

액적 가열을 고려한 분무 연소의 수치 해석

성형건* · 정대권** · 이상명*** · 노태성***

Numerical Analysis for Spray Combustion Considering Droplet Heating

Hyunggun Sung* · Daekwon Jeong* · Sangmyeong Lee** · Taeseong Roh***

ABSTRACT

In order to provide a useful data of combustion chamber design, a numerical analysis for spray combustion of fuel and oxidizer in combustion chamber has been conducted. As a spray model, the DSF model and the Euler-Lagrange scheme have been used. The change of droplet temperature has been calculated considering droplet heating. The coupling effects between and the gas phase the droplets, and between the gas phase and the evaporated vapor have been calculated using the PSIC model.

초 록

연소기 설계에 유용한 자료를 제공하기 위해 연소실내에서 연료와 산화제의 분무 연소에 관한 수치적 해석을 수행하였다. 분무 모델로 DSF 모델과 Euler-Lagrange 방법을 사용하였다. 액적 가열을 고려하여 액적의 온도 변화를 계산하였다. 액적과 가스상의 커플효과와 가스상과 증발된 기체상의 커플효과를 고려하기 위해 PSIC 모델을 사용하여 계산하였다.

Key Words: Spray Combustion(분무연소), LOx(액체산소), n-Decane, Droplet Heating(액적 가열)

1. 서 론

일반적으로 가스터빈의 연소기의 경우에서 연료는 액적의 상태로 분무되고 산화제는 기체로 연소실을 흐른다. 그러나 액체 로켓 엔진의 경우에는 연료와 산화제가 액적 상태로 연소실내로 분무 되어 진다. 이러한 차이로 인해 연소기내의

화염이 산화제의 증발량에 영향을 받는다. 따라서 연료와 산화제의 분무 연소는 액체 로켓 엔진의 연소기를 이해하는데 중요하다.

본 연구에서는 액체 로켓 엔진의 연소기 해석을 이해하기 저속의 질소가스가 흐르는 연소실내 분무 연소를 수치적으로 해석하였다. 유동이 없는 가스상의 지배 방정식은 수렴성이 좋지 않기 때문에 질소가스를 흐르도록 하였다. DSF 모델을 사용하여 원통형 연소기내 액적의 분무를 하였고 액적의 가열을 고려하였다[1][2]. 가스

* 인하대학교 공과대학원 항공공학과

** 인하대학교 항공우주공학과

*** 인하대학교 항공우주공학과 교수

연락처, E-mail: seaoffall@korea.com

Table 1. Conservation Equation for gas phase

Equation	ϕ	Γ_ϕ	$S_{\phi,g}$
Continuity	1	0	0
Momentum	\mathbf{v}_i	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i$
Species mass fraction	Y_s	ρD_{AB}	$-w_i R_{fu}$
Energy	h	$\frac{\mu_e}{\sigma_h}$	$w_f R_{fu} Q_s$
Turbulent kinetic energy	k	$\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon}$	$G_k - \rho \epsilon$
Dissipation rate	ϵ	$\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon)$

상의 해석은 오일러 좌표계를 사용하고, 기체상과 액체상의 해석에는 라그랑지 좌표계를 사용하였다. 가스상과 기체상의 상호 영향과 가스상과 액적의 상호 영향을 계산하기 위해 PSIC 모델을 사용하였다[3]. 액적의 증발량을 일반화된 가스상 방정식의 생성항으로 계산하였다. 연료는 n-Decane, 산화제는 LOx를 사용하여 저속의 질소가스가 흐르는 연소실내 분무 연소를 수치적으로 해석하였다. 이를 통해 액적의 크기, 온도 변화와 가스상의 유동장의 온도 분포와 속도 분포를 조사해 보았다.

2. 본 론

2.1 가스상 방정식

가스상에 대한 연속방정식, 모멘텀 방정식, 에너지 방정식, 화학종 보존 방정식 등은 오일러 좌표계에서 다음과 같은 형식으로 나타낼 수 있다.

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

Table 1은 가스상의 각 독립변수에 대한 계수를 나타낸다[2]. Table 2는 증발된 액적에 의한 생성항을 나타낸다.

Table 2. Source term for liquid phase

Equation	$dV_\phi S_{\phi,l}$
Continuity	$\pi \rho_d \dot{\eta}_i \frac{d_{i,in}^3 - d_{i,out}^3}{6}$
Momentum	$\pi \rho_d \dot{\eta}_i \frac{\mathbf{v}_{i,in} d_{i,in}^3 - \mathbf{v}_{i,out} d_{i,out}^3}{6}$
Energy	$\Delta \dot{m} h_v - \sum_i \dot{q}_i$

난류모델은 k-ε 모델을 사용하였다[4]. 연소모델에서 화염발달은 없다고 가정하고 개개의 액적이 기화하여 가스상의 연료 증기의 생성항으로 작용하며 화학반응이 비가역 단일 반응이고 액적 내의 화학반응이 없다고 가정하였다. 총괄 반응률은 아레니우스 경험식을 사용하였다.

$$R_{fu} = A \left(\frac{\rho Y_f}{W_f} \right)^a \left(\frac{\rho Y_o}{W_o} \right)^b \exp \left(\frac{-E}{RT} \right)$$

혼합물의 물성치는 'CHEMICAL PROPERTIES Handbook' 과 'The properties of gases and liquids' 참고로 하여 계산하였다[5][6].

22 액적의 지배 방정식

가스상과 액적의 사이의 속도를 레이놀즈수는 다음과 같다.

$$Re_{drop} = \rho \frac{d|U-v|}{\mu} \quad (2)$$

액적의 속도, 직경, 온도 방정식은 다음과 같다 [2][3].

$$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{18\mu f}{\rho_{drop} d^2} \right) (\mathbf{U} - \mathbf{v}) + \mathbf{g} \quad (3)$$

$$\frac{d(d)}{dt} = -2Sh(\rho D) \frac{y_v - y_\infty}{\rho_d d} \quad (4)$$

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{T_g - T_d}{\theta} - \frac{Q_L}{\theta} \quad (5)$$

여기서 레이놀즈수에 따른 항력 계수는 Table 3 과 같다.

Table 3. Drag coefficient

$Re_{drop} < 1000$	$C_D = \frac{24}{Re_{drop}} (1 + 0.15 Re_{drop}^{0.667})$
$Re_{drop} \geq 1000$	$C_D = 0.44$

액적의 온도가 끓는점에 도달하였을 때는 액적의 열평형 방정식을 사용하여 액적의 질량 변화를 계산하게 된다.

$$m_d c_d \frac{dT_d}{dt} = \dot{q} + L \left(\frac{dm_d}{dt} \right) \quad (6)$$

Equation (6)을 질량 변화에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

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

23 수치 해석 기법

가스상과 기체상, 가스상과 액적의 질량, 운동량, 에너지 커플효과는 PSCI(Particle source in cell) 방법을 사용하였다. 가스상 방정식에서 유한 체적 방정식은 TDMA 알고리즘으로 계산하고 압력과 속도의 커플효과는 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 계산하였다[7][8].

24 해석 결과

아래의 연소기에 분무 연소를 수치 해석하였다. 연소기 길이는 0.64 m이며, 반경은 0.08m 이다. 연료와 산화제가 분사되어 기화하는 영역에서 그리드를 밀집시켰다.

Fig. 1 Grid of combustion chamber

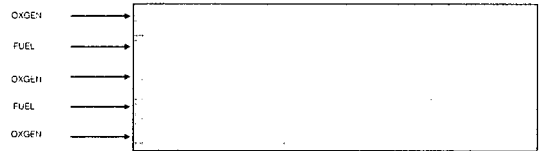


Table 4. inlet condition

입구 속도	2 m/s
입구 온도	1000 K
질소의 질유량	54.6 g/s
연료의 질유량 (n-Decane)	2 g/s
산화제의 질유량 (LOx)	20 g/s
연료의 초기 속도	20 m/s
산화제의 초기 속도	20 m/s
연료의 초기 온도	300 K
산화제의 초기 온도	80 K
연료의 초기 액적 크기	70 μm
산화제의 초기 액적 크기	100 μm

Table 4는 연소기 입구에서의 초기 조건을 나타낸다.

Fig. 2 Temperature of combustion chamber

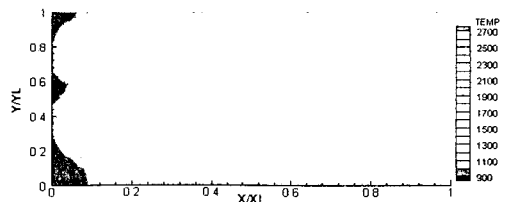


Figure 2는 연소실내 연소 반응일 때의 온도 분포이다. 입구 부근에서는 연료와 산화제 증발로 인해 냉각되어 초기 입구 온도보다 낮아졌다. 연소실내 최고 온도는 약 2700 K 이었다.

Fig. 3 Mass fraction of LOx

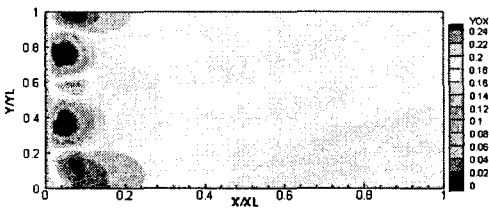


Figure 3은 연소실내 산화제의 질량 분율이다. 연료와 산화제가 만나서 반응이 일어나 산화제 질량 분율이 0이 되는 부근과 연소 반응으로 인해 온도가 급격히 증가하는 부분이 일치함을 보였다.

Fig. 4 Distribution of fuel droplet diameter and fuel droplet temperature

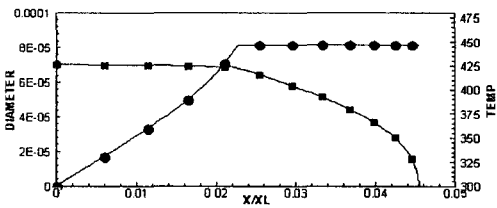


Fig. 5 Distribution of oxidizer droplet diameter and oxidizer droplet temperature

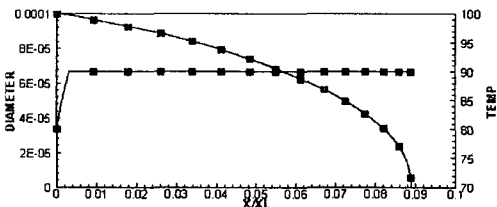


Figure 4,5는 연료와 산화제 액적의 온도 변화와 직경 변화를 나타낸다. 액적이 끓는점까지 도달하기 이전에는 액적의 직경이 큰 변화가 없으나 액적이 온도가 끓는점에 도달하였을 때는 액적의 직경이 급격히 변화하였다.

3. 결 론

저속의 질소가스가 흐르는 연소실내 분무 연소를 수치적으로 해석하였다. 연료 n-Decane과 산화제 LOx의 액적 상태로 분무시켰으며 액적의 가열을 고려하여 액적의 온도 변화를 계산하였다. 연소실내 최고 온도는 약 2700 K 이었고, 이 부근에서 산화제의 질량 분율이 급격히 줄어들었다. 액적의 크기는 액적이 끓는점에 도달한 이후 급격한 변화가 일어남을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. W. A. Sirignano, "The Formulation of Spray Combustion Model : Resolution Compared to Droplet Spacing", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 108, No. 3, 1986, pp.291-233
2. A. Krishnan and A. J. Przekwas, "COMPUTATIONAL ANALYSIS OF LIQUID HYPERGOLIC PROPELLANT ROCKET ENGINES", AIAA 92-1552
3. C. T. Crown, M. P. Sharma, and D. E. Stock, "The Particle-Source-in-Cell(PSIC) Model for Gas-Droplet flow", ASME Journal, Vol. 18, pp.1503-1510
4. Spalding, D. B., "Mathematical Model of Turbulence Flames", A review, Combustion Science and Technology, Vol. 13, 1976, pp.3-25
5. Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell, 'The properties of gases and liquids'
6. Carl L. Yaws, 'CHEMICAL PROPERTIES Handbook'
7. Partankar, S. V., "Numerical Heat transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington, D.C, 1980
8. 이재현, "GP2D 프로그램과 예제", 1999, pp.113-117