

연소실내 연료와 산화제의 분무 연소에 관한 수치적 해석

성형건* · 노태성**

Numerical Analysis for Spray Combustion of Fuel and Oxidizer in Combustion Chamber

Hyung-Gun Sung* · Tae-Seong Roh*

ABSTRACT

In order to provide a useful data for combustion chamber design, a numerical analysis for spray combustion of liquid fuel and oxidizer in combustion chamber has been conducted. High temperature nitrogen gas in low speed has been conveyed for the ignition of the liquid fuel and oxidizer mixture. Temperature and velocity distributions affected by characteristics of liquid fuel and oxidizer combustion have been investigated.

초 록

연소기 설계에 유용한 자료를 제공하기 위해 저속의 질소 가스가 흐르는 연소실내에서 연료와 산화제의 분무 연소에 관한 수치적 해석을 수행하였다. 점화를 위해 고온 질소가 흐르게 하였다. 연료와 산화제의 특성에 의한 연소실내 온도분포와 속도분포를 조사하였다.

Key Words: Spray Combustion(분무 연소), droplet(액적)

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 연소기 내의 화염이 산화제의 증발량에 영향을 받

는다. 따라서 연료와 산화제의 분무 연소는 액체 로켓 엔진의 연소기를 이해하는데 중요하다.

본 연구에서는 액체 로켓 엔진의 연소기 해석을 위해 저속 질소가스가 흐르는 연소실내 분무 연소를 해석하였다. 지배 방정식은 유동이 없는 경우는 만족하지 못하므로 질소가스가 흐르도록 하였다. DSF 모델을 사용하여 원통형 연소기내 분무연소를 해석하였고, 가스상의 해석은 오일러 좌표계를 사용하고 기체상에는 라그랑지 좌표계를 사용하였다. 액적의 크기와 질량변화는 가스상과의 열전달과 액적의 기화를 통해 발생한다. 연료는 n-Decane을 사용하였고, 산화제

* 인하대학원 항공공학과 석사과정

** 인하대학교 항공우주공학과, 정회원

표 1. Conservation equation for gas-phase

Equation	ϕ	Γ	$S_{\phi,g}$	$S_{\phi,l}$
Continuity	1	0	0	$\sum n_k m_k$
Momentum	v_i	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \rho g$	$\sum \{ n_k m_k u_i - \beta_k (u_i - v_k) \}$
Species mass fraction	Y_s	0	$-W_s$	$\alpha_s \sum n_k m_k$
Energy	h	$\frac{\mu_e}{\sigma_h}$	$W_s Q_s + n_k m_k L$	$-\sum n_k L - \sum n_k m_k C_{p,k} T_k$
Turbulent kinetic energy	k	$\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}$	$G_k - \rho \varepsilon$	0
Dissipation rate	ε	$\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon)$	0

는 LOX를 사용하였다. 저속 유동에서 연료와 산화제 액적의 궤도와 궤도에 따른 크기와 가스 상의 온도분포, 속도분포 등을 조사하였다.

2. 본 론

2.1 가스상 방정식

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

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

각 독립변수에 대한 계수와 소스항들은 표 1.에 나타나 있다. 가스상의 방정식들은 유동의 입구 조건들과 연소기 유입구 반경을 기준으로 무차원화 되었다.

난류모델은 Spalding과 Launder이 제안한 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였다[1]. 연소모델에서 화염 발달은 없다고 가정하고 개개의 액적이 기화하여 가스상의 연료 증기의 소스로 작용한다고 가

정하였으며 화학반응이 비가역 단일 반응이고 액적 내의 화학반응이 없다고 가정하였다. 총괄 반응률은 아레니우스의 반응률에 바탕을 둔 Westbrook과 Dryer[2]가 제안한 모델과 Spalding[3]이 제안한 eddy breakup model의 값 중에서 작은 것을 선택하였다.

$$W_s = w_f \min \left\{ A \left(\frac{\rho Y_f}{W_f} \right)^a \left(\frac{\rho Y_o}{W_o} \right)^b \exp \left(\frac{-E}{RT} \right), \left. \begin{array}{l} \frac{C_R}{W_f} g^{1/2} \left(\frac{\rho \varepsilon}{k} \right) \end{array} \right\} \quad (2)$$

혼합물의 비열은 다음과 같이 표현된다.

$$C_p(T) = \sum_i y_i C_{p,i}(T) \quad (3)$$

그리고 온도에 따른 비열의 변화는 다음과 같은 다항식을 사용하여 나타낸다.

$$C_{p,i} = \frac{R}{W_i} (C_{1i} + C_{2i}T + C_{3i}T^2 + C_{4i}T^3 + C_{5i}T^4) \quad (4)$$

위 다항식의 각 계수는 CRC의 핸드북을 참고하였다.[4]

가스상의 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\rho = (v_c - 1)M_c^2 \frac{p}{RT \sum_i \frac{y_i}{W_i}} \quad (5)$$

2.2 액적 방정식

액적의 기화는 준 정상과정이고 가정하였고 연료와 액적은 화학 반응식으로 반응한다고 가정하였다. 가스의 난류에 의한 액적 운동의 난류효과는 무시하였다. 액적은 액적의 궤도, 항력, 증발율, 항력계수는 각각 다음과 같다.[5]

$$\frac{dX_{i,k}}{dt} = V_{i,k} \quad (6)$$

$$\frac{dV_{i,k}}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\mu C_d Re_k}{\rho_k d_k^2} (U_i - V_{i,k}) + g \quad (7)$$

$$\dot{m}_{\dot{k}} = -\pi d_k Nu_k D_s \rho_s \ln \left[1 + \frac{Y_{vs} - Y_{vg}}{1 - Y_{vs}} \right] \quad (8)$$

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_k} \left(1 + \frac{1}{6} Re_k^{0.667} \right); & Re_k < 1000 \\ 0.44; & Re_k \geq 1000 \end{cases} \quad (9)$$

Nu_k 는 열대류에 대한 Nusselt수 이고 다음과 같다.

$$Nu_k = 2 + 0.5 Re_k^{0.5} \quad (10)$$

그리고 Re_k 는 액적과 가스 운동의 상대 Reynolds 수로서 다음과 같다.

$$Re_k = \frac{\rho |\dot{U} - \dot{V}_k| d_k}{\mu} \quad (11)$$

그리고 Y_{vs} 는 액적 표면에서 연료증기의 질량비이며 다음과 같다.

$$Y_{vs} = B_v \exp(-E_v / RT_k) \quad (12)$$

액적의 크기 변화는 다음과 같다.

$$\frac{d(d_k^2)}{dt} = -\frac{2Nu_k D_s \rho_s}{\rho_k} \ln \left[1 + \frac{Y_{vs} - Y_{vg}}{1 - Y_{vs}} \right] \quad (13)$$

2.3 수치해석 방법

가스상과 기체상의 질량, 모멘텀, 에너지 커

플효과는 PSCI(Particle source in cell) 방법을 사용하였다. 가스상 방정식에서 유한 체적 방정식은 TDMA 알고리즘으로 계산하고 압력과 속도의 커플효과는 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 계산하고, 액적의 특성들은 액적 궤도에 따라 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하여 적분한다.

2.4 해석결과

이번 연구에서 해석한 연소기 형상은 그림 1.에 나타나 있다. 질소는 반경 0.08m의 유입구를 통해서 유입되고 배출구의 반경은 0.08m 이다. 연료와 산화제의 액적은 유동에 수평으로 분사되어 연소실로 유입되며 각각 10개씩의 인젝터로 분출시켰다. 화염을 생성하기 위해 1000K의 질소가스가 1.0 m/s의 속도로 분출하여 화염을 생성시켰다. 연소기 입구에서의 가스와 액적의 초기조건은 표 2와 같다. 연료의 액적 크기는 70 μm 이며, 산화제의 액적 크기는 100 μm 이다.

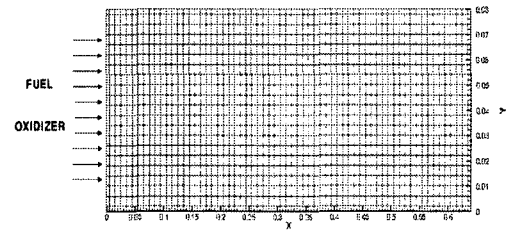


그림 1. 연소기 그리드

표 2. Inlet condition and properties

Inlet velocity	1 m/s
Inlet temperature	1000 K
Nitrogen mass flow rate	27.84 g/s
Fuel mass flow rate	4.016 g/s
n-decane droplet Velocity	200 m/s
Oxidizer mass flow rate	20 g/s
Oxygen droplet Velocity	200 m/s
Stoichiometric ratio	3.486
Equivalence ratio	0.7

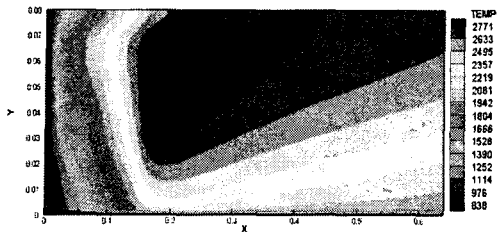


그림 2. 연소실내 온도 분포

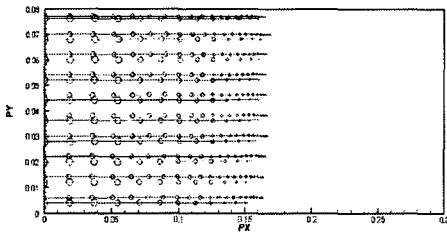


그림 3. 연소실내 액적 분포

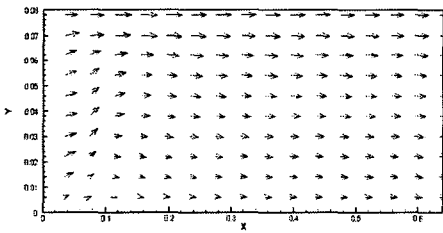


그림 4. 연소실내 속도 분포

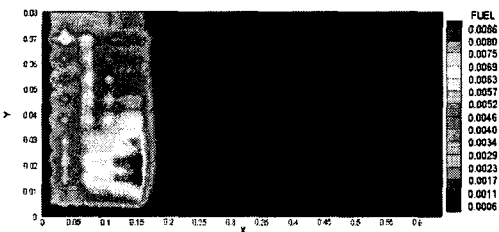


그림 5. 연소실내 연료 질량 분율

그림 2는 연소실내 온도 분포를 나타낸다. 연소실의 중심부가 가장 온도가 높지 않은 것은 그림 3에서 보듯이 첫 번째 분무되는 연료가 연소기 중심에서 3 mm 떨어져 있기 때문에 발

생한 것으로 보인다. 그림 3은 연소실내 액적의 분포를 보여준다. 액적의 분포 길이가 긴 것이 LOX이며 액적의 크기가 n-Decane 보다 커 증발하는 시간이 많이 걸렸기 때문에 보여진다. 그림 4는 연소실내 속도 분포를 나타낸다. 분무 연소 후 중심부 출구 속도는 약 4 m/s 으로 증가하였다. 그림 5는 연소실내 연료의 질량분율을 나타낸다. 연소실 중심부는 반응률이 높아서 연료의 질량 분율이 상대적으로 낮았다.

3. 결 론

n-Decane과 LOX가 액적 상태로 분무되는 연소실을 수치적으로 해석하였다. 화염 생성을 위하여 저속의 질소가스가 흐르도록 하였다. 연료와 산화제의 분사 위치에 따라 연소실내 온도 분포가 다름을 알 수 있었다. 또한 분무 연소를 통해 연소실 출구에서 유동의 속도를 증가시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Launder, B. E., Spalding, D. B., : *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, London, United Kingdom, 1972.
- 2) Westbrook, C. K, Dryer, F. L., : Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion, *Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 10*, 1984, pp. 1-57
- 3) Spalding, D. B. : Mathematical Model of Turbulence Flames : A review , *Combustion Science and Technology, Vol. 13*, 1976, pp.3-25
- 4) CRC : *Handbook of Physics and Chemistry*, Chemical Rubber Co., Cincinnati, OH, 1985
- 5) 성형건, 이윤용, 노태성, “원통형 연소실내 분무연소에 관한 수치적 해석”, 2004 춘계 항공우주학회 학술대회, pp 675-678, 2004