

# 초임계 스월 인젝터에서의 케로신 Surrogate 모델에 대한 수치적 연구

김국진\* · 허준영\* · 성홍계\*\*†

## Numerical Study for Kerosene Surrogate Model in Supercritical Swirl Injector

Kukjin Kim\* · Junyoung Heo\* · Honggye Sung\*\*†

### ABSTRACT

Injection characteristics of a kerosene swirl injector of liquid rocket engine operating at supercritical environment have been investigated. Kerosene surrogate models are proposed to model the kerosene properties. Turbulent numerical model is based on large eddy simulation and contains Soave modification of Redlich-Kwong equation of state and Chung's model. Numerical analysis results at supercritical environment are compared with the one at transcritical condition. Differences of density and viscosity are analyzed at both liquid film and core gas in the swirl injector.

### 초 록

초임계 환경에서 작동하는 액체 로켓 엔진의 케로신 스월 인젝터에서 케로신 물성치에 따른 인젝터 내외에서의 분사 특성을 연구하였다. 케로신의 물성치를 계산하기 위해 surrogate 모델이 적용되었다. 난류 수치 모델은 large eddy simulation을 기반으로 하였으며 SRK 상태 방정식, Chung의 기법을 포함하고 있다. 초임계 환경의 수치 해석 결과는 천이 임계 조건의 결과와 비교되었으며 스월 인젝터 내부의 액막과 중심부 사이의 밀도 및 점성 계수 분포의 차이가 관찰되었다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체 로켓 엔진), Swirl Injector(스월 인젝터), Kerosene(케로신), Surrogate Model(Surrogate 모델), Supercritical Environment(초임계 환경)

### 1. 서 론

현재 위성 발사 및 우주 개발을 목적으로 사

용되는 우주 발사체의 1단 로켓은 고추력을 필요로 하므로 고온, 고압의 초임계 조건에서 작동하는 액체 로켓이 이용된다. 이러한 환경에서 추진제의 상태량 변화에 대한 연구는 실험적 한계로 인해 수치적 해석을 필요로 한다.

액체 로켓의 연료로서 사용되는 케로신의 경우 다양한 탄화 수소 계열 분자가 함유되어 있

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

으므로 수치적 계산에서 모든 성분을 고려하기에는 한계가 있다. 이에 따라 케로신의 열역학적 특성을 대체적으로 만족하는 간략화된 surrogate 모델이 사용된다.

본 연구에서는 초임계 조건의 케로신 계열 연료에 대해 surrogate 모델을 적용하여 천이 임계 조건에서의 상태량 특성과 비교 분석하였다.

## 2. 이론 수식 및 수치 해법

본 연구에서는 난류 유동 특성의 구현과 함께 난류 닫힘 문제(turbulence closure problem)를 해결하기 위해 LES 기법이 적용되었고 Favre-averaged된 질량, 운동량, 에너지, 화학종 보존 방정식이 다음과 같이 사용되었다.

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

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

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

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

위 식은 대수적 Smagorinsky 모델을 이용하였으며 상점자 sgs는 subgrid scale 난류 모델의 subgrid closure term을 의미한다.

또한 초임계 영역 상태량의 정확한 예측을 위해 SRK 상태 방정식[1]과 Chung의 기법[2]이 사용되었다.

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

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

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

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

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

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

저속 유동 및 비압축성 유동장에서의 수치 해

석에 있어서 수렴 속도를 증가시키기 위해 예조 건화 기법이 적용되었다[3].

## 3. Surrogate 모델 및 계산 조건

Table 1에 제시된 탄화 수소 계열의 성분 비율은 기존 연구에서 고려된 JP-8/Jet A의 케로신 surrogate 모델[4]을 기준으로 하였으며 n-dodecane만을 고려한 모델이 추가되었다.

Figure 1의 격자는 RD-0110 액체 로켓 엔진에 적용된 스윙 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 36개의 블록으로 나누어 message passing interface(MPI) 고속 병렬 계산

Table 1. Components of Surrogate Models for the Kerosene

Model	JP-8/Jet A (Mole %)		
	1	2	3
n-decane		32.6	16.449
n-dodecane	100	34.7	20.152
n-tetradecane			14.156
n-hexadecane			10.335
Isooctane			6.830
Methylcyclohexane		16.7	7.945
Meta-xylene			7.348
Butylbenzene		16	5.812
1-methylnaphthalene			10.972

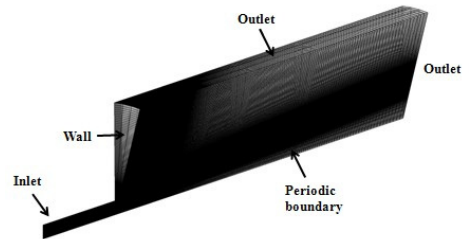


Fig. 1 Schematics of Boundary Condition and Grid System

기법을 적용하였다.

인젝터의 직경은 5 mm이고  $1.5 \leq x \leq 2.5$  mm인 범위에서 400 K, 100 bar 상태의 케로신이 초임계(100 bar, 1000 K) 및 천이 임계(100 bar, 715 K/687.5 K) 상태의 연소실로 분사된다. 천이 임계 조건의 715 K, 687.5 K는 각각 모델 1/3과 모델 2에 적용되었으며 이는 100 bar의 조건에서 SRK 상태 방정식을 이용하여 각 모델에 대한 밀도 분포의 변곡점을 기준으로 계산한 값이다.

인젝터에 연결된 유입로에서의 속도는 접선 방향으로 16.5 m/s, 수직 방향으로 9.5 m/s가 각각 설정되었으며 수직 방향 속도에 따른 질량 유량은 0.15 kg/s이다.

#### 4. 결과 및 고찰

초임계 조건 및 천이 임계 조건에서의 케로신 분사에 대한 수치 해석 결과를 비교 분석하였다.

Fig. 2는 케로신 surrogate 모델에 따른 스월 인젝터 내부에서의 유동 특성을 확인하기 위해 나타낸 온도장 해석 결과이다. 초임계 조건의 경우 스월 유동으로 인해 인젝터 벽면에 액막이 형성되며 중심부는 고온, 고압 상태의 가스가 형성된다. 또한 시간 경과에 따라 액막은 인젝터 출구로 빠져나가게 되며 상대적으로 밀도가 낮은 중심부를 통해 연소실 가스의 일부는 인젝터 내부로 다시 유입된다. 이러한 유동은 인젝터의

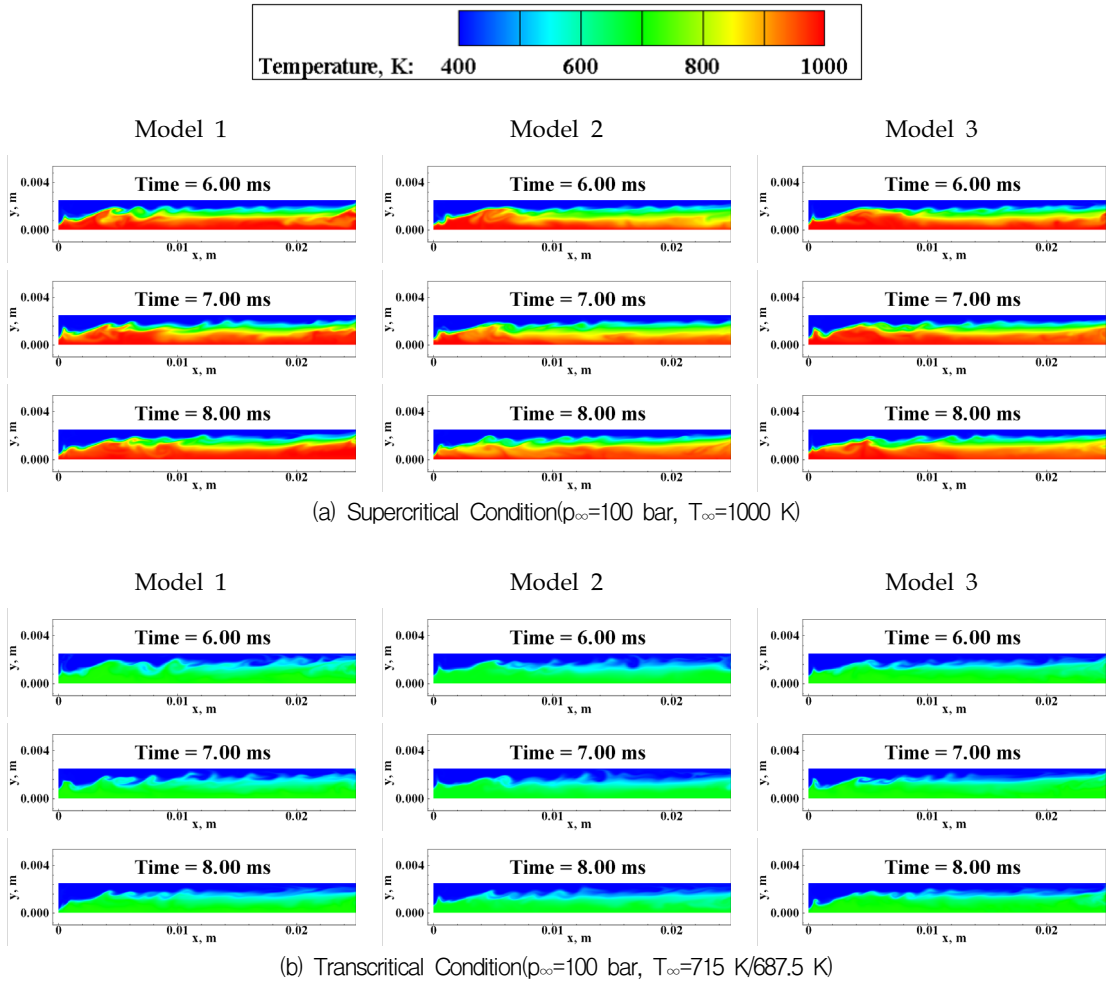
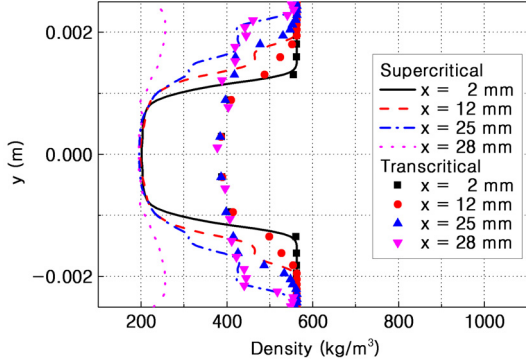
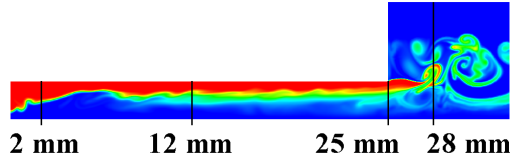
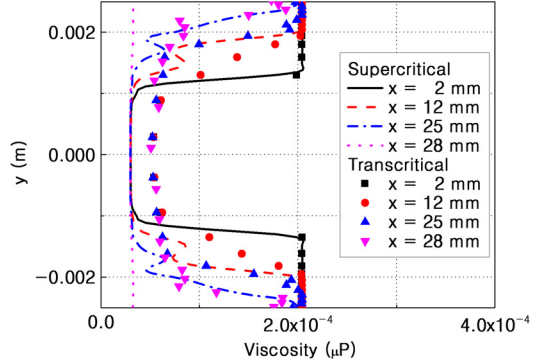


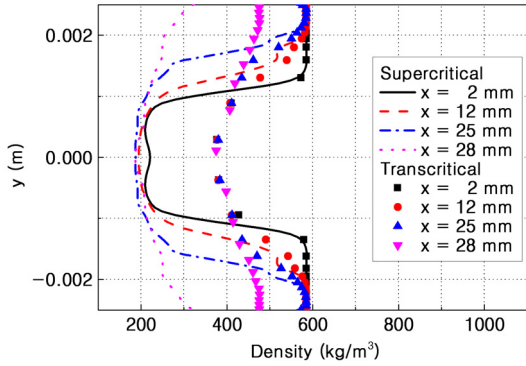
Fig. 2 Temporal Evolution of Temperature Field for Kerosene Surrogate Models



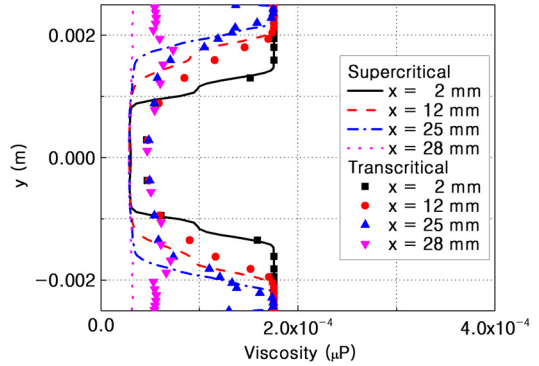
(a) Density of Model 1



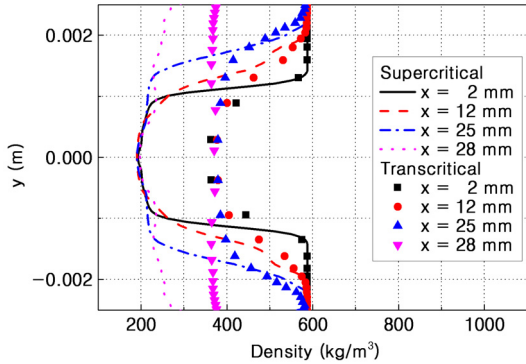
(b) Viscosity of Model 1



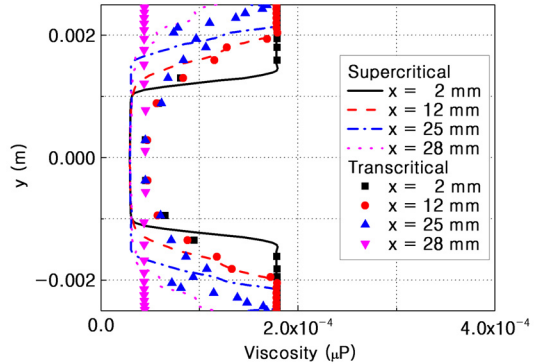
(c) Density of Model 2



(d) Viscosity of Model 2



(e) Density of Model 3



(f) Viscosity of Model 3

Fig. 3 Radial Distribution of Density and Viscosity for Kerosene Surrogate Models

불안정성을 야기하게 되며 분사되는 연료의 운동량을 감소시켜 성능 저하의 원인이 될 수 있다. 모델 1, 3의 상변화를 포함한 유동 특성은 매우 유사한 반면 모델 2의 경우 케로신의 상변화가 일어날 것으로 판단되는 액막과 중심부 사이의 천이 영역이 상대적으로 넓게 분포한다. 천이 임계 조건의 해석 결과에서도 동일하게 인젝터 벽면에 액막이 형성되는 것을 확인할 수 있으나 초임계 조건의 경우와 비교했을 때 중심부는 상대적으로 낮은 온도로 인해 높은 밀도 분포를 가지게 되며 이에 따라 인젝터 내부에서 형성되는 액막과 가스 경계층의 횡단 와류의 유동 특성도 달라진다.

Fig. 3은 보다 정량적인 상태량 비교를 위해 인젝터 입구에서부터 연소실 사이의 임의의 위치에서 반경 방향 평균 밀도 및 점성 계수 분포를 나타낸 것이다.

세 가지 모델 모두 밀도 및 점성 계수 분포에 있어서 전체적인 경향은 비슷하며 인젝터 내부에서 출구에 가까워질수록 액막의 두께는 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 모델 1, 3은 모델 2에 비해 상대적으로 좁은 온도 범위에서 상변화 과정을 겪는다는 것을 알 수 있으며 이는 점성 계수의 분포에서도 확인할 수 있다. 또한  $x=28 \text{ mm}$ 의 위치에서 모델 3은 밀도 및 점성 계수의 분포가 반경 방향으로 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있는데 이를 바탕으로 다른 두 모델에 비해 인젝터 출구에서 분사된 직후 빠르게 케로신의 상태 천이가 일어난다는 것을 예측할 수 있다. 천이 임계 조건일 경우 인젝터 중심부 밀도 분포는 초임계 조건일 때의 약 2배의 값을 가지는 반면 점성 계수는 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 이는 상변화가 일어나기 시작하는 천이 임계 조건에서부터 초임계 조건 사이의 온도 변화에 대해 점성 계수보다 밀도의 값이 민감하게 변화한다는 것을 의미한다. 이에 따라 초임계 조건의 인젝터 내부 물성치 변화 특성에 있어서 민감도를 고려한 선택적인 수치 해석 기법의 적용이 가능함을 알 수 있다. 또한 초임계 조건일 경우 밀도 및 점성 계수가 낮은 값을 가지기 때문에 천이 임계 조

건일 때보다 인젝터 중심부로 재유입되는 유동에 의한 저항을 적게 받을 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

초임계 조건에서 작동하는 스월 인젝터에서의 케로신 surrogate 모델에 대한 유동 특성 및 상태량 분포 특성이 LES로 모사되었다.

스월 유동에 의해 인젝터 내부 벽면에는 케로신 액막이 형성되며 중심부는 낮은 밀도의 가스 층이 형성된다. 이 경우 제시된 케로신의 surrogate 모델에 따라 상태 천이 영역, 유동 특성 및 물성치 분포가 달라지며 이에 따라 적합한 모델의 적용이 요구된다.

천이 임계 조건에서 초임계 조건으로 환경이 변화할 경우 물성치의 천이에 있어서 민감도가 서로 다르다는 것이 확인되었다.

## 후 기

본 논문은 2009년도 교육 과학 기술부의 재원으로 한국 연구 재단의 우주 기초 원천 기술 개발 사업(National Space Laboratory)으로 수행된 연구임(2009-03-026).

## 참 고 문 헌

1. Poling, B. E. et al., The Properties of Gases and Liquids, 5th ed., McGraw-Hill Companies, Inc., 2001
2. Chung, T. H. et al., "Generalized Multiparameter Correlation for Nonpolar and Polar Fluid Transport Properties", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 27, No. 4, April, 1988, pp.671-679
3. Choi, Y. H. and Merkle, C. L., "The Application of Preconditioning in Viscous Flows", Journal of Computational Physics, Vol. 105, Issue 2, April, 1993, pp.207-223
4. 김국진, 허준영, 성홍계, "초임계 영역에서 대체 모델 연료를 이용한 케로신의 열역학적 상태량 연구", 한국항공우주학회지, 제38권, 제8호, 2010, pp.823-833