

탄화수소 연료 액적의 연소 특성에 관한 수치해석

이봉수* · 이경재* · 김종현** · 구자예†
 (2003년 4월 14일 접수, 2003년 9월 18일 심사완료)

A Numerical Study of Combustion Characteristics of Hydrocarbon Fuel Droplet

Bong-Su Lee, Kyung-Jae Lee, Jong-Hyun Kim and Ja-Ye Koo

Key Words: Droplet Combustion(액적 연소), Hydrocarbon Fuel(탄화수소 연료), Real Gas Effect(실기체 효과), Droplet Lifetime(액적 수명)

Abstract

Droplet combustion at high ambient pressures is studied numerically by formulating one dimensional combustion model in the mixture of n-heptane fuel and air. The ambient pressure is supercritical conditions. The modified Soave-Redlich-Kwong state equation is used in the evaluation of thermophysical properties to account for the real gas effect on fluid p-v-T properties in high pressure conditions. Non-ideal thermodynamic and transport property at near critical and supercritical conditions are also considered. Several parametric studies are performed by changing ambient pressure and initial droplet diameter. Droplet lifetime decreased with increasing pressure. Surface temperature increased with increasing pressure. Ignition time increased with increasing initial droplet diameter. Temporal or spatial distribution of mass fraction, mass diffusivity, Lewis number, thermal conductivity, and specific heat were presented.

기호설명

a : 상평형 방정식 상수
 A : 액적 표면 면적, 선지수함수 인자
 b : 상평형 방정식 상수
 D : 액적 직경
 D_{ij} : 이성분 확산 계수
 e : 내부 에너지
 h : 엔탈피
 N : 화학종의 수
 \vec{q}_e : 에너지 확산 플럭스
 \vec{q}_i : 질량 확산 플럭스
 ρ : 밀도
 λ : 열전도율

μ : 점성
 R : 액적 반경
 r : 반경방향 좌표
 Σv : 분자 확산 체적
 Ru : 기체 상수
 s : 엔트로피
 t : 시간
 T : 온도
 \vec{v} : 이동 속도
 \vec{v}_s : 격자 이동 속도
 V : 제어 체적
 \vec{v}_i : 화학종 i의 확산 속도
 M : 분자량
 \dot{w}_i : 화학종 i의 생성속도
 X_i : 화학종 i의 몰 분율
 Y_i : 화학종 i의 질량 분율
 Z : 압축성 계수

† 회원 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
 E-mail : jykoo@hau.ac.kr
 TEL : (02)300-0116 FAX : (02)3158-4429

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 경원전문대학 자동차학과

하첨자

- c : 임계 조건
 ij : 화학종
 m : 혼합기
 r : 환산 계수

상첨자

- o : 아임계 상태

1. 서 론

디젤 엔진, 가스터빈 등의 액체 연료를 사용하는 엔진에서 연료 액적의 증발 및 연소는 엔진의 효율과 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 최근의 많은 고성능 연소 시스템에서는 임계점 이상에서 작동이 되고 있다. 따라서 임계점을 넘어서는 고압에서 연소 시스템의 연소 효율이나 공해물질 생성등의 연소 시스템 최적화를 위한 연구가 많이 이루어지고 있고, 실험적 뿐만 아니라 수치 해석적으로도 많은 발전이 있었다.

수치 해석적 방법으로 Spalding⁽¹⁾에 의해 선구적인 연구가 수행된 이후 1963년에는 Wieber⁽²⁾가 준정상상태의 고압환경에서의 탄화수소 액적의 증발에 대해 연구를 하였고, 최근에 Jia와 Gogos⁽³⁾는 질소내에서 n-heptane 연료 액적의 증발에 관한 연구를 수행하였다. Lazar와 Faeth⁽⁴⁾는 실기체 효과등을 고려한 n-octane, n-decane의 고압에서 연소를 연구 하였고 Hsieh 등은⁽⁵⁾ 임계 조건 근처에서 다성분 액적증발에 관해 연구하였다. Shuen 등은⁽⁶⁾ Hsieh 등의 연구에 덧붙여서 액상 연료의 초임계 상태 연소에 관한 연구를 하였다.

초임계 상태같은 고압환경에서는 이상기체 가정이 성립하지 않기 때문에 실기체효과를 고려한 Soave-Redlich-Kwong같은 상태방정식을 사용해야 한다. 임계점 이상이 되면 증발열이 0이되고 액체-기체간의 구분이 모호해져서 단일상으로 해석을 하여야 한다. 그러나 이에 대한 데이터가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 초임계 상태에서의 상의 경계를 임계 온도 지점으로 하여서 초임계 상태를 해석하였다. 그리고 아임계 및 초임계 상태에서 액적 표면 온도의 변화 및 액적수명에 대해서 연구하였고, 초임계 상태에서 여러 물성치들의 유동장에서의 시간에 따른 변화를 연구하였다.

2. 경계 조건 및 지배 방정식

2.1 가정 및 경계조건

2.1.1 가정

유동장에서 주위 가스는 연료 액적의 질량전달이 이루어지는 반경방향을 제외하고 정지상태라 가정한다. 다음은 계산을 위해 기본적으로 설정한 가정이다.

a) 구형 대칭 - 액적의 반경 방향에 대한 1차원으로 해석한다. b) 일정 압력 - 압력은 전 계산영역에서 일정하다. 따라서 모멘텀식을 풀 필요가 없으며 동시에 전체 에너지 계산에는 유동의 작은 속도 때문에 단순히 내부에너지와 같다고 할 수 있다. c) 복사와 점성 소산은 무시한다. d) 중력은 없다.

2.1.2 초기 조건

연료 액적 내에는 가스가 전혀 포함되어 있지 않고 내부유동은 없으며 연료 액적 내부의 온도는 균일하다. 주위 공기의 초기상태는 유동이 없이 정지해 있으며 온도는 균일하고 가스에는 연료성분이 전혀 포함되어 있지 않다.

2.1.3 경계 조건

구형의 대칭이라 가정하였기 때문에 속도는 액적 중심에서 0, 먼 곳에서는 온도 압력 그리고 조성이 일정하다고 할 수 있다. 액적 기화의 상변화는 액적 표면에서 일어나며 표면에서 급격한 열 및 물질전달이 일어난다. 표면을 전후해서 질량, 에너지 및 화학종이 보존된다. 또한 온도, 압력, 화학 포텐셜은 액적 표면에서 평형을 이룬다.

2.2 지배 방정식

압력 변화에 따른 액적의 기화를 수치해석하기 위해 액적 표면의 감소율을 나타낼 수 있도록 액상과 기상 모두에서 비정상적의 질량 보존식, 에너지 보존식, 화학종 보존식을 기술하여야 한다. 다음은 각각 질량, 에너지 그리고 화학종 보존식이다.

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho dV + \int_{A_s(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot d\vec{A} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho e dV + \int_{A_s(t)} \rho e (\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot d\vec{A} & \quad (2) \\ = - \int_{A_s(t)} \vec{p} \cdot d\vec{A} - \int_{A_s(t)} \vec{q}_e \cdot d\vec{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{A_s(t)} \rho Y_i dV + \int_{A_s(t)} \rho Y_i (\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot d\vec{A} & \quad (3) \\ = - \int_{A_s(t)} \vec{q}_i \cdot d\vec{A} + \int_{V(t)} \dot{\omega}_i dV \end{aligned}$$

여기서 액적은 구형의 제어 체적을 갖는다. 에너지 확산 플럭스는 다음과 같다.

$$\vec{q}_e = -\lambda \nabla T - \sum_i^N \vec{q}_i \bar{h}_i \quad (4)$$

질량 확산 플럭스는 다음과 같다.

$$\vec{q}_i = \rho Y_i \vec{v}_i = -\rho D_{im} \nabla Y_i \quad (5)$$

여기서, 열 확산은 무시한다. 각각의 화학종 i 에 대한 유효질량확산계수 D_{im} 는 확산계수와 관련하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$D_{im} = (1 - X_i) / \sum_{j \neq i}^N (x_j / D_{ij}) \quad (6)$$

고압상태에서의 증발을 다루기 위해 실제 기체 효과를 고려한 수정된 Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식을 사용하였다.⁽¹¹⁾

$$P = \frac{\rho R_u T}{(M - b\rho)} + \frac{a\rho}{M} \frac{\rho^2}{(M + b\rho)} \quad (7)$$

열역학적 물성치를 계산하는데는 이상기체성질과 열역학적 비 이상적 성질들을 설명하는 수정항들의 합으로 표현된다.

2.3 전달 물성치

점성 및 열전도도 그리고 확산계수를 계산하는데는 아임계압력에서의 각 화학종들의 계수의 값을 구한 후에 혼합기에 대한 값을 계산하고 초임계압력에서는 고압 효과를 고려하여 수정하는 방법으로 계산을 한다. 점성과 열전도도를 구하기 위해 NIST에서 개발한 SUPERTARPP⁽⁷⁾ 코드를 사용하였다. 이 코드는 온도와 압력효과 모두를 고려하였다. 확산계수의 경우에는 기상과 액상을 구분하여 계산을 수행하였다. 기상에서 임계압력 이하의 질량 확산계수는 Fuller et al.의 식을⁽⁸⁾ 사용하였다.

$$D_{ij} = \frac{10^{-3} T^{1.75} (M_i^{-1} + M_j^{-1})^{0.5}}{P [(\Sigma v)_i^{1/3} + (\Sigma v)_j^{1/3}]^2} \quad (8)$$

기상에서 임계압력 이상의 경우는 Takahashi가 제안한 식으로 확산계수를 얻을 수 있다.^(8,12)

$$\frac{D_{ij} P}{(D_{ij} P)^0} = f(T_r, P_r) \quad (9)$$

여기서 $(D_{ij} P)^0$ 는 1기압에서의 값이며 보통 실험적으로 알 수 있는 값이다. 임의의 고압 P에서 D_{ij} 를 구하기 위해서는 $D_{ij} P$ 의 값을 먼저 구한다. $D_{ij} P$ 는 식 (9)와 같이 환산온도 (T_r)과 환산 압력 (P_r)의 함수이며 이 값은 참고문헌 (12)에 나와 있다. 여기서 T_r 은 T/T_c , P_r 은 P/P_c 이며 또 i 와 j 로 이루어진 혼합기의 T_c 와 P_c 는 다음과 같이 구한다.

$$T_c = x_i T_{c,i} + x_j T_{c,j}, P_c = x_i P_{c,i} + x_j P_{c,j} \quad (10)$$

액상의 질량확산에 대한 이원 확산계수는 Wilke와 Chang의 식을⁽⁸⁾ 사용한다.

$$D_{ij} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(\Phi M_i)^{0.5} T}{\mu_j V_i^{0.6}} \quad (11)$$

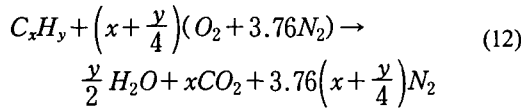
2.3.1 임계점의 처리

주위 조건이 초임계 상태일 때, 액적은 아임계 상태에서 초임계 상태로 천이하게 되고, 이 과정에서 아임계 상태와는 다른 기준으로 초임계 상태에 대한 계산을 수행하여야 한다. 임계상태가 되면, 액상-기상의 구분이 모호하게 되고 하나의 단일 상이되나, 이에 대한 data의 부족으로 임계 물성치에 대한 정확한 수치해석이 어려운 실정이다. 본 연구에서는 증발열이 0이고, 액상, 기상의 조성이 같아질 때, 초임계상태가 발생한 것이라 하고, 경계면에서의 온도를 임계온도로 설정한 후에 새로 계산된 임계온도를 기준으로 물성치를 계산하였다. 액상과 기상을 구분하여 계산하는 확산계수의 계산을 위해 새로운 임계온도를 기준으로 상의 경계를 구분하여서 초임계 상태에 대한 계산을 수행하였다.

2.4 연소 메카니즘

연소 메카니즘은 1단 비가역 화학식(A single-step irreversible chemical scheme)을 적용하

였다.⁽⁹⁾ 연료는 공기와 이론반응 한다고 가정하였다.



각 화학종의 생성속도는 Westbrook 과 Dryer⁽¹⁰⁾에 의해 제안된 1단 총괄 반응 메카니즘을 사용하여 계산 하였다.

$$\begin{aligned} \dot{w}_{fuel} &= -AM_{fuel}\exp(-E_a/R_uT)[fuel]^a[O_2]^b \\ \dot{w}_{O_2} &= \left(x + \frac{y}{4}\right)\left(\frac{M_{O_2}}{M_{fuel}}\right)\dot{w}_{fuel} \\ \dot{w}_{CO_2} &= -x\left(\frac{M_{CO_2}}{M_{fuel}}\right)\dot{w}_{fuel} \\ \dot{w}_{H_2O} &= -\frac{y}{2}\left(\frac{M_{H_2O}}{M_{fuel}}\right)\dot{w}_{fuel} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 연소속도와 가연한계를 예측한 것과 실험간에 가장 좋은 일치율을 얻기 위해 A (선지수 함수 인자)는 $5.1 \times 10^{11} \text{ cm}^3/\text{gmol}\cdot\text{s}$, E_a (활성 에너지)는 30.0 kcal/gmol , a와 b는 각각 0.25, 1.50의 값을 사용한다.⁽⁹⁾ 그리고 $[fuel]$, $[O_2]$ 는 연료와 산화제의 몰농도이다.

실험에서 점화의 시기는 시각적으로 화염이 막 보이기 시작하는 순간이나 혹은 온도가 급격히 변화할 때 등을 점화시작으로 볼 수 있다. 수치적 계산에서는 기체 온도의 시간에 대한 변곡점이나, 혹은 기상에서 한 점이 주위의 온도보다 높아지는 때를 점화가 시작되었다고 간주 할 수 있다. 본 논문에서는 기체상의 한 점이 주위의 온도보다 높아졌을 때, 점화가 시작되었다고 간주하고 이때부터 액상과 기상 경계면의 온도가 급격히 상승하게 된다.

3. 수치 계산

3.1 격자 생성

구형대칭을 가정하였으므로 1차원으로 격자를 생성하고, 액상인 연료와 기상인 액체를 구분하여 계산을 한다. 경계면을 중심으로 액상과 기상으로 나누어 각각 초기에 설정한 수만큼의 격자를 생성한다. 상변화가 급격히 일어나는 액적표면에서 격자밀도를 조밀하게 생성하고 시간에 따라 액적반경이 작아지므로 기화 과정의 전 계산

Table 1 Critical Properties of the Species in the heptane/ air system

Species	M _w (g/mole)	T _c (K)	P _c (MPa)	V _c (cm ³ /mole)
C ₇ H ₁₆	100	540.3	2.74	432.0
N ₂	28	126.2	3.39	89.8
O ₂	31	154.6	5.04	73.4
CO ₂	44	304.1	7.38	93.9
H ₂ O	18	647.3	22.12	57.1

영역에서 액적표면은 기화와 함께 이동하도록 격자를 구성하였다.

3.2 수치적 선형화

기화되는 과정은 시간 스텝에 따른 수치수렴의 제한이 없으므로 내재적 유한체적법을 사용하여 계산한다. 따라서 온도, 압력, 화학포텐셜은 독립변수에 대해서 선형화 되어야 한다.

$$Q = (\rho V, \rho v_r A, \rho e V, \rho Y_i V, V)^T \quad (14)$$

$i = 1, \dots, N-1$

여기서 N은 화학종의 수이고, V는 제어체적, A는 제어표면적, v_r 은 r 방향속도이다. 제어체적 V는 시간에 따라 변하는 이동 경계 문제이므로 변수로 생각한다. 온도, 압력, 질량분율 등등의 모든 변수들은 선형화 방법을 사용하여 식 (14)로부터 얻어지는 항들로 표현된다. 벡터 Q의 변수들의 각각의 변화량은 모든 격자에서 다음과 같이 이산화 할 수 있다.

$$\frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} + F_{i+1/2}^{n+1} - F_{i-1/2}^{n+1} = S^{n+1} \quad (15)$$

여기서

$$\begin{aligned} Q &= [\rho V, \rho v_r A, \rho e V, \rho Y_i V, V]^T \\ F &= [\rho(v - v_s)A, 0, \rho e(v - v_s)A + pvA, \rho Y_i(v - v_s)A, (v - v_s)A]^T \\ S &= [0, pA, -q_{eA}, -q_iA + \dot{w}_i V, 0]^T \end{aligned} \quad (16)$$

4. 결과 및 고찰

계산에 사용된 탄화수소 연료액적은 n-heptane 이고 주위 공기는 산소(21%)와 질소(79%)의 혼합기로 가정하였다. 계산은 액적의 초기 온도를 300K로 하고 주위 온도는 1000K를 조건으로 하여 계산하였다. 액적의 직경이 초기 직경의 10%

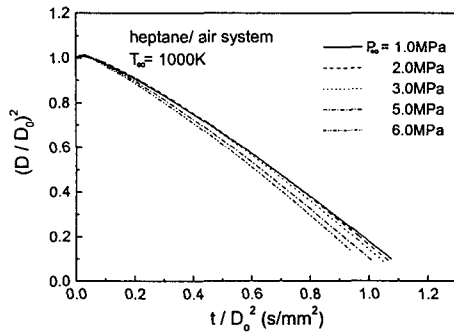


Fig. 1 Temporal histories of droplet diameter for heptane/air system at different ambient pressures

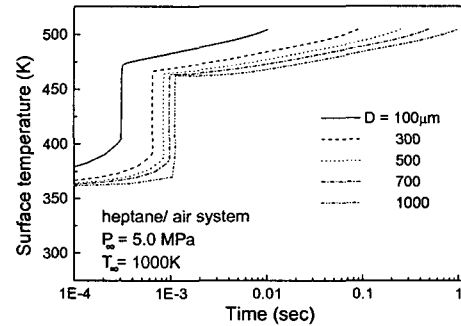


Fig. 3 Temporal variation of droplet surface temperature for heptane/air system at different initial diameters

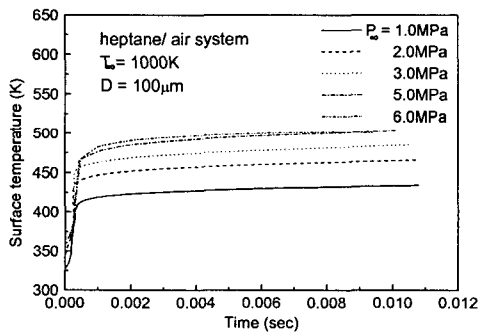


Fig. 2 Temporal variation of droplet surface temperature for heptane/air system at different ambient pressures

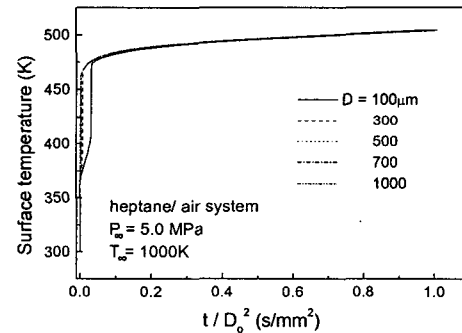


Fig. 4 Temporal variation of droplet surface temperature for heptane/air system at different initial diameters

일 때를 멈춤 조건으로 하였다. 액적 직경이 초기 직경의 10% 일 때의 액적의 질량은 초기 질량의 약 0.1% 정도이고 본 연구에서는 이 때까지의 시간을 액적 수명이라 정하였다. Table 1은 계산에 사용된 화학종들의 임계 물성치이다.

그림에 보여지는 환산반경(Reduced radial distance)은 r/R_0 로 r 은 각 격자들의 중심반경이고, R_0 는 초기 액적 반경을 나타낸다.

Fig. 1은 압력 변화에 따른 액적 직경의 변화를 시간에 따라 나타내었고 액적의 수명에 대한 것으로도 이해할 수 있다. 압력이 커질수록 액적의 수명이 빨리 줄어드는 것을 알 수 있다. 계산 초기에 t/D_0^2 이 0.019까지는 액적 반경이 약간 증가하는데 이는 점화가 일어나기 전에 연료액적의

증발과정에서 증발량 보다 체적 팽창량이 많기 때문이다. 이 후에는 직경의 재급이 시간에 비례함을 알 수 있다.

Fig. 2는 아임계 압력에서부터 초임계 압력까지 압력의 변화를 주었을 때 액적 표면온도의 값을 나타내었다. 온도의 상승을 보면 표면에서 급격하게 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 연료 액적이 점화되었기 때문이다. 표면 온도는 점화 후에 급격히 상승하여 어느 일정한 온도에 도달하는데 이때까지의 시간을 점화 시간이라 한다. 압력이 증가할수록 점화 시간이 증가하고, 액적 표면의 온도도 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 압력이 높을수록 밀도가 커지기 때문이다. 밀도

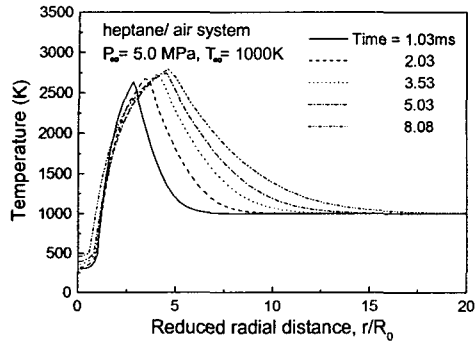


Fig. 5 Radial profiles of temperature for heptane/air system at different times

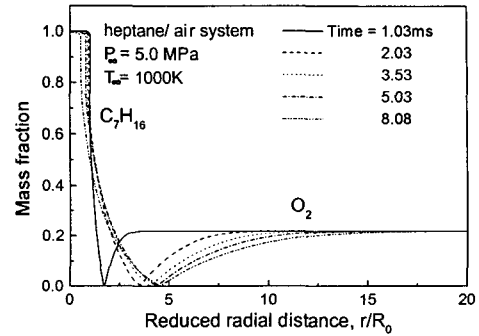


Fig. 7 Radial profiles of mass fraction for heptane and oxygen at different times

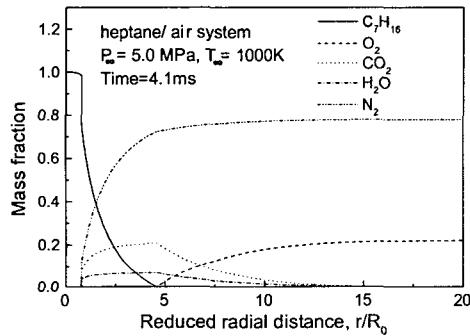


Fig. 6 Radial profiles of mass fraction for species in heptane/air system at 4.1ms

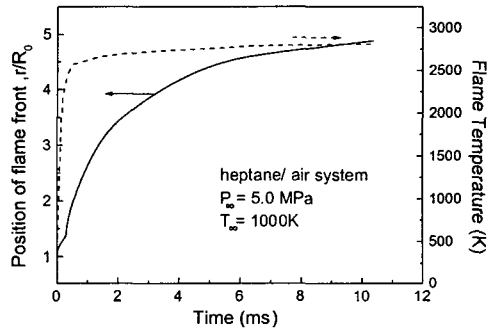


Fig. 8 Temporal profiles of flame position and temperature for heptane/air system

의 증가로 연소반응을 일으키는 연료와 산소의 물농도가 커지므로 반응율이 증가하기 때문에 화염의 온도가 증가하고 따라서 표면의 온도도 증가하게 된다.

Fig. 3은 액적의 직경을 $100\ \mu\text{m}$ 에서부터 $1000\ \mu\text{m}$ 까지 변화시켜 가면서 표면온도의 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. 액적의 직경이 커질수록 점화시간이 길어지는 것을 알 수 있다. 하지만 증발에서 D2법칙처럼 초기직경의 제곱에 비례하여 점화시간이 길어지는 것은 아니다. Fig. 4에서 t/D_0^2 에 대한 표면온도의 변화를 보면 점화는 D2의 법칙을 따르지 않는 것을 알 수 있다. 직경에 대해서 무차원화 하였기 때문에 초기 직경의 크기에 관계없이 표면온도는 하나의 값을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 시간변화에 따른 온도의 변화를 나타내었다. 가장 높은 온도점이 이론 혼합비가 발생하는 지점이다. 시간이 지날수록 화염이 바깥쪽으로 전파되어 나가고, 액적의 내부로도 열전달이 발생하여 온도가 초기 300K에서 8.08ms일 때는 약 500K까지 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 점화가 일어난 후에 액적 주위의 높은 화염온도로 인하여 액적 표면도 온도가 높아지게 되고 액적 표면의 온도가 높아질수록 증발 잠열의 감소로 더 많은 열량이 액적자체의 온도를 높이는 데 쓰이기 때문이다. 여기서 액적 직경은 $100\ \mu\text{m}$ 이고 다양한 액적의 크기에도 같은 값을 갖는다.

Fig. 6은 특정 시간에 각각의 화학종에 대한 질량 분율을 나타내었다. 이론 공연비가 되는 곳에서 연료와 산소는 완전히 소비가 되어 질량 분

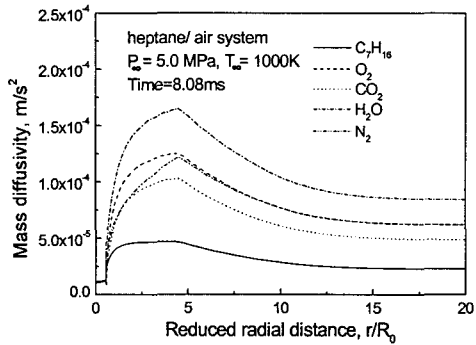


Fig. 9 Radial profiles of mass diffusivity for species in heptane/air system at 8.08ms

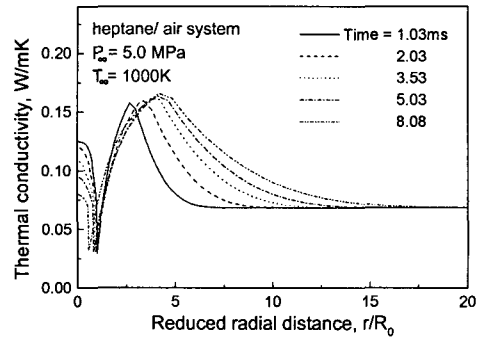


Fig. 11 Radial profiles of thermal conductivity for heptane/air system at different times

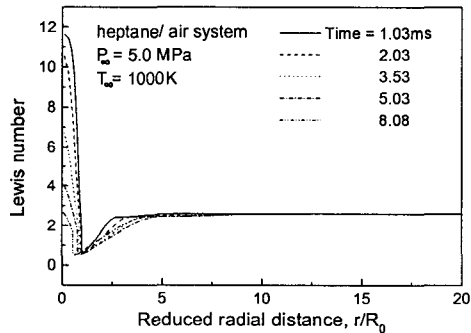


Fig. 10 Radial profiles of Lewis number for heptane/air system at different times

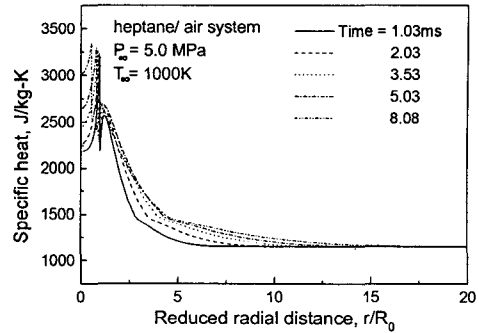


Fig. 12 Radial profiles of specific heat for heptane/air system at different times

율이 0인 반면에 생성물들의 질량 분율은 최고 값을 갖는다. 그리고 연료와 산소의 질량 분율이 0 인 지점이 Fig. 5에서 최고 온도 지점이고 화염면이라 할 수 있다. Fig. 7은 연료와 산소의 질량 분율이 시간에 따라 변화하는 것을 나타내었다. 화염이 반경방향으로 이동하는 것을 알 수 있고, 연료의 질량 분율을 통해서 액적의 반경이 시간에 따라 줄어들고 있음을 알 수 있다. 화염의 반경방향의 이동을 보다 쉽게 보기 위해 Fig. 8에서 시간에 따른 화염면의 위치를 환산 반경으로 나타내었고, 그 때의 온도를 나타내었다.

Fig. 9은 각 화학종의 환산 반경에 대한 질량 확산계수를 나타내었다. 질량 확산계수는 온도에 비례하고 분자량에 반비례한다. 따라서 온도가 낮을수록 그리고 분자량이 높을수록 확산성

은 낮아지게 된다.

주위 공기의 용해는 액체 연료의 질량 확산을 약간 증가시킬 것이다. 경계면에서 확산성의 강하 후에 반응 영역에서는 연소로 인해 발생한 높은 온도 때문에 순간적으로 질량 확산이 증가함을 알 수 있다. 질량확산 계수의 온도에 비례하는 특성 때문에 반경방향의 분포를 보면 Fig. 5의 온도분포와 매우 흡사한 것을 알 수 있다. 즉 온도가 높은 곳에서는 확산계수 값 또한 높고, 온도가 작은 곳에서는 낮은 확산계수 값을 보인다.

Fig. 10은 열확산 대 질량확산의 비율을 나타내는 루이스 수를 나타내었다. 고압에서 액적 연소는 확산에 의해 제어된다. Fig. 10에서 최소값을 갖는 지점이 액상/기상 경계면이고, 액적의 크기가 시간에 따라 줄어들고 있음을 보여주고 있

다. 액상/기상 경계면 근처의 루이스 수의 강하는 질소의 용해와 액상/기상의 상변화 때문에 일어난 것이다. 질소의 용해는 질량 확산이 증가하는 원인이 되고, 액상/기상 경계면에서는 많은 열 에너지가 상변화에 쓰이기 때문에 열확산 값이 급격히 감소하게 된다. 액적내부에서는 시간이 흐를수록 액적 중심의 온도 증가 때문에 액적 중심에서의 열확산 값이 감소하게 되고, 경계면 이후에서는 상변화 이후에 기상의 높은 온도로 인하여 열확산 값이 다시 증가하게 된다.

Fig. 11는 시간변화에 따른 열전도율의 변화를 보여준다. 일반적으로 액상연료는 기상연료보다 열전도율이 높으며 기상 성분이 액상에 용해되면 액상의 열전도율이 변하게 된다. 액상/기상경계에서 질소의 용해와 상변화는 열전도율을 급격하게 감소시킨다. 열전도율은 온도에 비례하므로 온도가 급상승하는 반응 영역에서 열전도율은 급격히 상승하게 된다. 액적 중심에서의 열전도율은 시간에 따라 감소하게 되는데 이는 액적이 작아지면서 더 많이 용해된 질소성분이 액적의 중심에 도달 할 수 있기 때문이다.

Fig. 12은 혼합물의 비열을 나타내었다. 열 전도율과 마찬가지로 공기 중 질소성분의 용해는 액상에서 비열의 급격한 상승을 일으키고, 액상/기상 간의 상변화는 경계면에서 급격한 강하의 원인이 된다.

4. 결 론

아임계 및 초임계 상태에서 1단 총괄 연소반응을 사용하여 n-heptane 연료액적의 연소에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주위 압력 및 직경의 크기를 변화시켜 가면서 액적 수명과, 표면온도의 변화 등을 관찰하였다. 주위 압력이 높을수록 연료액적의 수명은 감소하였고, 표면 온도는 증가하였다. 압력 증가 시에는 연료와 산소의 밀도 증가로 인하여 점화 시간이 증가하였다. 초기 액적 직경이 클수록 점화 시간이 길어지고, 액적 수명도 증가하였다.

(2) 주위 온도를 1000K, 압력을 5MPa로 하여, 초임계 상태에 대한 여러 물성치들의 반경방향 발달을 시간에 대해 나타내었다. 액상/기상간의 경계면에서는 상변화에 많은 에너지가 사용되므로 상경계면에서는 상대적으로 열 전도율, 루이

스 수, 비열이 급격히 감소하였다. 시간이 흐를수록 주위 기체가 액적 내부로 용해되는 양이 증가하므로 액적내부의 열 전도율은 감소하였다. 질량확산 계수의 반경방향분포는 유동장의 온도분포와 경향성이 일치하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지역대학우수과학자 지원연구 R05-2002-000-00171-0 지원으로 수행된 연구결과의 일부이며, 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Spalding, D. B., 1959, "Theory of Particle Combustion at high pressure," *ARS Journal*, Vol. 29, pp. 828~835.
- (2) Wieber, P. R., 1963, "Calculated Temperature Histories of Vaporizing Droplets to the Critical Point," *AIAA Journal*, Vol. 1, pp. 1815~1817.
- (3) Jia, H. and Gogos, G., 1993, "High Pressure Droplet Vaporization; Effects of Liquid-Phase Gas Solubility," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 4419~4431.
- (4) Lazar, R. S, and Faeth, G. M., 1971, "Bipropellant Droplet Combustion in the Vicinity of the Critical Point," *Proceedings of Thirteenth Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA*, pp. 801~811.
- (5) Hsieh, K. C., Shuen, J. S., and Yang, V., 1991, "Droplet Vaporization in High Pressures Environments, I: Near-Critical Conditions," *Combustion Science and Technology*, Vol. 97, pp. 111~132.
- (6) Shuen, J. S., Yang, V., and Hsiao, G. C., 1992, "Combustion of Liquid-Fuel Droplets in Supercritical Conditions," *Combustion and Flame*, Vol. 89, pp. 299~319.
- (7) Ely, J. F. and Huber, M. L., 1992, NIST Thermodynamical Properties of Hydrocarbon Mixtures Database (SUPERTRAPP) National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program.

- (8) Polling, B. E., Prausnitz, J. M., and O'Connell, J. P., 2001, *The Properties of Gases and Liquids*, 5th edition, MacGraw-Hill.
- (9) Stephen R. Turns., 1996, *An Introduction to Combustion*, MacGraw Hill, Singapore, International editions, pp. 135~137.
- (10) Westbrook, C. K., and Dryer. F. L., 1981, "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon fuels in Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 27, pp. 31~43.
- (11) Graboski, M. S., and Daubert, T. E., 1978, "A Modified Soave Equation of State for Phase Equilibrium Calculation, 1. hydrocarbon Systems," *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 17, No. 4, pp. 443~448.
- (12) Takahashi, S., 1974, "Preparation of a Generalized chart for the Diffusion Coefficients of Gases at High Pressures," *journal of Chemical Engineering of japan*, Vol. 7, No. 6, pp. 417~420.