

# 압력 선회 분사기 분무모델에서 액적분포함수 영향 고찰

문윤완\* · 설우석\* · 윤영빈\*\*

## A Study of Effect of Droplet Distribution Functions in Modeling of Pressure-Swirl Atomizer

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

### ABSTRACT

This study investigated the spray modeling of the pressure-swirl atomizer installed in liquid rocket engine and the effect of drop distribution function especially. The  $\chi^2$ , originally implemented to KIVA, Rosin-Rammler and modified Rosin-Rammler distribution functions were investigated theoretically and compared to each other. Also, they were applied to pressure-swirl atomizer similar to the injector installed in liquid rocket engine to evaluate the feasibility for LRE injector. Among the distribution functions, original Rosin-Rammler distribution function was the most compatible with predicting the spray characteristics of pressure-swirl atomizer installed in liquid rocket engine.

### 초 록

본 연구는 액체로켓엔진에 장착되는 압력 선회 분사기의 분무 모델에 대해 연구하였고, 특히 액적 분포함수에 대한 영향을 고찰하였다. KIVA에 기존의 함수인  $\chi^2$ 와 Rosin-Rammler 및 수정된 Rosin-Rammler 함수에 대해 이론적으로 고찰하였고, 액체로켓엔진에 장착되는 압력 선회 분사기와 유사한 경우에 적용하였으며, Rosin-Rammler 분포가 액체로켓엔진에 장착되는 압력 선회 분사기의 분무 특성에 잘 부합되는 것을 파악할 수 있었다.

Key Words: Pressure Swirl Atomizer(압력 선회 분사기), Atomization(무화), Droplet Distribution Function(액적분포함수)

### 1. 서 론

압력 선회 분사기는 가스 터빈 엔진, 산업용

로, 자동차 엔진, 농업용 분무, 액체로켓엔진 등 다양한 분야에 광범위하게 사용된다. 그 중 액체 로켓엔진에 사용되는 압력 선회 분사기는 소요되는 또는 요구되는 추력을 생산하기위해 큰 유량이 필요하며, 터보펌프에서 제공되는 압력과 연소기에서 발생하는 압력의 차이가 다른 적용 분야보다 적은 이유로 발생하는 시스템의 제약

\* 한국항공우주연구원 엔지니어

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail: ywmoon@kari.re.kr

으로 인해 SMD(Sauter Mean Diameter)가 상대적으로 큰 것이 특징이다. 일반적으로 액체로켓에 사용되는 분사기에서의 속도는 30~50 m/s 정도가 되고 차압은 약 10 bar 내외가 되며, 액체로켓엔진에 장착되는 분사기는 기계적 선회기를 사용하지 않는 방식이 대부분으로서 순수하게 점선의 입구로 선회량을 제어하기 때문에 차압의 대부분은 점선 유입구에서 발생하므로 일반적인 단공 분사기(single hole injector)와는 달리 액막(liquid sheet)의 분열에 필요한 에너지인 차압이 분열에 직접 쓰이지 못하게 된다.

본 연구에서는 이러한 특징을 갖고 있는 액체로켓엔진에 장착되는 압력 선회 분사기를 문윤완 등[1]이 모사한 것과 더불어 모델에서의 분열 후 액적 분포를 위한 다양한 분포함수에 대한 고찰을 통해 모델의 민감성 및 물리적 이유 등에 대해 고찰하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 분무 모델[2]

분무 모델은 문윤완 등[1]이 기술했던 것과 동일하다. 간략하게 설명하면 다음과 같다.

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

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.

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

여기서  $Q$ 는  $\rho_{liquid} / \rho_{gas}$ 이다. 위의 식을 점성 액막에 적용하면 파의 성장률의 해를 장파와 단파의 경우에 대해 각각 구할 수 있다[1].

또한 액막 분열과 액적 생성은 다음과 같다. 액막 분열 길이:

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

Ligament 직경 :

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

액적 직경:

$$d_D = 1.88d_L(1 + 3Oh)^{1/6} \quad (5)$$

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

또한 본 연구에서는 충돌 모델을 문윤완 등[1]이 채택한 것을 사용하였다.

### 2.2 액적분포함수

액적분포함수에는 Lefebvre[3]가 제안한 여러 가지 방법이 있다. 그 중 Log-normal이 가장 일반적으로 쓰이나, 여기서는 기본 유동 해석을 KIVA[4]로 수행하였으므로 기본의 분포함수는  $\chi^2$  함수이다. 위에서도 언급한 바와 같이 여러 가지 제약조건으로 인해 압력 선회 분사기에서 발생하는 액적의 조건은 일반 분사기와는 다를 것으로 생각되는 바, Rosin-Rammler 분포함수 및 Lefebvre[3]가 제안한 수정된 Rosin-Rammler를 KIVA[4]에 유도하여 적용하였다.

#### 2.2.1 $\chi^2$ 분포함수

$\chi^2$  함수는 다음과 액적 크기의 누적 분포를 갖는다.

$$V = 1 - \exp\left(-\frac{D}{\bar{D}}\right) \left[1 + \frac{D}{\bar{D}} + \frac{1}{2} \frac{D^2}{\bar{D}^2} + \frac{1}{6} \frac{D^3}{\bar{D}^3}\right] \quad (6)$$

여기서  $\bar{D}$ 는 특성 평균 입경으로서 SMD와의 관계는 다음과 같다.

$$\bar{D} = \frac{1}{3} D_{32}$$

또한 이에 상응하는 체적 분포( $dV/dD$ )는 다음의 식으로 나타난다.

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dD} = & \frac{1}{\bar{D}} \exp\left(-\frac{D}{\bar{D}}\right) \left[1 + \frac{D}{\bar{D}} + \frac{1}{2} \frac{D^2}{\bar{D}^2} + \frac{1}{6} \frac{D^3}{\bar{D}^3}\right] \\ & - \exp\left(-\frac{D}{\bar{D}}\right) \left[\frac{1}{\bar{D}} + \frac{D}{\bar{D}^2} + \frac{1}{2} \frac{D^2}{\bar{D}^3}\right] \end{aligned} \quad (7)$$

#### 2.2.2 Rosin-Rammler 분포함수

Rosin-Rammler 분포함수는 잘 알려진 바와

같이 다음의 누적 분포를 갖는다.

$$V = 1 - \exp\left(-\frac{D^q}{\bar{D}}\right) \quad (8)$$

여기서  $\bar{D}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{D} = D_{32} \Gamma(1 - q^{-1})$$

여기서  $\Gamma$ 는 함수이다.

이에 상응하는 체적 분포함수는 다음과 같다.

$$\frac{dV}{dD} = \frac{qD^{q-1}}{\bar{D}^q} \exp\left[-\frac{D^q}{\bar{D}}\right] \quad (9)$$

### 2.2.3 수정된 Rosin-Rammler 분포함수

Rizk와 Lefebvre[3]는 압력 선회 분사기의 실험 결과 분석 중에 상당히 큰 액적이 생성되는 경우에 원래의 Rosin-Rammler 분포함수가 큰 편차를 보인다는 것을 관측하여 다음의 수정된 Rosin-Rammler 분포함수를 제안하였다.

$$V = 1 - \exp\left(-\frac{\ln D}{\ln \bar{D}}\right) \quad (10)$$

또한  $\bar{D}$ 는 Rosin-Rammler와 같으며 이에 상응하는 체적 분포함수는 다음과 같다.

$$\frac{dV}{dD} = q \frac{(\ln D)^{q-1}}{D(\ln \bar{D})^q} \exp\left[-\left(\frac{\ln D}{\ln \bar{D}}\right)^q\right] \quad (11)$$

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 분포함수에 따른 액적 분포

다양한 분포함수에 따른 액적 분포의 영향을 고찰하였다.  $\chi^2$  분포함수의 경우 KIVA[4]에 내장된 함수로서, 디젤 엔진에서의 액적 분으로 구성된 함수이다. 이것은 디젤 엔진처럼 단공 분사기 및 고압의 분사기 분포에는 잘 일치하는 경향을 보이고 있으나[5], 압력 선회 분사기의 경우에는 계산의 결과를 보면 잘 일치하지 않은 것을 알 수 있었다. Figure 1은 SMD=15  $\mu\text{m}$ 와 35  $\mu\text{m}$ 에 대해 각각의 분포함수에서의 액적 분포에 대한 체적 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보면  $\chi^2$ 분포와 수정된 RR 함수는 SMD가 작음에도 불구하고 매우 큰 SMD의 분포까지 예측하

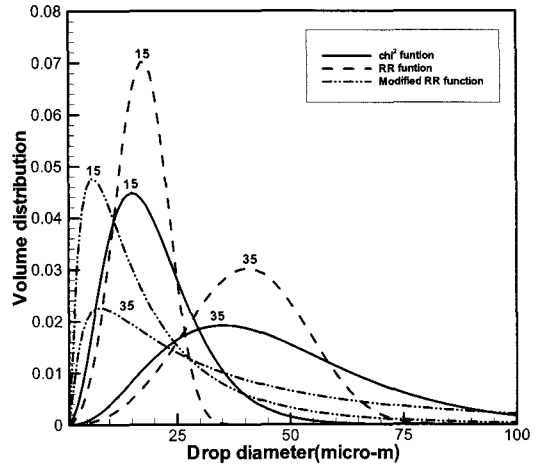


Fig. 1 Comparison of a  $\chi^2$ , Rosin-Rammler and a modified RR function for two SMD cases

고 있는 것을 볼 수 있다. 그와는 달리 RR의 경우는 SMD 부근에 액적이 분포하는 것을 볼 수 있고 특히 위의 경우는 Han 등[5]이 정한  $q=3.5$ 를 채택하였을 경우인데 액적의 크기가 큰 부분은 거의 없음을 보여 주고 있다. 이와 같은 것은 로켓엔진의 분사기에서 발생하는 분무의 SMD가 큰 것을 감안할 때 SMD의 몇 배가 되는 매우 큰 액적을 예측함으로써, 관성이 증가하여 분무 관통도 또는 액적의 분열 등의 과대 예측을 유도할 수 있다는 것을 보여 준다.

### 3.2 액체로켓엔진 분사기 적용

이와 같은 기본 고찰을 바탕으로 다음의 Soltani 등[6]의 경우를 계산하여 보았다. 계산 조건은 table 1과 같다. Figure 2는 하류 4 cm에서의 반경방향에 대한 SMD 분포를 나타낸다.

Table 1 Calculation condition of Soltani[6]'s case

	Inner
test media	water
$\dot{m}$ (kg/hr)	130.0
$\Delta P$ (bar)	15.0
swirl angle ( $^\circ$ )	43.9
$V_{axi}$ (m/s)	31.61
$\delta$ (mm)	0.2

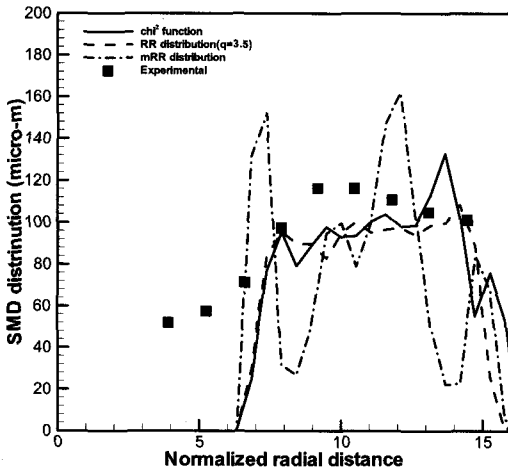


Fig. 2 Comparison of a  $\chi^2$ , Rosin-Rammler and a modified RR function for Soltani's case

그림에서 보듯이 eq. (9)의  $q=3.5$ 일 경우의 Rosin-Rammler 분포가 다른 분포에 비해 SMD를 예측하는데 있어 변동폭이 크지 않음을 알 수 있다.  $\chi^2$  분포의 경우 중앙부에서 외부로 나갈수록 액적 크기를 과대 예측하는 것을 볼 수 있고 수정된 Rosin-Rammler 분포는 전반적으로 예측을 잘 못 하는 것을 볼 수 있다. 수정된 Rosin-Rammler 분포의 경우 Lefebvre는 경우에 따라 예측이 실험과 많은 차이가 발생할 수 있음을 이미 지적하였다[3].

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존의 문윤완 등[1]이 개발한 압력 선회 유동 분사기의 수치모델에서 액적 분포함수에 대한 영향을 살펴보았다.  $\chi^2$ , Rosin-Rammler 및 수정된 Rosin-Rammler 분포함수에 대한 영향을 고찰하였으며, 본 연구에서는 디젤 엔진에 적합한  $\chi^2$  분포함수 대신 액체 로켓엔진에 장착되는 압력 선회 분사기의 분무 모델에는 Rosin-Rammler 분포가 더 적합한 것

을 수치 실험을 통해 파악할 수 있었다. 또한 수정된 Rosin-Rammler 분포의 경우 기존에 Lefebvre가 언급하였듯이 경우에 따라 적용성이 많이 떨어진다는 것을 확인하였고 본 연구에서 연구재료로 삼은 압력 선회 분사기에는 적합하지 않음을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 문윤완, 설우석, 윤영빈, "액체로켓엔진에서 동축 스윙형 분사기의 분무특성에 대한 수치적 고찰," 한국추진공학회 춘계학술대회논문집, 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. Lefebvre, A. H., 1989, *Atomization and sprays*, Hemisphere Publishing Corporation
4. 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
5. 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
6. 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