

액적변동을 고려한 액체로켓의 연소실 내 비정상 분무연소 해석

정대권* · 노태성**

Spray Combustion Analysis for Unsteady State in Combustion Chamber of Liquid Rocket Engine Considering Droplet Fluctuation

Daekwon Jeong* · Taeseong Roh**

ABSTRACT

A numerical study for spray combustion of fluctuated fuel and oxidizer droplets injected into combustion chamber has been conducted for the analysis of spray combustion considering characteristics of injector. The 2 dimensional unsteady state flow fields have been calculated by using QUICK Scheme and SIMPLER Algorithm. As the spray model, DSF model and Euler-Lagrange Scheme have been used. The sine function has been used for droplet fluctuation model of fuel and oxidizer, while the coupling effects of the droplets between gas phase and evaporated vapor have been calculated by using PSIC model.

초 록

인젝터의 특성을 고려한 분무연소 현상을 해석하기 위하여 연소실에 주입되는 연료와 산화제의 액적에 변동을 가해 연소실내 분무연소 현상을 수치적으로 해석하였다. 2차원 비정상 상태의 유동장을 QUICK Scheme과 SIMPLER Algorithm을 사용하여 계산하였고, 분무모델로는 DSF 모델과 Euler-Lagrange방법을 사용하였다. 연료와 산화제의 액적 변동은 사인 함수를 이용하여 모델링 하였고, 액적과 가스상의 커플효과와 가스상과 증발된 기체상의 커플효과는 PSIC 모델을 사용하여 계산하였다.

Key Words: Spray Combustion(분무연소), Droplet Fluctuation(액적 변동), QUICK Scheme, PSIC Model

1. 서 론

고체추진 로켓 엔진과 액체 추진 로켓 엔진의 연소불안정은 1930년대 말 발견되었다. 그 이후 불안정 진동이 거의 대부분의 개발프로그램에서 발견되었다[1]. 연소실내에서 일어나는 가장 대표적인 물리적 현상은 분무연소 현상이다. 연소실내의 분무현상을 해석하고 이 모델을 바탕으

* 학생회원, 인하대학교 항공공학과

** 정회원, 인하대학교 항공학과

연락처, E-mail: white-violet@hanmail.net

로 연소실내 진동모델을 추가함으로써 연소불안정을 해석할 수 있게 된다.

본 연구에서는 인젝터 특성에 따라 발생할 수 있는 진동모델을 추가하여 연소실내 분무연소 현상을 해석하였다. 인젝터의 특성에 따라 결정되는 연료와 산화제 액적의 크기와 속도에 사인함수를 이용하여 변동을 가하였고, 이에 따른 연소실내 분무연소 현상의 비정상상태 해석을 수행하였다.

연료와 산화제는 n-Decane과 LOx를 사용하였으며, 연소실 내의 연속방정식과 초기 연소조건을 만족시키기 위하여 1000 K의 질소가스가 저속으로 흐른다고 가정하였다. 액적의 분무를 해석하는 데는 DSF 모델을 사용하였고[2][3], 액적의 가열 또한 고려하였다. Euler-Lagrange 방법을 사용하여 가스상의 해석은 Euler 좌표계로 기체상과 액적의 해석은 Lagrange 좌표계로 계산하였고, 이 두 좌표계간의 커플 효과는 PSIC 모델을 이용하여 계산하였다[4]. 이를 통하여 시간에 따른 연소실내 온도 변화 및 온도 contour의 형상 변화를 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 지배 방정식

비정상 상태의 2차원 유동을 직교 좌표계에서 일반화된 미분 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

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

여기서 ϕ 는 독립변수, Γ_ϕ 확산계수를 나타내며, $S_{\phi,g}$ 와 $S_{\phi,l}$ 은 각각 가스상과 기체상의 생성항을 나타낸다. 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며[5], 연소모델에서 화염발달은 없다고 가정하였다. 개개의 액적이 기화하여 가스상의 연료 증기의 생성항으로 작용하여 화학반응이 비가역 단일 반응이고 액적 내의 화학반응이 없다고 가정

하였다. 총괄 반응율은 아레니우스의 경험식을 이용하였다.

$$R_{fu} = A \left(\frac{\rho Y_f}{W_f} \right)^a \left(\frac{\rho Y_o}{W_o} \right) \exp \left(\frac{-E}{RT} \right) \quad (2)$$

2.2 액적의 변동

액적의 변동을 모델링하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 본 연구에서는 간단하게 적용할 수 있는 사인함수를 사용하여 액적에 변동을 주었다. 사인함수의 값은 언제나 -1과 1의 범위 안에서 주어진다. 즉 항상 자기가 정해 놓은 범위 안에서만 변동을 일으킬 수 있다는 장점이 있다. 이 사인함수를 이용하여 액적의 크기와 x-방향속도, y-방향 속도에 각각 5% 이하의 변동을 주어서 해석하였다.

2.3 수치해석 모델

선행 연구에서도 사용되었던 SIMPLER Algorithm과 QUICK Scheme을 비정상 상태의 해를 구하는 데 사용하였다. 특히 비정상 상태의 해는 SIMPLER Algorithm의 내부 루프와 외부 루프를 이용하여 구할 수 있었다.

가스상과 분무된 액적, 그리고 그 액적이 증발한 기체상과 가스상은 서로 다른 좌표계로 계산된다. 하지만 각각의 특성치 들은 다른 좌표계의 영향을 주기 때문에 이를 계산하기 위해 PSIC (Particle Source in Cell) 모델을 사용하여 계산하였다.

3. 결 과

3.1 초기 조건

연소실의 형상과 연료와 산화제 인젝터의 위치는 Fig. 1과 같다. 연소실은 연료와 산화제가 기화하는 영역의 격자간격을 촘촘하게 두었고, 연소실의 Centerline에서 연료를 분사시켰다. 또 이 Centerline에 Symmetric 경계조건을 설정하여 계산을 용이하게 하였다.

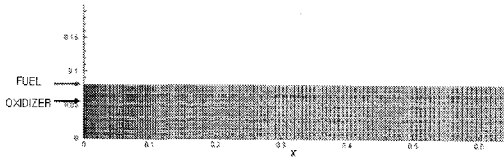


Fig. 1 Grid of Combustion Chamber

연속방정식을 위한 질소 가스는 2 m/s의 속도로 연소실 전체에 흐르도록 설정하였다. 그리고 연료와 산화제는 각각 네 개의 인젝터로 x-방향으로 20 m/s의 속도로 분무되도록 하였다. 그 외의 초기조건은 Table. 1과 같다.

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

3.2 해석 결과

Table. 1의 초기조건으로 액적의 변동 없이 계산한 결과는 다음과 같다.

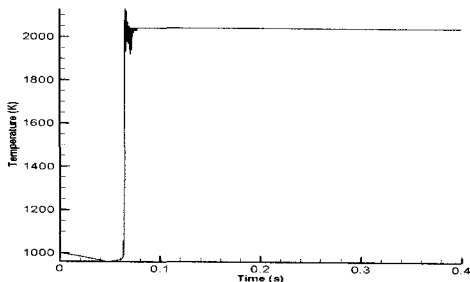


Fig. 2 Temperature of Reference Point (1)

Figure 2는 시간의 변화에 따른 기준점 온도의 변화를 보여준다. 이 기준점은 연소 반응 시 온도가 가장 높은 Centerline의 한 점을 선택하였다. Fig. 2는 연료와 산화제가 분무되고 0.4 초까지의 온도 변화를 나타내는데 분무가 시작되고 최고 온도까지 상승한 뒤 온도의 변화가 없는 것을 알 수 있다.

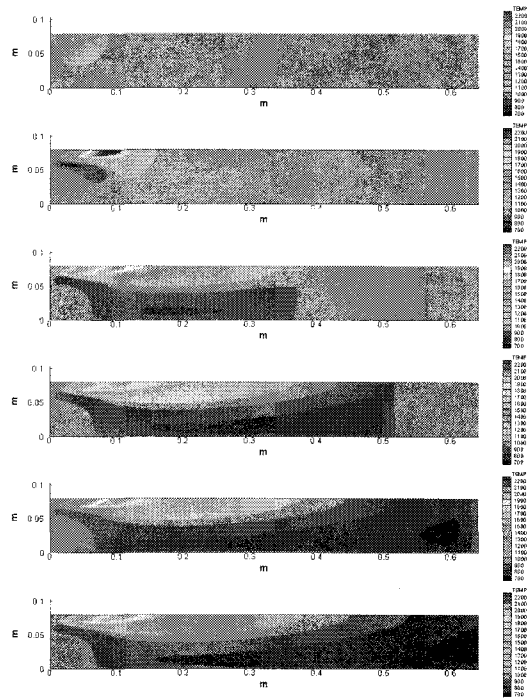


Fig. 3 Temperature of Combustion Chamber (No Droplet Fluctuation)

Figure 3은 연료와 산화제가 분무된 후 5 ms 마다의 연소실 내 온도 contour의 형상을 나타낸 것이다. 연료와 산화제가 분무된 후 30 ms 이후에는 연소실내 온도 contour 형상의 변화가 없었다. 이 결과와 Fig. 2의 결과를 바탕으로 액적의 변동을 크기와 x-방향 속도, y-방향 속도에 따라 각각 Case 1, 2, 3으로 나누어 해석해 보았다. 각각의 변동 폭은 5%를 설정하여 연료와 산화제 액적에 모두 변동을 주어 해석하였다.

Figure 4를 살펴보면 각 Case마다 시간에 따른 기준점에서의 온도변화를 알 수 있다. 해석 결과 세 가지 Case 모두 사인함수의 특성에 따

라 일정한 패턴으로 온도 변화가 일어나는 것을 알 수 있었다. 특히 Case 3의 y-방향 속도에 대한 변동은 Case 1, 2의 결과와 비교해 연소실 온도변화에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

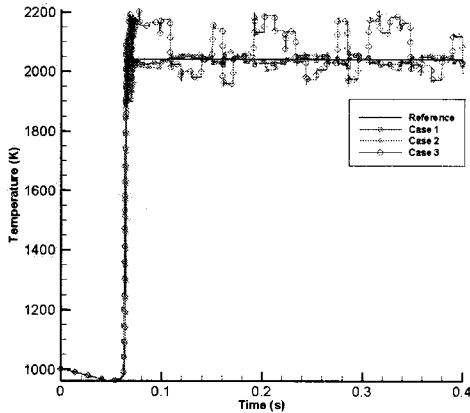


Fig. 4 Temperature of Reference Point (2)

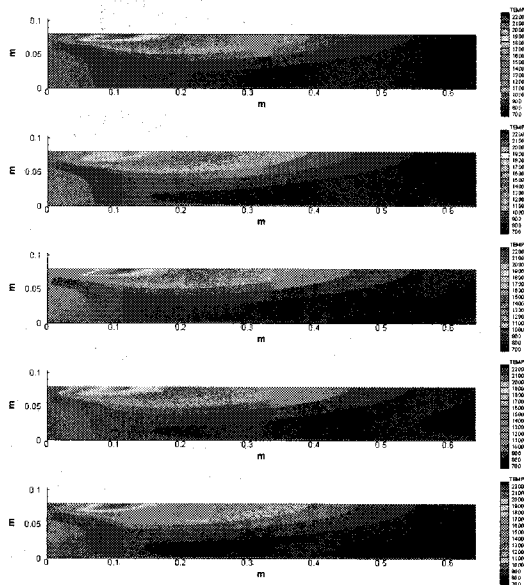


Fig. 5 Temperature of Combustion Chamber (Case 3)

또 세 가지 Case의 변동을 주었을 때 연소실 내 온도 contour 형상 또한 사인함수에 특성에 따

라 변화하는 것을 발견하였고, y-방향 속도에 변동을 주었을 때 가장 심하게 contour 형상이 변화한다는 것을 알 수 있었다(Fig. 5).

4. 결 론

연료와 산화제 액적의 크기와 속도에 사인함수를 이용한 변동을 적용하여 연소실내 비정상 상태 분무연소를 해석하였다. 그 결과 각 Case마다 사인함수의 특성에 따른 기준점에서의 온도 변화 및 연소실 내 온도 contour 형상의 변화를 발견할 수 있었다. 특히 Case 3의 결과에서 알 수 있듯이 y-방향 속도에 변동을 주었을 때가 액적의 크기나 x-방향 속도에 변동을 주었을 때 보다 온도변화가 큰 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. G. M. Faeth, "Current Status of Droplet and Liquid Combustion", Prog. Energy Combust. Sci., Vol 3, pp. 191-224, 1977
2. W. A. Sirignano, "The Formulation of Spray Combustion Models: Resolution Compared to Droplet Spacing", ASME Journal of Heat Transfer, Vol 108, No 3, pp. 633-639, 1986
3. A. Krishnan, A. J. Przekwas, K. W. Gross, "COMPUTATIONAL ANALYSIS OF LIQUID HYPERGOLIC PROPELLANT ROCKET ENGINES", AIAA 92-1552
4. C. T. Crown, M. P. Sharma, D. E. Stock, 'The Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows', Journal of Fluids Engineering, pp. 325-332, 1977.
5. Spalding, D. B., "Mathematical Model of Turbulence Flames", A review, Combustion Science and Technology, Vol. 13, 1976, pp.3-25.