

## 평면 이미지 기법을 이용한 분무 특성 해석 시 신호 감쇠의 영향

전재영\*·김동준\*·고현석\*·윤영빈\*\*·구자에\*\*\*

### The Effects of Signal Attenuation on Spray Characterization Using Planar Imaging Technique

Jayoung Jeun\*, Dongjun Kim\*, Hyeonseok Koh\*, Youngbin Yoon\*\* and Ja Ye Koo\*\*\*

**Key Words :** Attenuation(감쇠), Spray(분무), Planar Imaging Technique(평면이미지기법), SMD(평균액적지름), Mass Distribution(질량분포)

#### Abstract

In the analysis of the mass distribution and SMD (Sauter Mean Diameter), planar laser imaging technique is a convenient and useful one when compared to the mechanical patternator or PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer). But for the accurate usage of this laser technique, it is required to compensate the signal attenuation and to find the attenuation coefficients. In the present research, we considered effects of the spray distributions on the attenuation coefficient and improved the accuracy of planar laser imaging technique by the reduction of errors issuing from the signal attenuation.

#### 1. 서론

평면 이미지 기법을 이용한 optical patternator는 기존의 PLLIF 기법에서 얻을 수 있었던 질량 분포 뿐만 아니라 탄성 산란 신호의 이미지를 처리하여 2차원 단면에 대한 액적의 크기 분포 등을 동시에 얻을 수 있는 비삽입식 분무 분포 측정 장치이다. 레이저 평면광을 광원으로 분무에 조사하고, CCD 카메라 등의 영상 획득 장치를 이용하여 산란 혹은 여기된 형광 신호의 이미지를 얻은 후 이 이미지를 후처리하여 질량 분포, 액적 크기 분포(Sauter Mean Diameter), 전체 분무 형상 등을 뽑아낼 수가 있다. 그리고 기존의 mechanical patternator에서와 같이 유동장을 교란할 수 밖에 없었던 삽입식 측정 방식의 한계를 극복할 수 있고, 점 측정 혹은 선 측정 등의 다른 광학 기법보다 손쉽게 많은 공간상의 정보를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 이 기법을 이용하여 분무를 해석할 경우 액체 로켓, 가스 터빈, 디젤 엔진 등의 인젝터 설계나 전체 분무 시스템의 최적화 과정에서 신속한 정보를 얻는 것이 가능할 수 있다.

평면 이미지 기법의 이러한 장점들과 잠재적 가능성에도 불구하고 PLLIF 이미지는 절대값이 아닌 상대값을 구할 수 밖에 없으며, 이 상대값 역시 2차 산란 등으로 왜곡된 이미지에서 얻을 수 밖에 없어 신뢰성 있는 정량적 해석이 불가능하다. 본 연구에서는 이러한 평면 이미지 기법을 이용하여 분무를 측정할 때 나타나는 문제점 중 이차 산란에 의한 감쇠 현상에 대해 초점을 맞추어 감쇠를 보정할 수 있는 방안을 살펴 보았다.

#### 2. 실험 방법 및 장치

##### 2.1 평면이미지 기법을 이용한 측정 원리

Lorenz-Mie 이론에 따르면 임의의 지점에서 구형 입자에 의한 탄성 산란의 세기는 액적의 지름, 산란 각도, 액적의 굴절률, 편광, 입사광의 파장 등의 복잡한 함수로 나타내어진다. 그러나 Sankar 등[1]은 액적에 의한 약한 흡수가 산란과 함께 일어나는 경우, 일반적인 분무에서 만들어지는 액적 분포에 대해 Mie 산란 강도가 지름의 제곱에 비례하는 관계로 근사할 수 있다는 사실을 계산을 통해서 구하였다. 그러므로, 좌표  $(x,y)$ 로 정의되는 카메라의 화소에서 측정되어지는 Mie 산란 신호 강도  $G_s$ 와 액적 지름,  $d$ 의 관계는 입사광의 강도가  $I_0$ 일 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_s(x, y) = I_0(x, y) c_s \sum N_i(x, y) d_i^2(x, y) \quad (1)$$

여기서  $N_i$ 는 지름이  $d_i$ 인 액적의 개수,  $c_s$ 는 이론적으로 계산되거나 실험적으로 구할 수 있는 비례 상수이다.

형광 신호의 강도는 약한 흡수가 일어날 경우 형광 분자의 농도에 비례한다. 따라서, 형광 염료가 시험 유체 내에 균질하게 존재하고 증발 등의 효과로 액적 내의 성분의 변화가 없다면, 형광 신호의 강도는 유체의 체적, 즉 질량에 비례한다. 따라서, 좌표  $(x,y)$ 로 정의되는 카메라의 화소에서 측정되어지는 형광 신호 강도와 액적 지름의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_f(x, y) = I_0(x, y) c_f \sum N_i(x, y) d_i^3(x, y) \quad (2)$$

여기서  $c_f$ 는 이론적으로 계산되거나 실험적으로 구할 수 있는 비례 상수이며,  $\sum N_i(x,y)d_i^3(x,y)$ 는 측정 체적을 지나는 유체의 체적에 비례하므로, 유체의 밀도가 일정하다면 형광 신호의 강도

\* 서울대학교 대학원, doatonce@hitel.net

\*\* 서울대학교 기계항공공학부, yjkim@pknu.ac.kr

\*\*\* 한국항공대학교 항공기공학과,

jykoo@mail.hangkong.ac.kr

는 입사광의 강도와 측정 체적을 지나는 총 질량  $\delta m$ 에 비례하는 값을 나타내게 된다.

$$G_f = C_f' I_0(x, y) \delta m = C_f I_0(x, y) \rho \quad (3)$$

이 때 입사되는 평면광이 전체 산란면에 대해서 균일한 강도 분포를 가지고, 분무를 지나면서 감쇠가 일어나지 않는다면 카메라에 기록되는 신호의 강도는 오로지 연료의 질량 밀도  $\rho$ 에만 비례한다. 레이저 평면광의 강도는 광학장치의 정밀도의 오차에 따라 비균일한 강도를 나타낼 수 있다. 이러한 경우에는 질량 분포(mass distribution) 정량화를 위해서 형광 염료를 담은 quartz calibration cell을 사용하여 균일한 염료 농도에 대한 레이저 평면광의 강도 분포를 구하고 보정을 해야 한다.

그리고 정상 상태의 분무일 경우, 증발이 일어나지 않고 재순환되는 분무의 양이 무시할 수 있다는 조건하에서, 각 단면을 지나는 질량 플럭스는 일정하고, 시간에 따라 변하지도 않는다. 따라서, 분무장 전체 영역에서 발생하는 레이저 유도 형광신호를 검출할 수 있다면, 전체 단면에서 형광 신호의 합은 연료 노즐의 질량 플럭스에 비례하는 값을 나타내며 정상상태에서는 각 단면마다 일정한 값을 가진다. 따라서, 단위 시간 당 단위의 면적을 지나는 연료의 질량 플럭스,  $\dot{m}''(x, y)$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{m}''(x, y) = \frac{G_f(x, y)}{S(z)} \frac{\dot{m}_{nozzle}}{A} \quad [\text{kg/m}^2\text{sec}] \quad (4)$$

여기서,  $G_f(x, y)$ 는 측정된 형광 신호의 강도,  $S(z)$ 는 그 단면에서의 형광 신호의 강도합,  $\dot{m}_{nozzle}$ 은 노즐의 질량 유량,  $A$ 는 한 화소가 나타내는 영역의 면적이다.

평면 이미지 기법을 이용하여 액적의 크기를 측정하는 방법의 기본 원리는 레이저 평면광에 의해 생성되는 평면에 존재하는 액적들의 형광과 Mie 산란의 이미지를 함께 얻는 것이다. 유동이나 분무의 특성이 시간에 따라 변화하지 않는다고 가정할 수 있는 정상 상태의 분무의 경우, 하나의 카메라를 사용하여 형광과 Mie 산란의 이미지를 순차적으로 기록하는 방법이 가능하다. 한편 스월이 들어가는 비정상 상태의 분무에서는 형광과 Mie 산란 이미지를 동시에 얻기 위해서 프리즘이나 dichroic mirror 등의 적절한 광학장치가 필요하다. SMD를 구하는 경우에 있어서는 Mie 산란 신호와 형광 신호 사이의 비율로 나누어지면서 각 지점에서의 입사광의 강도에 의한 영향이 제거되므로 quartz cell을 통한 보정이 필요하지 않다.

앞에서 구했던 식 (2)를 식 (1)로 나누어 비를 구하면,

$$\frac{G_f(x, y)}{G_s(x, y)} = \frac{c_f}{c_s} \left[ \frac{\sum N_i(x, y) d_i^3(x, y)}{\sum N_i(x, y) d_i^2(x, y)} \right] \quad (5)$$

와 같으며 SMD의 정의로부터 위의 식은 다음과 같이 나타내어질 수 있다[2][3]

$$D_{32}(x, y) = \frac{1}{K} \left[ \frac{G_f(x, y)}{G_s(x, y)} \right] \quad (6)$$

여기서  $D_{32}(x, y)$ 는 좌표  $(x, y)$ 에서의 SMD이고,  $K$ 는 보정 상수이다. 형광 신호와 산란 신호의 비율을 통해서 상대적인 SMD

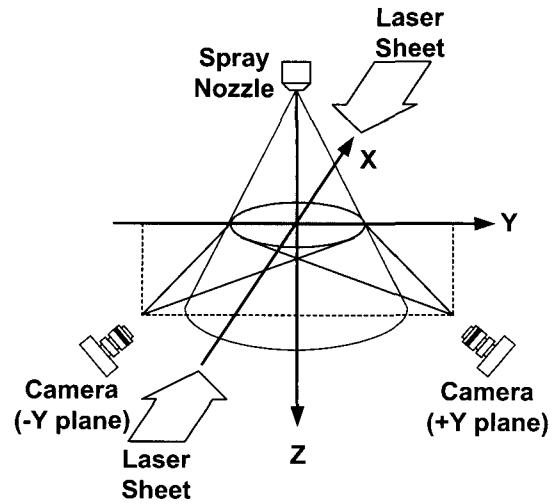


Fig. 1 Schematics of experimental setup and definition of coordinate system.

분포를 구할 수 있으며 적절한 보정 상수  $K$ 를 구한다면 평면에 대한 절대적인 SMD 분포를 구할 수 있다.

## 2.2 실험장치

전체 실험 장치는 연료 탱크와 고압가스 등으로 구성된 연료 공급 장치, 레이저 평면광을 만들어 내는 레이저와 fiber optics 등 일련의 광학 장치, 분무가 이루어지는 시험부, 신호를 검출하여 저장하는 측정부로 이루어져있으며 그 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

본 실험에서 사용된 분무 노즐은 solid cone 형상의 분무 패턴을 나타내는 인젝터로서, 단면 방향으로 균일한 유량분포를 보인다. 분무는 상온, 대기압 하에서 분사하였으며 분사 압력,  $\Delta P$ 가 5 bar 일 때, 유량은 10 g/sec로 공급된다. 시험 유체로는 물과 알코올을 4 : 1로 혼합한 용액에 레이저에 의한 형광이 일어나도록 fluorescein(Aldrich F245-6,  $C_{20}H_{12}O_5$ )을 30mg/l의 비율로 용해시켰다.

광원으로는 아르곤 이온 레이저(Spectra-Physics Model 2020, 3W)를 사용했으며, fiber optics(Dantec)를 이용하여 평면광으로 만들어 분무 방향에 수직이 되도록 조사하였다. 신호의 검출을 위해서는 칼라 디지털 카메라(Canon EOS D30, 2160×1440)를 이용하였고, 형광과 Mie 산란의 이미지를 얻어 연료의 질량 분포와 SMD 분포를 구하였다. 또한 이 두 신호를 적절히 분리해내기 위해서 형광 신호에 대해서는 550nm high-pass 필터를, Mie 산란 신호는 레이저 파장 대에 해당하는 514±5nm의 band-pass 필터를 각각 사용하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 분무장 내 액적에 의한 신호 감쇠의 영향

다중 산란(multiple scattering)을 무시할 수 있는 경우, 발생한 신호의 초기 강도  $I_0$ 는 특정한 매체를 거리  $L$  만큼 통과하는 동안 산란, 흡수에 의해서 지수적으로 줄어들며 이 때의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$I = I_0 \exp[-\gamma L] \quad (7)$$

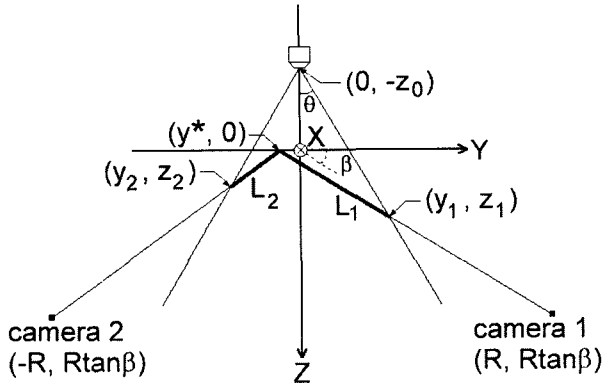


Fig. 2 Geometry of the beam path passing the uniform solid-cone spray, where  $R$  is the distance from spray axis ( $Z$ -axis) to camera, and  $\beta$  is a viewing angle of camera.

입사광의 감쇠를 보정하기 위해서 Fig. 1에서와 같이  $x$  축을 따라 양쪽으로 레이저광을 조사하여 얻은 이미지를 기하평균하는 방식을 채택하고, 두 대의 카메라를  $y$  축을 따라 분사축에 대칭이 되도록 장치를 구성하였다. 그리고 측정 단면을 따라 거의 균일한 유량 분포를 나타내는 *solid cone* 분무에 대하여 측정을 수행하였다. 이 분무는 유동장과 분무 특성의 변화가 시간에 따라 크지 않으므로 레이저 조사 방향과 신호 측정 위치를 차례대로 바꾸어 가면서 측정하는 것이 가능하였다. 두 대의 카메라를 사용하게 되면, 레이저 평면광이 조사되는 측정 단면 내의 한 점  $(y^*, 0)$ 으로부터 각각의 카메라까지 이르는 감쇠 경로  $L_1, L_2$  는 Fig. 2로부터 계산할 수 있다.

$$L_1^2 = (1 + \tan^2 \beta) \left( \frac{z_0 \tan \theta - y^*}{1 - \tan \beta \tan \theta} \right)^2 \quad (8)$$

$$L_2^2 = (1 + \tan^2 \beta) \left( \frac{z_0 \tan \theta + y^*}{1 - \tan \beta \tan \theta} \right)^2 \quad (9)$$

이 때 감쇠 경로의 합을 구하면, 다음과 같이 장치의 구성에만 관계되는 분무 반각  $\theta$ , 분사 축으로부터 카메라까지의 거리  $R$ , 카메라의 시선 각도  $\beta$ , 분무노즐로부터 측정단면까지의 축방향 거리  $z_0$ 만의 함수로 표현할 수 있으므로  $y$  방향의 위치에 상관없이 같은 값을 갖는다[5].

$$\begin{aligned} L_1 + L_2 &= \sqrt{1 + \tan^2 \beta} \left( \frac{2z_0 \tan \theta}{1 - \tan \beta \tan \theta} \right) \\ &= \text{constant} \end{aligned} \quad (10)$$

한편 감쇠 계수  $\gamma$ 는 단위 체적 당 액적의 수, 흡수 및 산란 단면의 함수로 주어진다[4]. 따라서 신호의 감쇠량은 액적 수밀도, 크기 분포, 형광 혹은 산란 신호의 파장에 영향을 받게 된다. *solid cone* 분무에서와 같이 측정 영역에서 감쇠 계수의 변화가 작은 경우에는 감쇠 거리의 영향이 주요하게 작용하기 때문에 카메라 1과 카메라 2와 같이 대칭인 위치에서 측정한 두 신호 강도의 기하 평균을 취하면 감쇠 거리가 항상 일정한 상수 값을 나타내므로 감쇠 이전의 강도에 비례하는 측정값을 얻어낼 수가 있다.

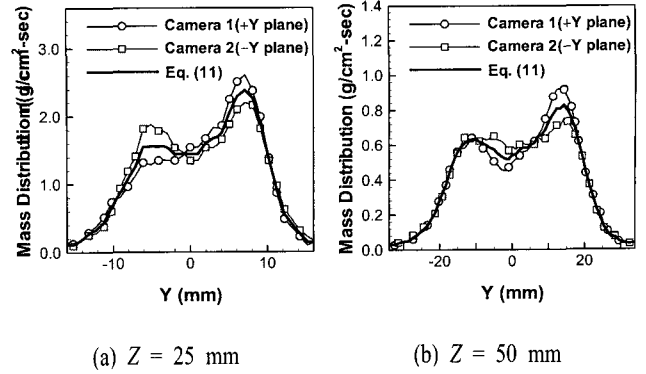


Fig. 3 Fuel mass distribution from optical patternator at (a) 25 mm and (b) 50 mm downstream from the nozzle tip.

$$\begin{aligned} \sqrt{I_1 I_2} &= I_0 \exp \left[ -\frac{\gamma}{2} (L_1 + L_2) \right] \\ &\approx K_{ext} I_0 \end{aligned} \quad (11)$$

Fig. 3는 분사 축 방향의 두 위치에서 단면의 중심축을 따라 질량 플럭스의 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)인 경우가 분무 노즐 출구에 가까운 상태여서 신호의 감쇠가 많이 일어나 두 카메라에서 측정한 분포가 서로 다른 분포 형태를 보이고 있으며 하류로 갈수록 Fig. 3(b)에서와 같이 두 측정 값의 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 식 (11)을 이용하여 두 신호의 기하 평균을 취했을 경우 측정에 사용한 분무가 완전히 균일한 유량 분포를 이루지는 않으며  $+Y$  방향으로 유량이 약간 편중되어 있다는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 신호의 파장에 따른 감쇠의 영향

형광과 산란의 비를 취하여 액적 평균 크기,  $SMD(D_{32})$ 를 구하는 경우 경로에 따른 감쇠는 신호의 파장 특성에 큰 영향을 받는다. 식 (12)에서 보듯이 형광 신호(하첨자  $f$ )와 산란 신호(하첨자  $s$ )가 같은 감쇠 계수를 가지는 경우에는 지수항의 값이 항상 1이 되므로  $SMD$  측정 시에 카메라의 위치와 감쇠 경로의 차이에 따른 오차가 발생하지 않는다[6]. 형광을 일으키는 입자의 흡수 영역대와 신호의 파장이 겹치는 경우에는 파장에 따라 감쇠 계수가 차이를 보일 수 있으며 이 경우에는 감쇠 경로의 길이가 신호의 비에도 영향을 줄 수 있다. 이 경우에도 두 대의 카메라를 이용하여 기하평균을 취하여 원래  $SMD$ 에 비례하는 값을 얻어낼 수 있다.

$$\frac{I_f}{I_s} = K D_{32} \exp \left[ -(\overline{\gamma_f} - \overline{\gamma_s}) L(y) \right] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} &\left[ \frac{I_f}{I_s} \right]_1 \left[ \frac{I_f}{I_s} \right]_2 \\ &= K^2 D_{32}^2 \exp \left[ -(\overline{\gamma_f} - \overline{\gamma_s}) (L_1 + L_2) \right] \\ &= K^2 D_{32}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

파장에 따른 감쇠계수의 측정은 식(7)을 이용하였다. 형광 염료를 담은 quartz cell에 레이저를 조사하여 나온 신호의 세기를 스프레이를 통과할 때와 그렇지 않을 때 각각 측정하였다.

파장은 산란 신호와 형광신호의 스펙트럼을 참고하여 주요

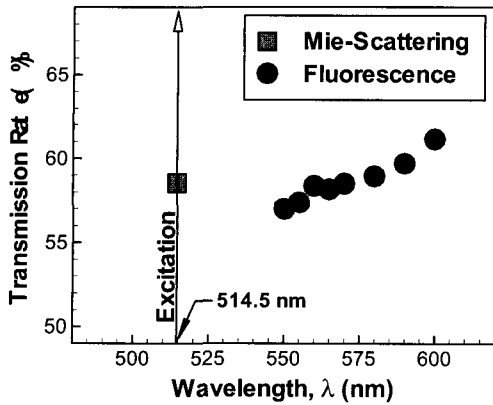


Fig. 4 Transmission measurements for the Mie-scattering and fluorescence signals through a solid-cone spray.

한 영역을 선택하였다.

Fig. 4는 결과를 표시한 것이다. 파장이 증가할수록 투과율이 조금씩 증가하는 것으로 나타났다. 즉 감쇠율이 감소하고 있는 것이다. 그러나 형광신호의 스펙트럼에서 대부분의 영역을 차지하고 있는 550~570 nm의 투과율이 514 nm와 유사하므로 같다는 가정을 하여도 무방하다고 판단한다.

#### 4. 결론

optical patterator 측정 시 경로에 따른 이차 산란에 의한 감쇠의 영향을 보정하고 정확도를 높일 수 있는 방안으로 두 대의 카메라를 이용하여 신호를 기하 평균하여 처리하는 방식을 제시하였고, 다른 측정 기법과의 비교를 통해서 정량화과정에서의 문제점을 검토, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 형광 신호를 이용하여 질량 유량 분포를 얻는 경우 액적의 밀도가 높은 인젝터 근방에서는 감쇠 경로의 길이 차로 인해 신호의 비대칭을 유발하였으나 두 대의 카메라를 이용하여 이를 복원해낼 수가 있었다.

(2) SMD 측정시에는 형광과 산란 신호의 파장에 따른 감쇠 계수의 차이가 측정 오차에 영향을 줄 수 있으며, 두 신호에 대

한 감쇠 계수가 파장의 영향을 많이 받는 경우에는 두 대의 카메라를 이용한 감쇠 보정 방식이 유효한 결과를 제공해 줄 수 있었다.

(3) 인젝터 근방에서와 같이 액적의 밀도가 높아 다른 장비로는 측정이 힘든 위치에서도 두 대의 카메라를 이용하여 이차 산란에 의한 감쇠를 고려한다면 고해상도의 정량적인 평면 분무 특성을 얻는 것이 가능하다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가 지정 연구실 사업 (M1-0104-00-0058)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Sankar, S. V., Maher, K. E., Robert, D. M., and Bachalo, W. D., "Rapid Characterization of Fuel Atomizers Using an Optical Patterator," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME*, Vol. 121, Jul. 1999, pp. 409-414
- [2] Le Gal, P., Farrugia, N., and Greenhalgh, D. A., "Development of Laser Sheet Dropsizing for Spray Characterization," *Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow* (1998), pp. 113-120.
- [3] 이경진, 정기훈, 윤영빈, 정경석, 정인석, "평면 이미지 기법을 이용한 분무 특성 해석", *대한기계학회논문집 B권*, 제24권 제1호 (2000), pp. 93-101.
- [4] Bohren, C. F., Huffman, D. R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley Interscience, 1983.
- [5] 고현석, 김동준, 정기훈, 윤영빈, 양수석, 이대성, "평면 이미지 기법의 신호 감쇠 효과에 대한 실험적 연구", *한국항공우주학회지*, 제 29권 제7호 (2001), pp71~77
- [6] Yeh, C.-N., Kosaka, H., and Kamimoto, T., "Measurement of Drop Sizes in Unsteady Dense Sprays," *Recent Advances in Spray Combustion: Spray Atomization and Drop Burning Phenomena*, Vol. I, Chapter 12, Ed. K.K. Kuo, Progress in Astronautics and Aeronautics, 1996.