

## 레이저 계측법을 이용한 분무 가시화

윤영빈<sup>†</sup> · 고현석\* · 김동준\* · 길태옥\*

### Spray Visualization Using Laser Diagnostics

Younghbin Yoon, Hyeonseok Koh, Dongjun Kim and Taeock Khil

**Abstract.** The optical patterator provides the high resolution and quantitative information of the spray. Fuel distribution and Sauter Mean Diameter (SMD) can be measured from fluorescence and Mie-scattering images. To correct the attenuation of the laser beam and signal in dense spray region, the method to find the geometric mean of the signal intensities obtained from two cameras was evaluated and verified in a solid-cone spray. In high pressure environment, the increased number density of the droplets cause multiple scattering. The optical pattention technique using a laser beam instead of a laser sheet was applied to minimize the multiple scattering problem. The pattern of a coaxial spray was changed from hollow-cone to solid-cone shape, and the spray angle was reduced as the ambient pressure increased from 0.1 to 4.0 MPa.

**Key Words :** Spray (분무), Imaging Technique (이미지기법), Extinction (감쇠), Laser-Induced Fluorescence (레이저 유도형광), Mie-scattering (Mie 산란)

### 1. 서 론

액체 연료를 사용하는 연소 시스템에서는 연료 분사 과정이 효율과 공해 배출 문제에 큰 영향을 미친다<sup>(1)</sup>. 따라서 실제 연소 시스템을 개발하기 위해서는 분무의 크기, 액적 분포 등의 특성들을 정량적으로 측정하는 것이 중요하다<sup>(2)</sup>. 이를 위해 분무장 내에 수집관을 삽입하는 기계적 패터네이터(Mechanical Patternator) 부터 고속카메라, Malvern particle analyzer, PDPA 과 같은 다양한 광학 기법이 개발, 적용되어 어느 정도의 성과를 내고 있다.

기존부터 사용되어 온 기계적 패터네이터는 수집관이 분무장 내에 위치하여 유동을 교란시키고 분해능이 낮은 문제점을 가지고 있었다<sup>(3)</sup>. 따라서 최근에는 유동에 교란을 주지 않는 비삽입식 광계측 기법이 개발되고 있다. 평면 이미지 기법을 이용한 광학 패터네이터는 PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence)

기법에서 얻을 수 있었던 질량 분포뿐만 아니라 Mie 산란 신호의 이미지를 처리하여 2차원 단면에 대한 액적의 크기 분포 등(Sauter Mean Diameter; SMD) 을 동시에 얻을 수 있는 비삽입식 분무 분포 측정 장치의 하나이다<sup>(4,5)</sup>. 그리고 점 측정 혹은 선 측정 등의 PDPA, Malvern 등의 광학 기법보다 손쉽게 많은 공간상의 정보를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 분무장 내의 액적에 의해 레이저 및 신호가 현저하게 감쇠할 경우, 신호 분포를 왜곡하여 신뢰성 있는 정량적 해석을 불가능하게 만든다. 또한 로켓 엔진 내부와 같이 고압 환경 하에서는 높은 수밀도로 인해 다중 산란 등에 의한 오차가 심하게 발생하여, 기존의 PDPA, PLIF 등의 광학 기법으로는 충분히 신뢰할 만한 결과를 얻기가 어렵다.

레이저 입사광의 감쇠를 해결하기 위해서는 양방향에서 평면광을 동시에 조사하는 방법을 사용할 수 있다<sup>(6)</sup>. Talley 등<sup>(7)</sup>은 평면광을 서로 반대방향으로 순차적으로 조사하면서 얻은 이미지를 이용하여 입사광의 감쇠를 보정하였다. Sick 등<sup>(8)</sup>은 여러 상황의 분무에 대해 양방향 동시 조사방법과 순차 조사방법을 서로 비교, 분석하였다.

<sup>†</sup>서울대학교 기계항공공학부  
E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

\*서울대학교 기계항공공학부 대학원

경로 상에서 일어나는 신호의 불균일한 감쇠 또한 정량적인 분무 측정을 위해 필요하다. Sick 등<sup>(8)</sup>은 LIF 신호가 분무를 통과하는 동안 감쇠되는 양을 직접 측정하여 신호 감쇠의 보정을 시도하였다. Brown 등<sup>(9)</sup>은 레이저 광선으로 분무 단면을 조사해나가면서 입사광과 신호의 감쇠를 보정하는 방식을 제안하였다.

고압환경의 분무와 같이 액적간의 거리가 매우 조밀한 경우에는 산란이 연속적으로 일어날 수가 있다. 영상을 이용한 광계측 과정에서 이러한 다중 산란이 일어나는 경우에는 해석이 매우 복잡해지며 특히 분무와 같은 3차원 이상 유동에 대한 다중 산란의 연구는 부족한 실정이다<sup>(10)</sup>. 실험적으로는 Brown 등<sup>(9)</sup>이 레이저 평면광 대신 레이저 광선을 사용하여 다중 산란을 최소화하는 방법을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 광학 패터네이터에서 발생할 수 있는 문제점 중 신호 감쇠에 초점을 맞추어 이를 보정할 수 있는 방안을 살펴보았다. 그리고 solid-cone 분무에서 감쇠의 영향을 살펴보고 PDPA 등의 다른 측정 기법과 광학 패터네이터의 정확도를 비교하여 보았다.

다중 산란의 영향을 무시할 수 없는 고압 환경에서 동축 스윌 인젝터의 특성 파악을 위해 레이저 평면광 대신 레이저 광선을 이용하는 광학 선형 패터네이터를 적용하였다. 레이저 광선이 분무를 통과하는 레이저 광선의 투과율을 측정하여 입사광 및 신호 감쇠의 문제를 해결하였다. 동시에, 레이저 광선이 지나가는 경로의 선형 이미지를 카메라로 측정하여 빠른 시간 내에 분무를 측정하고, 전체 단면을 재구성할 수 있도록 하였다.

## 2. 광학 패터네이터의 측정 원리

### 2.1 기본 측정 원리

액적에 의한 약한 흡수가 산란과 함께 일어나는 경우, 일반적인 분무에서 만들어지는 액적 분포에 대해 Mie 산란강도가 지름의 제곱에 비례하는 관계로 근사할 수 있다<sup>(5)</sup>. 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 이론적

으로 계산되거나 실험적으로 구할 수 있는 비례 상수이다.

형광 신호의 강도는 약한 흡수가 일어날 경우 형광 분자의 농도에 비례한다. 따라서 형광 염료가 시험 유체 내에 균일하게 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 강도는 입사광의 강도와 측정 체적을 지나는 총 질량  $\delta m$ 에 비례하는 값을 나타내게 된다.

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

$$\dot{m}''(x,y) = \frac{G_f(x,y)\dot{m}_{nozzle}}{S(z)A} [kg/m^2s] \quad (3)$$

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

액적의 크기 분포는 체적에 관련된 형광 신호와, 표 면적에 비례하는 Mie 산란 이미지를 이용하여 구할 수 있다. 앞에서 보여주었던 식 (2)를 식 (1)로 나누어 비를 구하면,

$$\frac{G_f(x,y)}{G_s(x,y)} = \frac{c_f}{c_s} \left[ \frac{\sum N_i(x,y)d_i^3(x,y)}{\sum N_i(x,y)d_i^2(x,y)} \right] \quad (4)$$

와 같으며 SMD의 정의로부터 위의 식은 다음과 같이 나타내어질 수 있다<sup>(11)</sup>.

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

여기서  $D_{32}(x,y)$ 는 좌표  $(x,y)$ 에서의 SMD이고,  $K$  ( $=c_f/c_s$ )는 보정 상수이다. 형광 신호와 산란 신호의 비율을 통해서 상대적인 SMD 분포를 구할 수 있으며 적절한 보정 상수  $K$ 를 구한다면 평면에 대한 정량적인 SMD 분포를 구할 수 있다.

## 2.2 분무장 내 신호 감쇠의 보정

다중 산란을 무시할 수 있는 경우, 측정면에서 발생한 신호의 초기 강도  $G_0$ 는 액적들이 존재하는 분무장을 거리  $L$  만큼 통과하는 동안 산란, 흡수에 의해서 지수적으로 줄어들며 이 때의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(12)</sup>.

$$\frac{I}{I_0} = \exp \left[ - \int_L \gamma(x,y) ds \right] \quad (6)$$

Fig. 1 Geometry of the beam path passing the uniform solid-cone spray.

두 대의 카메라를 사용할 경우, 레이저 평면광이 조사되는 측정 단면 내의 한 점  $(x^*, y^*, 0)$ 으로부터 각각의 카메라까지 이르는 감쇠 경로  $L_1, L_2$ 는 Fig. 1로부터 계산할 수 있다.

이 때  $x = 0$  인 경우 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<sup>(13)</sup>.

$$L_1 + L_2 = \sqrt{1 + \tan^2 \beta} \left( \frac{2z_0 \tan \theta}{1 - \tan \beta \tan \theta} \right) = \text{constant} \quad (7)$$

$x \neq 0$  인 위치에서는 Fig. 1에서와 같이 단면의 경계가 쌍곡선으로 나타나면서  $x = x^*$ 인 모든 점에서 감쇠 거리의 합이 같지는 않게 된다.

한편 감쇠 계수  $\gamma$ 는 단위 체적 당 액적의 수, 흡수 및 산란 단면의 함수로 주어진다<sup>(12)</sup>. 따라서 신호의 감쇠량은 액적 수밀도, 크기 분포, 형광 혹은 산란 신

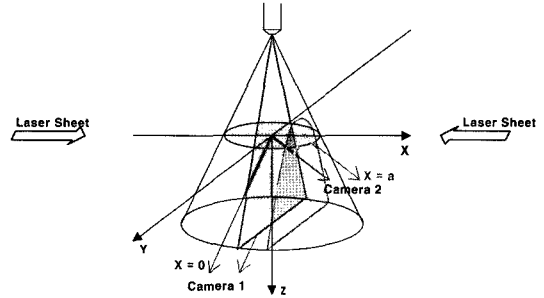


Fig. 1. Geometry of the beam path passing the uniform solid-cone spray.

호의 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 측정된 두 신호 강도의 기하 평균을 취하면 감쇠 거리가 항상 일정한 상수 값을 나타내므로 감쇠 이전의 강도에 비례하는 측정값을 얻어낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} \sqrt{G_1 G_2} &= G_0 \exp \left[ - \frac{\gamma}{2} (L_1 + L_2) \right] \\ &= \varphi G_0 \quad (\varphi: \text{constant}) \end{aligned} \quad (8)$$

## 3. Solid-cone 분무에서의 신호 감쇠 보정

### 3.1 실험 장치

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 이루어져 있다.

본 실험에서는 solid-cone 형상의 연료 분사 장치를 사용하여, 단면 방향으로 균일한 유량분포를 얻었다. 분무는 상온, 대기압 하에서 분사하였으며 분무 압력,  $\Delta P$ 가 0.5MPa 일 때, 유량은 10 g/sec로 공급된다. 시험 유체로는 물과 메탄올을 4:1로 혼합한 용액에 레이저에 의한 형광이 일어나도록 fluorescein(Aldrich F245-6,  $C_{20}H_{12}O_5$ )을 30 mg/l의 비율로 용해시켰다.

광원으로는  $Ar^+$  레이저 (Spectra-Physics Model 2020, 3W)를 사용했으며, fiber optics(Dantec)를 이용하여 평면광으로 만들어 분무 방향에 수직이 되도록 조사하였다. 신호의 검출을 위해서는 디지털 카메

라(Canon EOS D30, 2160 × 1440, 12-bit)를 이용하였고, 형광과 Mie 산란의 이미지를 얻어 연료의 질량 분포와 SMD 분포를 구하였다. 또한 이 두 신호를 적절히 분리해내기 위해서 형광 신호에 대해서는 550 nm high-pass 필터를, Mie 산란 신호는 레이저 파장에 해당하는  $515 \pm 5$  nm의 band-pass 필터를 각각 사용하였다.

질량 분포를 구하는 과정에서는 입사광의 강도 분포가 중요한 영향을 미친다. 평면광의 비균일한 강도 분포를 고려하기 위해서 quartz cell에 시험 유체를 담아 발생하는 신호의 분포를 측정하여 질량 분포 해석 시 고려하였다. 분무 단면에서 입사광의 감쇠에 따른 영향을 배제하기 위해서 서로 반대 방향(+X, -X)으로 두 번 순차적으로 조사하고, 이 때 얻은 각각의 이미지를 기하 평균하는 방식을 사용하였다<sup>(7)</sup>. 두 대의 카메라는 Y 축을 따라 레이저 진행방향에 수직이고, 분사 축에 대칭이 되도록 장치를 구성하였다. 실험에 사용된 분무는 유동장과 분무 특성의 변화가 시간에 따라 크지 않으므로 레이저 조사 방향과 신호 측정 위치를 차례대로 바꾸어 가면서 측정하는 것이 가능하였다.

### 3.2 분무장 내 액적에 의한 신호 감쇠의 영향

Fig. 2는 노즐 중심으로부터 25 mm 떨어진 하류에서 Y 축을 따라 측정 지점과 카메라 사이의 거리에 따른 질량 분포를 나타낸 그림이다. 분무 노즐 출구에 가까운 위치이므로 신호의 감쇠가 많이 일어나고 있으며 두 카메라의 위치에 측정값이 영향을 받고 있음을 보여주고 있다. 식 (8)을 이용하여 두 신호의 기하평균을 취했을 경우 측정에 사용한 분무가 완전히

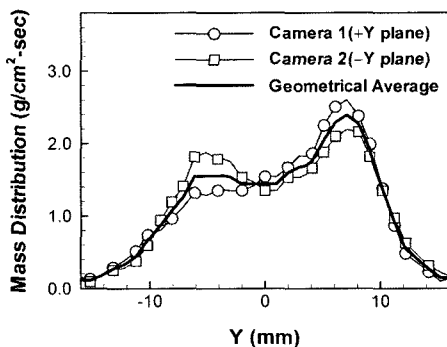


Fig. 2. Fuel mass distribution from optical patterner at 25 mm downstream from the nozzle tip.

균일한 유량분포를 이루지는 않으며, +Y 방향으로 유량이 약간 편중되어 있다는 것을 확인할 수 있다.

분사 축 방향으로 분무의 각 위치에서 각 신호의 투과율을 구하면, Fig. 3과 같이  $\gamma(z) = 6.25 \times 10^{-3} / z^2$ 의 실험식을 얻을 수 있다. 이 때 분사 축에 수직인 단면에서 감쇠계수의 변화는 무시하였다. 그리고 이를 이용하여 카메라에 도달하는 동안의 경로에 따라 적분하여 신호의 감쇠율을 계산하였다. 그 결과 Fig. 4와 같이 한 대의 카메라를 이용하는 방식과 두 대의 카메라에서 측정된 신호를 기하 평균하는 방식이 큰 차이를 보여주는 것을 확인할 수 있었다.

한 대의 카메라만으로 측정하는 경우에는 가장 멀리 떨어진 지점의 경우 15%이상의 오차를 보이고 있다. 하지만, 두 대의 카메라로 기하 평균을 취하게 되면 전체적으로 신호는 원래 강도에 비해 7~13% 정도 줄어들고, 평균 강도를 기준으로 하여  $\pm 3\%$  이내의 오차를 보여주고 있다.

Fig. 5는 광학 패턴네이터로부터 계산한 질량분포를 PDPA의 측정값과 비교한 결과이다. 노즐 중심에서 25 mm 떨어진 위치에서 중앙부에서 질량 분포가 거의 일정하다는 것을 PDPA 결과로부터 파악할 수 있으며, 광학 패턴네이터 역시 유사한 경향성을 보여주고 있다. 다만, 분무 가장자리에서 PDPA의 결과가 다소 높은 값을 나타내고 있다.

### 3.3 신호의 파장에 따른 감쇠의 영향

형광 신호와 산란 신호의 비를 취하여 액적 평균 크기인 SMD를 구하는 경우, 식 (9)에서 보듯이, 형광과 산란 영역에서 같은 감쇠 계수를 가진다면 카메라의 위치와 감쇠 경로의 차이에 따른 오차가 발생하지

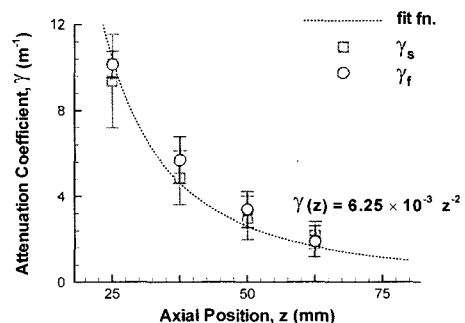
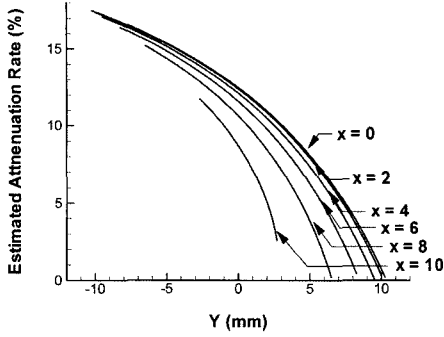
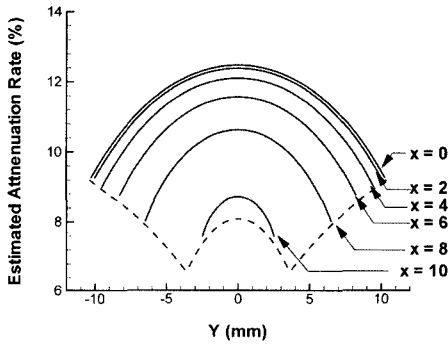


Fig. 3. Axial variation of the mean value of the attenuation coefficient of LIF ( $\gamma_f$ ) and Mie-scattering ( $\gamma_s$ ) signals.



(a) single image detection



(b) geometrical average method using two camera

Fig. 4. the measurement error due to the signal attenuation at Z=25 mm.

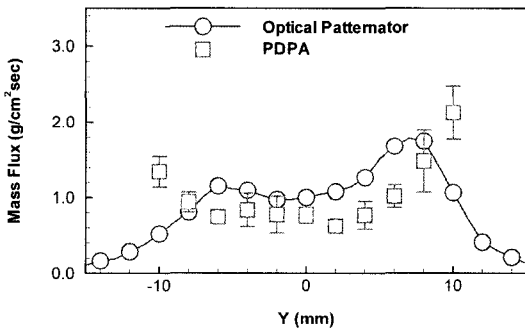


Fig. 5. Comparison of the local mass flux of the optical patternator with PDPA at Z=25 mm.

않는다<sup>(14)</sup>. 하지만, 감쇠 계수는 선택하는 신호의 파장 범위에 따라 Fig. 6과 같이 차이를 보일 수 있다. 이 경우에도 질량 분포를 구하는 경우와 같이, 두 대의 카메라를 이용하여 기하평균을 취하여 원래 SMD에 비례하는 값을 얻어낼 수 있다.

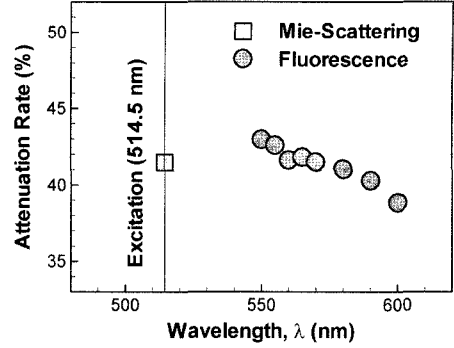


Fig. 6. Attenuation of the Mie-scattering and fluorescence signals through the solid cone spray

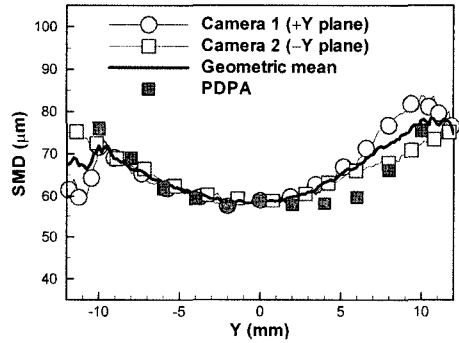


Fig. 7. Size distribution of solid cone spray measured by the optical patternator compared to PDPA at 25 mm downstream from the nozzle tip.

$$\frac{G_f}{G_s} = KD_{32} \exp[-(\gamma_f - \gamma_s)L(y)] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \left[ \frac{G_f}{G_s} \right]_1 \left[ \frac{G_f}{G_s} \right]_2 &= K^2 D_{32}^2 \exp[-(\gamma_f - \gamma_s)(L_1 + L_2)] \\ &= K^2 D_{32}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

측정 결과는 분무 중심 값에서 PDPA 값과 일치하도록 K 값을 정하여 단면 전체의 정량적인 SMD를 구하였으며, PDPA와 일치하는 결과를 보여주고 있다.

#### 4. 고압 환경에서 동축 스윙 분무 특성 파악

##### 4.1 레이저 빔을 이용한 측정 방법

Beer's 법칙에서 감쇠계수,  $\gamma$ 는 입사광의 파장이나 광학 장비의 위치, 광선이 통과하는 매질의 특성 등

에 영향을 받는다. 입사광의 파장보다 큰 구형 액적에 대해서 감쇠계수는 액적 지름,  $D$ 의 제곱, 즉 액적의 단면적에 비례하는 것으로 근사할 수 있다<sup>(15)</sup>. 그리고 분무와 같이 많은 수의 액적이 존재하고 다중 산란을 무시할 수 있는 경우에는 감쇠 계수가 액적의 수 밀도,  $N$ 과 액적 단면적의 함수로 나타나게 되어 감쇠 계수로부터 분무장 내에서 액적의 면적 분포(surface distribution)를 얻을 수가 있다<sup>(16)</sup>.

$$\gamma = c_{ext} \int N(D) D^2 dD \quad (11)$$

여기서  $c_{ext}$ 는 감쇠의 효율에 관련된 계수이다.

한편, 레이저 입사광이 분무를 지날 때 발생하는 산란 신호의 세기,  $G$  역시 액적의 단면적 분포에 비례한다<sup>(5,14)</sup>. 따라서 카메라 등을 이용하여 분무장 내의 산란 신호의 강도 분포를 얻을 수 있다면 감쇠 계수의 분포와 함께 액적의 단면적 분포를 얻을 수 있다.

입사광은 분무장을 통과하면서 그 강도가 줄어들게 되며, 산란 신호 역시 카메라에 도달하는 과정에서 감쇠를 겪게 된다. 분무장을 작은 격자로 쪼개고 각 격자 내에서는 감쇠 계수 값이 같다고 가정하면, 측정된 투과율과 산란 신호의 크기로부터 전체 영역의 감

쇠 계수를 계산할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{i,j} L_{i,j} = -\log(I_{n,j}/I_{0,j}) \quad (12)$$

$$(c_{ext}/c_{ext}) I_{0,j} \exp \left[ -\sum_{h=1}^{i-1} \gamma_{h,j} L_{h,j} \right] \gamma_{i,j} = G_{i,j} \quad (13)$$

식 (12), (13)에서  $L_{i,j}$ 는 조사하는 입사광의 간격 및 분무 영상을 분석하는 데 쓰이는 각 화소의 개수 및 크기 등 격자를 생성하는 조건에 따라 결정되는 값이다.  $I_{n,j}/I_{0,j}$ 는 입사광이 격자의  $j$ 번째 줄을 지나는 경우의 투과율로서 분무가 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우의 입사광의 강도를 광 다이오드 등으로 측정하여 구할 수 있다.  $G_{i,j}$ 는 분무의 Mie 산란 이미지로부터 얻을 수 있는 신호의 강도 분포이다.

카메라에 가장 가까운 첫 번째 줄( $j=1$ )에서는 입사광의 감쇠만이 문제가 되며 카메라까지 도달하는 동안 신호 감쇠의 영향은 없는 것으로 가정할 수 있다. 하지만, 두 번째 줄부터는 카메라에 기록된 산란 신호,  $G$ 는 신호 감쇠의 영향을 받은 값이므로 이전 과정에서 구해진 첫 번째 줄에서의 감쇠계수 값을 이용하여 다음과 같이 신호 감쇠를 우선적으로 보정해주는 작업이 추가적으로 필요하다.

$$G_{i,j} = \tilde{G}_{i,j} \left[ \sum_{k=1}^{j-1} \gamma_{i,k} L_{i,k} \right] \quad (j \geq 2) \quad (14)$$

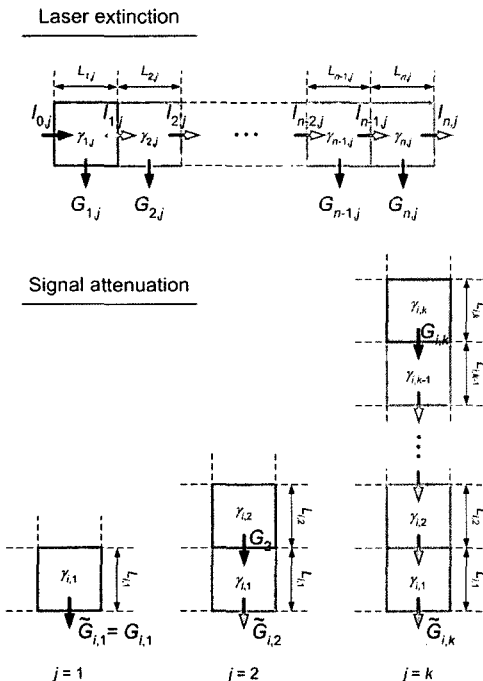


Fig. 8. Algebraic Reconstruction Technique (ART).

카메라에 가까운 줄부터 한 줄씩 이러한 과정을 반복해 나가면 전체 측정 영역에 대해서 감쇠 계수를 구

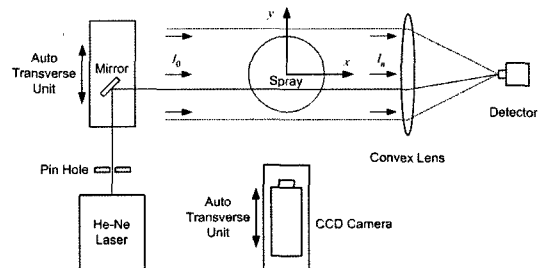


Fig. 9. Experimental setup at atmospheric pressure condition.

할 수 있다. 그리고 이러한 감쇠 계수 값으로부터 분무장 내에 존재하는 액적들의 면적 분포를 얻거나 원래 신호를 복원해내는 작업이 가능하다.

#### 4.2 실험 장치

광학 선형 패턴레이더는 레이저 광선을 측정평면으로 보내는 광학 전달부, 측정평면을 통과하면서 발생하는 신호를 기록하는 측정부, 측정값으로부터 원래 신호를 분석해내는 신호처리부 등 3부분으로 구성되어 있다. 우선 앞서 언급한 대로, 평면광 대신 레이저 광선을 이용하였으며, CCD 카메라(KODAK ES1.0 1008×1008)와 평면거울을 자동 이송 장치로 y축 방향으로 이동시켜, x축에 평행한 광선들이 분무를 훑고 지나가게 하였고, 그와 동시에 분무장에서 나오는 신호를 기록하였다.

상압의 경우, 레이저 광선이  $y=10$  mm에서 10 mm까지  $\Delta y=2$  mm의 간격을 두고 분무를 지나도록 조사하고, 이 때 발생하는 산란 신호를 카메라를 이용하여 측정하였다. 카메라는 측정평면 내에 나란하게 위치하며 입사광의 경로와 수직이 되도록 하였다. 이러한 배치는 입사광에 의해 발생한 산란 신호가 카메라까지 도달하는 동안 측정 평면만을 지나도록 하여 감쇠가 측정 평면 내에서만 이루어질 수 있도록 하기 위함이다. 이렇게 측정된 투과율과 신호는 컴퓨터를 이용하여 처리하게 된다. 이 과정에서 감쇠에 대한 정보를 추출해내고 이를 통해 원래의 신호/영상을 복원해내는 작업이 수행되었다.

고압 챔버에서의 측정은 Fig. 10과 같이 평면거울을 자동 이송 장치로 이동시켜, 평행한 레이저 광선들이 분무를 훑고 지나가도록 하였다. 약 8 cm 정도의 분무를 1.3 mm 씩 60개의 구역으로 나누어 측정하였다.

또한 구형렌즈의 초점거리에 광검출기를 두고, 분무를 지난 레이저 광선이 검출기의 중심에 맞도록 하였다. 레이저 광선이 분무를 지나면서 발생하는 산란 신호는 평면거울을 옮기는 자동 이송장치와 동기화되어 움직이는 카메라를 이용하여 측정하였다. 이 때 카메라는 상압에서의 실험과 같이 측정평면 내에 나란하게 위치하여 레이저 입사광의 경로와 수직이 되도록 하였다. 입사광의 감도는 광검출기를 통해 측정하여 National Instruments 사의 DAQ 보드를 통해 컴퓨터에 실시간으로 기록하였고, 산란 신호는 레이

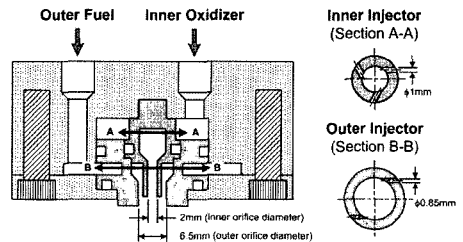
저 광선이 지나가는 위치에 따라 CCD 카메라로 60장의 이미지를 촬영, 이를 평균하여 사용하였다.

실험에는 동축형 스윙 인젝터를 사용하였으며, 모의 추진제로 물을 사용하였다. 챔버 내의 압력 조건을 변화시켜가면서 인젝터 끝면에서 30 mm 떨어진 곳의 분무 단면을 측정하였다. 이 때 분사 압력  $\Delta P$ 는 항상 0.6MPa이 되도록 조정하였으며, 유량은 산화제 부분에서는 25.6 g/s, 연료부에서는 10.76 g/s이었다. 각각의 압력 조건에서 산화제만 나오는 상태와 연료와 산화제 둘 다 나오는 상태를 측정하여 비교하였다.

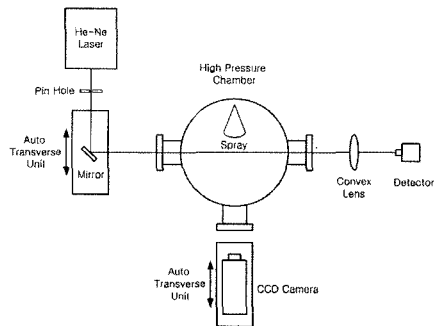
#### 4.3 상압에서의 solid-cone 측정 결과 비교

고압 환경 하에서의 측정에 앞서, 이 기법의 신뢰도를 알아보기 위해 상압 조건에서 solid-cone 형상의 분무를 측정해 보았다.

Fig. 11은 얻어진 Mie 산란 신호에서 입사광과 신호의 감쇠 영향을 보정한 결과이다. 보정하기 전과 비교하여볼 때, 신호 강도 면에서 분무 내 액적에 의해 20% 이상 감쇠된 산란 신호를 보정해 낼 수 있었으며, 이번 시험에 사용된 분무가 비대칭적인 U자 형을

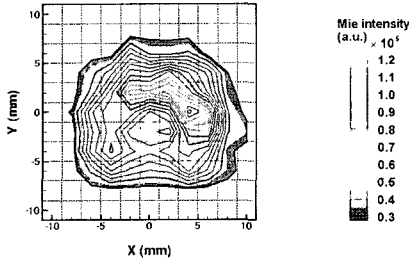


(a) Swirl-coaxial injector design

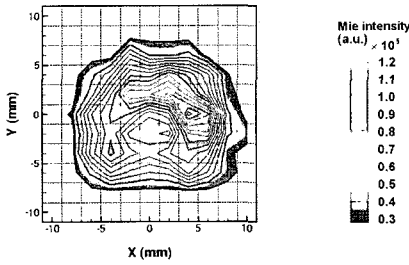


(b) Schematics

Fig. 10. Feature of swirl coaxial injector and schematics of experimental setup with high pressure chamber.



(a) Uncorrected signal distribution



(b) Attenuation corrected signal distribution

Fig. 11. Correction of MIE scattering image.

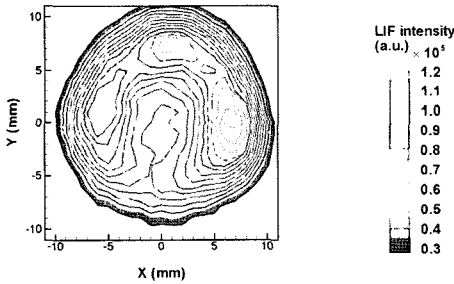


Fig. 12. Planar distribution of LIF signal obtained by the optical patterator.

이루고 있음을 알 수 있었다.

광학 선형 패터네이터 기법의 정확성을 검증하기 위하여 기존 광학 패터네이터를 이용하여 측정된 Laser 유도 형광(LIF) 신호의 결과와 Mie 산란 신호의 결과를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다.

레이저 입사광의 감쇠를 보정하기 위해서 양쪽 방향에서 순차적으로 레이저를 조사하여 얻은 이미지를 이용하였고, 신호 감쇠를 보정하기 위해서 두 대의 카메라에서 영상을 촬영하여 기하 평균하는 방식을 사용하였다<sup>(13)</sup>.

각각의 결과를 비교하기 위하여 분무의 균일도를 나타내는 패터네이션 지수, P.I. (Patternation Index)

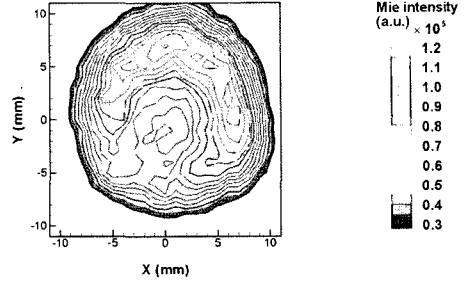


Fig. 13. Planar distribution of Mie-scattering signal obtained by the optical patterator.

와 S.U.I.(Spray Uniformity Index)를 구해보았다.

$$P.I.(%) = \sum_{i,j} \left| \frac{1}{N_g} - \frac{G(i,j)}{\sum_{i,j} G(i,j)} \right| \times 100 \quad (15)$$

$$S.U.I = \frac{\sqrt{\sum_{i,j} (y(i,j) - \bar{y})^2}}{N_g}$$

$$\text{where } y = \frac{G(i,j)}{\sum_{i,j} G(i,j)/N} \quad (16)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i,j} y(i,j)}{N_g}$$

Table 1에서 보는 바와 같이 광학 선형 패터네이터를 이용한 P.I.와 Mie산란 영상, LIF 영상에서 구한 P.I.는 ±5% 이내의 차이만을 보여주며 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다. 반면, S.U.I.의 경우에는 광학 선형 패터네이터에서 약간 큰 값을 나타내는 차이를 보여주고 있다. 이러한 차이는 광학 패터네이터가 0.2 mm × 0.2 mm의 영역을 촬영한 화소의 데이터를 기준으로 결과를 보여주는 반면, 광학 선형 패터네이터는 2 mm × 2 mm의 격자를 통해서 표현하고 있어 분무 가장 자리의 미세한 변화를 완전하게 반영하지 못하였기 때문이다. 이러한 문제는 레이저 광선을 조밀

Table 1. Comparison of the patteration index between the optical line patterator and the optical patterator

	Optical Line Patterator	Optical Patterator	
		Mie	LIF
P.I.(%)	52.64	50.21	48.02
S.U.I	0.6477	0.5593	0.5456



하게 이동하면서 신호를 잡아내어 광학 선형 패턴에이터의 측정 분해능을 높이는 방향으로 해결할 수 있을 것이다.

#### 4.4 고압환경에서 동축 스윌 분무 특성

Fig. 14는 산화제만 작동시킨 단일 스윌 인젝터에서 Mie 산란 신호를 이용한 분무 패턴에이션 결과이다. 주위 압력이 높아질수록 분무의 형상이 중심 부분이 비어있는 hollow cone에서 중심부까지 고루 분포하는 solid cone형상으로 변화하는 것을 뚜렷이 관찰할 수 있었다. 주위 압력이 0.1MPa과 0.5MPa 일 때, Mie 산란 신호가 강하게 나타나는 부분이 보이는데, 이는 액적의 분열이 잘 일어나지 않아서, 불균일하게 큰 액적들이 존재하는 것으로 생각된다. 주위 압력이 1.0MPa, 2.0MPa로 증가했을 경우에는 분열이 상대적으로 잘 일어남에 따라, 표면적 분포의 부분적 집중을 유발하는 큰 액적들이 사라져, 비교적 균일하게 분포하는 것으로 보인다. 하지만, 주위 압력이 4.0MPa이 되면 잘게 분열된 액적들이 좁은 지역에 모이면서 다시 부분적으로 면적 분포가 불균일하게 높아져서, 산란 신호가 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

일반적으로 동축형 인젝터에서는 스윌에 의한 분열

외에, 연료와 산화제가 분사되면서 일어나는 충돌에 의한 효과가 더해져서, 더 작은 입자로 분열되는 것으로 알려져 있다. 이를 바탕으로 산화제만을 분사한 경우와 연료와 산화제를 동시에 분사한 동축형 인젝터의 결과를 비교해 보도록 하겠다.

주위 압력이 0.1MPa, 0.5MPa과 같이 낮은 경우에는, Fig. 14에서 보듯이 산화제만 작동시킨 단일 스윌 인젝터와 동일하게, 부분적으로 불균일한 부분이 나타나는 결과를 보인다. 하지만 주위 압력이 높아짐에 따라 이런 불균일한 부분이 사라지는 현상을 보여주고 있으며, 동일 조건에서 산화제만 분사한 경우와 비교할 때, 상대적으로 균일한 표면적 분포를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 특히 4.0MPa에서의 분포를 비교해보면, 연료와 산화제를 둘 다 분사하는 경우에도 불균일한 분포가 나타나지만, 그 정도가 산화제만을 분사하는 경우보다 낮고, 전체적인 분무 영역이 보다 넓게 나오고 있다. 이는 연료가 산화제의 바깥쪽으로 분사되면서 분무가 커지게 되고 분사되는 과정에서 연료와 산화제의 혼합이 이루어지기 때문으로 볼 수 있다.

산화제만을 분사하는 단일 스윌 인젝터와 연료와 산화제를 동시에 분사하는 동축형 인젝터의 경우 모두 측정 지점에서 주위 압력이 증가함에 따라 분무각

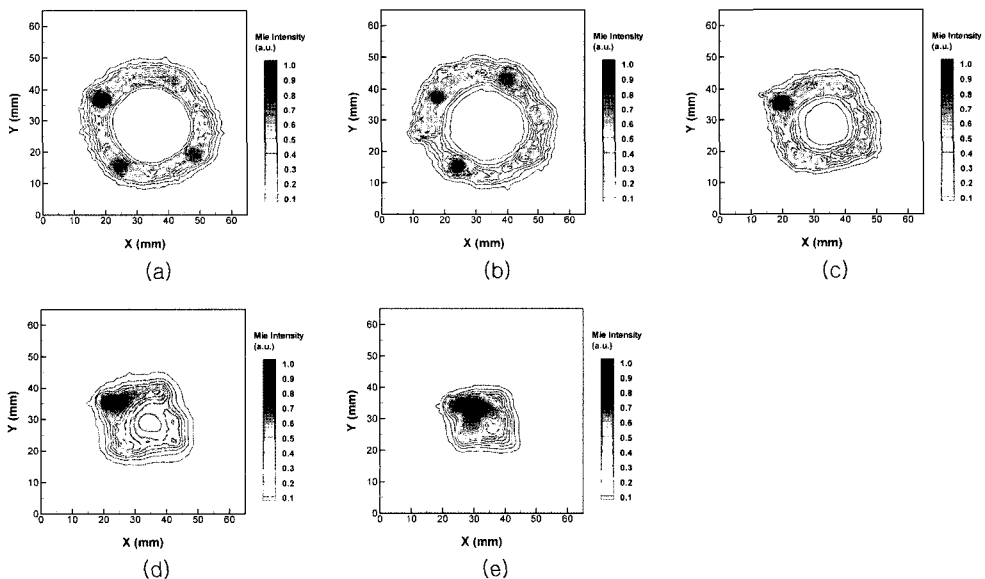


Fig. 14. Planar distribution of swirl injector in case of injecting oxidizer only ( $\Delta P=0.6\text{MPa}$ ) with chamber pressure (a)  $P_c=0.1\text{MPa}$  (b)  $P_c=0.5\text{MPa}$  (c)  $P_c=1.0\text{MPa}$  (d)  $P_c=2.0\text{MPa}$  (e)  $P_c=4.0\text{MPa}$ .

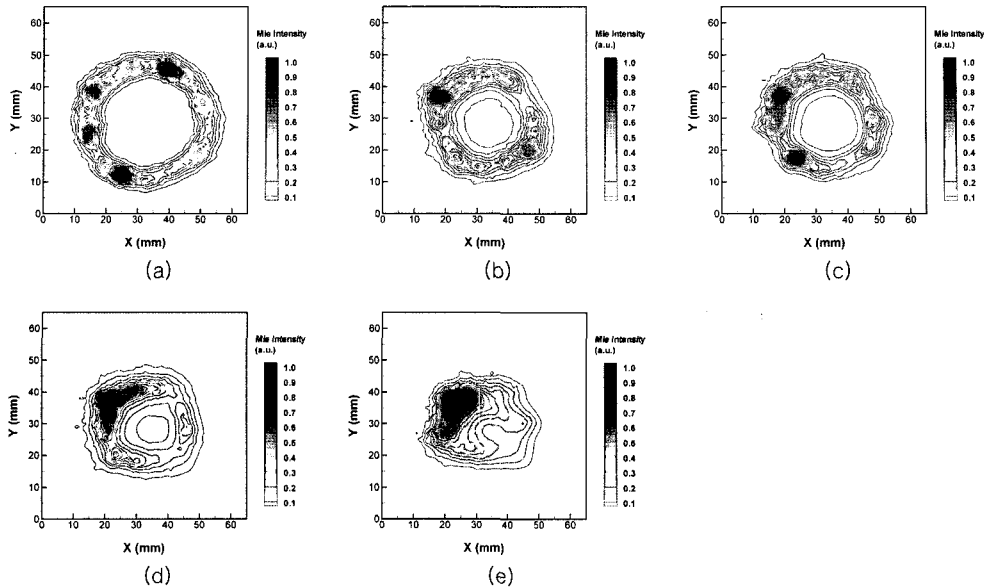


Fig. 15. Planar distribution of swirl coaxial injector in case of injecting both fuel and oxidizer ( $\Delta P=0.6\text{MPa}$ ) with chamber pressure (a)  $P_c=0.1\text{MPa}$  (b)  $P_c=0.5\text{MPa}$  (c)  $P_c=1.0\text{MPa}$  (d)  $P_c=2.0\text{MPa}$  (e)  $P_c=4.0\text{MPa}$

이 감소하는 것 또한 확인할 수 있었다. 주위 기체의 압력이 증가함에 따라 분무각이 감소하는 결과는 많은 논문들을 통해 확인할 수 있다<sup>(17),(18)</sup>. 이는 분무를 경계로 내부 중심부분과 외부와의 압력차이 때문에 발생한다. 분무의 미립화가 진행되면서 주위 기체가 분무의 외부와 중심부로 유입되게 되는데, 중심 내부 기체의 부피는 분무에 의해서 제한되게 되므로 분무를 경계로 중심부와 외부 사이에 압력차가 발생한다. 따라서 주위 압력이 증가함에 따라 분무는 중심부근에 보다 많이 분포하게 되고 분무각이 감소하는 결과를 보인다고 할 수 있다.

## 5. 결 론

광학 패턴메이터를 이용한 분무 측정 시 신호 감쇠의 영향을 보정하고 정확도를 높일 수 있는 방안으로 두 대의 카메라를 이용하여 신호를 기하 평균하는 방식을 제시하였고, PDPA 등의 기존 기법과의 비교를 통해서 정량화과정에서의 문제점을 검토하였다.

본 실험의 경우 형광 신호를 이용하여 질량분포를 측정하는 과정에서 단일 카메라를 이용하는 경우 위치에 따라 감쇠의 양이 최대 15%까지 오차를 보였다. 그러나 이러한 신호의 비대칭성의 문제는 두 대의 카

메라를 사용할 경우  $\pm 3\%$  이내의 오차로 줄이는 것이 가능하였다.

SMD를 측정하는 과정에서도 신호의 파장에 따른 감쇠 계수의 차이로 인해 신호의 감쇠가 영향을 줄 수 있다. 이와 같이 두 신호에 대한 감쇠 계수가 파장의 영향을 많이 받는 경우에도 두 대의 카메라를 이용한 감쇠 보정 방식이 유효한 결과를 제공해 줄 수 있었다.

액적의 수밀도가 매우 높은 고압 계측 과정의 경우 다중 산란의 문제를 최소화하기 위해 레이저 광선의 투과율과 분무에서 발생하는 산란 신호를 이용하는 광학 선형 패턴메이터 기법을 적용하였다. 대기압 조건에서 일반적인 solid cone 형상의 분무에 이 기법을 적용하여 감쇠 현상을 보정한 결과 기존의 광학 패턴메이터와 5% 이내로 유사한 결과를 획득할 수 있었다.

주위 압력을 변화시켜 가면서, 산화제만을 분사하는 단일 스윙 인젝터와 연료와 산화제를 동시에 분사하는 동축형 인젝터에 대하여 분무 특성을 측정된 결과, 분무의 형상이 hollow cone에서 solid cone으로 변해 감을 알 수 있었으며, 분무각이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 광학 선형 패턴메이터 기법은 다중 산란이 문제가 되어 광학 패턴메이터를 사용할 수

없는, 액체 로켓 엔진 내부의 고압 분무 등에서 정밀한 데이터를 얻을 수 있는 유용한 레이저 계측 기법이 될 수 있을 것으로 전망한다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(M1-0104-00-0058)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Lefebvre, A. H., 1989, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- 2) Tate, R. W., 1960, "Spray Patternation," *Ind. Eng. Chem.*, Vol.52(10), pp. 49A-53A.
- 3) McVey, J. B., Russell, S. and Kennedy, J. B., 1987, "High Resolution Patternator for the Characterization of Fuel Sprays," *J. Prop. Power*, Vol.3(3), pp. 202-209.
- 4) McDonell, V. G. and Samuelsen, G. S., 1997, "Assessment of Liquid Fuel Distribution in Sprays Using Planar Imaging Methods," ASPACC '97.
- 5) Sankar, S. V., Maher, K. E., Robart, D. M. and Bachalo, W. D., 1999, "Rapid Characterization of Fuel Atomizers Using an Optical Patternator," *J. Eng. Gas Turb. Power*, Vol.121, pp. 409-414.
- 6) Su, J., Drake, M. C., Fansler, T. D. and Harrington, D.L., 1998, "Towards Quantitative Characterization of Transient Fuel Sprays Using Planara Laser Induced Fluorescence Imaging," *ILASS-Americas '98*.
- 7) 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*.
- 8) Sick, V. and Stojkovic, B., 2001, "Attenuation Effects on Imaging Diagnostics of Hollow-Cone Sprays," *Appl. Opt.*, Vol.40(15), pp. 24355-2442.
- 9) Brown, C., McDonell, V. and Talley, D., 2002, "Accounting for laser extinction, signal attenuation, and secondary emission while performing optical patternation in a single plane," *ILASS-America 2002*.
- 10) Jermy, M. C. and Allen, A., 2002, "Simulating the Effects of Multiple Scattering on Images of Dense Sprays and Particle Fields," *Appl. Opt.*, Vol.41(20), pp. 4188-4196.
- 11) Le Gal, P., Farrugia, N. and Greenhalgh, D. A., 1999, "Laser Sheet Dropsizing of Dense Sprays," *Opt. Laser Technol.*, Vol.31(1), pp. 75-83.
- 12) Bohren, C.F. and Huffman, D.R., 1983, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley Interscience, New York.
- 13) Koh, H., Jeon, J., Kim, D., Yoon, Y. and Koo, J.-Y., 2003, "Analysis of Signal Attenuation for Quantification of Planar Imaging Technique," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 14(10), pp. 1829-1838.
- 14) Yeh, C.-N., Kosaka, H. and Kamimoto, T., 1996, "Measurement of Drop Sizes in Unsteady Dense Sprays," *Recent Advances in Spray Combustion: Spray Atomization and Drop Burning Phenomena*, Vol. I, Chap. 12, Ed. Kuo, K.K., *Progress in Astronautics and Aeronautics*, pp. 297-308.
- 15) Lim, J. and Sivathanu, Y., 2002, "Optical patternation of a water spray using statistical extinction tomography," 2002 NSF Design, Service and Manufacturing Grantees and Research Conference.
- 16) Wang, G., Deljouravesh, R., Sellens, R., Olesen, M. and Bardon, M., 1997, "An Optical Spray Pattern Analyzer," *ILASS-Americas '97*.
- 17) De Corso, S.M. and Kemeny, G.A., 1957, "Effect of Ambient and Fuel Pressure on Nozzle Spray Angle," *ASME Transactions*, Vol.79(3), pp. 607-615.
- 18) Wang, X.F. and Lefebvre, A.H., 1993, "Influence of Ambient Air Pressure on Pressure-swirl Atomization," *Atomisation Spray Technol.*, Vol.3, pp. 209-226.