

# 액체로켓(메탄-LOx) 동축인젝터의 초임계 연소 LES 연구

허준영\* · 김국진\* · 성홍계\*\* · Vigor Yang\*\*\*

## LES of Supercritical Combustion of Shear-coaxial Injector of a Methane-LOx Liquid Rocket Engine

Jun-Young Heo\* · Kuk-Jin Kim\* · Hong-Gye Sung\*\* · Vigor Yang\*\*\*

### ABSTRACT

The turbulent mixing and combustion of a shear coaxial injector under supercritical pressures have been theoretically/numerically investigated. Turbulent numerical model is based on large eddy simulation with real-fluid transport and thermodynamics over the entire pressure; Soave modification of Redlich-Kwong equation of state, Chung's model for viscosity/conductivity, and Fuller's theorem for diffusivity to take account Takahashi's compressible effect. The results are compared with previous researcher's. The large-scale vortices shedding from the outer rim into the recirculation region to react with gaseous oxygen was investigated.

### 초 록

고성능 액체로켓의 핵심 요소인 고압 연소기에 사용되는 분사기에 대한 혼합 및 연소 특성을 도출하기 위하여 초임계 상태에 적용되는 혼합 및 연소모형을 수치적으로 연구하였다. 난류모형은 LES(Large Eddy Simulation)를 기반으로 하였고, 난류연소모형은 혼합분율(Z)을 이용한 Laminar Flamelet Model을 사용하였다. 그리고 초임계 영역의 상태량을 계산하기위해 Soave Redlich-Kwong 상태 방정식, 점성계수와 열전도도에 대하여 Chung이 제안한 고압상태 혼합물에 대한 방정식, 확산계수에 대하여 Fuller 이론에 Takahashi가 제안한 고압상태의 특징을 고려한 식을 적용하였다. 계산결과는 선행연구자의 결과와 비교하였고, LOx post 후방에 발생하는 와류에 따른 보임영역에 대하여 연구하였다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Supercritical Condition(초임계상태), Laminar Flamelet Model(층류 소화염 모델)

### 1. 서 론

\* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\* 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
연락처, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

\*\*\* 미국 조지아 공과대학 항공우주공학부

세계 각국에서는 위성발사체의 고성능·고효율화를 위해 기존 엔진 기술을 바탕으로 추력을 증대시킬 수 있는 고압연소엔진 개발이 주를 이루고 있다. 추력 10톤급 이상 엔진의 경우 대부분 고압조건에서 연소하므로 연료와 산화제 모

두 초임계 상태에 존재하게 되며, 고압에서의 연소기술이 곧 고성능 엔진의 핵심 기술이라고 할 수 있다. 이러한 엔진은 100 기압 이상의 고압에서 작동하므로 엔진 설계 인자를 도출하기 위하여 엔진의 실제 연소 환경, 즉 초임계연소 (supercritical combustion), 분사기의 동적거동 (injector dynamics)에 대한 물리적 이해와 이론적 정립이 필수적이다. 고출력 액체 로켓의 실제 연소 환경인 초임계 영역에서는 에너지의 함량은 액체특성이면서 에너지의 확산은 기체성질로 매우 독특한 상태량과 열방출을 표출한다. 즉 고밀도의 에너지 확산으로 높은 연소효율과 액체 로켓엔진의 성능 증가를 이룰 수 있다. 초임계 영역에서의 열화학 물성치의 특성, 분사/혼합의 동적특성은 기존과 다른 특성을 갖고 있다. 초임계 환경에 대한 연소해석은 고출력 엔진을 개발하기 위하여 필수적으로 해결해야 할 핵심기술이다. 우주 개발 계획을 세우고 있는 세계 각국 (미국, 러시아, 유럽, 중국, 일본, 인도 등)에서는 우주기술을 선점하기 위하여 본 분야의 연구에 각고의 노력을 기울이고 있다.

## 2. 이 론

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 복잡한 난류 유동 특성을 구현하기 위해 LES 기법이 적용되었고, 재순환 영역에서와 같은 저속 유동과 비압축성 유동장에서 수렴 속도를 증가시키기 위해 예조건화 기법이 적용되었다. Favre-averaged된 질량, 운동량, 에너지, 화학종 보존 방정식이 사용되었으며 이는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p} \delta_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} - \tau_{ij}^{sgs})}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{E}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p}) \tilde{u}_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \tilde{u}_j \tilde{\tau}_{ij} + \lambda \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} - H_i^{sgs} + \sigma_i^{sgs} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{U}_{k,j} \tilde{Y}_k - \Phi_{k,j}^{sgs} - \theta_{k,j}^{sgs}) + \bar{\omega}_k \quad (4)$$

작은 와류는 모델링되어야 하며, 본 연구에서는 Algebraic Smagorinsky Type 모델이 적용되었다.

### 2.2 난류연소모델

난류연소 해석을 위해 혼합분율(Z)을 이용한 층류 소화염 모델을 사용하였다. 층류 소화염 모델은 Presumed  $\beta$ -function PDF 기법을 사용하여 계산하였고, i종의 질량분율(filtered species mass fraction)은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\tilde{Y}_i(x, t) = \int_0^1 Y_i(Z) \tilde{P}(Z; x, t) dZ \quad (5)$$

$Y_i(Z)$ 는 수치적 방법을 통해 구할 수 있고 여기에 사용되는 PDF는 다음과 같은 presumed  $\beta$ -function 에 의해 나타낼 수 있다. 여기에서  $\Gamma$ 는  $\gamma$ -function으로써 평균혼합분율과 그 변화에 관계된 상수  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} \tilde{P}(Z; x, t) &= \frac{Z^{\alpha-1} (1-Z)^{\beta-1}}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \Gamma(\alpha+\beta) \quad (6) \\ \alpha &= \tilde{Z} \left( \frac{\tilde{Z}(1-\tilde{Z})}{\tilde{Z}^2} - 1 \right) \\ \beta &= (1-\tilde{Z}) \left( \frac{\tilde{Z}(1-\tilde{Z})}{\tilde{Z}^2} - 1 \right) \end{aligned}$$

여기서  $\tilde{Z}^2$ 는 혼합분율의 sgs variance로써, 다음과 같이 가정하였다.

$$\tilde{Z}^2 = K_b \overline{\rho(\tilde{Z} - \bar{\tilde{Z}})^2} / \bar{\rho} \quad (7)$$

$K_b$ 는 모델상수로써 3을 사용하였고, scalar dissipation rate,  $\chi$ 는 다음과 같은 Girmaji and Zhou의 모델을 사용하였다.[1]

$$\tilde{\chi} = 2 \left( \frac{\nu}{Sc} + \frac{u_i}{Sc_i} \right) \left( \frac{\partial Z}{\partial x_j} \frac{\partial Z}{\partial x_j} \right) \quad (8)$$

Flame library는 Chemkin II와 초임계 전달물성치 계산 방정식(Chung's method)을 이용하여 구할 수 있다.  $\beta$ -function PDF모델은 가장 많이 사용되는 모델중의 하나으로써, 여기에 사용되는  $\gamma$ -function은 양극에서  $\infty$ 로 수렴하는 특성을 이용한 모델이다. 하지만 그 특성상 실제 계산에서는 이 부분에서 수치적으로 불안정하므로 주의가 필요하다.

### 2.3 열역학적 상태량 및 전달물성치 방정식

초임계 영역의 상태량을 정확하게 예측하기 위해 Soave Modification of Redlich-Kwong 실제기체 상태방정식을 사용하였다.[2]

$$p = \frac{R_u T}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m(V_m + b)} \quad (9)$$

$$a = \frac{0.42747R_u^2 T_c^2}{p_c} \quad b = \frac{0.08664R_u T_c}{p_c}$$

$$\alpha = [1 + (0.48508 + 1.55171\omega - 0.15613\omega^2)(1 - T_r^{0.5})]^2$$

점성계수와 열전도도에 대하여 Chung이 제안한 고압상태 혼합물에 대한 방정식이 적용되었고, 확산계수는 Fuller 이론에 Takahashi가 제안한 고압상태의 특징을 고려한 식을 사용하였다.[3,4]

## 3. 결 과

### 3.1 경계조건 및 격자구성

초임계상태에서의 메탄/액체산소 연소해석을 수행하였다. 경계조건은 Fig. 1과 같다.

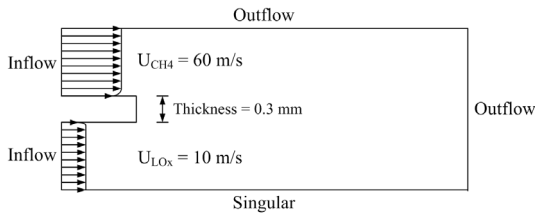


Fig. 1 Boundary Condition

평판의 두께는 전형적인 shear coaxial 인젝터의 두께인 0.3mm이다. 메탄과 액체산소 모두 입구에서 10%의 난류강도를 주었고, 출구는 MOC(Method Of Characteristics)에 기반한 non-reflecting 경계조건을 설정하였다. 그리고 계산영역은 매우 얇은 평판이지만 인젝터 형상에 기반을 두고 있으므로, 아랫면을 축으로 가정하는 경계조건을 설정하였다. 격자구성은 Fig. 2와 같다. 격자수는 약 175,000(44blocks)개로 구성되어있고, radial 방향으로 가장 작은 격자크기는 약 6 $\mu$ m이다.

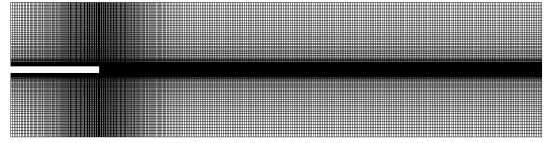


Fig. 2 Computational Domain

### 3.2 계산 결과

초임계영역에서 메탄/액체산소의 연소유동을 수치모사하였고 계산결과는 Fig. 3과 같이 선행 연구자[5]의 결과와 비교하였다.

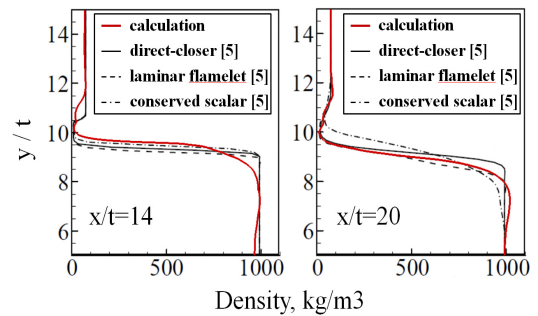


Fig. 3 Vertical Distributions of Mean Density

메탄과 액체산소의 밀도차로 인해 급격한 밀도변화 구간이 나타나는데 x/t=14에서 본 연구 결과가 선행연구결과보다 밀도변화구간이 넓게 나타나는 것을 보인다. 즉, 강화화염이 구성되지 않고 온도가 낮게 넓은 영역으로 분포하는 구간이 형성되었고, 보염구간이 선행결과에 비해 다소 짧아졌음을 나타낸다. 이는 선행연구와 모델상수와 전달물성치 계산식의 차이에 의해 난류에 의한 영향이 선행연구보다 상대적으로 커진 것으로 판단된다.

Figure 4, 5는 온도장과 메탄/산소의 물분율을 나타낸다.

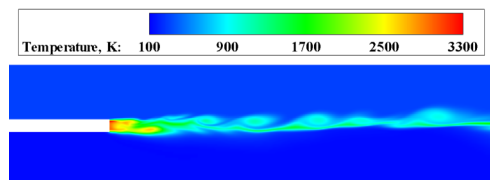


Fig. 4 Instantaneous Temperature Contours

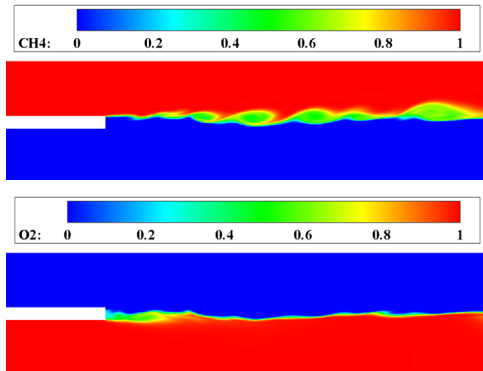


Fig. 5 Instantaneous Mass Fractions of CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>

Splitter 끝단에서 발생한 강건한 화염이 후방으로 전파될수록 연소가 종료되면서 혼합에 의해 유동이 빠져나가는 것을 확인할 수 있다.

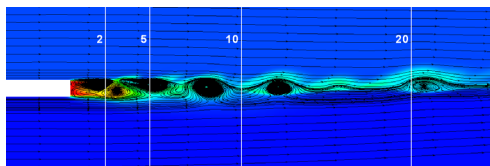


Fig. 6 Vortex Shedding and Axial Locations

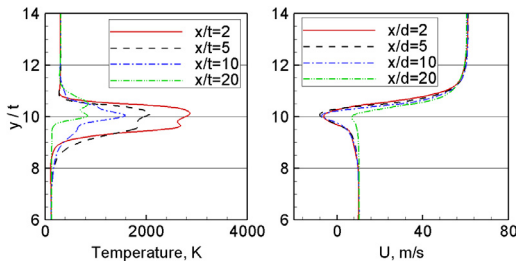


Fig. 7 Vertical Distributions of the Time-averaged Temperature and U-velocity

Figure 6, 7은 splitter두께를 기준으로 LOx post 끝단으로부터의 위치에 따른 온도, 축방향 속도분포를 나타낸 것이다. 재순환영역이 발생하는 LOx post 끝단에서 화염이 안정적으로 보임 되었으며,  $x/t$ 가 약 10~20에서 보임영역이 줄어드는 것을 보인다.

#### 4. 결 론

초임계상태에서의 작동하는 동축 인젝터의 메

탄/액체산소 연소해석을 LES 수치적용하였다. 인젝터의 LOx post 두께는 0.3mm이며 계산결과 선행연구결과와 유사하였다. 선행연구에 비해 난류가 연소반응에 더 많은 영향을 미치는데, 이는 수치적 모델상수와 전달물성치 계산식의 차이에 의한 것으로 사료된다. LOx post 후단으로부터 5~10에서 화염온도가 급격히 낮아지며 약 10~20에서 보임영역이 거의 없다. 본 연구를 통해 초임계환경에서 연료와 산화제의 혼합 및 연소해석에 적용 가능한 모델을 정립하였다.

#### 후 기

본 논문은 2008년도 교육 인적 자원부의 재원으로 한국 연구 재단의 우주 기초 원천 기술 개발 사업(National Space Lab.)으로 수행된 연구(2008-2006287)이며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Girimaji, S.S, and Zhou, Y., "Analysis and Modeling of Subgrid Scalar Mixing Using Numerical Data," *Phys. Fluids A*, 8, 5, 1224-1236, 1996.
2. Soave, G., "Equilibrium Constants from a Modified Redlich-Kwong Equation of State," *Chemical Engineering Science*, 27, 1197, 1972.
3. Chung, T., Ajlan, M., Lee, L. and Starling, K., "Generalized Multi-parameter Corresponding State Correlation for Polyatomic, Polar Fluid Transport Properties," *Indust. Chem. Engin. Research*, 27, 671-679, 1988.
4. Takahashi, S., "Preparation of a Generalized Chart for the Diffusion Coefficients of Gases at High Pressures," *Journal of Chemical Engineering(Japan)*, 7, 417, 1974.
5. Zong, N., Ribert, G. and Yang, V., "A Flamelet Approach for Modeling of Liquid Oxygen(LOX)/Methane Flames at Supercritical Pressures," *AIAA* 2008-946.