

# 초임계 상태에서의 LOx 스월 인젝터에 대한 동적 수치 모델링

김국진\* · 허준영\* · 김종찬\* · 성홍계\*\*

## Dynamic Numerical Modeling for LOx Swirl Injector at Supercritical Conditions

Kuk-Jin Kim\* · Jun-Young Heo\* · Jong-Chan Kim\* · Hong-Gye Sung\*\*

### ABSTRACT

For understanding of high performance liquid rocket engine operating at high pressure, dynamic characteristics of liquid oxygen in a swirl injector operating at supercritical conditions has been numerically investigated. Turbulent numerical model is based on large eddy simulation and contains full conservation laws including Soave modification of Redlich-Kwong equation of state and Chung's model. Preconditioning method is applied to get an effective convergence rate. Numerical analysis results are compared with the one that ideal equation of state applied to. Differences of thermodynamic properties and mixing dynamics are investigated at liquid phase area inside injector and combustion chamber.

### 초 록

고압 조건에서 작동하는 고성능 액체 로켓 엔진에 대한 이해를 위해 초임계 조건의 스월 인젝터에서 액체 산소의 동적 특성이 수치적으로 연구되었다. 난류 수치 모델은 large eddy simulation을 기반으로 하였으며 보존 방정식과 SRK 상태 방정식, Chung의 기법을 포함하고 있다. 또한 수렴 속도의 증가를 위해 예조건화 기법이 적용되었다. 수치 해석 결과는 이상 기체 상태 방정식을 적용한 결과와 비교 되었으며 인젝터 내부와 연소실에서 액상이 존재하는 영역에서의 상태량과 동적 특성의 차이가 관찰되었다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체 로켓 엔진), Swirl Injector(스월 인젝터), LOx(액체 산소), Large Eddy Simulation(대와동 모사), Supercritical Conditions(초임계 조건)

### 1. 서 론

\* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

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

미국, 러시아, 유럽, 일본 등 우주 기술 선진국  
들은 이미 축적된 기술을 바탕으로 군사력 뿐

아니라 여러 산업 분야에서의 우위를 점하고 있다. 그러나 우주 기술은 국가 안보나 경제적 측면의 이유로 다른 나라와의 인력 및 기술 교류에 있어서 많은 제약이 있으며 이에 따라 국내에서 우주 원천 기술에 대한 연구가 시급한 상황이다.

현재 우주 발사체의 대부분은 액체 로켓이며 엔진의 실제 연소 환경, 즉 초임계 조건에서 인젝터의 동적 특성에 대한 연구는 로켓 개발을 위한 핵심 기술 확보의 밑바탕이 된다. 이러한 필요성에 의해 본 연구에서는 혼합과 미립화 특성이 뛰어나고 연소 불안정성의 위험이 적은 단순 스웰 인젝터에서 액체 산소의 동적 특성에 대해 알아보려고 한다.

## 2. 이론 수식 및 수치 해법

본 연구에서는 복잡한 난류 유동 특성을 구현하고 난류 닫힘 문제(turbulence closure problem)을 해결하기 위해 LES 기법이 적용되었고 Favre-averaged된 질량, 운동량, 에너지, 화학종 보존 방정식이 사용되었으며 이는 다음과 같다.

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

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

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

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

위 식은 대수적 Smagorinsky 모델을 이용하였으며 상점차 sgs는 subgrid scale 난류 모델의 subgrid closure term을 의미한다.[1]

또한 초임계 영역의 상태량을 정확하게 예측하기 위해 실제 유체 상태 방정식인 SRK 상태 방정식과 Chung의 기법[2]이 사용되었다.

$$p = \frac{R_u T}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m (V_m + b)} \quad (5)$$

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

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

$$\eta = \eta^* \eta^0 = \eta^* \frac{40.785 F_c (MT)^{1/2}}{V_c^{2/3} \Omega_v} \quad (6)$$

$$F_c = 1 - 0.2756\omega + 0.059035\mu_r^4 + \kappa$$

여기서  $\eta^0$ ,  $\Omega_v$ 는 각각 저압 조건에서의 점성계수와 충돌 적분을 뜻하며  $\eta^*$ 는 경험적으로 얻어진 수치에 의해 구할 수 있다.

재순환 영역에서와 같은 저속 유동과 비압축성 유동장에서의 수렴 속도를 증가시키기 위해 예조건화 기법이 적용되었다.[3]

## 3. 계산 조건

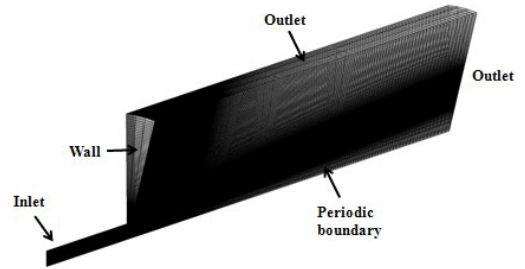


Fig. 1. Schematic of Boundary Condition and Grid System

Figure 1의 격자는 RD-0110 액체 로켓 엔진에 적용된 스웰 인젝터의 형상을 계산 시간과 비용, 정확도를 고려하여 준 3차원 모델로 구성하였다. 실제 형상에서의 접선 방향 유입로는 얇은 슬릿으로 가정되었으며 인젝터를 포함한 연소실 양쪽은 periodic 경계를 적용하였다. 전체 격자의 수는 약 60만개이며 LES의 계산 효율을 증대시키기 위해 전체 영역을 33개의 블록으로 나누어 message passing interface(MPI) 고속 병렬 계산 기법을 적용하였다.

인젝터의 직경은 5 mm이고  $1.5 \leq x \leq 2.5$  mm 인 범위에서 120 K, 100 bar 상태의 액체 산소가 초임계 상태의 산소(300 K, 100 bar)로 채워져 있는 연소실로 분사된다. 인젝터에 연결된 유

입로에서의 속도는 접선 방향으로 49.5 m/s, 수직 방향으로 9.5 m/s가 각각 설정되었으며 수직 방향 속도에 따른 질량 유량은 0.15 kg/s이다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 산소에 대한 상태 방정식 비교 결과

Table 1. Oxygen Properties

$p_c$	50.43 bar	MW	31.999 g/mol
$T_c$	154.581 K	$\omega$	0.0222

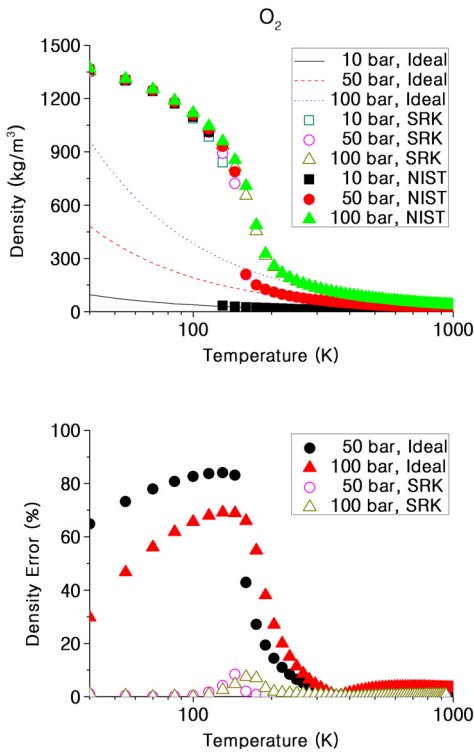


Fig. 2. Density and Error of Oxygen as Functions of Pressure and Temperature

스윙 인젝터에서 액체 산소의 동적 특성을 알아보기 전에 다양한 압력, 온도 조건에서 상태 방정식 종류에 따른 산소의 밀도와 그 오차를 Fig. 2에 나타냈다. Table 1에 제시된 산소의 상태량을 고려했을 때 이상 기체 상태 방정식을

적용하였을 경우 액상이 존재하는 영역에서 매우 큰 오차를 나타내며 임계점 부근에서 최대 84.1%의 오차를 보인다. SRK 상태 방정식을 이용하였을 경우 역시 임계점 부근에서 최대 오차를 보이지만 그 수치는 10.5%로서 상대적으로 매우 정확한 결과를 보인다. 그 외의 영역에 대해서는 NIST SUPERTRAPP[4]의 데이터와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

##### 4.2 LOx 스윙 인젝터의 동적 특성 비교

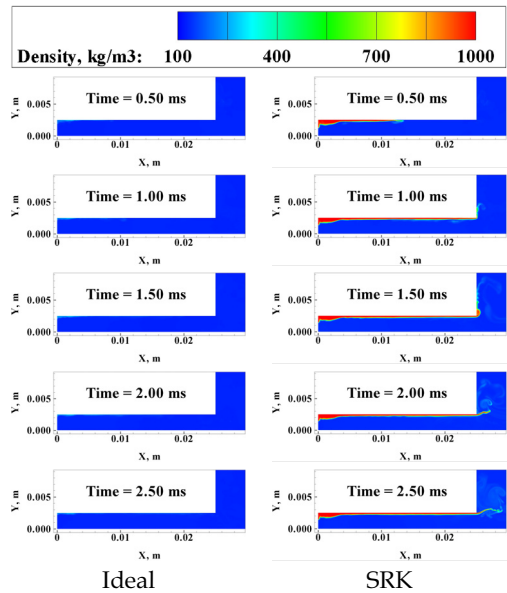


Fig. 3. Density Contour of Ideal and SRK Equation of State

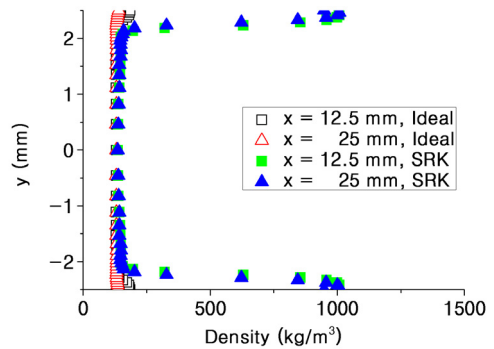


Fig. 4. Radial Distributions of Density

Figure 3은 단순 스윙 인젝터에서 동일한 조건으로 액체 산소를 분사시켰을 경우, 이상 기체 상태 방정식과 SRK 상태 방정식을 적용한 경우에 대한 수치 해석 결과이다. 이상 기체 상태 방정식을 적용한 경우 유입로 부근에서 분사된 액체 산소는 급격히 초임계 상태로의 천이가 이루어지는 물리적으로 타당하지 못한 결과를 보이고 있다. 반면에 SRK 상태 방정식을 적용하였을 경우 인젝터의 벽면 근처에 액체 막을 형성하며 연소실로의 유동 발달 과정이 진행되는 것을 확인할 수 있다. 결과를 보다 정량적으로 비교하기 위해 축방향으로  $x=12.5, 25$  mm인 지점에서의 밀도 분포를 Fig. 4에서 비교하였다. 인젝터 중심부에서는 두 경우 모두 초임계 상태의 매우 낮은 밀도 분포를 나타내지만  $y=\pm 2.1$  mm인 지점에서 급격한 차이가 나기 시작한다. 이 지점에서부터 벽면까지는 액체 산소 막이 형성되어 있으며 이것은 이상 기체 상태 방정식이 액상 성분의 상태량을 정확히 예측하지 못함을 의미한다.

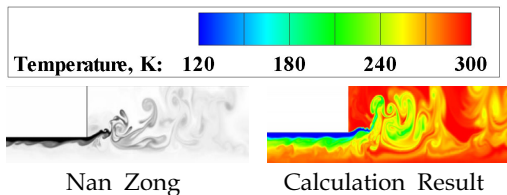


Fig. 5. Comparison of Temperature Field ( $p_{inj}=100$  bar,  $p_{\infty}=100$  bar,  $T_{inj}=120$  K,  $T_{\infty}=300$  K,  $V_i=16.5$  m/s,  $V_n=9.5$  m/s)

Figure 5는 Nan Zong의 수치 해석[5]과 동일한 경계 조건을 적용하여 온도장을 비교한 결과로서 스윙 인젝터 출구 부근에서의 유동 특성이 정성적으로 일치함을 알 수 있다.

Figure 6은 SRK 상태 방정식을 적용하였을 경우, 시간 진전에 따른 온도장의 변화를 나타낸 것이다. 유입구에서의 접선 방향 속도 성분에 의해 연소기 입구 부분에서 액체 산소는 확산되며 요동을 치고 일부는 밀도가 낮은 인젝터 중심부로 다시 유입되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이

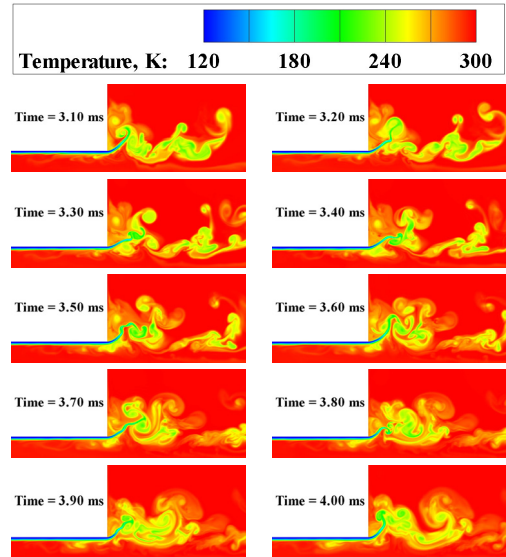


Fig. 6 Temporal Evolution of Temperature Field

러한 현상은 반경 및 축 방향으로의 동적 불안정성에 의한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

초임계 조건에서 작동하는 단순 스윙 인젝터에서 액체 산소의 동적 특성이 MPI 고속 병렬 계산 기법을 이용한 LES를 기반으로 모사되었다.

이상 기체 상태 방정식은 액상으로 존재하는 성분에 대한 상태량의 예측에 있어서 상당한 오차가 발생하며 임계점 부근에서 최대가 됨을 확인하였다. SRK 상태 방정식은 임계점 부근에서 약 10% 정도의 오차가 발생하지만 그 외의 영역에 대해서는 매우 정확한 결과를 보인다. 두 상태 방정식을 수치 모델에 적용하여 비교한 결과 접선 방향 속도 성분에 의해 인젝터 벽면에 액체 산소가 막을 형성하는 현상을 이상 기체 상태 방정식에서는 정확히 예측하지 못했다. 시간 진전에 따른 온도장을 비교한 결과 인젝터 출구 부분에서 반경 및 축 방향으로의 동적 불안정성이 확인되었다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

1. Zong, N., "Modeling and Simulation of Cryogenic Fluid Injection and Mixing Dynamics under Supercritical Conditions", Ph. D Thesis, The Penn State Univ., 2005
2. Congiunti, A., Bruno, C. and Giacomazzi, E., "Supercritical Combustion Properties", AIAA Paper No. 2003-0478, 2003
3. Choi, Y. H. and Merkle, C. L., "Time-Derivative Preconditioning for Viscous Flows", AIAA Paper No. 1991-1652, 1991
4. National Institute of Standards and Technology, NIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixtures Database(SUPERTRAPP) Version 3.2 Users' Guide, January 2007
5. Zong, N. and Yang, V., "Cryogenic Fluid Dynamics of Pressure Swirl Injectors at Supercritical Conditions", Physics of Fluids, Vol. 20, Issue 5, pp. 056103-1-14, 2008