

고온고압 환경에서 케로신 연료의 물성치변화 및 분무특성연구

변용우* · 손 민* · 구자예†

Thermal Properties and Spray Characteristics of Kerosene Fuel at High Temperature and Pressure

Yongwoo Byeon, Min Son and Jaye Koo

Key Words: Kerosene properties(케로신 물성치), Spray characteristics(분무특성)

Abstract

The object of this investigation is to study the thermal properties and spray characteristics of kerosene fuel in high temperature and pressure conditions. In order to investigate the thermal properties and spray characteristics, KIVA3 and SUPERTRAPP have been used at the same time. The thermal properties of kerosene has been calculated in high temperature and pressure condition using SUPERTRAPP. The study of spray characteristics has been conducted at both original properties of KIVA3 and calculated properties. The evaporation rate was increased in proportion to pressure when the calculated properties were used. However, the effect of pressure was not shown in the case of using original properties. So the calculated properties are more effective than original properties in high temperature and high pressure condition

1. 서 론

최근의 고성능 연소시스템에서는 연소실의 압력이 점차 증가됨에 따라서 액체로켓을 비롯한 추진기관에서 사용되는 연료와 산화제가 고온·고압 상태인 초임계조건에 놓이게 된다. 초임계조건에서는 상의 구분이 모호해지며 열역학적 물성치의 값들이 압력에 따라서 달라진다. 따라서 추진제의 증발 및 혼합, 화학반응 등 모든 계산의 기본 데이터로 사용되는 추진제와 작동 가스의 열역학적 물성치에 대한 정확한 예측이 필요하다.

본 연구에서는 액체로켓의 고온·고압 환경에서 케로신 연료의 분무 및 기화특성을 파악하기 위하여 수치해석프로그램인 KIVA3로 유동해석을 진행하였다. 기존의

KIVA3에서는 압력변화에 따른 물성치 변화량이 없으며 사용온도 범위가 케로신의 경우에는 임계온도 700K 이내이기 때문에, 고온·고압 영역에서의 물성치 데이터가 부족하다. 따라서 NIST의 물성치 계산프로그램인 SUPERTRAPP을 사용하여 물성치 계산영역을 확장시켜서 해석하였다.

2. 연구방법

2.1 수치해석프로그램

고온·고압 조건에서 물성치 변화 및 분무 해석을 위해 KIVA3를 해석프로그램으로 사용하였다. 케로신 연료의 임계점은 Table 1에 나타난 것처럼 압력은 21.7 bar이고 온도는 약 700K이다. KIVA3에서는 연료 및 작동가스의 물성치 계산을 프로그램에 저장되어 있는 온도조건에 따른 데이터를 사용한다. 그러나 대부분의 물성치 데이터가 임계온도까지만 존재하며, 압력에 대한 영향을 고려하지 못하기 때문에 압력변화에 따른 물성

(2010년 4월 7일 접수~2010년 5월 24일 심사완료, 2010년 6월 11일 게재확정)

*한국항공대학교 대학원

†교신저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부

E-mail : jykoo@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0116

Table 1 Kerosene properties

KIVA3	
Molecular weight	167.3 kg/kmole
Critical pressure	21.7 bar
Critical temperature	700K
Boiling point	500K
Density	0.819 g/cc
SUPERTRAPP : Density [at 1000K]	
12 bar	0.0213 g/cm ³
20 bar	0.0323 g/cm ³
30 bar	0.0496 g/cm ³
50 bar	0.0861 g/cm ³
100 bar	0.1811 g/cm ³
200 bar	0.318 g/cm ³

치 값의 정확한 예측을 기대할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 초임계 조건에서의 물성치 계산을 위하여 해석프로그램(KIVA3)의 기존 물성치와 NIST의 SUPERTRAPP을 사용하여 계산한 초임계조건에서의 물성치 데이터를 함께 사용한다. 프로그램에서 사용되는 연료의 전체 물성치 중 부분적으로 초임계상태 물성치를 계산하며, 고온·고압 조건에서 케로신연료 물성치 변화와 분무특성 연구를 수행하였다.

2.2 케로신물성치

KIVA3에서 케로신 연료의 밀도 값은 Table 1에 나타난 것과 같이 0.819 g/cc이며, 이는 고정된 값으로 사용된다. 또한 기화된 연료의 밀도는 분열과 증발 과정을 거친 연료액적이 기체 상태로 구분되어질 때, 액적이 존재하는 격자의 질량과 질량분율, 체적 등을 사용하여 연료증기의 밀도 값을 계산한다. 이로 인해 압력변화가 밀도 변화에 영향을 미치지 못하며, 다른 물성치 역시 압력의 영향을 고려하지 못하기 때문에, SUPERTRAPP을 사용하여 초임계 조건에서의 물성치 데이터를 구한다.

Figure 1은 SUPERTRAPP을 사용하여 압력별로 온도에 따른 밀도변화를 계산한 결과이다.

압력이 1 bar 일 때는 케로신 연료의 끓는점인 500K 근처에서 상변화로 인하여 밀도 값이 급격하게 낮아지며 연료의 액체 및 기체상태가 분명하게 구분된다. 압력이 높아지게 되면 끓는점이 점차 높아지고, 초임계 영역인

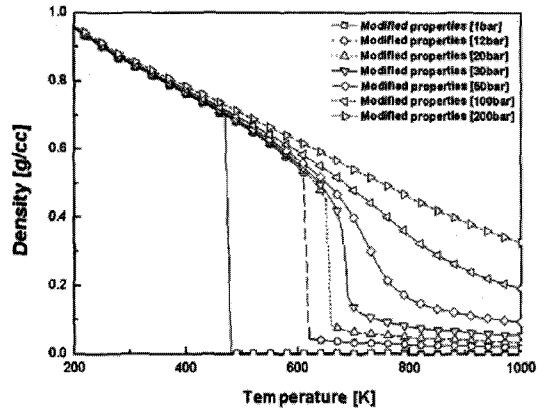


Fig. 1 Variation of density at different pressure

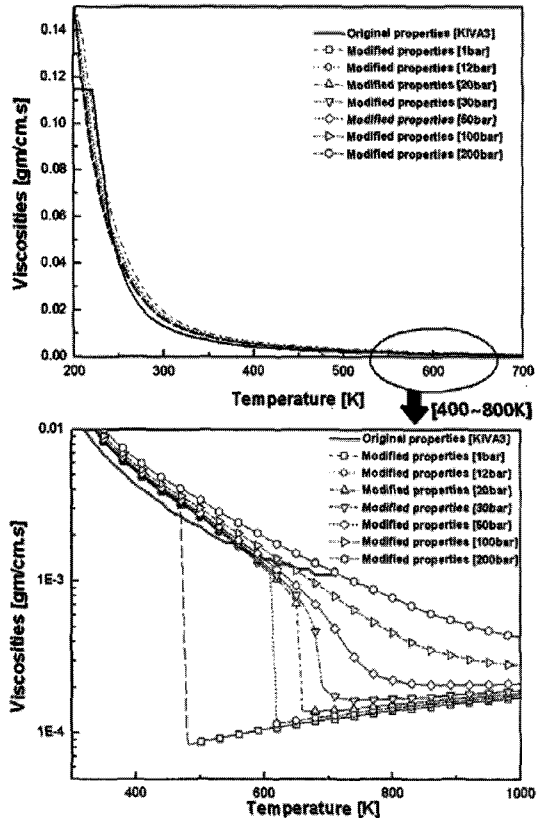


Fig. 2 Variation of viscosities at different pressure

30 bar 이상부터는 밀도변화가 완만해지며 초임계상태의 특징인 상의 구분이 모호해지는 현상이 일어난다. 또한 온도가 증가함에 따라서 압력조건에 따른 밀도 값의 변화가 0에 근사한 값으로 수렴하는 결과가 나타난다.

Figure 2는 물성치 수정 전후의 점성 값을 비교한 그래프이다. 끓는점과 임계온도 근처에서는 연료의 상변

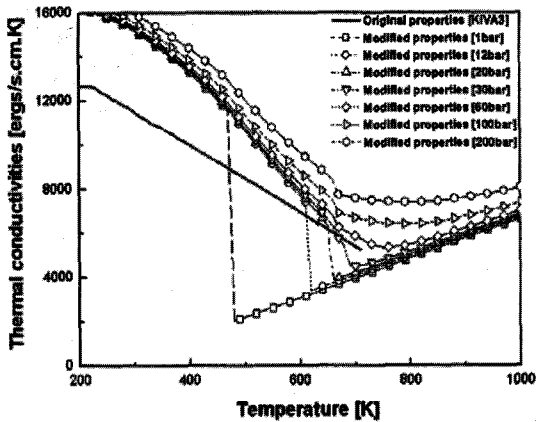


Fig. 3 Variation of thermal conductivities at different pressure

화로 인해 물성치 값이 급격한 변화를 보이지만 저온 및 고온영역에서는 비슷한 값을 나타낸다.

Figure 3은 물성치 수정 전후의 열전도도를 비교한 그래프이다. 기존 물성치는 임계온도 700K까지 데이터가 존재하며, 압력변화에 영향을 받지 않는다. 수정된 물성치는 끓는점과 임계온도 부근에서 연료의 상변화에 의해 압력별로 값의 차이를 나타내며, 다른 물성치와 마찬가지로 고온영역으로 갈수록 한 점으로 수렴하는 경향을 보인다. 즉, 기존 물성치는 압력변화의 영향을 고려하지 못하지만, 수정된 물성치는 압력에 따라서 물성치 값의 차이를 보이며, 특히 천임계 영역에서 뚜렷한 차이를 나타낸다.

KIVA3에서 사용하는 케로신 물성치는 문헌⁽²⁾의 값을 사용하였으며, 연료의 고유 물성치 값은 Table 1에 나타내었고 그 밖의 엔탈피, 점성 등의 물성치는 온도 조건에 따라 사용한다. 또한, SUPERTRAPP을 사용하여 고압 조건에서 케로신 연료의 밀도, 점성, 열전도도의 물성치 값을 계산한다. 계산된 값을 KIVA3의 연료 물성치 데이터에 적용하여 고압조건에서 물성치 데이터의 변화에 따른 분무유동 차이를 연구한다. 프로그램에서 사용하는 밀도 및 점성 등을 포함한 물성치의 계산수식들은 압력변화의 영향을 고려하지 못하기 때문에 압력변화에 따라 유동적으로 계산이 이루어지지 않는다. 따라서 본 연구에서는 초임계조건 물성치에 대한 수정을 진행하며, 고온·고압 조건 물성치 수정방법 순서도를 Fig. 4에 나타냈다.

2.3 계산방법

본 연구에서 온도와 압력을 제외한 계산조건은 동일

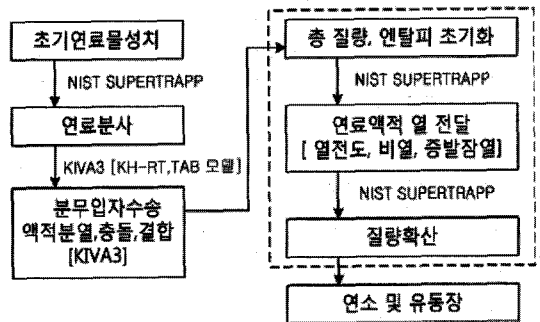


Fig. 4 Schematics for modification of the physical properties at high temperature and pressure conditions by using SUPERTRAPP

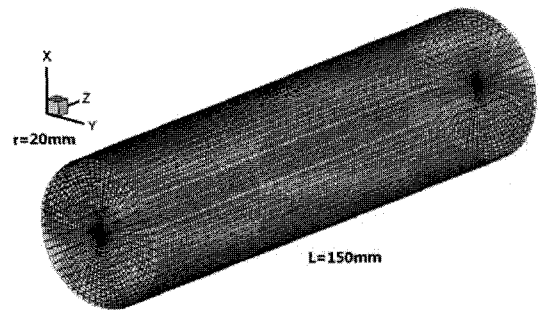


Fig. 5 Computational grid

하게 적용된다. 격자의 형태는 직경 40 mm, 길이 150 mm의 원형 실린더형태이고, Fig. 5에 나타내었다. 격자수는 약 23만개로 구성하였고, z축 방향의 출구조건을 제외하고 나머지 면은 모두 벽면조건이다. 연료의 분무는 입구의 중간지점에서 z축 방향으로 분사되고 10 ms 동안 0.38 g의 연료를 5000개의 입자로 나누어 분사하며, 연료분무 외에 외부 유동의 유입은 없도록 하였다.

연료의 분무속도는 10 m/s, 분무각은 30°로 설정하였고, 초기액적의 직경은 50 μm이며, 연료액적의 온도는 300K로 설정하였다. 연소기 내부에 분무유동 외에 외부 유동의 유입은 없으며, 각 계산마다 연소실출구의 압력을 연소실 내부와 동일하게 적용하여 연소실 내부와 외부의 압력차로 인한 내부유동이 생기지 않게 하였다.

연소실 내부의 고온·고압 조건은 본래 화학반응으로 인해 이루어지지만, 계산에서는 임의로 온도 및 압력 값을 입력하여 연소기 내부의 상태를 고온·고압 상태가 되게 한다. 화학반응을 통해 고온상태가 되면 기화된 연료가 연소되어 기화된 연료의 양을 정확히 알 수 없고, 계산시간이 길어지기 때문에 온도와 압력 변수를 직접 입력하는 방법을 사용하였다.

Table 1에서 나타낸 것처럼 케로신 연료는 임계압력 이 약 21 bar, 임계온도가 700K 이기 때문에 계산조건 을 아임계 상태와 초임계 상태로 구분하기 위해서 압력 조건을 12, 20, 30, 50, 100, 200 bar, 온도조건은 1000K 로 설정하였다. 또한, 단일연료액적을 계산하였던 프로그 램⁽³⁾에 동일한 조건을 적용하여 액적증발에 대한 계 산을 진행하며, 이를 통해 케로신연료의 기화에 대한 경 향성을 비교하였다. 액적증발 계산에 이용된 연료의 데 이터는 SUPERTRAPP을 사용하여 계산한 새로운 물성 치 데이터를 적용하였다.

KIVA3의 기존 물성치는 초임계 조건에서의 계산이 불가능하며 수정된 물성치 또한 실험 데이터와 직접적 인 비교가 어렵기 때문에 디젤연료를 사용한 고압분무 실험데이터를 이용하여 침투깊이를 간접적으로 비교 하였다.

3. 연구결과

계산변수 이외에 계산조건은 모두 동일하게 적용하였 으며, 진행시간에 따라 온도 및 압력 조건과 초임계 물 성치 데이터의 수정 유무에 따라서 계산 결과를 비교하 였다.

시간에 따라 단일액적의 증발로 인한 액적직경변화를 압력 조건별로 Fig. 6에 나타내었다⁽³⁾. y축의 $(d/d_0)^2$ 은 액적의 수명을 나타내며, 16%가 되는 순간에 계산이 종 료된다. 액적증발계산은 주위 유동이 없는 상태에서 액 적주변 압력과 온도 조건에 의해서만 진행되었다. 계산 결과 같은 온도 조건에서 압력이 높은 경우에 연료액적

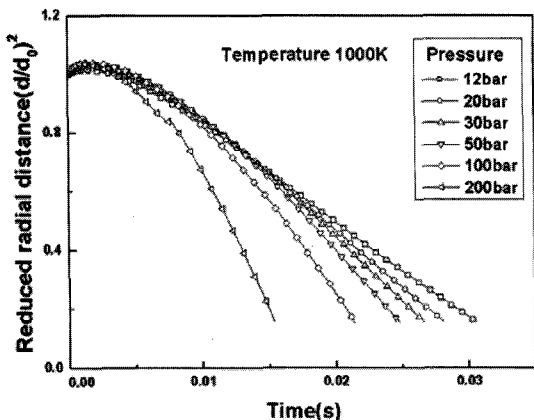


Fig. 6 Variation of droplet diameters versus various pres- sure

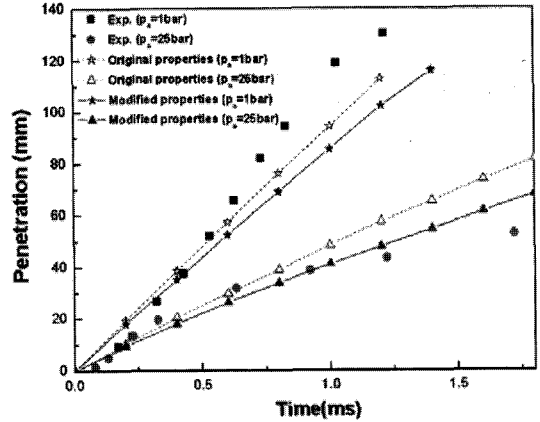


Fig. 7 Comparison of spray penetration with experimental data⁽⁵⁾

의 증발이 더 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

Figure 7은 압력 조건에 따라서 침투깊이를 실험데이 터와 비교한 결과이다. 기존 물성치 데이터의 범위는 임 계점 이하로 제한되어 있고, 수정된 물성치도 측정값과 실질적인 비교가 어렵기 때문에 디젤연료를 사용한 분 무 실험데이터와 간접적으로 비교하였다. 저압조건에서 는 기존 물성치와 수정된 물성치 모두 실험값과 약간의 차이가 있지만 비슷한 경향을 보인다고 할 수 있다. 그 러나 고압조건에서는 결과에 차이가 나타나며, 기존 물 성치의 경우가 더 크게 나타난다. 이 결과가 정확한 검 증의 기준이 될 순 없지만, 고압조건에서 수정된 물성치 를 사용한 경우의 결과가 기존의 물성치보다 더 타당하 다고 볼 수 있다.

기존의 물성치와 SUPERTRAPP을 사용하여 새로 계 산한 물성치 데이터를 적용하여, 증발률(연료증기/공급 된 전체연료량)을 물성치 수정전후로 나누어 Fig. 8에 나타내었다.

기존 물성치를 사용한 경우에는 12 bar에서 50 bar 까 지 압력의 증가에 따라 증발된 연료량이 줄어들다가 100 bar 이상에서는 증가하는 현상이 나타났다. 그 이유 는 앞의 물성치 계산결과를 통해 확인할 수 있는데, 기 존의 물성치 값이 수정된 물성치의 100 bar 이상에서 나 타나는 물성치 변화와 비슷한 경향을 보이기 때문이다. 즉, 고압조건이 될수록 물성치 값의 급격한 변화가 사라 지게 되어 기존의 물성치와 비슷한 변화를 나타낸다. 반 면에 수정된 물성치를 사용한 경우에는 압력증가에 비 례하여 연료의 증발량이 일관성 있게 증가하였다. 이는 수정된 물성치를 사용했을 때, 압력변화에 대해서 천임

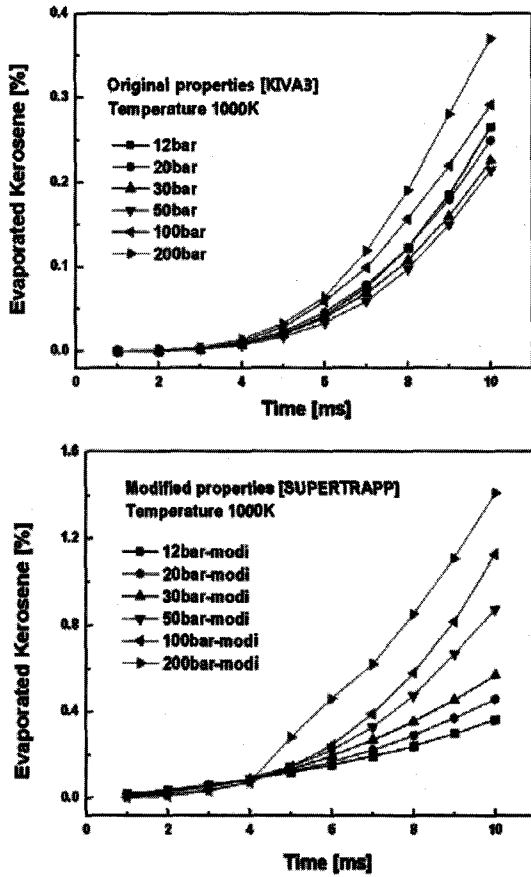


Fig. 8 Variation of kerosene vapor according to property change

계 및 초임계 영역에 걸쳐 열역학적 물성치의 계산이 정확히 진행되었음을 보여준다.

Figure 9는 물성치 수정 전후의 케로신 연료증기 질량 분율 분포와 분무액적분포를 나타낸 결과이다. 두 경우 모두 압력이 증가함에 따라서 액적분포형태의 차이는 있지만 분무액적의 침투길이가 점차 짧아지는 동일한 결과가 나타났다.

연료증기 질량분율 분포는 압력증가에 따라서 증발량이 감소하다가 증가하는 Fig. 8의 결과와 다르게 단순히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 9의 결과가 연료증기의 질량분율 분포이기 때문에 Fig. 8의 연료증기량과는 다르게 나타난 것이다. 그러나 실제로는 압력증가에 따라 연소실 내부의 총 밀도가 증가하기 때문에 Fig. 8의 결과와 같이 100, 200 bar 조건에서 실제 연료증기량은 증가한다. 이를 통해 기존 물성치를 사용한 경우에는 압력증가에 따라서 내부 유동장이 변하기 때문에 침

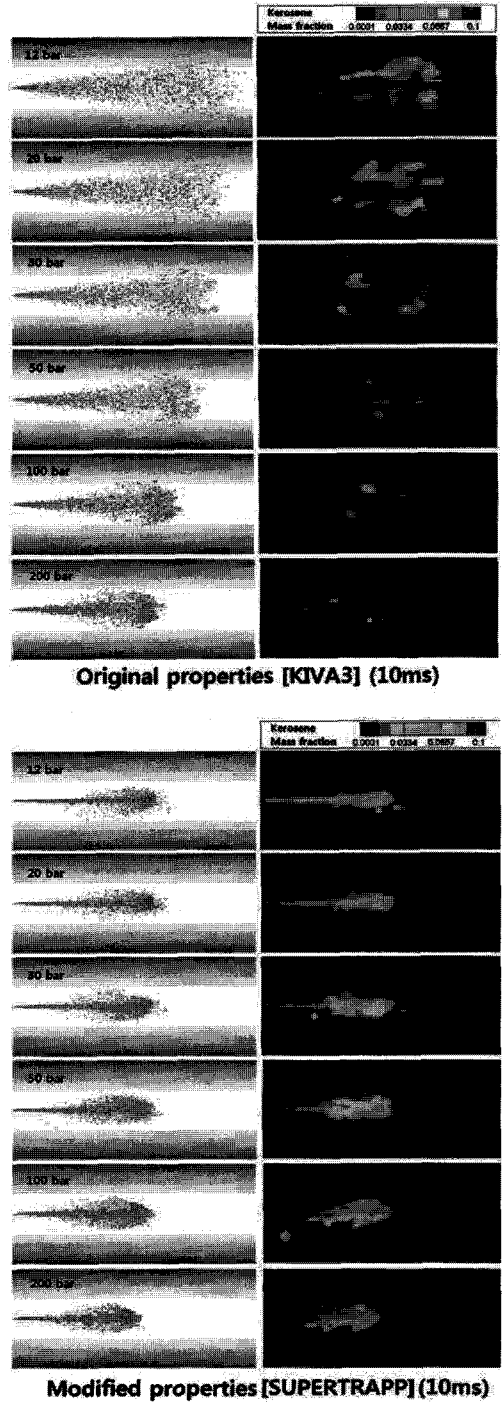


Fig. 9 Spray image and contour of evaporated kerosene

투길이나 액적분포에 있어서는 변화를 나타내만, 질량 분율 분포가 감소하는 것으로 보아 압력의 변화가 열역학적 물성치 계산에는 직접적인 영향을 주지 못하는 것

을 알 수 있다.

반면에 수정된 물성치를 사용한 경우에는 압력변화에 따라서 침투길이가 짧아졌으며, 연료증기의 분포넓이가 줄어들었지만 실제로 분포된 연료증기량이 증가하였음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 고온·고압 조건에서 케로신 연료의 열역학적 물성치 변화에 따른 분무특성 연구를 수행하였다. SUPERTRAPP을 사용하여 고온·고압 영역에서의 열역학적 물성치를 계산하였으며, 계산된 물성치 데이터와 기존의 물성치 데이터로 구분하여 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기존 KIVA3의 물성치 데이터를 사용한 경우에는 고온·고압 영역에서 물성치 값 변화를 올바르게 예측하지 못한다. 따라서 KIVA3에 SUPERTRAPP을 적용하여 물성치의 사용가능한 온도범위를 확장하였다.

2) SUPERTRAPP을 사용하여 수정한 연료 물성치 데이터가 기존의 물성치보다 압력변화에 대해 물성치 값 예측이 타당함을 확인하였다.

3) 수정된 물성치 데이터를 사용한 경우에는 주변 압력의 증가에 따라서 연료액적의 증발량이 증가하였으며, 침투길이가 감소하였다.

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) Ke Su, "Numerical Simulations of Gas turbine combustion", Purdue University, 2002.
- (2) J. W. Rose and J. R. Cooper, John Wiley & Sons, 'Technical data on fuel', New york 1977, p. 275.
- (3) 이경재, 이봉수, 김종현, 구자예, "아임계 및 초임계 탄화수소 연료 액적의 기화 특성 연구", 한국항공우주학회지, 제31권 제7호, 2003, pp. 85~93.
- (4) Tim Edwards, "'Kerosene' Fuels for Aerospace Propulsion - composition and Properties", AIAA 2002-3874, July 2002.
- (5) I. V. Roisman, Lucio Araneo, C. Tropea, "Effect of ambient pressure on penetration of a diesel spray", International Journal of Multiphase Flow 33, 2007, 904-920.