

액체로켓엔진에서 동축 스월형 분사기의 분무특성에 대한 수치적 고찰

문운완* · 설우석* · 윤영빈**

A Numerical Study of the Spray Characteristics of Co-axial Swirl Injector in Liquid Propellant Rocket Engine

Yoon Wan Moon* · Woo-Seok Seol* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

This study investigated the characteristics of spray generated by a liquid-liquid co-axial swirl injector used in a combustor of the liquid rocket engine. The linear stability analysis[1] was introduced in liquid sheet breakup and Post[2]'s collision model which considers shattering was adopted on the collision model after breakup. Every model was implemented to KIVA[3], which was adopted as solver. To validate the implemented models the cases of high and low injection velocity were calculated respectively and each result agreed well with test results.

초 록

본 연구에서는 액체 추진제 로켓엔진의 연소기에 주로 사용되는 액체-액체 동축 스월형 분사기의 분무특성에 대해 고찰하였다. 액막의 분열에는 선형 안정성 이론[1]을 도입하였고 분열 후 층돌에는 층돌 이후 분열이 고려된 Post[2]의 모델을 사용하였으며, solver로는 KIVA[3]를 사용하였다. 이러한 모델을 통해 디젤 엔진에 적합한 고속 분사와 로켓엔진에 적합한 저속 분사를 각각 검증하였고 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Co-axial Swirl Injector(동축 스월형 분사기), Liquid Sheet Breakup(액막 분열), Collision Shattering Model(층돌 산개모델)

1. 서 론

동축 스월형 분사기는 구소련 및 현재의 러시

아의 대부분의 발사체 엔진에 적용되는 분사기이며, 혼합효율의 증가로 인한 고효율의 성능을 발생시키는 것으로 알려져 있다. 구소련에서 50년대 후반에 개발하기 시작하여 60년대 초 발사에 성공한 소유즈(Soyuz)의 RD-107, RD-108 및 RD-0110 등이 대표적인 예라 하겠다. 이러한 분사기는 1950년대부터 많이 사용되어 왔으나, 구

* 한국항공우주연구원 엔진그룹
** 서울대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: ywmoon@kari.re.kr

체적인 분열기구는 아직 밝혀지지 않고 수학적인 hydraulic analysis를 통하여 대표적인 특성만을 구할 수 있었다. 근래에는 Inamura 등[4]이 노즐의 길이에 따른 스월 각도, 발달되는 액막의 두께, 분열길이 등을 경계층 이론과 더불어 실험적으로 연구하여 분사기 내부의 유동은 비교적 정보를 얻을 수 있는 상황이나, 분사된 분무의 특성에 대해서는 구체적으로 밝혀진 바가 없다.

본 연구에서는 동축 스월형 분사기의 분열기구를 모사하여 구체적인 액적의 무화과정을 살펴보고자 하였으며, 최적화된 분사기를 설계하기 위한 전단계로서 parametric study에 의한 다양한 분사기의 특성을 살펴보고 목표 엔진에 알맞은 설계 자료를 제공하고 더 나아가 연소 환경을 예측할 수 있는 기본 자료로 사용하기위해 연구를 진행하였다.

2. 수치 이론 및 해석 기법

동축 스월형 분사기에서 발생하는 것은 단공 분사기에서와는 달리 액주(liquid column)가 아닌 액막(liquid sheet)이다. 이것은 액주와는 분열 과정이 다르다. 액막의 분열은 막에서 환형의 액체 기둥이 생성되고 다시 커다란 덩어리로 분열된 후 미세한 액적으로 분열된다. 이러한 분열과정을 모사하기 위해서는 적절한 가정과 수학적 모델을 필요로 한다. 본 연구에서는 Senecal 등[1]이 개발한 수학적 이론과 모델을 사용하였다.

2.1 선형 안정성 해석(Linear Stability Analysis)[1]

유동이 없고 비점성이며 비압축성인 기체장에 액막의 두께가 $2h$, 비압축성, 2차원이며 점성이 있는 액막이 속도 U 로 움직인다고 생각하자. 액체와 기체의 밀도는 각각 ρ_1 및 ρ_2 이고 액체의 점성계수는 μ_1 이라 하자(여기서 첨자 '1'은 액체이고 '2'는 기체를 뜻한다). 좌표계는 액막을 따라 움직이며 초기 정상상태에서 무한소의 교란은 다음의 식과 같다.

$$\eta = R[\eta_0 \exp(ikx + \omega t)]$$

분산관계를 얻기 위하여 선형화된 연속 방정식과 운동량 방정식을 액체와 기체의 계면(interface)에서 풀어야만 하는데 각각의 액상 및 기상에 대해 방정식을 세운 후 조합하여 풀면 다음과 같은 sine mode에 대한 ω 와 k 의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \omega^2 [\tanh(kh) + Q] + \omega [4\nu_1 k^2 \tanh(kh) \\ & + 2iQkU] + 4\nu_1^2 k^4 \tanh(kh) \\ & - 4\nu_1^2 k^3 \mathcal{L} \tanh(\mathcal{L}h) - QU^2 k^2 + \sigma k^3 / \rho_1 = 0 \end{aligned}$$

여기서 Q 는 ρ_2/ρ_1 이다.

위의 식을 점성 액막에 적용하면 파의 성장률의 해는 다음과 같이 된다(단파의 경우).

$$\omega_r = -2\nu_1 k^2 + \sqrt{4\nu_1^2 k^4 + QU^2 k^2 - \frac{\sigma k^3}{\rho_1}}$$

2.2 액막 분열 및 액적 생성 모델

본 연구에서는 액막에서의 분열로 발생하는 액적의 크기를 예측하기 위해 Dombrowski와 Johns[1]가 제안한 액막 분열을 채택하였다.

액막의 분열시간 및 분열길이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\eta_b = \eta_0 \exp(\Omega_s \tau) \Rightarrow \tau = \frac{1}{\Omega_s} \ln\left(\frac{\eta_b}{\eta_0}\right)$$

$$L = V\tau = \frac{V}{\Omega_s} \ln\left(\frac{\eta_b}{\eta_0}\right)$$

여기서 $\ln\left(\frac{\eta_b}{\eta_0}\right)$ 는 Dombrowski와 Johns[1]가 제안한 12를 사용하기로 한다. 단파의 경우 ligament의 직경은 다음과 같다.

$$d_L = \sqrt{\frac{16h}{K_s}}$$

Ligament로부터 분열되는 액적의 크기는 다음과 같이 예측될 수 있다.

$$d_D = 1.88d_L(1 + 3Oh)^{1/6}$$

여기서 $Oh = \mu_1 / (\rho_1 \sigma d_L)^{1/2}$ 로 정의되는 Ohnesorge 수이다.

2.3 충돌모델[2]

본 연구에서는 높은 충돌 We 수와 높은 충돌 parameter에서 발생할 수 있는 shattering collision model을 사용하였고, 그 때 생성되는 액적의 크기는 다음과 같다.

$$r_{child}^* = \frac{1.89}{\sqrt{2.81 We^{2/7} (1 + \Delta^{-3})^{2/21} + 1}}$$

2.4 계산모델

본 연구에서는 위의 모델들을 KIVA[3]에 적용하였으며 2차 액적 분열모델은 TAB[3] 모델을 사용하였고, 난류 모델은 standard $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 또한 액적의 분포는 원래의 χ^2 분포로부터 문운완 등[5]이 수행했던 결과를 바탕으로 Rosin-Rammler 분포를 적용하였고 액체의 선회분무를 모사하였다.

3. 결 과

위에서 언급한 모델을 검증하기 위해 Parrish[6]가 실험한 분열 길이가 짧은 경우와 분열 길이가 긴 일반적인 액체 로켓엔진 분사기의 경우로 나누어 검증을 실시하였다.

3.1 분열 길이가 짧은 경우

Parrish가 실험한 경우는 자동차의 디젤엔진에 사용되기 위해 고안된 압력 선회 분사기이다. 이 경우는 로켓엔진의 분사기보다 유량이 약 1/10~1/100정도로 작고 분무 속도가 빠르기 때문에 분열 길이가 매우 짧다. 이러한 경우는 액막 분열에서부터 2차 분열까지 매우 짧은 시간이 소요되며 위에서 가정한 단파의 경우에 매우 가까우므로 선택되었다. 또한 이렇게 분열 길이가 짧은 경우는 일반적으로 알려진 공기역학적인 분열이 주로 발생하게 된다. Parrish의 실험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Test and calculation condition (Parrish[6])

Injection Pressure (MPa)	4.86
Mass Injected (mg)	44.0
Injection duration (ms)	3.86
Fuel density (g/m ³)	0.77
Fuel viscosity (g/cm s-1)	4.7e-3
Surface tension (g/s ²)	18.16
Ambient pressure (MPa)	0.1
Ambient density (g/cm ³)	1.17e-3

Figure 1은 시간에 따른 분무관통길이의 분사기 출구 하류 39mm에서 평균한 실험결과와 계산결과의 비교이다. 분사 초기에 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있으나 후반으로 갈수록 과대 예측하는 것을 볼 수 있다. 이것은 계산 영역이 실험과 일치하지 않음으로 해서 발생하는 주위 공기의 교란때문으로 생각된다.

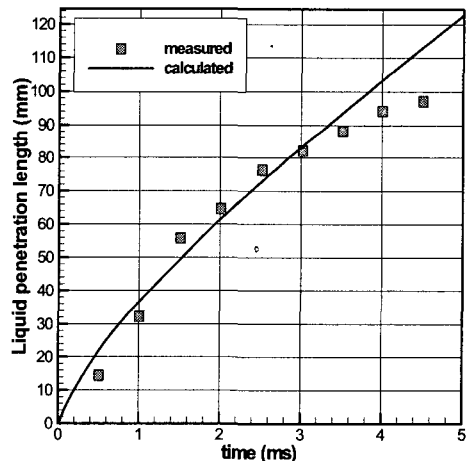


Fig. 1 Calculated penetration length compared with measured result

Table 2 Calculation condition of Soltani[7]'s case

	Inner	Outer
test media	water	
\dot{m} (kg/hr)	130.0	400.0
ΔP (bar)	15.0	4.0
swirl angle (°)	43.9	52.6
V_{axi} (m/s)	31.61	16.0
δ (mm)	0.2	0.2

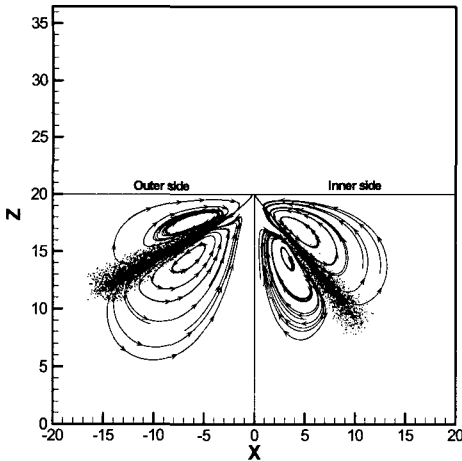


Fig. 2 Spray field and streamline of inner and outer injector nozzle

3.1 액체 로켓엔진 분사기의 경우

본 계산에서는 Soltani 등[7]의 실험을 바탕으로 2D 축대칭에 대해 수행하였고 계산격자는 20×20 cm, 100×100의 격자로서 각 격자당 2×2 mm의 크기를 갖는 계산격자를 선택하였다. 또한 시험에서 물로 수류시험을 수행하였기 때문에 정확한 비교를 하기 위해 계산에서도 액체를 물로 사용하여 계산을 수행하였으며 계산조건은 Table 2와 같다.

Figure 2는 inner와 outer 노즐에서의 streamline을 도시하여 보았다. 그림에서 보듯이 내외측 모두 분무가 됨에 따라 강한 swirl을 형성하여 외부의 기체가 액막의 반경 안쪽과 바깥쪽에 모두 재순환 영역이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 재순환 영역은 연소시에 외부의 연소기체가 액막을 예열할 수 있는 것으로서 보다 빠른 증발을 유발하여 보다 짧은 거리에서 산화제와 연료의 증기가 서로 혼합되므로 연소효율을 높일 수 있는 것으로서 매우 중요한 영역이 된다. 여기서는 inner와 outer를 각각 계산하였는데, 두 액막의 간섭을 살펴보아야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 동축 스윙형 분사기의 분무모델 개발을 하였으며 및 CFD 해석을 수행하였다. 적용된 모델은 Senecal 등의 Stability Analysis를 통한 액막 분열모델과 Abraham 등이 액적의 충돌 모델을 세분화하여 수정한 충돌 모델을 사용하였다. Senecal 등이 적용한 검증에는 디젤 엔진과 같은 질량유량이 작고, 분사차압이 매우 큰 조건이므로 액막의 분열길이 짧고 매우 빠른 ligament 분열 및 공기역학적인 분열이 일어나는데 반해, 로켓 엔진에 사용되는 분사기는 분열 길이가 길고, SMD도 매우 크므로 공기역학적인 분열보다는 액막/액주의 분열 주파수가 더 지배적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Senecal, P.K., Schmidt, D.P., Nouar, I., Rutland, C.J., Reitz, R.D., and Corradini, M.L., "Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization," *Intl. J. of Multiphase Flow*, vol.25, pp.1073-1097, 1999
2. Post, S.L., and Abraham, J., "Modeling the outcome of drop-drop collisions in Diesel sprays," *Int. J. Multiphase Flow* 28, pp.997-1019, 2002
3. Amsden, A. A., O'Rourke, P. J., and Butler, T. D., *KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays*, Los Alamos National Laboratory, LA-11560-MS, 1989
4. Inamura, T., Tamura, H., and Sakamoto, H., "Characteristics of Liquid Film and Spray Injected from Swirl Coaxial Injector," *J. of Propulsion and Power*, vol. 19, no. 4, 2003
5. 문윤완, 김홍집, 박태선, "CFD를 통한 동축 스윙형 분사기의 액막 분열 모델 연구," 제3회 한국유체공학학술대회 논문집, 2004
6. Han, Z., Parrish, S., Farrel, P. V., and Reitz, R. D., "Modeling Atomization

Processes of Pressure-Swirl Hollow-Cone Sprays," *Atomization and Sprays*, vol. 7, pp. 663-684, 1997

7. Soltani, M.R., Ghorbanian, K., Ashjaee, M.,

and Morad, M.R., "Spray characteristics of a liquid-liquid coaxial swirl atomizer at different mass flow rates," *Aerospace Science and Technology*, vol. 9, pp.592-604, 2005