

# 동축와류형 분사기의 케로신/액체산소 초임계 혼합특성 수치적 연구

허준영\* · 김국진\* · 성홍계\*\* · 최환석\*\*\*

## Numerical Study for Kerosene/LOx Supercritical Mixing Characteristics of Swirl Injector

Jun-Young Heo\* · Kuk-Jin Kim\* · Hong-Gye Sung\*\* · Hwan-Seok Choi\*\*\*

### ABSTRACT

The turbulent mixing of a kerosene/liquid oxygen coaxial swirl injector under supercritical pressures have been numerically investigated. Kerosene surrogate models are proposed for the kerosene thermodynamic properties. Turbulent numerical model is based on LES(Large Eddy Simulation) with real-fluid transport and thermodynamics over the entire pressure range; 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 effect of operating pressure on thermodynamic properties and mixing dynamics inside an injector and a combustion chamber are investigated. Power spectral densities of pressure fluctuations in the injector under various chamber pressure are analyzed.

### 초 록

초임계환경에서 작동하는 케로신/액체산소 동축와류형 분사기의 혼합특성을 수치적으로 연구하였다. 케로신 물성치를 계산하기 위하여 씨로게이트 모델이 적용되었다. 난류모델은 LES를 기반으로 하였고, 초임계영역의 상태량을 계산하기 위해 SRK 상태방정식, 점성계수와 열전도도에 대하여 Chung이 제안한 고압상태 혼합물에 대한 방정식, 확산계수에 대하여 Fuller 이론에 Takahashi가 제안한 고압상태의 특징을 고려한 식을 적용하였다. 연소실 압력변화에 따른 분사기와 연소실에서의 열역학적 물성치와 혼합특성을 관찰하였다. 또한 분사기의 압력섭동 스펙트럼밀도를 분석하였다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Supercritical Condition(초임계상태)

\* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

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

\*\*\* 종신회원, 한국항공우주연구원 연소기팀

### 1. 서 론

위성발사체의 고성능화를 위해 기존엔진기술을 바탕으로 추력을 증대시킬 수 있는 고온/고

압연소엔진 개발이 주를 이루고 있다. 추력 10톤급 이상 엔진의 경우 대부분 고압조건에서 연소하므로 연료와 산화제 모두 초임계상태에서 작동되며, 고압에서의 연료/산화제 혼합-연소기술이 곧 고성능 엔진의 핵심기술이라고 할 수 있다. 하지만 고압환경에서의 실험적 연구는 안전성 문제로 인해 수치적 해석을 필요로 한다. 초임계영역에서는 에너지의 함량은 액체특성이면서 에너지의 확산은 기체성질로 매우 독특한 상태량과 열방출을 표출한다. 즉 고밀도의 에너지 확산으로 높은 연소효율과 액체로켓엔진의 성능 증가를 이룰 수 있다. 액체로켓연료로 사용되는 케로신은 다양한 탄화수소계열의 분자로 이루어져 있으므로 모든 성분을 고려한 수치모사는 한계가 있다. 이에 따라 케로신의 열역학적 특성을 만족하는 단일화합종 또는 써로게이트(surrogate)모델이 사용된다.

본 연구에서는 케로신 모델 및 다양한 초임계 압력조건에 따른 케로신/액체산소 동축와류형 분사기의 혼합특성을 비교분석하였다.

## 2. 이 론

본 연구에서는 복잡한 난류유동특성을 구현하기 위해 LES 기법이 적용되었고, 재순환영역에서와 같은 저속유동과 비압축성 유동장에서의 수렴 속도를 증가시키기 위하여 예조건화기법이 적용되었다. Favre-averaged된 질량, 운동량, 에너지, 혼합분을 보존방정식이 사용되었으며 이는 다음과 같다.

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

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

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

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{f}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{f})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} D \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_j} - \Phi_j^{sgs} \right) \quad (4)$$

상첨자 sgs는 subgrid scale 난류모델의 subgrid closure term을 의미한다.

초임계영역의 상태량을 정확하게 예측하기 위해 Soave Modification of Redlich-Kwong 실제기체 상태방정식을 사용하였다.[1] 점성계수와 열전도도에 대하여 Chung이 제안한 고압상태 혼합물에 대한 방정식이 적용되었고, 확산계수는 Fuller 이론에 Takahashi가 제안한 고압상태의 특징을 고려한 식을 사용하였다.[2, 3]

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

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

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

## 3. 분사기 형상 및 경계조건

초임계상태에서의 케로신/액체산소 동축와류형 분사기의 혼합해석을 수행하였다. 분사기내부에 산화제, 외부에는 연료가 공급되고 와류의 방향은 동일하다. 그리고 분사기의 외부노즐끝단에서 연료와 산화제가 혼합이 일어나는 분사조건을 고려하였다.

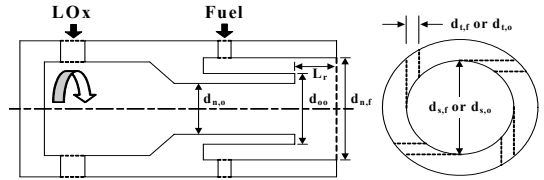


Fig. 1 Schematics of a Swirl Injector

분사기의 단면 개략도는 Fig. 1과 같고, 분사기의 주요부위 수치는 Table. 1에 나타내었다. 분사기 내부노즐 끝단의 두께는 0.6 mm이고 리세스 길이는 3.2 mm이다.

Table 1 Geometric Parameters of Injectors

$d_{t,f}/d_{n,o}$	$d_{t,o}/d_{n,o}$	$d_{s,f}/d_{n,o}$	$d_{s,o}/d_{n,o}$
$2.6 \times 10^{-1}$	$4.3 \times 10^{-1}$	$2.0 \times 10^0$	$1.8 \times 10^0$
$d_{o,o}/d_{n,o}$	$d_{n,f}/d_{n,o}$	$n_f$	$n_o$
$1.3 \times 10^0$	$2.0 \times 10^0$	4	8

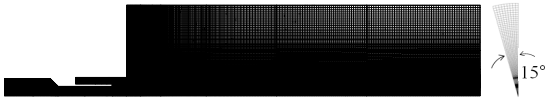


Fig. 2 Computaional Domain

계산시간을 줄이기 위하여 분사기는 원주방향 단면의 15°만을 고려하였으며 격자구성은 Fig. 2와 같다. 격자수는 약 675,000개이며 계산영역을 45개의 블록으로 나누어 병렬계산기법을 적용하였다.

Table 2 Operation Condition

Injector		Coaxial Swirl
Chamber Pressure		5.25, 8.0, 10.0 MPa
Oxidizer		Liquid Oxygen; 103 K
Fuel		Kerosene; 350 K
Mass Flow Rate	Fuel	0.232 kg/s
	Oxidizer	0.084 kg/s

Table 3 Components of Surrogate Models for the Kerosene[4]

Species(mole,%)	Kerosene	
	Model-1	Model-2
n-dodecene	100	·
n-decane	·	32.6
n-dodecane	·	34.7
Methylcyclohexane	·	16.7
Butylbenzene	·	16

케로신과 액체산소 모두 입구에서 5%의 난류 강도를 주었고 출구는 MOC에 기반한 경계조건을 적용하였다. 그리고 계산영역은 인젝터 형상에 기반을 두고 있으므로 양 옆면은 주기성(periodic) 조건, 아랫면은 축으로 설정하였다.

본 연구에서는 연소실의 압력과 케로신의 물성치에 따른 혼합특성을 비교하였다. 분사기 계산조건과 케로신의 물성치는 Table 2, 3과 같다.

#### 4. 결 과

전형적인 동축와류형 분사기에서 산화제와 연료는 접선(azimuthal)방향과 반경(radial)방향의 속도만을 가지고 공급된다. 여기에서 접선방향속

도는 와류강도를 결정하고 반경방향속도는 유량을 결정하게 된다. 본 연구에서는 공동(cavity)이 있는 분사기형상을 해석하였다. 동일한 와류강도로 산화제 또는 연료가 공급될 때 공동이 있으면 없을 때보다 분사기내부에 유체가 가득 차 있게 된다. 이로 인해 산화제의 코어가 두껍게 형성되었다. 분사기내에서 강한와류를 가진 극저온의 산화제가 상온의 연소실로 분사되면서 혼합과 열전달이 활발히 발생하고 밀도는 급격히 감소하게 된다. 동시에 와류속도와 반경방향 속도도 감소하고 Fig. 3과 같이 와동의 분열이 발생하며 재순환영역이 형성된다. 본 연구에서는 재순환영역이 분사기내부까지 침투하는데, 이는 와동의 분열을 촉진하고 연소안정화에 기여할 것으로 판단된다.

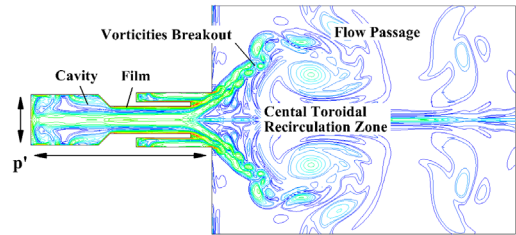


Fig. 3 Flow Structure of Coaxial Swirl Injector

#### 4.1 연소실 압력에 따른 혼합 특성

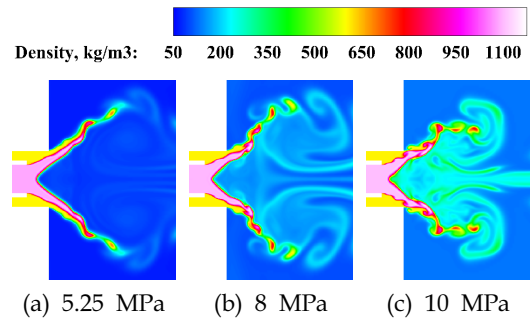


Fig. 4 Density Contour under Various Chamber Pressure

Figure 4는 산화제와 연료의 공급조건은 동일하게 하고 연소실압력을 증가시켰을 때, 밀도장을 비교한 결과이다. 5.25 MPa에서 10 MPa로 압력을 증가시키면 유동장의 밀도는 증가하지만

기화현상은 더 활발히 진행되어 상변화의 전이 영역이 넓게 분포함을 보인다. 이로 인해 압력이 증가할수록 혼합면의 파동은 커지게 되고, 산화제와 연료의 혼합은 활발히 진행됨을 알 수 있다.

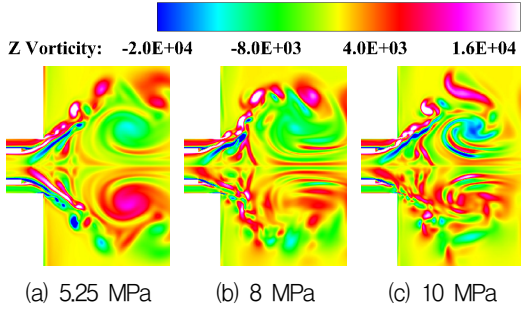


Fig. 5 Z-Vorticity Contour under Various Chamber Pressure

Figure 5는 z방향 와동의 크기를 나타내고 있다. 압력이 증가할수록 산화제, 연료의 와동은 커지게 되고 혼합면에서 연료와 산화제의 전단력이 커져 기화를 촉진시킨다. 이로 인해 분사기 후방에 강건한 재순환영역이 형성됨을 보인다.

#### 4.2 연소실 압력에 따른 주파수 특성

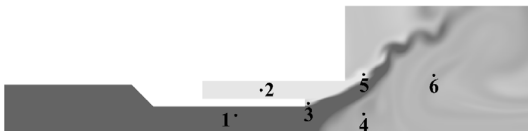


Fig. 6 Probe Location

연소실 압력증가가 분사기에 주는 음향학적 영향을 살펴보기 위하여 분사기 내·외부의 여러 위치에 대한 주파수를 비교 및 분석하였다. 데이터 수집위치는 산화제와 연료노즐 내부(1, 2)와 혼합이 시작되는 산화제노즐 끝단(3), 재순환영역(4), 연료노즐 끝단(5), 분사기출구에서 약간 떨어진 후류(6)에 대하여 분석하였다.(Fig. 6)

5.25, 10.0 MPa의 연소실압력조건에서 분사기 후류(5, 6, 7)에서는 3.3~3.35 kHz의 지배적인 주파수가 나타난다. 그리고 분사기내부(1, 2, 3)에서는 산화제노즐에서는 고밀도의 액체산소에서

발생되는 1.3 kHz의 주파수가 지배적으로 존재하였다. 초임계조건일 때 산화제는 1000 kg/m<sup>3</sup> 이상의 고밀도 액체특성을 가지지만 에너지확산은 기체성질을 가지므로 산화제노즐 내부에서도 비교적 큰 주파수를 가지고 있다. 밀도와 압력이 음속에 복합적으로 영향을 주는 요인이기 때문에 압력변화에 따른 주파수특성은 압력뿐만 아니라 밀도변화에도 영향을 받는다.

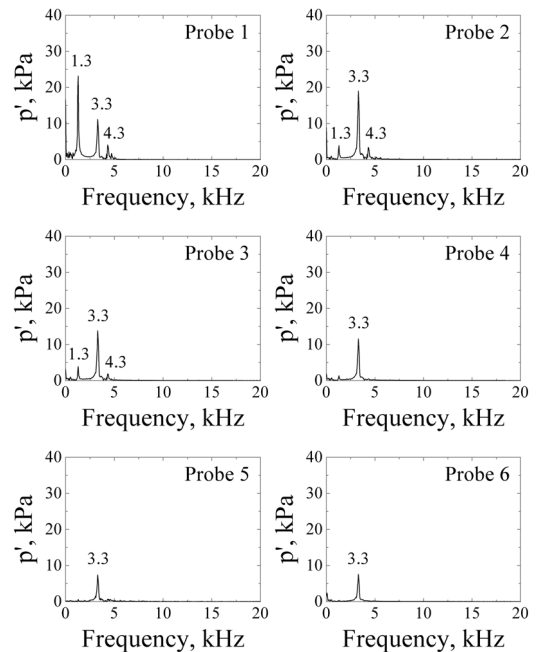


Fig. 7 Power Spectral Densities of Pressure Fluctuations: 5.25 MPa

5.25 MPa보다 10.0 MPa일 때 전체적으로 주파수가 50 Hz정도 상승하므로 압력변화보다 밀도변화가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 연료노즐에서는 산화제노즐에 비해 낮은 밀도범위를 가지므로 3.3 kHz의 고주파가 지배적으로 존재하였다. 또한 분사기내부에서는 모든 위치에서 4.3 kHz의 주파수가 형성되었다. 산화제와 연료가 혼합되는 위치 5에서는 압력이 증가함에 따라 고주파가 형성되었다. 고압에서는 저압보다 기화특성이 활발히 발생하기 때문에 분사기내부에서 발생한 고주파가 소멸되지 않고 분사기끝단에서도 나타나는 것으로 판단된다.

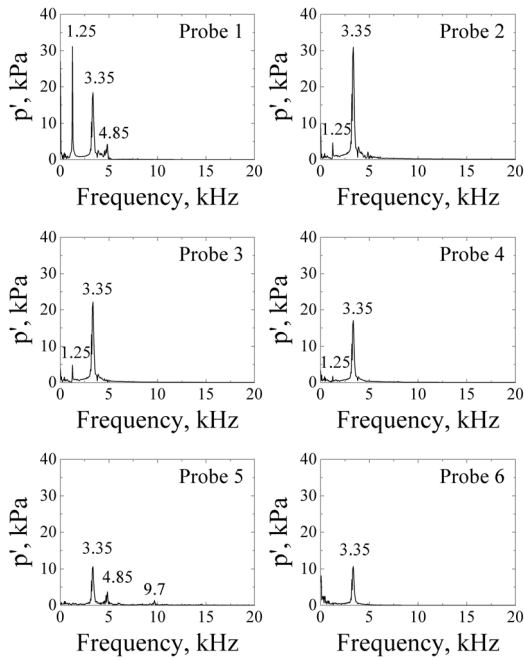


Fig. 8 Power Spectral Densities of Pressure Fluctuations; 10.0 MPa

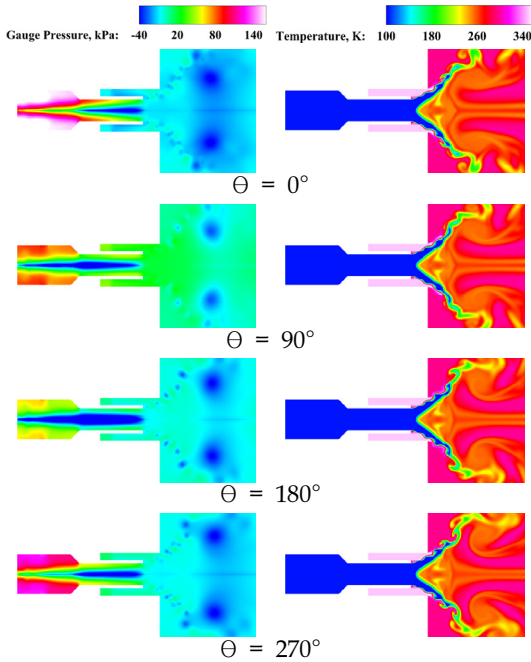


Fig. 9 Temporal Evolution of Pressure and Temperature Field over 1 Cycle of the Dominant Vortex Shedding; 10.0 MPa

Figure 9는 분사기내에서 지배적으로 발생하는 와류방출(vortex shedding)의 한 주기를 나타낸 것이다. 분사기에 공급되는 난류유동으로 인해 내부유동에 파동이 존재하고, 분사기 공동에 지속적으로 공급되는 산화제는 코어 바깥경계에 Kelvin- Helmholtz 파동을 형성시킨다. 이 파동이 후류로 전달되면서 산화제 노즐끝단에서 헤어핀와동(hairpin vortice)이 형성된다. 또한 파동이 재순환영역과 상호작용을 하면서 자급하는 불안정성(self-sustained instability)현상이 나타나게 된다.

#### 4.3 케로신 모델에 따른 혼합 특성

케로신은 화학적으로 정확한 모델이 없으므로 열역학적 특성을 만족하는 단일화학종 또는 써로게이트 모델이 사용된다. 하지만 단일화학종과 여러 화학종을 혼합한 써로게이트 모델은 화학종 수에 따라 계산시간에 큰 영향을 준다. 계산 효율과 모델 정확도에 따른 영향을 분석하기 위하여 단일화학종 케로신 모델과 써로게이트 모델의 혼합특성을 비교하였다. Table 4는 케로신 모델에 따라 분사기에 공급되는 연료와 산화제의 열역학적 상태량의 차이를 나타낸 것이다.

Table 4 Thermodynamic Properties for Models

Properties		Model-1	Model-2
Density (kg/m <sup>3</sup> )	Oxidizer	1086.6	
	Fuel	605.2	603.9
Viscosity (N·s/m <sup>2</sup> )	Oxidizer	1.41×10 <sup>-4</sup>	
	Fuel	2.29×10 <sup>-4</sup>	2.18×10 <sup>-4</sup>

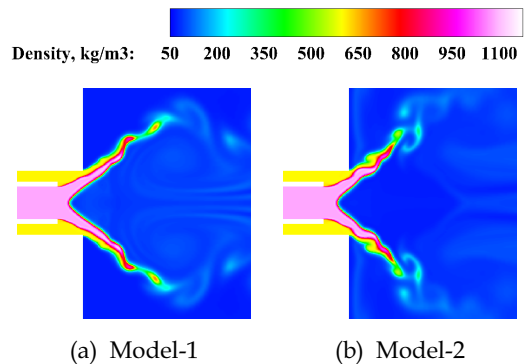


Fig. 10 Density Contour for Kerosene Models

케로신 모델-1, 2의 열역학적 물성치는 거의 유사한 값을 가짐을 보인다. 혼합과 밀접한 관련이 있는 밀도와 점도는 모델-1이 모델-2에 비하여 높으므로 이로 인해 모델-2의 혼합면에서 더 활발한 기화현상이 발생함을 알 수 있다.(Fig. 10) 상온에서 혼합할 때 그 차이는 극히 작지만 연소조건에서는 기화가 매우 빠르게 진행되고 물성치간 반응현상이 다르기 때문에 혼합특성도 달라질 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구를 통해 초임계조건에서 연소실 압력 변화에 따른 동축와류형 분사기의 내·외부 혼합 및 주파수특성을 비교하였다. 분사기의 산화제노즐 끝단의 두께는 0.6 mm이며 리세스 길이는 3.2 mm이다. 연소실 압력은 5.25, 8.0, 10.0 MPa 이고, 케로신은 단일화확종 모델과 써로게이트 모델을 적용하였다.

연소실에서는 3.3~3.35 kHz의 주파수가 지배적이다. 산화제노즐은 극저온 고밀도의 유체로 채워져 있고 압력섭동이 크기 때문에 노즐내부에서 발생하는 1.3 kHz의 저주파가 지배적으로 나타났다. 이에 반해 연료는 산화제에 비하여 밀도가 낮아 음속이 빠르므로 연료노즐에서는 3.3 kHz의 고주파가 지배적으로 존재하였다. 또한 분사기내부에서는 모든 위치에서 4.3 kHz의 주파수가 형성되었다. 연소실압력이 10.0 MPa일 때, 분사기 내·외부의 주파수는 5.25 MPa보다 약 50 Hz 증가하였고, 산화제/연료의 혼합면에서 고주파가 형성되었다. 케로신 모델에 따른 열역학적 상태량과 혼합특성은 거의 유사하였지만, 연소조건에서는 물성치간 반응으로 인해 혼합특

성이 달라질 것으로 판단되므로 이에 대한 추후 연구가 필요하다.

## 후 기

본 논문은 2008년도 교육 인적 자원부의 재원으로 한국 연구 재단의 우주 기초 원천 기술 개발 사업(National Space Lab.)으로 수행된 연구(20100029574)이며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Soave, G., "Equilibrium Constants from a Modified Redlich-Kwong Equation of State," Chemical Engineering Science, Vol. 27, 1972.
2. Chung, T., Ajlan, M., Lee, L. and Starling, K., "Generalized Multi-parameter Corresponding State Correlation for Poyatomic, Polar Fluid Transport Properties," Indust. Chem. Engin. Research, Vol. 27, pp. 671-679, 1988.
3. Takahashi, S., "Preparation of a Generalized Chart for the Diffusion Coefficients of Gases at High Pressures," Journal of Chemical Engineering(Japan), Vol. 7, 1974.
4. 김국진, 허준영, 성홍계, "초임계영역에서 대체모델연료를 이용한 케로신의 열역학적 상태량 연구", 한국항공우주학회지, 38권 8호, 2010.