

<論 文>

공기/연료분무 혼합기의 점화 및 화염전파 해석

김용모* · 김성준**

(1995년 2월 9일 접수)

Numerical Analysis of Ignition and Flame Propagation in the Air/Fuel Spray Mixture

Yong-Mo Kim and Sung-Jun Kim

Key Words : Ignition(점화), Flame Propagation(화염전파), Fuel Sprays(연료분무), Ignition Energy(점화에너지), Numerical Model(수치모델)

Abstract

An Eulerian-Lagrangian method is employed to simulate the ignition process and the flame propagation through the air/fuel spray mixture in a closed constant-volume combustor. The spray mixture is ignited by providing a hot wall at the end of the combustor or by firing the electric spark. The investigated parameters involve the initial droplet size, overall equivalence ratio, initial fuel vapor concentration, distance between the hot wall and the nearest droplet, and the ignition energy. Numerical results clearly show the existence of the optimum spray condition for minimizing the ignition energy and the ignition delay time as well as the critical dependence of ignition upon the distance of the heat source to the nearest droplet.

1. 서 론

연료 직접분사식 가솔린엔진, 디젤엔진, 그리고 가스터빈 엔진을 비롯한 연소기에서 연료 분무 혼합기의 점화 및 화염전파 현상은 중요한 물리적 과정이다. 이러한 실제적인 중요성과 연료분무의 점화와 화염전파 현상에 대한 이해의 필요성 때문에 점화에너지를 최소화시키는 최적 분무조건, 최대화염속도, 희박화염한계의 확장, 공해배출가스의 저감, 그리고 액체연료 연소기에서의 연소 불안정에 관한 연구가 최근에 활발히 진행되고 있다.

연료분무의 점화와 정상 연소파의 전파에 대해서는 수많은 실험과 이론적 연구들이 수행되어 왔

다. Ballal과 Lefebvre⁽¹⁾는 점화지연과 최소점화에너지를 예측하기 위해 단순화된 모델을 개발하였으며 Peter와 Mellor⁽²⁾는 특성시간 해석법을 이용하여 가스터빈 연소기에서 정지된 연료분무의 점화과정을 해석할 수 있는 실험공식을 제안하였다. 하지만 저속의 헵탄과 메탄올 분무에 대한 Danis의 최근의 실험결과⁽³⁾는 이 공식들이 특히 천이연소영역에서 작은 크기의 액적과 희박한 당량비에 대해서는 최소점화에너지를 과소예측함을 보여주었다. Chan과 Polymeropoulos⁽⁴⁾는 층류 tetralin 분무혼합기의 스파크 점화에 관한 실험적 연구에서 점화에너지를 최소화하는 액적크기의 최적조건이 존재함을 보여 주었다. Aggarwal과 Sirignano^(5,6)는 밀폐된 공간에서의 연료분무의 점화와 화염전파를 수치적으로 해석하였으며 Sommer⁽⁷⁾는 Aggarwal과 Sirignano⁽⁵⁾의 수치해석결과를 실험를 통하여 검증

*정회원, 한양대학교 기계공학과

**한양대학교 대학원

한 결과, 액적으로 흡수되는 복사열전달을 고려하지 않았기 때문에 수치결과가 실험치에 비해서 점화지연시간을 과도하게 예측하는 것으로 나타났다. Gutheil⁽⁸⁾은 상세한 화학반응모델을 사용하여 희박한 메탄올 분무의 점화를 수치적으로 해석하여 OH 이온, CO를 포함한 중간 화학종들의 형성과 농도분포에 대한 상세한 정보를 제공하였다. 본 연구에서는 연료분무 혼합기의 고온벽면의 열전달에 의한 점화와 스파크 점화에 의한 화염전파를 수치적으로 해석하였으며 수치결과를 이용하여 액적의 크기, 당량비, 그밖에 다른 매개변수들이 최소점화지연시간과 최소점화에너지에 미치는 영향을 분석하였다.

수치계산은 초기 연료분무조건, 당량비, 초기혼합기의 온도, 그리고 초기연료증기의 질량분율 등을 포함한 다양한 연소기의 조건에 대하여 수행되었다. 본 연구의 다상유동에 대한 수학적인 모델은 Eulerian-Lagrangian 방식에 기반을 두고 있으며 모든 마하수 유동영역의 비정상 다상 연소유동 해석에 적용할 수 있는 개선된 PISO 알고리즘^(9,10)을 사용하였다. 수치안정성과 정확성에 큰 영향을 미치는 화학반응 생성항은 유체역학적 연산자와 화학반응 연산자가 동일한 예측 및 복수교정 수치절차 내에서 처리되게 하여 두 연산자간에 강한 수치적 결합을 갖게 하였다.

2. 물리 및 수치해석 모델

다상 연소유동에 대한 Eulerian-Lagrangian 모델은, 기체유동장에 대한 보존방정식은 Eulerian 좌표계에서 표현되고 연료액적의 운동방정식은 Lagrangian 좌표계에서 표현된다. 기상과 액상간의 수학적 결합은 이상간의 질량, 운동량, 에너지 변화율을 나타내는 상호작용 생성항으로 나타난다.

2.1 기상보존방정식

일차원 비정상 다상 연소유동에서 기상의 유동장은 질량, 운동량, 에너지 그리고 화학종에 관한 보존방정식에 의해 지배된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = S^m \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + P - \mu \frac{\partial u}{\partial x}) = S^u \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u e + P u - k \frac{\partial T}{\partial x}) \\ = S^e + H_R W_f R_f + Q' \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_f)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_f - D \frac{\partial Y_f}{\partial x}) = S^m - W_f R_f \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_o)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_o - D \frac{\partial Y_o}{\partial x}) = -s W_o R_f \quad (5)$$

여기서,

$$S^m = \sum_k n_k m_k / dV \quad (6)$$

$$S^u = \sum_k (n_k m_k U_k - \frac{4}{3} \pi \rho_k r_k^3 n_k \frac{dU_k}{dt}) / dV \quad (7)$$

$$S^e = \sum_k n_k m_k (C_{p,f}(T_f - T_{ref}) - H_{v,eff}) / dV \quad (8)$$

여기서, u 는 속도, p 는 압력, ρ 는 밀도, e 는 전 에너지, Y_f 와 Y_o 는 연료와 산소의 질량분율, H_R 은 반응열, Q' 는 단위시간 단위체적당 전기점화에너지, $H_{v,eff}$ 는 유효증발의 잠열, s 는 화학당량계수이다. 질량보존방정식의 S^m 은 연료액적의 증발로 인한 질량생성항이고 운동량 및 에너지 보존방정식의 S^u 와 S^e 는 각각 두 상간의 상호작용 생성항이다. dV 는 계산요소체적이고 n_k 와 m_k 는 각각 액적parcel의 숫자와 연료액적 parcel의 증발률이다. 화학반응물 R_f 는 Arrhenius 반응식⁽¹¹⁾에 의하여 결정된다.

$$R_f = A \left(\frac{\rho Y_f}{W_f} \right)^a \left(\frac{\rho Y_o}{W} \right)^b e^{-E/RT} \quad (9)$$

여기서, W_f 와 W_o 는 연료와 산소의 분자량이고 n -decane 연료에 대하여 활성화에너지, E 는 30000 cal/mole, A 는 mole-cm³-sec 단위에서 3.2×10^{11} 이고, a 와 b 는 각각 0.25와 1.5이다.

2.2 액상운동방정식

연료액적의 운동방정식은 Lagrangian 좌표계에서 액적추적법에 의해 처리되며 각 계산 Parcel내의 액적들은 동일한 위치, 속도, 크기, 그리고 온도를 갖는다. 액적증발률은 Frossling 관계식⁽¹²⁾에 의해 결정되고 액적의 온도는 빠른 혼합에 의하여 액적내부의 온도가 균일하다고 가정한 무한전도모델⁽¹³⁾과 액적내부의 유동을 무시하고 열전도의 영향만을 고려한 전도한계모델⁽¹³⁾에 의해 계산하였다. 이 액적가열모델은 가스필름영역에서 준정상상태로 가정하였으나 증발시 Lewis수와 Prandtl수가 크게 변하므로 $Le=1$ 과 $Pr=1$ 의 가정은 배제하였

다. Clift 등⁽¹⁴⁾에 의해 제안된 관계식에 의해 대류의 영향을 고려하였고 가스필름 두께에 따른 교정식을 사용하여 기체유동과 액적표면사이의 열전달 및 질량전달에 미치는 스테판유동의 영향을 고려하였다. 연료액적 수송방정식과 관련된 중요가정 및 상세한 수식은 참고문헌⁽¹³⁾에 잘 정리되어 있다. 액적증발계산의 정확성에 많은 영향을 미치는 가스 필름에서의 평균 물리적 상태치는 Hubbard 등⁽¹⁵⁾의 계산결과에 따라 1/3법칙을 사용하여 계산하였다. 온도 혹은 압력에 따라 변하는 열화학적 상태치들은 JANAF data bank⁽¹⁶⁾로부터 추정계산하였다.

2.3 수치절차

Eulerian 좌표계에서 기상 보존방정식들은 분리오차(splitting error)를 줄일 수 있는 개선된 PISO 알고리즘^(9,10)에 의한 압력기준 유동해석법에 의해 차분한다. 밀도, 온도 그리고 질량분율에 있어서의 급격하고 큰 변화를 반영하기 위해 화학종 질량분율과 에너지의 보존방정식은 속도-압력-밀도장의 결합을 다루기 위해 예측/복수교정 계산절차내에서 계산하였고, 비정상계산시 반복계산을 피하기 위해 교정계산 후 계수행렬을 다시 계산하였다. 그러므로 본 연구의 수치모델⁽¹⁰⁾은 모든 마하수의 비정상 화학반응 유동의 해석에서 반복계산을 필요로 하지 않는다. 수치 안정성과 정확성에 큰 영향을 미치는 화학반응 생성항은 유체역학적 연산자와 화학반응 연산자가 동일한 예측 및 복수교정 수치절차내에서 처리되게 하여 두 연산자간에 강한 수치적 결합을 갖게 하였다. 본 연구의 다상유동의 비정상 계산절차는 액상과 기상간의 전체적인 반복계산이 요구되는 PSIC해법⁽¹⁷⁾과 다르며 Lagrangian 좌표계에서 수식화된 액적운동방정식은 기상방정식과 동일한 예측/교정계산 절차내에서 계산되며 액적의 상미분 방정식들은 시간에 대한 2차 정확도를 갖는 explicit Runge-Kutta법을 사용하여 적분하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 고온벽면에 의한 연료분무의 점화과 화염전파

Fig. 1은 초기온도가 310 K인 정지된 n-decane 액적과 공기의 혼합기가 온도(T_w)가 1500 K인 고온벽면으로부터 열전달을 통해 점화가 되는 밀폐된

정적 연소기를 나타낸다. 본 연구에서는 액적의 크기에 관계없이 일정한 간격으로 배열시킨 경우⁽¹⁸⁾와는 달리 연료의 질량과 액적들의 전 표면적을 일정하게 분포시키기 위해 액적간의 거리(S)를 액적의 수에 반비례하도록 하였으며 점화시기는 벽면으로부터의 열유속이 0이 될 때로 정의하였다. Fig. 1에서 S_w 는 고온벽면과 가장 인접한 연료액적간의 거리를 나타내며 연료분무혼합기에서 평균 당량비(ϕ)는 다음 식으로 결정된다.

$$\phi = \frac{(m_i + Y_{f,i}\rho L)}{\left(\frac{W_o}{W_{air}}\right)\rho L(1 - Y_{f,i})} \left(\rho \frac{W_o}{W_f}\right) \quad (10)$$

여기서, ρ 는 초기혼합기의 밀도, L 은 연소기의 길이, ν 는 산소와 연료의 몰당량비, m_i 은 액체연료 질량, $Y_{f,i}$ 는 초기연료증기의 질량분율, W_{air} 는 공기의 분자량을 나타낸다.

Fig. 2는 고온 벽면근처에서의 연료와 산소의 질량분율과, 온도분포를 보여준다. 벽면으로부터의 열전달로 기체의 온도가 증가하여 액적이 증발하여 증기화된 연료가 공기와 혼합되어 화학반응이 일어나고 반응속도가 급격히 증가한다. 액적근방에 연료증기의 질량분율이 국소적으로 최대값을 나타내며, 특히 점화초기에 큰 증발율을 가지는 작은 직경의 액적의 경우가 이러한 경향이 현저하게 나타남을 알 수 있다. Fig. 3은 고온벽면으로부터 가장 근접하게 위치한 연료액적의 위치(S_w)와 액적의 초기 크기에 따른 반경변화와 액적의 위치를 나타낸다. 액적의 증발과 가열에 의해 기체가 팽창하므로 액적이 벽면으로부터 멀어지고, 액적의 반경이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 작은 액적이 빨리 가열되므로 점화지연기간동안 작은 액적이 큰 액적보다 이 변화가 현저함을 알 수 있고, 점화열원으로부터 가장 가까이 위치한 첫번째 액적이 다른 액적보다 변화가 뚜렷하므로 이 액적이 점화과정 중에 결정적인 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

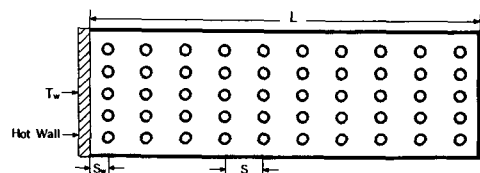


Fig. 1 Fuel spray combustor with a hot isothermal wall

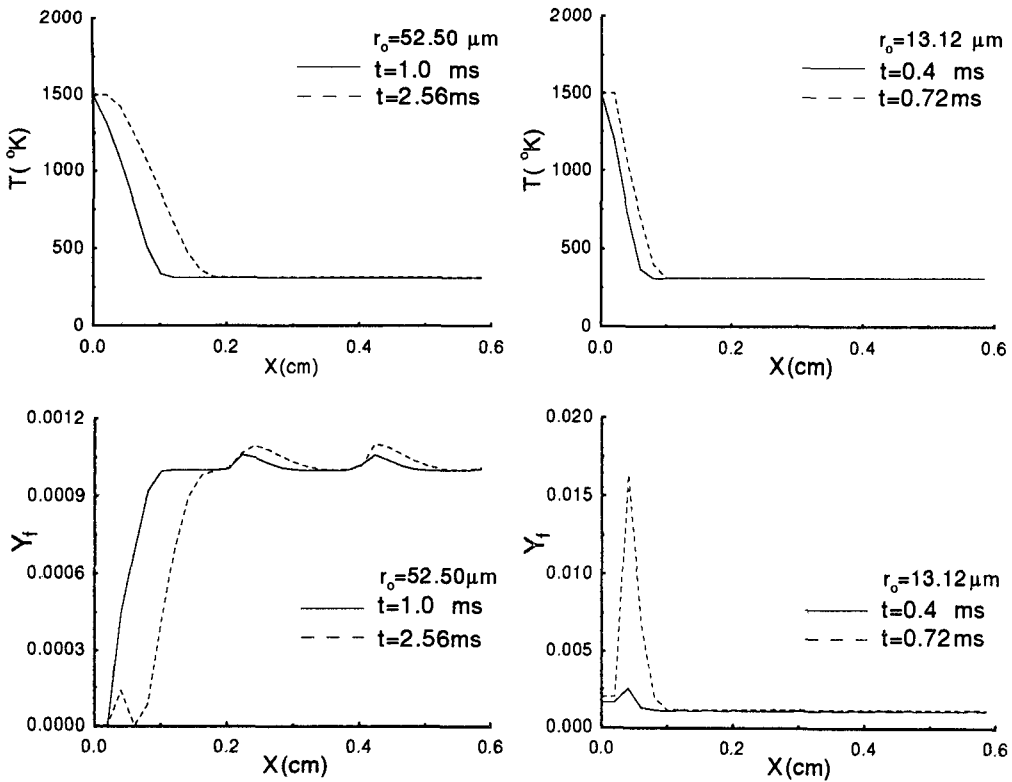


Fig. 2 Distribution of temperature and fuel vapor mass fraction

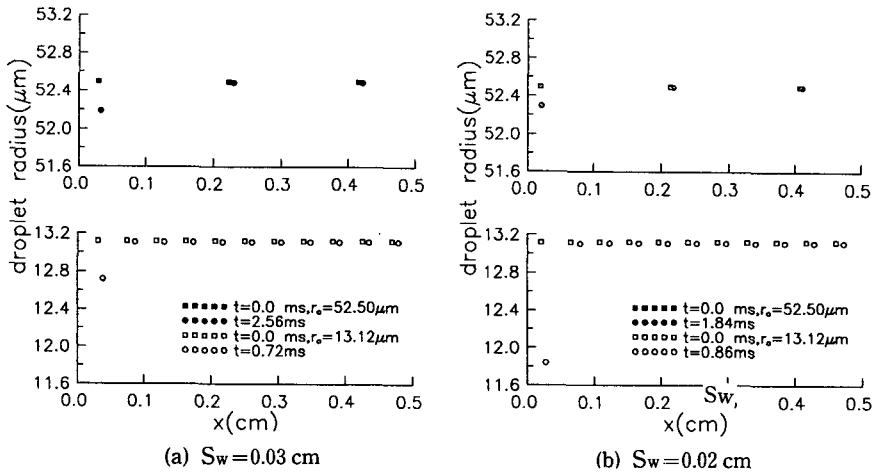


Fig. 3 Variation of droplet size and location with time

Fig. 4는 두 개의 액적가열모델, 즉 무한전도모델과 전도한계모델을 사용하여 크기가 다른 액적에 대해서 당량비에 따른 점화지연시간을 보여주고 있다. 수치해석결과에서 보는 바와같이 점화지연시간

이 최소로 되는 최적의 당량비가 존재하며 특히 직경이 상대적으로 작은 액적의 경우에 이러한 경향이 더욱 분명하게 나타남을 알 수 있다. 점화에 직접적인 영향을 미치는 국소 당량비는 전당량비, 초

기 액적의 크기에 의존하며 위치에 따라 불균일하고, 시간에 따라 변하게 된다. 액적가열 모델의 예측결과를 비교해보면 작은 액적($r_o=13.12 \mu\text{m}$)의 경우에는 무한전도 모델이 전체적으로 점화지연시

간을 조금 크게 예측하나 당량비가 3.0보다 클 때는 두 모델이 거의 동일한 결과를 갖는다. 반면에 큰 액적($r_o=50 \mu\text{m}$)의 경우에는 무한전도 모델이 전도한계 모델보다 점화지연시간을 과대 예측함을 볼 수가 있는데, 이는 무한전도 모델이 점화지연초기의 큰 열적 관성 때문에 전도한계 모델보다 액적의 표면온도가 낮고 이에 따라 증발율이 작으므로 늦게 점화하기 때문이다. 이러한 경향은 단일 연료 액적에 대한 두 액적가열 모델의 예측결과와 실험결과를 비교한 참고문헌[19]에 상세하게 기술되어 있다. 상대적으로 큰 액적에 대한 점화 및 화염전파 해석에서 무한전도 모델은 액적가열시간과 점화지연시간을 과도하게 예측하기 때문에 이후의 모든 계산에서는 전도한계 모델을 사용하였다.

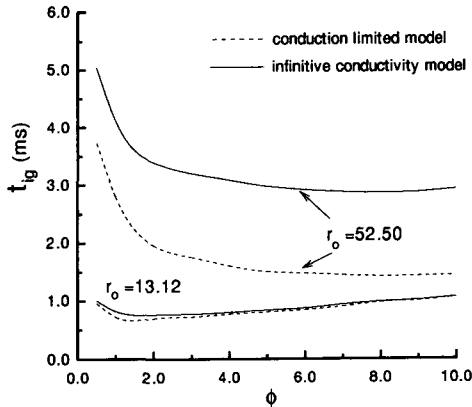
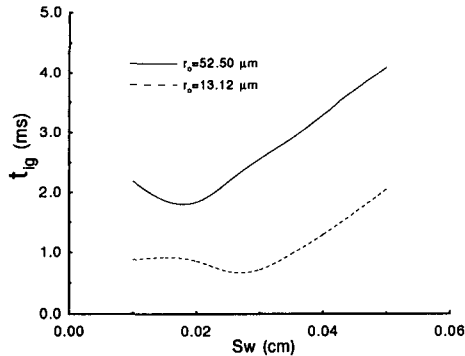
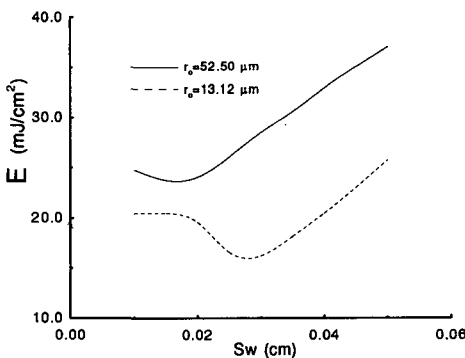


Fig. 4 Ignition delay time versus equivalence ratio



(a) Ignition delay time



(b) Ignition energy

Fig. 5 Variation of ignition characteristics with the distance of the nearest droplet to the hot wall

Fig. 5는 크기가 각기 다른 액적에 대해서 고온 벽면으로부터의 가장 근접하게 위치한 액적과의 거리(S_w)에 따른 점화에너지와 점화지연시간을 나타낸다. 점화에너지와 점화지연시간을 최소로 하는 최적의 액적위치가 존재함을 알 수 있다. 고온벽면으로부터 멀어질수록 기체온도가 감소하여 연료의 농도가 감소하므로 점화지연이 크게 예측되고, 액적이 고온벽면에 너무 가까우면 액적의 과다증발로 인해 액적주위 혼합기의 냉각효과와 벽면가열로 인한 공기의 팽창으로 공기가 하류쪽으로 이동하게 되어 벽면근처에서의 낮은 산소농도 때문에 오히려 점화지연이 크게 나타날 수 있음을 나타내고 있다. 작은 액적($r_o=13.12 \mu\text{m}$)의 경우에 큰 액적($r_o=50 \mu\text{m}$)과 비교할 때 액적 parcel당 상대적으로 많은 액적수를 포함하고 있으므로 액적증발로 인한 냉각효과가 크게 나타나기 때문에 작은 액적의 경우 큰 액적에 비해 최소 점화지연시간에 대응하는 첫번째 액적 parcel의 위치는 고온벽면으로 상대적으로 멀어지게 된다. Fig. 5(b)로부터 점화에너지도 점화지연시간과 비슷한 경향을 나타냄을 잘 알 수 있다. 수치결과에서 보는 바와 같이 벽면으로부터 첫 번째 연료액적까지의 거리가 연료특성에 큰 영향을 미치며, 실제의 연소기에서는 연료액적의 위치가 확률적으로 결정되기 때문에 점화지연시간과 점화에너지가 통계적인 양이 됨을 알 수 있다. Sommer에 의해 수행된 실험(7)에서 가열된 수직 벽면에 평행하게 이동하는 연료액적의 벽면점화온도를 최저로 하는 액적과 벽면과의 위치가 존재함을 잘 보여주었으며 이러한 실험결과는 본 연구의 예측결과와 정성적으로 일치하고 있다. 그러나 실

협의 경우 이차원 유동장에 가열된 수직평판을 따라 형성되는 열경계층, 연료액적이 흡수하는 복사 열전달, 액적 이동속도 등의 차이 때문에 본 연구의 예측결과와의 정량적인 비교는 불가능하다.

3.2 전기점화에 의한 연료분무의 점화와 화염전파

Fig. 6은 전기점화에 의해 공기/연료분무 혼합기가 점화되는 밀폐된 정적 연소실을 나타내며 본 연구에서는 전기점화영역(S_{ig})은 2.0 mm, 전기점화

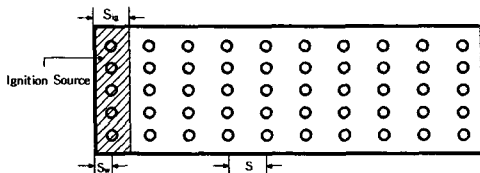
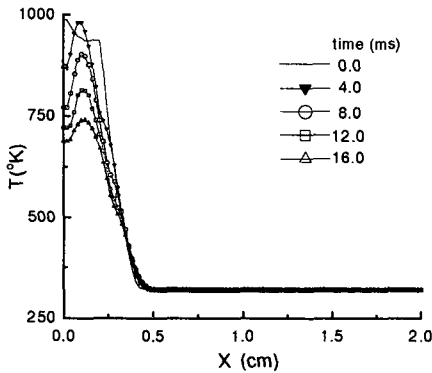
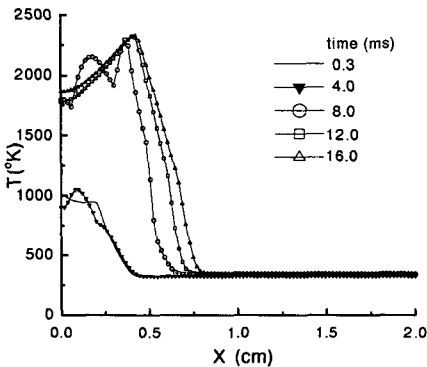


Fig. 6 Fuel spray combustor with the electric spark ignition



(a) $d_o=60 \mu\text{m}$, $\phi=1.0$, $E_{ig}=96.475 \text{ mJ}/\text{cm}^2$

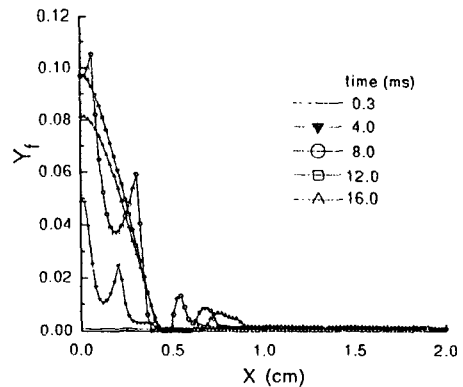


(b) $d_o=60 \mu\text{m}$, $\phi=1.0$, $E_{ig}=96.48 \text{ mJ}/\text{cm}^2$

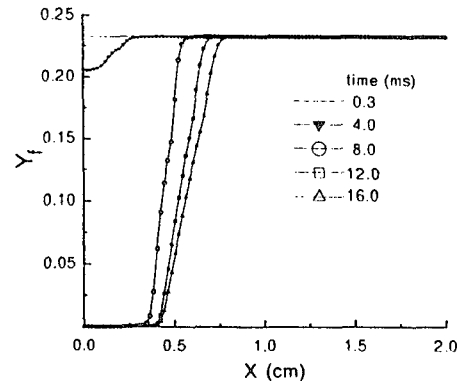
Fig. 7 Flame propagation characteristics of the fuel spray-air mixture

시간은 0.3 ms로 하였다.

Fig. 7은 당량비가 1인 연료분무와 공기의 혼합기에 대한 시간에 따른 화염전파 특성을 보여준다. 단위 면적당 전기점화에너지, $E=96.475 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 인 경우에는 반응열이 혼합기의 가열과 액적의 증발로 인한 에너지 소비를 보충하지 못하므로 점화에 실패하였으나, $E=96.480 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 으로 증가시키면 급격한 온도상승과 더불어 스스로 유지되는 화염핵(flame kernel)이 형성되어 화염이 성공적으로 전파함을 알 수 있다. Fig. 8은 $E=96.480 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 에 대응하는 시간에 따른 연료증기와 산소의 질량분율을 나타낸다. 연료분무와 공기와의 혼합기에서 화염면은 연료와 산소의 질량분율이 최소로 되고 온도가 극소적으로 최대가 되는 지점에 위치한다. 화염면에서 왼쪽 고온 벽면쪽으로는 연료증기가 농후한 상태이고, 화염면에서 오른쪽으로는 산소가 농후한 상태로 되어 있는 확산화염의 구조를 형성하



(a) Fuel mass fraction



(b) Oxygen mass fraction

Fig. 8 Mass fraction profiles of fuel vapor and oxygen ($d_o=60 \mu\text{m}$, $\phi=1.0$, $E_{ig}=96.48 \text{ mJ}/\text{cm}^2$)

고 있다. 이러한 현상은 전기점화 초기의 열팽창으로 산소가 농후한 상태의 혼합기가 대부분 연소실의 우측으로 이동하게 되어 연료액적이 점차적으로 가열되어 증발된 연료증기와 반응한 후 이 영역에서 산소가 고갈되며 연료액적은 계속적으로 증발되므로 연료의 질량분율이 증가하게 된다. 이 영역에서 연료의 질량분율은 상대적으로 큰 값을 가지고 있으나 이러한 고온영역에서 밀도가 매우 낮으므로 실제적인 연료증기의 질량은 소량이다.

Fig. 9는 고정된 점화에너지에 대해서 액적크기에 따른 점화지연시간과 점화모드를 보여준다. 액적의 크기가 작은 경우에 점화지연시간이 긴데 이는 액적의 과다증발로 인해 주위의 기체가 냉각되기 때문에 점화지연시간이 길게되는 균일한(homogeneous) 연소모드가 나타난다. 액적의 크기가 증가하면서 점화지연시간이 급격히 줄어들다가 액적의 크기에 덜 민감한 완만한 부분이 나타나는데, 이 영역에서는 전체적인(global) 연소모드가 나타

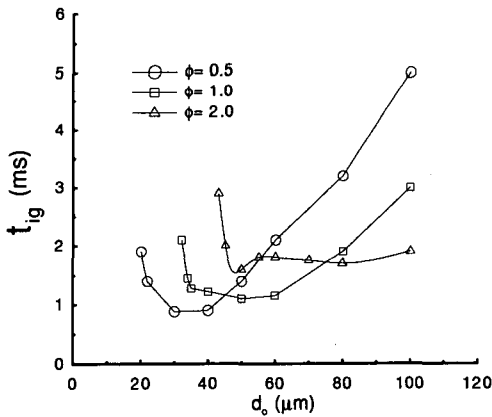


Fig. 9 Ignition delay time versus droplet diameter for several equivalence ratios

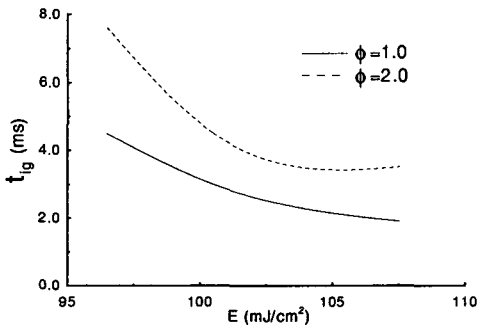


Fig. 10 Ignition delay time versus ignition energy ($d_0 = 100 \mu\text{m}$)

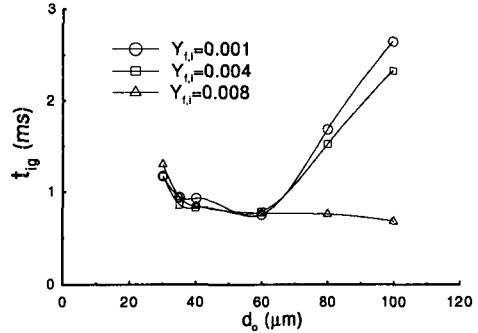


Fig. 11 Ignition delay time versus droplet diameter ($E = 107.5 \text{ mJ/cm}^2$)

나며, 액적의 크기가 더욱 커지면 화학반응영역이 좁은 국소(local) 연소모드로 된다. Fig. 10는 스파크 점화에너지에 따른 점화지연시간을 보여주는데, 점화지연시간이 점화에너지에 강하게 의존하며 최소점화에너지 근방에서 점화지연시간이 매우 길어짐을 알 수 있다.

Fig. 11은 초기 연료증기 질량분율 ($Y_{f,i}$)이 점화지연시간에 미치는 영향을 나타낸다. 수치해석 결과에서 보는 바와 같이 큰 액적에서는 초기 연료증기 질량분율이 증가할수록 점화지연시간이 크게 감소하며, 국소 연소모드에서 전체적인 연소모드로 변하게 됨을 잘 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구의 수치모델은 밀폐관내의 공기/연료분무 혼합기에서의 점화와 정상연소파의 화염전파에 관련된 기본적인 물리적 특성을 잘 예측하였다. 넓은 구간의 연소조건에 대한 수치해석결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 점화에너지와 점화지연시간을 최소화시키는 최적 액적크기와 최적 당량비가 존재한다.

(2) 점화특성은 고온변역으로부터 첫번째 액적까지의 거리에 민감하게 변화하며 액적의 크기에 따른 점화지연시간을 최소화시키는 최적의 위치가 존재한다.

(3) 연료분무 혼합기의 연소특성은 액적의 크기에 따라 변하며 액적의 크기가 작아질 수록 액적의 과다증발로 인한 냉각효과 때문에 점화지연시간이 길게되는 균일한 연소모드, 액적의 크기가 증가하면서 점화지연시간이 급격히 줄어들다가 액적의 크기에 덜 민감한 전체적인 연소모드, 액적의 크기가

더욱 커지면 화학반응영역이 좁은 국소 연소모드로 된다.

(4) 큰 액적의 경우에는 초기 연료증기 질량분율이 증가할 수록 점화지연시간이 크게 감소하며, 국소연소모드에서 전체적인 연소모드로 변하게 된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 94년도 목적기초 학술 연구 지원으로 수행된 내용의 일부이며, 관계자 여러분께 감사할 드립니다.

참고문헌

- (1) Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H., 1981, "A General Model of Spark Ignition for Gaseous and Liquid Fuel-Air Mixtures," *18th Symposium on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 737~1746.
- (2) Peters, J. E. and Mellor, A. M., 1980, "An Ignition Model for Quiescent Fuel Sprays," *Combustion and Flame*, Vol. 38, pp. 65~74.
- (3) Danis, A. M., Namer, I. and Cernansky, N. P., 1988, "Droplet Size and Equivalence Ratio Effects on Spark Ignition of Monodisperse n-Heptane and Methanol Sprays," *Combustion and Flame*, Vol. 74, pp. 285~294.
- (4) Chan, K. K. and Polymeropoulos, C. E., 1981, "An Experimental Investigation of the Minimum Ignition Energy of Monodisperse Sprays," *Eastern Section/Combustion Institute, Fall Technical Meeting, October 27-29*, pp. 285~294.
- (5) Aggarwal, S. K. and Sirignano, W. A., 1984, "Ignition of Fuel Sprays: Deterministic Calculations For Idealized Droplet Arrays," *20th Symposium on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 1773~1780.
- (6) Aggarwal, S. K. and Sirignano, W. A., 1985, "Unsteady Spray Flame Propagation in a Closed Volume," *Combustion and Flame*, Vol. 62, pp. 69~84.
- (7) Sommer, H. T., 1986, "Ignition Studies of Fuel Droplets Streams," *21th Int. Symposium on Combustion*, pp. 641~646.
- (8) Gutheil, E., 1993, "Numerical Investigation of the Ignition of Dilute Fuel Sprays Including Detailed Chemistry," *Combustion and Flame*, Vol. 93, pp. 239~254.
- (9) Chen, C. P., Shang, H. M. and Jiang, Y., 1992, "A Novel Gas-Droplet Numerical Method for Spray Combustion," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 15, pp. 233~245.
- (10) Kim, Y. M., Chen, C. P., Ziebarth, J. P. and Chen, Y. S., 1994, "Prediction of Fast Transient Spray-Combustion Flows," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 25, pp. 21~42.
- (11) Westbrook, C. K. and Dryer, F. L., 1984, "Chemical Kinetic Modelling of Hydrocarbon Combustion," *Prog. Energy Comb. Sci.*, Vol. 10, pp. 1~57.
- (12) Frossling, N., 1938, "On the Evaporation of Falling Droplets," *Gerlands Beltrage Zur Geo-physik*, Vol. 52, pp. 170~216.
- (13) Abramzon, B. and Sirignano, W. A., 1988, "Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculations," *AIAA Paper 88-0636*, 26th Aerospace Science Meeting, Reno, Nevada.
- (14) Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978, "Bubbles, Drops and Particles," Academic Press.
- (15) Hubbard, G. L., Denny, V. E. and Mills, A. F., 1975, "Droplet Vaporization: Effects of Transient and Variable Properties," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 1003~1008.
- (16) Chase, M., 1986, JANAF Thermochemical Table, 3rd edition, American Chemical Society and American Institute of Physics for the National Bureau of Standards.
- (17) Crowe, C. T., Sharma, M. P. and Stock, D. E., 1977, "The Particle Source in Cell Method for Gas-Droplet Flows," *J. Fluid Eng*, Vol. 99, p.325.
- (18) Kim, Y. M. and Kim, S. J., 1994, "Ignition and Flame Propagation of Fuel Spray in a Closed Tube," 대한기계학회, 94년도 춘계학술대회 논문집, pp. 91~95.
- (19) Law, C. K. and Sirignano, W. A., 1977, "Unsteady Droplet Combustion with Droplet Heating- II : Conduction Limit," *Combustion and Flame*, Vol. 28, pp. 175~186.