

## 평면 이미지 기법을 이용한 분무특성 해석

— 이미지 처리 과정을 중심으로

### Analysis of Spray Characteristics using Planar Imaging Technique

윤 영 빈\*

Yoon, Youngbin

#### 1. 서론

수송이 편리하고 저장이 용이하며, 에너지 밀도가 높다는 장점때문에, 상용 엔진의 대부분이 분무의 형태로 연소실로 주입되는 액체 연료를 사용하고 있다. 그러나 일반적으로 사용되고 있는 액체 연료들은 점화에 필요한 양을 증발시킬 정도로 휘발성이 강하지 않기 때문에 연소실내에서 연료액적의 기화를 촉진시키기 위하여 액적을 미립화시켜 표면적을 증가시켜야한다. 이와같은 이유로 분무 액적의 크기 측정 문제는 오랫동안 연구되어 온 문제였고, 그동안 여러 방법이 고안되어왔지만, 연료의 분무는 일반적으로 액적의 수밀도가 매우 크며, 그 크기 또한 다양하여 많은 어려움을 겪어왔다.<sup>(1)</sup>

초기에는 주로 일정한 간격의 구역으로 이루어진 수직관이나, 열선의 냉각정도로 액적의 크기를 판별하는 방법 등을 이용하여 분무의 분포를 측정하여 왔다. 그러나 이는 공간 해상도가 매우 떨어지고, 근본적으로 유동장을 교란시키게 되므로 복잡한 구조의 유동에서는 적용하기 어렵고, 특히 화학 반응이 있는 유동에 사용할 수 없었다.<sup>(2)</sup>

한편, 광학적인 접근 방법<sup>(3)</sup>은 역사적으로 상당히 오래전부터 사용하여 왔으며, 최근에는 레이저의 개발로 인해 획기적인 발전을 거듭하

고 있다. 이는 크게 이미지 방법과 비이미지 방법으로 분류할 수 있는데, 이미지 방법은 측정 위치와 시간에 대해 역적이 분포하는 형태 그대로를 보여주기 때문에 신뢰성이 높다는 장점이 있다. 사진측정 기법은 이러한 기법의 대표적인 예이며 고속촬영 기법을 사용하면 분무의 분열 메커니즘을 전체적으로 볼 수 있기 때문에 최근에도 널리 사용되고 있다. 특히 홀로그래를 기록매체로 사용할 경우, 3차원 측정이 가능하기 때문에 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이미지 기법은 처리속도가 매우 느리기 때문에 실시간 측정이 어려우며, 사진촬영의 경우, 근본적으로 3차원의 액적 분포를 2차원 기록매체에 기록하기 때문에 액적의 크기 차이에 따라 심도의 차이가 오차를 증대시키는 단점이 있다.

한편, 비이미지법은 주로 단일 파장의 레이저를 사용하여 빛의 산란과 회절, 형광 정도를 감지하여 액적의 크기로 환산하는 방법이다. 빛의 산란을 이용한 방법은 이중에서 가장 먼저 개발되었으며, 액적 직경이 1 $\mu$ m보다 매우 작을 때에는 산란광의 강도가 액적 직경의 6제곱에, 빛의 파장과 비슷한 크기일 때에는 4제곱에, 그 이상인 경우에는 2제곱에 비례한다는 원리를 이용한다. 그러나 광산란 기법은 산란광의 강도가 액적의 모양이나 성분에 따라 매우 민감하게 변하기 때문에 오차가 크며, 이에 대한 보정을 매번 해주어야하는 불편함이 있다. 이에 Bachalo<sup>(4)</sup>는 산란광 파장의 도플러 신호 위상과 입자의 크기가 선형적인 함수 관계가 있다는 사실에 착안하여 PDPA(Phase

\* 정회원, 한국액체미립화학회,  
서울대학교 기계항공공학부

Doppler Particle Analyzer)를 개발하였다. 파장이 동일한 두 레이저광이 교차하며 만들어내는 프린지를 통과하는 투명한 구형 입자가 구형 렌즈와 같은 역할을 수행하여 두 광의 위상차를 유발한다. 이때 액적의 크기에 따라 굴절률이 다르므로 두 광검출기 사이의 위상차를 측정하면 입자의 크기를 역산할 수 있게 된다. 이러한 PDPA는 그동안 많은 연구에 이용한 결과 상당히 신뢰성이 높다는 것이 검증되었고, 특히 LDV(Laser Doppler Velocimeter)와 그 원리가 유사하므로 입자의 속도와 크기를 동시에 측정할 수 있고, 측정범위가 3~5000 $\mu\text{m}$  정도로 넓은 범위의 측정이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 PDPA의 기본 원리가 입자가 구형 렌즈의 역할을 한다는 가정에서 출발한 것이므로 구형의 투명한 입자에만 적용할 수 있다. 또한 PDPA는 1차원 측정방식이기 때문에 매번 측정위치를 이동시켜야 하므로 공간 해상도가 매우 낮고 분무 분포의 전체적인 특성을 살펴보는 데 많은 시간과 노력이 필요하다.

빛의 Fraunhofer 회절현상을 이용하여 액적의 크기를 측정하는 원리는 Malvern 시스템으로 구현되었다. 이는 PDPA와 같은 점 측정 방식이 아니라 광 경로상의 모든 액적들의 회절무늬를 동시에 처리하여 앙상블 평균을 구한다. 이때 측정된 회절무늬로부터 액적의 분포 함수를 유추해야 하는데, 어떤 함수를 사용하느냐에 따라 결과가 달라지게 된다. 또한 이러한 Malvern 시스템은 광 경로상의 액적 평균 크기를 구할 수 있지만, 평면상의 크기 분포를 구할 수 없기 때문에 제한적일 수밖에 없다.

따라서 분무 단면상의 공간분포를 매우 신속하며 간단하게 측정할 수 있는 대체 진단 기법이 필요하게 되었는데, 레이저 평면광을 이용하는 평면 이미지 기법은 그 중의 하나라고 할 수 있다. 평면 레이저 유도 형광(PLIF: Planar Laser Induced Fluorescence) 기법은 형광물질이 특정 파장의 레이저에 다른 파장의 형광을 일으키는 원리를 이용하여 액적 크기를 정량적으로 분석한다. 어떤 물질은 스스로 형광을 일으키지만, 일반적으로 모의연료로 실험에 사용되는 물에는 로다민 계열의 염료나 형광제물

첨가하여 사용한다.

PLIF를 이용한 분무 해석 기법은 매우 높은 해상도를 가지고 분무의 측방향 또는 단면 방향의 2차원 공간분포를 한번에 구할 수 있다는 뛰어난 장점을 가지고 있다. 또한, 분무의 SMD(Sauter Mean Diameter) 뿐만 아니라 동시에 단면상의 유량분포 패턴을 한눈에 알아볼 수 있는 이미지를 제공하기 때문에 분무의 내부구조를 쉽고 정확하게 파악할 수 있다. 그러나 이 기법은 상당히 복잡한 광학 원리의 이해를 필요로 하며, 상대적인 SMD 분포만을 구하기 때문에 액적 크기의 절대값을 알기 위해서는 PDPA와 같은 별도의 1차원 측정이 이루어져야 한다. 또한 이차산란이나 분무장 내에서 신호의 감쇠현상으로 인한 오차 등은 아직 완전히 해결되어있지 않아서 이에 대한 연구가 계속 진행되고 있다. 그럼에도 불구하고, PLIF 기법으로부터 제공되는 분무 액적의 2차원 평면 데이터는 분무 해석에 매우 유용한 역할을 하고 있다. Su<sup>(5)</sup> 등은 PLIF를 이용하여 가솔린 분무기의 수직 단면의 이미지를 얻었는데, 입사광의 감쇠를 보정하기 위해서, 좌우에서 레이저를 조사하여 두 개의 이미지를 얻은 후 평균을 구하는 방법과, 함께 측정된 Mie 산란 이미지와 입사광의 감쇠의 총량을 이용하는 두 가지 방법을 사용하였다. McDonell<sup>(6)</sup> 등은 분무의 분포를 알아보는 방법으로 PLIF를 사용하였으며, Talley<sup>(7)</sup> 등은 입사광의 감쇠를 보정하는 방법으로 좌우에서 레이저를 조사하여 두 개의 이미지를 얻은 후, 두 이미지의 기하 평균을 구하는 방법을 제안하였다. 그러나, 분무에서 카메라까지의 경로가 다름으로 인해 생기는 형광 신호의 감쇠에 관한 문제는 해결하지 못하였다. Sankar<sup>(8)</sup> 등은 Aerometrics사의 optical patternator를 이용하여 분무의 분포를 측정하였고, Zelina<sup>(9)</sup> 등은 같은 장치를 이용하여 분무 분포뿐만 아니라, 형광 신호와 Mie 산란 신호의 비율을 이용해서 평면의 SMD 분포를 구하였다. PDPA로부터 구한 분무의 질량 유량 분포와 비슷한 분포를 나타내지만, 중심부근에서 잘 맞지 않음을 지적하고, 레이저 평면 밖에서의 산란으로 인한 것으로 보았다. Le

Gal<sup>(10)</sup> 등도 같은 원리로 평면의 SMD 분포를 구하였다.

본 논문에서는 PLIF의 원리 및 오차 요인 등을 정리해보고, 실제적으로 이를 적용하는 과정에서 필수적인 이미지 처리과정을 중점적으로 다루고자 한다. 또한 기존의 PLIF 방법의 한계였던 시간 평균 측정을 벗어나 펄스 레이저를 광원으로 순간 분무 측정을 하여 비정상 분무장을 해석하는 방법도 소개하고자 한다.

## 2. PLIF 기법의 원리

특정 파장의 레이저 평면광에 형광물질을 포함한 분무 액적이 존재하면, 서로 다른 파장의 형광과 탄성 산란 신호를 방출하게 된다. 이를 광학 필터를 사용하여 분리하여, 각각의 이미지를 두 개의 카메라를 이용하여 기록하거나 분무장이 시간에 따라 변하지 않는다는 가정하에 두 번을 순차적으로 촬영한다. Lorenz-Mie 이론에 따르면 탄성 산란의 세기는 액적의 지름, 산란 각도, 액적의 굴절률, 편광, 입사광의 파장 등의 복잡한 함수로 나타내어지지만, 지름이 1 $\mu$ m 보다 큰 구형의 액적의 경우, 근사적으로 액적의 지름의 제곱에 비례한다고 알려져 있다. 따라서 좌표 (x,y)로 정의되는 디지털 카메라의 화소에서 측정되는 탄성 산란 신호의 강도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$G_s(x, y) = I_i(x, y) c_s \sum N_i(x, y) d_i^2(x, y) \quad (1)$$

여기서  $I_i$ 는 입사광의 강도,  $N_i$ 는 지름이  $d_i$ 인 액적의 개수이다. 한편, 형광 신호의 강도는 형광 분자의 농도에 비례한다. 따라서, 형광 염료가 시험 유체 내에 균질하게 존재하고 있다면, 형광 신호의 강도는 유체의 체적, 즉 질량에 비례하므로, 디지털 카메라에서 측정되는 형광 신호의 강도는 다음과 같다.

$$G_f(x, y) = I_i(x, y) c_f \sum N_i(x, y) d_i^3(x, y) \quad (2)$$

위에서 구한 두 식으로부터, 다음의 관계식

을 얻을 수 있다.

$$\frac{G_f(x, y)}{G_s(x, y)} = \frac{c_f}{c_s} \left[ \frac{\sum N_i(x, y) d_i^3(x, y)}{\sum N_i(x, y) d_i^2(x, y)} \right] \quad (3)$$

이때, SMD의 정의로부터,

$$SMD(\equiv D_{32}) = \frac{\sum N_i d_i^3}{\sum N_i d_i^2} \quad (4)$$

$$D_{32}(x, y) = \frac{1}{K} \left[ \frac{G_f(x, y)}{G_s(x, y)} \right] \quad (5)$$

여기서  $D_{32}(x, y)$ 는 좌표 (x,y)에서의 SMD이고,  $K$ 는 보정 상수이다. 위의 식은 측정된 형광 신호와 탄성 산란 신호를 이용하여 SMD를 측정할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 그러나, 형광 신호와 산란 신호의 비율만으로는 절대적인 액적의 크기를 얻을 수 없고, 상대적인 액적 크기 분포만을 구할 수 있다. 절대적인 값을 얻기 위해서는 보정 상수  $K$ 를 구해야만 하는데, 이는 PDPA를 이용하여 구할 수 있다.

## 3. PLIF 기법의 오차 요인

### 3.1 이차산란(Secondary Scattering)

PLIF를 이용하여 분무 액적의 크기 분포를 정량적으로 측정하는데 있어서 가장 큰 오차를 유발하는 요인은 분무장에서 액적들에 의한 이차 산란이다. 짙은 분무에서 이차 산란은 세 가지 중요한 오차의 원인을 만들어 낸다.

첫째, 입사되는 레이저 평면광의 감쇠를 야기해서 입사광의 강도가 변하게 된다. 이로 인하여 레이저광이 입사하는 쪽의 분무로부터의 형광 신호의 강도가 더 크게 나타나는 비대칭성이 발생하게 된다. 둘째, 산란광이 레이저 평면 밖의 액적들을 여기시켜 형광을 발생시키거나, 형광이 레이저 평면 밖의 액적들에 의해 산란된다. 이 현상으로 인해 3차원적인 모습을 보이게 되고, 측정되는 형광 신호의 강도를 더 강하게 만든다. 이러한 현상은 입사광의 강도

가 클수록 두드러지므로 입사광의 강도 조절로 어느정도 해결할 수 있다. 셋째, 형광 신호가 검출기로 도달하는 경로에 있는 입자들에 의해서 감쇠되는데, 이로 인해 전체적으로 형광 신호의 강도가 약해진다.

### 3.2 레이저 평면광의 강도 변화

레이저 평면광의 강도는 폭을 따라서 일정하지 않다. 즉, 레이저광의 강도는 Gaussian 분포를 이루기 때문에 평면광이 중앙에서 최대의 강도를 가지며 이로부터 멀어질수록 크게 감쇠한다. 따라서 측정하고자 하는 분무의 폭이 넓은 경우, 이러한 현상으로 인한 오차는 더욱 커진다.

### 3.3 원근 보정에 따른 왜곡 현상

분무의 단면 형상은 단면에 수직한 촬영이 이루어져야 한다. 그러나 분무 아래에 카메라를 설치하는 것은 현실적으로 불가능하며, 수직하게 위에서 촬영하면 노즐에 가려서 가장 중요한 분무 중심을 측정할 수 없다. 또한 노즐을 지면과 수평하게 장치하여 내부가 보이는 유리벽 뒤쪽에서 촬영하는 경우는 액적으로 인해 형광신호의 감쇠가 매우 커서 심한 오차가 발생한다. 따라서 분무 액적을 피해 비스듬한 각도에서 이미지를 얻은 후 이를 수직의 이미지로 보상해 주는 방법이 일반적이다. 이 경우, 카메라에 먼 쪽은 가까운 쪽에 비해 형광신호가 카메라에 도달하는 과정에서 보다 많은 액적을 통과해야 하므로 얻어진 강도는 실제 강도보다 현저히 떨어지게 된다.

이러한 원인에 의한 형광신호의 감쇠에 의한 오차를 없애기 위하여 분무 단면 방향이 아니라 측방향의 이미지를 일정 간격으로 촬영한 후, 이로부터 다시 단면의 이미지를 재구성하는 방법도 사용되고 있으나, 측방향(분무단면의 직각) 분무속도가 매우 크므로 노출시간이 대단히 짧아야 하는 한계가 있다.

### 3.4 형광염료의 농도에 따른 오차

일반적으로 형광신호는 액적 직경의  $n$  제곱에 비례하게 되는데, 입사광의 흡수율, 형광염

료의 농도, 레이저 파장의 특성에 관계되므로 실험적으로 얻어야 한다. 따라서 SMD를 구하기 위해서는  $n$  값이 3이 되도록 실험적으로 적정한 염료의 농도를 얻어야 하며, 실험과정에서 이 농도가 일정하게 유지되도록 해야 한다. Le Gal<sup>(10)</sup>은 PTP를 케로신에 용해시켜 266nm의 입사광에 340nm의 형광신호를 얻을 때, 0.023 g/l의 농도에서는  $n$ 이 2.996이며 농도가 증가하면 값이 작아지고 농도가 작으면 값이 커짐을 보인 바 있다.

## 4. 이미지 처리 과정

입사광의 강도와 노출 시간의 결정은 기록된 이미지의 신뢰성을 바탕으로 경험을 통해 이루어진다. Fig. 1은 정상상태의 분무 단면 측정을 위한 일반적인 실험장치를 보여주고 있다.

실험 장치는 크게 연료 공급 장치, 시험부, 레이저 평면광을 만들어 주는 레이저와 광섬유(또는 Sheet beam optics), 카메라로 이루어져 있다. 모의 연료로 물을 사용하는 경우, 물과 알코올을 4:1의 비율로 혼합하여 형광염료를 용해시킨다. 형광염료는 사용하는 레이저의 파장에 형광을 일으키는 것을 선택하여야 하는데, 514.5nm의 아르곤 이온 레이저에는 fluorescein (F245-6,  $C_{20}H_{12}O_5$ )을 용해시켜 사용한다. 분무는 일정한 압력을 유지시켜주기 위해서 고압용 용기에 시험 유체를 담아 놓고, 질소 가스로 가압하여 노즐에 유체를 공급하여 준다.

레이저 평면광에 의해 방출되는 액적의 산란광과 형광은 그 강도가 비교적 크기 때문에 디지털 카메라로도 충분히 이미지를 획득할 수 있다. 형광 신호와 산란 신호를 분리하기 위하여 광학 필터를 사용하였는데, 형광 신호를 받기 위해서는 530nm high-pass 필터를, 산란 신호를 위해서는 514±5nm band-pass 필터를 각각 사용하였다. 카메라의 노출 시간은 형광 신호는 1초, 산란 신호는 1/2초로 하여 각각의 시간에 대해 평균된 이미지를 얻으며, 정상상태의 분무에 대한 신뢰성을 얻기 위해 동일 조건에서 10회 이상의 실험을 통하여 앙상블 평균을 구한다.

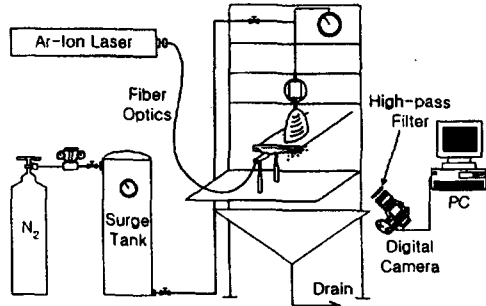


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus for PLIF

위의 실험장치로부터 구한 산란신호와 형광신호는 Fig. 2와 같은 과정을 거쳐서 SMD와 질량 플럭스 분포의 의미를 가지게 된다. 그림에서 보이는 바와 같이 이미지의 처리과정이 복잡한 것은 PLIF 기법에서 발생하는 오차 요인들을 이미지 과정을 거쳐 보정해 주기 위해서이다.

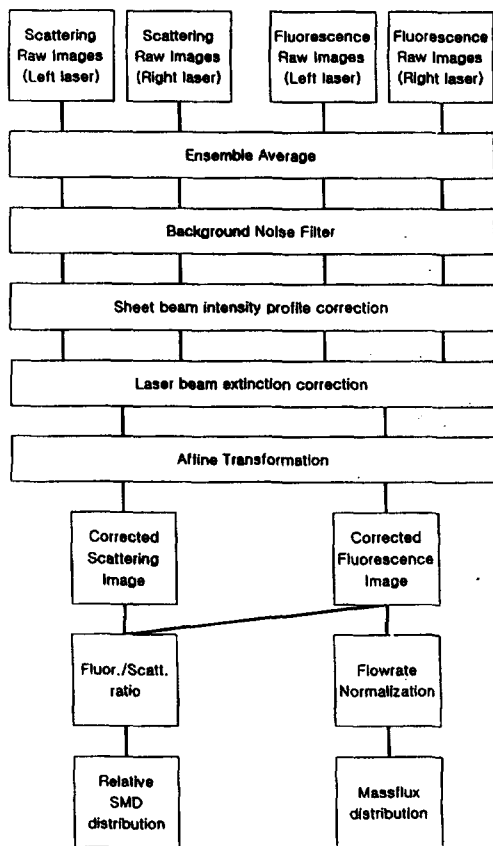


Fig. 2 Image processing for PLIF

#### 4.1 레이저 평면광의 강도 보정

일반적으로 레이저 평면광의 강도는 폭을 따라서 일정하지 않고 Gaussian 분포를 나타낸다. 이를 보정하기 위해 일반적으로, 메탄올과 염료를 담은 quartz calibration cell을 사용한다. 이 cell을 레이저 평면광의 경로에 놓고, 카메라로 찍은 후, 여러 개의 이미지의 평균으로 강도 분포를 구하여, 레이저 평면광의 강도 변화에 의한 오차를 보정한다. 레이저 평면광의 강도는 레이저 출력, 레이저 평면광에 대한 카메라의 상대적인 위치 등에 따라 달라지기 때문에 이 중 하나라도 달라진다면 이 보정과정을 다시 수행하여야 한다.

#### 4.2 분무 액적에 의한 입사광의 감쇠 보정

이차산란의 첫번째 오차 요인인 입사광의 감쇠 현상은 레이저를 순차적으로 좌우에서 조사하여 각각의 이미지를 얻은 후 Talley<sup>(7)</sup>에 의하여 제안된 알고리즘을 사용하여 해결할 수 있다.

먼저 측정하고자 하는 분무에서 입사광의 감쇠가 Beer's law를 따른다고 가정한다. 레이저를 좌우에서 조사한 두 개의 이미지에서 각각 입사광의 감쇠가 일어난다면, 입사광의 강도  $I_l(x)$ 와  $I_r(x)$ 는 레이저의 진행방향의 위치,  $x$ 에 따라 감소할 것이다. 따라서 두 이미지가 같은 질량 분포를 가지는 분무를 나타내고 있지만, 서로 다른 신호 강도 분포를 보이게 된다. 비례 상수  $C_f$ 가 일정하다면,  $x$ 에 따른 형광 신호의 강도의 변화와 입사광의 강도  $I$ 와 액체의 질량 밀도  $\rho$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{dG_l}{G_l} = \frac{dI_l}{I_l} + \frac{d\rho}{\rho} \tag{6}$$

$$\frac{dG_r}{G_r} = \frac{dI_r}{I_r} + \frac{d\rho}{\rho}$$

여기서 첨자  $l$ 은 레이저가 왼쪽에서 조사된 경우,  $r$ 은 오른쪽에서 조사된 경우를 의미한다. 분무를 통과하는 동안의 입사광의 감쇠는 Beer's law에 따르기 때문에, 입사광의 상대적 소멸  $dI/I$ 는 산란 매체만의 함수가 된다.

이 경우에 있어서는 국부적인 액적 수밀도와 크기 분포만의 함수가 된다. 따라서, 이 값을 모든 점에서 왼쪽에서 조사했을 때와 오른쪽에서 조사했을 때가 같게 된다.

$$\frac{dI_l}{I_l} = -\frac{dI_r}{I_r} \quad (7)$$

위의 두 식을 연립하면 다음과 같다.

$$\frac{dG_l}{G_l} + \frac{dG_r}{G_r} = 2\frac{d\rho}{\rho} \quad (8)$$

이 식으로부터 입사광의 강도에 관계없이, 측정된 형광 신호의 강도만으로 질량 밀도를 알 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 뒷 식을 적분하면 다음과 같다.

$$\ln G_l + \ln G_r = 2\ln \rho + C_1 \quad (9)$$

$$\rho(x) = C_0 \sqrt{G_l(x) G_r(x)} \quad (10)$$

이로부터 좌우에서 조사한 두 이미지의 기하 평균값을 구하면, 분무의 질량 밀도 분포를 알 수 있게 된다. 여기에 적절한 적분 상수  $C_0$  를 구한다면 바로 정량적인 질량 밀도 값을 구할 수 있다.

좌우에서 조사한 두 이미지를 이용하여, 교정된 이미지를 얻는 과정을 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 같은 분무에 대한 이미지와 강도 분포이므로 서로 같은 모양을 가져야 하지만, 조사 방향에 따라 형광 신호 강도가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 3의 (c)의 보정된 이미지와 강도 분포가 실제의 값이라고 할 수 있다. 보정된 이미지에서 왼쪽이 오른쪽보다 큰 값을 갖는 것은 실험에 사용된 hollow cone 분무가 실제로 비대칭의 형태를 띄고 있기 때문이다.

#### 4.3 원근 보정을 위한 affine 변환

카메라를 레이저 평면과 수직하지 않고 비스

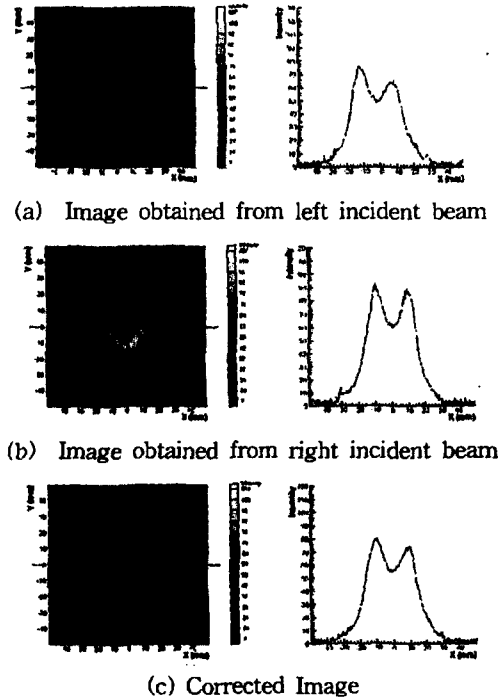


Fig. 3 Fluorescence image and intensity profile affected by the direction of incident beam

듬한 각을 이루도록 설치한 경우, 획득된 이미지는 원근 보정이 필요한데, 이는 affine 변환을 수행함으로써 해결하였다. Affine 변환은 이미지를 이루는 기본 사각형의 꼭지점  $(x, y)$ 을 원래의 이미지  $(u, v)$ 로 이동시킬 수 있는 행렬을 구함으로써 원근에 의해 왜곡된 모든 이미지의 점들을 이동시키는 방법이다. 이 변환을 위한 계수들은 측정 위치에 정사각형의 격자를 놓고, 이미지를 얻은 후 얻어진 사다리꼴의 이미지가 정사각형의 이미지로 변환되는 값들을 찾음으로써 구할 수 있다. 이때 원근의 보정은 변환 격자 안에서만 이루어지기 때문에 이미지를 얻을 때에는 항상 이 범위 내에서 수행하여야 한다. Affine 변환을 위한 기본 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_{11}u + a_{21}v + a_{31}}{a_{13}u + a_{23}v + a_{33}} \\ y &= \frac{a_{12}u + a_{22}v + a_{32}}{a_{13}u + a_{23}v + a_{33}} \end{aligned} \quad (11)$$

Fig. 4는 이러한 변환을 통해 경사진 각도에서 기록한 이미지를 수직방향으로 전환하는 과정을 보여주고 있다. 또한 정사각형의 격자를 같은 방법으로 변환하여 이 변환의 신뢰성을 검증할 수 있다.

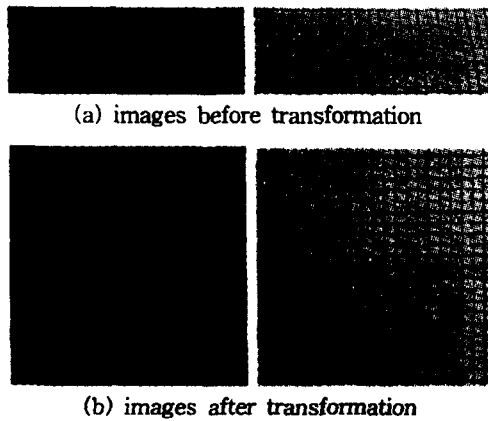


Fig. 4 Affine transformation for correction of image perspective

4.4 형광 이미지의 정량화

형광 신호는 입사광의 강도와 연료의 질량에 비례하는데, 위의 보정과정을 거친 PLIF 이미지는 입사광의 강도에 의한 영향을 제거하였기 때문에, 연료의 질량에만 비례하게 된다. 따라서, 충분히 넓은 영역의 이미지에서 형광 신호의 총합은 연료 노즐의 질량 유량을 나타내게 된다. 이를 이용하여, 형광 이미지를 단위 시간 동안 단위 면적을 지나는 연료의 질량 유량, 즉 질량 플럭스로 변환시켜 줄 수 있다.<sup>(12)</sup> 그러나 단면을 통과하는 액적들의 속도분포는 PLIF 기법으로는 측정할 수 없기 때문에 여기서 구하는 질량 플럭스는 벡터량이 아닌 그 절대값만을 의미한다.

Fig. 5는 hollow cone 분무(측정위치: 4cm, 분사유량: 6.9g/s)에 대하여 PLIF기법으로 얻은 형광신호의 강도를 정량화하여 유량 플럭스 분포로 산출하는 과정을 보여주고 있다. 그림에서와 같이, 정량화 과정은 단순히 이미지상의 상대적 강도 레벨을 절대적인 유량 플럭스로 변환시킨 것으로, 이 과정에서 이미지 자체에 특별한 보정을 하는 것은 아니다.

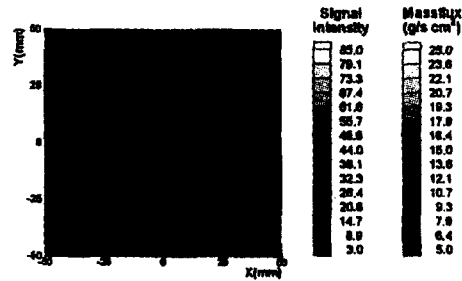


Fig. 5 Correction of fluorescence signal to achieve massflux distribution

4.5 SMD 분포 측정

앞에서 이론적으로 설명했던 바와 같이 형광 신호와 산란신호의 비로부터 상대적인 SMD 크기 분포를 구할 수 있다. Fig. 6은 Fig. 5에서와 같은 조건에서 노즐의 중심을 지나는 수평축 선상의 형광신호와 산란신호의 강도 분포를 보여주고 있다. 크기가 작은 액적들이 많은 지역에서는 Mie 산란의 강도가 상대적으로 강하게 나타나므로, 노즐의 중심 부근에 작은 액적들이 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 분무 단면상의 상대적인 SMD 분포를 보여준다.

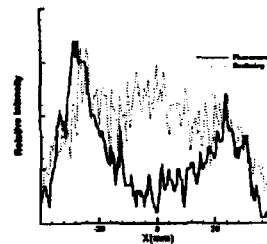


Fig. 6 Comparison of Fluorescence and Mie Scattering signal

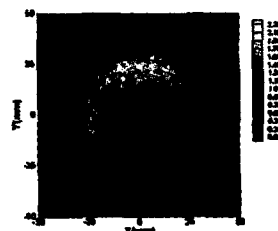


Fig. 7 Relative SMD distribution

한편, PDPA와 같은 1차원 측정기법을 이용하여 평면상의 한 점에 대한 절대적 SMD 크기를 제공해 줌으로써 전체 평면의 절대적인 SMD를 구할 수 있다. Fig. 8은 Fig. 6으로부터 구한 추상의 SMD의 분포를 PDPA를 사용하여 측정한 값들과 비교해 본 결과이다. 여기서 PDPA 측정값 중 하나를 식 (5)에 대입하여 상수  $K$ 를 결정한다. 이로부터 구한 절대적인 SMD 크기 분포를 Fig. 9에 나타내었다.

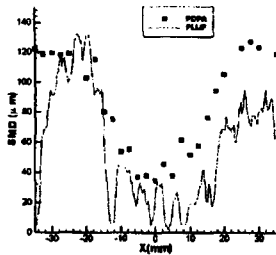


Fig. 8 Comparison of SMD profile obtained from imaging technique with PDPA data

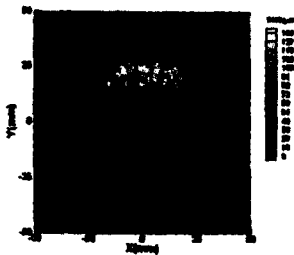


Fig. 9 Corrected SMD distribution

#### 4.6 3차원 이미지 재구성

각 단면들의 질량 유량 분포를 이용하여 3차원 분무 구조의 이미지로 재구성할 수 있다 (Fig. 10). 이러한 3차원 분무 이미지는 분무의 전체적인 상황을 한눈에 보여줄 수 있다<sup>(12)</sup>. 또한 분무방향의 평면에 대한 분무형상은 그 속도가 빠르기 때문에 측정하기가 어렵지만, 3차원으로 재구성된 이미지에서 Fig. 11과 같이 임의의 방향에 대한 이미지를 얻어 낼 수 있다. Fig. 10과 11로부터 이 분무는 전체적으로 단면상에서 오른쪽에 분무가 더 많이 존재하는

비대칭적인 형상을 보이고 있음을 쉽게 판단할 수 있다.

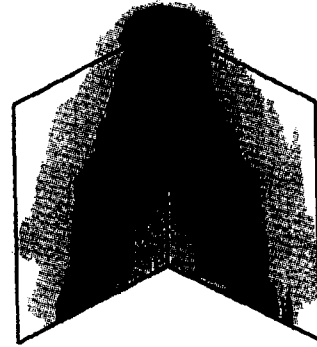


Fig. 10 3-D Image reconstruction of spray from 2-D images of radial mass distribution

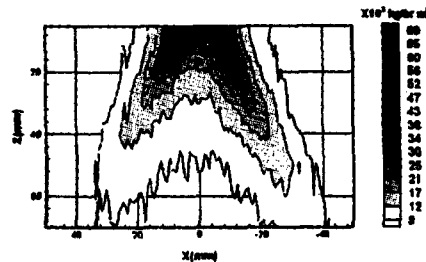


Fig. 11 Axial Spray Image extracted from the 3-D reconstructed image(Fig. 10)

#### 5. 비정상 분무 측정을 위한 PLIF 기법

실제로 분무의 분포를 측정할 필요가 있는 시스템은 스월을 이용하여 화염을 안정화하거나, 특정 시간에만 연료를 분사하는 등 시간에 따라 분무 양상이 변하는 경우가 많다. 이러한 경우에는 보다 효율적인 시스템 설계를 위해서 빠른 측정 방식이 필수적이다. 앞서 설명한 바와 같이 평면이미지 기법이 단계적으로 많은 보정 과정을 거쳐야 하기 때문에 비정상 분무에 적용하기 위해서는 Fig. 12와 같은 광학시스템을 구성할 필요가 있다.

먼저, 입사광의 감쇠 보정을 위해, 양쪽에서 서로 반대방향으로 평면광이 입사하도록 해야



한다. 따라서 레이저 빔의 강도를 정확히 반으로 나누기 위해 50/50 beam splitter가 필요하며, 이렇게 나누어진 입사광을 cylindrical lens의 조합을 이용하여 평면광으로 만들어서 분무를 통과시킨다. 이때, ND:YAG 레이저를 이용하고 카메라와 동기시켜 측정하고자 하는 시간에 이미지를 기록할 수 있도록 해야한다.

한편, 카메라 각도에 따라 PLIF 신호의 강도가 변하는 것을 처리하기 위해 그림과 같이 서로 동기된 두 대의 카메라를 반대방향에 설치한다. 또한, 측정부 쪽에서는 형광 신호와 산란 신호를 동시에 기록해야 하기 때문에 doubling prism이나 dichroic mirror 등을 이용하고 각각의 신호만을 받아들일 수 있는 필터를 별도로 사용해야 한다. 이 경우, 한 CCD 소자에 같은 이미지를 두 개로 보여주게 되므로 높은 해상도의 측정 장치가 필요하다.

Fig. 13은 doubling prism과 형광, 산란 필터를 각각 사용하였을 때, 백색 광원에 대해 사물의 이미지가 어떻게 분리되는지를 보여주고 있다.

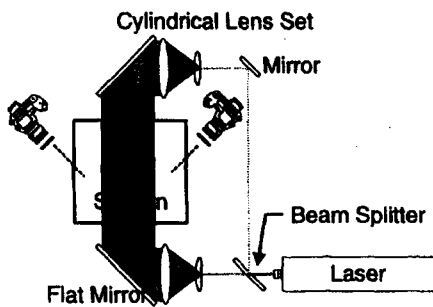


Fig. 12 Optical Setup for unsteady-PLIF

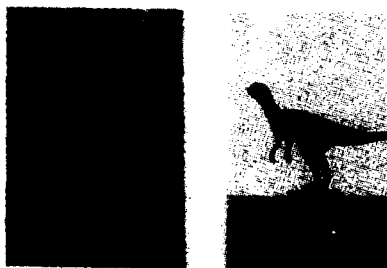


Fig. 13 Simultaneous scattering and fluorescence images using doubling prism and filters

## 6. 결론

이상에서 PLIF 기법을 이용하여 정상상태의 분무의 2차원 분포를 측정할 때 발생하는 오차를 보정하기 위한 이미지 처리 방법들을 살펴 보았다.

결론적으로, PLIF 기법은 높은 해상도로 2차원 평면상의 질량 플럭스와 SMD 분포를 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 좀 더 정량적인 분포를 얻기 위하여 2차 산란이나, PLIF 신호가 경로에서 액적에 의해 감쇠되는 현상 등으로부터 발생하는 오차의 줄일 수 있는 방법의 연구가 필요하다. 따라서 이러한 오차 요인을 좀 더 보완하여 비정상유동에 적용할 수 있는 기법으로 개발된다면 분무 특성 해석에 매우 유용한 데이터를 제공할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. G. M. Faeth, "Current Status of Droplet and Liquid Combustion," *Progress in Energy Combustion Science*, Vol. 3, 1977, pp. 191-224.
2. A. H. Lefevre, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
3. G. Wang, R. Delijouravesh, R. W. Sellens, M. J. Olesen, and M. F. Bardon, "An Optical Spray Pattern Analyzer," 10th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System, 1997, pp. 261-265.
4. W. D. Bachalo, and M. J. Houser, "Phase Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distribution," *Optical Engineering*, Vol. 23, No. 5, 1984, p.583.
5. J. Su, M. C. Drake, T. D. Fansler and D. V. Harrington, "Toward Quantitative Characterization of Transient Fuel Sprays Using Planar Laser Induced Fluorescence Imaging," 11th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System,

- 1998, pp. 106-110.
6. V. G. McDonell and G. S. Samuelsen, "Assessment of Liquid Fuel Distribution in Sprays Using Planar Imaging Methods," *Proceeding of the 1st Asia-Pacific Conference on Combustion*, 1997, pp. 30-33.
  7. D. G. Talley, J. F. Verdick, S. W. Lee, V. G. McDonell and G. S. Samuelsen, "Accounting for Laser Sheet Extinction in Applying PLLIF to Sprays," AIAA-96-0469, 1996.
  8. S. V. Sankar, K. E. Maher, W. D. Bachalo and W. T. Mayo, "Time- Resolved Measurement of Liquid Mass Distribution in a Fuel Injector Spray Using an Optical Patternator," 10th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System, 1997, pp. 266-270.
  9. J. Zelina, J. A. Rodrigue and S. Sankar, Fuel Injection Characterization Using Laser Diagnostics at Atmospheric and Elevated Pressures, AIAA-98-0148, 1998.
  10. P. Le Gal, N. Farrugia and D. A. Greenhalgh, "Development of Laser Sheet Dropsizing for Spray Characterization," *Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow*, 1998, pp. 113-120.
  11. D. G. Talley, A. T. Thamban, V. G. McDonell and G. S. Samuelsen, Laser Sheet Visualization of Spray Structures, AIAA Progress Series, Recent Advances in Spray Combustion II, 1996, pp. 113-141.
  12. K. Lee, K. Jung, Y. Yoon, I.-S. Jeung, "The Development of Planar Imaging Technique for Spray Characterization", *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, Korea, 1999.