

## 평면 이미지 기법을 이용한 분무 특성 해석

이경진\* · 정기훈\* · 윤영빈\*\* · 정경석\*\*\* · 정인석\*\*  
(1999년 7월 5일 접수)

### The Spray Characterization Using Planar Imaging Technique

Kyungjin Lee, Kihoon Jung, Youngbin Yoon, Kyung-Seok Jeong  
and In-Seuck Jeung

**Key Words:** Spay(스프레이), SMD(Sauter Mean Diameter ; 액적평균 지름치), Patteration(패터네이션), Fluorescence(형광), Mie Scattering(Mie 산란), PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer ; 도플러 입자 측정기), 3-D Reconstruction(3차원 재구성)

#### Abstract

The characteristics of spray nozzle have been quantified with the measurement of fluorescence and Mie scattering images. To correct the attenuation of the incident light sheet, a sequential double-pass light sheet system and the geometrical averaging of two images was implemented. Quantitative mass flux distribution of spray was obtained from fluorescence image. 3-D image is reconstructed using 2-D radial images. Sauter mean diameter (SMD) distribution was determined using the ratio of fluorescence signal intensity and Mie scattering signal intensity and the values were quantified with PDPA data. The measurement of mass flux and SMD using planar imaging technique agree with PDPA data fairly well in the low density region. However, in dense region, there are significant errors caused by secondary scattering. It was found that the planar imaging technique provides many advantages over the point measurement technique, such as PDPA, and can be implemented for quantitative measurement, especially in low density region.

#### 기호설명

$A$  : 한 pixel이 나타내는 영역의 면적  
 $c_f, c_s, C_f, C_f', K$  : 비례상수  
 $d_0$  : 액적의 지름  
 $D_{32}$  : SMD  
 $G_f$  : 형광신호의 강도  
 $G_s$  : Mie 산란신호의 강도  
 $I_i$  : 입사광의 강도  
 $\dot{m}$  : 연료의 질량 유속  
 $\dot{m}_{nozzle}$  : 노즐의 연료 유량

$N_i$  : 지름이  $d_i$ 인 액적의 개수  
 $S$  : 형광신호의 강도합  
 $x$  : 노즐중심으로부터의 거리  
 $z$  : 노즐로부터의 축방향 거리  
 $\delta m$  : 측정체적을 지나는 액체의 총질량  
 $\Delta P$  : 분사압력  
 $\rho$  : 측정체적 내의 액체의 질량밀도

#### 1. 서론

액체 연료의 수송과 저장의 편리함으로 인해, 현재의 에너지 수요 중 많은 부분이 연소실 내로 분무(spray)의 형태로 주입된 액체 연료의 연소로 이루어지고 있다.<sup>(1)</sup> 일반적인 액체 연료들은 점화에 필요한 양을 증발시킬 정도로 휘발성이 강하지 않기 때문에, 표면적을 증가시키기 위해서 많

\* 서울대학교 항공우주공학과

\*\* 회원, 서울대학교 항공우주공학과

E-mail : ybyoon@plaza.snu.ac.kr

TEL : (02)880-1904 FAX : (02)887-2662

\*\*\* 한국기술교육대학교 동력기계공학과

은 수의 액적으로 미립화되어야 한다.<sup>(2)</sup> 액체 연료를 이용하는 연소기에 있어서 분무는 정확한 양의 액체 연료를 기체 상태에 분산시켜 균일한 혼합과 신속한 기화를 이루어 궁극적으로 연소를 촉진시키는 방법으로 액체 연료 로켓 엔진, 가스 터빈, 디젤 엔진, 산업용 로 등에서 광범위하게 이용되고 있다.<sup>(1)</sup> 따라서, 이러한 분무를 이용하는 연소 시스템의 연소 효율과 공해 물질 배출은 분무의 전체적인 특성에 크게 영향을 받는다.

분무를 상세하게 분석하는 방법으로서 위상 도플러 입자 분석기(PDPA ; Phase Doppler Particle Analyzer)가 널리 사용되어지고 있다. PDPA는 액적의 크기와 속도에 대한 정확한 정보를 제공하여 주고, 주어진 정보들을 이용하여 액적의 수밀도나 액체 체적 유량 등을 계산해 낼 수도 있다. 그러나 PDPA를 이용하여 분무의 전체적인 특성을 분석하는 일은 매우 많은 시간을 필요로 한다. 많은 경우에 있어서 좀 더 빨리 분무의 특성을 파악할 수 있는 대체 진단 기법이 필요한데, 레이저 평면광을 이용하는 평면 이미지 기법은 그 중의 하나라고 할 수 있다.

연소의 효율과 연소기의 배기 특성과 밀접한 관계가 있는 분무 특성치로는 평균 액적 크기, 액적 크기 분포, 분사각, patternation 등이 있다. 평균 액적 크기는 여러 가지로 정의될 수 있는데, 그 중에서 SMD(Sauter Mean Diameter)는 체적과 표면적의 비율이 전체 분무의 값과 같은 액적의 지름으로 평균 액적의 크기를 나타내기 위해 가장 널리 사용되고 있다. Patternation이란 원추형 분무에서 원주 방향이나 지름 방향으로의 연료 분포의 균일성을 측정하는 것을 의미한다.<sup>(3)</sup> 연료 노즐에서 생성되는 분무 분포의 대칭성은 대부분의 연소 시스템에서 매우 중요한 요소이다.

레이저 평면 이미지 기법을 이용하여 분사각과 분무의 질량 분포를 구하여 patternation을 수행할 수 있으며, 형광 이미지와 Mie 산란 이미지를 함께 구하여 SMD를 측정할 수 있다.

여러 연구자들이 PLMS (Planar Laser Mie Scattering)나 PLLIF (Planar Liquid Laser Induced Fluorescence; 형광) 기법을 사용하여 분무의 특성을 관찰하였다. Wang<sup>(4)</sup> 등은 Mie 산란을 이용해서 air-blast 노즐의 분무 패턴을 측정하였다. 입사광의 감쇠를 보정하기 위해서, line-of-sight에 따른 감쇠 계산을 하였다. Su<sup>(5)</sup> 등은 PLLIF를 이용

하여 가솔린 분무기의 수직 단면의 이미지를 얻었다. 입사광의 감쇠를 보정하기 위해서, 좌우에서 레이저를 조사하여 두 개의 이미지를 얻은 후 합하는 방법과 함께 측정된 Mie 산란 이미지와 입사광의 감쇠의 총량을 이용하여 line-of-sight에 따른 계산을 하는 두 가지 방법을 사용하였다. Talley<sup>(6)</sup> 등은 입사광의 감쇠를 보정하는 방법으로 좌우에서 레이저를 조사하여 두 개의 이미지를 얻은 후, 두 이미지의 기하 평균을 구하는 방법을 제안하였다. Zelina<sup>(7)</sup> 등은 분무 분포뿐만 아니라, 형광 신호와 Mie 산란 신호의 비율을 이용해서 평면의 SMD 분포를 구하였다. PDPA로부터 구한 분무의 질량 유량 분포와 비슷한 분포를 나타내지만, 중심 부근에서 잘 맞지 않음을 지적하고, 레이저 평면 밖에서의 산란으로 인한 것으로 보았다.

이러한 레이저 평면 이미지 기법을 이용한 분무 특성 측정은 유동을 교란시키지 않으면서, 높은 공간 해상도의 측정을 할 수 있으며, PDPA와 같은 점 측정 방식에 비해 손쉽게 많은 정보를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 정량적인 해석에는 아직 몇 가지 문제점이 있다.

본 연구에서는 PLLIF를 이용하여 가스 터빈 엔진에 사용되는 hollow cone 형태의 노즐로부터 만들어지는 분무의 질량 유량 분포를 구해 보고, 카메라를 비스듬하게 설치한 경우, 그로 인한 영향을 살펴보았다. 또한, 형광 신호와 Mie 산란 신호의 비를 이용하여 평면의 SMD 분포를 구해 보았다.

## 2. 이론

### 2.1 질량 분포 측정의 원리

광학적으로 분무의 분포를 측정하는 방법 중 가장 기본적인 것으로 Mie 산란을 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 정성적인 가시화의 도구로서 널리 사용되어지고 있으며 기본적인 분무의 구조를 파악하는데 있어서 효과적이다. Mie 산란의 강도는 액적의 지름의 제곱에 비례하기 때문에, 분무의 표면적에 비례하는 값을 나타내게 된다. 그러나, Mie 산란은 액적의 크기, 굴절률, 레이저광의 파장, 촬영 각도 등의 여러 가지 광학적 변수들에 의해 영향을 받기 때문에 정량적인 측정

을 하는데 어려움이 많다.

최근에는 분무 분포의 정량적인 측정을 위해서 레이저 유도 형광을 이용하는 방법이 널리 사용되고 있다. 적절한 광원을 특정 유체에 비추어 주면 형광이 유도된다. 어떤 물질은 스스로 형광을 일으키지만, 이런 물질들은 대개 유독하다. 실험을 위해서는 안전한 시험 유체를 사용하는 것이 바람직한데, 일반적으로 분무 실험에 사용되는 물, 알코올, 옥탄 등의 물질은 형광을 내지 않는다. 이런 비형광성 유체를 사용할 경우, 레이저 유도 형광을 얻기 위해서 적절한 형광 염료(e.g. rhodamine, fluorescein)를 유체에 첨가하여 사용한다.<sup>(8)</sup>

형광 신호의 강도는 형광 분자의 농도에 비례한다. 따라서, 형광 염료가 시험 유체 내에 균질하게 존재하고 있다면, 형광 신호의 강도는 유체의 체적, 즉 질량에 비례한다. 형광 신호 강도와 액적 지름의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_f = c_f d_0^3 \quad (1)$$

여기서  $c_f$  는 이론적으로 계산되거나 실험적으로 구할 수 있는 비례 상수이다. 좌표  $(x, y)$ 로 정의되는 디지털 카메라의 화소에서 측정되어지는 형광 신호의 강도는 식 (1)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,  $\sum N_i(x, y) d_i^3(x, y)$  는 측정 체적을 지나는 유체의 체적에 비례하므로, 유체의 밀도가 일정하다면 형광 신호의 강도는 입사광의 강도와 측정 체적을 지나는 총 질량에 비례하는 값을 나타내게 된다. 즉, 식 (3)과 같이 측정 체적 내의 액체의 질량밀도에 비례한다.

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

## 2.2 SMD 분포 측정의 원리

평면 이미지 기법을 이용하여 액적의 크기를 측정하는 방법의 기본 원리는 레이저 평면광에 의해 생성되는 평면에 존재하는 액적들의 형광과 Mie 산란의 이미지를 함께 얻는 것이다. 형광과 Mie 산란은 서로 다른 파장의 빛을 내기 때문에 광학 필터를 사용하여 분리할 수 있다. 유

동이나 분무의 특성이 시간에 따라 변화하지 않는다고 가정할 수 있는 정상 상태의 분무의 경우, 하나의 카메라를 사용하여 형광과 Mie 산란의 이미지를 순차적으로 기록하는 방법이 가능하다.

Lorenz-Mie 이론에 따르면 Mie 산란의 세기는 액적의 지름, 산란 각도, 액적의 굴절률, 편광, 입사광의 파장 등의 복잡한 함수로 나타내어지지만, 지름이  $1\mu\text{m}$  보다 큰 구형의 액적의 경우, 근사적으로 액적의 지름의 제곱에 비례한다고 할 수 있다. Mie 산란 신호 강도와 액적 지름의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$G_s = c_s D_0^2 \quad (4)$$

여기서  $c_s$  는 이론적으로 계산되거나 실험적으로 구할 수 있는 비례 상수이다. 좌표  $(x, y)$ 로 정의되는 디지털 카메라의 화소에서 측정되어지는 Mie 산란 신호의 강도는 식 (4)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_s(x, y) = I_i(x, y) c_s \sum N_i(x, y) d_i^2(x, y) \quad (5)$$

앞에서 구했던 식 (2)를 위의 식 (5)로 나누어 주면 다음과 같다.

$$\frac{G_f(x, y)}{G_s(x, y)} = \frac{c_f}{c_s} \left[ \frac{\sum N_i(x, y) d_i^3(x, y)}{\sum N_i(x, y) d_i^2(x, y)} \right] \quad (6)$$

SMD의 정의로부터 위의 식은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.<sup>(14)</sup>

$$\frac{G_f(x, y)}{G_s(x, y)} = K D_{32}(x, y) \quad (7)$$

$$D_{32}(x, y) = \frac{1}{K} \left[ \frac{G_f(x, y)}{G_s(x, y)} \right] \quad (8)$$

여기서  $D_{32}(x, y)$ 는 좌표  $(x, y)$ 에서의 SMD이고,  $K$ 는 보정 상수이다. 식 (8)은 측정된 형광 신호와 Mie 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 적절한 보정 상수  $K$ 를 구해야만 하는데, 이는 PDPA를 이용하여 구할 수 있다.

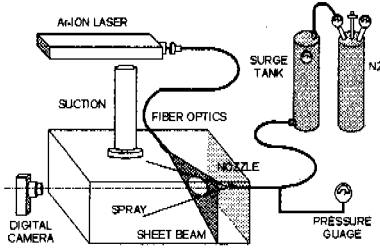


Fig. 1 Schematic of experimental setup

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

전체 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험 장치는 크게 연료 공급 장치, 시험부, 레이저 평면광을 만들어 주는 레이저와 fiber optics, 카메라로 이루어져 있다.

본 실험에서 사용된 연료 노즐은 이중 오리피스 형식의 노즐로서 시동 노즐과 주 노즐로 구성되어 있는데, 시동 노즐만을 실험에 사용하였다. 분무는 대기 중으로 수평으로 분사하였다. 분무 압력은 연료 노즐의 바로 앞에서 압력계를 사용하여 측정하였다. 분무 압력,  $\Delta P$ 가 7bar 일 때, 유량은 25 kg/hr 이었다. 물과 알코올을 4:1로 혼합한 용액을 시험 유체로 사용하였는데, 아르곤 이온 레이저에 의해서 형광을 일으키기 위해서 fluorescein(Aldrich F245-6,  $C_{20}H_{12}O_5$ )을 30mg/l의 비율로 용해시켰다. 일정한 압력을 유지시켜 주기 위해서 고압용 용기에 시험 유체를 담아 놓고, 질소 가스로 가압하여 노즐에 유체를 공급하여 주었다. 시험부는 아크릴로 막아 주었고, 광학적 접근을 위해서 창을 내었다. 분무의 후류 부분에 송풍기를 설치하여 공기 및 작은 액적 등이 배출되도록 하였다.

광원으로는 아르곤 이온 레이저(Lexel 953, 최대 출력 4W)를 사용했으며, fiber optics(TSI, View Point)를 이용하여 평면광으로 만들어 주었다. 레이저 평면광은 분무에 직교하도록 조사하였다. 3차원 이송장치를 사용하여, 레이저 평면광의 조사 위치를 변화시켜 주었다. 칼라 디지털 카메라를 평면광에 직교하도록 설치하고 형광과 Mie 산

란의 이미지를 얻어 연료의 질량 분포와 SMD 분포를 구하였다.

형광 신호와 Mie 산란 신호를 분리하기 위하여 광학 필터를 사용하였는데, 형광 신호를 받기 위해서는 530nm high-pass 필터를, Mie 산란 신호를 위해서는 514±5nm band-pass 필터를 각각 사용하였다.

#### 3.2 입사광의 감쇠 보정

질은 분부에서는 액적들에 의하여 상당한 입사광의 감쇠가 발생하기 때문에, 정확한 분부의 패턴을 얻을 수 없다. 따라서 정확한 분부의 패턴을 얻기 위해서는 이에 대한 보정이 필요하다. 본 연구에서 사용된 분무도 상당한 입사광의 감쇠가 일어날 정도로 농밀하다. 이를 보정하기 위하여 레이저를 순차적으로 좌우에서 조사하여 각각의 이미지를 얻은 후 Talley<sup>(6)</sup> 등에 의하여 제안된 알고리즘을 사용하였다. 이것은 이미지 중 레이저 평면광의 진행 방향에 평행한 한 줄의 픽셀들에 대한 관계를 세운 후, 평면의 모든 줄에 적용을 시켜서 2차원의 분포를 얻는 것이다.

먼저 측정하고자 하는 분부에서 입사광의 감쇠가 Beer's law를 따른다고 가정한다. 이는 분무가 지나치게 농밀하지 않을 경우 타당한 가정이다. Beer' law가 타당하다면, 앞으로 설명될 방법은 감쇠의 매커니즘-빛의 소멸은 흡수, 산란, 혹은 다른 영향이나 이것들의 결합에 의해서 일어난다-에 관계없이 적용될 수 있다.

레이저를 좌우에서 조사한 두 개의 이미지에서 각각 상당한 입사광의 감쇠가 일어난다면, 주어진 줄을 따라서 감쇠에 의해 입사광의 강도  $I_l(x)$ 와  $I_r(x)$ 는  $x$ 가 변화함에 따라 각각 감소하고 증가하게 된다. 따라서 두 이미지가 같은 질량 분포를 가지는 분무를 나타내고 있지만, 서로 다른 신호 강도 분포를 보이게 된다.

식 (3)에서 비례 상수  $C_f$ 가 일정하다면,  $x$ 에 따른 형광 신호의 강도의 변화와 입사광의 강도  $I$ 와 액체의 질량 밀도  $\rho$ 의 변화와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dG_l}{G_l} &= \frac{dI_l}{I_l} + \frac{d\rho}{\rho}, \\ \frac{dG_r}{G_r} &= \frac{dI_r}{I_r} + \frac{d\rho}{\rho} \end{aligned} \quad (9)$$

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 상대적인 소멸  $dI/I$ 는 산란 매체만의 함수가 된다. 이 경우에 있어서는 국부적인 액적 수밀도와 크기 분포만의 함수가 된다. 따라서, 이 값은 모든 점에서 왼쪽에서 조사했을 때와 오른쪽에서 조사했을 때가 같게 된다.

$$\frac{dI_l}{I_l} = \frac{dI_r}{I_r} \quad (10)$$

식 (9)에 식 (10)을 대입하여 연립하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{dG_l}{G_l} + \frac{dG_r}{G_r} = 2\frac{d\rho}{\rho} \quad (11)$$

이 식으로부터 입사광의 강도에 관계없이, 측정된 형광 신호의 강도만으로 질량 밀도를 알 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 식 (11)을 적분하면 다음과 같이 된다.<sup>(12)</sup>

$$\ln G_l + \ln G_r = 2\ln \rho + C_1 \quad (12)$$

$$\rho(x) = C_0 \sqrt{G_l(x) G_r(x)} \quad (13)$$

식 (13)으로부터 좌우에서 조사한 두 이미지의 기하 평균값을 구하면, 분무의 질량 밀도 분포를 알 수 있다. 여기에 적절한 적분 상수  $C_0$ 를 구한다면 바로 정량적인 질량 밀도 값을 구할 수 있다. 이러한 방법은 산란 신호의 입사광의 감쇠를 보정하는 데에도 마찬가지로 적용될 수 있다.

### 3.3 원근에 대한 보정

카메라를 레이저 평면과 수직하지 않고, 비스듬히 각을 이루도록 설치한 경우 획득된 이미지를 원근에 대한 보정을 하였다. 이러한 원근에 대한 보정은 Affine 변환을 함으로써 해결하였다. 이 변환을 위한 계수들은 측정 위치에 정사각형의 격자를 놓고, 이미지를 얻은 후 얻어진 사다리꼴의 이미지가 정사각형의 이미지로 변환되는 값들을 찾음으로써 구할 수 있다.<sup>(10)</sup>

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 질량 유속 분포 측정

카메라를 레이저 평면에 수직으로 위치하고, 분무 압력을  $7\text{kgf/cm}^2$ 으로 했을 때의 분무의 질량 유량 분포를 알아보기 위하여 노즐로부터의 거리에 따른 형광 이미지를 얻었다. 각각의 이미지들은 평면광의 강도 변화와 입사광의 감쇠를 보정하여 주었다.

형광 이미지는 입사광의 강도와 연료의 질량 밀도에 비례하는데, 보정된 형광 이미지는 입사광의 강도에 의한 영향을 제거하였기 때문에, 연료의 질량 밀도에만 비례하게 된다. 따라서, 충분히 넓은 영역의 이미지에서의 보정된 형광 신호의 합은 연료 노즐의 질량 유량을 나타내게 된다. 이를 이용하여, 형광 이미지를 연료의 질량 유속으로 변환시켜 줄 수 있다.

Fig. 2는 노즐로부터의 거리에 따른 형광 신호의 합을 나타내고 있다. 예상했던 것과는 달리 노즐로부터의 거리가 멀어질수록 큰 값을 나타내고 있는데, 이것은 이미지 평면과 카메라 사이의 액적들에 의한 형광 신호의 감쇠의 영향으로 설명할 수 있다. 노즐로부터 가까울수록 카메라까지의 거리가 멀어지기 때문에, 그 사이의 액적의 수가 많아지므로 형광 신호의 감쇠량이 많아지게 된다. 따라서 정량적인 질량 유량 분포를 얻기 위해서는 각 단면마다 각각의 형광 신호의 합을 이용하여 보정하여 주어야 한다. 단위 시간 당 단위 면적을 지나는 연료의 질량 유량을 다음과 같이 얻을 수 있다.

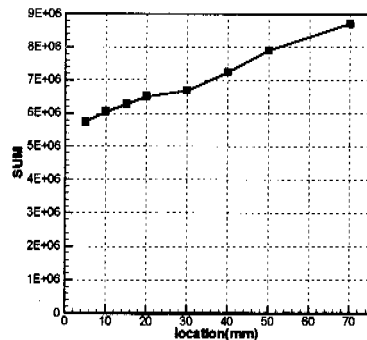
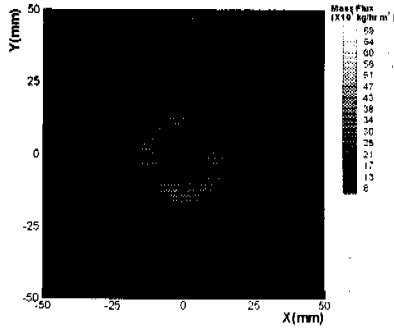
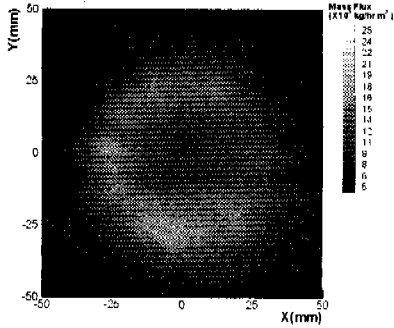


Fig. 2 Summation of fluorescence intensity



(a) z=20mm

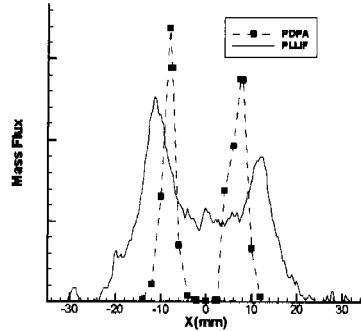


(b) z=50mm

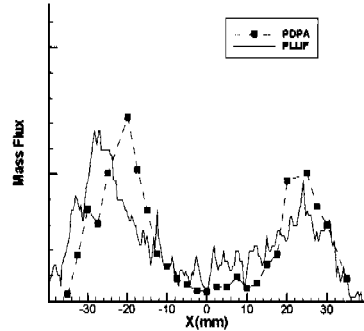
Fig. 3 Mass flux distribution

본 실험에서 사용된 분무와 같은 정상 상태의 분무에 있어서는, 증발이 거의 일어나지 않고, 재순환되는 분무의 양이 무시할 수 있다는 조건하에서, 각 단면을 지나는 질량 유량은 일정하고, 시간에 따라 변하지도 않는다. 따라서, 각각의 단면에서의 형광 신호의 함은 일정해야 한다.

Fig. 3은 연료의 질량 유속으로 정상화한 이미지들이다. 두 이미지는 서로 다른 scale을 사용하여 나타내었다. 분무는 구조면에서 중심이 비어 있고, 고리 모양의 부분에서 큰 유량을 가지는 hollow cone의 형상을 보이고 있다. 노즐로부터의 거리가 멀어짐에 따라 최대 신호 강도는 감소하면서 분무의 범위가 넓어지고 많은 양의 분무가 존재하는 영역의 두께가 증가하고 고르게 분포되어지고 있다. 모든 단면에서 좌측의 분무의 밀도가 더 높은 비대칭적인 형상을 보이고 있다.



(a) z=20mm



(b) z=50mm

Fig. 4 Mass flux profile measured from planar imaging technique compared with PDPA data

또한, 대부분의 분무가 존재하는 고리 부분의 아래쪽에 분무가 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이는 중력의 영향으로 액적들이 지체(lagging)하고 있는 것들이다. 하류에서는 몇 개의 밀도가 높은 부분들로 이루어진 듯한 모습을 보이고 있다.

Fig. 4는 평면 이미지 기법을 이용하여 얻은 노즐 중심선에서의 질량 유속의 변화를 PDPA를 통해 얻은 값과 비교하고 있다. 분무가 비교적 덜 농밀한 z가 50mm인 지점에서는 PDPA data와 거의 일치하고 있지만, z가 20mm인 지점에서는 상당한 차이를 보여주고 있다. PDPA data에 비해 노즐 중심 부근에서 상당히 큰 값을 나타내고 있으며 분무의 바깥쪽 경계도 더 먼 곳에 위치하고

있다. 최대값의 위치도 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 레이저 평면광 바깥쪽에 존재하는 액적들의 이차 산란-산란된 빛이 레이저 평면 밖의 액적들을 여기 시켜서 형광을 발생시키거나 형광이 레이저 평면 밖의 액적들에 의해 산란된다-에 의해 일어나는 현상으로 설명되어질 수 있다. 따라서 분무가 농밀하게 존재하는 영역에서 형광 이미지를 이용한 정량적인 연료의 질량 유속 측정에는 어려움이 있다. 그러나 좌우의 최대값의 비는 비교적 일치하고 있기 때문에 분무의 대칭성을 측정하는 pattenation에 있어서는 어느 정도 합당한 결과를 얻을 수 있다.

또한, 이런 질량 유속 측정을 통해서 분사각과 분무가 집중적으로 분포하는 지역의 두께도 측정할 수 있는데, 이런 data들은 수치 해석에서 사용되어 진다. 본 실험에 사용된 노즐은 노즐로부터의 거리가 50mm인 지점을 기준으로 하였을 때는 약 71°의 분사각을 가진다.

각 단면들의 질량 유량 분포를 이용하여 3차원 분무 구조의 이미지를 재구성할 수 있다. Fig. 5는 각 단면들의 질량 유속 분포들로부터 재구성된 3차원 분무 이미지이다. 이러한 3차원 분무 이미지는 분무의 전체적인 윤곽을 보여줌으로써, 대략적인 조망을 할 수 있게 해 줄 뿐만 아니라, 이 이미지로부터 어떤 각도나 위치든 원하는 종방향 단면의 분포를 얻어낼 수도 있다. Fig. 6는 3차원 이미지로부터 얻어진 종 방향 단면의 이미지의 예이다.

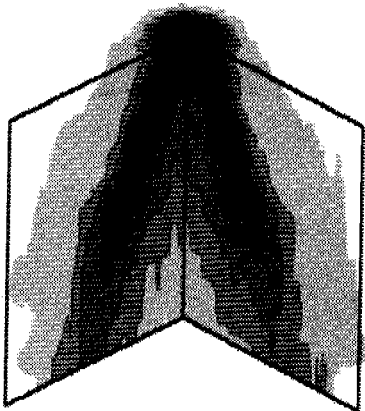


Fig. 5 3-D Reconstructed image of spray from radial mass distributions.

#### 4.2 SMD 분포 측정

Fig. 7은 형광과 Mie 산란의 상대적인 강도를

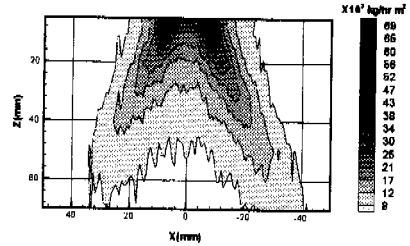
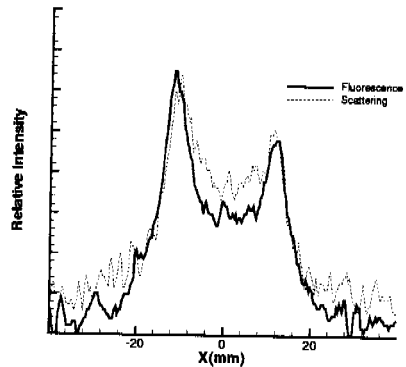
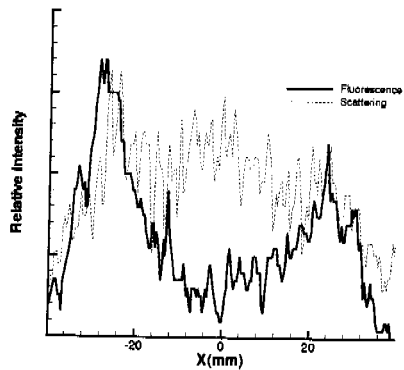


Fig. 6 Axial mass distribution image at nozzle centerline extracted from 3-D image



(a) z=20mm



(b) z=50mm

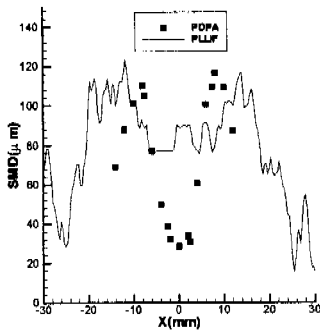
Fig. 7 Comparison of fluorescence and Mie scattering

비교하고 있다. 앞에서 설명했던 것처럼 물질의 제적에 비례하는 형광 신호가 액적의 지름의 세 제곱에 비례하고, Mie 산란의 강도는 액적의 굴절률, 파장, 카메라와의 각도 등의 변수들에 영향을 받기는 하지만, 일반적으로 액적 지름의 제곱에 비례한다고 볼 수 있다. 크기가 작은 액적들이 많은 지역에서는 Mie 산란의 강도가 상대적으로 강하게 나타난다.

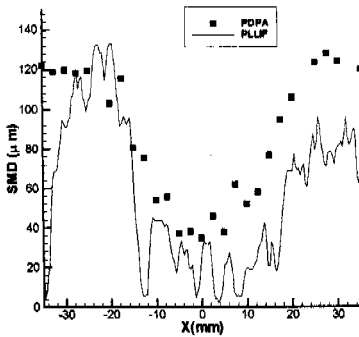
Fig. 8은 노즐 중심선에서의 SMD의 변화를 PDPA를 사용하여 측정된 값들과 비교하고 있다. 본 실험에서는 정상 상태의 분무를 사용했기 때문에, 하나의 카메라를 사용하여 형광과 Mie 산란의 이미지를 순차적으로 기록하는 방식을 사용하였다. 형광 신호와 Mie 산란 신호의 비를 이용

해 구한 값은 상대적인 값들이기 때문에, 이를 정량화하기 위하여 PDPA를 이용해 측정된 값 중 하나를 대입하여 식 (8)의 상수  $K$ 를 결정하여야 한다. 본 실험에서는  $z$ 가 50mm일 때 왼쪽 바깥 쪽 경계의 한 점에서의 값을 이용하였다.

질량 유속의 경우와 마찬가지로 분무의 밀도가 비교적 낮은  $z$ 가 50mm인 경우 PDPA의 결과와 거의 일치하고 있다. 그러나 분무의 밀도가 높은  $z$ 가 20mm인 경우, 최대값은 비슷한 값을 나타내고 있지만, 중심 부근과 외곽에서 상당한 오차를 보이고 있다. 중심 부근에서의 SMD가 PDPA에 의한 결과보다 큰 값을 나타내고 있으며, 액적이 거의 존재하지 않아 PDPA로 결과를 얻을 수 없는 영역에서의 측정이 이루어지고 있다. 이는 역시 이차 산란의 영향으로 설명할 수 있다.

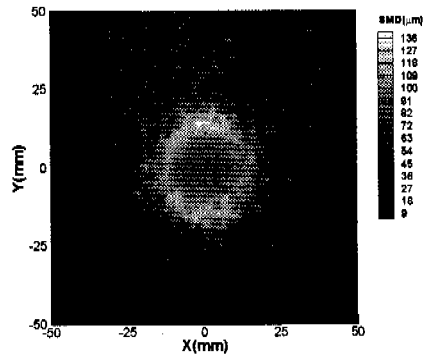


(a)  $z=20\text{mm}$

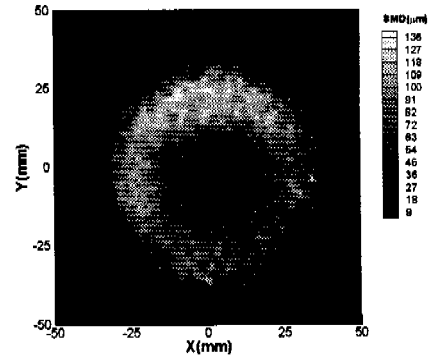


(b)  $z=50\text{mm}$

Fig. 8 SMD profile measured from planar imaging technique compared with PDPA data



(a)  $z=20\text{mm}$



(b)  $z=50\text{mm}$

Fig. 9 SMD distribution



Fig. 9는 앞에서 구한 보정 상수  $K$ 를 이용하여 정량화한 SMD 분포이다. 각 단면에서 분무의 밀도가 높은 고리 모양의 지역에 비교적 큰 액적들이 존재하고, 중심 부분이나 고리 모양의 지역 바깥쪽에는 작은 액적들이 존재하는 것을 볼 수 있다.

이러한 레이저 평면 이미지 기법을 이용한 SMD 측정은 비록 정량적인 결과를 얻기 위해서는 PDPA 등의 다른 계측 방법을 통해 보정을 해주어야 하고, 몇 가지의 오차의 요인도 가지고 있다는 단점은 있지만, 한번에 한 평면 전체의 분포를 높은 공간 해상도로 구해 주기 때문에, 점 측정 방식에 비해 장점을 가진다고 할 수 있다.

### 5. 결론

레이저 평면 이미지 기법을 이용하여 분무의 질량 유속 분포와 SMD를 측정하였고, 각 단면의 질량 유속 분포를 이용하여 3차원 분무 구조의 이미지를 재구성하였다. 정량적인 연료의 질량 유속 분포를 얻기 위하여 형광 신호의 강도를 각각의 단면의 형광 신호 강도의 합을 이용하여 정규화시켜주었다. 형광과 Mie 산란 이미지를 순차적으로 기록한 후, 두 이미지의 비를 이용하여 SMD 분포를 구하였다. 정량적인 SMD 값을 얻기 위하여 PDPA를 이용하여 보정 상수를 구하였다.

분무의 밀도가 비교적 낮은 영역에서는 PDPA를 이용하여 얻은 결과와 거의 일치하고 있지만, 노즐에서 가까운 분무의 밀도가 높은 지역에서는 상당한 차이를 보이고 있다.

이와 같은 레이저 평면 이미지 기법을 이용한 분무 특성치의 측정은 유동을 교란시키지 않으면서, 한번의 측정으로 높은 공간 해상도를 유지하면서 한 평면의 정보를 주기 때문에 많은 시간을 필요로 하는 점 측정 방식에 대해서도 장점을 가지고 있다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 저공해 가스터빈 엔진 연소기 개발 사업의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Faeth, G. M., 1977, "Current Status of Droplet and Liquid Combustion," *Progress in Energy Combustion Science*, Vol. 3, pp. 191~224.
- (2) Lefevre, A. H., 1983, *Gas Turbine Combustion*, Hemisphere Publishing Corporation.
- (3) Lefevre, A. H., 1989, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation.
- (4) Wang, G., Delijouravesh, R., Sellens, R. W., Olesen, M. J., and Bardon, M. F., 1997, "An Optical Spray Pattern Analyzer," *10th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System*, pp. 261~265.
- (5) Su, J., Drake, M. C., Fansler, T. D., and Harrington, D. V., 1998, "Toward Quantitative Characterization of Transient Fuel Sprays Using Planar Laser Induced Fluorescence Imaging," *11th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System*, pp. 106~110.
- (6) Talley, D. G., Verdieck, J. F., Lee, S. W., McDonell, V. G., and Samuelsen, G. S., 1996, "Accounting for Laser Sheet Extinction in Applying PLLIF to Sprays," AIAA-96-0469.
- (7) Zelina, J., Rodrigue, A., and Sankar, S., 1998, "Fuel Injection Characterization Using Laser Diagnostics at Atmospheric and Elevated Pressures," AIAA-98-0148.
- (8) McDonell, V. G., and Samuelsen, G. S., 1997, "Assessment of Liquid Fuel Distribution in Sprays Using Planar Imaging Methods," *Proceeding of the 1st Asia-Pacific Conference on Combustion*, pp. 30~33.
- (9) Van de Hulst, H. C., 1957, *Light Scattering by Small Particles*, John Wiley.
- (10) Russ, J. C., 1992, *The Image Processing Handbook*, CRC Press.
- (11) 이경진, 1999, "평면 이미지 기법을 이용한 분무 특성 해석에 관한 실험적 연구," 서울대학교 석사학위논문.