

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.8.823

초임계 영역에서 대체 모델 연료를 이용한 케로신의
열역학적 상태량 연구

김국진*, 허준영*, 성홍계**

Investigation of Thermophysical Properties of the Kerosene Using
the Surrogate Model Fuel at Supercritical Conditions

Kuk-Jin Kim*, Jun-Young Heo* and Hong-Gye Sung**

ABSTRACT

For the study of thermophysical properties of kerosene for the liquid rocket and aviation fuels, the surrogate models are investigated. The density distributions based on the real gas equations of state (Soave modification of Redlich-Kwong and Peng-Robinson equation of state) and NIST SUPERTRAPP (extended corresponding state principle) are compared with the previous experimental results at supercritical conditions. The error range of thermophysical properties analyzed for the surrogate models as well. Peng-Robinson equation of state and extended corresponding state principle are especially accurate for the hydrocarbon fuels but the appropriate surrogate models need to be chosen to the operation conditions such as pressure and temperature.

초 록

액체 로켓 및 항공용 엔진 연료로서 사용되는 케로신의 열역학적 상태량을 연구하기 위해 surrogate 모델이 조사되었다. 초임계 조건에서 실제 기체 상태 방정식(SRK 상태 방정식, PR 상태 방정식)과 NIST SUPERTRAPP(ECS 원리)을 이용하였을 경우의 밀도 분포가 기존의 실험 결과와 비교되었다. 또한 surrogate 모델의 종류에 따른 열역학적 상태량의 오차 범위에 대한 고찰이 수행되었다. 탄화 수소 계열 연료에 대해서는 PR 상태 방정식과 ECS 원리가 높은 정확도를 나타내지만 압력, 온도와 같은 작동 환경에 따라 적절한 surrogate 모델을 선별하여 선택해야 함을 확인하였다.

Key Words : Kerosene(케로신), Surrogate Model(Surrogate 모델), Supercritical Conditions(초임계 조건), Real Gas Equation of State(실제 기체 상태 방정식), Thermophysical Property(열역학적 상태량)

I. 서 론

현재 위성 발사나 우주 개발의 목적으로 사용되는 우주 발사체는 2단식 또는 3단식 로켓을 사용하며 이 중에서 1단 로켓의 경우 고추력을 필요로 하기 때문에 연소실의 압력이 추진제의 임계 압력을 크게 상회하는 액체 로켓을 이용한다.

† 2010년 4월 7일 접수 ~ 2010년 6월 1일 심사완료

* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학과

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부

교신저자, E-mail : hgsung@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 항공대길 100

액체 로켓의 개발은 원천 기술을 바탕으로 높은 수준의 응용 과학 기술을 필요로 하지만 국가 간 인력 및 기술 교류에 있어서 많은 제약이 따르고 있다. 우리 나라의 경우 앞으로 발사 예정인 KSLV-II에 사용되는 액체 로켓 엔진은 자국의 기술력을 이용한 개발 계획을 가지고 있으며 추진제로는 KSLV-I 과 마찬가지로 케로신과 액체 산소가 채택되었다. 이외에도 케로신 계열 연료는 스크램 제트 엔진을 비롯한 각종 항공기용 엔진 연료로서 사용되고 있다.

액체 로켓 엔진이나 특정 스크램 제트 엔진의 연소실에 분사된 추진제는 고온, 고압 상태의 초임계 환경에 노출되며 이러한 조건에서는 아임계 상태에서의 일반적인 상 변화 과정과 상이한 열역학적 상태 천이를 경험하게 된다. 아임계 환경을 포함한 이러한 초임계 조건에서 케로신의 열역학적 특성을 연구하기 위해서는 실험적 한계로 인해 수치적 계산을 필요로 한다.

케로신은 원유를 분별 증류하여 얻을 수 있으며 단일 성분이 아닌 매우 다양한 탄화 수소 계열 성분이 함유되어 있다. GC-MS(gas chromatography-mass spectrometry)와 같은 방법을 사용하여 케로신의 성분을 파악할 수 있지만 매우 많은 종류의 성분으로 구성되어 있으므로 모든 성분을 수치적 계산에서 고려하기에는 한계가 있다. 또한 케로신이 분별 증류된 지역과 시점, 생산 공장 등에 따라 서로 다른 물성치 특성을 갖게 되므로 정확한 상태량 예측이 현재 기

술로는 불가능하다. 그러므로 GC-MS를 통해 연료 성분을 분석하고 이를 바탕으로 케로신에 함유된 정도가 큰 성분을 기준으로 surrogate 모델을 가정하는 방법을 이용할 수 있다. 물론 이러한 과정에서 케로신의 임계 압력, 임계 온도, 인화점(flash point) 등과 같은 열역학적 특성을 대체적으로 만족하며 구성 성분을 간략화 할 수 있다는 조건을 만족하여야 한다.

본 연구에서는 초임계 조건의 단일 성분 상태량에 관한 기존 연구[1]를 바탕으로 케로신 계열 연료의 surrogate 모델에 대한 내용과 함께 초임계 영역뿐만 아니라 연료가 액상으로 존재하는 영역에서의 상태량을 예측하는 데 있어서 높은 정확도를 보이는 실제 기체 상태 방정식에 대한 이론적 연구를 수행하였다. 또한 다양한 압력과 온도 조건에서 케로신의 열역학적 상태량을 비교 분석하였다.

II. 케로신의 Surrogate 모델 및 실제 기체 상태 방정식

2.1 케로신의 Surrogate 모델

케로신 계열 연료는 수천 종류의 탄화 수소 계열 분자로 구성되어 있으며 그동안 이러한 연료의 구성 성분과 함께 상태량에 대한 분석이 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다[2-12].

Table 1. Components of Surrogate Models for the Kerosene

Model	China no. 3 kerosene (Mole %)	JP-8/Jet A (Mole %)		
	1	2	3	4
n-decane(C ₁₀ H ₂₂)	49	16.449	15.7	32.6
n-dodecane(C ₁₂ H ₂₆)		20.152	17.5	34.7
n-tetradecane(C ₁₄ H ₃₀)		14.156	11.3	
n-hexadecane(C ₁₆ H ₃₄)		10.335	6.6	
Isooctane(C ₈ H ₁₈)		6.83		
1, 3, 5-trimethylcyclohexane(C ₉ H ₁₈)	44			
Methylcyclohexane(C ₇ H ₁₄)		7.945	6.5	16.7
Ethylcyclohexane(C ₈ H ₁₆)			6.7	
Meta-xylene(C ₈ H ₁₀)		7.348	7	
Butylbenzene(C ₁₀ H ₁₄)		5.812	5.6	16
Isobutylbenzene(C ₁₀ H ₁₄)			5.6	
n-propylbenzene(C ₉ H ₁₂)	7			
Naphthalene(C ₁₀ H ₈)			5.8	
1-methylnaphthalene(C ₁₁ H ₁₀)		10.972	5.2	
2, 5-dimethylhexane(C ₈ H ₁₈)			6.5	

케로신 계열 연료의 주요 구성 성분은 파라핀, naphthenes, aromatics로 구성된다. 이러한 연료의 성분 분석을 위해서는 GC-MS, ASTM D2425, ASTM D2789 등의 기법이 사용되며[7] 이를 통해 파악한 주요 구성 성분을 기준으로 다양한 surrogate 모델이 제시되어 왔다. 하지만 그러한 모델을 기준으로 하여 실험 자료와 직접적인 비교를 한 사례가 많지 않으므로 본 연구는 선행 연구에서 실험 자료와의 비교를 위해 제안된 China no. 3 kerosene과 대표적인 케로신 계열 연료인 JP-8/Jet A의 surrogate 모델[4, 7, 9-12]을 기초로 하였다. Table 1은 이에 따른 각 모델의 구성 성분에 대한 몰 분율을 나타낸 것이다. 모델 1(China no. 3 kerosene)의 surrogate 모델은 주요 구성 성분이 n-alkanes, mono-cycloalkanes, aromatics로서 각 성분을 대표하여 n-decane, 1, 3, 5-trimethylcyclohexane, n-propylbenzene이 선택되었으며 몰 분율은 실험 결과와 반복적으로 비교 대조하여 결정되었다[9]. 모델 2, 3은 JP-8/Jet A의 휘발 특성과 상 변화 특성을 근사적으로 예측할 수 있으며 각 구성 요소에 대해 구체적인 화학적 특성을 파악하고 있는 성분으로 결정되었다[4, 7, 10, 11]. 또한 모델 4는 surrogate 모델의 간략화가 상태량 예측에 있어서 합당한 결과를 도출할 수 있는지의 여부를 확인하기 위해 선택되었다[12].

2.2 실제 기체 상태 방정식

2.2.1 Soave-Redlich-Kwong 모델

Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식은 van der Waals 상태 방정식을 분자 간 인력과 척력을 고려하여 보완한 Redlich-Kwong 상태 방정식에 추가적으로 분자 내부 전하 분포의 균일성 정도를 나타내는 이심 인자(acentric factor)를 포함한 실제 기체 상태 방정식 중의 하나이다. 이심 인자, ω 는 분자의 비구형성에 대한 척도이며 다음과 같이 정의된다[14, 15].

$$\omega = -1 - \log_{10} p_r^{sat} \quad (1)$$

$$p_r^{sat} = \frac{p^{sat}(at T_r = 0.7)}{p_c} \quad T_r = \frac{T}{T_c}$$

여기서 p, p_c, T, T_c 는 각각 압력, 임계 압력, 온도, 임계 온도를 나타내며 상첨자 sat 는 포화 상태에서의 값을 의미한다. 이러한 세 개의 인자를 고려한 Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식이 다음과 같이 제안되었다.

$$p = \frac{R_u T}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m(V_m + b)} \quad (2)$$

$$a = \frac{0.42748 R_u^2 T_c^2}{p_c} \quad b = \frac{0.08664 R_u T_c}{p_c}$$

$$\alpha = [1 + S(1 - T_r^{0.5})]^2$$

$$S = 0.48508 + 1.55171\omega - 0.15613\omega^2$$

위 식에서 R_u, V_m 은 각각 일반 기체 상수, 몰 당 체적을 나타낸다. Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식은 온도와 이심 인자의 함수로서 표현되는 $\alpha = \alpha(T, \omega)$ 가 추가됨으로서 이심 인자가 0.6을 초과하지 않는 범위에서 매우 정확한 결과를 얻을 수 있다[16].

2.2.2 Peng-Robinson 모델

Redlich-Kwong 상태 방정식에서 고려된 임계 압축성 인자, Z_c 가 대부분의 실제 기체에 대한 값보다 큰 0.333의 값을 갖기 때문에 Peng-Robinson 상태 방정식은 Z_c 를 0.307로 수정하여 보완된 상태 방정식이다[16].

$$p = \frac{R_u T}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m^2 + 2bV_m - b^2} \quad (3)$$

$$a = \frac{0.45724 R_u^2 T_c^2}{p_c} \quad b = \frac{0.07780 R_u T_c}{p_c}$$

$$\alpha = [1 + S(1 - T_r^{0.5})]^2$$

$$S = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$$

이 상태 방정식은 중간 크기의 탄화 수소 계열 분자에 대한 액상 상태를 예측하는 데 있어서 매우 우수한 특징을 가지지만 작은 이심 인자를 갖는 화합물에 대해서는 Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식보다 부정확한 결과를 보인다[16].

2.2.3 Extended Corresponding States 모델

Extended corresponding states(ECS) 원리는 어떤 관심의 대상이 되는 유체의 물성치가 기준이 되는 유체에 대응 상태의 원리를 적용하여 구해지는 물성치와 동일하다고 보는 것으로서 다음의 관계식을 이용한다.

$$T_0 = \frac{T_x}{f_{x,0}} = T_x \frac{T_{0,c}}{T_{x,c} \theta_{0,c}(T_{x,r}, V_{x,r}, \omega_x)} \quad (4)$$

$$\rho_0 = \rho_x h_{x,0} = \rho_x \frac{\rho_{0,c}}{\rho_{x,c}} \phi_{0,c}(T_{x,r}, V_{x,r}, \omega_x) \quad (5)$$

위 식에서 하첨자 0, x, c, r은 각각 기준 유체, 대상 유체, 임계 상태량, 환원 상태량을 나타

내며 θ 와 ϕ 는 shape factor로서 실험 데이터와의 비교 대조를 통해 얻을 수 있다. NIST SUPERTRAPP[20]의 경우, 기준 유체는 propane으로서 그 상태량을 구하기 위해 다음의 modified Benedict-Webb-Rubin 상태방정식이 사용되었다.

$$p = \sum_{n=1}^9 a_n(T) \rho_m^n + \exp(-\gamma \rho_m^2) \sum_{n=10}^{15} a_n(T) \rho_m^{2n-17} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho_{mc}^2}$$

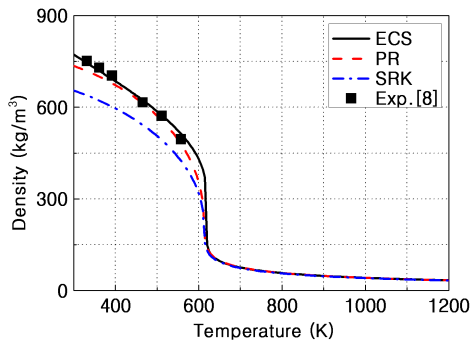
여기서 $a_n(T)$ 는 온도에 관한 함수이며 각 식에 포함된 계수는 성분마다 다른 값을 가지는 경험적 상수이다[16-19].

III. 결과 및 고찰

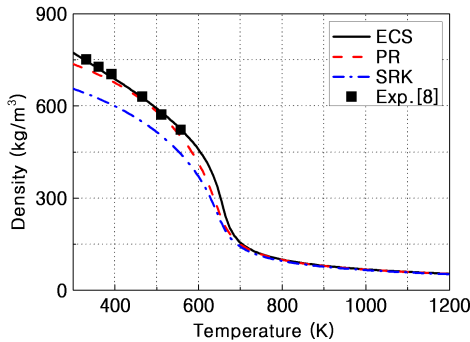
3.1 상태 방정식 비교

3.1.1 밀도 분포 비교

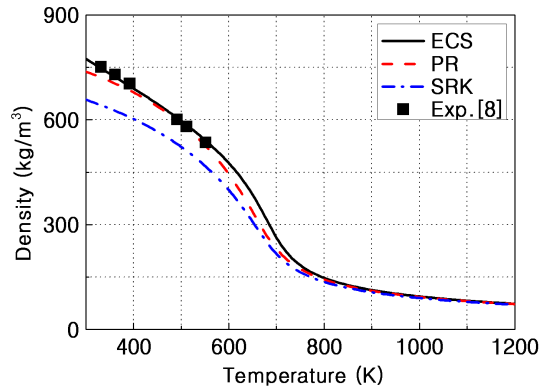
실제 기체 상태 방정식인 Peng-Robinson 상태 방정식과 Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식, 그



(a) p=25.0 atm

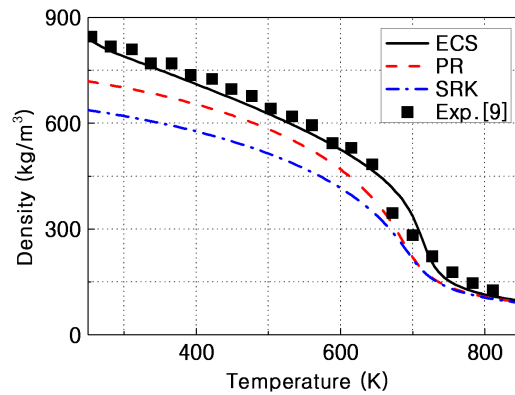


(b) p=40.0 atm

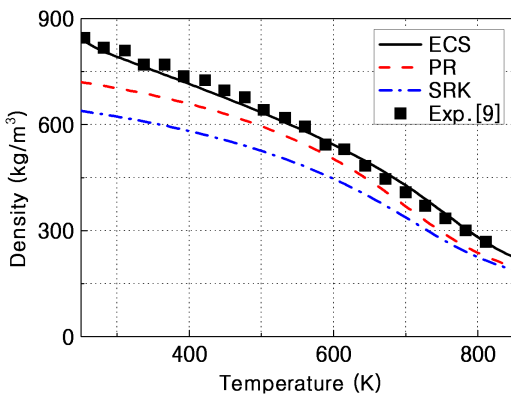


(c) p=55.0 atm

Fig. 1. Density of Model 1 (China No. 3 Kerosene) as Functions of Pressure and Temperature



(a) p=34.5 atm



(b) p=68.9 atm

Fig. 2. Density of Model 2 (JP-8/Jet A) as Functions of Pressure and Temperature

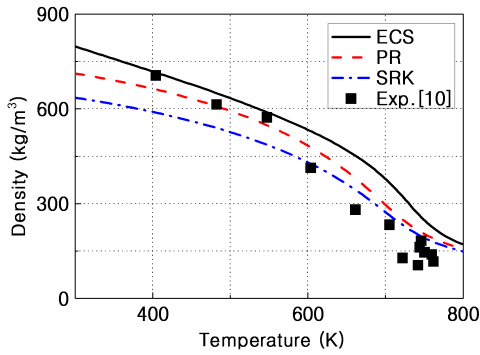


Fig. 3. Density of Model 3 (JP-8/Jet A, p=49.0 atm) as Functions of Pressure and Temperature

리고 ECS 원리가 적용된 NIST SUPERTRAPP[20]을 이용하여 다양한 압력, 온도 조건에서 케로신 계열 연료의 열역학적 상태량 분포를 비교 분석하였다. Fig. 1-3은 상태 방정식의 우위를 판단하기 위해 surrogate 모델을 적용하여 밀도 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 1은 모델 1의 밀도 분포로서 세 가지 압력 조건 모두에 있어서 액상으로 존재하는 영역에서는 Peng-Robinson 상태 방정식과 ECS 원리가 Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식을 적용하였을 경우보다 높은 정확도를 보이는 것을 알 수 있다. Peng-Robinson 상태 방정식이 높은 정확도를 보이는 이유는 케로신 성분의 대부분이 중간 크기 탄화 수소 계열 분자로 구성되어 있으며 이 상태 방정식이 석유 산업과 관련된 천연 가스의 상태를 해석하기 위해 개발되었기 때문이다. 또한 압력 조건이 25 atm일 경우 615-620 K의 구간에서 상태량이 급변하는 것을 확인할 수 있는데 China no. 3 kerosene의 경우 임계 압력은 24 atm, 임계 온도는 613 K[9]로서 비슷한 압력 조건에서 비교적 정확한 임계 온도의 예측을 나타내고 있다. 임계 압력을 초과하는 경우 모델 1의 상 변화 과정이 불분명해지고 이것은 액상과 기상 간의 구분이 모호해진다는 것을 뜻한다.

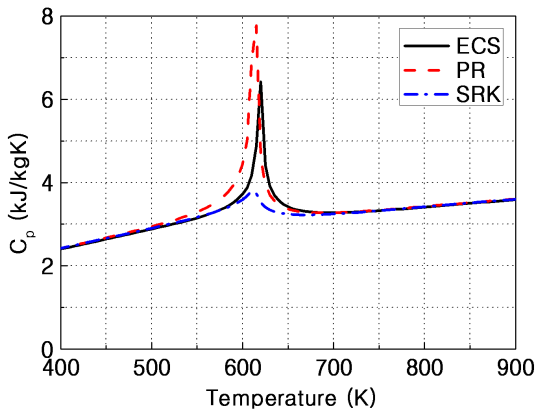
JP-8/Jet A는 23.14 atm, 683.15 K의 임계 상태량[4]을 가지며 Fig. 2, 3은 모델 2, 3의 surrogate 모델을 실험 결과와 비교하기 위하여 초임계 압력 조건에서 예측된 결과이다. Fig. 2에서는 ECS 원리가 전체적인 온도 범위에 있어서 매우 정확한 예측 결과를 보이는 반면 Peng-Robinson 상태 방정식의 오차가 모델 1의 경우보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은 Peng-Robinson 상태 방정식이 중간 크기 탄화 수소

계열 분자의 액상 영역 상태 예측에 있어서 매우 정확한 결과를 보이지만 JP-8/Jet A의 surrogate 모델에 포함된 성분이 비교적 무거운 탄화 수소 계열 분자이기 때문에 오차가 크게 나타난 것으로 판단된다. Fig. 3에서는 550 K까지는 ECS 원리를 이용한 경우와 Peng-Robinson 상태 방정식을 이용한 경우 모두 비교적 정확한 밀도 분포를 예측하지만 그 이상의 온도 영역에서는 매우 큰 오차를 보이고 있다. 이는 실험을 통한 밀도 계산 과정에 있어서 비압축성 유동의 가정이 적용된 베르누이 방정식을 이용해 계산하였기 때문에 나타난 결과[11]로서 판단되며 임계점 부근과 초임계 영역에서의 상태량 예측이 매우 부정확해질 수 있는 원인이 된다. 이외에도 실험에 사용된 JP-8/Jet A가 생산된 지역 및 공장에 따라 서로 다른 특성을 가질 수 있다는 점이 영향을 미칠 수 있다. Fig. 1-3에 대한 오차 비교 분석 결과, ECS 원리와 Peng-Robinson 상태 방정식의 경우 실험 데이터와의 비교에서 5% 이하의 오차를 보이는 반면 Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식을 적용하였을 경우 최소 10%, 최대 15%의 오차를 보이는 것을 확인하였다. 이 중 전체적으로 가장 높은 정확도를 보이는 것은 ECS 원리를 이용한 결과이다.

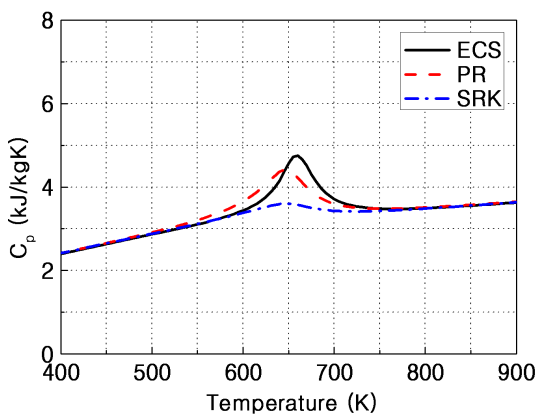
3.1.2 정압 비열 분포 비교

Fig. 4-6은 상태 방정식에 따른 정압 비열의 비교 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4. (a)의 경우, 모델 1의 임계 압력에 가까운 조건에서 정압 비열이 급격하게 증가하였다가 다시 감소하는 특징을 보이는데 그 온도 조건을 기준으로 상 변화가 일어나며 이는 잠열에 대한 현상이다. 또한 Fig. 5. (a)의 경우, JP-8/Jet A의 천이 임계 상태에 가까운 34.5 atm의 조건에서 이와 유사한 결과를 확인할 수 있다. China no. 3 kerosene과 JP-8/Jet A의 경우 모두 임계 압력을 초과하는 조건에서는 이와 같은 급격한 천이 단계를 거치지 않는 것을 확인할 수 있으며 이러한 현상은 압력 조건이 증가할수록 현저하게 나타난다.

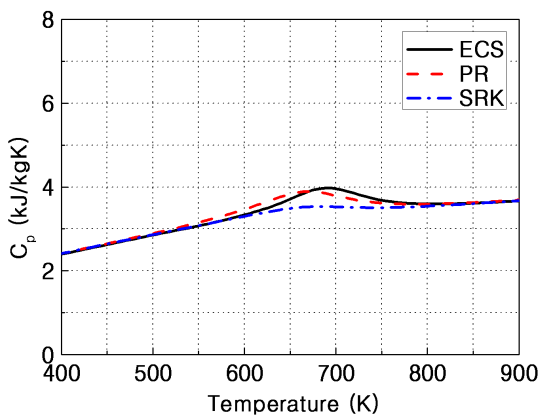
앞 절의 밀도 분포 비교 결과에서 가장 높은 정확도를 보인 ECS 원리와 다른 두 개의 실제 기체 상태 방정식의 결과를 비교해보면 전체적으로 Peng-Robinson 상태 방정식이 Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식에 비해 높은 정확도를 보이는 것을 알 수 있으며 두 상태 방정식에 따른 결과 차이는 상태 변화가 일어나는 온도 영역에서 두드러지게 나타난다. 그리고 동일한 surrogate 모델에 대해 압력 조건이 증가할수록 이러한 편차는 작아지는 것을 확인할 수 있는데 이를 통



(a) p=25.0 atm

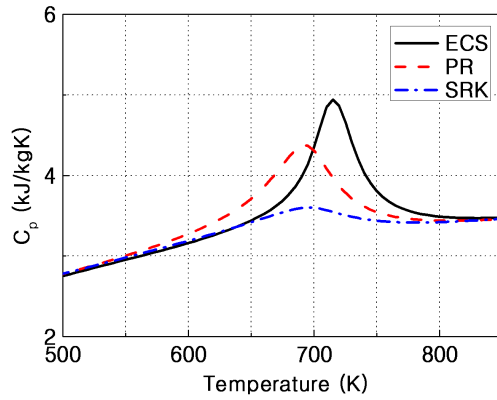


(b) p=40.0 atm

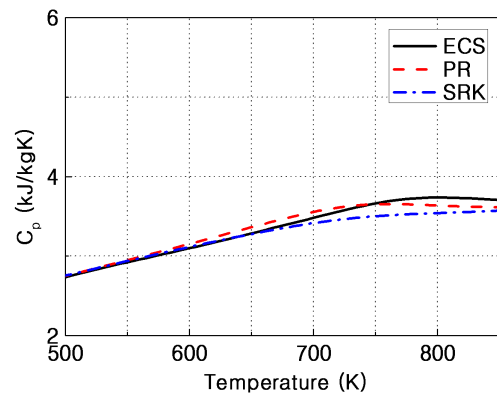


(c) p=55.0 atm

Fig. 4. Constant Pressure Heat Capacity of Model 1 (China No. 3 Kerosene) as Functions of Pressure and Temperature



(a) p=34.5 atm



(b) p=68.9 atm

Fig. 5. Constant Pressure Heat Capacity of Model 2 (JP-8/Jet A) as Functions of Pressure and Temperature

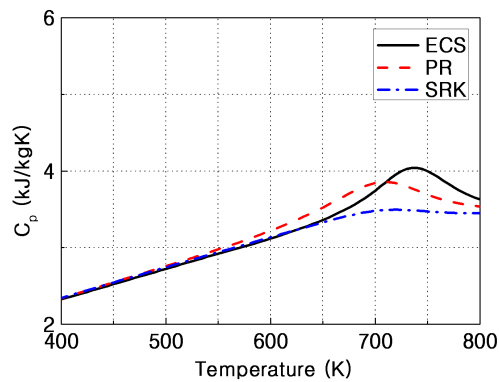


Fig. 6. Constant Pressure Heat Capacity of Model 3 (JP-8/Jet A, p=49.0 atm) as Functions of Pressure and Temperature

해 급격한 상 변화가 일어나는 조건에서의 상태량 예측에 있어서 오차가 매우 커질 수 있음을 알 수 있다. 또한 두 상태 방정식 모두 상 변화가 일어날 것으로 기대되는 온도 조건을 ECS 원리보다 더 낮게 예측하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 Surrogate 모델 비교

각 surrogate 모델의 구성 성분에 따른 상태량 예측의 정확도를 비교하였으며 여기서는 모델 4가 추가적으로 고려되었다. 이는 앞서 서술하였듯이 surrogate 모델의 간략화를 통한 정확한 상태량 예측 결과의 도출 여부를 확인하기 위한 것이다.

Fig. 7, 8은 가장 정확도가 높은 ECS 원리를 적용하여 앞서 비교 분석된 surrogate 모델의 압력 조건에 대해 밀도 분포와 실험 데이터와의 비교를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 China no. 3 kerosene의 경우 주어진 실험 데이터는 임계 온도 이하의 액상 영역에 국한되며 이 영역에서는 모든 압력 조건에 대하여 높은 정확도를 보인다. Fig. 8의 JP-8/Jet A에 대한 비교에서 모델 2, 3은 압력 조건이 49 atm일 경우를 제외하고는 대부분의 영역에서 높은 정확도를 보이며 모델 4는 상대적으로 오차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 여기서 49 atm의 압력 조건은 550 K 이상의 온도에서 실험적 계산에 대한 오차 가능성으로 인해 부정확한 결과를 보이는 것으로 판단된다. 또한 JP-8/Jet A가 액상으로 존재할 것이라 예상되는 저온 영역에서는 세 개의 surrogate 모델 모두 매우 높은 정확도를 보이고 고온 영역에서는 압력 조건이 68.9atm일 때보다 34.5 atm일 때 더 부정확한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 34.5 atm의 조건일 경우

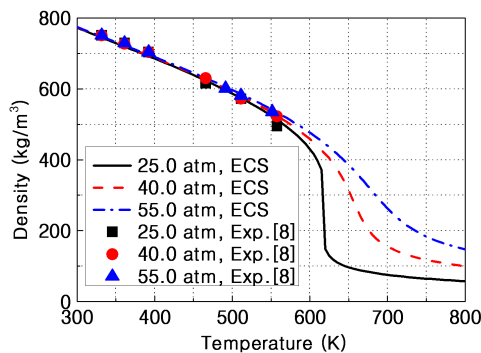
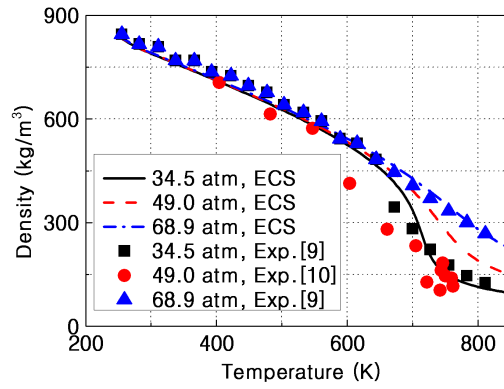
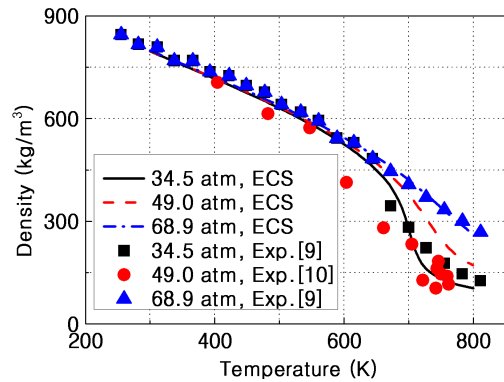


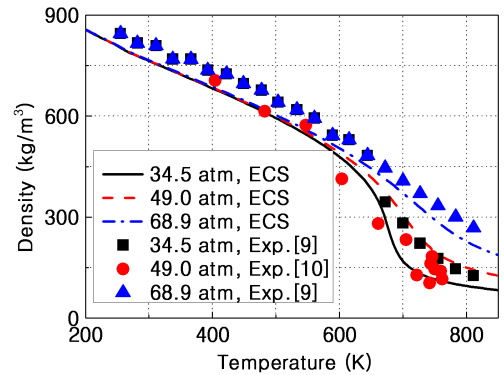
Fig. 7. Density of China No. 3 Kerosene (Model 1) as Functions of Pressure and Temperature



(a) Model 2



(b) Model 3



(c) Model 4

Fig. 8. Density of JP-8/Jet A as Functions of Pressure and Temperature

JP-8/Jet A의 임계 온도인 683.15 K 부근에서 최대 오차를 보이고 그 이상의 온도 영역에서는 다시 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 ECS 원리를 적용한다 하더라도 임계 상태량 부근에서는 정확도가 낮아질 수 있음을 의미한다.

Table 2. Maximum Density Error of Surrogate Models for China No. 3 Kerosene and JP-8/Jet A

China No. 3 Kerosene			
Pressure (atm)	Max. Error (%)		
	Model 1		
25.0	3.60		
40.0	1.40		
55.0	1.03		
JP-8/Jet A			
Pressure (atm)	Max. Error (%)		
	Model 2	Model 3	Model 4
34.5	20.53	27.59	40.77
49.0	185.66	155.83	101.71
68.9	5.29	4.41	19.05

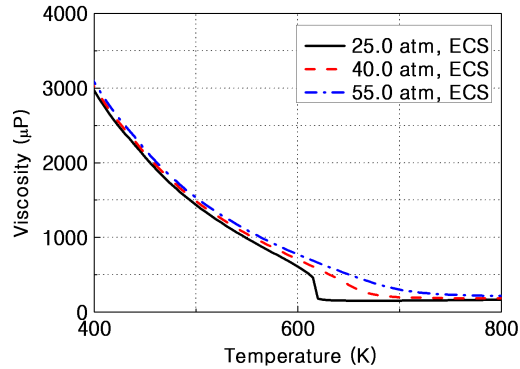
Table 2는 surrogate 모델에 따라 각 압력 조건에서의 최대 오차를 나타낸 것이다. China no. 3 kerosene의 경우 매우 높은 정확도를 보이지만 임계 또는 초임계 영역에서의 실험 데이터가 없으므로 전체적인 영역에서의 정확도 여부를 판단하기는 힘들다. JP-8/Jet A의 경우 앞서 언급한 실험적 오차를 고려하여 49 atm의 조건을 제외한 상태에서 모델 4는 34.5 atm일 때 다른 두 개의 모델에 비해 2배 정도의 오차를 보이며 68.9 atm일 때에는 약 4배의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다. 모델 2, 3을 비교해 보면 천이 임계 조건에 가까운 34.5 atm의 조건에서는 모델 2가, 초임계 조건인 68.9 atm의 조건에서는 모델 3이 더 높은 정확도를 보이며 이를 통해 압력 조건에 따라 높은 정확도를 나타내는 surrogate 모델이 다를 수 있음을 알 수 있다.

3.3 전달 물성치의 비교

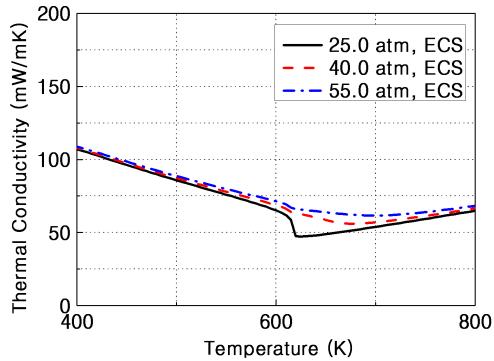
앞서 고려한 케로신의 surrogate 모델 중에서 정확도가 높은 China no. 3 kerosene과 JP-8/Jet A의 모델 2, 3에 대해 점성 계수와 열 전도도에 대한 분포를 비교하였다. 본 연구에서 제시한 조건과 동일한 경우의 전달 물성치에 대한 실험 자료가 없으므로 밀도 분포의 예측에 있어서 가장 신뢰도가 높은 ECS 원리를 이용한 계산 결과를 통해 각 압력, 온도 조건에서의 상태량 특성을 확인하고자 하였다.

Fig. 9-11에서 알 수 있듯이 점성 계수와 열 전도도에 대해서도 밀도나 정압 비열과 동일한 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특징적인 것은 점성 계수의 경우, 저온 영역에서 액체 상으로 존재할 때 온도 증가에 따라 감소 폭이 크며, 열 전도도의 경우 점성 계수와 비교했을 때

온도 변화에 민감하게 반응하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 또한 JP-8/Jet A의 모델 2, 3에 대한 점성 계수와 열 전도도 비교 결과는 거의 비슷하며 모델 2가 모델 3에 비해 상태 변화가 일어나는 온도 범위를 상대적으로 더 높게 예측하는 것을 확인할 수 있다.

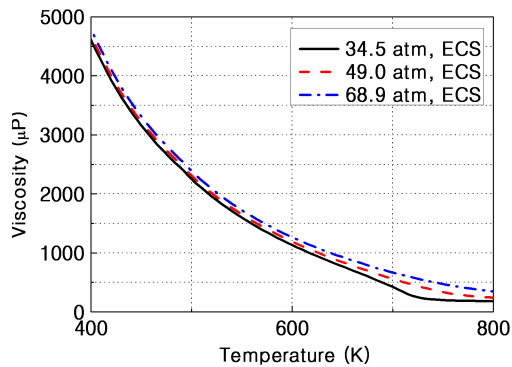


(a) Viscosity

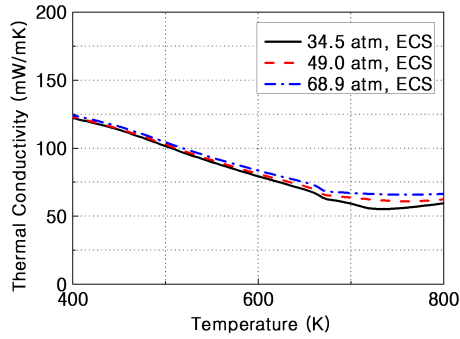


(b) Thermal Conductivity

Fig. 9. Transport Properties of Model 1 (China No. 3 Kerosene) as Functions of Pressure and Temperature

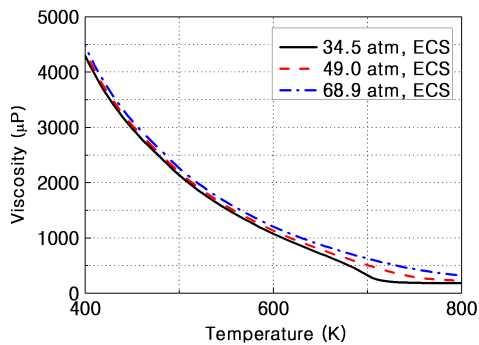


(a) Viscosity

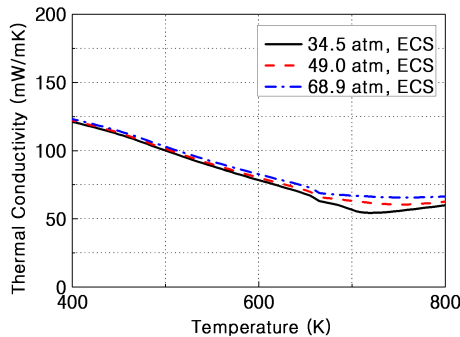


(b) Thermal Conductivity

Fig. 10. Transport Properties of Model 2 (JP-8/Jet A) as Functions of Pressure and Temperature



(a) Viscosity



(b) Thermal Conductivity

Fig. 11. Transport Properties of Model 3 (JP-8/Jet A) as Functions of Pressure and Temperature

IV. 결 론

초임계 영역을 포함한 넓은 범위의 압력 및 온도 조건에서 케로신 계열 연료인 China no. 3

kerosene, JP-8/Jet A의 상태량 예측을 위해 surrogate 모델과 실제 기체 상태 방정식에 대한 이론적 조사 및 이를 통한 비교 연구가 이루어졌다.

상태 방정식 종류에 따른 밀도 분포 비교 결과에서 China no. 3 kerosene의 경우에는 액상 영역에서 Peng-Robinson 상태 방정식과 ECS 원리가 Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식을 적용하였을 경우보다 높은 정확도를 보이는 것을 알 수 있었으며 JP-8/Jet A의 경우 China no. 3 kerosene에서와 유사한 경향을 보이지만 Peng-Robinson 상태 방정식의 오차가 상대적으로 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이는 JP-8/Jet A의 surrogate 모델이 비교적 무거운 탄화 수소 계열 분자로서 구성되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 전체적으로는 ECS 원리를 적용하였을 경우 가장 높은 정확도를 보이며 저압 조건에서는 임계 온도 부근에서 상태량이 급변하지만 각 연료의 임계 조건을 크게 벗어나는 초임계 상태에서는 상 변화 과정이 명확하게 구분되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 정압 비열의 분포 비교에서는 임계 상태량에 가까운 조건에서 급격하게 증가한 후 다시 감소하게 되는 데 이는 상 변화와 잠열에 의한 현상으로 판단할 수 있다. 또한 ECS 원리를 기준으로 했을 때 임계 온도 조건에서 Peng-Robinson 상태 방정식과 Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식의 정확도 편차가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

각 surrogate 모델에 따른 계산과 실험 결과와의 밀도 비교에서는 더 적은 성분으로 대체된 모델 4가 다른 두 개의 모델에 비해 매우 낮은 정확도를 보이는 것을 확인할 수 있었으며 높은 신뢰도의 ECS 원리를 적용한다 하더라도 임계 조건 근처에서의 상태량 예측에 있어서는 오차가 증가할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 압력 조건에 따라 높은 정확도를 나타내는 surrogate 모델이 다를 수 있음을 확인하였다.

ECS 원리를 이용한 전달 물성치의 예측 결과에 있어서도 밀도나 정압 비열의 분석 결과와 동일함을 확인하였으며 저온 영역에서 온도 변화에 따라 점성 계수, 열 전도도의 민감도에 있어서 차이가 있다는 결과를 확인할 수 있었다. 또한 JP-8/Jet A 모델 2, 3에 대한 상 변화 온도 예측에 있어서의 차이를 확인할 수 있었다.

상대적으로 높은 정확도를 보이는 Peng-Robinson 상태 방정식과 ECS 원리를 이용한 여러 가지 상태량 예측을 바탕으로 차후 케로신과 산화제의 혼합 및 연소에 대한 수치 해석에의 적용이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2008년도 교육 과학 기술부의 재원으로 한국 연구 재단의 우주 기초 원천 기술 개발 사업(National Space Laboratory)으로 수행된 연구임(2008-200687).

참고문헌

- 1) 김국진, 허준영, 김종찬, 구자예, 성홍계, "초입계 영역에서 실제 기체 상태 방정식에 따른 단일 성분의 열역학적 상태량 비교 연구", 한국추진공학회지, 제 14권, 제 3호, 2010, pp. 39~51.
- 2) Wang, T. S., "Thermo-Kinetics Characterization of Kerosene/RP-1 Combustion", AIAA Paper No. 1996-2887, *32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1~13 July 1996, Lake Buena Vista, Florida.
- 3) Huang, H., Sobel, D. R., and Spadaccini, L. J., "Endothermic Heat-Sink of Hydrocarbon Fuels for Scramjet Cooling", AIAA Paper No. 2002-3871, *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 7~10 July 2002, Indianapolis, Indiana.
- 4) Edwards, T., "Kerosene" Fuels for Aerospace Propulsion - Composition and Properties", AIAA Paper No. 2002-3874, *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 7~10 July 2002, Indianapolis, Indiana.
- 5) Yu, G., Li, J. G., Zhao, Z., Chang, X. Y., and Sung, C. J., "Investigation of Vaporized Kerosene Injection in a Supersonic Model Combustor", AIAA Paper No. 2003-6938, *12th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies*, 15~19 December 2003, Norfolk, Virginia.
- 6) Yu, G., Fan, X. J., Li, J. G., Yue, L. J., Zhang, X. Y., and Sung, C. J., "Characterization of a Supersonic Model Combustor with Partially-Cracked Kerosene", AIAA Paper No. 2005-3714, *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 10~13 July 2005, Tucson, Arizona.
- 7) Shafer, L. M., Striebich, R. C., Gomach, J., and Edwards, T., "Chemical Class Composition of Commercial Jet Fuels and Other Specialty Kerosene Fuels", AIAA Paper No. 2006-7972, *14th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, 6~9 November 2006, Canberra, Australia.
- 8) Magee, J. W., Bruno, T. J., Friend, D. G., Huber, M. L., Laesecke, A., Lemmon, E. W., McLinden, M. O., Perkins, R. A., Baranski, J., and Widegren, J. A., "Thermophysical Properties Measurements and Models for Rocket Propellant RP-1: Phase I", *NISTIR 6646*, 2007.
- 9) Fan, X. J., Yu, G., Li, J. G., Zhang, X. Y., and Sung, C. J., "Investigation of Vaporized Kerosene Injection and Combustion in a Supersonic Model Combustor", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 22, No. 1, 2006, pp. 103~110.
- 10) Tucker, K. C., "A Flash Vaporization System for Detonation of Hydrocarbon Fuels in a Pulse Detonation Engine", Ph. D Dissertation, Air Force Institute of Technology, 2005.
- 11) Miser, C. L., Helfrich, T. M., Phelps, D. K., and Schauer, F. R., "Supercritical Fuel Density from an Experimental Pulsed Detonation Engine", AIAA Paper No. 2006-1025, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 9~12 January 2006, Reno, Nevada.
- 12) Montgomery, C. J., Cannon, S. M., Mawid, M. A., and Sekar, B., "Reduced Chemical Kinetic Mechanisms for JP-8 Combustion", AIAA Paper No. 2002-0336, *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 14~17 January 2002, Reno, Nevada.
- 13) Burkhardt, H., Sippel, M., Herbertz, A., and Klevanski, J., "Kerosene vs Methane: A Propellant Tradeoff for Reusable Liquid Booster Stages", *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 41, No. 5, 2004, pp. 762~769.
- 14) Annamalai, K., and Puri, I. K., *Advanced Thermodynamics Engineering*, Imported Ed., CRC Press, Boca Raton, 2002, pp. 296~298.
- 15) Poling, B. E., Prausnitz, J. M., and O'Connell, J. P., *The Properties of Gases and Liquids*, 5th Ed., McGraw-Hill, New York, 2001, pp. 2.23~2.26.
- 16) Sengers, J. V., Kayser, R. F., Peters, C. J., and White, H. J., Jr., *Equations of State for Fluids and Fluid Mixtures*, 1st Ed., Part I, IUPAC, Amsterdam, 2000, pp. 76~86.
- 17) Ely, J. F. and Hanley, J. M., "Prediction of Transport Properties. I. Viscosity of Fluids

and Mixtures", *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 20, No. 4, 1981, pp. 323~332.

18) Ely, J. F. and Hanley, J. M., "Prediction of Transport Properties. 2. Thermal Conductivity of Pure Fluids and Mixtures", *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 22, No. 1, 1983, pp. 90~97.

19) Yang, J. C., Vazquez, I., Boyer, C. I., Huber, M. L., and Weber, L., "Measured and

Predicted Thermodynamic Properties of Selected Halon Alternative/Nitrogen Mixtures", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 20, No. 2, 1997, pp. 96~105.

20) Huber, M. L., "NIST Standard Reference Database 4 - NIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixtures Database (SUPERTRAPP) Version 3.2 Users' Guide", *National Institute of Standards and Technology*, January 2007, Gaithersburg, Maryland.