

PSIC 모델을 이용한 액체로켓의 연소실내 분무유동 해석

정대권* · 노태성**

Analysis for Spray Flow Using PSIC Model in Combustion Chamber of Liquid Rocket Engine

Daekwon Jeong* · Taeseong Roh**

ABSTRACT

A numerical study for spray flow of fuel and oxidizer droplets in the combustion chamber has been conducted prior to the analysis of spray combustion of the liquid rocket engine. As the spray combustion model, DSF model and Euler-Lagrange scheme have been used. While the coupling effects of the droplets between gas phase and evaporated vapor have been calculated using PSIC model, SIMPLER algorithm and QUICK scheme have been used as numerical schemes. As the results, the calculations have shown velocity and temperature distribution in combustion chamber as well as mole fraction of fuel and oxidizer.

초 록

액체로켓의 연소실내 분무연소 현상을 해석하기 위해 비연소 반응의 연료와 산화제 액적의 분무유동을 해석하였다. 분무연소 모델로 DSF 모델과 Euler-Lagrange 방법을 사용하였다. 액적과 가스상 그리고 증발한 기체상의 커플효과는 PSIC 모델을 사용하여 계산하였으며 수치 해석 방법으로 SIMPLER 알고리즘과 QUICK Scheme을 사용하였다. 해석결과 연소실내 속도와 온도 분포를 알 수 있었고, 연료와 산화제의 물분을 또한 알 수 있었다.

Key Words: Spray Combustion(분무연소), Droplet(액적), DSF Model, PSIC Model, Quick Scheme

1. 서 론

액체로켓엔진에서는 분무연소 현상이 나타난다. 분무연소 현상에 관한 연구는 연소실내 물리적 현상을 이해하는 중요한 자료를 제공한다. 액

체로켓엔진의 유동은 가스와 추진제 액적, 산화제 액적으로 이루어진 다상 분무 유동이다.[1]

분무연소 현상에 관한 연구에는 실험적 방법과 수치적 방법이 있는데 이 중 수치적 방법은 비용절감 차원에서 큰 장점이 있다. 분무연소의 수치해석 모델에 관해 많은 연구가 이루어졌다. Feath는 LHF(Locally Homogeneous Flow) 모델과 SF(Separated Flow) 모델로 구분하였으며, SF 모델은 다시 난류변동 효과에 따라 DSF모델과

* 학생회원, 인하대학교 항공공학과

** 정회원, 인하대학교 항공학과

· 연락처자, E-mail: tsroh@inha.ac.kr

SSF모델로 구분된다.[2] Sirignano는 연속상과 분산상의 해석방법에 따라 Euler-Euler 방법과 Euler-Lagrange 방법으로 구분하였다.[3] 이 중 DSF 모델과 Euler-Lagrange 방법을 액적과 산화제의 분무유동을 모사하는 데 사용하였다. 그리고 고차차분기법인 QUICK Scheme과 액적과 가스상 그리고 가스상과 증발된 기체상의 커플효과를 위한 PSIC 모델을 사용하여 가상의 연소기 그리드에서의 연소반응이 없는 정상상태 분무유동을 수치적으로 살펴보았다.

2. 기본 이론

2.1 지배방정식

본 연구에서는 압축성을 고려한 정상상태 유동장을 2차원 비직교 좌표계에서 계산하였다. 가스상의 지배방정식을 일반형 미분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S_{\phi,g} + S_{\phi,l} \quad (1)$$

ϕ 는 독립변수, Γ_ϕ 는 확산계수, $S_{\phi,g}$ 와 $S_{\phi,l}$ 은 각각 가스상과 기체상의 생성항이다. 가스상은 연소실내 셀 영역을 흐르는 유동장으로 정의하며, 기체상은 계산될 셀 영역에서 액적이 기화되어 기체 상태로 변화한 것을 의미한다. 난류모델은 Spalding과 Launder의 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다.[4]

2.2 액적의 지배방정식

액적의 기화는 준 정상과정이라 가정하였고, 가스의 난류에 의한 액적 운동의 난류효과는 무시하였다.(DSF 모델) 중력을 무시한 액적의 운동방정식은 다음과 같다.[5]

$$m_d \frac{dv}{dt} = C_{d\rho}(U-v)|U-v| \frac{A_d}{2} \quad (2)$$

여기서 항력계수는 액적의 레이놀즈수에 따라 다음과 같이 구분하여 사용하였다.

$$\begin{aligned} Re_{drop} < 1000, C_d &= \frac{24}{Re_{drop}}(1 + 0.15 Re_{drop}^{0.667}) \\ Re_{drop} \geq 1000, C_d &= 0.44 \end{aligned} \quad (3)$$

$$Re_{drop} = \rho \frac{d|U-v|}{\mu} \quad (4)$$

운동방정식을 액적의 속도변화에 대한 식으로 정리하면 액적의 속도변화에 따른 궤도변화를 알 수 있다.

$$x_{n+1} = x_n + (v_{x,n+1} - v_{x,n}) \frac{\Delta t}{2} \quad (5)$$

$$y_{n+1} = y_n + (v_{y,n+1} - v_{y,n}) \frac{\Delta t}{2}$$

액적의 질량 증발율은 물질전달 계수(Sh)와 확산계수(D), 액적표면과 Free stream 에서의 질량분율(y_ν, y_∞)로 나타낼 수 있는데, 이를 이용하면 액적의 직경에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$d_{n+1} = d_n - \frac{d(d)}{dt} \Delta t \quad (6)$$

$$\frac{d(d)}{dt} = -2Sh(\rho D) \frac{y_\nu - y_\infty}{\rho_d d}$$

그리고 액적의 온도가 끓는점에 도달하게 되면 액적의 온도가 변하지 않게 되므로 이때는 열평형방정식을 이용하여 액적의 직경에 관한 식(Eq. 7)을 얻을 수 있다.

$$\frac{d(d)}{dt} = -2 \frac{\dot{q}}{\pi L \rho_d d^2} \quad (7)$$

액적의 온도 역시 열평형 방정식을 변형한 Eq. 8를 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{d,n+1} = T_g - (T_g - T_{d,n}) \exp\left(\frac{-\Delta t}{\theta}\right) \\ - Q_L \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{\theta}\right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 수치해석 기법

정상상태의 해를 구하기 위해 속도와 압력을

결합하여 수렴 해를 구하는 SIMPLER 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘은 SIMPLE 알고리즘의 변형된 알고리즘이라 할 수 있다. SIMPLE 알고리즘에서는 압력 수정과 속도 수정을 한 번만 수행하는 반면 SIMPLER 알고리즘에서는 이를 두 번 수행하여 좀 더 나은 결과 값을 얻게 해 준다. 공간 차분 기법으로는 고차 차분 기법인 QUICK Scheme을 사용하였다.

분무되는 액적은 가스상의 특성에 영향을 받고, 가스상은 증발된 기체상의 특성에 다시 영향을 받는다. 따라서 분무유동장을 해석하기 위해서는 액적과 가스상 그리고 증발된 기체상의 상호영향을 고려해야 한다. 이를 계산하기 위해 PSIC(Particle Source in Cell) 모델을 사용하였다.[6] PSIC 모델을 고려한 전체 수치 해석 모델은 다음과 같다. 먼저 분무를 제외한 유동장의 흐름을 계산한 후, PSIC 모델을 사용하여 가스상의 특성을 구하고 이를 통해 액적지배 방정식을 계산한다. 이렇게 계산된 액적의 특성치들을 다시 PSIC 모델을 사용하여 가스상의 생성향으로 포함하여 유동장의 흐름을 계산하여 속도와 압력이 수렴할 때까지 반복 계산한다.

3. 결 과

3.1 초기 조건

연소실의 형상은 Fig. 1과 같이 반경이 0.08 m의 연소실과 노즐로 설정하였다. 연속방정식을 만족시키기 위해 1000K의 질소가스를 사용하여 연소기 내에 유동장을 생성하였고, 거기에 액체상태의 연료(n-Decane, $C_{10}H_{22}$)와 산화제(LOX, O_2)를 분무시키는 형식을 취하였다. 질소 가스는 유입구 전면으로 수평방향 2 m/s의 속도로 유입되고, 연료와 산화제는 각각 열 개의 인젝터로 역시 수평방향 20 m/s의 속도로 분무된다고 가정하였다. 연료와 산화제의 액적 크기는 각각 $70 \mu\text{m}$ 와 $100 \mu\text{m}$ 로 설정하였고, 초기온도는 연료 300 K, 산화제 80 K로 설정하였다. 연소실 입구에서의 초기조건은 Table. 1과 같다.

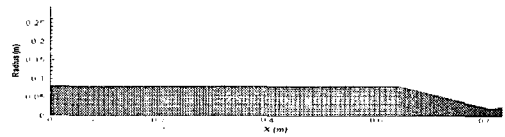


Fig. 1 Combustion Chamber Grid

Table 1 Inlet condition and properties

Inlet velocity	2 m/s
Inlet temperature	1000 K
Nitrogen mass flow rate	27.84 g/s
n-decane velocity	20 m/s
n-decane temperature	300 K
n-decane mass flow rate	4.016 g/s
LOX velocity	20 m/s
LOX temperature	80 K
LOX mass flow rate	20 g/s

Table. 1의 초기조건을 이용하여 연소기내 연료와 산화제의 비연소 분무유동현상을 살펴보았다.

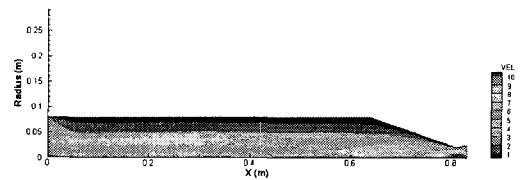


Fig. 2 Velocity of Combustion Chamber

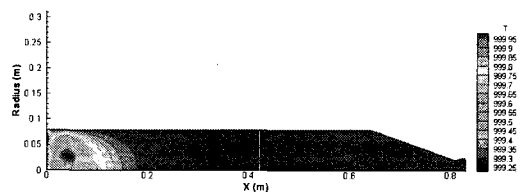


Fig. 3 Temperature of Combustion Chamber

Figure. 2와 Fig. 3은 비연소 반응에서의 연소실내의 속도 분포와 온도분포를 나타낸 것이다. 비연소 반응시 연소실내의 속도는 노즐에 의해 노즐 목부근에서 속도가 증가한 것을 제외하고는

특이할 만한 것을 찾아볼 수 없었다. 그리고 Fig. 3의 온도분포를 살펴보면 연소기 입구 부근에서 온도 저하가 있음을 살펴볼 수 있었다. 이는 온도가 낮은 연료와 산화제의 영향으로 증발열을 빼앗겨서 생긴 결과라 할 수 있다.

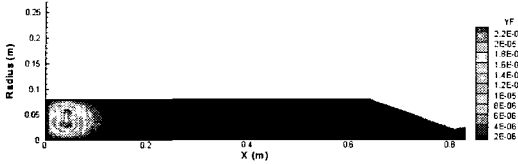


Fig. 4 Mass Fraction of Fuel

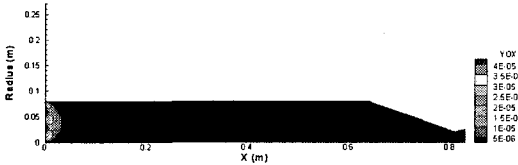


Fig. 5 Mass Fraction of LOX

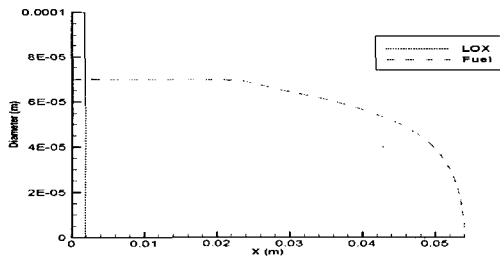


Fig. 6 Diameter of LOX and Fuel

Figure. 4 와 Fig. 5에 연료와 산화제의 물분율을 나타내었다. 연료는 연소기 입구에서 0.05 m 떨어진 곳에 집중되어 있는 반면 산화제는 연소기 입구 부근에 집중 되어 있다. 이는 Fig. 6을 통해 알 수 있는데 끓는점이 낮은 산화제 액적이 연소기 입구 부근에서 완전히 증발한 반면 상대적으로 높은 끓는점을 가진 연료의 액적은 연소기 입구에서 0.05 m 떨어진 곳 부근에서 완전히 증발하였다. 이 차이가 물분율의 차이를 가져온 것이라 할 수 있다.

4. 결 론

질소가스가 흐르는 유동장에 연료와 산화제 액적을 분무시켜 비연소 분무유동을 살펴보았다. 비연소 분무유동시의 연소실 내 속도분포와 온도분포를 계산하였고, 연료와 산화제 액적의 직경변화와 물분율도 계산하였다. 그 결과 연료 액적의 증발에 의한 온도 저하 현상과 증발열과 물분율 사이의 상관관계를 알 수 있었다. 일반적으로 연소 현상은 액적이 완전히 증발한 기체상태에서 이루어진다. 이 사실과 물분율을 결과로 미루어 볼 때 연소반응이 첨가된다면 이는 연료가 완전히 증발하는 즉 연료의 물분율이 높은 부분에서 연소 현상이 활발히 일어날 것이라 예상된다.

참고문헌

1. Kenneth K. Kuo, Principles of Combustion, John Wiley & Sons, 1996
2. G. M. Faeth, "Current Status of Droplet and Liquid Combustion", Prog. Energy Combust. Sci., Vol 3, 1977, pp.191-224.
3. W. A. Sirignano, "The Formulation of Spray Combustion Models: Resolution Compared to Droplet Spacing", ASME Journal of Heat Transfer, Vol 108, No 3, 1989, pp.710-718
4. Launder, B. F., Spalding, D. B., Mathematical models of Turbulence, Academic Press, London, United Kingdom, 1972.
5. Wallis, G. B., "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw Hill, 1969.
6. C. T. Crowe, M. P. Sharma, D. E. Stock, 'The Particle-Source-In Cell Model for Gas-Droplet Flows', Journal of Fluids Engineering, 1977, pp.325-332.