, 영상의 질을 저하시키는 피할 수 없는 현상이다. 수차에 의한 파면의 변위량은 홀로그래프에서 멀리 떨어질수록 커지기 때문에, 기록 물체가 홀로그래프에서 멀리 위치할수록 재생 영상의 선명도는 감소한다.

영상 재현을 목적으로 하는 산란광 홀로그래피 기법에서 가장 큰 문제점은 재생 영상 전 영역에 배경으로 존재하는 반점 모양의 스펙클 노이즈이다. 일반적으로, 스펙클의 크기는 산란 표면(홀로그래프)에서 멀어질수록, 산란 표면이 작을수록 커지게 된다.<sup>(6)</sup> 스펙클이 커지면 배경과 입자의 구별이 힘들어져서 입자의 정확한

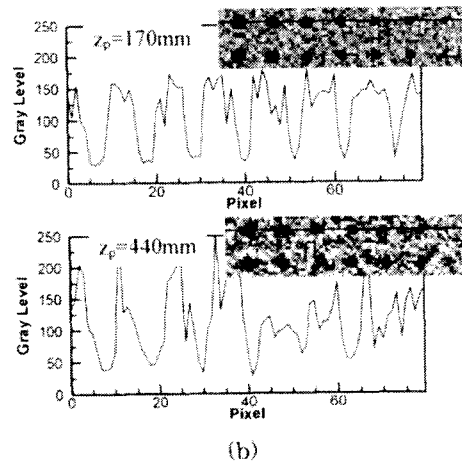
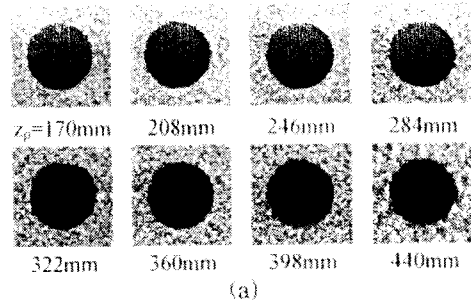


Fig. 3 Effect of particle position from hologram on image quality

광축 방향 초점 위치 결정을 어렵게 하고, 해석 가능한 입자의 크기를 제한한다. 스펙클은 스펙클의 크기가 영상장치의 최대 해상도(CCD pixel)보다 작을 경우는 마이크로(micro) 스펙클, 큰 경우는 마크로(macro) 스펙클로 구별되며, 두 경우 모두 재생 영상의 질을 저하시킨다. 하지만, 재생 영상의 인식 능력 관점에서 마이크로 스펙클이 마크로 스펙클에 비해 조금 더 유리하기 때문에, 본 연구와 같이 아주 작은 입자를 해석하고자 할 경우, 최소한 마크로 스펙클은 발생되지 않도록 해야 한다.<sup>(6,7)</sup>

스펙클과 수차의 영향으로 재생 입자의 선명도는 입자의 광축 방향 위치에 따라 다르게 나타나며, Fig. 3 (a)는 300  $\mu\text{m}$  크기의 입자를 광축 방향으로 이동시키며 얻은 재생 영상을 보여주고 있다. 입자가 홀로그래프에서 멀어질수록, 스펙클이 커지며, 수차로 인한 재생 파면의 왜

쪽으로 입자의 경계 선명도가 떨어짐을 확인할 수 있다. Fig. 3 (b)는 19~43  $\mu\text{m}$  입자군에 대한 재생 영상과 밝기 분포를 나타내고 있다. 홀로그래프에서 가장 먼  $z_p=440$  mm인 경우, 입자의 크기가 작을수록 배경과의 구분이 더욱 힘들어짐을 알 수 있다.

### 3.2 입자의 크기 결정

입자 크기 결정 과정을 검증하기 위하여 투명 유리에 8~300  $\mu\text{m}$ 의 원이 존재하는 크기 보정판을 사용한 예비 실험을 수행하였다. 재생 영상에서 비교적 큰 입자에 비해서 작은 입자들은, 상대적으로 낮은 명암대비를 가지며 스펙클에 의한 영향도 많이 받기 때문에, 입자의 크기와 명암대비에 무관하게 입자 크기를 결정할 수 있는, 적절한 입자 영상처리 기법과 크기 결정 변수를 찾는 것이 중요하다.

재생 영상에서 스펙클 노이즈를 제거하기 위하여, 웨이블릿 (Wavelet) 기법을 이용하였으며, Fig. 4는 입자 크기를 결정하기 위한 영상처리 절차이다. Fig. 4 (a)는 300  $\mu\text{m}$  입자의 영상, (b)는 (a) 영상에 웨이블릿을 적용하여 노이즈를 제거한 영상, (c)는 (b) 영상의 명암값 (gray level)이 0부터 1까지 균일한 분포를 가지도록 명암값 변환을 한 뒤, 일정한 기준에 의해서 이진화된 영상이다. 명암값 변환의 이유는 기록 및 재생 조건에 의존하지 않는 일관성 있는 크기 결정을 위한 것이다. Fig. 5는 크기 보정판의 입자들에 대해서 0.637의 이진화 기준값으로 결정된 크기를 보여주고 있으며, 실선으로 표시된 실제 입자 크기와 잘 일치하고 있다. 하지만 20  $\mu\text{m}$  이하의 아주 작은 입자의 경우, 입자를 표현하는 화소 수가 너무 적어

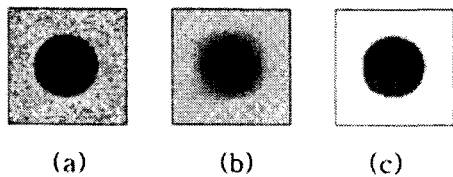


Fig. 4 Image processing procedure for determination of particle size (a) original image, (b) Wavelet transform, (c) binarization

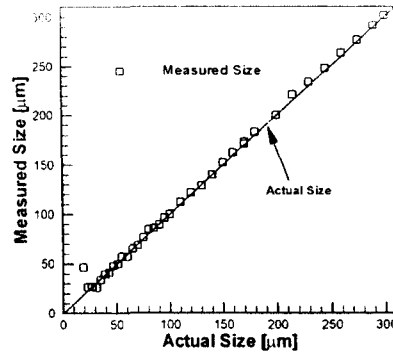


Fig. 5 Size calibration results

오차가 발생하므로, 이처럼 작은 입자에 대해서는 전부 동일한 값( $D_p = 20 \mu\text{m}$ )으로 입자 크기를 할당하였다.

### 3.3 초점 결정 변수

입자 홀로그래피에서 입자의 속도를 결정하기 위해서는, 두 순간에 존재하는 입자의 정확한 3차원 위치가 결정되어야 한다. 입자의 XY 좌표는 비교적 간단하고 정확하게 결정되지만, 광축(Z) 방향 좌표는 재생 입자가 가지는 긴 광축 방향 심도로 인하여 간단하지 않다. Fig. 6은 500  $\mu\text{m}$  크기의 입자가 가로-세로로 균일하게 배열되어 있는 스크린의 중앙에 있는 한 입자에 대해, 광축 방향으로 이동하며 획득한 입자의 전형적인 초점 패턴을 보여주고 있다. 이처럼 재생 입자가 존재하는 심도 내에서, 입자의 정확한 광축 방향 좌표 결정을 위해서는 적절한 초점 판단 변수가 필요하다. 입자의 패턴이나 명암 분포, 명암 기울기 등을 사용한 기존 연구들도 있지만,<sup>(1-4)</sup> 스펙클이 존재하는 홀로그래프 이미지에 적용하기에는 적절하지 않기 때문에, 본 연구에서는 1) 상관계수법 (Correlation Coefficient Method, CCM), 2) 선명도계수법 (Sharpness Index Method, SIM), 3) 깊이밝기계수법 (Depth Intensity Method,

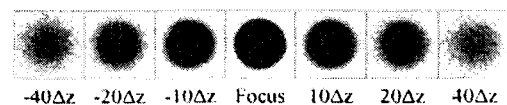


Fig. 6 Defocusing pattern of a 500  $\mu\text{m}$  dot

DIM)을 개발, 적용하였다.

1) 상관계수법(Correlation Coefficient Method)

두 영상  $F$ 와  $G$ 에 대해 정의되는 상관계수는 식 (1)과 같이 정의되며, 두 영상간 유사성이 낮으면 0에 가까운 값, 유사성이 아주 높으면 1에 가까운 값을 갖는다.

$$CC = \frac{\sum_m \sum_n (F_{mn} - \bar{F})(G_{mn} - \bar{G})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (F_{mn} - \bar{F})^2)(\sum_m \sum_n (G_{mn} - \bar{G})^2)}} \quad (1)$$

여기서  $m, n$ 은 화소의 색인,  $\bar{F}$ 와  $\bar{G}$ 는 각 영상의 평균 명암값을 나타낸다.

Fig. 7 (a)는 상관계수를 이용한 광축 방향 위치 결정의 개략도이다. 광축상의 입의 위치에서의 입자의 상관계수는, 그 평면의 앞뒤 일정거리(상관간격:  $\Delta C_z$ )만큼 떨어져 있는 두 위치에서의 입자 영상들의 상관계수로 정의된다. 최적의 상관간격은 입자만의 상관관계는 잘 표현하면서, 동시에 배경이 되는 스펙클의 상관관계는 배제할 수 있을 정도의 거리가 되어야 한다. 본 연구에서는 해석하고자 하는 입자의 크기와 심도, 그리고 계산의 효율성을 종합적으로 고려하여 상관간격( $\Delta C_z$ )을  $200 \mu\text{m}$ 로 결정하였다. Fig. 8 (b)는 입자의 크기 변화에 따른 전형적인 상관계수 분포를 나타낸다. 이렇게 계산된 상관계수 분포에 가우시안 곡선 근사를 통해 얻어진 중심 좌표(최대값)를 입자의 초점 위치로 결정할 수 있다. 하지만, 입자가 작아질수록 입자의 심도는 짧아져, 상관계수 분포가 무질서해지고, 상관계수는 더 이상 입자의 위치 결정을 위한 변수로써 이용되기 어렵다는 것을 알 수 있다.

2) 선명도계수법(Sharpness Index Method)

비교적 큰 입자에 적용이 가능한 또 다른 초점 결정 변수인 선명도계수는 입자의 경계 부분이 얼마나 선명한지를 나타낼 수 있는 지표를 의미한다. Fig. 8은  $500 \mu\text{m}$  크기의 입자 해

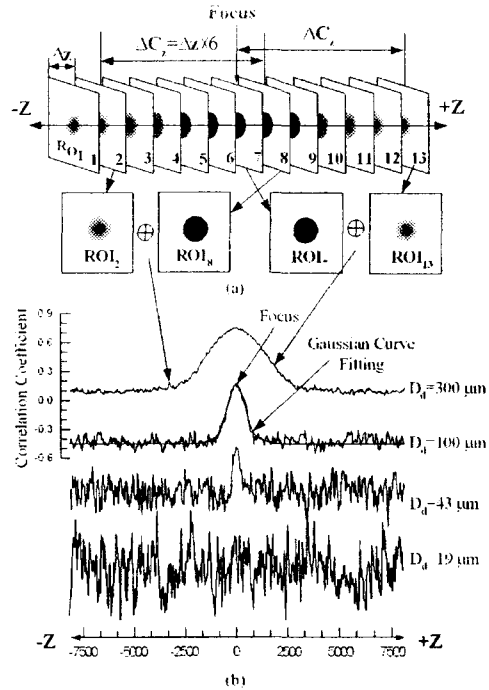


Fig. 7 (a) Correlation Coefficient Method (b) Distribution of correlation coefficient with the change of particle size

석 영역에 대한 명암 히스토그램, 그것의 누적 히스토그램(점선), 선명도계수를 나타내고 있다. 명암 히스토그램에서 첫 번째 높은 빈도는 입자의 명암에 의한 것이며, 두 번째 높은 빈도는 입자의 배경이 되는 스펙클 명암에 의한 것이다. 두 피크 사이의 매우 낮은 빈도값을

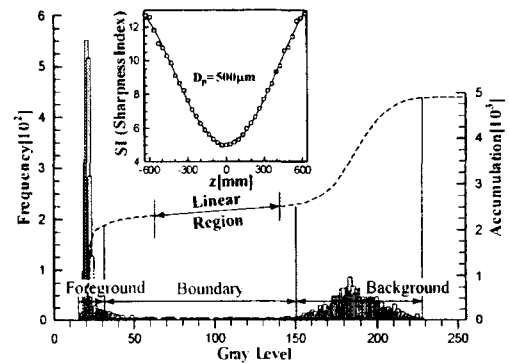


Fig. 8 Illustration of Sharpness Index Method and Sharpness Index around the focal position with  $D_p = 500 \mu\text{m}$

갖는 영역은, 입자와 배경 사이의 경계 부분에 해당한다. 경계 부분의 명암의 빈도가 낮을수록, 선명한 경계를 갖는, 초점이 잘 맞는 입자의 영상이라고 할 수 있다. 하지만, 경계면의 선명도는, 명암 히스토그램보다 누적 히스토그램을 통해서 보다 쉽게 표현할 수 있다. 즉, 누적 히스토그램에서 나타나듯이 두 피크 사이에서는 거의 선형적인 증가를 하며, 이 선형 구간의 기울기가 낮다는 것은, 경계 부분의 선명도가 높다는 것을 의미한다. 따라서, 이 구간의 기울기인 선명도계수가 입자의 초점을 결정하기 위한 적절한 판단 변수로써 이용될 수 있다. 이렇게 결정된 선명도 계수는 초점에서 멀어질수록 높아지며, 상관계수법과 비교해 광축 방향으로 비교적 좁은 구간만으로도 초점 변화를 쉽게 표현할 수 있음을 Fig. 8에서 확인할 수 있다.

3) 깊이밝기계수법(Depth Intensity Method)

입자가 아주 작은 경우, 이전의 두 방법에 의한 초점 판단이 용이하지 않기 때문에, 이 경우에 적합한 깊이밝기계수를 도입하였으며, 개략도를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9 (a)는 크기가  $M \times N$ 인 해석 영상( $ROI_{xy}$ )이며, 이 면을 중심으로 앞, 뒤로  $\Delta Z$  간격으로 입자가 존재하는 전 영역을 주사한  $K$ 개의 영상들은 해석 영상군( $ROI_{xy}$ -series, Fig. 9b)이다. 해석 입자의 중심을 원점으로 하는 좌표계에서,  $XZ$  또는  $YZ$  평면을 따라 해석영상군을 절단하면,  $M \times N$  또는  $N \times K$  크기의 절단면 영상( $ROI_z$ , Fig. 9c)을 얻을 수 있다. 광축을 따라 이 절단면 영상의 명암값을 나타내면, 초점에서 가장 낮은 값을 갖는 깊이 방향 명암 분포를 얻을 수 있다. 이것은 입자 영상이 초점에 가까워질수록, 중심부의 명암값도 낮은 값을 갖기 때문에 가능하다.  $ROI_z$ 의  $M/2$ 번째 행벡터가 깊이 밝기계수가 되고,  $19 \mu m$  크기의 입자들에 대해 적용한 결과를 Fig. 9 (c)에 나타내었다. 깊이 밝기계수가 초점에서 가장 낮은 값을 가지며, 이는 이 방법이 매우 작은 입자들에 대한 적절한 초점 판단 기준이 될 수 있음을 나타낸다.

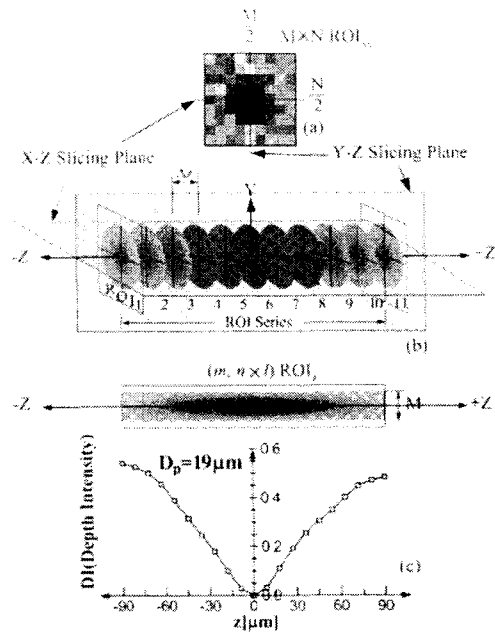


Fig. 9 Illustration of Depth Intensity Method; (a)  $ROI_{xy}$  image, (b) slicing planes for  $ROI_z$ , (c) Depth Intensity of small particles below  $50 \mu m$

앞에서 제안한 세 초점 판단 변수들은 입자의 크기에 따라서 각기 다른 성능을 보이는 것으로 확인되었다. 따라서, 각 변수의 특성을 고려하여 입자의 크기에 따른 적절한 초점 판단 변수를 아래와 같이 설정, 선택적으로 적용하였다.

- 큰 입자( $D_p > 300 \mu m$ ): 상관계수법과 선명도계수법을 순차적으로 적용
- 중간 크기 입자( $50 \mu m < D_p < 300 \mu m$ ): 상관계수법
- 작은 크기 입자( $D_p < 50 \mu m$ ): 깊이밝기계수법

3.4 입자의 위치 결정과 오차 분석

앞에서 소개한 세 초점 결정 방법 중, 상관계수법과 선명도계수법의 성능을 비교하기 위해, 홀로그래피 필름으로부터 322 mm 떨어진 위치에 놓인 스크린 상의  $500 \mu m$  기록 입자들의 재생 영상에 대해, 상관계수법과 선명도계수법을 적용시켜 입자들의 3차원 좌표를 Fig. 10에 나타내었다. 스크린 위의 입자들은 평면

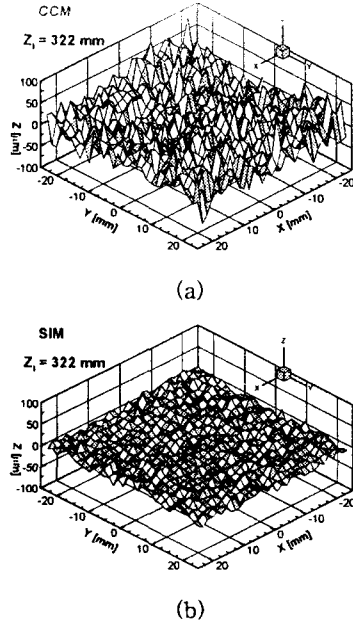


Fig. 10 Reconstructed position of particles at  $z_p=322$  mm; (a) CCM, (b) SIM

위에 존재하므로, 이상적으로는 재생된 입자들의 광축 방향 위치는 모두 같아야 하지만, 측정 결과는 스크린의 광축 방향 위치를 기준으로 조금씩 벗어나 있다. 각 입자들의 광축 좌표로부터 평면 근사하여 구한 광축 좌표를 참값( $z_p$ )으로 하다면, 입자의 초점 결정에서 발생하는 측정오차( $\beta$ )는 참값과 각 입자들의 측정 좌표( $z_p$ )의 차이이며, 다음과 같이 표현된다.

$$E = z_p - z_{\beta} = \overline{z_p \pm u_z} = \overline{z_p \pm t_{\nu, P} S_z} \quad (2)$$

불확실도( $u_z$ )의  $t_{\nu, P}$ 는 유한한 자료 집합에 사용되는 가중치로, 자료 개수( $N$ )에 의해 결정되는 자유도( $\nu=N-1$ )와 신뢰 수준을 결정하는 확률( $P\%$ )로 결정되며,  $S_z$ 는 표준편차이다.

Fig. 10의 결과에서 불확실도는 상관계수법이  $\pm 44.74 \mu\text{m}$ , 선명도계수법이  $\pm 16.07 \mu\text{m}$  이어서, 선명도계수법이 상관계수법에 비해 1/3 정도의 낮은 값을 보였다. 3.3 절에서 언급하였듯이, 비교적 큰 입자에 대해서, 두 방법 모두 입자의 초점 결정에 이용될 수 있으나, 상관계

수법보다는 선명도계수법이 보다 좋은 결과를 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 선명도계수법을 적용하기 위해서는, 대략적인 초점의 위치를 알고 있어야 하므로, 상관계수법에 의해 대략적인 초점을 결정한 후, 결정된 초점 주변의 짧은 폭의 입자 영상구간에 대해 선명도계수법을 적용하면, 보다 정확한 초점을 결정할 수 있다.

기록 가능한 전 영역에 존재하는 입자들에 대해서 좌표 결정 과정에서 발생하는 오차를 분석하기 위해서, 스크린을 광축 방향으로 8 위치에서 기록하고, 단계적으로 상관계수법과 선명도계수법을 적용하여 결정된 3차원 좌표들의 오차를 Table 1에 나타내었다. 입자의 X와 Y축 좌표 오차는 불확실도가 대략  $16 \mu\text{m}$  와  $11 \mu\text{m}$  정도로써, CCD 화소의 크기가  $9 \mu\text{m}$  임을 감안하면, 거의 무시할 정도의 작은 양이다.

Z축 좌표의 불확실도는  $13 \mu\text{m}$ 에서  $30 \mu\text{m}$ 까지 광축 방향 위치에 따라서 변하는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 광축 방향 위치에 따라서 각기 다른 요인의 오차가 발생하기 때문이다. 입자가 홀로그램에서 가까운 경우는, 상대적으로 낮은 수차에 의한 재생 영상의 선명도가 높기 때문에, 모든 위치에서 초점 계산 과정에서 발생하는 오차의 변화폭, 즉 소프트웨어적인 요인에 의해 발생하는 오차는 크지 않게 나타난다. 하지만, 좁은 홀로그램 개구경으로 인하여, 홀로그램 전 영역에 걸친 균일한 조건에 의한 완벽한 재생이 어려워져, 입자들

Table 1 Means and uncertainties of particle positions

$z_p$ [mm]	$\overline{E_x \pm u_x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\overline{E_y \pm u_y}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\overline{E_z \pm u_z}$ [ $\mu\text{m}$ ]
170	$2.14 \pm 16.07$	$10.73 \pm 10.47$	$0 \pm 22.85$
208	$3.42 \pm 14.73$	$7.57 \pm 11.53$	$0 \pm 25.84$
246	$-4.73 \pm 15.04$	$11.31 \pm 10.07$	$0 \pm 19.70$
284	$3.83 \pm 15.10$	$8.69 \pm 9.66$	$0 \pm 13.47$
322	$0.15 \pm 15.44$	$11.81 \pm 10.25$	$0 \pm 16.07$
360	$1.70 \pm 15.76$	$6.03 \pm 10.50$	$0 \pm 15.68$
398	$-0.94 \pm 15.39$	$6.15 \pm 11.81$	$0 \pm 19.08$
440	$-4.24 \pm 18.04$	$-6.70 \pm 11.47$	$0 \pm 30.36$
Total	$0.80 \pm 16.28$	$8.90 \pm 11.51$	$0 \pm 19.37$



의 분사면이 불균을 형성하게 되며, 이는 하드웨어적인 오차 요인으로 간주할 수 있다. 반대로, 입자가 홀로그래프에서 먼 경우, 수차로 인한 입자 경계의 선명도 저하에서 기인하는 초점 계산 과정의 소프트웨어적인 오차는 커지지만, 넓은 홀로그래프 구경에 의한 재생이 가능하여 균일한 재생 효과를 얻을 수 있어, 하드웨어적인 오차는 작다고 할 수 있다. 따라서, 전반적인 오차의 크기는 무시할 정도로 작지만, 오차가 가장 최소화될 수 있는 최적 입자 위치는, 두 오차 요인들이 서로 상쇄될 수 있는 홀로그래프와 산란판의 중간 영역임을 확인할 수 있다.

종합적으로, 입자의 3차원 좌표 결정에 있어서 발생할 수 있는 오차에 대한 평균

$$E = \sqrt{(\overline{E_x})^2 + (\overline{E_y})^2 + (\overline{E_z})^2} = 8.94 \mu\text{m}$$

$$\sqrt{(\overline{u_x})^2 + (\overline{u_y})^2 + (\overline{u_z})^2} = 27.79 \mu\text{m}$$

로 예측할 수 있다.

#### 4. 분무 액적에의 적용

##### 4.1 입자 해석 절차

입자들의 3차원 좌표 결정을 위한 이미지 처리 알고리즘을 실제 분사되는 분무 액적에 적용하여, 분무 액적의 3차원 속도를 측정하였다. Fig. 11은 분무의 국부 영역에서 양 방향에서 획득된 입자들의 재생 영상을 보여 주고 있다. 이러한 분무 홀로그래프의 기록부터 최종적인 측정 결과를 얻는 과정까지의 이미지 처리 과정을 Fig. 12에 나타내었다.

전 과정은 크게 3 단계로 구성되며, 1 단계에서는 분무의 기록과 재생과정을 통해, 재생

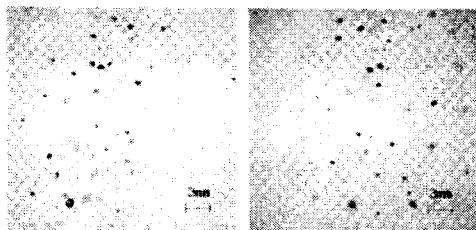


Fig. 11 Typical reconstructed images of droplets captured from two sides

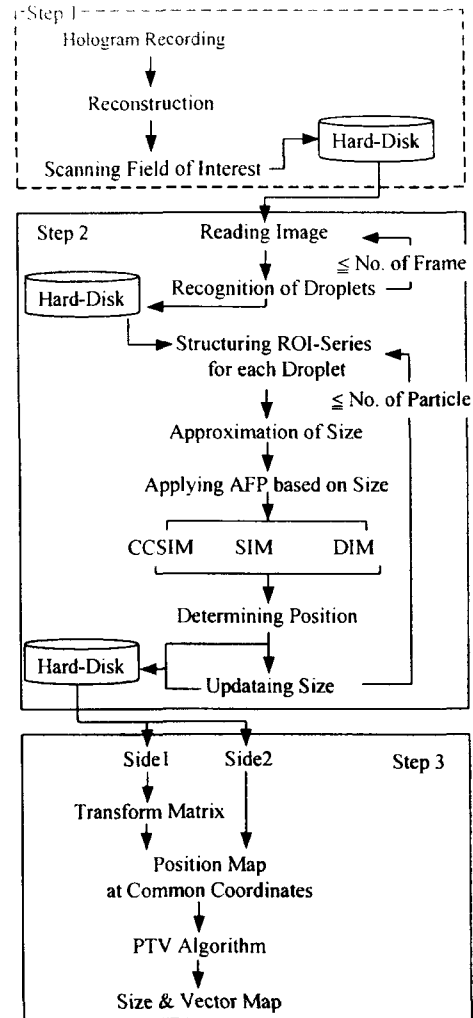


Fig. 12 Flow chart for determination of sizes and velocities of particles

된 전 구간의 영상을 영상획득 장치를 사용하여 컴퓨터에 저장한다. 2 단계에서는 입자들을 배경과 분리한 후, 개별 입자에 대해 광축 방향으로 초점패턴 영상들을 조합하여 해석영상군(ROI-series)을 만든 후, 자동 초점 판단 기법들 중에서 가장 적절한 방법을 적용하여 입자의 3차원 좌표와 크기를 결정한다. 3 단계에서는 양 방향에서 얻어진 입자의 크기와 위치 정보를 토대로, 양 방향 단일 펄스 홀로그래피에 의해 구해진 좌표변환행렬을 적용하여, 동일한 좌표계를 기준으로 하는 입자의 3차원 위치가 결정된다. 두 순간의 입자의 3차원 위치

로부터, 입자추적알고리즘(particle tracking algorithm: PTA)을 적용함으로써, 각 입자들의 속도 벡터가 계산된다. 입자추적 알고리즘은 백승조 등<sup>(8)</sup>에 의해 개발된 일치 확률(matching probability) 방법을 이용하였다.

#### 4.2 분무 측정 결과

Fig. 13은 양방향 이중 펄스 홀로그래피 시스템을 이용하여 분무 입자를 기록하고, Fig. 12와 같은 해석 절차를 통해 얻어진 입자의 크기와 3차원 속도장을 보여주고 있다. 사용 노즐은 풀콘노즐이며, 분사 압력은 147, 196, 294 kPa이다. 분사 압력이 높아지면서 입자 크기는 작아지고, 입자의 속도는 증가하는 분무 특성상 예측 가능한 경향과 잘 일치하고 있다.

입자의 속도 측정에 있어서의 오차의 불확실도는, 입자들의 3차원 좌표 결정 단계에서 발생하는 불확실도로부터 결정될 수 있다. 두 펄스의 입자 간 거리의 각 축방향 성분( $R_i$ )들에 대한 불확실도( $u_{R_i}$ )는, 단일 펄스에서 입자의 좌표 결정의 불확실도( $u_i$ )와  $u_{R_i} = \sqrt{2}u_i$ ,  $i=x, y, z$ 의 관계를 갖는다. 또한, 각 방향의 입자 속도는 입자간 거리,  $R_i$ 를 두 펄스의 시간간격  $\Delta t$ 로 나누므로, 각 축방향 속도 성분의 불확실도는 다음과 같이 결정된다.

$$u_{vi} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_i}{\partial R_i} u_{R_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_i}{\partial \Delta t} u_{\Delta t}\right)^2} \quad (3)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta t} u_{R_i}\right)^2 + \left(\frac{R_i}{\Delta t^2} u_{\Delta t}\right)^2}$$

두 펄스의 시간 간격 불확실도  $u_{\Delta t}$ 는 0으로 간주하면, 각 축방향 속도 성분의 불확실도는

$$u_{vi} = u_{R_i}/\Delta t = \sqrt{2}u_i/\Delta t \quad (4)$$

으로 결정된다. 각 속도 성분의 불확실도가 전파되어 발생하는 속도의 크기에 대한 불확실도는 다음과 같이 결정된다.

$$u_v = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_x} u_{vx}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial V_y} u_{vy}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial V_z} u_{vz}\right)^2} \quad (5)$$

Table 2는 식 (4)에 의해 결정되는 각 축방향 속도 성분의 불확실도와 식 (5)에 의해 결정되는 속도 크기에 대한 불확실도를, 전체 측정 입자에 대해 평균한 값을 나타내고 있다.

Table 2 Uncertainties of velocity measurements

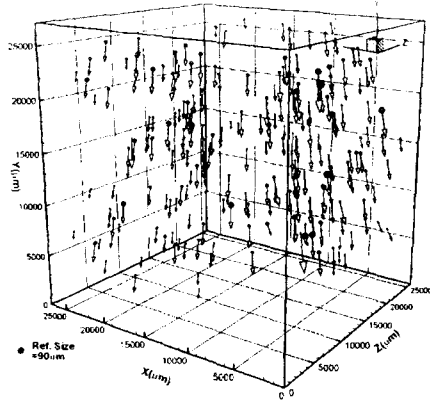
$P_{bf}$ [kPa]	$\Delta t$ [μs]	$u_{vx}$ [ms]	$u_{vy}$ [ms]	$u_{vz}$ [ms]	$u_v$ [ms]
147	700	0.033	0.023	0.039	0.033
196	250	0.092	0.065	0.110	0.096
294	150	0.153	0.108	0.183	0.171

#### 4.3 레이저 계측결과와의 비교

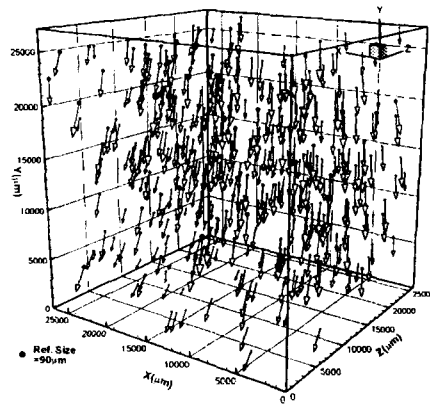
개발된 홀로그래피를 이용한 입자의 크기 및 3차원 속도 측정 시스템의 타당성을 검증하기 위하여, 2D-PDA(Particle Dynamics Analyzer)를 이용한 계측 결과와 비교하였다. 본 연구에서 사용한 PDA는 점 측정 및 2차원 속도 측정의 한계성과, 많은 양의 샘플을 통한 통계적인 결과를 바탕으로 하는 특성을 가지고 있기 때문에, 영상 처리에 의한 홀로그래피 계측 결과와 직접적인 비교는 불가능하지만, 실험 조건 변화에 따른 경향의 변화는 확인이 가능하다. Fig. 14는 비교 결과를 나타내고 있으며, 분사 압력이 증가하면서 입자 속도는 증가하고, 크기는 감소하는 같은 경향을 확인할 수 있다. 속도는 아주 작은 차이를 나타내지만, 입자 크기는 다소 많은 차이를 보이고 있는데, 이는 홀로그래피의 특성상 측정할 수 있는 샘플 수가 적어, 한 순간 한 위치에서 많은 양의 샘플에 대해 통계적인 결과를 보이는 PDA 결과와 차이를 보이는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

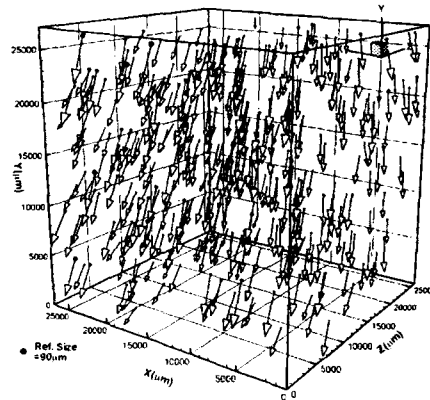
본 연구에서는, 펄스 레이저를 이용한 양방향 산란광 기록 시스템과 연속 레이저를 이용한 이미지의 재생 및 획득 시스템을 구축하였



(a)  $P_{hi} = 147$  kPa



(b)  $P_{hi} = 196$  kPa



(c)  $P_{hi} = 294$  kPa

Fig. 13 Measurement results of sizes and 3D velocities of droplets (a)  $P_{hi} = 147$  kPa, (b)  $P_{hi} = 196$  kPa, (c)  $P_{hi} = 294$  kPa

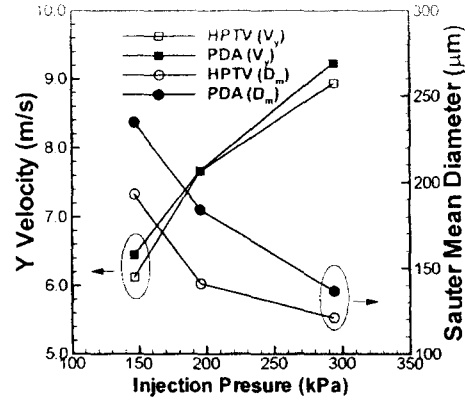


Fig. 14 Comparison of holographic measurement results with those of PDA

고, 재생된 입자의 크기 및 3차원 속도 성분 추출을 위한 자동화된 영상 처리 프로그램을 완성하였다. 특히, 입자의 광축 방향 위치 결정을 위한 입자 초점 결정 변수로 상관계수법, 선명도계수법, 깊이밝기계수법을 개발하였다. 실제 적용 대상으로 노즐에서 분사되는 액적에 대해서, 양 방향 좌표 보정과 입자 추적 알고리즘을 적용하여, 최종적으로 액적의 크기와 3차원 속도를 측정하였다. 이렇게 측정된 액적 크기와 3차원 속도는 레이저 입자 계측 장비의 결과와 어느 정도 잘 일치하여, 본 연구에서 개발된 3차원 입자 속도 측정을 위한 펄스 홀로그래피 시스템의 타당성을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 두뇌한국 21 사업 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. G. Haussmann, and W. Lauterborn, "Determination of size and position of fast moving gas bubbles in liquids by digital 3-D image processing of hologram reconstructions", Applied Optics, Vol. 19, No. 20, pp. 3529-3535, 1980
2. O. Feldmann, F. Mayinger, and P. Gebhard, "Evaluation of pulsed laser

- holograms of flashing sprays by digital image processing and holographic particle image velocimetry", Nuclear Engineering and Design, Vol.184, no.239-252, 1998
- B. Tao, E. Malkiel, and J. Katz, "Analysis tools for holographic particle image velocimetry(HPIV)", 3rd International Workshop on Particle Image Velocimetry, September, pp. 16-18, 1999
4. M. Yamakawa, K. Nishida, M. Kamikawa, T. Yoshizaki and H. Hiroyasu, "Development of three dimensional measurement system for droplet size distribution via pulsed laser holography method", Journal of the ILASS-Japan, Vol. 8, No. 23, pp 130-137, 1999
  5. J.W. Goodman, Statistical Optics, John Wiley & Sons.1985
  6. W. J. Dallas, "Deterministic Diffusers for Holography", Applied optics Vol. 12, No. 5, pp. 1179-118, 1978
  7. F. I. Diamond, "Some effects of diffused illumination in holography", J. Opt. Soc. Am. Vol. 59, No. 10, pp. 1339-1342, 1969.
  8. 백승조, Two-Frame 입자 추적 속도계의 개발 및 난류 박리 유동장애의 응용, 포함 공과대학 박사학위논문, 1997