

액체로켓엔진의 불안정 액적 거동의 해석

이윤용* · 노태성**

Analysis of Unstable Droplet Behavior of Liquid Rocket Engine

Yoon-Yong Yi* · Tae-Seong Roh**

ABSTRACT

For the analysis of combustion instabilities of a liquid rocket engine, a simple spray combustion model has been analyzed by the Euler-Lagrange method. Gas temperature, droplet trajectory, and droplet radius have been evaluated on 2-D axisymmetric coordinates. The Euler-Lagrange method has been shown to have a good tendency of gas temperature distribution as well as droplet trajectory and radius change.

초 록

액체로켓엔진의 연소불안정을 해석하기 위해 Euler-Lagrange 방법을 사용하여 간단한 분무연소를 해석하였다. 2차 축대칭좌표계에서 가스 온도와 액적 궤도, 액적 반지름을 구하였고 Euler-Lagrange 방법이 액적의 궤도, 액적의 크기와 주위 가스의 온도분포의 경향성을 잘 나타내는 것을 검증하였다.

1. 서 론

고체추진 로켓 엔진과 액체추진 로켓 엔진의 연소불안정은 1930년대 말 발견되었다. 그 이후 불안정 진동이 거의 대부분의 개발프로그램에서 발견되었다. 상대적으로 체적이 작은 지역에서 과밀한 에너지의 방출 때문에 연소실내의 진동을 증폭시키는 것이 연소불안정의 주원인이다. 그러므로 연소실내의 물리적 현상에 대해 해석하는 것이 연소불안정 해석의 첫걸음이 된다. 연소실내의 분무현상을 해석함으로써 연소실내 과밀 에너지의 원인을 알아내고 이 모델을 바탕으로 연소실내 진동모델을 추가함으로써 연소불안정을 해석할 수 있게 된다.

액체추진로켓은 가스, 추진제 액적과 산화제

액적으로 이루어진 다상 분무연소유동이다. 분무연소과정은 정확한 이해가 이루어지지 않은 복잡한 이상유동과정으로서 여러 연구자들에 의해 많은 연구가 수행되었다. Faeth는 분무연소를 두개의 상을 하나의 제트로 해석하는 국부적인 유동평형 모델 (locally homogeneous flow, LHF) 과 두개의 상을 구분하여 해석하는 유동 분리 모델 (separated flow, SF)로 구분하였다. 유동분리모델은 액적 운동에서 난류 변동의 효과를 고려하지 않는 DSF(deterministic separated flow) 모델과 난류 변동 효과를 고려한 SSF(Stochastic separated flow) 모델로 구분하였다.[1] Sirignano는 유동분리 모델을 액적 특성을 가스특성과 같이 관심영역에서 연속적 개념으로 해석한

* 학생회원, 인하대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 인하대학교 항공우주공학과

Euler-Euler 방법과 각 액적의 특성과 개개 액적의 궤도를 구하는 Euler-Lagrange 방법으로 구분하였다.[2-3] Euler-Lagrange 방법은 기체상에는 Euler 방법으로 지배방정식을 구하지만 액체상에는 Lagrange 방법으로 방정식을 구한다. 그러므로 액적 특성들이 상미분방정식들로 만들어지기 때문에 수치적 확산이나 수치적 소산을 막을 수 있으며 해의 다가성을 처리 할 수 있어서 여러 분무 연소 환경에 대해 모델링 할 수 있다.

본 연구에서는 Euler-Lagrange 방법을 사용하여 간단한 분무연소모형을 해석하고 방법을 검증하였다.

2 본 론

2.1 Euler-Lagrange 모델을 이용한 간단한 모델 해석

Euler-Lagrange 모델을 검증하기 위해 많은 가정을 통해 연소모형을 간단하게 만들었다. 기체상과 액체상간의 질량 및 모멘텀 커플링을 무시하였고 기체상의 밀도, 속도, 질량 성분비, 모멘텀, 에너지는 주어졌다고 가정하였다. 단지 기체상의 스칼라 온도를 구하여 액체상과의 에너지 커플링을 고려하였다. 그리고 액적 표면 온도는 일정하다는 가정을 하여 액적의 연소에 따른 온도상승은 고려하지 않았다.

2.1.1 기체상 온도 방정식

방정식은 2차 축대칭 좌표계(z,r)를 사용하였고 다음과 같은 특성값을 사용하여 무차원화 하였다.

$$Z_c = 10\text{cm}, U_c = 100\text{cm/s}$$

$$\theta_c = 500\text{K}, R_c = 100\mu$$

가스상 스칼라 온도(θ)의 무차원 방정식은

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(U\theta) + \frac{\alpha}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) - S_\theta \quad (1)$$

이다. 여기서

$$S_\theta = \frac{K_1 n}{2\pi \Delta r \Delta r} (1 + K_5 (\theta - \theta_l)) \times \left[1 + K_4 \left(S \left| \dot{U} - \dot{U}_l \right| \right) \right]^{0.25} \times S^{0.5} \ln(1 + K_5 (\theta - \theta_l)) \quad (2)$$

첨자 l 은 액적을 의미한다. 위 식의 U 와 θ_l 은 알고 있는 상수라고 가정한다. 그러므로 가스 속도는 일정하다. S_θ 는 상간의 무차원 열전달 비이고 $K1$ 는 열전달 시간 상수, $K4$ 는 일정한 압력에서의 비열비와 기화시의 잠열을 나타낸다. $K5$ 는 레이놀즈수 보정계수이다.

2.1.2 액체상 방정식

관심 있는 액체상의 특성은 속도(\dot{U}_l), 액적 반지름의 제곱($S=R^2$), 그리고 액적 수(n)이다.

$$\frac{dn}{dt} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dX}{dt} = \dot{U}_l \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = -K_2 (1 + K_5 (\theta - \theta_l)) \times \left[1 + K_4 \left(S \left| \dot{U} - \dot{U}_l \right| \right) \right]^{0.25} \times S^{0.5} \ln(1 + K_5 (\theta - \theta_l)) \quad (5)$$

$$\frac{d\dot{U}}{dt} = \frac{K_3}{S^{0.5}} (\dot{U} + \dot{U}_l) \quad (6)$$

2.1.3 경계조건 및 초기조건

해석영역으로 들어오는 유동($z=0$)에서의 단열 경계조건은 다음과 같다.

$$U_\infty \rho C_p \theta_\infty = U_0 \rho C_p \theta_0 - \lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_{z=0}$$

위 식의 무차원 형태는

$$\theta_\infty = \theta_0 - \alpha \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_0 ; \alpha = \lambda / \rho C_p U_0$$

이다.

여기서 θ_{∞} 는 미리 기술되어 있다.

다른 경계면의 조건들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \text{ at } z = 1$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \text{ at } r = 0, r = 1$$

초기조건은 θ_{∞} 의 값을 사용하였다.

2.1.4. 수치해석 방법

parabolic 형태의 가스 온도 방정식은 ADI 방법으로 구하였고 액적 특성의 상미분 방정식은 3차 PECE 방법을 사용하여 특성곡선을 따라 적분하였다.

먼저 액적 방정식을 한번의 시간스텝에서 적분한 후에 가스 온도를 구한다. 액적은 시간스텝마다 분사되어 해석영역으로 새로 계속 추가되고 해석공간을 넘어간 액적은 계산에서 제외시킨다.

2.2 해석결과

Fig.1-3에서는 액적 상미분방정식의 특성곡선을 액적의 분사 각을 5° - 30° 에서 5° 씩 6개를 사용하여 $\Delta t=0.01$, $\Delta z=\Delta r=0.025$ 에서 해석한 것이다.

Fig. 1은 액적의 궤도에 따른 액적 반지름의 변화를 나타낸 것이다. 액적이 주위 가스를 지나며 기화하며 그 크기가 줄어드는 경향을 나타내고 있다. Fig. 2와 Fig. 3는 가스의 온도분포를 나타낸 것이다. 초기 온도를 2.0으로 설정하였고 액적의 온도가 일정하다고 가정하였으므로 가스 온도는 액적의 기화에 따른 잠열의 효과로 액적의 궤도를 따라 온도가 감소하고 있는 것을 보여준다.

Fig.4-5는 원형의 액적 소스로부터 분사되는 경우이다. (0,0.1)과 (0,-0.1)에서 $30^{\circ}, 0^{\circ}, -30^{\circ}$ 의 분사각을 특성곡선으로 하면 해석공간에 존재하는 특성곡선은 4개가 된다. 이때 액적의 특성곡선이 교차하는 경우가 생기고(Fig. 4) 이때 액적

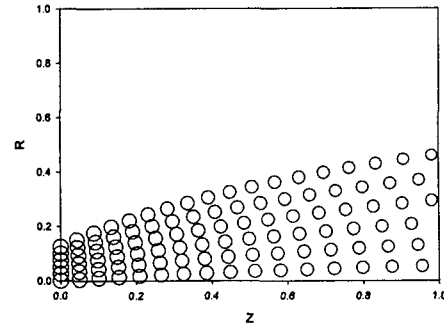


Fig.1 액적 궤도와 액적 반지름 제곱

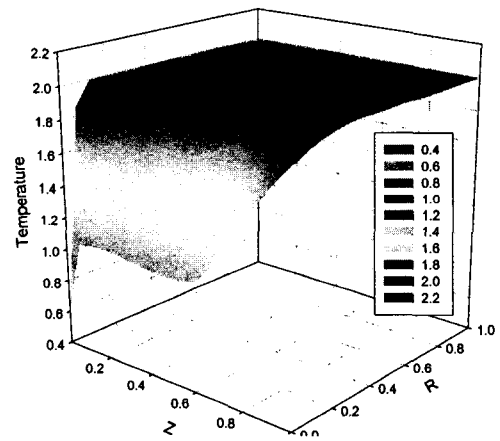


Fig. 2 가스 온도 (과도상태)

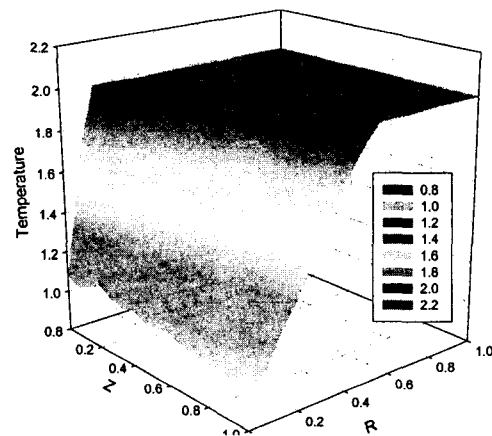


Fig. 3 가스 온도 (정상상태)

특성은 여러 값을 가진다. 그러나 이때에도 가스의 온도는 특성곡선이 교차하지 않을 때와 별다른 차이는 없었다. (Fig. 5)

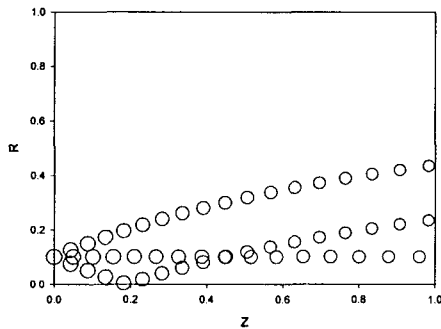


Fig. 4 액적 반지름 제곱(원형 액적 소스)

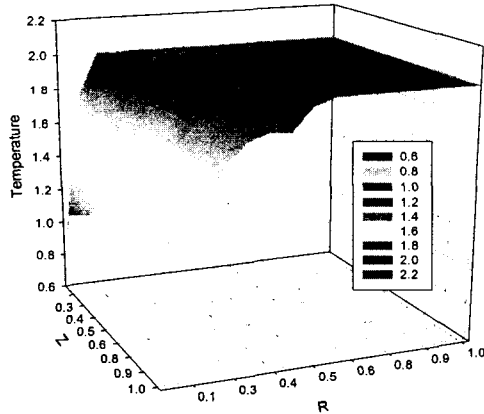


Fig. 5 가스 온도(원형 액적 소스)

3. 결론

Euler-Lagrange 모델은 다른 모델에 비해 컴퓨팅 시간과 비용이 많이 들지만 분무현상을 실제와 가장 가깝게 모사할 수 있는 방법이다. Euler-Lagrange 방법을 사용하여 간단한 모델을 시험한 결과 액적의 운동과 액적의 크기, 주위 가스의 온도의 경향을 잘 나타낼 수 있었다.

액적의 난류효과를 무시하고 모델링 하였지만 앞으로 액적의 난류효과를 고려하기 위해서는 과밀한 에너지 방출이 나타나는 실제 액체로켓 엔진의 연소실을 모사해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 국가지정 연구소 사업 (과제번호 M1-0104-00-0058)의 지원으로 수행된 연구 결과로서 연구비를 지원해 주신 기관에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. G . M. Faeth, "Evaporation and Combustion of spray", Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 9, pp 1-76, 1983
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. W. A. Sirignano, "Fuel Droplet Vaporization and Spray Combustion", Prog. Energy Combust. Sci., Vol 9, pp. 291-322, 1983
4. Dukowicz, J. K., "A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays," Journal of Computational Physics, Vol. 35, 1980, pp. 229-253.
5. B. Seth, S. K. Aggarwal and W. A. Sirignano, "Flame propagation through an air-fuel spray mixture with transient droplet vaporization", Comb. Flame 39, 149, 1980
6. C. T. Crown, M. P. Sharma, and D. E. Stock, "The Particle-Source-in -Cell(PSIC) Model for Gas-Droplet flow", ASME J, Vol 18, pp 1503-1510.