

# 고압환경에서 동축 스월 분사기 분무 특성에 대한 수치적 해석

문윤완\* · 설우석\* · 김동준\*\* · 윤영빈\*\*

## Numerical Analysis for Characteristics of Coaxial Swirl Injector in High-Pressure Environment

Yoonwan Moon\* · Woo-Seok Seol\* · Dongjun Kim\*\* · Youngbin Yoon\*\*

### ABSTRACT

This numerical analysis was performed in order to validate adoption of the sheet breakup model in high-pressure environment, which were used for prediction of spray characteristics in atmosphere environment. In experiments the higher environment pressure the shorter breakup length; the results of new sheet breakup model predicted the breakup length in good agreement with experimental results qualitatively and quantitatively. Also the shape of spray calculated by numerical analysis were agreed well with experiments quantitatively.

### 초 록

본 연구에서는 상압환경에 적용되었던 액막 분열 모델을 고압환경에 적용하였다. 실험에서 주위압이 고압으로 진행할수록 액막의 분열길이는 짧아지는데 개발된 액막 분열 모델은 이러한 경향을 잘 예측하는 것으로 나타났으며 분무 형상도 정성적으로 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다.

Key Words: Sheet Breakup Model(액막분열모델), Coaxial Swirl Injector(동축 스월형 분사기), Linear Stability Analysis(선형 안정성 이론), High-Pressure Environment(고압환경)

### 1. 서 론

동축 스월형 분사기는 산업용 가스 터빈, 농기계, 자동차 엔진, 액체로켓엔진 연소기 등 다양한 분야에 활용된다. 이 분사기는 상대적으로 간

단한 설계, 고신뢰도, 양질의 분무, 및 동력이 적게 요구되는 장점이 있다. 특히 액체로켓엔진에 장착되는 경우 엔진 시스템 구성상 양질의 분무를 얻기 위해 차압이 큰 분사기를 사용할 수 없으므로 필요 동력이 적게 요구되는 동축 스월형 분사기는 매우 적합하다고 할 수 있다. 미국에서는 초기 액체로켓엔진에 사용되는 분사기의 대부분이 충돌형 분사기를 사용하였다. 이 분사기는 설계에서는 매우 간단하지만 역시 적은 차압

\* 한국항공우주연구원 엔진팀

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail: ywmoon@kari.re.kr

으로 분사를 하여야 하기 때문에 양질의 분무를 얻을 수 없고 이러한 단점을 극복하기 위해 추진제를 충돌시켜 분무의 질을 높였으나, 각 추진제 흐름의 중심이 정확히 충돌할 수 있도록 가공되어야 하며 약간의 오차가 존재하면 극심한 연소 불안정이 발생하면서 대형 사고로 이어지는 단점이 있었다. 이러한 사례로 F-1 엔진의 경우 like doublet 분사기를 사용하였는데 극심한 연소 불안정의 발생으로 배플을 사용하였고 그로 인한 성능 저하가 심각하게 발생한 대표적 예이다. 구소련에서는 1950년대 중후반부터 소유즈 등의 대표적인 발사체를 개발하면서 주로 동축 스윙형 분사기를 사용하였다. 동축 스윙형 분사기는 충돌형 분사기와는 달리 하나의 분사기에서 산화제와 연료가 분사되므로 추진제 혼합 효율이 상대적으로 크므로 연소 성능을 증가시킬 수 있으며 설계에 따라 화염의 부상길이를 임의로 조정할 수 있으므로 연소 안정성에도 기여할 수 있다.

일반적으로 분사기의 설계에서는 상압 및 고압에서의 수류시험으로 분무의 크기 및 분포 등의 특성을 고찰하여 실제 엔진에 장착하게 된다. 이 때 상압에서의 수류시험은 실제 연소 상황과는 많이 다르나 분사기의 상대적인 비교를 위해 수행하여야 할 부분이다. 보다 실제 상황에 가깝게 적용하기 위해 고압 상태에서의 분무시험을 수행하나 주위압이 고압일 경우 분무가 농후해 지므로 얻는 자료에는 한계가 있다. 본 연구에서는 문윤완 등 [1]이 개발한 액막 분열 모델을 사용하여 고압 환경의 실험결과와 비교하여 모델 검증에 하였고 상압환경에서의 분무 특성이 변하는 과정을 연구함으로써 액막 분열 영역을 고찰하였다.

## 2. 액막 분열 모델

### 2.1 선형 안정성 이론

액막 표면에 무한소의 교란이 존재한다면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

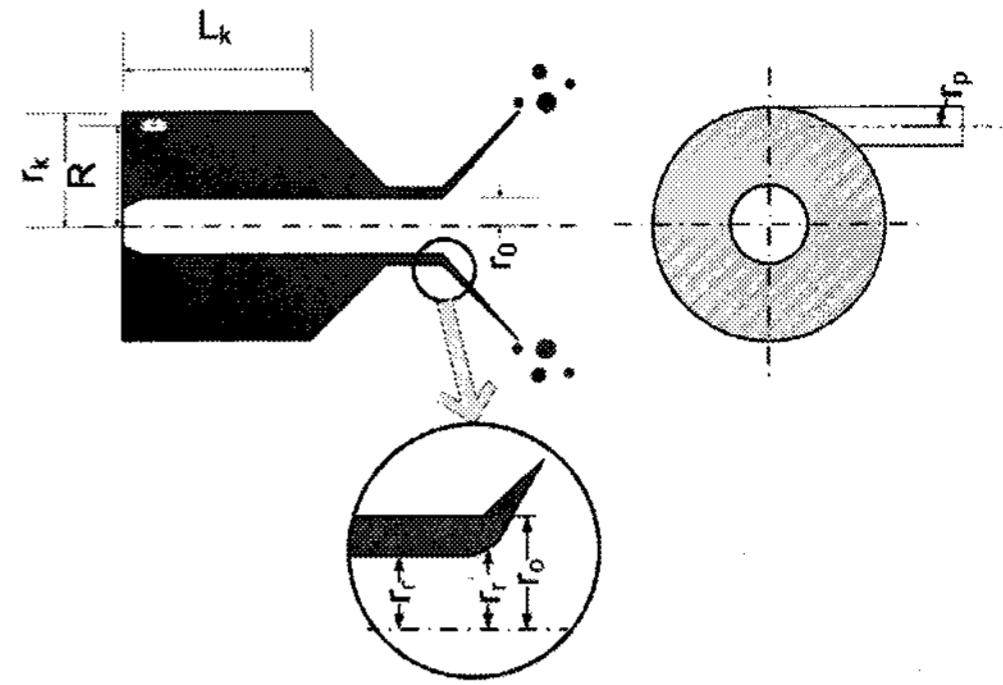


Fig. 1 Schematic of coaxial swirl injector

$$\eta = R[\eta_0 \exp(ikx + \omega t)] \quad (1)$$

위의 식으로부터 액상(liquid phase)과 기상(gas phase)에 대한 관계식을 수학적으로 구할 수 있으며, 이것으로부터 sine mode의 성장률( $\omega$ )과 파동수( $k$ )의 관계식을 구할 수 있다.

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

여기서  $Q$ 는  $\rho_{liquid} / \rho_{gas}$ 이다. 위의 식을 점성액막에 적용하면 파의 성장률의 해를 장파와 단파의 경우에 대해 각각 구할 수 있다[2]. 또한 액막 분열 길이와 액적의 크기도 장파와 단파의 경우 각각 달라진다[2]. 이것을 종합하면 다음의 식으로 표현할 수 있다.

i) 단파의 경우( $We_2 \geq 27/16$ )

액막 분열 길이:

$$L = V\tau = \frac{V}{\Omega_s} \ln\left(\frac{\eta_b}{\eta_0}\right) \quad (\ln\left(\frac{\eta_b}{\eta_0}\right) = 12) \quad (3)$$

Ligament 직경:

$$d_L = \sqrt{\frac{16h}{K_s}} \quad (4)$$

ii) 장파의 경우( $We_2 < 27/16$ )

액막 분열 길이:

$$\begin{aligned} L = \frac{1}{2\sin\theta} [3V\sin\theta \ln\left(\frac{\eta_b}{\eta_0}\right) &\sqrt{\frac{h_0(d_0 - h_0)}{QU^2 k - \sigma k^2 / \rho_1}} \\ &+ (d_0 - h_0)^{3/2}]^{2/3} \quad (5) \end{aligned}$$

Ligament 직경:

$$d_L = \sqrt{\frac{8h}{K_s}} \quad (6)$$

장파의 경우 액막 분열 길이가 복잡하게 유도된 이유는 액막의 최대 성장률이 액막 두께의 함수로 표현되기 때문이며 단파는 액막 두께와는 무관하기 때문에 간략하게 표현될 수 있다. 또한 액막의 두께는 원추형의 기하학적 형상과 질량 보존으로부터 유도된다.

장파와 단파 두 경우 모두 다음과 같은 식으로 ligament 이후의 분열된 직경을 구할 수 있다.

$$d_D = 1.88d_L(1+3Oh)^{1/6} \quad (7)$$

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

## 2.2 계산 모델

본 연구에서는 위의 모델들을 KIVA[3]에 적용하였으며 2차 액적 분열모델은 TAB[3] 모델을 사용하였고, 난류 모델은 RNG모델을 사용하였다. 또한 액적의 분포는 원래의  $\chi^2$ 분포로부터 문윤완 등[1]이 수행했던 결과를 바탕으로 Rosin-Rammler 분포를 적용하였다. KIVA에는 2차원 축대칭의 경우 선회분무 모사가 되어 있지 않으므로 다음과 같이 간단한 식을 사용하여 선회분무의 속도 성분을 모사하였다.

$$v_{axi} = V\cos(\alpha/2) \quad (8)$$

$$v_{norm} = 0.0$$

$$v_{othr} = V\sin(\alpha/2)$$

동축 스월형 분사기의 분사기 끝단에서 이론 초기 액막 두께와 선회각은 수력학적인 1차원식으로 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다[4].

$$\tan(\alpha/2) = \frac{2\mu A}{((1+S_B)^2 - 4\mu^2 A^2)^{0.5}} \quad (9)$$

여기서  $(\alpha/2)$ 는 분무각이고  $\mu$ 는 충전 계수,  $A = Rr_o/n_{inl}r_{inl}^2$ 는 분사기의 기하학적 특성이며  $R$ ,  $r_o$ ,  $r_{inl}$ 은 Fig. 1에 나타나 있으며  $n_{inl}$ 은 접선방향 입구의 개수이다. 또한  $S_B$ 는 Fig. 1에서 보듯이 분사기 출구에서 air core와 분사기 출구 반경의 비로서  $S_B = r_{mb}/r_o$ 로 정의한다. 여기서 고려하여야 할 것은 위의 Eq. (9)은 일반적으로

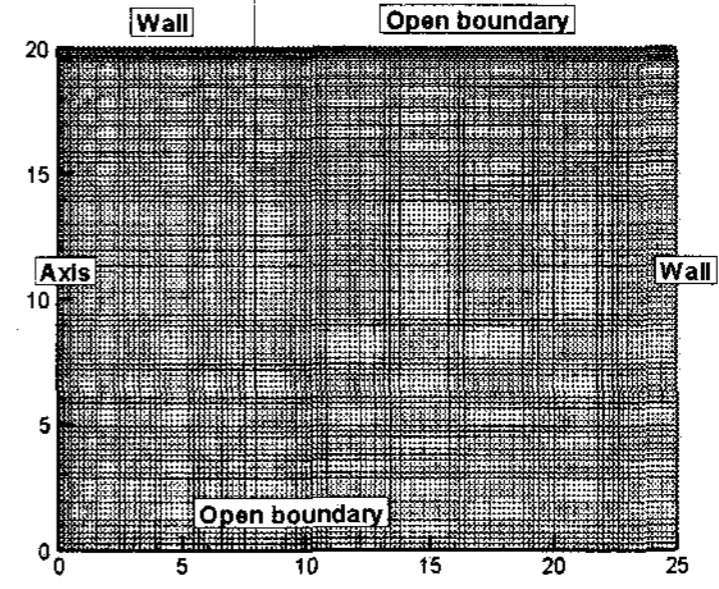


Fig. 2 Grid and boundary conditions

Table 1 Experiment condition

$\Delta P_{inj}$ (bar)	5.79
$\dot{m}$ (g/s)	25.21
$P_{amb}$ (bar)	1, 10, 40

동축 스월형 분사기의 차압 및 마찰 손실은 분사기 내에서 접선방향 입구에서 대부분 발생하게 되는데 이것을 고려하지 않고 있다는 것이다. 이와 같은 마찰 손실을 고려하면 다음과 같은 식으로 바뀌어야 한다[4].

$$\tan(\alpha_\theta/2) = \frac{2\mu_\theta A_\theta}{((1+S_B)^2 - 4\mu_\theta^2 A_\theta^2)^{0.5}}$$

여기서  $A_\theta$ 는 접선방향 입구의 마찰 손실을 고려한 분사기 특성계수이며 그에 따라  $\mu_\theta$ 를 최대 유량흐름이론[4]에 의해 구하고  $S_B$ 를 다음의 식으로부터 구한다.

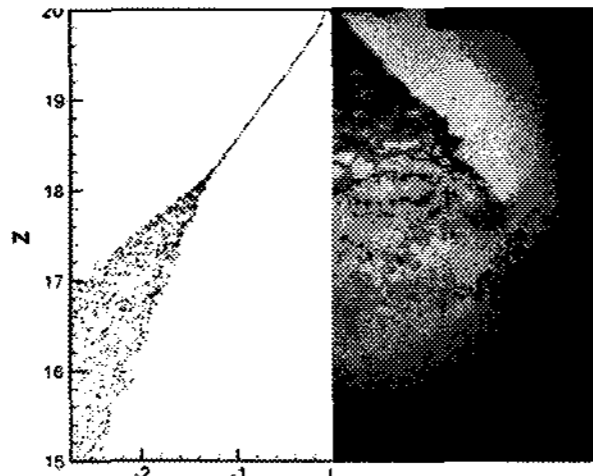
$$\mu_\theta = (1 - \mu_\theta^2 A_\theta^2) - S_B(S_B - \mu_\theta^2 A_\theta^2)^{0.5} - \mu_\theta^2 A_\theta^2 \ln \frac{1 + (1 - \mu_\theta^2 A_\theta^2)^{0.5}}{S_B + (S_B - \mu_\theta^2 A_\theta^2)^{0.5}} \quad (10)$$

## 3. 결과 및 고찰

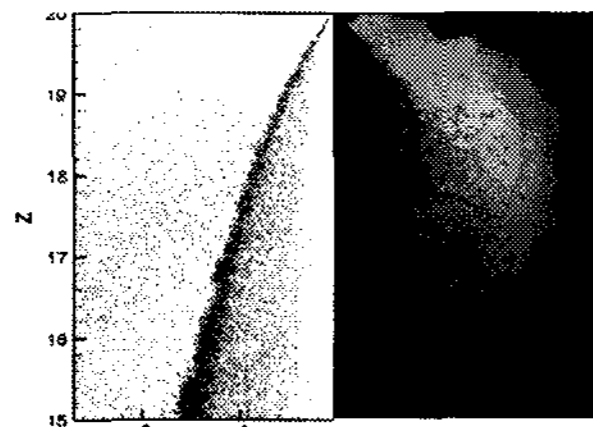
고압 환경에서의 분무 현상을 수치적으로 해석하기 위해 김동준 등[5]이 실험한 결과를 채택하였다. 이 실험은 고압탱크에서 주위압을 변경시키면서 1 bar에서 40 bar까지 다양한 질량 유량으로 분무의 특성을 살펴 본 것이다. 고압탱크의 유동장을 모사하기 위해 Fig. 2와 같이 계산 영역과 경계조건을 선정하였다. 계산 영역은

Table 2. The geometry of injector for validation[6]

$r_{k'}$ mm	3.0	$R$ , mm	2.5
$r_{p'}$ mm	0.5	$L_{k'}$ mm	10.0
$i$	3	$r_{0'}$ mm	1.0



a) Pamb = 1 bar



b) Pamb = 40 bar

Fig. 3 Spray field comparison of numerical and experimental results

25×20 cm이고 100×100 격자를 사용하였다. 계산 조건과 계산에 사용된 분사기의 대략적인 치수는 Table 1과 Table 2에 정리하였으며 실험에 관한 자세한 방법은 [5]에 잘 나타나 있다.

Figure 3은 주위압 1, 40 bar에 대한 분무장의 실험 및 계산결과 비교이다. 그림에서 보듯이 주위압이 증가할수록 액막 분열길이가 짧아지는 것을 볼 수가 있으며 또한 분무장 액적의 수밀도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 40 bar에서는 분무의 폭이 하류로 갈수록 좁아지는 것을 볼 수 있는데 이는 분사기 차압이 변하지 않았으므로 초기의 분사각은 1 bar에서와 같지만 하류로 분무가 진행할수록 주위 기체의 재순환 영역과 분열의 활성화로 액적의 운동량이 적어져 발생하는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기개발된 액막 분열 모델로 고압 환경에서의 분무 특성을 살펴보았다. 기존의 상압 환경에서의 분무 특성에서 고압으로 갈수록 분열길이가 짧아지는 것을 볼 수 있었으며 액적이 보다 미세하게 분열되는 것을 알 수 있었고 주위 기체의 재순환과 분열로 인해 분무 형상이 좁아지는 것을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. 문윤환, 설우석, 윤영빈, "액체로켓엔진에서 동축 스윙형 분사기의 분무특성에 대한 수치적 고찰," 제26회 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2006, pp.156-160
2. 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, 1999, pp.1073-1097
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. Dityakin, Yu. F., Klyachko, L. A., Novikov, B. V., and Yagodkin, V. I., Liquid Atomization, Machnostroenie, Moscow, 1997 (in Russian)
5. 김동준, 임지혁, 길태욱, 한풍규, 윤영빈, "고압환경에서 스윙 인젝터의 분무 및 분열 특성," 한국항공우주학회지, 제34권, 제7호, 2006, pp.97-104