

디젤엔진조건에서 DME분무의 연소특성 해석

배준경* · 강성모* · 김용모†

Parametric Study of DME Spray Combustion Characteristics in the Diesel-like Condition

Junkyeung Bae, Sungmo Kang and Yongmo Kim

Key Words: Dimethyl ether(DME), Flamelet model(화염편모델), Auto-ignition(자발화), High pressure vaporization model(고압증발모델)

Abstract

The present study has numerically investigates the vaporization, auto-ignition and combustion processes in the high-pressure and high-temperature conditions encountered in the diesel engine. In the present study, in order to understand the overall spray combustion characteristics of DME fuel as well as to identify the distinctive differences of DME combustion processes compared to conventional hydrocarbon liquid fuels, the sequence of the comparative analysis has been systematically made for DME and n-Heptane liquid fuels. Computations for DME fuel are made for two cases including constant fuel mass flow rate condition and fixed heat release rate. Based on numerical results, the discussions are made for the detailed combustion processes of DME and n-Heptane spray.

1. 서 론

DME(dimethyl ether)는 가장 간단한 에테르로써, 분자량도 46 g/mol로 작은 편에 속한다. 하지만 분자량이 작은 다른 연료에 비해 자발화 온도가 낮아 압축착화 엔진에 적당하다. 또한 DME는 C-C 결합이 없고 산소원자의 함유량이 높다는 특징이 있다. 이러한 특성 때문에 DME를 연료로 사용한 연소에서는 soot이 거의 배출되지 않을 뿐만 아니라, NOx의 발생량도 기존 디젤연료에 비해 20% 정도 낮출 수 있다. 또한 세탄가가 높고 연료특성도 좋기 때문에 대체연료로서 많은 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁻⁸⁾.

DME는 디젤연료와 비교하면 상대적으로 높은 증기압, 세탄가, 합산소 성분 그리고 상대적으로 낮은 발열량 및 액체밀도 등으로 인하여 액적의 증발, 분무의 침투길이, 점화 및 난류 연소과정에 있어서 디젤연료와는 상이한 분무연소 특성을 보임을 선행연구들을 통하여 고찰하였다⁽⁹⁻¹³⁾.

본 연구에서는 고압액체상태에서 DME 액적의 증발 특성에 영향을 미치는 효과들을 고려한 고압증발모델과 자발화 및 난류화염장을 제대로 모사할 수 있는 상세화학모델 기반의 Representative Interactive Flamelet(RIF) 모델을 기존의 분무 모델과 결합한 포괄적인 수치모델을 이용하여, 고온 고압의 정적연소기에서 분사된 DME 분무의 증발, 점화 및 난류연소특성에 대하여 해석하였다. 특히 디젤엔진의 연료로 통상적으로 사용되고 있는 탄화수소 액체연료와 DME 연료의 분무연소특성에 있어서 차이점을 동일 연료분사량 기준으로 해석한 결과⁽¹³⁾를 바탕으로 n-Heptane과 동일한 발열량을 갖도록 수정된

(2009년 10월 29일 접수 ~ 2009년 12월 9일 심사완료)

* 한양대학교 기계공학과

† 교신저자, 한양대학교 기계공학부

E-mail : ymkim@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0428 FAX : (02)2297-0339

Table 1 Thermo-physical properties of DME and n-Heptane

	DME	n-Heptane
Chemical formula	CH ₃ OCH ₃	C ₇ H ₁₆
MW [kg/kmol]	46	100.203
Boiling Point [°C]	120-130	98.4
Liquid phase density [kg/m ³]	660	684
Heat of combustion [MJ/kg]	28.8	44
Heat of vaporization [kJ/kg]	460-470	316
Kinetic viscosity [kg/ms]	0.25	0.4
Cetane #	>55	52~56

DME 연료의 분사조건에 대해 DME 분무화염 구조를 상세히 비교하였다.

2. 수치 및 물리 모델

액상과 기상에서 발생하는 중요한 물리 현상들은 비정상, 다차원 연립방정식으로 모델링 된다. Eulerian-Lagrangian 다상유동해석 방법에서 기상의 지배방정식은 Lagrangian 좌표계로 표현되며 액상과 기상의 지배방정식은 질량, 운동량, 열전달률을 나타내는 상호 관련된 생성항으로 결합된다. 본 연구에서 사용한 물리 및 수치 모델은 혼합분율의 변화에 분무의 증발영향을 고려한 Flamelet 모델⁽¹⁰⁾, KH-RT 액적분열 모델⁽¹⁴⁾, 난류에 의한 액적의 dispersion을 고려해 주기 위한 stochastic 액적추적모델⁽¹⁵⁾, 액적간의 충돌영향을 고려한 액적충돌모델⁽¹⁶⁾, 고압상태에서 적용할 수 있는 액적증발모델⁽⁹⁾, 그리고 k-ε 난류모델을 사용하였다. 고압증발모델과 RIF 모델에 대해서는 아래에 기술하였다.

2.1 고압증발모델

본 연구에서는 고압상태에서 일어날 수 있는 실제기체의 거동, 온도, 압력에 따른 상태량 및 증발잠열의 변화, 주위기체가 액적으로 용해되는 현상, Stefan 유동 등 고압상태에서 액적의 증발특성에 중요한 영향을 미치는 효과들을 정확히 모사하기 위해 고압증발모델을 사용하였다. 액적과 기체장 간의 전단력에 의해 발생하는 액적 내부유동을 고려하기 위하여 막이론 및 유효전도도 모델⁽¹⁷⁾을 사용하였다.

각 성분에 대한 증기-액체 평형조건은 다음과 같이

기술할 수 있다.

$$T^v = T^l; P^v = P^l; f_i^v = f_i^l \quad (1)$$

여기서 첨자 v, l 은 각각 증기와 액체상태를 나타내고 f_i 는 i -성분의 퓨가시터로 다음 관계식으로부터 계산할 수 있다.

$$R_u T \ln \left(\frac{f_i}{X_i P} \right) = \int_V^{\infty} \left\{ \left(\frac{\partial P}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_j} - \frac{R_u T}{V} \right\} = dV - R_u T \ln Z \quad (2)$$

여기서, X_i 는 i -성분의 몰분율, V 는 전체부피, 그리고 Z 는 압축계수이다.

순수 물질에 대한 증발 잠열과 혼합기의 증발 엔탈피 간의 차이는 Peng-Robinson 상태방정식을 사용하여 결정한다. 상변화에 필요로 하는 에너지는 다음과 같이 나타난다.

$$\Delta h = \sum_{i=1,2} Y_i^l \bar{H}(T, P, Y_i^l) - \sum_{i=1,2} Y_i^v H_{i,l}(T, P) \quad (3)$$

\bar{H}_i 는 i -성분의 부분 엔탈피이고, 같은 온도에서 이상기체 엔탈피 H_i^0 는 다음의 열역학적 관계에 의해서 나타난다.

$$(\bar{H}_i - H_i^0)_T = -R_u T^2 \left(\frac{\partial \ln \phi_i}{\partial T} \right) \quad (4)$$

ϕ_i 는 퓨가시터 계수로서 아래와 같이 정의된다.

$$\phi_i = \frac{f_i}{Y_i P} \quad (5)$$

열역학적 상태량을 정확하게 계산하기 위하여 온도와 압력의 함수로써 계산하였고 적절한 혼합법칙을 이용하여 혼합물의 상태량을 구하였다.

2.2 난류연소모델

본 연구에서 사용한 RIF 모델에 대한 내용은 참고문헌⁽¹⁰⁾에 잘 나타나 있으므로 간략하게만 설명하도록 하자. 층류화염면내의 화학종 및 에너지를 지배하는 방정식을 혼합분율(mixture fraction) Z 에 대해서 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} + \dot{\omega}_i \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{1}{2c_p} \frac{\partial^2 h}{\partial Z^2} - \chi \frac{1}{2c_p} \sum_{k=1}^N h_k \frac{\partial^2 Y_k}{\partial Z^2} - \frac{1}{\rho c_p} \left(\sum_{k=1}^N h_k \dot{\omega}_k - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot q_{rad} \right) \quad (7)$$

이때, 공간상에서 혼합분율상으로 좌표변환을 하게

됨에 따라 나타나게 되는 매개 변수인 스칼라소산을 χ 는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 층류화염면내의 분자단위 확산에 대한 특성시간의 역수로 해석할 수 있다.

$$\chi(Z) \equiv 2D_Z \left(\frac{\partial Z}{\partial x_j} \right)^2 \cong \chi_{st} f(Z) = \chi_{st} \frac{Z^2 \ln Z}{Z_{st}^2 \ln Z_{st}} \quad (8)$$

초기에 RIF 모델은 전체 해석영역에 대한 국소화염구조가 하나의 층류화염면(single RIF)으로 대표된다고 가정하였으나, Barths⁽¹¹⁾ 등은 주어진 시간에서 공간상으로 불균일하게 존재하는 스칼라소산율의 분포를 고려할 수 있도록 확장한 multiple RIF 모델인 EPFM(Eulerian Particle Flamelet Model) 모델을 제안하였다. 이때, 주어진 시간과 공간에서 각 화학종의 평균질량분율은 다음과 같이 나타난다.

$$\tilde{Y}_i(\mathbf{x}, t) = \sum_{l=1}^{N_i} \tilde{I}_l(\mathbf{x}, t) \times \int_0^1 Y'_i(Z, \langle \chi | Z \rangle_l; t) \tilde{P}(Z; \mathbf{x}, t) dZ \quad (9)$$

여기서 $P(Z)$ 는 beta 함수를 사용한 혼합분율에 대한 확률밀도함수(PDF)를 의미하고 $\tilde{I}_l(\mathbf{x}, t)$ 는 주어진 시간 t 와 공간 \mathbf{x} 에서 l 번째 RIF가 발견될 확률을 의미하여 다음과 같은 보존방정식을 통해 구해진다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\tilde{\rho} \tilde{I}_l) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{\rho} \tilde{u}_j \tilde{I}_l) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_l} \frac{\partial \tilde{I}_l}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

식 (9)에 나타난 Y'_i 는 l 번째 RIF에 대해서 식(6)과 (7)로 계산된 비정상상태 해를 의미하며, 이를 구하기 위한 조건부 스칼라소산율 $\langle \chi | Z \rangle_l$ 는 식(8)과 같이 다음의 형태로 나타난다.

$$\langle \chi | Z \rangle_l = \langle \hat{\chi}_{st} \rangle_l f(Z) \quad (11)$$

주어진 시간에서 l 번째 RIF이 가지는 평균조건부 스칼라소산율은 다음과 같이 계산된다.

$$\langle \hat{\chi}_{st} \rangle(\mathbf{x}, t) = \frac{\int_V \tilde{I}_l(\mathbf{x}, t) \tilde{\rho}(\mathbf{x}, t) [\langle \hat{\chi}_{st} \rangle(\mathbf{x}, t)]^{3/2} \tilde{P}(Z_{st}; \mathbf{x}, t) dV}{\int_V \tilde{I}_l(\mathbf{x}, t) \tilde{\rho}(\mathbf{x}, t) [\langle \hat{\chi}_{st} \rangle(\mathbf{x}, t)]^{1/2} \tilde{P}(Z_{st}; \mathbf{x}, t) dV} \quad (12)$$

여기서,

$$\langle \hat{\chi}_{st} \rangle(t) = \frac{c_{\chi} \frac{\tilde{\epsilon}}{k} Z^{n^2}}{\int_0^1 f(Z') \tilde{P}(Z') dZ'} \quad (13)$$

최근에는 증발이 난류 분무연소에 미치는 영향에 자세한 정보는 참고문헌⁽⁹⁻¹³⁾에 자세히 기술되어있다. 또한

DME의 화학반응모델로는 78개의 화학종과 336단계의 상세화학반응메커니즘⁽¹⁸⁾을 사용하였고, n-Heptane의 경우 43개의 화학종과 185단계의 skeletal 메커니즘⁽¹⁹⁾을

Table 2 Experimental conditions

	n-Heptane	DME	
구분	Reference	CASE 1	CASE 2
노즐직경 [mm]	200	200	239
분사속도 [m/s]	225	225	312
총분사량 [mg]	6	6	9.2
분사시간 [ms]	1.4		
연소실온도 [K]	823		
연소실압력 [MPa]	4.1		

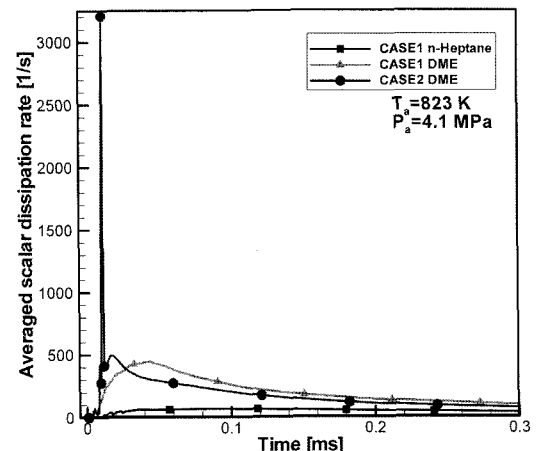
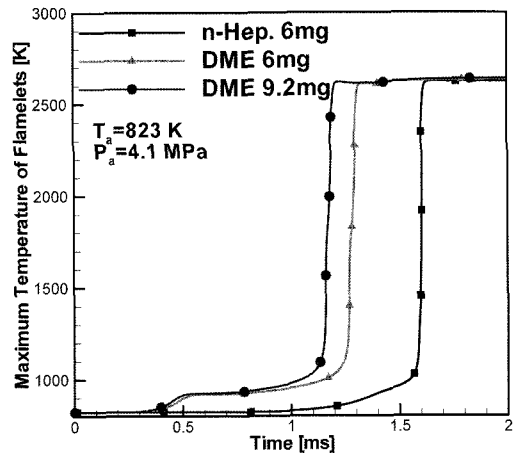


Fig. 1 Time evolution of temperature and averaged scalar dissipation rate of combustion chamber.

이용하였다.

3. 결과 및 고찰

DME분무연소 특성해석을 위한 포괄적인 수치모델의 예측능력을 검증하기 위해 고온·고압의 공기로 채워진 정적 실린더 내에 DME분무가 주입되어 일어나는 물리적 과정을 수치적으로 해석하였다. 이 정적 실린더 내의 초기압력 및 분사압력이 각각 4.1 MPa과 40 MPa이다. 반경방향 40 mm, 축방향 90 mm로 되어있는 계산영역을 60×80의 비균일 격자계를 이용하여 차분하였다. 선행연구(CASE1)⁽¹³⁾에서는 DME와 n-Heptane의 연료 분사량(6 mg)과 연료 분사속도(225 m/s)가 동일한 상태에 대하여 비교하였다. 그러나 본 연구(CASE2)에서는 n-Heptane의 발열량(44 MJ/kg)에 비해 낮은 발열량(28.8 MJ/kg)을 갖는 DME의 특성을 고려하여 동일 발열량(CASE1, n-Heptane)을 갖도록 DME 총분사량을 조정하여 DME 분무연소 특성을 비교하였다. 자세한 연소조건은 Table 2에 나타내었다.

Figure 1에 n-Heptane과 DME의 점화지연특성을 도시하였다. n-Heptane의 점화지연 시간(1.63 ms)에 비해 DME의 점화지연 시간은 각각 1.3 ms(CASE1), 1.2 ms(CASE2)로 DME의 빠른 증발 및 합산소연료 특성으로 인하여 n-Heptane 보다 점화시기가 빨라짐을 알 수 있다.

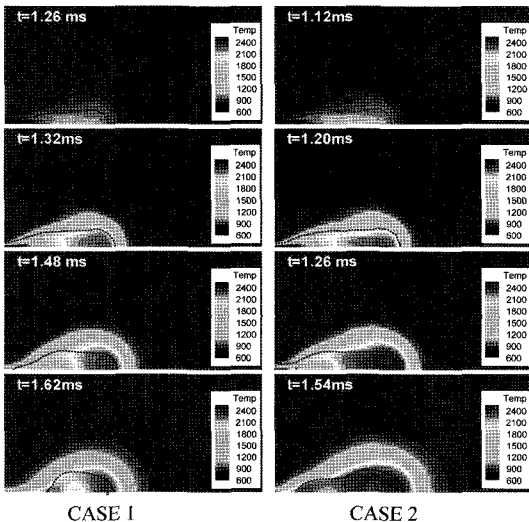


Fig. 2 Instantaneous distribution patterns of temperature of DME spray flames.

CASE1에 비해 CASE2의 경우 많은 연료를 분사함에도 불구하고 빠른 분사속도로 인한 난류강도 증가로 분무액적의 증발, 연료제트의 모멘텀 증가로 인한 연료제트 영역으로의 공기유입 그리고 혼합율이 증가하여 점화지연 시간을 단축시키는 결과를 보였다. 특히 CASE2의 경우 분사초기에 높은 상대속도로 인해 액적분열과 증발이 급격하게 일어나 인제터 근방에 혼합분을 구배가 크게 증가하고 난류강도도 매우 높아 스칼라소산율이 급격하게 증가된다. 그러나 초기분사시기가 지나면

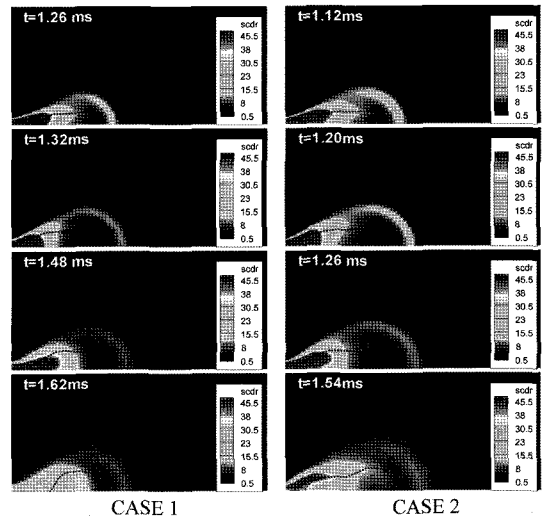


Fig. 3 The instantaneous distribution patterns of scalar dissipation rate of DME spray flames.

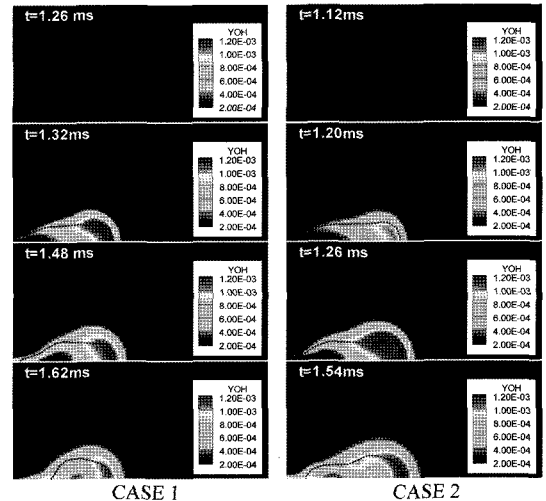


Fig. 4 Instantaneous distribution patterns of OH radical mass fraction of DME spray flames.

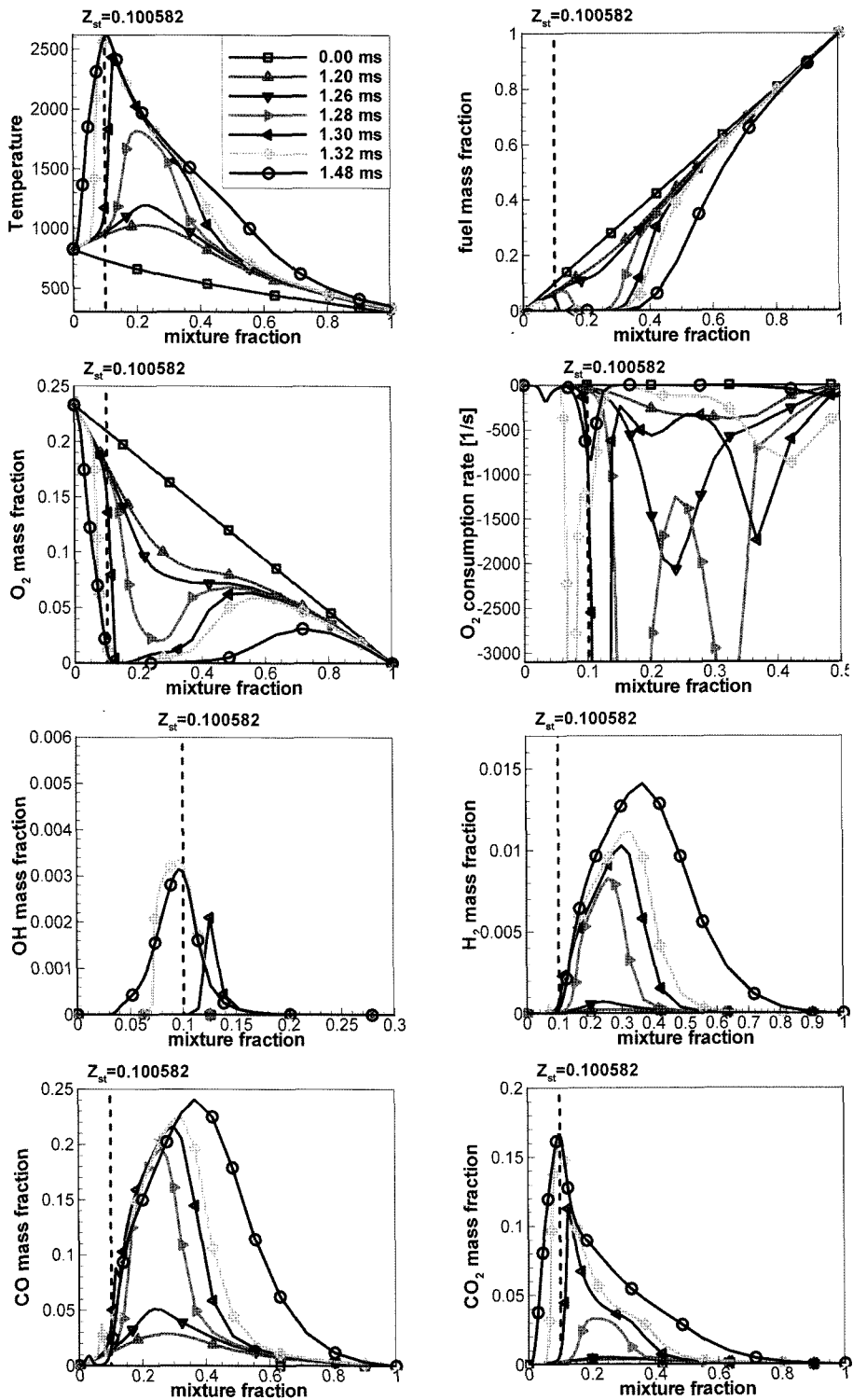


Fig. 5 Time evolutions of temperature and mass fraction of various species in the interactive flamelet for DME spray, CASE1.

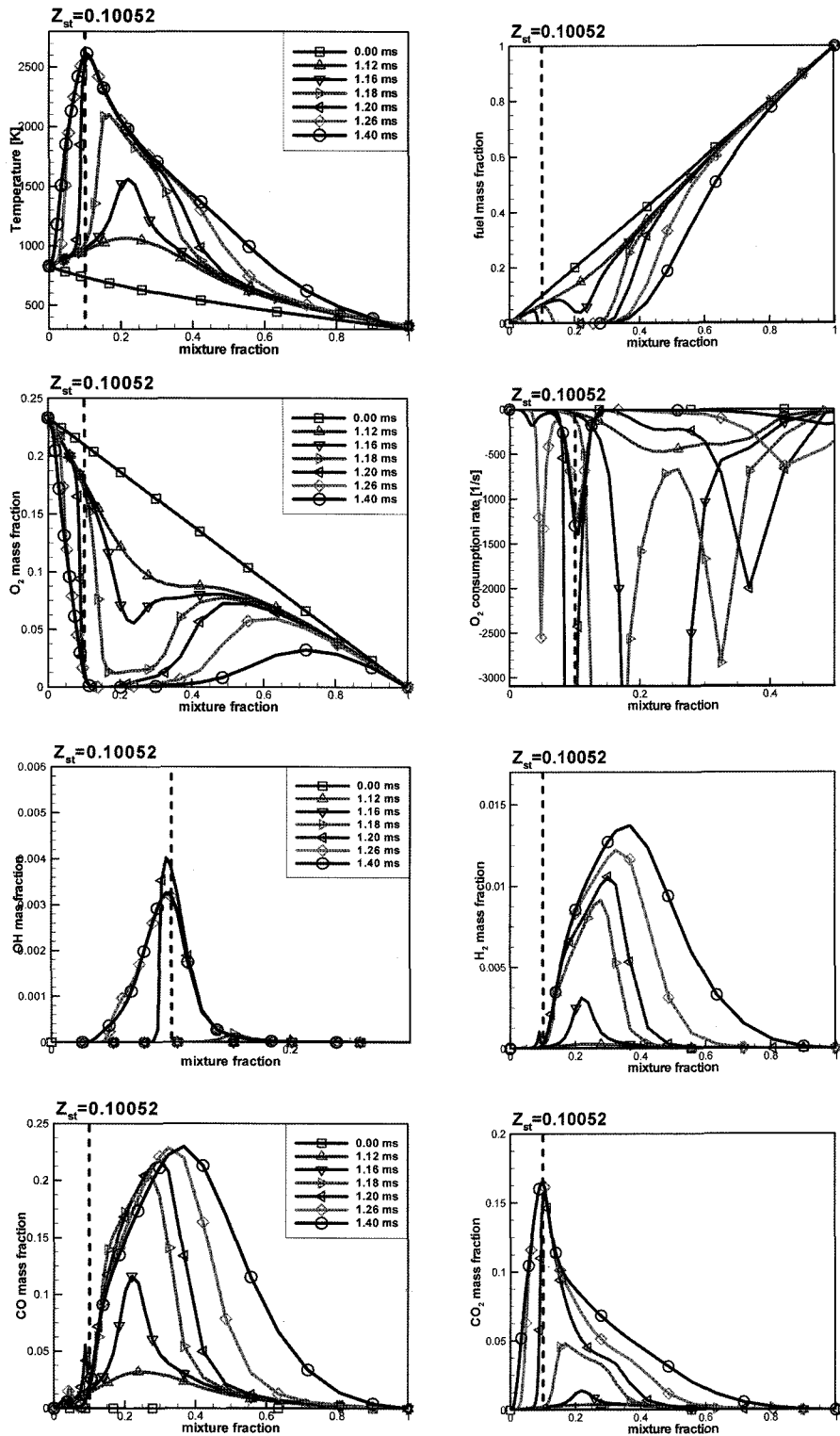


Fig. 6 Time evolutions of temperature and mass fraction of various species in the interactive flamelet for DME spray, CASE2.

큰 운동량을 가지고 유입되는 CASE2는 연료증가의 침투깊이가 증가하게 되어 혼합분을 구배가 빠르게 감소하게 되어 CASE2의 경우 CASE1에 비해 스칼라소산율이 급격히 감소하고 자발화가 상대적으로 빨리 일어남을 알 수 있다.

연료분사기간 동안에는 분무액적의 증발에 의한 냉각 효과와 강한 난류에 의한 스칼라소산율 증대로 인하여 DME 연료증기 제트 꼬리 근방의 화학당량비 조건(Z_{st})을 가지는 위치에서 자발화가 불가능하고 상대적으로 낮은 스칼라소산율을 가지는 DME 연료증기 제트 머리 부분의 화학당량비 조건을 가지는 위치 근방에서 자발화가 쉽게 발생한다. 그리고 DME 연료분무제트는 n-Heptane 연료분무 제트에 비해서 상대적으로 높은 증발율과 짧은 분무관통거리를 가지므로 DME 분무화염장은 상대적으로 인젝터와 근접한 상류영역에 형성됨을 알 수 있다. 이러한 특성은 Fig. 2-4을 통하여 확인할 수 있다.

Fig. 5, 6에서는 DME 점화과정 및 분무연소특성을 상세히 분석하기 위해 초기 연소실조건(Table 2)에서 혼합분을 공간의 순간적인 화염구조를 온도, 화학종 질량분율(연료증기, O_2 , H_2 , OH, CO, CO_2), 산소 소모율에 대하여 도시하였다. 선행 연구⁽¹³⁾를 통하여 n-Heptane 분무화염에 비해 DME 분무화염은 혼합분을 공간에서 산소와 연료증기의 비평형 반응영역이 현저히 넓게 분포함을 확인하였고, 본 연구에서와 같이 연료 분사량과 분사속도가 증가하는 경우, 연료증기의 빠른 확산을 통해 비평형 영역이 더욱 확장됨을 알 수 있다. 연료농후 영역에 반응영역이 n-Heptane화염에 비해 넓게 분포하는 DME 분무화염의 구조는 합산소 연료의 연소특성과 직접적으로 관련되어 있는 것으로 사료된다.

CASE1, 2 모두 혼합분을 공간상에서 대응하는 산소 및 연료증기 질량분율, 그리고 산소 소모율의 분포에 이러한 경향을 나타내고 있다. 이러한 수치해석 결과로부터 DME연료를 사용하는 엔진에서의 화염구조 및 공해물질 생성특성은 난류와 화학 반응의 상호작용에 더욱 민감하게 영향을 받을 것임을 알 수 있다. 반응물이 상대적으로 낮은 점화초기를 지나면 반응물이 세 개의 위치에서 정 점을 이루며 전파하게 된다. 화학당량비 조건 근방에 위치한 반응물의 정점을 가지는 영역은 확산화염 특성을 가지며 희박 및 농후 영역에 위치한 정점은 예혼합 화염 특성을 가지며 전파하게 된다. 이러한 삼지 화염 구조를 가지는 복잡한 반응 과정은 아주 짧은 기간 동안에 일어난다. 또한 DME 분무화염은 n-Heptane

분무화염에 비해 연료가 농후한 영역에서 OH 라디칼이 훨씬 넓게 분포하고 있고 이러한 DME 분무화염의 OH 특성은 직접분사식 디젤엔진의 실제적인 화염장에서 매연입자의 산화에 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 더욱이 DME 분무화염장에서는 연료가 농후한 영역에서 수소가 훨씬 높게 그리고 넓게 분포하고 있기 때문에 매연입자의 생성을 현저히 저감할 수 있는 또 하나의 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

결론

수치계산결과로부터 고온·고압 정적연소기에서 분사된 DME 및 n-Heptane 분무화염장의 특성을 아래와 같이 요약하였다.

연료분사기간 동안에 자발화가 일어나는 DME 연료분무제트의 경우에는 상대적으로 낮은 스칼라소산율을 가지는 DME 연료증기 제트 머리부분의 화학당량이 조건에서 약간 연료가 농후한 위치 근방에서 자발화가 일어나는 반면에 연료주입이 끝난 후에 자발화가 일어나는 n-Heptane 연료분무제트의 경우에는 스칼라소산율이 급격히 감소하게 되어 자발화 조건을 충족하게 되는 연료증기제트 꼬리영역의 화학당량비 조건을 가지는 위치 근방에서 자발화가 일어나게 된다.

연료분사 초기의 DME 연료분무제트의 최대 스칼라소산율은 n-Heptane 연료분무제트의 최대 스칼라소산율에 비하여 동일 분사량 조건(CASE1)의 경우 7배, 동일 발열량 조건(CASE2)의 경우 50배 가까이 높게 예측되었다. 또한 CASE2에서는 CASE1에 비하여 더 많은 연료를 동시간에 분사하기 때문에 빠른 분사속도로 인하여 긴 분무관통거리를 형성하였고 난류강도 증가로 연료증기의 혼합 및 증발특성이 향상되었다. 그 결과 CASE1에 비하여 점화지연 시간의 단축과 비평형 반응영역이 확장되는 화염구조 특성을 보였다. 이러한 수치해석 결과로부터 DME 연료를 사용하는 엔진에서의 화염구조 및 공해물질 생성특성은 난류와 화학반응의 상호작용에 더욱 민감하게 영향을 받을 것임을 알 수 있다.

CASE1,2모두 DME 분무화염은 n-Heptane 분무화염에 비해 연료가 농후한 영역에서 현저히 넓은 고온의 화염장을 형성하고 있다. 또한 이 영역에서 OH라디칼 및 수소가 훨씬 높게 그리고 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 DME 분무화염의 특성은 직접분사식 디젤엔진의 실제적인 화염장에서 매연 입자의 산화와 매연 입

자의 생성억제에 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project(무저공해 자동차 사업단)의 연구지원을 받아 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) C. Arcoumanis (2000) "The Second European Auto-Oil Programme (AOLII)", European Commission, vol.2, Alternative Fuels for Transportation.
- (2) S. C. Sorenson, M. Glensvig and D. Abata (1998) "Dimethyl Ether in the Diesel Fuel Injection Systems", SAE Paper 981159.
- (3) K. Wakai, K. Nishida, T. Yoshizaki and H. Hiroyasu (1998) "Spray and Ignition Characteristics of Dimethyl Ether Injected by a DI Diesel Injector", Proceedings of the Fourth International Symposium COMODIA '98, pp.537~542.
- (4) S. Kajitani, Z. Chen, M. Oguma and M. Konno (2002) "A Study of Low Compression-ratio Di-methyl Ether Diesel Engines", Int. J. Engine Res., Vol.2, pp.1~11.
- (5) K. Wakai, K. Nishida, T. Yoshizaki and H. Hiroyasu (1999) "Ignition Delays of DME and Diesel Fuel Sprays Injected by a D.I. Diesel Injector", SAE Paper 1999-01-3600.
- (6) H. Ten, J. C. CcCandless and J. B. Schneyer (2001) "Thermo-chemical Characteristics of Di-methyl Ether – An Alternative Fuel for Compression-Ignition Engines", SAE Paper 2001-01-0154.
- (7) V. I. Golovitchev, N. Nordin and J. Chomiak, N. Nishida and K. Wakai (1999) "Evaluation of Ignition Quality of DME ad Diesel Engine Conditions", Proceedings of the Forth International Conference of Internal Combustion Engines 99 (ICE99): Experiments and Modeling, pp.299~306.
- (8) Y. Kim, J. Lim and K. Nd Min (2007) "A Study of the Dimethyl Ether Spray Characteristics and Ignition Delay", Int. J. Engine Res., Vol.8, pp.337~346.
- (9) Y. Yu, S. K. Kim and Y. Kim (2001) "Numerical Modeling for Autoignition and Combustion Processes of Fuel Sprays in High-Pressure Environment", Combustion Science and Technology, Vol.168, pp.85~112.
- (10) H. Pitsch, H. Barths and N. Peters (1996) "Three Dimensional Modeling of NOx and Soot Formation in DI-Diesel Engines Using Detailed Chemistry Based on the Interactive Flamelet Approach", SAE Paper 962057.
- (11) H. Barths, C. Antoni and N. Peters (1998) "Three Dimensional Simulation of Pollutant Formation in a DI-Diesel Engines Using Multiple Interactive Flamelets", SAE Paper 982456
- (12) S. K. Kim, Y. Yu, J. H. Ahn and Y. Kim (2004) "Numerical Investigation of the Autoignition of Turbulent Gaseous Jets in a High-Pressure Environment Using the Multiple RIF Model", Fuel, Vol.83, pp.375~386.
- (13) Y. W. Yu, J. Lee and Y. Kim (2008) "Numerical Studies on the Combustion Characteristics and Pollutant Formation for the DME Fueled Diesel Engine", Journal of ILASS-KOREA, Vol.13, No.1, pp.28~33.
- (14) M. A. Patterson and R. D. Reitz (1998) "Modeling of the Effects of Fuel Spray Characteristics on Diesel Engine combustion and Emission", SAE Paper 980131.
- (15) A. A. Amsden, P. J. O'Rourke and T. D. Butler (1989) "KIVA II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays" : Los Alamos National Labs, LA-11560-MS.
- (16) P. J. O'Rourke (1981) "Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays", Los Alamos National Laboratory report LA-9069-T.
- (17) B. Abramzon and W. A. Sirignano (1987) "Approximate Theory of a Single Droplet Vaporization in a Convective Field: Effects of Variable Properties, Stefan Flow and Transient Liquid
- (18) Lawrence Livermore National Laboratory Web. "https://www-pls.llnl.gov/? url=science_and_technology-chemistry-combustion"
- (19) S. Liu, J. C. Hewson, J. H. Chen and H. Pitsch (2004) "Effects of Strain Rate on High-Pressure Nonpremixed n-Heptane Autoignition in Counterflow", Combustion and Flame, Vol.137, pp.320~339.