한국가시화정보학회지, 제6권, 제1호, (2008) 59~65
<일반논문> (투고일: 2008.06.18/심사완료일: 2008.06.27)

고압 환경 하에서의 분무 분포 측정

조성호* · 임지혁* · 윤영빈† · 최성만** · 한영민***

Spray Distribution Measurement at High Ambient Pressure

Seongho Cho, Ji-Hyuk Im, Youngbin Yoon, Seongman Choi and Youngmin Han

Abstract. Distribution of spray was measured. Optical Line Patternator (OLP) was used to measure the planar distribution of the spray from a swirl-coaxial type injector. Ambient pressure was varied and injection pressure was fixed in experiment. As ambient pressure increased, spray distribution was changed from hallow cone to solid cone shape, and spray angle was decreased. Limitation in measuring dense spray was found at high ambient pressure condition.

Key Words : Spray(분무), Imaging Technique(이미지기법), High Ambient Pressure(고압환경), Extinction(감쇠), Mie Scattering(Mie 산란)

1. 서 론

액체 연료를 사용하는 연소 추진 기관에 있어서 연료 분사는 매우 중요하다. 분사기를 통하여 분사된 분무의 액적 크기 및 유량 분포에 따라 연소기 내의 화염 발생 위치,연료 혼합 효율 등이 변화하고 그 결과 연소 특성이 변화하게 된다. 또한 액체 로켓 엔진의 경우 연료 액적의 분포 상태가 연소불안정 현상에도 영향을 줄 수 있기 때문에, 연소기 내부의 분무 특성을 계측하여 정량적으로 파악할 필요가 있다. 상압 조건에서 분무 단면의 분포 형상을 파악하기 위하여 분무장 내에 수집관을 삽입하여 직접 유량을 측정하는 기계적 패터네이터(mechanical patternator)와, Malvern particle analyzer, PDPA 등의 광학 기법, 2차원 단면에서유량 분포를 빠르게 파악할 수 있는 광학 패터네이터(optical patternator), 광학 토모그래피(optical tomography)[1] 등의 방법이 개발되었다.

액체 로켓 엔진의 경우 내부 압력이 높은 연소실 내에 액체 연료가 분사되는데, 이 경우 다른 조건이 모두 동일한 경우에도 상압에서의 분무 특성과 많은 차이를 보인다. 고압 조건에서의 분무 특성을 파악하기 위하여 압력을 유지할 수 있는 챔버가 필요하고, 이때 상압 조건에서의 분무 계측에 비하여 실험 상 제약이 많아진다. 고압 상황에서의 분무 분포를 파악하기 위하여 챔버 내에 기계적 패터네이터를 사용하는 방법[2]과 X-선 토모그래피(X-ray tomography)[3]를 이용하는 방법이 사용되었다.

Koh[4]는 고압에서의 분무 분포를 측정하는 방법으로, 광학 선형 패터네이터(Optical Line Patternator)를 이용한 분무 단면 계측 방법을 제안하였다. 광학 선형 패터네이터는 기존의 광학 패터네이터와 달리 평면광이 아닌 직선광을 사용하기 때문에, 평면광을 광원으로 사용할 시 발생하는 다중 산란에 의한 오차를 감소시킬 수 있다[5]. 또한, 카메라를 이용하여 레이저 광선이 지나가는 경로의 이미지를 처리함으로써 빠른 시간 내에 분무를 측정하며, 주어진 데이터로부터 간단한 방법으로 분무 분포를 재구성할 수 있다.

본 연구에서는 광학 선형 패터네이터를 이용, 분무 주위 압력 조건을 변화시켰을 때 동축-스월형 분사기를 통하여 발생하는 분무의 단면 분포를 측정하였다.

†서울대학교 기계항공공학부, 항공우주신기술연구소
E-mail : ybyoon@snu.ac.kr
*서울대학교 기계항공공학부 대학원
**전북대학교 항공우주공학과
***한국항공우주연구원 연소기그룹

2. 실험 기법, 장치 및 조건

2.1. 실험 기법

광학 선형 패터네이터는 레이저 광선을 분무에 조사

하여, CCD 카메라 및 광검출기를 통하여 각각 Mie 산란광 및 레이저 광선의 투과율을 측정, 분무 분포를 측정하는 장치이다. 분무에 레이저 광선을 조사하였을 때 발생하는 Mie 산란과 레이저 광선의 투과율에 대한 데이터를 얻은 후 이를 처리하여 분무 분포를 재구성한다.

일반적으로 Beer-Lambert 법칙에서 감쇠 계수 γ는 입사광의 파장, 광학 장비, 매질 특성 등에 영향을 받는다. 입사광의 파장보다 큰 구형 액적에 대하여 감쇠 계수는 액적 지름 D의 제곱, 즉 액적의 단면적에 비례한다고 근사할 수 있다[1]. 많은 수의 액적이 존재하는 분무의 경우, 다중 산란을 무시할 수 있다면 분무장 내 액적의 면적 분포를 얻을 수 있으며[6], 산란 신호 또한 액적 단면적 분포에 비례함을 알 수 있다[7].

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

$$G = c_s I \int N(D) D^2 dD \tag{2}$$

이때 c_{ext}는 감쇠 효율 관련 계수, c_s는 산란 및 검출부 효율 관계 계수이다.

분무 평면을 격자로 나눈 후, 각 격자 내에서 감쇠 계수 값이 같다고 가정하면, 측정한 투과율과 Mie 산란 신호의 값으로부터 전체 영역의 감쇠 계수를 계산할 수 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 레이저 광선이 분무를 통과하면서 감쇠되며, 각 격자는 감쇠된 레이저 광선을 받아 Mie 산란 신호를 방출한다.

$$\sum_{i=1}^{n} \gamma_{i,j} L_{i,j} = -\log(I_{n,j}/I_{0,j}) \tag{3}$$

$$(c_s/c_{ext}) I_{0,j} \exp\left[-\sum_{h=1}^{i-1} \gamma_{h,j} L_{h,j}\right] \gamma_{i,j} = G_{i,j} \tag{4}$$

식 (3), (4)에서 $L_{i,j}$는 조사하는 입사광의 간격 및 분무 평면에서의 격자를 생성하는 조건에 의하여 결정되는 값이다. $L_{n,j}/I_{0,j}$는 입사광이 격자의 j번째 줄을 지나는 경우의 투과율로, 분무 이전 및 분무 중의 평면을 통과하는 입사광의 강도를 비교하여 알아낼 수 있다. $G_{i,j}$는 분무의 Mie 산란 신호의 강도이다.

한편, 방출된 Mie 산란 신호는 분무 영역의 각 격자를 지나면서 다시 감쇠되어, 카메라는 본래의 신호보다 작은 값을 받아들이게 된다. 따라서 다음과 같이 신호 감쇠를 우선 보정해 주는 작업이 필요하다.

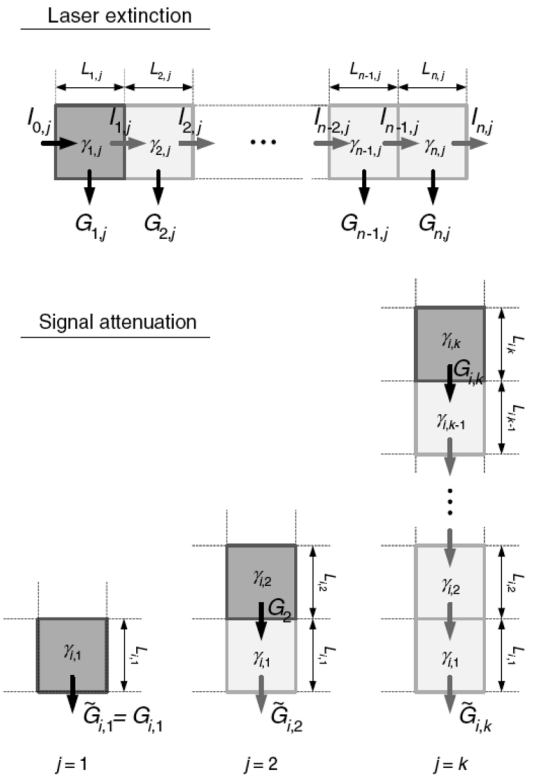


Fig. 1. Algebraic Reconstruction Technique (ART).

$$G_{i,j} = \tilde{G}_{i,j} \exp\left[-\sum_{k=1}^{j-1} \gamma_{i,k} L_{i,k}\right] \tag{5}$$

이러한 과정을 통하여 전체 측정 영역에 대하여 감쇠 계수를 구할 수 있으며, 감쇠 계수 분포로부터 분무장 내 액적의 면적 분포, 본래의 Mie 산란 신호 등을 얻을 수 있다.

2.2. 실험 장치 및 조건

실험에 사용된 장치 구성도는 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 고압 챔버 내에 분사기를 장착한 후, 분사기를 통하여 발생하는 분무 분포를 광학 선형 패터네이터를 이용하여 관측하였다.

광학 선형 패터네이터의 광원으로 쓰이는 레이저 광선은 LEXEL Ar-Ion laser(514.5 nm)로부터 생성되는 직선광을 이용하였으며, 광선이 평면 거울에 반사되어 분무 영역을 지나도록 하였다. 분무 영역을 지난 레이

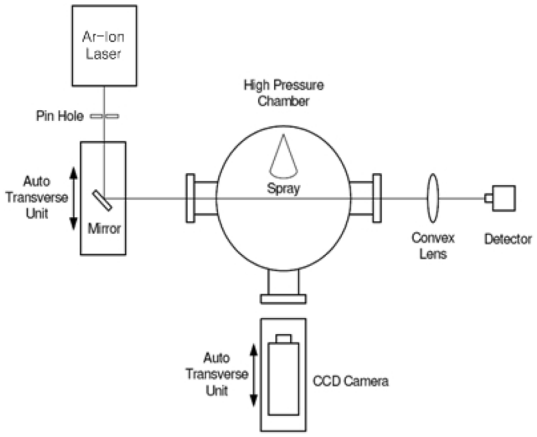
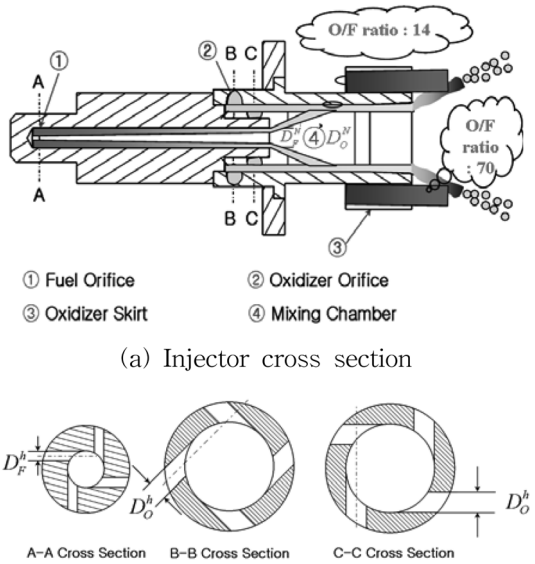


Fig. 2. Schematics of experimental setup

저 광선은 볼록 렌즈를 통과하여, 렌즈의 초점거리에 있는 광검출기로 들어가도록 하였다. 레이저 광선이 분무를 지나면서 발생하는 Mie 산란 신호는 CCD 카메라(KODAK ES 1.0 1008×1008)를 이용하여 촬영하였으며, 레이저 광선의 세기는 광검출기 및 National Instrument사의 DAQ Board를 이용하여 기록함으로써 레이저 광선의 투과율을 알아내었다. 이때 카메라와 평면 거울을 자동 이송 장치로 이동시켜, 광선이 분무 영역의 모든 부분을 통과할 수 있도록 하였다.

실험을 수행하면서, 분사기 출구 아래쪽 3 cm 위치, 폭 6 cm 정도의 분무 영역을 2 mm씩 30개 구간으로 나누어 측정하였으며, 레이저 광선의 투과율과 Mie 산란 신호를 동시에 측정하였다. 이때 각 영역에 대하여 Mie 산란 신호를 60장 촬영하여 이를 평균한 이미지를 분무 분포 재구성에 사용하였다.

본 연구의 분무 특성을 측정하는 대상으로, KSLV 과제를 통하여 설계된 동축-스월 타입 분사기가 사용되었다. 자세한 형상은 Fig. 3과 같다. 분사기의 형상은 러시아의 액체로켓엔진 RD-170의 예연소기에 사용되는 분사기를 참고하여 설계되었다. 분사기 내부 오리피스에서 액체 연료와 산화제가 동축 스월 형식으로 공급되며, 이때 산화제-연료 혼합비는 약 14이다. 혼합된 추진제가 리세스 영역을 지나 노즐 외부로 배출될 때 스커트를 통하여 추가적으로 산화제가 공급되어, 최종적으로 산화제-연료 비는 70이 된다. 분사기에서 공급하는 유량은 연료 공급압력 25 kgf/cm^2, 산화제 공급압력 10 kgf/cm^2 조건에서 연료의 경우 0.015 kg/s, 산화제의 경우 분사기 내부에서 0.21 kg/s, 스커트에서 0.82 kg/s이다.



(a) Injector cross section

(b) fuel/oxidizer injet cross section

Fig. 3. Swirl-coaxial injector design.

본 실험에서는 챔버 내부 주위 기체의 압력을 1 bar, 5 bar, 10 bar, 20 bar의 4가지 경우로 변화시키면서 분무 분포를 관찰하였다. 각 주위 기체 압력에 대하여 산화제 단독 분무의 경우와 연료 및 산화제 동축 분무의 경우 분포를 관측하였다. 모의 추진제로 물을 이용하였으며, 분사 압력은 챔버 내부 기체 압력에 대하여 연료의 경우 25 bar, 산화제의 경우 10 bar를 유지하도록 하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1. 산화제 분무 분포 계측

주위 기체 압력에 따른 산화제의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4를 통하여, 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무가 수축되어 안쪽으로 분무가 몰리게 되는 것을 확인할 수 있다. 분무가 수축되는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 분사기에 의하여 발생하는 스월 분무는 hollow cone 형태로 분사되고, 분사된 액막의 분열 과정에서 주위 기체가 액막을 따라가게 된다. 이때 cone을 경계로 바깥쪽의 기체는 안쪽에 비하여 부피가 매우 커서 압력이 챔버 압력과 동일하게 유지되지만, cone 안쪽의 기체는 액막에 의해 그 부피가 제

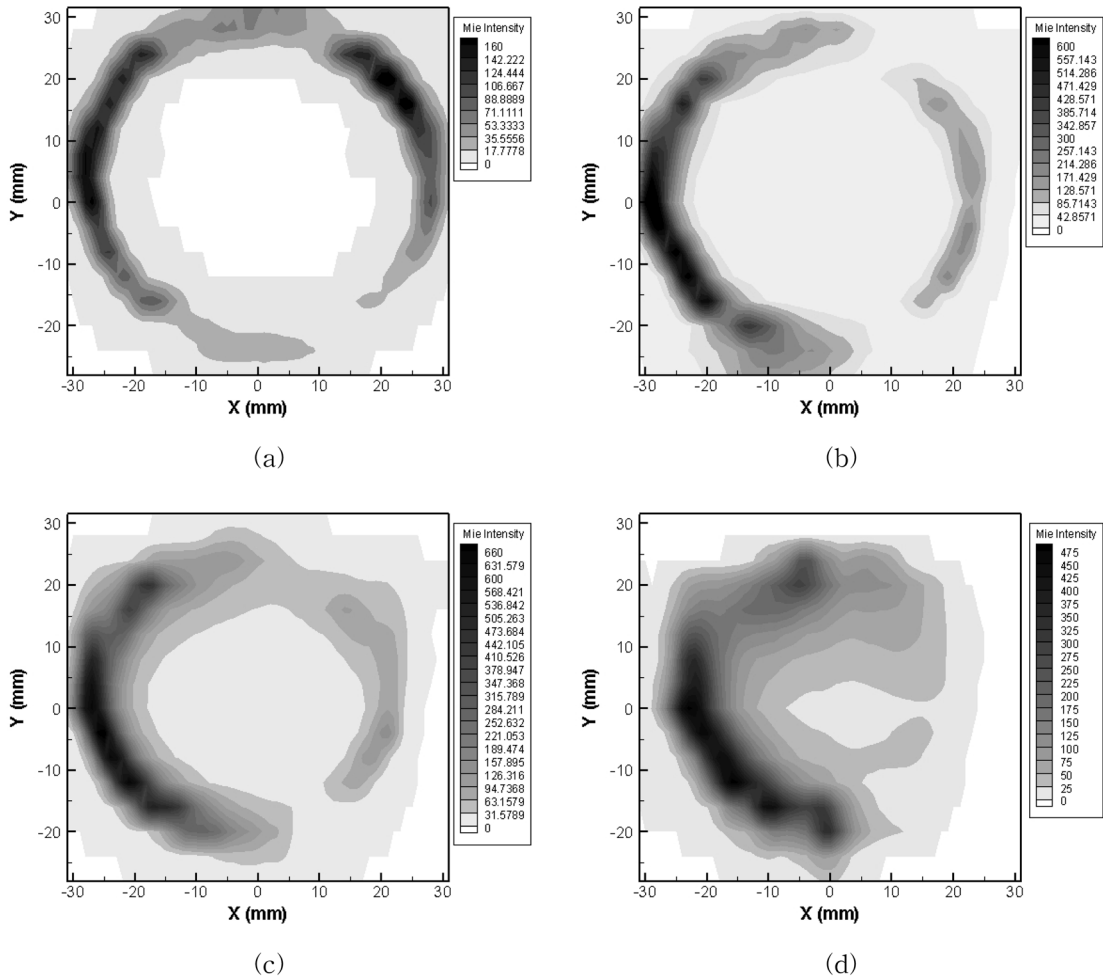


Fig. 4. Planar distribution of spray in case of injecting oxidizer only (delta P=10 bar) with chamber pressure (a) Pc=1 bar (b) Pc=5 bar (c) Pc=10 bar (d) Pc=20 bar

한되고, 기체가 액막을 따라가게 되면서 압력이 감소하여 cone 내부 기체 압력은 액막의 바깥쪽의 압력보다 낮아지게 된다. 그 결과 액막이 안쪽으로 수축된다. 따라서 주위기체 압력이 증가하면 상압에서는 hollow cone 형태를 유지하던 분무가 solid cone 형태의 분무로 바뀌게 된다.

주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무가 밀해지면서 레이저 광선의 감쇠가 크게 증가할 것임을 쉽게 예측할 수 있다. 특히, 내부 기체 압력이 높을 경우에서는 크게 감쇠보정이 되지 않음을 확인할 수 있다. 이는 예연소기용 분사기 특성에 따라 산화제의 유량이 매우 크기 때문에 분무가 너무 밀하기 때문이며 큰 유량에도 감쇠보정을 정확하게 할 수 있도록 Optical Line Patternator 기법을 수정할 필요가 있다고 판단된다.

3.2. 연료-산화제 동축 분무 분포 계측

Fig. 5는 주위 기체 압력에 따른 동축 분무의 분포를 보여준다. 동일한 주위 기체 압력에서 산화제의 분무 분포에 비하여 동축 분무의 분무 분포가 보다 수축되어 있음을 알 수 있다. 동축 분무의 경우에는 분사기 노즐 안쪽에서 연료와 산화제가 서로 충돌하면서 운동량을 잃게 되기 때문에, 산화제만 분사되었을 경우보다 운동량이 감소하여 분무각이 감소하고 분무는 중앙으로 모이게 된다. 또한 동일한 주위 기체 압력에서 산

화제의 분무분포와 비교하여 보았을 때 레이저 광선 및 Mie 산란 신호의 감쇠가 더 심함을 확인할 수 있다. 이는 연료의 유량이 더해지고 고압일수록 그 감쇠 효과가 더 커지기 때문이며 또한 산화제에 비해 더 많은 유량이 더 작은 부피에 모이기 때문에 감쇠가 심해지기 때문이라 보인다.

3.3. 결과 분석

Fig. 4 및 Fig. 5를 통하여 주위기체 압력 변화에 따른 분사기의 분무 분포 특성을 파악하였다. 분사 조건에 따라, 분사 유체의 운동량 감소에 따른 분무각 감소 효과 및 분무 액막에 의한 주위 기체 압력의 변화에 따른 분무 분포의 변화를 확인하였다. 또한 챔버 내부 주위기체 압력이 증가함에 따라 광학 선형 패터네이터의 측정 한계가 발생함을 파악하였다.

Fig. 6은 유사한 분사기에 대하여 상압 조건에서 계측 방법을 달리하여 얻은 분무 분포를 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 기존의 광학 패터네이터[8]를 사용하여 계측한 결과이고, (b)는 광학 선형 패터네이터를 이용하여 계측한 결과이다. 두 결과를 비교하였을 때, 실제 분무 형상이 thin hollow cone에 가깝다는 것을 고려하면 광학 선형 패터네이터가 더 실제와 유사하게 분무 영역을 계측함을 알 수 있다. 이 결과는 광학 선형 패터네이터가, 실제로 광학 패터네이터의 오차 원인이 되는

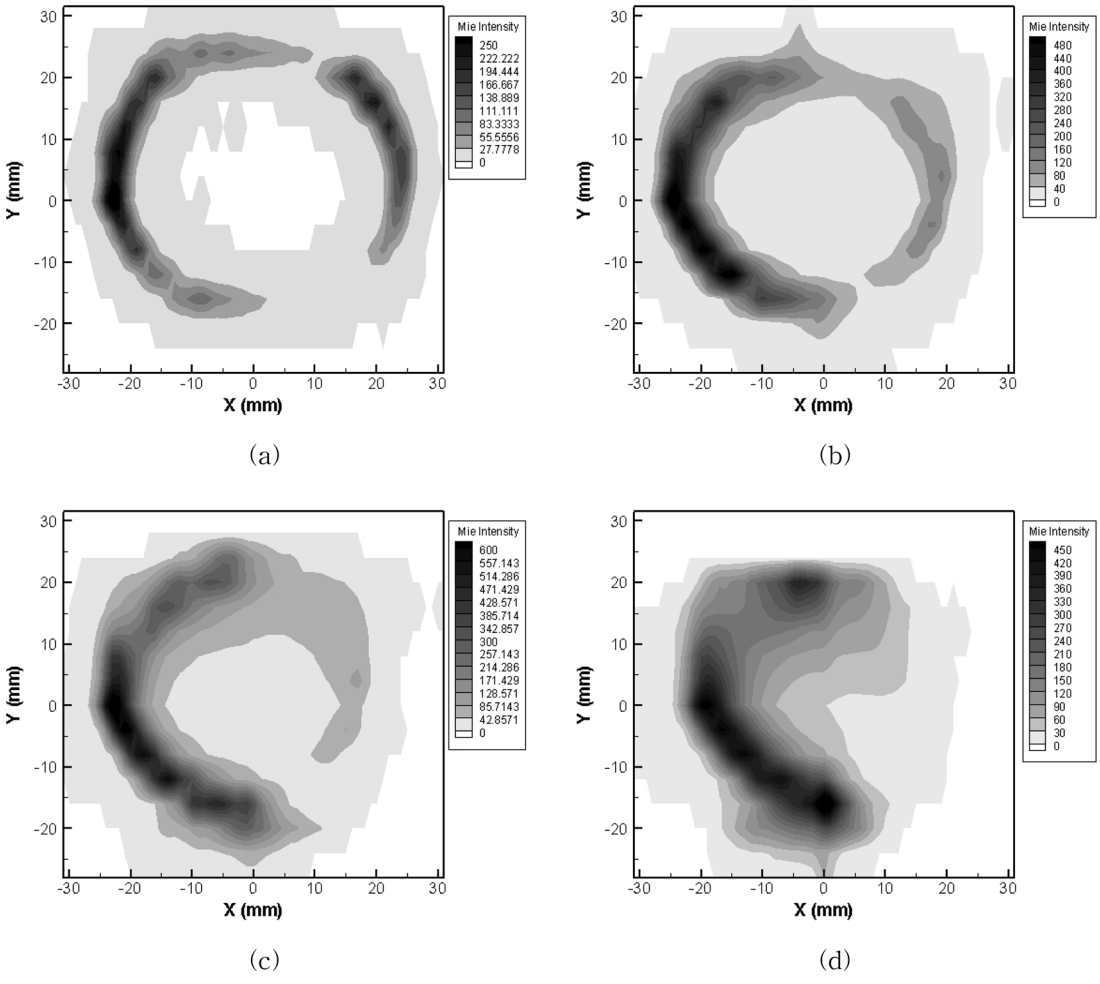


Fig. 5. Planar distribution of spray in case of injecting both fuel and oxidizer (ΔP=25 bar for fuel and 10bar for oxidizer) with chamber pressure (a) Pc=1 bar (b) Pc=5 bar (c) Pc=10 bar (d) Pc=20 bar

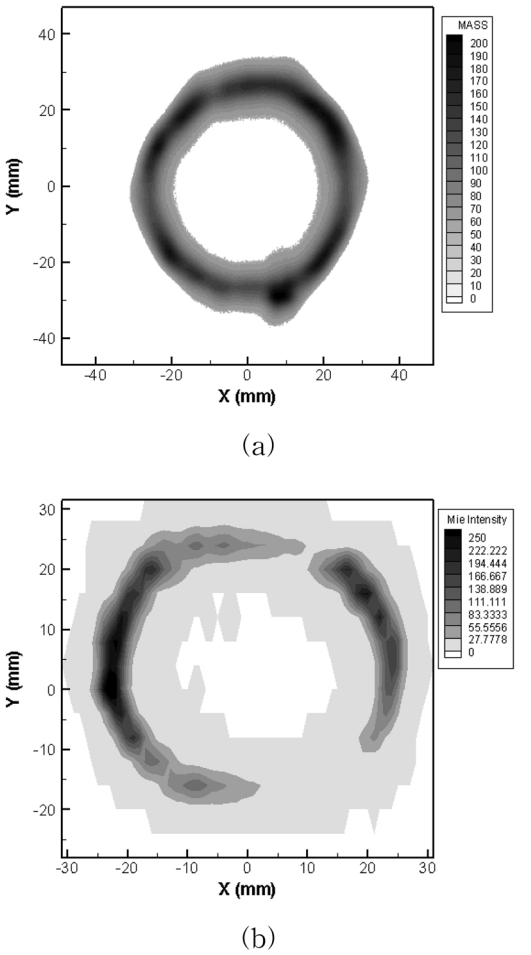


Fig. 6. Planar distribution of coaxial spray at atmospheric pressure measured by (a) Optical Patternator (b) Optical Line Patternator

다중 산란에 의한 영향을 적게 받음을 알려준다. 따라서 유량이 많은 분무를 계측할 경우 광학 선형 패터네이터가 광학 패터네이터에 비하여 뛰어난 성능을 보여줌을 예측할 수 있다.

한편, Fig. 4 및 Fig. 5의 (c) 및 (d)의 경우, 즉 주위 기체 압력이 10 bar 이상의 고압일 경우에 광학 선형 패터네이터가 정상적으로 감쇠된 Mie 산란 신호를 보정해 주지 못함을 확인할 수 있다. 그 이유는 레이저 광선이 밀한 분무 영역을 통과하면서 감쇠량이 많아지기 때문이라고 짐작된다. 특히, 레이저가 입사되는 왼쪽 절반의 영역은 비교적 신호 보정이 잘 되었으나 오른쪽 절반의 영역은 신호 보정이 거의 되지 않았음을 관찰할 수 있다. 이는, 분무에서 발생한 Mie 산란 신호가 분무 영역을 진행하면서 감쇠되는 효과보다는 입사되는 레이저 광선이 분무 영역을 지나면서 감쇠되어 강도가 약한 Mie 산란 신호를 발생시키는 효과가 더 크다고 생각해 볼 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 데이터를 통한 재구성 방법 및 레이저 광선을 분무에 입사하는 방법이 개선되어야 할 것이다.

4. 결 론

고압 조건에서 광학 선형 패터네이터 기법을 이용하여 분사기의 분무 분포 특성을 파악하였다. 주위 압력을 변화시키면서 산화제 및 연료/산화제 동축 분무 형상을 계측한 결과, 5 bar 이상의 주위 압력 조건에서 주위 압력이 증가함에 따라 분무 단면이 뚜렷한 hollow cone 형상에서 점차 solid cone과 유사하게 변화하고, 분무각이 감소하는 것을 관찰하였다. 또한 기존의 광학 패터네이터와 비교하여 다중 산란에 의한 영향을 적게 받음을 확인하였다. 한편, 분사기의 유량이 매우 크기 때문에 분무에 입사되는 레이저 광선의 감쇠율이 매우 크며, 그 결과 Mie 산란 신호 세기가 크게 감소하여 카메라로 관측되지 않는 문제가 발생하였다. 이러한 문제는 특히 챔버 압력이 높을수록 심각하게 발생하였으며, 식 (5)를 적용한 후보정 기법을 이용하였으나 해결할 수 없었다. 따라서 이러한 문제를 해결할 수 있는 개선책이 필요한 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 소형위성발사체(KSLV-I) 개발 사업(Ⅴ)의 세부과제 “예연소기용 산화제 과잉 분사기의 설계인자 특성 연구”의 일환으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1) Lim, J., Sivathanu, Y., Narayanan, V., and Chang, S., 2003, “Optical patternation of a water spray using statistical extinction tomography,” Atomization and Sprays, Vol. 13, pp.27-43.
2) Strakey, P.A., Talley, D.G., and Hutt, J.J., 2001, “Mixing characteristics of coaxial injectors at high gas/liquid momentum ratios,” Journal of Propulsion

and Power, Vol. 17, No. 2, pp.402-410.

3) Ruff, G.A. and Faeth, G.M., 1995, “Nonintrusive measurement of the structure of dense sprays,” Recent Advances in Spray Combustion: Spray Atomization and Drop Burning Phenomena, Vol.I, pp.263-296.
4) Koh, H., Kim, D., Shin, S. and Yoon, Y., 2006, “Spray characterization in high pressure environment using optical line patternator,” Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp.2159-2167.
5) 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.
6) Wang, G., Deljouravesh, R., Sellens, R.,Olsen, M. and Bardon, M., 1997, “An optical spray pattern analyzer,” ILASS-Americas '97.
7) Yeh, C.-N., Kosaka, H. and Kamimoto, T., 1995, “Measurement of drop sizes in unsteady dense sprays,” Recent Advances in Spray Combustion: Spray Atomization and Drop Burning Phenomena, Vol.I, pp. 297-308.
8) Koh, H., Jung, K., Yoon, Y., Lee, K. and Jeong, K.-S., 2006, “Development of Quantitative Measurement of Fuel Mass Distribution Using Planar Imaging Technique,” Journal of Visualization, Vol. 9, No. 2, pp.161-170.