

Like-Douplet 인젝터의 분무 질량분포 측정을 위한 PLLIF 기법의 신뢰성 평가

정기훈* · 고현석* · 윤영빈†

Assessment of PLLIF Measurement for Spray Mass Distribution of Like-Douplet Injector

Kihoon Jung · Hyeonseok Koh and Youngbin Yoon

Abstract. A PLLIF (Planar Liquid Laser Induced Fluorescence) technique has been known to be a useful tool for the measurement of the spray patterns for various spray injectors because it can obtain two-dimensional images with high spatial resolutions without any intrusion on the spray field. In case of dense spray, however, the secondary emission as well as the extinction of an incident laser beam or a fluorescence signal can cause errors in quantifying a mass distribution. Unfortunately, a like-douplet injector which has a dense spray zone at the center may not be a good example or the application of the PLLIF technique. Therefore, we took PLLIF data for the like-douplet injector with a 12 bit color CCD camera by varying laser power, and then assessed their accuracy by comparing with the data obtained with a mechanical patternator and a PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer). The experimental results showed that the gray level of fluorescence signal increases nonlinearly due to a secondary emission at the dense spray zone but this nonlinearity can be avoided by reducing the incident laser beam power. In addition, the mass flux distribution of the spray could be obtained by using the mass concentration data from PLLIF technique and the velocity profiles of liquid drops, and this distribution showed good agreement with that of mechanical patternator. Therefore, it is possible that the PLLIF technique can be successfully applied to finding the mass distributions of like-douplet injectors.

Key Words : like-douplet injector(like-douplet 인젝터), spray visualization(분무 가시화), mass flux distribution(질량플럭스 분포), PLLIF(평면 액체 레이저 유도형광), secondary emission(이차방출)

1. 서 론

동일한 두 액체 제트의 충돌 모멘텀을 이용하여 액체 추진제를 미립화시키는 like-douplet 인젝터는 구조가 간단하여 제작이 용이하면서도 고유량의 추진제를 효과적으로 분사할 수 있기 때문에 액체 로켓엔진에 많이 이용되어 왔다.⁽¹⁾

Taylor⁽²⁾는 두 액체 제트의 충돌시 형성되는 액막의 형상과 두께 등을 이론적으로 계산하여 실험결과와 일치한다는 사실을 밝힌 바 있다. 그러나 이는 분사

속도가 낮을 때에만 성립하며, 속도가 높을 때에는 Dombrowski와 Hooper⁽³⁾에 의해, 제트의 충돌시 액막 내부에 형성되는 충돌파의 성장과 분열이 분무의 미립화 메커니즘을 지배한다는 사실이 밝혀졌다. 이와 같이 like-douplet 인젝터의 분무는 평면 액막의 분열로 형성되기 때문에 분무단면은 이심률이 매우 큰 타원형 분포를 갖는다. 일반적으로 이러한 분무 분포가 연소 성능뿐만 아니라 연소 안정성에 관련되어 있어 매우 중요하다는 사실이 알려져 있지만⁽⁴⁾, like-douplet 인젝터의 질량분포에 대한 연구는 부족한 실정이다.

분무 질량분포 측정기법으로 기계적인 분류장치(mechanical patternator)를 주로 사용하여왔다.^(5,6,7) 이는 일정 시간동안 단위셀에 포집된 분무량으로부터 질량플

*서울대학교 기계항공공학부 로켓추진실실험실

†서울대학교 기계항공공학부

E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

렉스를 직접 측정하는 방식인데, 공간 분해능이 낮고 분무장을 교란시킨다는 단점을 가지고 있다. 비접촉 방식으로, PDPA⁽⁸⁾ (Phase Doppler Particle Analyzer, 위상도플러 입자 분석기)는 입자의 크기와 속도를 동시에 측정하여 질량플렉스를 측정하는데, 밀도가 높은 분무장에는 구형이 아닌 액적이 많고 입자의 중첩이 활발하여 오차가 높아진다는 단점을 보인다.⁽⁹⁾

최근에는 액적의 형상과 중첩에 관계없이 고해상도의 2차원 분무 분포를 측정할 수 있는 PLLIF(Planar Liquid Laser Induced Fluorescence, 평면 액체 레이저 유도형광) 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(10,11) 그러나 이 기법 또한 분무 밀도가 높을 때에는 여러 오차를 유발하는데, 입사레이저광의 강도가 액적을 통과함에 따라 감소되고 액적에서 방출되는 형광신호 강도 또한 카메라에 도달하기 이전에 분무장에 의해 감소된다. 한편, 액적에서 방출된 신호가 강하여 측정 대상이 아닌 위치에서 방출된 형광신호가 기록되는 이차방출 현상도 오차의 요인이 된다.⁽¹¹⁾

Like-doublet 인젝터의 분무는 분무평면 중앙의 국소 영역에 대부분의 분무 질량이 집중되므로 위의 오차가 예상된다. 따라서 본 실험에서는 PLLIF기법을 이용하여 이 분무의 질량분포를 측정하여 예상되는 오차 요인들의 영향을 분석하였다. 또한, 기계적 분류장치와 PDPA로부터 측정한 질량분포와 비교하여 PLLIF 기법의 신뢰성을 검증하였다.

2. like-Douplet 인젝터의 분무특성

실험에 사용된 인젝터의 형상과 세부적인 치수를 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 오리피스 직경, 충돌거리, 충돌각 등은 실제 로켓에서 사용하는 인젝터와 유사하게 설계하였다. 그러나 오리피스 입구는 원형으로 하고 그 길이를 실제보다 길게 함으로써 최대한 안정된 유동을 형성하여 측정 데이터의 편차를 줄일 수 있도록 하였다. 원형 입구 형상의 오리피스를 사용하는 경우, 충돌형 인젝터의 분무형상에 매우 큰 교란을 주는 캐비테이션(cavitation)을 피할 수 있다는 사실이 보고된 바 있다.⁽¹²⁾

Fig. 2(a)는 이 인젝터의 분무 패턴을 스트로보스코프를 사용하여 촬영한 순간 사진을 보여주고 있는데 Fig. 2(b)에 이를 간략하게 표현하였다. 두 제트의 충돌로 형성된 액막(liquid sheet)은 충돌파(impact wave)에 의해 액주(liquid ligament)로 분열되고 이 액주는

Table 1. Like-doublet injector design parameters

| Design Parameters | Present | Practical |
|---|---------|-------------|
| orifice diameter, d_o [mm] | 1.4 | 0.8~7 |
| orifice entrance shape | round | sharp |
| orifice length/ d_o | 14.3 | 2~5 |
| pre-impingement length/ d_o | 5 | usually 5 |
| Experimental Conditions | Present | Practical |
| impingement angle (2θ) [°] | 60 | usually 60 |
| injection pressure (ΔP) [bar] | 3 | 4~30 |
| jet Weber number, We_j | 10730 | $\sim 10^5$ |

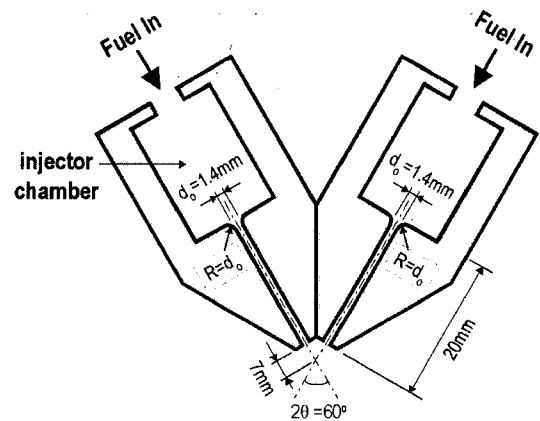


Fig. 1. Like-doublet injector schematic.

다시 액적으로 미립화된다. 이러한 액막의 분열 메커니즘으로 인해 대부분의 분무가 x - z 의 2차원 평면상에 존재하게 된다. Ibrahim과 Przekwas⁽¹³⁾에 의하면, 이 액막은 중앙($x=y=0$)에서 최대 두께를 갖으므로 중앙에서 매우 큰 액적이 형성되어 국소적인 고밀도 분무를 이루게 된다.

한편, Dombrowski와 Hooper⁽³⁾에 따르면 미립화 과정에서 에너지의 소산이 일어나지 않기 때문에 액막, 액주, 액적 모두 제트의 분사속도(V_j)와 동일한 속도를 가진다. 따라서 Fig. 2(b)에서와 같이 액주나 액적이 충돌점을 중심으로 하는 원호를 이룬다고 가정하면, 임의의 위치(x, y, z)에서 액적 속도의 z 방향 성분($V_{d,z}$)은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{d,z}(x, y, z) = V_j \cdot (z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) \quad (1)$$

3. PLLIF를 이용한 분무 질량분포 측정

3.1 PLLIF 이론

PLLIF 기법은 액적내에 균일하게 분포된 형광물질

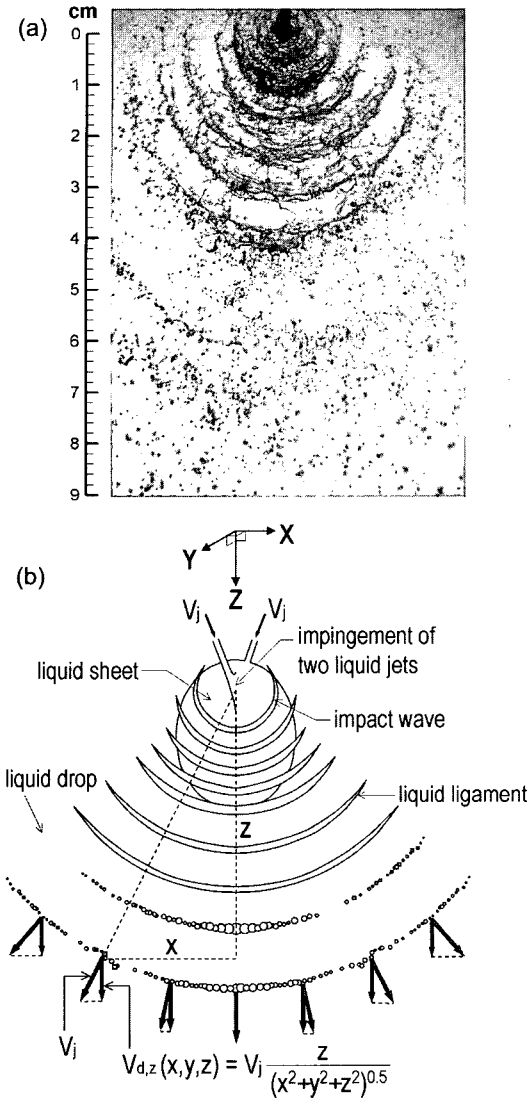


Fig. 2. Spray pattern of a like-doublet injector: (a) photograph of spray breakup using a stroboscopic light and (b) schematic and the distributions of drop velocities.

의 광흡수율이 작을 경우 그 형광신호의 크기는 액적의 부피에 비례한다는 사실에 기초하고 있다.⁽¹³⁾ 이때 카메라의 (i,j) 픽셀에 기록되는 형광신호의 크기 $G(i,j)$ 는 다음과 같이 표현된다.⁽¹¹⁾

$$G(i,j) = C I_0 \sum_k n_k d_k^3 \quad (2)$$

여기서 C 는 상수이며, I_0 는 입사되는 레이저광의 강도로서 픽셀 내에서 동일하다고 가정한다. 또한, n_k

는 액적의 크기로 구분된 집합중에서 k 번째 크기(d_k)를 갖는 집합의 수밀도를 의미하는데, 카메라의 노출 시간(Δt) 동안 측정 단위체적(δV)에 존재하는 평균 액적의 수로서, 다음과 같이 정의된다.

$$n_k = \frac{1}{\Delta t \delta V} \sum_{m=1}^{M_k} t_{m,k} \quad (3)$$

여기서 $t_{m,k}$ 는 k 번째 집합의 m 번째 액적의 통과시간을, M_k 는 k 번째 집합의 총 액적수를 의미한다.

수밀도는 시간에 대한 평균값이므로 식(2)의 신호 강도는 단위체적을 통과하는 액적의 부피가 아니라 측정시간동안 단위체적 내에 존재하는 액적의 평균부피, 즉 공간적인 액적의 농도를 의미하게 된다. 더욱이 식(2)의 상수는 PLLIF 기법만으로는 측정할 수 없기 때문에 식(2)는 액적의 상대적인 농도분포를 의미하게 된다.

3.2 PLLIF 실험장치

Fig. 3은 like-doublet 인젝터의 분무 질량분포 측정을 위한 PLLIF 실험장치를 보여주고 있다. 광원으로서는 연속레이저인 Ar-ion 레이저(LEXEL-95)를 광섬유를 이용하여 평면광으로 사용하였는데, 일반적으로 평면광의 강도는 Gaussian 분포를 이루므로 dye-cell 데이터를 이용하여 보정해 주었다. 514.5 nm의 파장에 형광을 일으키기 위하여 형광염료(Fluorescein, $C_{20}H_{12}O_5$, Aldrich Chemical Co.)를 모의연료 1리터 당 30 mg의 비율로 혼합하였다. 이 형광염료는 알코올에 용해되기 때문에 메틸알콜과 물을 부피비가 4대 1이 되도록 혼합한 용액을 모의연료로 사용하였다. 형광염료를 혼합한 모의연료는 400~530 nm의 파장을 흡수하는 것으로 알려져 있는데, 단색검출기(monochromator)를 이용하여 500~650 nm의 파장을 방출하는 것을 확인하였다. 따라서 550 nm이상의 파장만을 통과시키는 광필터를 사용하여 514.5 nm의 산란신호를 제거하고 형광신호만을 카메라에 기록하였다.

카메라는 칼라 디지털 카메라(Canon D30)를 사용하였는데, 칼라는 Red, Green, Blue모드로 12 bit 방식으로 기록하며 해상도는 2160×1440이다. 카메라의 한 픽셀이 갖는 실제 크기는 2 mm가 되도록 배율을 조절하였는데, 이는 PLLIF 기법의 일반적인 해상도보다 낮은 값이다. 식(2)에 의하면 임의의 픽셀은 모든 액적크기 범위를 충분히 포함할 정도의 크기를 가져야 하는데, 본 실험에 사용된 분무의 예상 평균 액

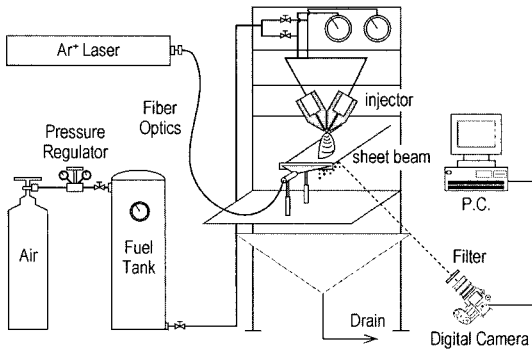


Fig. 3. Experimental setup for PLLIF measurements.

적크기는 0.23 mm이므로 이를 고려하여 2 mm로 결정한 것이다. 카메라의 노출시간은 분무의 시간평균을 고려하여 0.5초로 하였다. 한편, Fig. 3에서와 같이 분무에 대해 수직방향에서 촬영이 불가능하기 때문에 40°의 각도에서 촬영하였고 이때 발생하는 이미지의 왜곡 현상은 이미지 처리과정을 통해 보정하였다.⁽¹⁵⁾

3.3 형광 신호의 선형성 검증

형광신호는 형광입자의 광흡수율이 낮을 때에만 액적의 부피에 비례하는 강도를 보인다. 또한 액적이 렌즈의 역할을 할 수 있을 정도로 클 경우에는 액적의 특정 영역의 형광신호가 크게 나타날 수 있기 때문⁽¹¹⁾에 분무의 질량분포 측정에 앞서 같은 조건에서 형광신호가 분무 액적의 부피에 선형성을 갖는지를 검증하여야 한다.

Anderson 등⁽¹⁶⁾은 like-doublet 인젝터 분무의 평균 액적 크기에 대한 다음의 경험식을 제시하였다.

$$\frac{d_D}{d_o} = 2.217 [We_{eff}(\theta)]^{-0.354} f(\theta) = \frac{(1 - \cos\theta)^2}{\sin^3\theta} \quad (4)$$

여기서 d_D 와 d_o 는 각각 평균 액적직경과 오리피스 직경을 의미한다. 식(4)로부터 본 실험조건에서 0.23 mm의 평균직경을 갖는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(a)는 이 평균직경의 액적에 대한 형광신호의 선형성을 검증하는 실험장치를 보여주고 있다. 함수 발생기로 단일액적 발생기에서 형성되는 액적의 크기를 조절하며 분사되는 액체는 질량분포 측정실험과 동일한 농도의 형광염료를 포함한다. Fig. 4(b)는 0.185~0.233 mm 크기의 액적에 대한 형광신호의 강도를 보여주고 있다. 형광신호의 크기는 액적 직경의

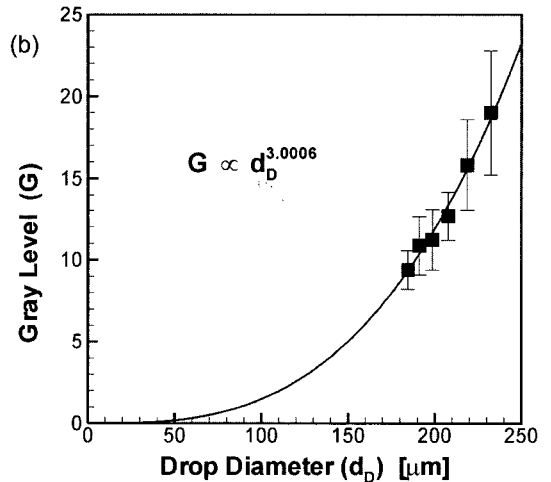
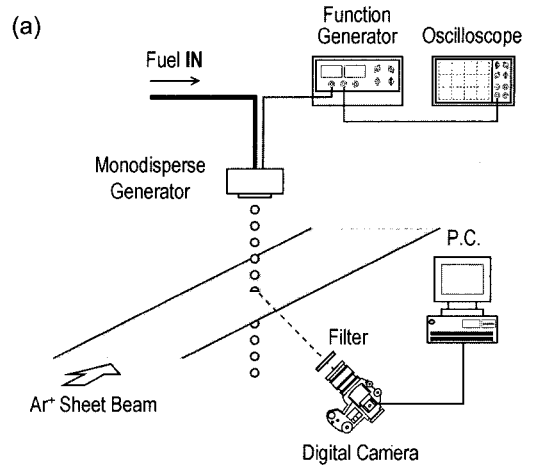


Fig. 4. Validation of linearity of fluorescence signal to the volume of drop: (a) experimental setup and (b) gray level of fluorescence signal as a function of drop diameter.

세제곱에 비례하였는데, 이로부터 이 범위의 액적 크기, 동일한 형광염료의 농도에서 식(2)가 성립한다는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 형광신호의 강도와 카메라 CCD 센서에 기록되는 신호강도의 선형성 또한 확인하여야 하는데, 형광신호의 강도는 입사하는 레이저광의 강도에 비례하므로 입사 레이저의 강도에 대해 센서에 기록되는 신호강도의 선형성을 Fig. 5(a)와 같은 방법으로 조사하였다.

Fig. 5(b)는 입사 레이저 강도에 대한 카메라의 R, G, B 채널의 신호강도 변화를 보여주고 있다(B 채널의 경우 광필터에 의해 Blue 파장이 제거되므로 신호

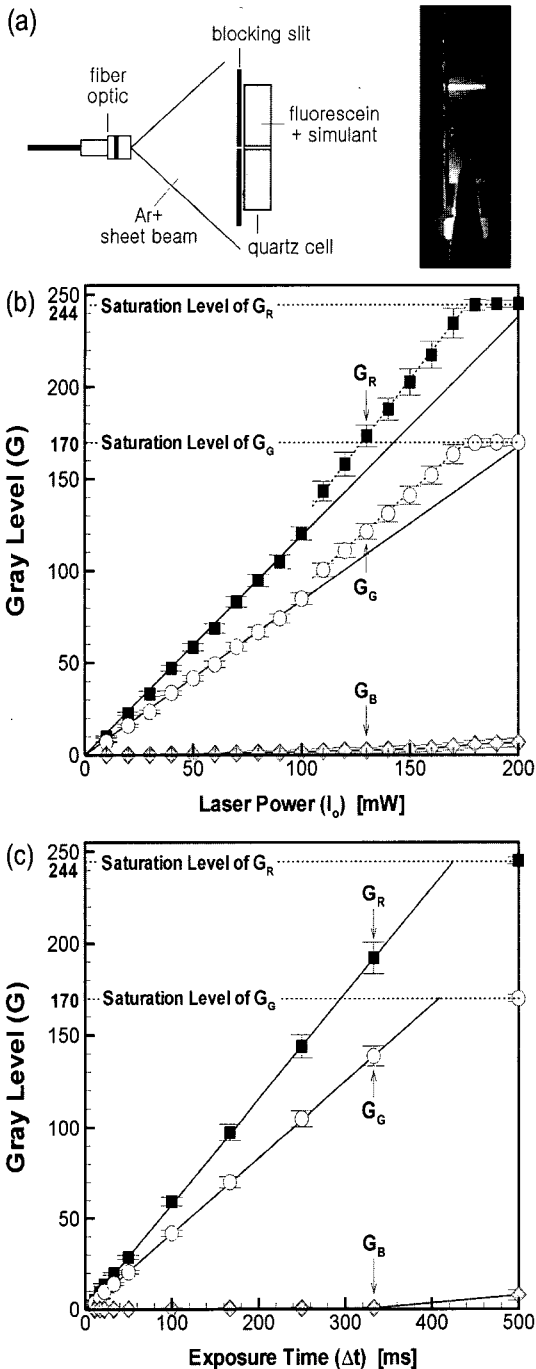


Fig. 5. Validation of the linearity of color camera sensors to the fluorescence signal: (a) schematic of experimental setup, and (b) gray levels of fluorescence signals as a function of the power of incident laser beam when the camera exposure time is 50 msec and (c) the exposure time of camera when the laser power is 30 mW.

가 거의 기록되지 않는다). 먼저 레이저 강도가 180 mW에 이르면 R, G 두 채널 모두 포화상태에 이르러 더 이상 신호가 증가하지 않는다는 결과가 흥미롭다. 이러한 신호의 포화 현상은 최대 강도 255 (12 bit의 신호를 이미지 처리과정의 편의를 위해 8 bit로 전환하였기 때문에 최대 255강도를 갖는다) 이하에서 발생하는데, G 채널의 신호는 R 채널에 비해 광필터에 의해 더 많은 광량이 제거되므로 G 채널의 포화강도(170)가 R 채널(244) 보다 더 낮다. 한편, 카메라의 노출시간에 따른 형광신호의 변화를 보여주는 Fig. 5(c)에서도 Fig. 5(b)와 같은 강도에서 신호의 포화현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이는 CCD 센서와 형광신호 스펙트럼의 관계에 의한 것으로 판단된다. 그러나 이는 입사 레이저 강도를 충분히 낮추어 포화를 방지하고 촬영된 이미지의 강도가 포화강도 이하임을 확인한다면 피할 수 있다.

한편, Fig. 5(b)의 R, G 채널의 경우, 레이저 강도가 100 mW일 때까지 신호강도가 레이저 강도에 선형적으로 증가하였으나 이보다 높은 강도에서는 선형성이 유지되지 않았다. 이는 100 mW 이상의 강도에서 형광(또는 산란) 신호가 매우 강하여 측정대상이 아닌 영역의 형광신호까지 기록되는 이차방출에 의한 효과로 판단된다. 따라서 입사레이저 강도가 30 mW로 낮은 Fig. 5(c)에서는 포화 강도에 도달하기 전까지 이와 같은 비선형 증가가 보이지 않는다. 결론적으로 실제 분무의 PLLIF 측정에 있어서 이차방출을 피할 수 있는 레이저 강도를 찾는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

4. 질량분포 측정의 정량화

4.1 입사레이저 및 형광신호 강도 감쇠

PLLIF 측정에 있어서 입사 레이저 및 형광신호는 분무를 통과하면서 그 강도가 감소되어 질량분포를 실제보다 작게 예측하는 오차가 발생할 수 있다.

Fig. 6(a)는 고정된 카메라 위치에서 레이저의 방향에 따라 예상되는 y축방향의 형광신호 분포를 보여주고 있다. 입사 레이저나 형광신호의 감쇠가 발생한다면 후방(backward)에서 입사하는 레이저에 대해서 y+축의 레이저 강도 감쇠는 y-축에 비해 작을 뿐만 아니라 카메라로부터의 거리도 가까워서 형광신호의 감쇠 또한 작을 것이다. 따라서 그림에서와 같이 y-축의 형광신호가 y+축 보다 더 크게 나타날 것이다. 반면에 전방(forward)에서 입사하는 레이저에 대해서는

레이저의 감쇠는 y 축이 작고 형광신호의 감쇠는 y^+ 축이 작기 때문에 대칭적인 신호분포를 보일 것으로 예상된다.

그러나 실험결과(Fig. 6(b))는 레이저의 입사 방향에 무관하게 모든 형광신호가 대칭적인 분무분포를 보이며 그 절대적인 크기 또한 매우 유사하게 나타났다. 따라서 본 분무장에서는 입사 레이저 및 형광신호의 강도 감쇠가 크지 않아 분무의 질량분포에 심각한 오차를 발생하지는 않는다.

4.2 형광신호의 이차방출

Fig. 7은 충돌점으로부터 5 cm와 8 cm의 위치에서 입사 레이저의 강도에 따른 x 축의 형광신호 분포를 보여주고 있다. R 채널의 포화강도가 G 채널보다 더 높기 때문에 R 채널 신호만을 이용하였고 모든 경우에 있어서 포화강도를 넘지 않는다는 것을 확인하였다.

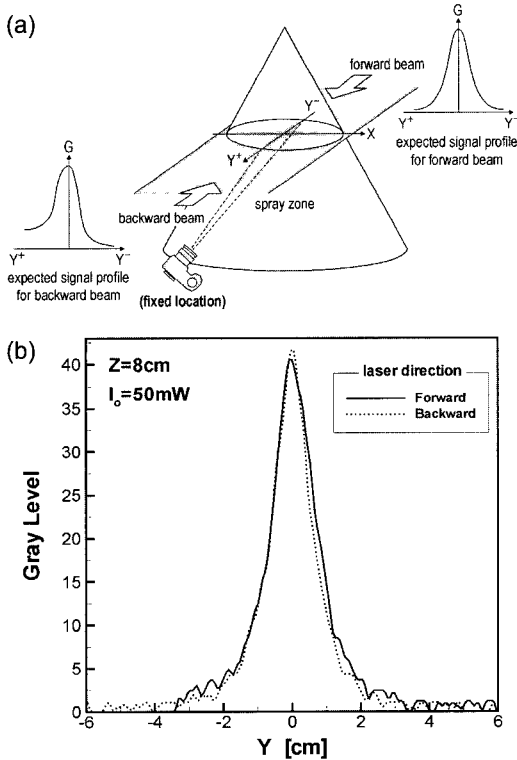


Fig. 6. Laser beam and fluorescence signal extinctions: (a) experimental setup and expected output signal profiles under the assumption that the extinctions are significant, and (b) actual gray levels of fluorescence signals for the forward and backward sheet beams.

Fig. 7(a)로부터 레이저의 강도가 90 mW 이상일 때, 분무가 집중되는 중앙부에서 형광신호의 강도가 이보다 낮은 레이저 강도에서 보다 25% 정도 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 5 cm 후방의 분무장에서 이차방출을 유발하는 최소 레이저 강도는 90 mW 전후일 것으로 예측된다. 8 cm 후방(Fig. 7(b))에서는 분무의 집중이 보다 완화되므로 110 mW의 강도에서만 이차방출로 인한 오차가 발생한다.

Fig. 7의 결과로부터, 이차방출을 피하기 위해 레이저의 입사강도를 낮추어야 함을 알 수 있다. 그러나 입사강도가 감소함에 따라 형광 신호에 대한 잡음 비가 증가하여 30 mW에서의 결과와 같이 형광신호의

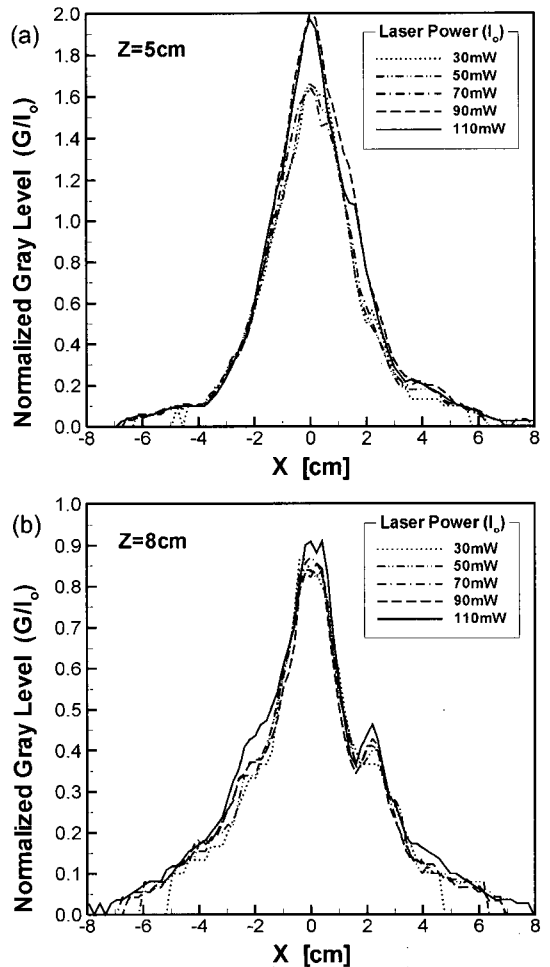


Fig. 7. Normalized gray level of fluorescence signal along the x -axis ($y=0$): (a) at 5 cm and (b) at 8 cm downstream from the impingement point of liquid jets.

크기가 작은 바깥영역에서 변동이 심하게 나타난다. 따라서 이차방출을 피하면서 높은 신호 대 잡음 비를 얻을 수 있는 입사광의 강도를 선택하는 것이 PLLIF 측정에서 있어서 매우 중요하다. 본 실험에서는 Fig. 7의 결과로부터 70 mW를 최적의 입사광 강도로 결정하였다.

4.3 질량플럭스 전환

앞에서 보인 Fig. 7은 식(2)에 기초한 분무의 상대적인 농도분포를 의미한다. PLLIF 데이터의 신뢰성을 검증하기 위하여 기계적인 분류장치의 측정결과와 비교하였는데 이 장치는 분무의 질량플럭스만을 측정할 수 있다. 따라서 PLLIF으로부터 얻은 상대적인 분무 농도를 다음과 같은 과정을 통해 절대적인 질량플럭스로 전환하였다.

먼저, 식(3)의 액적의 통과시간은 레이저광의 두께(h)를 액적의 z 방향 속도($V_{d,z}$)로 나누어 구할 수 있으므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$n_k = \frac{1}{\Delta t \delta V} \sum_{m=1}^{M_k} \frac{h}{(V_{d,z})_{m,k}} \quad (5)$$

이때, 같은 픽셀에 존재하는 액적은 모두 $V_{d,z}$ 의 속도를 갖는다고 하면, 식(5)는 다음으로 표현된다.

$$n = \frac{1}{\Delta t \delta V} \frac{h M_k}{V_{d,z}} \quad (6)$$

이제 식(6)을 식(2)에 대입하여 다음 식을 얻는다.

$$G(i,j) = \frac{C I_o}{V_{d,z}} \cdot \frac{1}{\Delta t \delta A} \sum_k M_k d_k^3 \quad (7)$$

여기서 레이저광의 두께가 한 픽셀의 크기와 비슷하므로 단위체적(δV)를 레이저광의 두께와 한 픽셀의 면적(δA)의 곱($h \delta A$)으로 표현하였다.

한편, (i,j) 픽셀에서의 질량플럭스($m''(i,j)$)는 Δt 의 노출시간동안 한 픽셀의 면적을 통과하는 액적의 총 질량으로서 다음과 같이 정의된다.

$$m''(i,j) = \frac{\rho_l}{\delta A \Delta t} \cdot \frac{\pi}{6} \sum_k M_k d_k^3 \quad (8)$$

여기서 ρ_l 은 액체의 밀도를 의미한다. 식(7)과 (8)로부터 다음과 같은 상대적인 질량플럭스를 구할 수 있다.

$$m''(i,j) = C' V_{d,z} G(i,j), \quad C' \equiv \frac{\pi \rho_l}{6 C I_o} \quad (9)$$

한편, 측정평면을 통과하는 총 분무 유속(m_i)은 z 축을 따라 보존되어야 하므로 다음의 식이 성립한다.

$$m_i = \sum_{i,j} [m''(i,j) \delta A] = C' \sum_{i,j} [V_{d,z} G(i,j) \delta A] \quad (10)$$

위의 식으로부터 상수 C' 를 구하여 식(9)에 대입하고, 식(1)로부터 얻은 액적의 속도로부터 최종적으로 다음의 정량적인 질량플럭스를 구할 수 있다.

$$m''(i,j) = \frac{V_{d,z} G(i,j)}{\sum_{i,j} V_{d,z} G(i,j)} \cdot \frac{m_i}{\delta A} \quad (11)$$

5. PLLIF 기법의 신뢰성 평가

본 실험에 사용된 기계적인 분류장치는 10 mm의 해상도를 갖는 12×15 격자로 구성되어있다. 충돌점으로부터 5 cm와 8 cm하류의 위치에서 2차원 질량플럭스를 측정하였는데 분무의 채집효율이 각각 94.7, 86.0% 이었다. 따라서 PLLIF 측정 결과와의 정량적인 비교를 위해 각 질량분포에 100/94.7, 100/86.0을 곱하여 질량결손을 보정하였다.

Fig. 8은 PLLIF 및 기계적 분류장치로 얻은 2차원 질량플럭스 분포를 보여주는데, 분무 패턴뿐만 아니라 그 절대적인 크기도 일치한다는 사실을 알 수 있다. 8 cm의 위치에서 비교해보면, PLLIF 기법의 해상도(2 mm)가 기계적 분류장치(10 mm) 보다 정밀하기 때문에 분무가 희박한 부분까지도 세밀하게 표현하고 있다.

한편, 질량플럭스 측정결과로부터 분무 균일도를 대표하는 변수인 P.I.(Patternation Index)⁽⁶⁾와 S.U.I.(Spray Uniformity Index)⁽⁷⁾를 계산하여 보다 정량적인 비교를 수행하였다. Table 2의 결과에 의하면, 두 측정기법 모두 매우 유사한 분무 균일도를 표현해 주고 있음을 알 수 있다. 이로부터 PLLIF 기법으로부터 측정된 질량플럭스 분포의 신뢰성을 확인할 수 있다.

Table 2. Comparison of spray uniformity between PLLIF and mechanical patternator

| Location | Patternator | P.I. (%) | S.U.I. |
|----------|-------------|----------|--------|
| Z=5 cm | PLLIF | 128.8 | 2.61 |
| | Mechanical | 130.4 | 2.49 |
| Z=8 cm | PLLIF | 110.0 | 1.88 |
| | Mechanical | 111.7 | 1.77 |

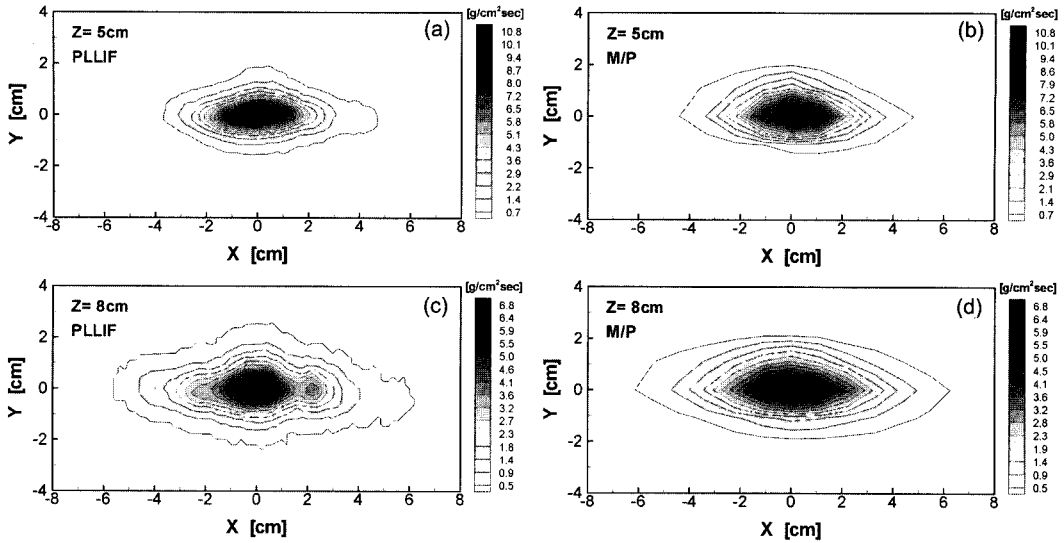


Fig. 8. Comparison of 2-D mass flux distribution between PLLIF and mechanical patternator: (a) PLLIF at 5 cm downstream, (b) mechanical patternator at 5 cm downstream, (c) PLLIF at 8 cm downstream, and (d) mechanical patternator at 8 cm downstream.

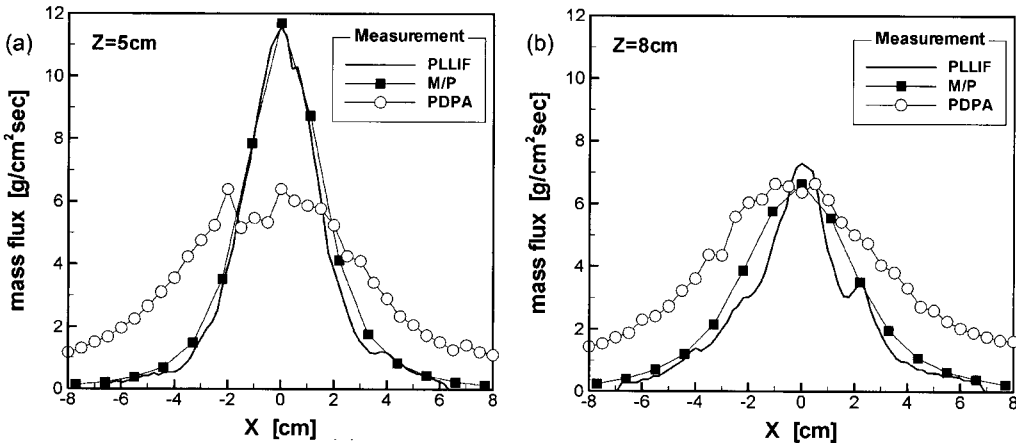


Fig. 9. Comparison of mass flux distribution of PLLIF along the x-axis ($y=0$) with those of mechanical patternator and PDPA: (a) at 5 cm downstream and (b) at 8 cm downstream.

Fig. 9는 PLLIF, 기계적 분류장치, PDPA등을 이용하여 측정한 x축의 질량플럭스를 비교하여 보여주고 있다. PLLIF와 기계적 분류장치는 매우 유사한 분포를 나타내는 반면, PDPA는 다른 경향성을 갖는다. 이는 PDPA가 구형이 아닌 액적을 측정할 수 없기 때문인데⁽¹⁷⁾, 특히 분무가 밀집된 중앙부에 이러한 액적의 빈도가 높기 때문에 중앙부의 질량플럭스를 과소평가하게 된다. 따라서 PDPA는 like-doublet 인젝터의 분무 질량플럭스 측정에 적용할 수 없다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

PLLIF 기법을 이용하여 like-doublet 인젝터의 분무 농도 및 질량플럭스를 측정한 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Like-doublet 인젝터는 중앙부에 밀도가 높은 분무를 형성하여 PLLIF 측정에 있어서 이차방출에 의한 오차를 유발할 수 있다. 그러나 입사 레이저나 형광신호의 강도 감쇠는 크지 않다.

2. 입사 레이저 강도를 줄여 이차방출을 피할 수 있으나 이 경우 형광신호에 대한 잡음 비가 증가한다. 따라서 최적의 입사 레이저 강도를 결정하는 것이 PLLIF 측정에 있어서 매우 중요하다.

3. PDPA는 like-doublet 인젝터의 분무특성 측정에 큰 오차를 보이지만, PLLIF는 기계적 분류장치와 매우 유사한 결과를 보이므로 분무 농도 및 질량플럭스 측정에 있어 신뢰성 있는 기법으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(M1-10104-00-0058)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Gill, G.S. and Nurick, W.H., 1976, "Liquid Rocket Engine Injectors," Report No.NASA-SP-8089.
- 2) Taylor, G.I., 1960, "Formation of thin flat sheets of water," Proc. the Royal Society of London A Vol. 259, pp.1~17.
- 3) Dombrowski, N. and Hooper, P.C., 1964, "A study of the sprays formed by impinging jets in laminar and turbulent flow," J. Fluid Mech. Vol.18, pp. 392~400.
- 4) Harrje, D.T., 1972, "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability," Report No NASA-SP-194.
- 5) Rupe, J.H., 1953, "The Liquid-Phase Mixing of a Pair of Impinging Streams," JPL Report No.20~195.
- 6) Tate, R.W., 1960, "A significant Variable in Fuel Combustion and Chemical Processes Utilizing Atomizing Nozzles," Industrial and Engineering Chemistry/Equipment and Design, Vol.52, pp.49~53.
- 7) Chen, S.K., Lefebvre, A.H. and Rollbuhler, J., 1993, "Factors Influencing the Circumferential Liquid Distribution From Pressure-Swirl Atomizers," J. Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.115, pp.447~452.
- 8) Bachalo, W.D. and Houser, M.J., 1984, "Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurement of Drop Size and Velocity Distributions," Optical Engineering, Vol.23, pp.583~590.
- 9) Ruff, G.A. and Faeth, G.M., 1995, "Non-intrusive Measurement of the Structure of Dense Sprays" Recent Advances in Spray Combustion: Spray Combustion Measurements and Model Simulation Vol.1, Progress in Astronautics and Aeronautics, pp. 263~296.
- 10) Brown, C.T., McDonnell, V.G., and Talley, D.G., 2002, "Accounting for Laser Extinction, Signal Attenuation, and Secondary Emission While Performing Optical Patternation in a Single Plane," ILASS Americas 15th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems.
- 11) Talley, D.G., Thamban, T.S., McDonnell, V.G. and Samuelsen, G.S., 1995 "Laser Sheet Visualization of Spray Structure," Recent Advances in Spray Combustion: Spray Combustion Measurements and Model Simulation Vol.2, Progress in Astronautics and Aeronautics, pp.113~141.
- 12) Nurick, W.H., 1976, "Orifice Cavitation and Its Effect on Spray Mixing," J. Fluids Engineering, pp. 681~687.
- 13) Ibrahim, E.A. and Przekwas, A.J., 1991, "Impinging Jets Atomization," Phys. Fluids A, Vol.3, pp. 2981~2987.
- 14) Le Gal, P., Farrugia, N. and Greenhalgh, D.A., 1999, "Laser Sheet Dropsizing of Dense Sprays," Optical & Laser Technology, Vol.31, pp.75~83.
- 15) Crane, R., 1997, A simplified Approach to Image Processing, Prentice-Hall.
- 16) Anderson, W.E., Ryan, H.M. and Santoro, R.J., 1995, "Impinging jet injector atomization," Liquid Rocket Engine Combustion Instability, Progress in Astronautics and Aeronautics, pp.215~247.
- 17) Lefebvre, A.H., 1989, Atomization and sprays, Hemisphere publishing corp. pp.388~391.