

고압 환경에서의 분무 특성 계측을 위한 광학 토모그래피 기법 연구

조성호* · 임지혁* · 최호연** · 윤영빈***

Study of Optical Tomography for Measurement of Spray Characteristics at High Ambient Pressure

Seongho Cho* · Ji-Hyuk Im* · Hoyeon Choi** · Youngbin Yoon***

ABSTRACT

Spray cross-section was measured by the Optical Line Patternator (OLP) and Optical Tomography at high ambient pressure. The laser line beam passed through the spray region, then Mie scattered signal and transmitted light were captured. The measured signal was processed to obtain a distribution of attenuation coefficient in spray cross-section. Beer-Lambert's law and mathematical reconstruction methods were used to reconstruct the distribution of attenuation coefficient. Spray became dense at high pressure and attenuation of scattered signal occurred seriously. OLP method, which uses Mie scattered signal, showed limit in compensating attenuation problem in dense spray region. Optical tomography reconstructed spray cross-section well, from transmission rate of light penetrating spray region.

초 록

광학 선형 패터네이터 및 광학 토모그래피 기법을 사용하여 높은 주위 기체 압력 조건에서 분무 단면을 측정하였다. 레이저 직선광이 분무 영역을 지나도록 하여 발생하는 Mie 산란 신호 및 직선광의 투과율을 측정하였으며, 이로부터 Beer-Lambert 법칙 및 수학적 단면 재구성 기법을 이용하여 분무 단면의 감쇠 계수 분포를 재구성하였다. 높은 주위 기체 압력 조건에서 광학적으로 밀한 분무가 발생하며, 그 결과 산란 신호의 감쇠 효과가 크게 증가한다. 따라서 미 산란 신호를 이용하는 광학 선형 패터네이터의 경우 감쇠 효과를 완화하는 데 한계를 보인다. 광학 토모그래피의 경우 분무를 통과하는 레이저광의 투과율 정보만을 이용하여 성공적으로 분무 단면을 재구성하였다.

Key Words: Spray(분무), Imaging Technique(이미지 기법), High Ambient Pressure(고압 환경), Light Attenuation(광 감쇠), Tomographic Reconstruction(토모그래피 재구성)

† 2009년 6월 26일 접수 ~ 2009년 8월 13일 심사완료

* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

*** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

추진력 또는 전력을 생산하기 위하여 연소 기관이 널리 이용되며, 이때 대부분의 연소 기관은 분사기를 이용하여 연소기 내에 액체 연료를 분무 형태로 공급한다. 액적 지름, 연료 혼합 효율이나 유량 분포 등 연료 분무의 특성은 연소 특성을 표시하는 화염 위치, 연소 불안정 등의 인자에 영향을 준다. 이로부터 기관의 성능을 향상시키기 위하여 분무 특성에 대한 이해가 필요함을 알 수 있다.

분무 특성 중, 분무 분포는 중요한 요소로서 이를 파악하기 위한 다양한 계측 기법이 개발되었다. 우선 기계적 패터네이터를 이용함으로써 분무의 유량 분포를 직접적으로 측정하는 방법이 제시되었으나, 직접적인 유량 측정 시 유동에 영향을 주어 그 특성을 변화시킬 수 있기 때문에 비간섭적인 계측 기법이 다양하게 개발되었다. X-선 토모그래피[1], ballistic image를 사용하여 밀한 분무를 측정하는 방법[2] 및 광학적인 방법을 이용하여 분무를 계측하는 Malvern, PDPA 등의 기법이 액적 지름, 분무 분포 등의 분무 특성을 간접적으로 측정하기 위하여 사용되었으며, 이러한 기법들을 이용함으로써 분무에 대한 다양한 연구가 수행되었다.

분무 분포를 측정하기 위한 광학적 분무 가시화 기법이 다양하게 개발되었다[1-6,10,12]. 그 중 Mie 산란 신호 또는 형광 신호와 분무를 통과하는 빛의 투과율을 측정함으로써 분무의 분포를 파악하려는 시도가 다양하게 시행되었다. 그러나 광학적으로 밀한 분무에서 광학적 신호를 사용할 경우 다음과 같은 문제로 인하여 측정 오차가 발생한다[3]. 우선, 입사되는 광원의 세기가 감소하며(light extinction), 분무로부터 발생하는 신호 또한 감쇠된다(light attenuation). 또한 신호 측정 시 측정하고자 하는 위치에서 발생하는 신호 외 다른 위치에서 발생하는 신호가 동시에 측정되어 오차가 발생한다(multiple scattering). 이러한 문제들을 해결하기 위하여 감쇠 효과를 수학적으로 보정하거나[4,5], 실험 기기를 변경함으로써 오차 신호를 줄이려는 연구[3]가 수행되었다. 그 외 Mie 산란 신호의 보정 및 레이저

투과율 측정을 이용하여 분무 분포를 측정하는 광학 선형 패터네이터[6] 기법이 제안되었다.

한편, 산란 신호를 직접적으로 이용하는 분무 계측 기법 외에 레이저광의 투과율 정보를 이용하여 단면을 재구성하는 토모그래피 기법이 제안되었다. 토모그래피 기법은 본래 투명한 생물체 조직의 단면을 새도우그래프 등의 투영 정보를 이용하여 재구성하기 위하여 제안되었으며[7], 이후 Santoro 등[8]이 메탄 제트를 통과하는 레이저광의 투과율을 측정하여 단면의 감쇠 계수 분포장을 계측하였다. 한편 투영 정보를 양전자방출 토모그래피(Positron Emission Tomography)에 적용하기 위하여 통계적 추측 및 최대 유사도 추정법(Maximum Likelihood Estimation)을 이용하는 단면 재구성 알고리즘이 제안되었으며[9], 이후 Lim 등[10]은 이러한 알고리즘을 이용하여 분무 단면의 감쇠 계수 분포를 측정하는 광학적 분무 측정 기기를 개발하였다.

본 연구에서는 기존의 광학 기법을 이용하여 이전보다 높은 유량 및 주위기체 압력 조건을 갖는 분무 단면의 감쇠 계수 분포를 측정하였다. 광학 선형 패터네이터 및 최대 유사도 추정법을 이용한 광학 토모그래피 기법을 이용하여 분무 단면을 계측하였으며, 이때 분무 단면의 위치에 따른 감쇠 계수의 분포를 Beer-Lambert 법칙에 근거한 재구성 기법을 이용하여 파악하였다.

2. 실험 장치 및 기법

2.1 광학 기기를 이용한 분무 단면 계측

본 연구에서는 광학 기기를 이용하여 분무 단면을 측정하였다. 광학적 계측 기법을 이용하여 분무를 측정할 경우 광원이 분무를 투과하는 것이 중요하기 때문에, 물 등의 투과성이 높은 액체가 실제 분무 액체의 대용으로 사용된다. 이때 분무에서 발생하는 산란 신호 및 레이저광의 투과율 정보를 이용하여 분무를 계측한다.

광학 기기를 이용하여 단면을 재구성하는 광학 토모그래피 기법의 경우, 분무를 통과하는 레

이저광의 투과율을 측정할 필요가 있다. 이러한 레이저광의 투과율은 분무 단면에 대한 일종의 투영 정보로 생각할 수 있다.

감쇠 계수 분포와 분무 특성의 관계는 아래의 식을 통하여 확인할 수 있다. 레이저광의 파장이 분무 내 액적의 지름에 비하여 매우 작을 경우, 다음과 같은 식에 의하여 액적의 지름과 감쇠 계수의 관계가 표현된다[11].

$$\gamma = c_{ext} \int N(D) D^2 dD \quad (1)$$

이때 γ 는 감쇠 계수, D 는 액적의 지름, $N(D)$ 는 지름 D 인 액적의 수밀도이다. c_{ext} 는 감쇠효율 관련 계수이다. 본 식으로부터 감쇠 계수가 액적 지름의 제곱에 비례함을 확인할 수 있으며, 유량이 D^3 에 비례함을 생각해볼 때 감쇠 계수 분포가 유량 분포의 경향과 유사할 것임을 예상할 수 있다.

Beer-Lambert 법칙에 의하여 분무를 통과하는 레이저광의 투과율은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{I_n}{I_0} = \exp\left(-\int_s \gamma ds\right) \quad (2)$$

I_0 은 분무 영역에 입사되는 레이저광의 세기, I_n 은 분무 영역을 통과하여 감쇠된 레이저광의 세기이다. s 는 레이저광이 분무 영역을 통과하는 경로이다. 각각 고유의 감쇠 계수 값을 갖는 분무 영역을 연속하여 통과할 경우 레이저광의 투과율 관련식인 Eq. 2는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_{n,j}}{I_{0,j}} = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \gamma_{i,j} L_{i,j}\right) \quad (3)$$

이때 분무 단면을 영역별로 나눈 후, 분무 영역 (i,j) 에서의 감쇠 계수를 $\gamma_{i,j}$ 라 한다. 분무 영역 (i,j) 를 레이저광이 통과하는 경로의 길이는 $L_{i,j}$ 이다. Eq. 3으로부터 투과율 데이터가 분무 단면의 감쇠 계수 분포와 관련됨을 확인할 수 있다.

2.1.1 광학 선형 패터네이터

광학 선형 패터네이터는 Mie 산란 신호와 레이저광의 투과율 정보를 동시에 측정한 후, 이를 토대로 분무장 단면의 감쇠 계수 분포를 재구성하는 기법이다. 본 기법은 Koh 등[6]의 연구에서 자세하게 설명되어 있다.

본 기법은 Mie 산란 신호의 특성 및 그 감쇠 효과를 고려하여 측정된 산란 신호의 세기로부터 평면의 감쇠 계수 값을 도출한다. 이를 위하여 우선 분무로부터 발생하는 Mie 산란 신호의 특성을 수학적으로 나타내는 과정이 필요하다. Mie 산란 신호의 세기 G 는 아래의 식과 같이, 분무의 특성 및 입사되는 레이저 광의 세기 I 및 신호 발생 영역 내 액적의 지름 및 수밀도에 의하여 결정된다[12].

$$G = c_s I \int N(D) D^2 dD \quad (4)$$

c_s 는 산란 및 검출부 효율 관계 계수이다. Eq. 4 및 Eq. 1, 3으로부터 입사광의 감쇠에 의하여 감소한 산란 신호를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

한편, 산란 신호는 계측 기기에 전달되는 과정에서 분무 영역을 통과하면서 감쇠된다. 이때 기기에서 최종적으로 계측되는 신호 $\widetilde{G}_{i,j}$ 는 Eq. 3을 적용함으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

위의 Eq. 5, 6을 이용하여 산란 신호가 분무 영역을 통과함에 따라 발생하는 감쇠 효과를 보정할 수 있으며, 결과적으로 측정하고자 하는 분무 영역의 감쇠 계수 분포를 계산할 수 있다. 이러한 단면 재구성 과정은 대수학적 재구성 기법 (Algebraic Reconstruction Technique)라 부르며, Fig. 1에 위의 신호 감쇠 과정이 도시되어 있다.

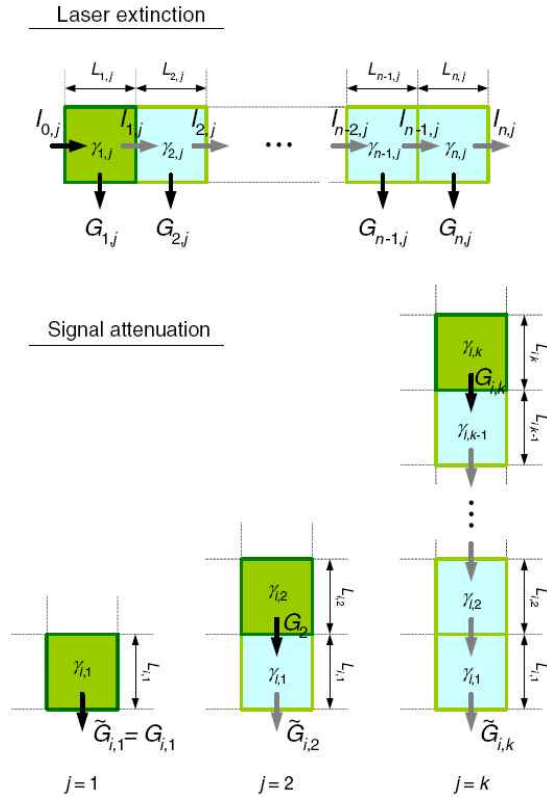


Fig. 1 Algebraic Reconstruction Technique (ART)

2.1.2 광학 토모그래피

광학 토모그래피 기법은 광학 기기를 이용하여 얻어낸 투영 정보를 토대로 단면을 재구성하는 기법이다. 분무를 통과하는 레이저 직선광의 투과율을 다각도에서 측정된 후, 이를 토대로 분무 단면의 감쇠 계수 분포를 재구성하였다.

분무 단면을 재구성하기 위하여 최대 유사도 추정법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)를 이용하였다. 본 재구성 기법은 본래 Shepp 등[9]이 양전자 방출 토모그래피(Positron Emission Tomography)에 사용하기 위하여 제안하였다. MLE 알고리즘은 단면 주위의 검출기로부터 획득한 신호 분포에 대한 통계적인 접근으로부터 출발하며, 아래 식을 통하여 확률적으로 가장 가능성이 높은 신호 분포를 추정한다.

$$\gamma_b^{m+1} = \gamma_b^m \sum_{d=1}^D \frac{n_d p_{b,d}}{\sum_{b^*=1}^B \gamma_{b^*}^m p_{b^*,d}} \quad (7)$$

Equation 7에서 γ 는 감쇠 계수, m 은 추정식의 반복 횟수를 의미한다. b 는 재구성 영역을 구성하는 미소 영역 $b = 1, 2, \dots, B$ 이며, d 는 측정 영역 주위의 검출기 $d = 1, 2, \dots, D$ 이다. n_d 는 검출기에서 측정된 신호의 총합이며, $p_{b,d}$ 는 영역 b 에서 발생한 신호가 검출기에서 측정될 확률이다. 위 추정식을 반복함으로써, 보다 정확한 감쇠 계수 값을 얻을 수 있다.

위 추정식을 토모그래피 기법에 적용할 경우, 검출기 신호 n_d 는 레이저광 투과율로부터 얻는 정보 $-\log(I_1/I_0)$, 확률 $p_{b,d}$ 는 영역 b 를 지나가는 레이저광의 경로 길이에 대한 분포로 생각할 수 있다[10, 13]. 다음의 식은 Fig. 2와 같이 분무 영역을 통과하는 레이저광의 투과율에 대하여 Beer-Lambert 법칙을 적용한 결과를 수학적으로 나타내며, 이때 미소 영역을 지나가는 경로의 길이 Δ 의 분포를 $p_{b,d}$ 를 대신하여 사용할 수 있다.

$$-\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = \Delta 1 \cdot \gamma_{21} + \Delta 2 \cdot \gamma_{11} + \Delta 3 \cdot \gamma_{12} \quad (8)$$

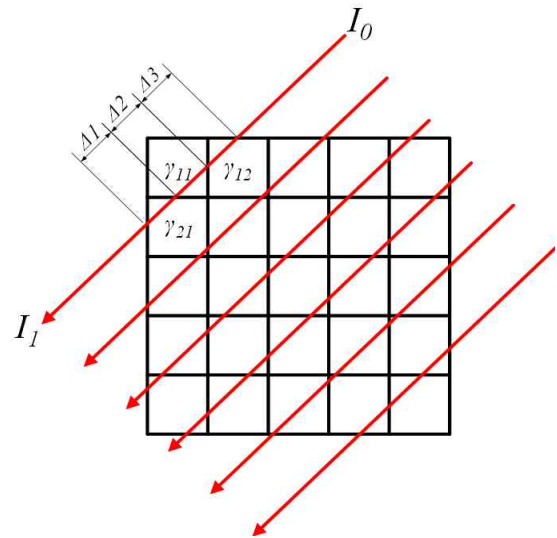


Fig. 2 Spray field geometry for MLE reconstruction algorithm.

일반적인 광학 토모그래피 계측의 경우, 계측할 영역의 형상을 원형으로 결정한 후 이를 미

소 영역으로 나누어 단면을 재구성한다. 그러나 본 연구에서는 분무 영역이 충분히 클 경우 계측할 영역의 가장자리 감쇠 계수 값이 0이 되어 실제 분무 단면을 재구성하는 데 영향이 적을 것이라 가정하였으며, 이후 계측할 분무 영역을 60 mm × 60 mm의 정방형으로 결정하였다.

2.2 실험 장치 및 조건

광학 계측을 통하여 분무 단면을 재구성하기 위하여 광원 및 계측 장비가 사용되었다. He-Ne 레이저를 이용하여 직선광을 발생시켰으며, 레이저광이 분무 영역을 통과한 후 렌즈를 통하여 광검출기에 도달하도록 하였다.

광학 선형 패턴네이터의 경우, Fig. 3과 같이 레이저광이 수평 이송 장치에 의하여 분무 영역을 훑고 지나가도록 하였으며, 분무에서 발생하는 Mie 산란 신호는 측면에 설치된 CCD 카메라(Kodak ES 1.0)에 의하여 수집되도록 하였다. 레이저광은 2 mm 간격으로 총 60 mm 폭의 영역을 지나도록 하였으며, CCD 카메라로 84mm 폭의 영역을 촬영하여 60 mm × 84 mm의 분무 단면을 재구성하였다. 여기서는 60 mm × 60 mm 영역만을 도시하였다.

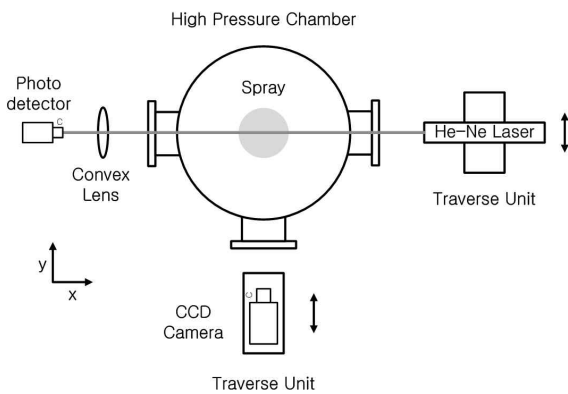


Fig. 3 Schematic of Optical Line Patternator

광학 토모그래피 기법을 이용하기 위하여, Fig. 4와 같은 장치를 설치하였다. 레이저광이 1 mm 간격으로 총 60 mm 폭의 영역을 훑고 지나가도록 하였으며, 고압 챔버 내에 분사기를 장착한 후 10°씩 회전시켜 총 18개 각도에서 분무

를 통과하는 레이저광의 세기를 광검출기를 이용하여 측정하였다. 이후 분무의 유무에 따른 레이저광의 세기 차이로부터 투과율 정보를 계산하였으며, 이를 이용하여 60 mm × 60 mm의 분무 단면을 재구성하였다.

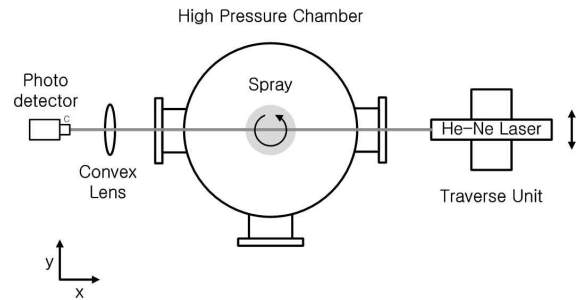


Fig. 4 Schematic of Optical Tomography

한편, 광학적으로 밀한 분무를 생성하기 위하여 스월형 분사기를 사용하였다[14, 15]. 분사기 단면의 형상은 Fig. 5와 같으며, 실제 연료 대신 수돗물을 사용할 경우, 특정 유입구를 선택하여 유량을 공급할 때 분사기의 유량은 분사 차압이 10 bar일 경우 210 g/s 이다.

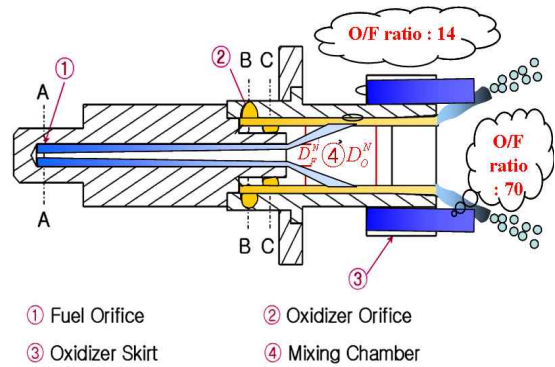
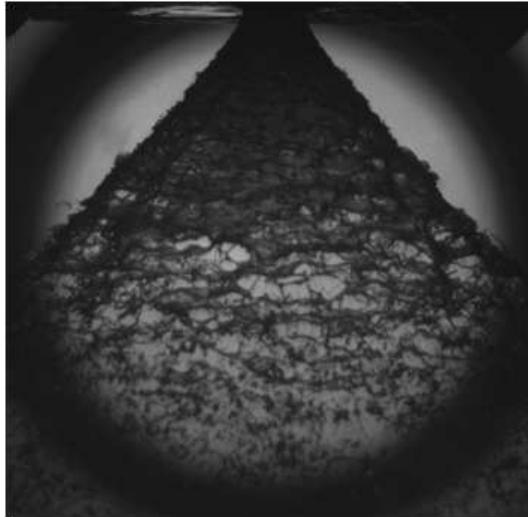


Fig. 5 Swirl injector design

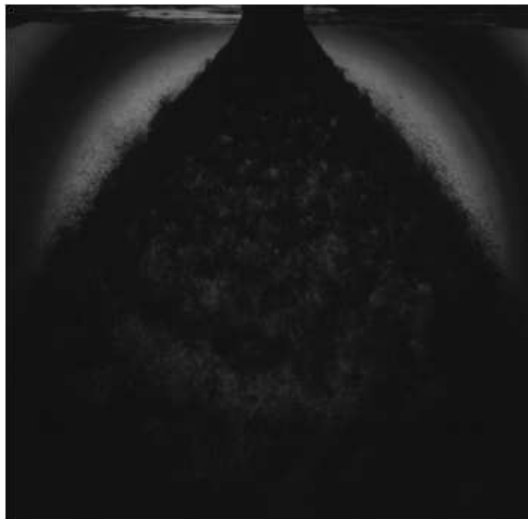
본 연구에서는 고압 챔버 내부에 분사기를 장착한 후 단일 스월 분무를 생성하여 이를 계측하는 실험을 수행하였다. 분무의 주위 기체 압력 Pc를 1 bar 및 10 bar의 두 경우로 변화시킨 후 각 조건에 따른 분무 특성의 변화를 관찰하였다. 이때 분사기 하방 20 mm에서 레이저광이 통과하도록 하여 분무 단면을 계측하였다.

3. 실험 결과

본 연구에서 계측한 스웰 분무의 형상은 다음과 같다.



(a) $P_c = 1$ bar



(b) $P_c = 10$ bar

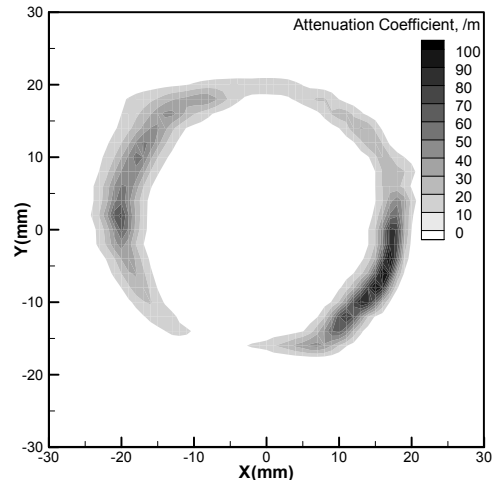
Fig. 6 Pattern of optically dense spray

스웰 분무는 일반적으로 hollow-cone 형상으로 발생하며, 그 외형을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 한편 유량이 큰 분무의 경우 빛이 분무 영역을 통과하는 경로에서 분무 액적의 수밀도 또는 지름이 증가하기 때문에 식 (1), (2)로부터 레이저광의 투과율이 감소함을 예측할 수 있으며,

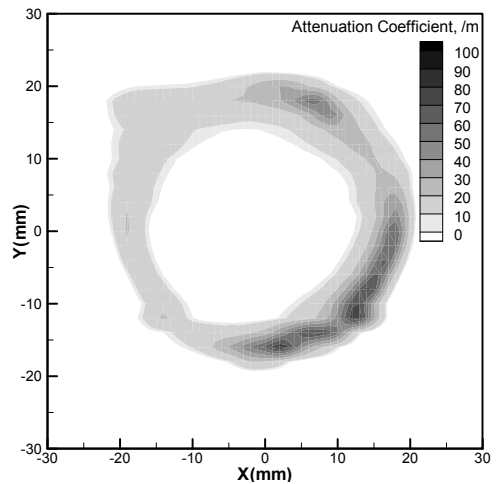
이때 분무가 광학적으로 매우 밀한 특성을 지님을 확인할 수 있다. 또한 주위 기체 압력이 증가할 경우 밀한 정도는 더 커지는 것을 Fig. 6을 통하여 알 수 있다. 따라서 일반적 계측 방법을 사용할 경우, 광학적 신호의 감쇠 효과를 보정해주는 것이 중요하다.

3.1 광학 선형 패턴네이터를 이용한 분무 계측

Figure 7은 광학 선형 패턴네이터를 이용하여 계측한 분무 분포를 보여준다. 이때 분무 영역 내 감쇠 계수 최대값의 10% 이하 값은 그림에서 절삭하였다.



(a) $P_c = 1$ bar



(b) $P_c = 10$ bar

Fig. 7 Planar distribution of spray obtained from Optical Line Patternator

스웰 분무의 단면은 ring 형태일 것으로 예상되며, 분무 주위 압력 P_c 가 1 bar인 경우 광학 선형 패터네이터는 분무 단면을 비교적 원형에 가깝게 재구성하였다. 그러나 $P_c = 10$ bar일 경우 앞서 살펴보았듯이 분무가 보다 밀해지고, 우측에서 좌측으로 레이저광이 분무 영역을 통과하면서 Mie 산란광의 감쇠 효과가 보정이 어려울 정도로 증가한다. 그 결과, 재구성된 분무 분포의 단면은 Mie 산란 이미지의 감쇠에 대한 보정을 충분히 하지 못하였음을 확인할 수 있다.

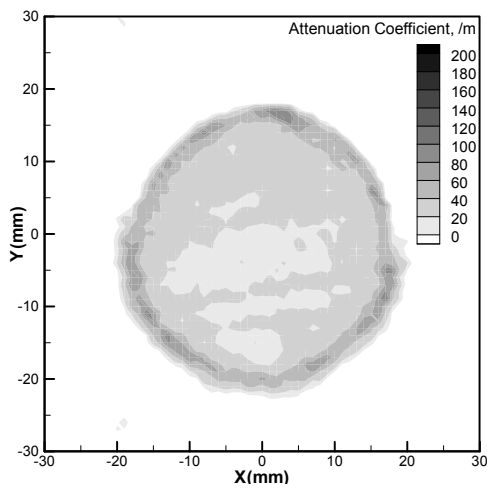
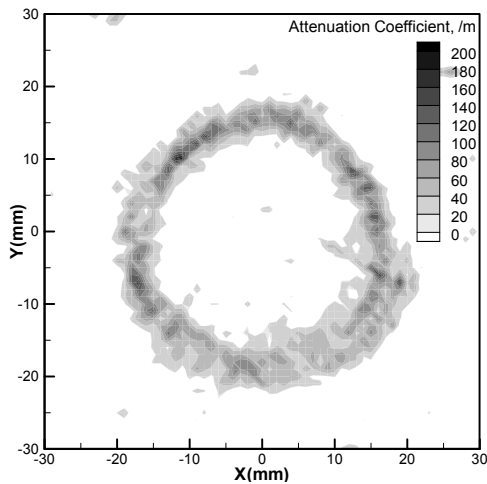
(a) $P_c = 1$ bar(b) $P_c = 10$ bar

Fig. 8 Planar distribution of spray obtained from Optical Tomography

3.2 광학 토모그래피를 이용한 분무 계측

광학 토모그래피 기법을 이용하여 계측한 분무 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 이때 분무 영역 감쇠 계수 최대값의 10% 이하의 값은 그림에서 나타내지 않았다.

광학 토모그래피는 다각도에서 분무 영역에 대한 레이저광의 투과율 정보를 수집 후 분무 단면을 재구성하기 때문에, 신호 감쇠에 따른 보정을 고려할 필요 없이 분무 단면을 비교적 원형에 가깝게 재구성할 수 있었다. $P_c = 1$ bar인 경우, $P_c = 10$ bar 조건에서 분무 단면의 형상과 비교하여 재구성된 중앙 영역의 감쇠 계수 값이 크다.

3.3 계측 기법에 따른 결과 비교

광학 선형 패터네이터 기법을 통하여 측정된 분무 분포와 광학 토모그래피 기법을 사용하여 얻은 분무 분포를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 분무 중앙을 통과하는 동일한 직선을 따라 각 계측 기법을 통하여 얻은 분무의 감쇠 계수 분포 결과를 비교하였다. 이때 레이저광은 우측에서 좌측으로 진행하며 점차 그 세기가 감소한다. 분무가 광학적으로 비교적 덜 밀한 경우, 즉 Fig. 9의 우측 영역 및 $P_c = 1$ bar인 경우 레이저광이 감쇠되는 양이 비교적 적으며, 그 결과 각 기법이 비교적 유사한 결과를 도출함을 확인하였다. 한편, 레이저광이 분무를 상당 부분 통과하여 그 세기가 과도하게 감쇠될 경우인 Fig. 9의 좌측 영역 및 $P_c = 10$ bar인 조건에서, 광학 선형 패터네이터 기법은 감쇠로 인한 분무 영역 재구성의 문제를 충분히 해결하지 못하였음을 알 수 있다. 한편 광학 토모그래피 기법은 광학적으로 매우 밀한 분무를 비교적 대칭적으로 재구성하였다. 그러나 보통 hollow-cone 형상으로 발생하는 스웰 분무의 경우 그 단면이 ring 형상이고 중앙부에서 분무가 거의 없음을 고려할 때, Fig. 9 (a)에서 볼 수 있듯이 $P_c = 1$ bar인 경우 분무 중앙부에서 감쇠 계수 20/m 이상의 잘못된 값을 재구성함을 확인하였다.

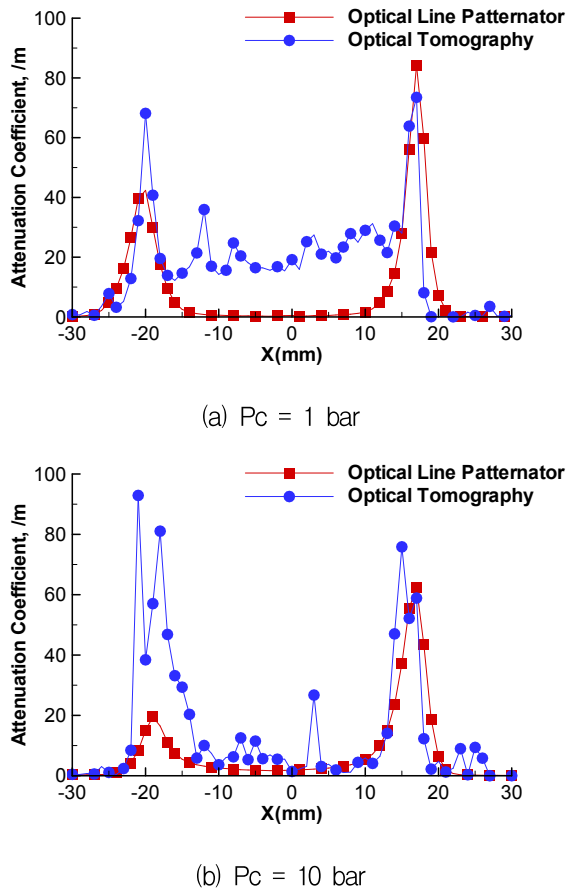


Fig. 9 Results obtained from Optical Line Patternerator (square) and Optical tomography (circle)

4. 결 론

광학적 특성을 이용하여 분무 단면을 계측하였다. 분무 주위의 기체 압력이 상압에서 고압으로 증가함에 따라, 분무는 광학적으로 밀하게 변화함을 확인할 수 있다. 분무가 광학적으로 밀해지면서 분무를 통과하는 레이저광의 감쇠율이 증가하며, 그 결과 분무로부터 발생하는 Mie 산란 신호의 세기 및 분무를 통과하면서 CCD 카메라에 전달되는 산란 신호의 전달률이 크게 감소한다. 따라서 광학 선형 패터네이터를 이용하여 분무 단면을 측정할 경우 Mie 산란 신호의 감쇠 효과를 보정하는 데 문제가 발생하여 분무를 정밀하게 계측하지 못한다. 한편, 광학 토모그래피 기법의 경우 여러 각도에서 분무를 통

과하는 레이저광의 투과율 정보를 측정하며 Mie 산란 신호를 이용하지 않기 때문에 신호 감쇠의 보정 문제를 고려할 필요가 없다. 또한 분무 단면을 재구성하는 데 MLE 알고리즘을 사용하여 보다 정확한 분무 단면의 감쇠 계수 분포를 도출할 수 있다. 그러나 알고리즘의 한계로 인하여 부정확한 결과를 얻는 경우가 발생한다. 본 연구를 통하여 MLE 알고리즘을 이용한 토모그래피 기법은 광학 선형 패터네이터 기법에 비하여 정확하게 분무 분포를 측정할 수 있음을 확인하였으나, 보다 정밀한 결과를 얻기 위하여 부정확하게 계산된 감쇠 계수 값을 소거하는 방법을 찾아야 할 것이다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부의 우주기초원천기술사업(S10801000194-08A0100-19410) 및 항공우주신기술연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Ruff, G.A. and Faeth, G.M., "Noninvasive measurement of the structure of dense sprays," in Recent Advances in Spray Combustion: Spray Atomization and Drop Burning Phenomena Vol I, K. K. Kuo Ed., AIAA, Virginia, 1996, pp.263-296
2. Linne, M.A., Paciaroni, M., Gord, J.R., and Meyer, T.R., "Ballistic Imaging of the Liquid Core for a Steady Jet In Crossflow," Applied Optics, Vol. 44, No. 31,, 2005, pp.6627-6634
3. Brown, C., McDonnell, V. and Talley, D., "Accounting for laser extinction, signal attenuation, and secondary emission while performing optical patterneration in a single

- plane," ILASS-America 2002, 2002
4. Abu-Gharbieh, R., Persson, J.L., Försth, M., Rosén, A., Karlström, A., and Gustavsson, T., "Compensation Method for Attenuated Planar Laser Images of Optically Dense Sprays," *Applied Optics*, Vol. 39, No. 8, 2000, pp.1260-1267
 5. Koh, H., Jung, K., Yoon, Y., Lee, K. and Jeong, K.-S., "Development of Quantitative Measurement of Fuel Mass Distribution Using Planar Imaging Technique," *Journal of Visualization*, Vol. 9, No. 2, 2006, pp.161-170
 6. Koh, H., Kim, D., Shin, S. and Yoon, Y., "Spray characterization in high pressure environment using optical line patternator," *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, 2006, pp.2159-2167
 7. Ramachandran, G.N. and Lakshminarayanan, A.V., "Three-dimensional reconstruction from radiographs and electron micrographs: application of convolutions instead of Fourier transforms," *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, Vol. 68, No. 9, 1971, pp.2236-2240
 8. Santoro, R.J., Semerjian, H.G., Emmerman, P.J. and Goulard, R., "Optical Tomography for Flow Field Diagnostics," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, No. 7, 1981, pp.1139-1150
 9. Shepp, L.A. and Vardi, Y., "Maximum Likelihood Reconstruction for Emission Tomography," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol. MI-1, 1982, pp.113-122
 10. Lim, j., Sivathanu, Y., Narayanan, V., and Chang, S., "Optical patteration of a water spray using statistical extinction tomography," *Atomization and Sprays*, Vol. 13, 2003, pp.27-43
 11. Wang, G., Deljouravesh, R., Sellens, R., Olsen, M. and Bardou, M., "An optical spray pattern analyzer," *ILASS-Americas '97*, 1997
 12. Yeh, C.-N., Kosaka, H. and Kamimoto, T., "Measurement of drop sizes in unsteady dense sprays", in *Recent Advances in Spray Combustion: Spray Atomization and Drop Burning Phenomena Vol I*, K. K. Kuo Ed., AIAA, Virginia, 1996. pp.297-308
 13. Partel, R., "Maximum likelihood-expectation reconstruction with limited dataset for emission tomography," *Master Thesis, University of Akron, Ohio*, 2007
 14. 양준호, 최성만, "로켓 산화제 과잉 예연소기 분사기의 성능특성 연구," *한국추진공학회지*, 제11권 1호, 2007, pp.57-63
 15. 조성호, 임지혁, 윤영빈, 최성만, 한영민, "고압 환경 하에서의 분무 분포 측정," *한국가시화정보학회지*, 제6권 1호, 2008, pp.59-65