

동축 스월형 분사기에서 충돌 모델 연구

문윤완*, 설우석**, 윤영빈***

A Study of Collision Model in Coaxial Swirl Injector

Yoonwan Moon*, Woo-Seok Seol** and Youngbin Yoon***

Key Words : Coaxial swirl injector(동축 스월형 분사기), Collision(충돌), Coalescence(병합), Breakup(분열)

Abstract

In this study the effect of collision model was evaluated in spray field by CFD. A collision is basically the interaction between droplets and criteria of collision is determined by drop Weber number, impact parameter, and drop-size ratio. Early developed collision model considered coalescence and grazing collision with the exchange of momentum. However in experimental research there were bouncing, coalescence, reflexive separating and stretching separating in interaction between droplets. In this study the collision considering such complex phenomena is modeled and was compared with the basic collision model.

1. 서론

압력 스월형 분사기는 여러 분야에 다양하게 사용된다. 그중 동축 스월형 분사기는 액체로켓엔진에 사용되는 것으로서 연료와 산화제가 동심을 이루며 분사되며 각각의 분무각이 달라 외부 혼합형의 경우 분사기 외부에서 연료와 산화제의 액막이 서로 충돌한다. 일반적인 충돌형 분사기의 경우 액주가 충돌하여 넓은 막으로 형성된 후 분열되지만 동축 스월형 분사기의 경우 액막이 서로 충돌하여 분열되므로 보다 효율적으로 추진제의 혼합을 이룰 수 있다.

액체로켓엔진에 사용되는 동축 스월형 분사기의 특징은 엔진 시스템의 제약 때문에 작은 분사기 차압을 갖고 산화제와 연료를 동시에 분사한다는 점이다. 특히 산화제가 액체산소인 경우 극저온의 유체와 상온의 연료가 하나의 분사기 요소에서 분사되는 특징이 있다. 이것은 빠른 분무속도를 통해 공기역학적인 분열이 발생하는 일반적인 분사기와는 다르며 액막의 충돌과 공기역학적인 분열이 혼재되어 있는 경우라 하겠다.

액적 충돌의 경우 많은 연구자들이 실험적인 방법을 통해 물리적 현상과 충돌 영역에 대해 연구하였다[1,2]. 이와 같은 연구는 대부분 디젤 엔진에 국한된 것으로서 충돌의 영향으로 인해 하류의 평균입경이 달라지고[3] 속도와 분포에 영향을 미친다[4]는 것을 밝혔다. 이것은 궁극적으로 액적의 수명과 그로 인한 증발 및 연소 현상에 영향을 미치게 된다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 액적 상호작용 모사는 O'Rourke와 Bracco[3] 및 Gavaises 등[4]이 물로 실험한 것에 근거를 두고 있다. 하지만 Jiang 등[5]과 Qian 및 Law[6] 이 관측한 결과, 상압에서의 물과 압력이 증가된 환경에서 탄화수소 계열의 충돌 거동은 다르다는

것을 제시했다.

본 연구에서는 동축 스월형 분사기의 액막 충돌 거동을 모사하기 전에 다양한 충돌 모사가 하류의 SMD에 어떠한 영향을 미치는가를 고찰하기 위해 일반적인 디젤엔진의 분무 차압 조건보다 많이 감소된 영역인 액체로켓엔진의 분사기 차압에서 단일 스월형 분사기에 대해 적용하여 실험과 비교하여 보았다.

2. 이론

일반적으로 액적의 충돌은 충돌 후 충돌 변수와 충돌 We 수에 따라 다음의 영역으로 나눌 수 있다(Qian 및 Law[6]).

- i) slow coalescence
- ii) bounce
- iii) coalescence
- iv) reflexive separation
- v) stretching separation

이와 같은 영역을 impact parameter와 충돌 We수에 따라 그리면 Fig. 1과 같다. 이 영역들은 다음과 같이 설명될 수 있다. 두 개의 액적이 서로 접근할 때 액적 사이에 있는 주위 기체가 갇히고 압축하여 국부적인 압력은 증가하게 된다. 이 때 갇힌 기체가 충돌 전에 빠져나갈 수 있도록 충분히 액적의 속도가 느리면 slow coalescence가 발생한다. 그러나 액적의 상대속도가 상대적으로 커서 기체가 빠져나가지 못 할 정도로 충돌 시간이 짧으면 압력이 액적이 서로 닿지 못하도록 밀어내게 되는데, 이것을 bounce라 한다. 높은 We수에서는 액적이 운동 에너지를 넘어서므로 일시적으로 병합이 된 액적이 분열된다. 높은 충돌 변수에서는 액적은 신장하여 분열하려는 경향이 있고, 거의 정면으로 충돌할 때에는 반발성의 분열(reflexive separation)이 발생한다. 그러나 이 같은 현상은 물의 경우에는 좀처럼 발생하지 않는다. 본 연구에서는 O'Rourke와 Bracco의 모델[3]에 근거하여 일반적

* 한국항공우주연구원 엔진팀, ywmoon@kari.re.kr

** 한국항공우주연구원 엔진팀, wsseol@kari.re.kr

*** 서울대학교 기계항공공학부, ybyoon@snu.ac.kr

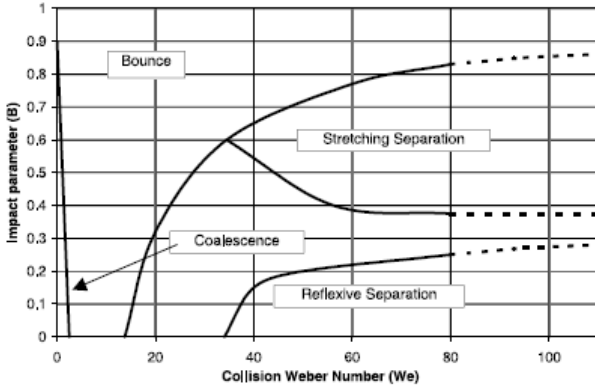


Fig. 1 Schematic of various collision regimes of hydrocarbons droplets in 1 atm. air[6]

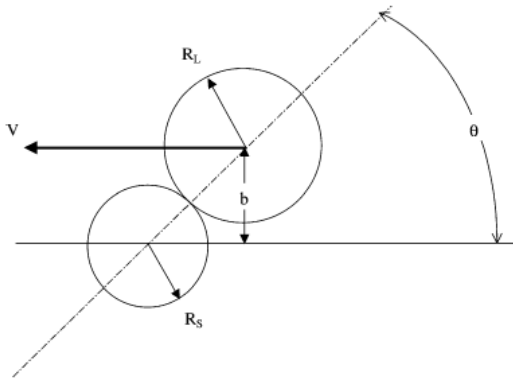


Fig. 2 Definition of the impact parameter in a binary droplet collision

인 병합 모델을 1차로 사용하였고, 그 외 탄성 충돌 모델(bounce model), reflexive separation 모델 및 shattering collision 모델을 사용하였다.

충돌 현상을 설명하기 위해 필요한 각 변수는 Weber 수(We), 충돌 변수(B) 및 액적 크기비(γ) 등이 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$We = \rho U^2(r_1 + r_2)/\sigma \quad (1)$$

여기서 ρ 와 σ 는 액상의 밀도와 표면장력이고 U 는 액적간의 상대 속도, r_1 과 r_2 는 액적의 반경이다. 또한 아래 첨자 '1'은 충돌하는 액적 중 작은 쪽이며 '2'는 큰 부분을 나타낸다.

$$B = b/(r_1 + r_2) \quad (2)$$

여기서 b 는 Fig. 2에서와 같이 하나의 액적에서 다른 액적까지의 중심간의 거리를 나타내는데 상대 속도 벡터와 평행한 선을 두 중심에 각각 그렸을 경우의 거리이다. Fig. 2에서 $B = \sin\theta$ 로 표현할 수 있다. 즉, $B = 0$ 이면 정면충돌이고, $B = 1$ 이면 거의 스쳐지나가는 것이 된다. 액적 크기비는 다음과 같이 두 가지 방법으로 정의된다.

$$\gamma = r_2/r_1 \quad (3)$$

$$\Delta = r_1/r_2 = 1/\gamma \quad (4)$$

여기서 $r_2 > r_1$ 이다.

병합모델은 O'Rourke와 Bracco[3]가 제시한 모델을 사용하였으며 이것은 KIVA-II 설명서에 잘 나와 있으므로 나머지 모델에 대해 설명하기로 한다.

2.1 탄성 충돌 모델(Bounce model)

Estrade 등[1,2]은 실험을 통해 탄성 충돌에 대해 기준을 제시하였다. 실험에 기초하여 두 개의 액적이 서로 접근할 때 반구형으로 변형된다고 가정하였고 서로 가까워질 때의 그 변형은 표면 에너지의 증가를 가져오며 그 에너지가 두 액적의 초기 운동에너지보다 크면 탄성 충돌이 발생한다고 가정하여 다음의 기준을 제시하였다.

$$We < \frac{\Delta(1 + \Delta^2)(4\phi' - 12)}{\chi_1(\cos(\arcsin B))^2} \quad (5)$$

여기서 ϕ' 은 형상 factor로서 3.351로 측정된 값을 사용하며, χ_1 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{cases} \chi_1 = 1 - 0.25*(2 - \tau)^2(1 + \tau) & (\tau > 1.0) \\ \chi_1 = 0.25\tau^2(3 - \tau) & (\tau \leq 1.0) \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $\tau = (1 + B)(1 + \Delta)$ 이다.

ϕ' 은 형상 factor로서 구로서 가정하였을 경우 3.351인데, 이것은 주위의 압력에 대한 영향을 고려하면 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$\phi' = \phi'_0(\rho_a/\rho_o)^{2/3} \quad (7)$$

2.2 반발 분열 모델(Reflexive Separating model)

Ashgriz와 Poo[1]는 reflexive separation 모델의 기준을 다음과 같이 제시하였다.

$$We > 3[71 + \Delta^3]^{2/3} - 4(1 + \Delta^2) \frac{\Delta(1 + \Delta^3)^2}{\Delta^6\eta_1 + \eta_2} \quad (8)$$

여기서 $\eta_1 = 1(1 - \xi)^2(1 - \xi^2)^{1/2} - 1$

$$\eta_2 = 2(\Delta - \xi)^2(\Delta^2 - \xi^2)^{1/2} - \Delta^3$$

$$\xi = 0.5B(1 + \Delta)$$

$$\Delta = r_1/r_2 (r_2 > r_1)$$

$$\gamma = r_2/r_1$$

$B = b/(r_1 + r_2)$ 이다. 또한 b 는 Fig. 2에 잘 정의되어 있다.

2.3 신장 분열 모델(Stretching Separating model)

높은 충돌 We수와 높은 충돌 parameter에서는 두 개의 액적이 충돌하여 분열을 발생시킨다. 그 식은 다음과 같다.

$$\ddot{r} = \frac{9\sigma r_c^4}{16\rho R_o^6} - \frac{27\sigma r_c^7}{32\rho R_o^9} + 3\frac{r_c^2}{r} \quad (9)$$

여기서 r_c 는 두 개의 액적이 충돌하여 발생하는 원통의 반경이고, R_o 는 두 개의 원형인 액적이 병합되었을 때의 반경이 된다.

Table 1 Experiment and calculation conditions[20]

ΔP_{inj} (bar)	\dot{m}_{inj} (g/s)	simulant
8	28.84	Water

Table 2. The geometry of injector for validation[20]

r_k , mm	3.0
r_p , mm	0.5
i	3
R , mm	2.5
L_k , mm	10.0
r_0 , mm	1.0

이것을 무차원화 하면 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\ddot{r}^* = \frac{9}{4 We (1 + \Delta^{-3})^{1/3}} r^{*4} - \frac{27}{8 We (1 + \Delta^{-3})^{1/3}} r^{*7} + 3 \frac{\dot{r}^{*2}}{r^*} \quad (10)$$

여기서 $r^* = r_c/R_o$, $t^* = 0.5tU/R_o$ 이다. 경계조건은 $r^*(0) = 1$, $\dot{r}^*(0) = -0.75\alpha$ 이며 α 는 0(1)정도의 상수이다. 위식에서 We수가 매우 크다는 가정에서 우변의 첫 번째 두 항을 소거하면 그 해는 다음과 같다.

$$r^* = \frac{1}{(1.5\alpha t^* + 1)^{0.5}} \quad (11)$$

무차원화된 분열시간은 다음과 같다.

$$t^* = 9.24 \sqrt{(We (1 + \Delta^{-3})^{1/3})^{1/2} r^{*3/2}} \quad (12)$$

위의 Eq. (12)와 $\alpha = 0.44$ 를 취하면 다음과 같이 분열되어 발생하는 액적의 크기를 결정할 수 있다.

$$r_{child}^* = \frac{1.89}{\sqrt{2.81 We^{2/7} (1 + \Delta^{-3})^{2/21} + 1}} \quad (13)$$

여기서 주목할 것은 원통형의 액주가 분열되는 데에는 주위 기체의 영향이 포함되어 있지 않다는 것이다. Frohn과 Roth는 We수가 1000과 1800사이에 발생하는 것을 발견한데 반해, Willis와 Orme는 We수가 3200까지 가더라도 진공에서는 거의 발생하지 않는 것을 밝혔다. 그러나 Gunn과 Park은 $We < 200$ 에서 분열이 발생하는 것을 관측하였고, Georjon과 Reiz는 분열 criterion을 $We > 100$ 으로 생각하였다[1]. 여기서는 We 수 100을 기준으로 하였다.

3. 결과

3.1 계산 조건

충돌 모델에 대한 영향을 평가하기 위해 김동준 등[7]이 실험한 조건을 채택하였고 그 중 주위압 1 bar에서의 조건으로 계산을 수행하였으며 Table 1과 같이 요약 될 수 있다. 또한 그 때

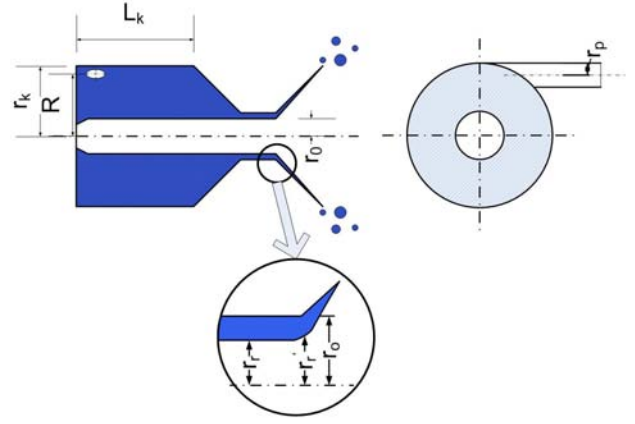
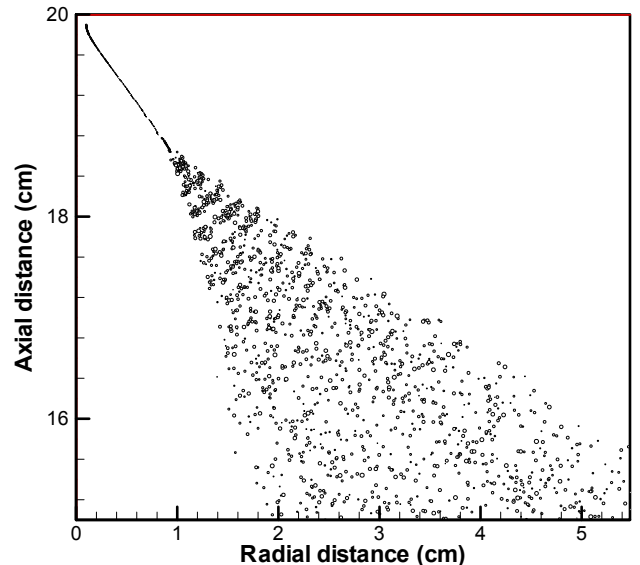


Fig. 3 Schematic and main geometric symbols of coaxial swirl injector

사용한 분사기의 개략도와 치수는 Fig. 3 및 Table 2와 같다. 계산 격자는 20×20 cm의 100×100으로서 2차원 축대칭으로 계산을 수행하였다.

3.2 충돌 모델 비교

충돌 모델을 비교하기 위해 충돌 모델이 없을 경우, O'Rourke의 모델 및 현재의 모델을 각각 계산하였다. Fig. 4는 분무 영역을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 분무 형상에 대한 차이는 거의 없는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 차압이 8 bar로서 매우 낮아 분열이 액막의 분열 이후 운동량이 작아 2차 분열 및 충돌이 크게 발생하지 않아 발생하는 현상일 것으로 생각된다. 또한 현재 모사 유체를 물로 하였는데 이는 탄화수소 계열의 연료와는 충돌에 대해 많이 다른 영역을 보여주고 있다. 즉, 물에서는 reflexive separation과 stretching separation이 거의 발생하지 않는 것으로 알려져 있는데[3] 위의 그림에서도 그와 같은 현상이 관측되고 있음을 알 수 있다. 이를 검증하기 위해 Fig. 5와 같이 분사기 하류 50 mm에서 SMD의 분포를 실험값과 비교하여 보았다. 역시 그림에서도 알 수 있듯이 서로 미묘한 분포의 변화는 보여주고 있으나, 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. SMD의 분포를 통해 알 수 있는 것은 액막이 선회유동을 하면서 분열되므로 원심력으로 인해 액적이 넓게 분포한다는 것이다. 이



a) No collision model

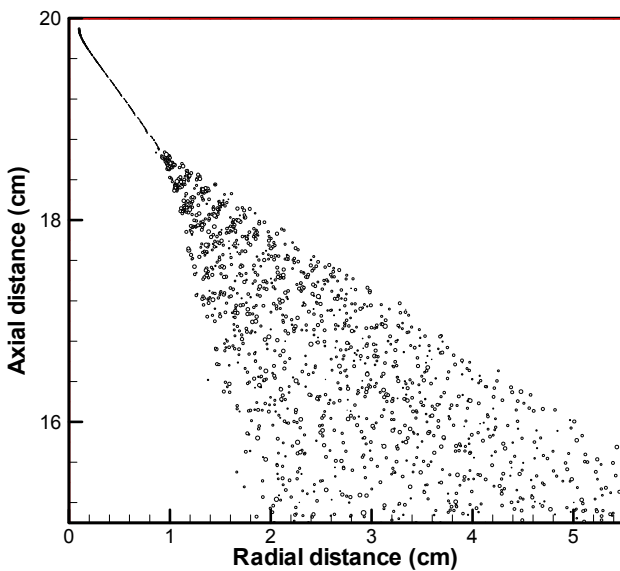
는 액적과 액적이 서로 충돌할 수 있는 기회를 줄여주는 역할을 한다고 생각된다.

4. 결론

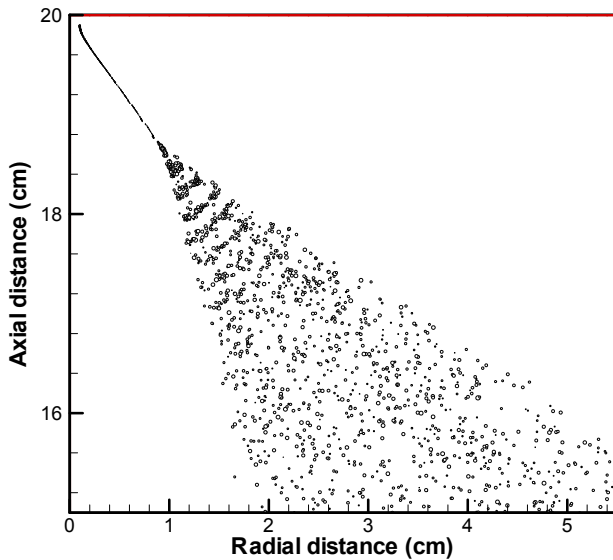
본 연구에서는 단일 스윙형 분사기의 충돌에 대한 고찰을 수행하였다. 이를 위해 충돌 모델이 없는 경우, 고전적인 충돌 모델 및 새로운 충돌 모델에 대해 비교하였고, SMD에 대해서는 실험 결과와 비교하였다. 이를 통해 차압이 낮은 액체로켓엔진에 장착되는 분사기에서 발생하는 분무장은 낮은 운동량과 넓은 분무각 등으로 인해 충돌에 대한 민감도가 많이 간소하는 것을 알 수 있었으며, 특히 모사 추진제를 물로 하였기 때문에 실제 추진제에서 발생하는 다양한 과정을 실험과 CFD에서 동일하게 예측하지 못함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Post, S.L., Abraham, J., 2002, "Modeling the outcome of drop-drop collisions in Diesel sprays," *International Journal of Multiphase Flow* 28, pp.997-1019
- [2] Munnannur, A., Reitz, R.D., 2007, "A new predictive model for fragmenting and non-fragmenting binary drop:et collisions," *International Journal of Multiphase Flow* 33, pp.873-896
- [3] O'Rourke, P., Bracco, F., 1980. "Modeling of drop interactions in thick sprays and a comparison with experiments," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 9, pp.101-106
- [4] Gavaises, M., Theodorakakos, A. Bergeles, G., Breen, G., 1996. "Evaluation of the effect of droplet collisions on spray mixing," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 210, pp.465-475
- [5] Jiang, Y., Umemura, A., Law, C.K., 1992. "An experimental investigation on the collision behaviour of hydrocarbon droplets," *Journal of Fluid Mechanics* 234, pp.171-190
- [6] Qian, J., Law, C.K., 1997. "Regimes of coalescence and separation in droplet collision," *Journal of Fluid Mechanics* 331, pp.59-80
- [7] 김동준, 임지혁, 길태욱, 한풍규, 윤영빈, 2006. "고압환경에서 스윙 인젝터의 분무 및 분열 특성," *한국항공우주학회지*, 제 34권, 제7호, pp.97-104



b) O'rourke's model



c) New model

Fig. 4 Comparison of Spray field distribution according to collision model

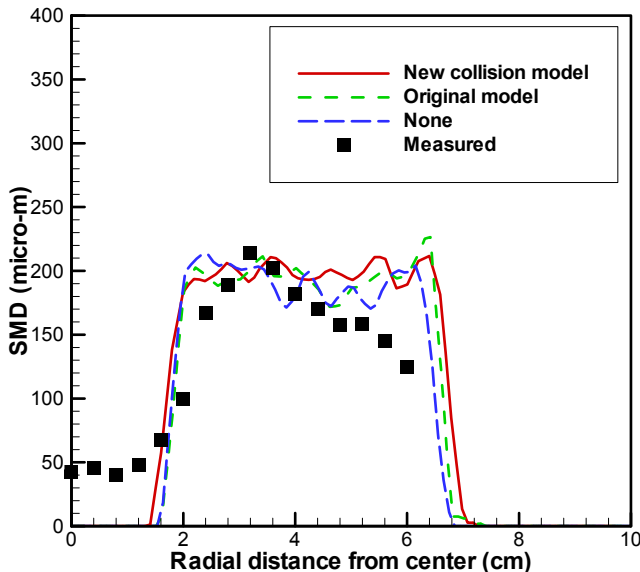


Fig. 5 SMD Comparison with experiment at each model