

研究論文

토모그래피 기법을 이용한 고압 조건에서의
스웰 분사기의 분무 분포 계측

박구정* · 조성호** · 정재목** · 김태성** · 윤영빈***†

Measurement of Spray Distribution of Swirl Injector by
Tomography Method at High Pressure Condition

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

ABSTRACT

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

초 록

고압의 주위 압력 영역에서 토모그래피 기법을 이용하여 분무의 단면을 계측하였다. 구성된 분무 단면은 간접촬영방법을 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(스웰형 분사기), Tomography(토모그래피), High Pressure Condition(고압 환경 조건), Spray Angle(분무각), Spray Cross Section Size(분무 단면 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 여러 인자에 지배되는 연소 현상을 예측할 때 하나의 특성으로 활용될 수 있다.

분무 단면을 측정하기 위하여 기계적 패터네

접수일 2011. 5. 9, 수정완료일 2011. 8. 19, 게재확정일 2011. 8. 22

* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부

** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

*** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부

† 교신저자, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2011년도 춘계학술대회(2011. 4. 28-29, 현대 로템(주) 기술연구소) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

이터[1], 광학 선형 패터네이터[2], 평면 액체 레이저 유도 형광법(PLLIF)[3] 등이 사용되었지만 고압 분무 조건에서 적용하기에는 한계점들을 가지고 있었다[4]. 스윌 분사기의 분무 단면 분포 계측에 토모그래피를 이용한 연구가 많이 이루어지지 않아 다양한 압력에 대한 분무 단면 분포 계측을 통하여 고압 조건에서의 토모그래피 기법 적용 여부를 확인하였다.

본 연구에서는 조 등의 연구[4]보다 더 높은 고압의 조건에서 토모그래피 기법을 적용하여 분무 단면을 얻었고 간접 촬영 방법을 통하여 분무 사진을 획득하여 분무각을 측정하였으며 광학 선형 패터네이터와의 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].

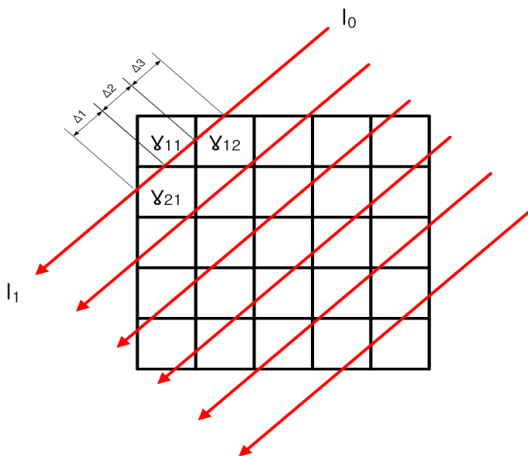


Fig. 1 Geometry of spray field for MLE reconstruction algorithm

수학적 모델인 Poisson 모델로부터 likelihood function을 적용하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$L(\gamma(b)) = P(n^*(d) | \gamma(b)) = \sum_A \prod_{b=1, \dots, B} e^{-\gamma(b,d)} \frac{\gamma(b,d)^{n(b,d)}}{n(b,d)!}$$

위의 식을 로그함수를 취하여 간단하게 하고 b_0 에 대한 편도미분과 Expectation-Maximization하여 분무장 내에서의 감쇠 계수를 구할 수 있다. 알고리즘에 의해 MLE 기법은 아래의 식을 사용하였다[5].

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

여기서 γ_i 는 i영역에서의 감쇠계수이며, n_i 는 분무를 통과하는 레이저의 감쇠율을 나타낸다. p_{ij} 는 레이저가 분무 영역 i을 통과하여 광학계측부 j에 도달하는 경로의 길이이다.

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 조 등의 연구[7]에서 사용한 동축-스윌 타입 분사기를 사용하였다. 분사기의 형상은 Fig. 2와 같으며 산화제 오리피스만을 사용

해 단일 스월 분무를 생성하여 실험하였다. 모사 추진제로 물을 사용하였으며 실험 조건은 분사 차압 10 bar, 분사 유량 210 g/s이다. 그리고 주위 기체 압력을 1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar로 달리 하며 실험을 하였다. 조 등의 연구와 측정 지점이 같은 곳인 분사기 하방 20 mm에 레이저 광을 지나가게 하였고 이는 레이저 광이 분무 분열이 일어나지 않은 부분과 분열이 완전히 일어난 부분의 사이에 있게 하여 분무 단면을 측정하게 하였다.

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

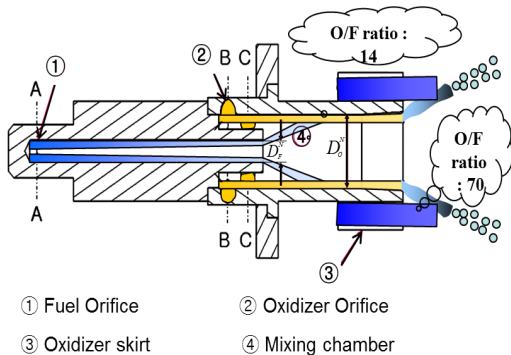


Fig. 2 Swirl-coaxial Injector design

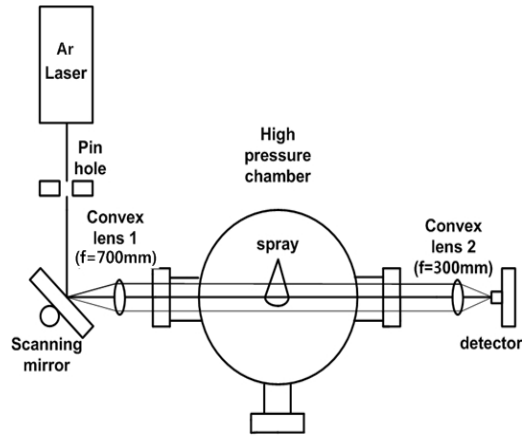


Fig. 3 Schematic of optical tomography

의 Labview program에 의해서 제어되었다.

토모그래피 기법과의 비교를 위해 간접 촬영 방법을 이용하여 분무 사진을 획득하였다. 카메라는 Canon 7D 디지털 카메라, 렌즈는 Canon EF 180 mm f/3.5L macro 렌즈를 사용하였다. 광원으로는 발광시간이 0.8 μ s인 Palflash 501 섬광 광원을 사용하였고, 이를 통해서 분해능은 36.5 pixel/mm을 얻을 수 있었다.

3. 실험 결과

3.1 분무각 (Spray Angle)

분무각은 단일 분사기와 다중 분사기의 성능이나 점화 성능, 분사기 면의 냉각 등 연소시스템에 영향을 미치는 요소이다. 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무각이 감소하게 되는데, 분무와 주위 기체와의 운동량 차이 등으로 인하여 분무각이 감소하게 된다[8, 9].

이러한 분무각 감소 현상은 간접 촬영 방법을 이용하여 촬영한 Fig. 4 에서 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무각이 감소하고 분무가 밀해지는 것으로부터 확인 할 수 있다. 이는 Koh 등 [2]이 고압에서 적용한 광학 선형 패턴미터를 이용한 실험결과에서도 나타나 있으며, Kim 등 [10]의 고압에서의 분무 사진을 통해서도 확인할 수 있다.

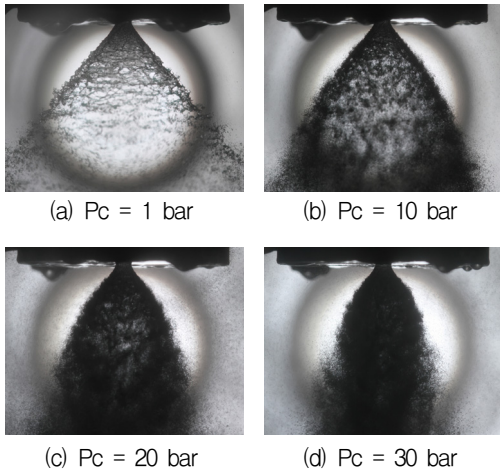


Fig. 4 Spray pattern at various chamber pressure

Figure 5는 간접 촬영 방법을 통해서 얻어진 이미지 5장을 평균 내어 측정된 분무각을 주위 기체 압력에 따라 나타내고 있으며 이로부터 주위 기체 압력이 증가 갈수록 분무각의 감소폭이 커지는 것을 확인 할 수 있다.

3.2 분무 단면의 크기 (Spray Cross Section Size)

분무각이 주위 기체 압력이 증가함에 따라 감소하는 점으로부터 분무 단면의 크기 또한 감소할 것이라는 것을 알 수 있다. 주위 기체 압력이 커짐에 따라 분무의 크기가 감소하는 것은 Fig. 6과 Fig. 7의 토모그래피를 이용한 결과에서도 알 수 있다.

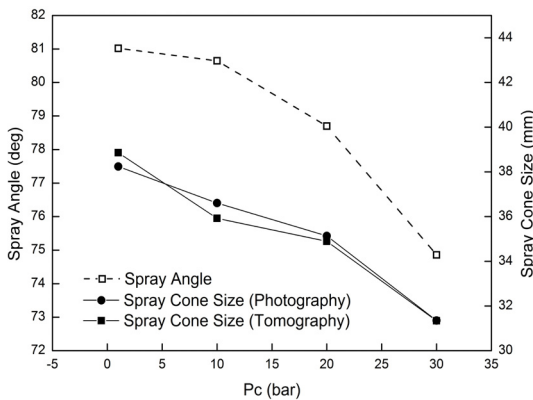


Fig. 5 Spray angle and spray cone size

토모그래피 이미지와 간접 촬영 방식의 이미지를 비교하여 최대 감쇠 계수의 70%인 감쇠 계수 130을 분무의 경계로 설정하였다. 구한 분무의 크기와 간접 촬영 방법에 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 6에서 볼 수 있듯이 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무 안쪽의 분무 분포가 증가하게 되고 분무 안쪽이 밀해지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무의 분열이 분무의 위쪽에서 일어나고 분무각이 감소하면서 분무 안쪽으로 액적들이 분포하기 때문이다. Fig. 7에서 나타났듯이 Kim 등[10]이 실험한 광학 선형 패턴미터 방법으로 실험한 결과와 같이 분무 분포에서 상대적으로 밀한 곳이 신호의 강도가 높게 나타나게 되며 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. 하지

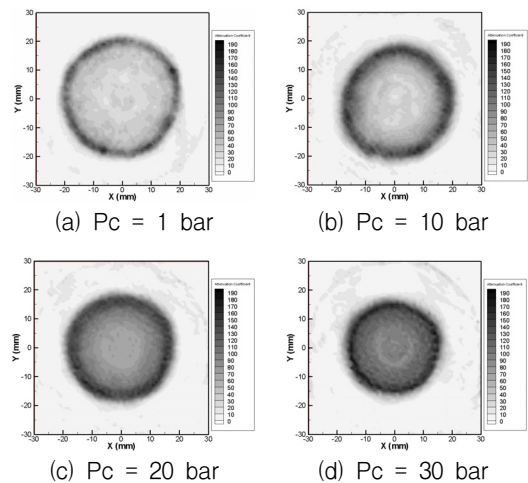


Fig. 6 Distribution of spray obtained by tomography at Pc = 1 bar, 10 bar, 20 bar and 30 bar

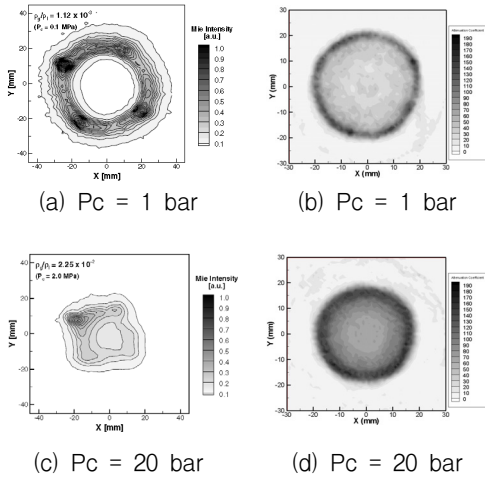


Fig. 7 Spray pattern at various chamber pressure using optical line patternator and tomography

만 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.

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

4. 결 론

상압에서부터 고압 조건까지의 토모그래피를 통한 스윌형 분사기의 분무 단면 측정의 실험을 수행하였다. 고압에서의 토모그래피를 실험은 많이 이루어지지 않았기 때문에 본 논문에서의 결과는 앞으로 활용가치가 높을 것이라고 예상된다.

간접 촬영 방법을 사용하여 토모그래피의 결과와 비교하였다. 이를 통해 분무각을 측정하였으며 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분무각이 감소하는 것을 확인하여 분무 크기가 줄어드는 것을 확인하였다.

간접 촬영 방법으로부터 획득한 이미지에서 분무 크기를 구하여 토모그래피를 통해 재구성

된 분무 단면의 분무 크기를 비교하였다. 분무 안쪽이 밀해지는 현상을 관찰하여 광학 선형 패턴네이터를 이용한 계측 결과와 비교하였으며, 이를 통해서 주위 기체 압력이 높은 조건에서도 토모그래피 기법 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단과 서울대학교 항공우주신기술 연구소(IAAT)의 지원(NRF - 2011 - 220 - D00023)으로 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Strakey, P.A., Talley, D.G., and Hutt, J.J., "Mixing characteristics of coaxial injectors at high gas/liquid momentum ratios," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No. 2, 2001, pp.402-410
2. 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
3. Talley D. G., Verdick J. F., Lee S. W., McDonell V. G. and Samuelsen G. S., "Accounting for laser sheet extinction in applying PLLIF to sprays," *AIAA 96-0469*, 1996
4. 조성호, 임지혁, 최호연, 윤영빈, "고압 환경에서의 분무 특성 계측을 위한 광학 토모그래피 기법 연구," *한국추진공학회지*, 제13권, 제4호, 2009, pp.36-44
5. Shepp, L. A. and Vardi, Y., "Maximum Likelihood Reconstruction for Emission Tomography," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol. MI-1, 1982, pp.113-122

6. Lim, j., Sivathanu, Y., Narayanan, V., and Chang, S., "Optical patterning of a water spray using statistical extinction tomography," *Atomization and Sprays*, Vol. 13, 2003, pp.27-43
7. 조성호, 임지혁, 윤영빈, 최성만, 한영민, "고압 환경 하에서의 분무 분포 측정," *한국가시화정보학회지*, 제6권, 제1호, 2008, pp.59-65
8. De Corso, S. M., and Kemeny, G. A., "Effect of Ambient and Fuel Pressure on Nozzle Spray Angle," *ASME Transactions. Journal of Tribology*, Vol. 79, No. 3, 1957, pp.607-615
9. Lefebvre A. H., *Atomization and spray*, CRC Press, 1989
10. Kim D., Im J., Koh H. and Yoon Y., "Effect of Ambient Gas Density on Spray Characteristics of Swirling Liquid Sheets," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 23, No. 3, 2007, pp.603-611