

광학 선형 패터네이터를 이용한 고압 환경 하에서의 분무 측정

고현석[†] · 신상희* · 윤영빈**

Spray Measurement Using Optical Line Patternator at High Ambient Pressure

Hyeonseok Koh, Sanghee Shin and Youngbin Yoon

Abstract. Optical Line Patternator(OLP) has been applied to get a distribution of the spray at high ambient pressure. OLP is a combined technique of extinction measurement and image processing. The attenuated intensity of laser beam after traversing spray region was measured by using a photo-detector, and the line image of Mie-scattering was captured simultaneously in the path of each laser beam by using a CCD camera. The distribution of extinction coefficient in the spray is obtained by processing these data with the algebraic reconstruction technique. From the distribution of extinction coefficient, the surface distribution of spray can be reconstructed. OLP does not use laser sheet but use laser beam so that the noise effect of multiple scattering, caused by increasing number density of droplet in high pressure environment, is reduced drastically. OLP is expected as a suitable method which can investigate the characteristics of relatively large spray under the high pressure environment such as liquid rocket engine.

Key Words : Spray (분무), Imaging Technique (이미지기술), Extinction (감쇠), High Ambient Pressure (고압환경)

1. 서 론

연소 시스템에서 연소 효율을 높이기 위해서는 연료의 혼합 효율과 증발률을 높여야 한다. 일반적으로 평균 연료의 액적 크기가 작아지면 체적 당 열 발생량이 높아지면서 연소가 원활하게 일어나는 장점이 있다. 그러나 액적의 크기가 너무 작아지면 원하는 위치에서 연소가 일어나지 않을 수 있다. 또한 액적들의 분포 상태는 연료의 혼합 효율을 변화시킬 수 있으며, 액체 로켓 엔진의 경우, 엔진의 불안정성에도 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 실제 연소 시스템을 개발하기 위해서는 분무의 크기, 액적 분포 등의 특성들을 정량적으로 측정하는 것이 중요하다. 이를 위해 분무장 내에 수집관을 삽입하는 기

계적 패터네이터(Mechanical Patternator)부터 고속 카메라, Malvern particle analyzer, PDPA와 같은 다양한 광학 기법이 개발, 적용되어 어느 정도의 성과를 내고 있다. 최근에는 광학 패터네이터(Optical Patternator)와 같이 레이저 평면광을 조사하였을 때 나오는 신호를 파장별로 분석하여 2차원 단면 내의 질량 및 액적 크기 분포 등을 빠르게 분석해 낼 수 있는 기술도 개발되고 있다.

그러나 로켓 엔진 내부와 같이 고압 환경 하에서의 분무에 대해서는 카메라를 이용한 대략적인 분무 형상 외에는 신뢰할 만한 정량적인 측정 결과가 부족한 상황이다. 이는 고압 상태에서는 분무 액적들의 수밀도가 증가하기 때문에 신호 감쇠, 다중 산란 등에 의한 오차가 심하게 발생하여, 기존의 PDPA, PLIF 등의 광학 기법으로는 충분히 신뢰할 만한 결과를 얻기가 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 이러한 상황을 극복하기 위해서 레이저 평면광을 사용하는 광학 패터네이터와 달리 레이저 광선을 시험부에 순차적으로 조사하였다. 이를

[†]서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : aroma@snu.ac.kr

*서울대학교 기계항공공학부 대학원

**서울대학교 기계항공공학부

통해 고압에서 나타날 수 있는 다중 산란에 의한 오차를 최소화하고자 하였다.⁽¹⁾ 그리고 분무장 내에서 일어나는 입사광과 신호의 감쇠 문제를 해결하기 위해서 시험부를 통과할 때 일어나는 레이저 광선의 투과율을 측정하여 측정 결과를 보정하는 데 사용하였다. 동시에, 기존의 광학 토모그래피에서 사용하였던 다각조사방법과 달리, 카메라를 이용하여, 레이저 광선이 지나가는 경로의 이미지를 처리하여 빠른 시간 내에 분무 전체를 측정하고, 비교적 간단한 알고리즘으로도 분무를 재구성할 수 있도록 하였다.

이러한 입사광의 투과율과 이미지 처리 기법을 이용하는 광학 선형 패턴네이터(Optical Line Patternator)의 정확성을 검증하기 위하여 상압 조건에서 solid cone 형상의 분무 특성 결과를 기존의 기법과 비교하여 보았다. 그리고 고압 환경하의 분무에서도 적용 가능한 지에 대하여 살펴보았다.

2. 측정 원리 및 실험 장치

2.1 기본 측정 원리

초기 강도가 인 레이저 광선이 분무를 통과한 후 그 강도가 I 로 감쇠하였을 때, 그 투과율(I/I_0)은 Beer-Lambert 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽²⁾

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left[-\int \gamma(x,y) ds\right] \quad (1)$$

이 때 감쇠계수, γ 는 입사광의 파장이나 광학 장비의 위치, 광선이 통과하는 매질의 특성 등에 영향을 받는다. 입사광의 파장보다 큰 구형 액적에 대해서 감쇠계수는 액적 지름, D 의 제곱, 즉 액적의 단면적에 비례하는 것으로 근사할 수 있다.⁽³⁾ 그리고 분무와 같이 많은 수의 액적이 존재하고 다중 산란을 무시할 수 있는 경우에는, 감쇠 계수가 액적의 수밀도, N 과 액적 단면적의 함수로 나타나게 되어 감쇠 계수로부터 분무장 내에서 액적의 면적 분포(surface distribution)를 얻을 수가 있다.⁽⁴⁾

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

여기서 c_{ext} 는 감쇠의 효율에 관련된 계수이다.

한편, 레이저 입사광이 분무를 지날 때 발생하는 산란 신호의 세기, G 역시 액적의 단면적 분포에 비례한다.⁽⁵⁾

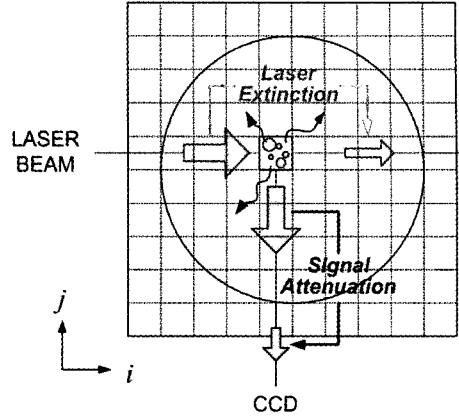


Fig. 1. Laser extinction and signal attenuation.

$$G = c_s I \int N(D) D^2 dD \quad (3)$$

여기서 c_s 는 산란과 검출부의 효율에 관계하는 계수를 의미한다. 따라서 카메라 등을 이용하여 분무장 내의 산란 신호의 강도 분포를 얻을 수 있다면 감쇠 계수의 분포와 함께 액적의 단면적 분포를 얻을 수 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 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 감쇠 계수를 계산할 수 있다.

$$\sum_{n=1}^n \gamma_{i,j} L_{i,j} = -\log(I_{n,j}/I_{0,j}) \quad (4)$$

$$(c_s/c_{ext}) I_{0,j} \exp\left[-\sum_{h=1}^{i-1} \gamma_{h,j} L_{h,j}\right] \gamma_{i,j} = G_{i,j} \quad (5)$$

식 (4), (5)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 입사

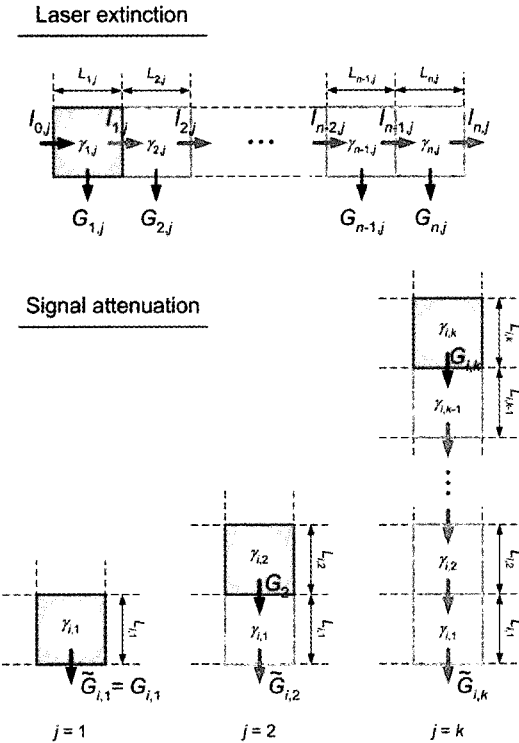


Fig. 2. Algebraic Reconstruction Technique (ART).

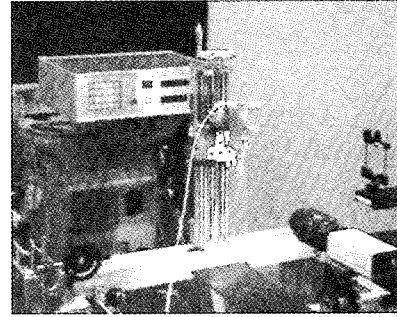
광의 감쇠만이 문제가 되며 카메라까지 도달하는 동안 신호 감쇠의 영향은 없는 것으로 가정할 수 있다. 하지만, 두 번째 줄부터는 카메라에 기록된 산란 신호, \tilde{G} 는 신호 감쇠의 영향을 받은 값이므로 이전 과정에서 구해진 첫 번째 줄에서의 감쇠계수 값을 이용하여 다음과 같이 신호 감쇠를 우선적으로 보정해주는 작업이 추가적으로 필요하다.

$$G_{i,j} = \tilde{G}_{i,j} \exp \left[\sum_{k=1}^{j-1} \gamma_{i,k} L_{i,k} \right] \quad (j \geq 2) \quad (6)$$

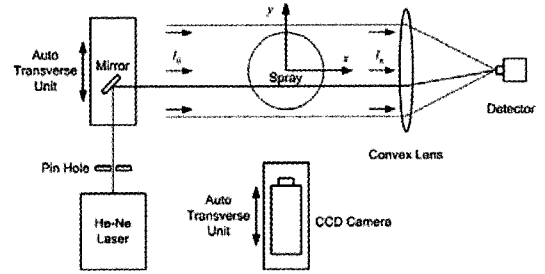
카메라에 가까운 줄부터 한 줄 씩 이러한 과정을 반복해 나가면 전체 측정 영역에 대해서 감쇠 계수를 구할 수 있다. 그리고 이러한 감쇠 계수 값으로부터 분무장 내에 존재하는 액적들의 면적 분포를 얻거나 원래 신호를 복원해내는 작업이 가능하다.

2.2 실험 장치

광학 선형 패터네이터는 레이저 광선을 측정평면으로 보내는 광학 전달부, 측정평면을 통과하면서 발생하는 신호를 기록하는 측정부, 측정값으로부터 원래 신호를 분석해내는 신호처리부 등 3부분으로 구성되



(a) Photograph



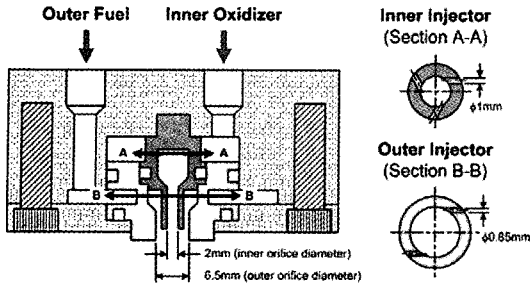
(b) Schematics

Fig. 3. Experimental setup at atmospheric pressure condition.

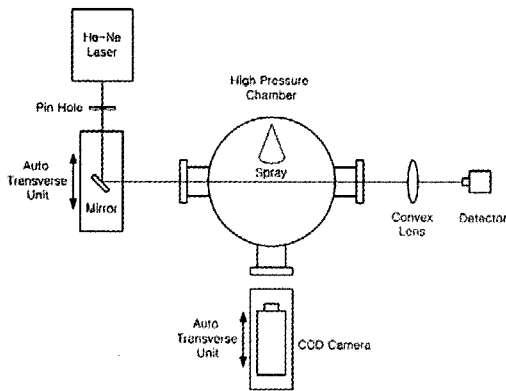
어 있다. 우선 앞서 언급한 대로, 평면판 대신 레이저 광선을 이용하였으며, CCD 카메라(KODAK ES1.0 1008 × 1008)와 평면거울을 자동 이송 장치로 y축 방향으로 이동시켜, x축에 평행한 광선들이 분무를 훑고 지나가게 하였고, 그와 동시에 분무장에서 나오는 신호를 기록하였다.

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 측정한 투과율과 신호는 컴퓨터를 이용하여 처리하게 된다. 이 과정에서는 감쇠에 대한 정보를 추출해내고 이를 통해 원래의 신호/영상을 복원해내는 작업을 수행하였다.

고압 챔버에서의 측정은 Fig. 4와 같이 평면거울을 자동 이송 장치로 이동시켜, 평행한 레이저 광선들이 분무를 훑고 지나가도록 하였다. 약 8 cm 정도의 분무



(a) Swirl-coaxial injector design



(b) Schematics

Fig. 4. Feature of swirl coaxial injector and schematics of experimental setup with high pressure chamber.

를 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 레이저 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 30mm 떨어진 곳의 분무 단면을 측정하였다. 이 때 분사 압력 ΔP 는 항상 0.6 MPa이 되도록 조정하였으며, 유량은 산화제 부분에서는 25.6 g/s, 연료부에서는 10.76 g/s이었다.

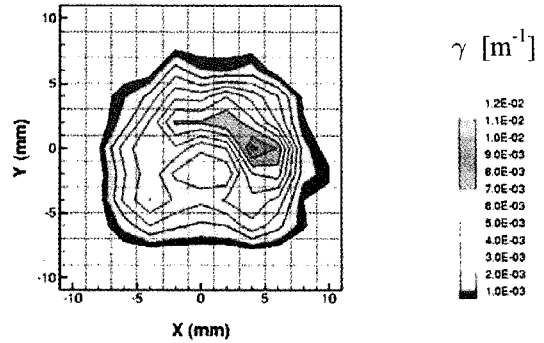


Fig. 5. Planar distribution of attenuation coefficient.

각각의 압력 조건에서 산화제만 나오는 상태와 연료와 산화제 둘 다 나오는 상태를 측정하여 비교하였다.

3. 실험 결과 및 해석

3.1 상압에서의 solid-cone 분무 특성 측정

고압 환경 하에서의 측정에 앞서, 이 기법의 신뢰도를 알아보기 위해 상압에서 광학 선형 패턴메터 기법을 적용하여, solid cone 형상의 분무에 대해서 측정을 수행하였다. 모의 추진제로는 물을 사용하였고, 분사 압력 ΔP 는 0.5MPa로 주었으며 그 때의 질 유량은 10 g/s였다.

Fig. 5는 측정된 투과율과 산란 신호 분포를 가지고 앞서 언급한 알고리즘을 이용하여 구한 감쇠계수의 분포를 보여주고 있다.

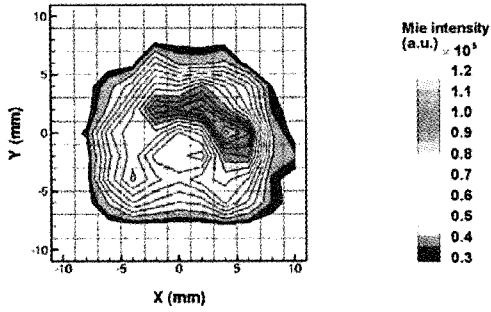
물의 경우, 감쇠는 흡수보다 산란에 의해 주로 일어나므로 감쇠계수의 분포는 산란 신호의 분포로 유추할 수 있다. 이렇게 얻어낸 감쇠계수의 분포는 형광 신호나, 다른 측정값의 보정에도 사용할 수 있다.

Fig. 6은 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 이루고 있음을 알 수 있었다.

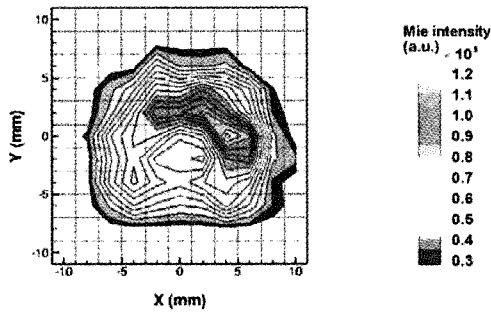
3.2 기존 계측 기법과의 비교

광학 선형 패턴메터 기법의 정확성을 검증하기 위하여 기존 광학 패턴메터를 이용하여 측정된 Laser 유도 형광(LIF) 신호의 결과와 Mie 산란 신호의 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

레이저 입사광의 감쇠를 보정하기 위해서 양쪽 방



(a) Uncorrected signal distribution



(b) Attenuation corrected signal distribution

Fig. 6. Correction of MIE scattering image.

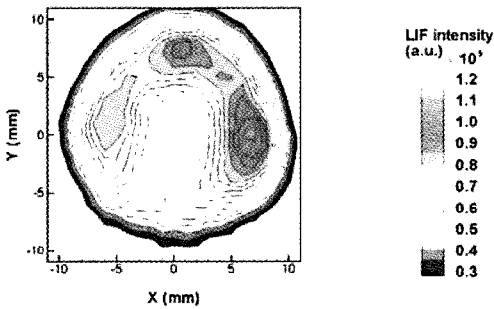


Fig. 7. Planar distribution of LIF signal obtained by the optical patternator.

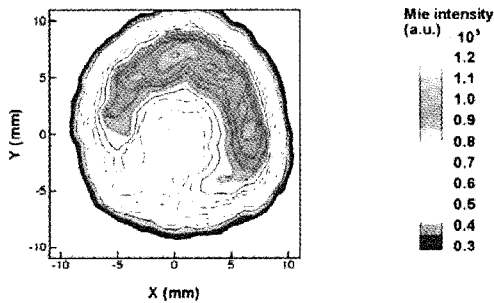


Fig. 8. Planar distribution of Mie-scattering signal obtained by the optical patternator.

향에서 순차적으로 레이저를 조사하여 얻은 이미지를 이용하였고, 신호 감쇠를 보정하기 위해서 두 대의 카메라에서 영상을 촬영하여 기하 평균하는 방식을 사용하였다.⁽⁶⁾

각각의 결과를 비교하기 위하여 분무의 균일도를 나타내는 패터네이션 지수, P.I. (Patternation Index) 와 S.U.I.(Spray Uniformity Index)를 구해보았다.

$$P.I.(%) = \sum_{i,j} \left| \frac{1}{N_g} - \frac{G(i,j)}{\sum_{i,j} G(i,j)} \right| \times 100 \quad (7)$$

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

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

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i,j} y(i,j)}{N_g} \quad (8)$$

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 조밀하게 이동하면서 신호를 잡아내어 광학 선형 패터네이터의 측정 분해능을 높이는 방향으로 해결할 수 있을 것이다.

3.3 고압 환경에서 동축형 인젝터의 분무 특성 측정

Fig. 9는 산화제만 작동시킨 단일 스웰 인젝터에서

Table 1. Comparison of the patternation index between the optical line patternator and the optical patternator

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

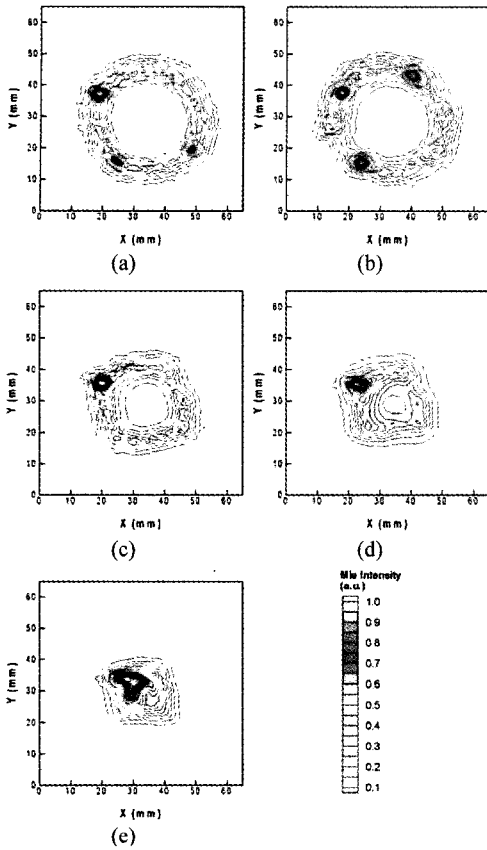


Fig. 9. Planar distribution of swirl injector in case of injecting oxidizer only ($\Delta P=0.6\text{MPa}$) with chamber pressure (a) $P_c=0.1\text{MPa}$ (b) $P_c=0.5\text{MPa}$ (c) $P_c=1.0\text{MPa}$ (d) $P_c=2.0\text{MPa}$ (e) $P_c=4.0\text{MPa}$.

Mie 산란 신호를 이용한 분무 패턴네이션 결과이다. 주위 압력이 높아질수록 분무의 형상이 중심 부분이 비어있는 hollow cone에서 중심부까지 고루 분포하는 solid cone형상으로 변해가는 것을 뚜렷이 관찰할 수 있었다. Mie 산란 신호가 강하게 나타나는 곳은, 그 부분에 존재하는 액적의 표면적 합이 다른 곳보다 많다는 것을 의미하는데, 이는 두 가지로 해석될 수 있다.

첫째는, 액적의 분열이 잘 일어나지 않아서, 불균일하게 큰 액적들이 존재하는 곳일 수 있다. 앞서 언급한 대로, 큰 액적이 존재하면, 나오는 산란신호는 증가하게 되어, 부분적으로 높은 신호 강도를 보일 수 있다. 0.1MPa이나 0.5MPa에서 나타나는 강도가 높은 부분들은 이에 해당하는 것으로 생각된다.

다음으로는 분열이 잘 일어났지만, 그 부분의 액적

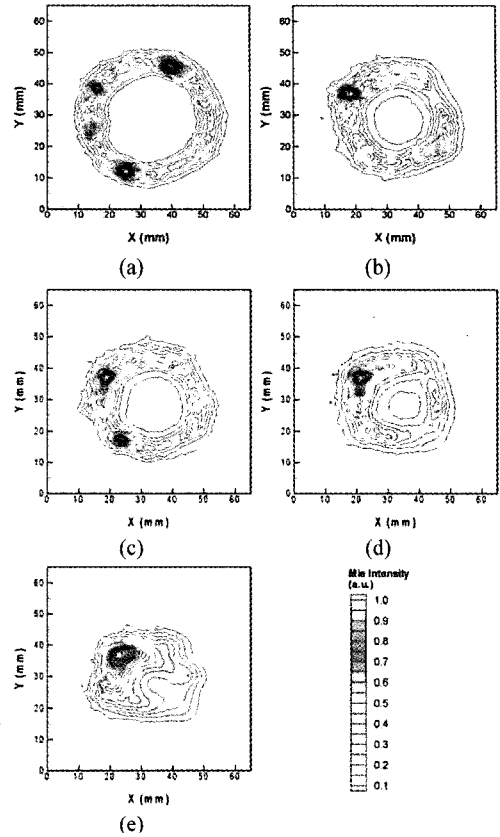


Fig. 10. Planar distribution of swirl coaxial injector in case of injecting both fuel and oxidizer ($\Delta P=0.6\text{MPa}$) with chamber pressure (a) $P_c=0.1\text{MPa}$ (b) $P_c=0.5\text{MPa}$ (c) $P_c=1.0\text{MPa}$ (d) $P_c=2.0\text{MPa}$ (e) $P_c=4.0\text{MPa}$.

수밀도가 많아서 그 부분의 표면적 합이 높아지는 경우이다. 0.1MPa, 0.5MPa일 때의 부분적으로 신호 강도가 높았던 지역은 1.0MPa, 2.0MPa로 주위 압력이 높아짐에 따라 사라졌다가, 4.0MPa에서 다시 나타나는 현상을 보인다. 이는, 1.0MPa, 2.0MPa에서는 분열이 잘 일어나남에 따라, 표면적 분포의 부분적 집중을 유발하는 큰 액적들이 사라져, 비교적 균일하게 액적으로 분열되다가, 4.0MPa 상태에서는 잘게 분열된 액적들이 좁은 지역에 모여면서 다시 부분적으로 면적 분포가 불균일하게 높아져서, 산란 신호가 강하게 나타나는 것으로 보인다.

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. 9에서 보듯이 산화제만 작동시킨 단일 스웰 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 스웰 인젝터와 연료와 산화제를 동시에 분사하는 동축형 인젝터의 경우 모두 측정 지점에서 주위 압력이 증가함에 따라 분무각이 감소하는 것 또한 확인할 수 있었다. 주위 기체의 압력이 증가함에 따라 분무각이 감소하는 결과는 많은 논문들을 통해 확인할 수 있다.^(7,8) 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.

4. 결 론

액적의 수밀도가 높은 고압 계측 과정에서 예상되는 입사광의 감쇠, 신호의 감쇠를 보정하고, 다중 산란의 문제를 최소화하기 위해 레이저 광선의 투과율과 분무에서 발생하는 산란 신호를 이용하는 광학 선형 패턴네이터 기법을 적용하였다. 대기압 조건에서 일반적인 solid cone 형상의 분무에 이 기법을 적용하여 감쇠 현상을 보정한 결과 기존의 광학 패턴네이터와 5% 이내로 유사한 결과를 획득할 수 있었다.

주위 압력을 변화시켜 가면서, 산화제만을 분사하는 단일 스웰 인젝터와 연료와 산화제를 동시에 분사하는 동축형 인젝터에 대하여 분무 특성을 측정하고, 분무의 형상이 hollow cone에서 solid cone으로 변해 감을 알 수 있었으며, 분무각이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

향후 카메라와 자동 이송 장치를 좀 더 정밀하게 동기화시켜 측정 분해능을 좀더 향상시킬 경우 광학 패턴네이터 수준의 데이터를 얻어낼 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라, 광학 선형 패턴네이터 기법은 다중 산란이 문제가 되어 광학 패턴네이터를 사용할 수 없는, 고압 분무에서 정밀한 데이터를 얻을 수 있는 유용한 레이저 계측 기법이 될 수 있을 것으로 전망한다. 더욱이, 수평 이송장치를 사용하여 scanning 할 경우, 분무의 크기에 상관없이 사용할 수 있어, 상대적으로 큰 분무이며, 고압인 액체 로켓 엔진 내부 분무 특성을 측정하는데 있어서는 기존의 어느 기법보다도 간결하고 정확한 기법이 될 것으로 예상된다.

후 기

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

참고문헌

- 1) 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.
- 2) Bohren, C.F. and Huffman, D.R., 1983, Absorption and scattering of light by small particles, Wiley Interscience, New York.
- 3) 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.
- 4) Wang, G., Deljouravesh, R., Sellens, R., Olesen, M. and Bardon, M., 1997, "An optical spray pattern analyzer", ILASS-Americas '97.
- 5) 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.
- 6) Koh, H., Jeon, J., Kim, D., Yoon, Y. and Koo, J.-Y., 2003, “Analysis of Signal Attenuation for Quantification of Planar Imaging Technique”, Measurement Science and Technology, Vol. 14(10), pp. 1829-1838.
 - 7) 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.
 - 8) Wang, X.F. and Lefevbre, A.H., 1993, “Influence of Ambient Air Pressure on Pressure-swirl Atomization”, Atomisation and Spray Technology, Vol. 3, pp. 209-226.