

토모그래피 기법을 이용한 스월 인젝터의 분무 분포 계측

박구정* · 조성호* · 정재묵* · 김태성* · 윤영빈*

Measurment of Spray Distribution of Swirl Injector by Tomography method

Gujeong Park* · Seongho Cho* · Jaemook Chung* · Taesung Kim* · Youngbin Yoon*

ABSTRACT

This study constructed the spray distribution by the Tomography method at high pressure condition. The constructed spray distribution was compared with the images by Indirect Photography method so that the spray size was confirmed and took the boundary of the distribution. It was confirmed that the Tomography applies to construct the distribution at high pressure.

초 록

고압의 주위 압력 영역에서 토모그래피 기법을 이용하여 분무의 단면을 구성하였다. 구성된 분무 단면은 Indirect Photography method를 이용한 이미지와 함께 비교되어 분무 단면의 크기를 확인하였고 토모그래피에 의해 재구성된 단면의 경계를 설정할 수 있었다. 이를 통해 고압의 주위 압력 영역에서도 토모그래피를 적용하여 분무를 구성할 수 있다는 것을 확인하였다.

Key Words: Swirl Injector(스월형 분사기), Tomography(토모그래피), High Pressure Condition(고압 환경 조건), Spray Angle(분무각), Spray Cone Size(분무 크기)

1. 서 론

액체로켓에 사용되는 추진제들은 고압의 영역에서 분무되어 연소된다. 분사기에서 분무된 추진제의 분무 특성은 연소 현상에 영향을 주기 때문에 이와 관련된 연구가 많이 이뤄지고 있다. 분무의 단면 분포를 확인하면 추진제의 밀한 부

분을 알 수 있어 연소 현상의 예측에 많은 도움이 된다.

분무 단면을 측정하기 위하여 기계적 패턴레이터[1], Optical Line Patternator[2], Planar Liquid Laser Induced Fluorescence(PLLIF)[3] 등이 사용되었지만 고압 분무 조건에서 적용하기에는 한계점들을 가지고 있었다[4].

본 연구에서는 이전 연구[4]보다 더 높은 고압의 조건에서 토모그래피 기법을 적용하여 분무 단면을 얻었고 Indirect Photography method를 통하여 분무 사진을 획득하여 분무각을 측정하

* 서울대학교 기계항공공학부

** 중신회원, 서울대학교 기계항공공학부

† 교신저자, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

였으며 Optical Line Patternator와의 결과와 분무 단면을 비교하였다

2. 실험 기법과 장치 및 방법

2.1 실험기법

분무 단면을 측정하기 위하여 토모그래피 기법을 사용하였다. 토모그래피 기법은 레이저 빔이 분무에 의해서 감쇠되는 비를 측정하여 분무 단면을 재구성하는 기법이고 분무 단면을 재구성하는 방법으로는 최대 유사도 추정법 (Maximum Likelihood Estimation, MLE)을 사용하였다[5][6].

MLE 기법은 아래의 식을 사용하여 분무장 내에서의 감쇠 계수를 구할 수 있다[5].

$$\gamma_i^{(n)} = \gamma_i^{(n-1)} \sum_j \left(\frac{p_{ij} n_j}{\sum_k \gamma_k^{(n-1)} p_{kj}} \right), \quad n = 1, 2, \dots$$

여기서 γ_i 는 i 영역에서의 감쇠계수이며, n_i 는 분무를 통과하는 레이저의 감쇠율을 나타낸다. p_{ij} 는 레이저가 분무 영역 i 를 통과하여 detector j 에 도달하는 경로의 길이이다.

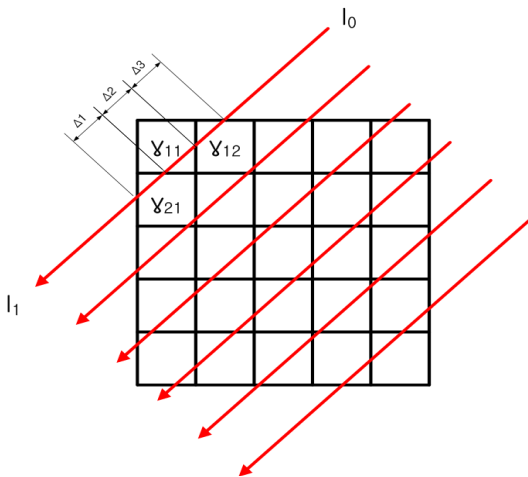


Fig. 1 Geometry of spray field for MLE reconstruction algorithm

Figure 1은 각 분무 영역을 지나는 레이저 광의 경로 길이에 대한 정의를 나타낸다. 이때 레이저 광의 감쇠율을 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$-\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = \Delta_1 \cdot \gamma_{21} + \Delta_2 \cdot \gamma_{11} + \Delta_3 \cdot \gamma_{12}$$

분무는 일반적으로 중심에 대해 대칭이라고 생각되기 때문에 분무 영역을 원형으로 구성하여 분무 분포를 재구성한다. 하지만 재구성 영역이 실제 분무 영역보다 충분히 크면 분무 영역 형상이 분무를 재구성하는데 영향을 주지 않을 것이라고 예상 할 수 있다[4].

2.2 실험 장치 및 방법

본 실험에서는 이전 연구[7]에서 사용한 동축-스웰 타입 분사기를 사용하였다. 분사기의 형상은 Fig. 2와 같으며 산화제 오리피스만을 사용해 단일 스웰 분무를 생성하여 실험하였다. 모사 추진제로 물을 사용하였으며 실험은 조건은 분사차압 10 bar, 분사 유량 210 g/s이다. 그리고 주위 기체 압력을 1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar로 달리 하며 실험을 하였다. 레이저 광을 분사기 하방 20 mm를 지나가게 하여 분무 단면을 측정하였다.

이전 연구[7]에서는 느린 속도로 움직이는 수평 이송 장치를 이용하여 레이저를 1 mm씩 이동하며 측정을 하였기 때문에 분무를 측정할 때

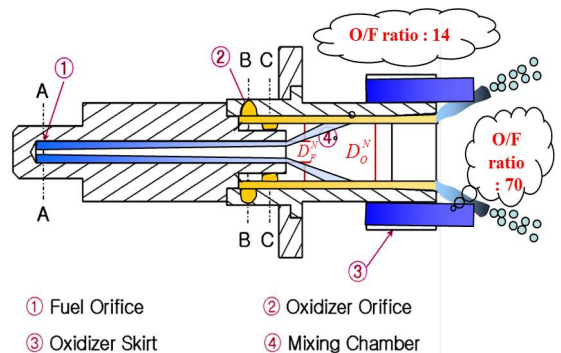


Fig. 2 Swirl-coaxial Injector design

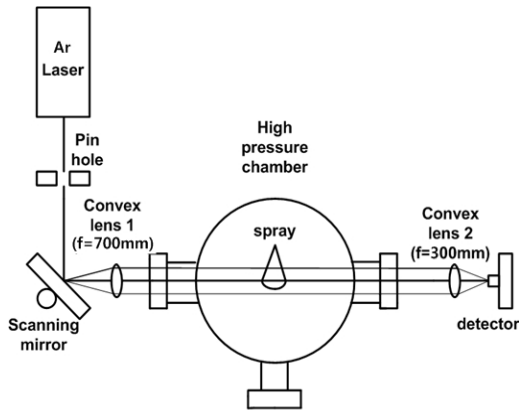


Fig. 3 Schematic of Optical Tomography

오랜 시간이 걸렸다. 따라서 측정 시간을 줄이기 위하여 Fig. 3과 같이 실험 장치를 구성하여 실험을 수행하였다. 레이저는 아르곤(Ar) 레이저를 이용하였으며 General Scanning INC.의 G325DT 스캐닝 미러를 통하여 레이저 광이 분무를 스캔할 수 있게 구성하였고 레이저 광이 스캐닝 미러에 도달하기 전에 핀홀을 통하여 레이저 광의 크기를 줄여주었다. 스캐닝 미러에서 반사된 레이저 빔은 초점 길이가 700 mm인 볼록렌즈를 통과하여 분무를 지난 후 초점길이 300 mm인 볼록 렌즈를 거쳐 Thorlabs의 DET100A/M photodetector에 도달하여 토모그래피에 필요한 신호값을 얻게 된다. 이 때 고압 챔버 내의 분사기를 10도씩 회전시켜 18개의 각도에서 분무 감쇠율을 측정하였다. 분무 측정 영역은 60 mm로 정하였고 스캐닝 미러와 photodetector는 National Instrument의 Labview program에 의해서 제어되었다.

토모그래피 기법과의 비교를 위해 Backlight Photography method를 이용하여 분무 사진을 획득하였다. 카메라는 Canon 7D Digital Camera, 렌즈는 Canon EF 180 mm f/3.5L macro lens를 사용하였다. 광원으로는 발광시간이 $0.8 \mu s$ 인 Palflash 501 spark light source를 사용하였고, 이를 통해서 분해능은 36.5 pixel/mm을 얻을 수 있었다.

3. 실험결과

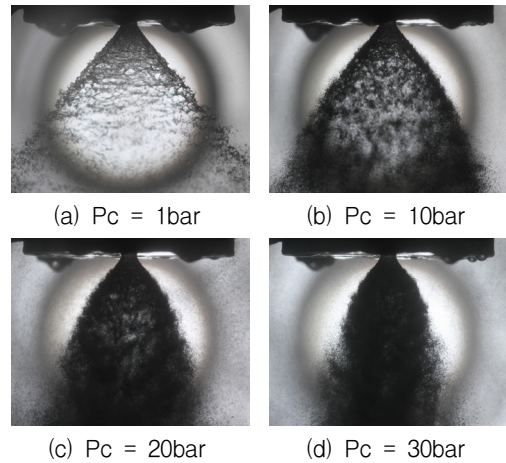


Fig. 4 Spray pattern at various chamber pressure

3.1 분무각 (Spray Angle)

분무각은 다중 분사기의 성능이나 점화 성능, 분사기 면의 냉각 등 연소시스템에 영향을 미치는 요소이다. 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무각이 감소하게 되는데, 이는 분무의 안쪽의 압력과 주위 기체 압력의 차이 때문이다[8][9].

이러한 분무각 감소 현상은 Indirect Photography method를 이용하여 촬영한 Fig. 4에서 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무각이 감소하고 분무가 밀해지는 것으로부터 확인할 수 있다. 이는 Koh 등[2]이 고압에서 적용한

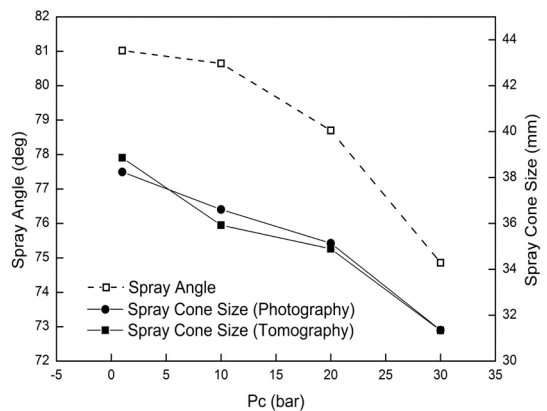
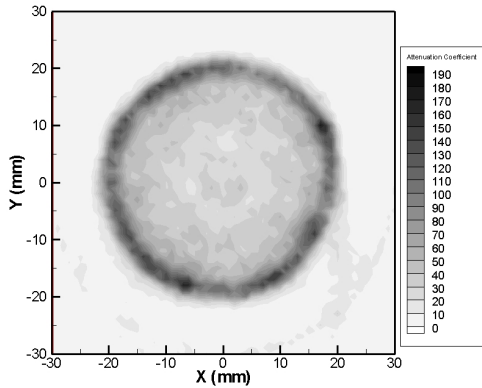
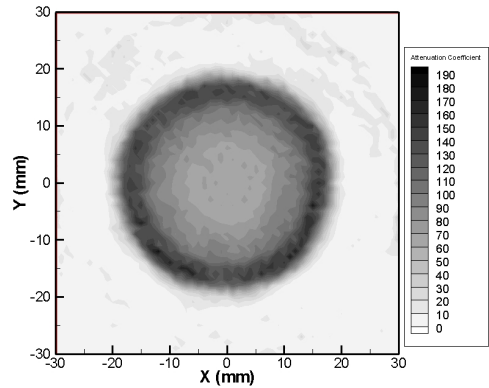


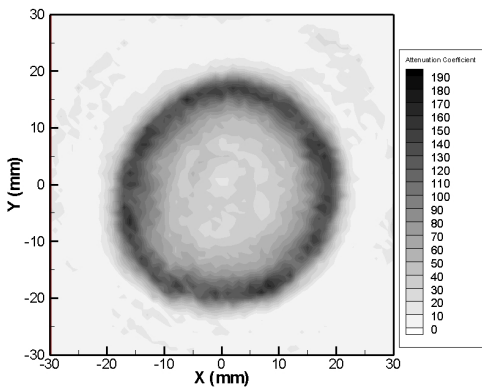
Fig. 5 Spray angle and Spray Cone size



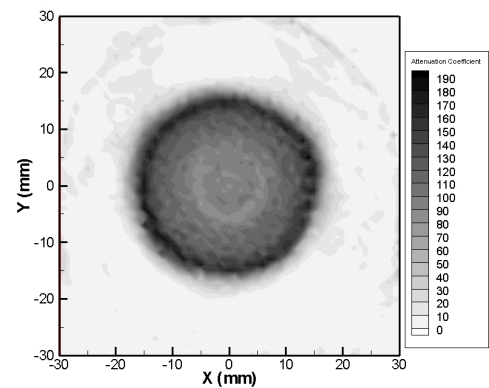
(a) $P_c = 1\text{bar}$



(a) $P_c = 20\text{bar}$



(b) $P_c = 10\text{bar}$



(b) $P_c = 30\text{bar}$

Fig. 6 Distribution of spray obtained by Tomography at $P_c = 1\text{bar}$ and 10bar

Fig. 7 Distribution of spray obtained by Tomography at $P_c = 20\text{bar}$ and 30bar

Optical Line Patternator를 이용한 실험결과에서도 나타나 있으며, Kim 등[10]의 고압에서의 분무 사진을 통해서도 확인할 수 있다.

Figure 5는 Indirect Photography method를 통해서 얻어진 이미지 5장을 평균하여 측정된 분무각을 주위 기체 압력에 따라 나타내고 있으며 이로부터 주위 기체 압력이 증가 갈수록 분무각의 감소 폭이 커지는 것을 확인 할 수 있다.

3.2 분무의 크기 (Spray Cone Size)

분무각이 주위 기체 압력이 증가함에 따라 감소하는 점으로부터 분무 단면이 크기 또한 감소할 것이라는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 6과 Fig. 7의 토모그래피를 이용한 결과에서도 볼 수

있듯이 주위 기체 압력이 커짐에 따라 분무의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다.

토모그래피 이미지에서 최대 감쇠 계수에서 70%되는 지점인 감쇠 계수 130을 분무의 경계라고 설정하여 구한 분무의 크기와 Indirect Photography method에 의한 이미지에서 획득한 분무의 크기와 토모그래피를 이용하여 얻어진 분무의 크기의 비교를 Fig. 5에서 볼 수 있다. Fig. 5에서 확인 할 수 있듯이 두 값이 비슷하기 때문에 토모그래피를 통한 분무 단면의 재구성이 잘 되었다는 것을 알 수 있다.

Figure 6과 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무 안쪽의 분무 분포가 증가하게 되고 분무 안쪽이 밀해지는 것을

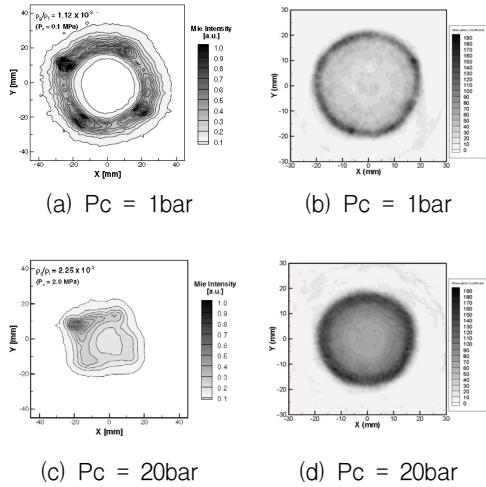


Fig. 8 Spray pattern at various chamber pressure

확인 할 수 있다. 이는 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무의 분열이 분무의 위쪽에서 일어나고 분무각이 감소하면서 분무 안쪽으로 액적들이 분포하기 때문이다. Fig. 8에서 나타내듯이 Kim 등[10]이 실험한 Optical Line Patternator 방법으로 실험한 결과와 같이 주위 기체압력이 증가함에 따라 액적들이 분무의 안쪽으로 분포하게 됨에 따라 분무 안쪽이 밀해지는 것을 볼 수 있다.

주위 기체 압력이 상압일 때는 측정위치에서 분무가 분열되지 않아 hollow cone 형상을 유지하여 분무 안쪽이 빈 공간을 이루고 있다. 하지만 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 상압의 결과에서 분무 안쪽의 감쇠계수가 분무 바깥쪽의 감쇠 계수보다 높게 나타내고 있다. 이는 레이저 광이 분무를 통과하면서 분무 안쪽에서 반사광이 발생하여 감쇠계수가 높게 나온 것으로 생각된다.

4. 결 론

상압에서부터 고압 조건까지의 토모그래피를 통한 스윙형 분사기의 분무 단면 측정의 실험을 수행하였다. 고압에서의 토모그래피를 실험은 많이 이루어지지 않았기 때문에 본 논문에서의 결

과는 앞으로 활용가치가 높을 것이라고 예상된다.

Indirect Photography method를 사용하여 토모그래피의 결과와 비교하였다. 이를 통해 분무각을 측정하였으며 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무각이 감소하는 것을 확인하여 분무 크기가 줄어드는 것을 확인하였다.

Indirect Photography method로부터 획득한 이미지에서 분무 크기를 구하여 토모그래피를 통해 재구성된 분무 단면의 분무 크기를 비교하였다. 분무 안쪽이 밀해지는 현상을 관찰하여 Optical Line Patternator를 이용한 계측 결과와 비교하였으며, 이를 통해서 주위 기체 압력이 높은 조건에서도 토모그래피 기법 적용이 가능함을 확인 할 수 있었다.

한편 레이저 광이 분무를 통과하면서 반사광에 의해 분무 안쪽에도 감쇠계수가 나타나게 되는데 이를 보완하기 위한 방법이 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL) (No. 0498-20100025)과 서울대학교 항공우주신기술연구소(IAAT)의 지원으로 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 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
2. 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

3. Talley D. G., Verdick 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
4. 조성호, 임지혁, 최호연, 윤영빈, "고압 환경에서의 분무 특성 계측을 위한 광학 토모그래피 기법 연구", 한국추진공학회지, 제13권 4호, 2009, pp.36-44
5. Shepp, L. A. and Vardi, Y., 1982, "Maximum Likelihood Reconstruction for Emission Tomography," IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. MI-1, pp. 113~122
6. Lim, j., Sivathanu, Y., Narayanan, V., and Chang, S., 2003, "Optical patterning of a water spray using statistical extinction tomography," Atomization and Sprays, Vol. 13, pp.27~43
7. 조성호, 임지혁, 윤영빈, 최성만, 한영민, "고압 환경 하에서의 분무 분포 측정," 한국가시화정보학회지, 제6권 1호, 2008, pp.59-65
8. De Corso, S. M., and Kemeny, G. A., 1957, "Effect of Ambient and Fuel Pressure on Nozzle Spray Angle", ASME Transactions. Journal of Tribology, Vol. 79, No. 3, pp. 607 - 615
9. P. H. Rothe and J. A. Block, 1997, "Aerodynamics Behavior of Liquid Sprays", International Journal of Multiphase Flow ,Vol. 3, Issue 3, Pages 263-272
10. Kim D., Im J., Koh H. and Yoon Y. 2007, "Effect of Ambient Gas Density on Spray Characteristics of Swirling Liquid Sheets", Journal of Propulsion and Power, Vol. 23, No. 3, pp. 603-611