

## DME연료 디젤 엔진에서의 연소특성 해석

유용욱<sup>1)</sup> · 이정원<sup>2)</sup> · 김용모<sup>\*2)</sup>

현대기아자동차<sup>1)</sup> · 한양대학교<sup>2)</sup>

### Numerical Studies on Combustion Characteristics of Diesel Engines using DME Fuel

Yongwook Yu<sup>1)</sup> · Jeong-Won Lee<sup>2)</sup> · Yongmo Kim<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Power Train R&D Center HMC&KMC, Hyundai Motor Company, 772-1 Jangdeok-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 2 August 2007 / Accepted 2 October 2007)

**Abstract** : The present study is mainly motivated to investigate the vaporization, auto-ignition and spray combustion processes in DI diesel engine using DME and n-heptane. In order to realistically simulate the dimethyl ether (DME) spray dynamics and vaporization characteristics in high-pressure and high-temperature environment, the high-pressure vaporization model has been utilized. The interaction between chemistry and turbulence is treated by employing the Representative Interaction Flamelet (RIF) model. The detailed chemistry of 336 elementary steps and 78 chemical species is used for the DME/air reaction. Based on numerical results, the detailed discussion has been made for the distinctly different combustion characteristics of DME diesel engine in term of vaporization, ignition delay, pollutant formation, and heat release rate.

**Key words** : Dimethyl ether(DME), Flamelet model(화염편 모델), Auto-ignition(자발화), High-pressure vaporization Model(고압증발모델), Detailed chemistry(상세화학반응식)

### 1. 서론

DME(dimethyl ether: 화학식 CH<sub>3</sub>-O-CH<sub>3</sub>)는 가장 간단한 에테르이다. 또한 분자량도 46g/mole로 작은 편에 속한다. 하지만 분자량이 작은 다른 연료들과는 다르게 DME는 자발화 온도가 낮아서 압축착화 엔진에 적당하다. 무엇보다도 DME의 큰 장점은 C-C 연결이 없고, 산소원자의 함유량이 크다는 것이다. 이로 인해 DME를 연료로 사용한 연소에서는 soot을 거의 배출하지 않을 뿐만 아니라, NOX 발생량도 디젤연료에 비해 20%나 급감시킬 수 있다. 또한 세탄가가 높고 연료특성도 좋기 때문에 새로운

연료로서 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>1-3)</sup>

그러나 DME는 디젤연료와 비교하면 상대적 높은 증기압, Cetane 수, 함산소 성분 그리고 상대적으로 낮은 발열량 및 액체밀도 등으로 인하여 액적의 증발, 분무의 침투길이, 점화 및 난류연소과정에 있어서 디젤유와는 상이한 분무연소 특성을 가질 것으로 예상된다. DME 연료를 실제 엔진(Diesel, HCCI, 가스터빈 연소기등)에 적용할 수 있는 최적 연소조건을 도출하기 위해서는 DME 분무의 증발, 자발화 및 연소특성을 체계적으로 파악하는 것이 선결과제이다.

본 연구에서는 고압상태에서 DME 액적의 증발 특성에 영향을 미치는 효과들을 고려한 증발모델과

\*Corresponding author, E-mail: ymkim@hanyang.ac.kr

자발화 및 난류화염장을 제대로 모사할 수 있는 상세화학모델 기반의 Representative Interactive Flamelet (RIF) 모델을 이용하여, 고온 고압의 디젤 엔진조건에서 분사된 DME분무의 증발, 점화 및 난류 연소특성을 수치적으로 해석하였다.

## 2. 지배방정식

액상과 기상에서 발생하는 중요한 물리 현상들은 비정상, 다차원 연립방정식으로 모델링된다. Eulerian-Lagrangian 다상 유동해석방법은 기상의 지배방정식은 Euler 좌표계로 표시되는 반면 액상의 지배방정식은 Lagrangian 좌표계로 표현되며 기상과 액상의 지배방정식은 질량, 운동량, 열전달률을 나타내는 상호 관련된 생성항으로 결합된다. 본 연구에서 사용한 물리 및 수치 모델은 혼합 분율의 변화에 분무의 증발 영향을 고려한 Flamelet 모델,<sup>4)</sup> 파동 불안정 액적분열과 TAB 모델을 조합한 액적분열 모델,<sup>5)</sup> 난류에 의한 액적의 dispersion을 고려해 주기 위한 stochastic 액적추적모델,<sup>6)</sup> O'Rourke의 액적충돌모델,<sup>7)</sup> 고압상태에서 적용할 수 있는 액적증발 모델, 그리고 k-ε 난류 모델을 사용하였다. 고압증발 모델과 RIF 모델에 대해서는 아래에 기술하였다.

### 2.1 고압증발모델

본 연구에서는 고압상태에서 일어날 수 있는 실제 기체의 거동, 온도, 압력에 따른 상태량 및 증발 잠열의 변화, 주위기체가 액적으로 용해되는 현상, Stefan 유동 등, 고압상태에서 액적증발특성에 중요한 영향을 미치는 효과들을 정확히 모사하기 위해 고압증발모델을 사용하였다. 액적과 기체장 간의 전단력에 의해 발생하는 액적 내부 유동을 고려하기 위해 막이론 및 유효전도도 모델<sup>8)</sup>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, l은 각각 증기와 액체상태를 나타내고  $f_i$ 는 i-성분의 퓨가시티로 다음 관계식으로부터 계산할 수 있다.

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

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.

$$\Delta h = \sum_{i=1,2} Y_i^l \bar{H}_i(T, P, Y_i^l) - \sum_{i=1,2} Y_i^g H_{i,i}^0(T, P) \quad (3)$$

$\bar{H}_i$ 는 성분 i의 부분 엔탈피이고, 같은 온도에서의 이상기체 엔탈피  $H_i^0$ 는 다음의 열역학적 관계에 의해서 나타난다.

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

$\phi_i$ 는 퓨가시티 계수로서 아래와 같이 정의 된다.

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

액적증발모델에서 열역학적 상태량을 정확하게 계산하는 것이 무엇보다 중요하다 할 수 있다. 본 연구에서는 열역학적 상태량을 온도와 압력의 함수로써 계산하였고 적절한 혼합법칙을 이용하여 혼합물의 상태량을 구했다.<sup>9)</sup>

### 2.2 난류연소모델

본 연구에서 사용한 RIF 모델에 대한 내용은 참고 문헌<sup>10)</sup>에 잘 나타나 있으므로 간략하게만 설명하도록 하자. 층류화염면내의 화학종 및 에너지를 지배하는 방정식을 혼합분율(mixture fraction)  $Z$ 에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial Y_k}{\partial t} = \frac{\chi}{2} \frac{\partial^2 Y_k}{\partial Z^2} + \frac{\dot{\omega}_k}{\rho} \quad (6)$$

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

이때, 공간상에서 혼합분율상으로 좌표변환을 하게 됨에 따라 나타나게 되는 매개 변수인 스칼라 소산을  $\chi$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 층류화염면내의 분자단위 확산에 대한 특성시간의 역수로 해석할 수 있다.

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

초기에 RIF 모델은 전체 해석영역에 대한 국소화염구조가 하나의 층류화염면(single RIF)으로 대표된다고 가정하였으나, Barths<sup>10)</sup> 등은 주어진 시간에서 공간상으로 불균일하게 존재하는 스칼라소산율의 분포를 고려할 수 있도록 확장한 multiple RIF 모델인 EPFM(Eulerian Partilce Flamelet Model) 모델을 제안하였다. 이때, 주어진 시간과 공간에서 각 화학종의 평균질량분율은 다음과 같이 나타난다.

$$\tilde{Y}_k(\bar{x}, t) = \sum_{i=1}^N \tilde{I}_i(\bar{x}, t) * \int_0^1 Y_k^i(Z, \langle \chi / Z \rangle_i; t) \tilde{P}(Z; \bar{x}, t) dZ \quad (9)$$

여기서 P(Z)는 beta 함수를 사용한 혼합분율에 대한 확률밀도함수(PDF)를 의미하고, Ii(x,t)는 주어진 시간 t와 공간 x에서 i번째 RIF가 발견될 수 있는 확률을 의미하여 다음과 같은 보존방정식을 통해 구해진다.

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

식 (9)에 나타난 Yki는 i번째 RIF에 대해 식 (6)과 (7)로 계산된 비정상상태 해를 의미하며, 이를 구하기 위한 조건부 스칼라소산율  $\langle \chi / Z \rangle_i$ 는 식 (8)에서 처럼 다음과 같이 나타난다.

$$\langle \chi / Z \rangle_i = \langle \chi_{st} \rangle_i f(Z) \quad (11)$$

주어진 시간에서 i번째 RIF이 가지는 평균조건부 스칼라소산율은 다음과 같이 계산된다.

$$\langle \chi_{st} \rangle_i(t) = \frac{\int \tilde{I}_i \bar{\rho} \langle \chi_{st} \rangle^{3/2} \tilde{P}(Z_{st}) dV}{\int \tilde{I}_i \bar{\rho} \langle \chi_{st} \rangle^{1/2} \tilde{P}(Z_{st}) dV} \quad (12)$$

여기서,

$$\langle \chi_{st} \rangle(\bar{x}, t) = \frac{c_x \frac{\tilde{\epsilon}}{k} \bar{Z}^2}{\int_0^1 f(Z^*) \tilde{P}(Z^*) dZ^*} \quad (13)$$

최근에는 증발이 난류 분무 연소에 미치는 영향에 자세한 정보는 참고문헌<sup>10,11)</sup>에 자세히 기술되어 있다. 본 연구에서는 78개 화학종과 336단계의 반응식으로 이루어진 DME의 상세화학반응식<sup>12)</sup>을 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 RIF 모델을 이용하여 DME와 n-heptane 을 사용하는 직접 분사식 디젤 엔진의 연소과정과 공해물질 생성특성을 수치적으로 해석하였다. 수치계산은 Cummins N-14 엔진의 다양한 분사조건에 대하여 수행하였으며 수치해석 결과를 바탕으로 상세한 고찰을 하였다.

엔진의 형상 수치와 수치 계산 조건은 Table 1과 2에 상세히 기술하였다. 수치 계산은 하사점(Bottom dead center)에서 시작하여 배기 밸브가 열리는 130°CA가 될 때까지 계속된다.

동일한 분사조건에서의 디젤유와 DME의 연소특성을 비교하기 위하여 상세화학반응식이 잘 알려져 있는 n-heptane을 디젤유 대신에 연료로 사용하였다. 디젤연료를 n-heptane으로 해석하는 데는 n-heptane의 증발속도가 디젤연료보다 빠르고 액상의 밀도의 차이로 인해 n-heptane이 20% 정도 분사속도가 빠른 문제점이 있는 것으로 알려져 있다. n-heptane의 상세화학반응식<sup>16)</sup>은 114개의 기본 반응식과 43개의 화학종으로 구성되어있다. Table 3에 n-heptane과

Table 1 Engine specification of Cummins N-14 diesel engine

Engine type	Cummins N-14
Bore (cm)	13.97
Stroke (cm)	15.24
Squish (cm)	0.378
Compression ratio	16.5
Displacement volume(cm <sup>3</sup> )	2340
Connecting rod length (cm)	30.48
Injection nozzles	8
Injection hole diameter (cm)	0.02
Spray inclination angle (deg)	76

Table 2 Computational condition

Case	Computation sector(°)	RPM	Initial air pressure(MPa)	Initial air temp.(K)	Mass of fuel(g)	Mass of air(g)	Wall temp.(K)	SOI (°CA)	EOI (°CA)
A	45	1200	0.1244	408	0.0657	2.627	400	-2.5	4.5
B	45	1200	0.1244	408	0.0657	2.627	400	2	10
C	45	1200	0.1244	408	0.0657	2.627	400	7	15

Table 3 Thermo-physical properties of DME and n-heptane

	DME	n-Heptane
Chemical formula	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
MW(kg/kmol)	46	100.203
Boiling Pt(°C)	120-130	98.4
Liquid phase density(kg/m <sup>3</sup> )	660	684
Lower heating value(KJ/kg)	6,870	44,926
Heat of vaporization(kJ/kg)	460-470	316
Kinetic viscosity(kg/ms)	0.25	0.4

DME의 열물성치를 간략히 비교하였다.

Fig. 1은 연료로 DME와 n-heptane를 분사하였을 때, 각각 다른 분사시기에 대한 실린더 내의 압력선도를 나타낸다. 같은 조건에서 n-heptane의 결과와 비교를 해보면, DME의 압력의 최고값이 더 낮게 나온다는 것을 확인할 수 있다. 이는 Table 3에서 볼 수 있듯이 동일한 질량이 분사되었을 때는 단위 질량당 발열량이 n-heptane이 더 크기 때문에 압력상승이 더 높게 일어나게 된다. 또한 CASE A, B, C 모두에서 DME가 먼저 점화가 일어나서 압력상승이 먼저 일어나고 있음을 알 수 있다.

분사시기에 따른 점화지연 시간은 각각의 분사시기에 따른 평균 스칼라 소산율과 평균온도를 나타낸 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 액체상의 연료가 분사

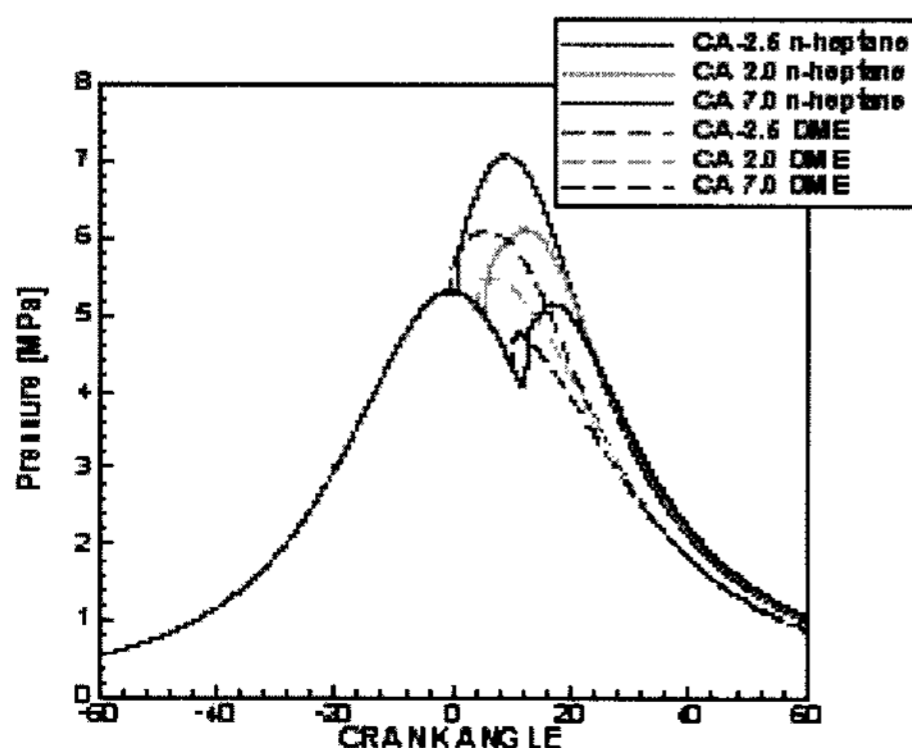


Fig. 1 Cylinder pressure histories for 3 injection timings

되는 초기상태에서는 스칼라 소산율이 빠르게 증가하고, 높은 증발율과 높은 속도의 분사과정에 의해 생성된 강한 난류에 의해 곧 최고값에 도달하게 됨을 알 수 있다.

화염편 모델에서 높은 스칼라 소산율을 가지는 경우 열의 확산 손실과 반응영역에서의 라디컬이 연소에 의한 열 방출과 라디컬 생성보다 더 크게 되며 화염은 꺼져있는 상태로 남아있다. 점진적으로 스칼라 소산율이 낮아지면 체류시간이 길어지고 화학반응이 일어나는 것이 가능하게 된다. 낮은 스칼라 소산율에서는 화학반응에 의한 열과 라디컬이 연속적으로 증가하기 때문에 확산손실이 작아지게 되어 혼합장에서 점화가 일어날 수 있다.<sup>13,14)</sup>

분사시기에 따른 스칼라 소산율의 최대값은 Case B의 경우가 가장 높고 분사지연이 가장 긴 Case C 그리고 조기분사인 Case A 순으로 나타남을 알 수 있다. 이는 착화전 압력을 포함한 연소실 조건, 난류 특성, 분무거동, 그리고 증발특성의 차이로부터 기인한 것으로 사료된다.

높은 분사 속도는 액적의 분열, 연료액적과 기체장 사이의 대류열전달, 액적의 증발 그리고 기체상의 난류를 증가시킨다. 결과적으로 이러한 높은 분사속도는 난류와 높은 증발율 그리고 혼합분율의 큰 구배에 의해 스칼라 소산율이 증가하게 되고 비평형 효과가 증가하게 된다.

초기 분사 기간 직후에 스칼라 소산율은 증발된 연료가 주변의 유동으로 퍼져나가고 난류 또한 소산되어 감으로 인해 점차적으로 감소하게 된다.

스칼라 소산율이 계속 저감되어 자발화가 일어나는 시점에 도달하게 되면, 확산에 의한 손실이 작아지게 되고 화학반응에 의해 생성된 열과 radical들이 계속적으로 증가하여 자발화가 일어나게 된다.

DME와 n-heptane의 스칼라 소산율을 비교해보면 모든 조건에서 DME의 스칼라 소산율이 큰 것을

알 수 있으며 이는 n-heptane에 비해 큰 DME의 증발률<sup>17)</sup>에 의한 것이다. 특히 분사초기에 DME는 n-heptane에 비해 현저히 높은 스칼라 소산율을 나타내고 있으며 자발화가 일어나는 시점과 자발화가 일어난 후에도 DME는 n-heptane에 비해 높은 스칼라 소산율을 유지하고 있는 것을 볼 수 있으며 DME는 증발율이 상대적으로 크기 때문에 분무침투깊이가 짧아지며 혼합기 유동장에서의 혼합분율의 구배가 크게 되기 때문이다. 또한 상대적으로 큰 스칼라소산율을 가지는 DME분무의 연소특성은 비평형효과에 더 민감하게 영향을 받을 것으로 사료된다.

Fig. 2에 n-heptane의 결과와 비교해서 DME의 점화지연특성을 도시하였다. SOI  $-2.5^{\circ}\text{CA}$ ,  $2^{\circ}\text{CA}$ ,  $7^{\circ}\text{CA}$ 일 때 DME의 점화지연시간은 각각  $-0.36^{\circ}\text{CA}$ ,  $4.10^{\circ}\text{CA}$ ,  $10.24^{\circ}\text{CA}$  이고 n-heptane의 점화지연시간은 각각  $0.78^{\circ}\text{CA}$ ,  $5.69^{\circ}\text{CA}$ ,  $12.33^{\circ}\text{CA}$ 으로 나타나고 있으며 DME의 경우가 빠른 증발율 및 합산소연료 특성으로 인하여 점화시기가 현저히 빨라짐을 알 수 있다.

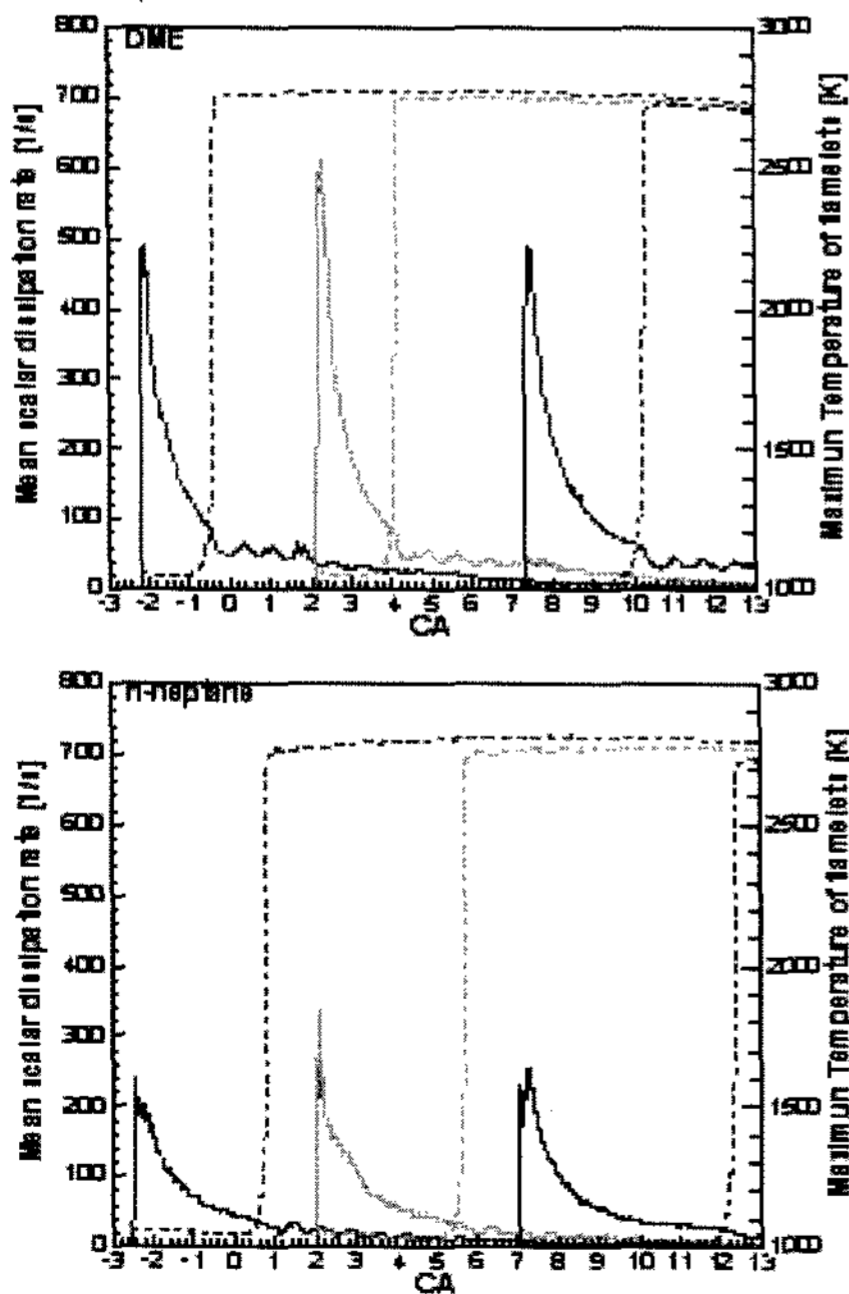


Fig. 2 Temporal evolution of the scalar dissipation rates (solid line) and the maximum temperature (dashed line) for the 3 injection timings (red line : Case A, green line : Case B, blue line : Case C)

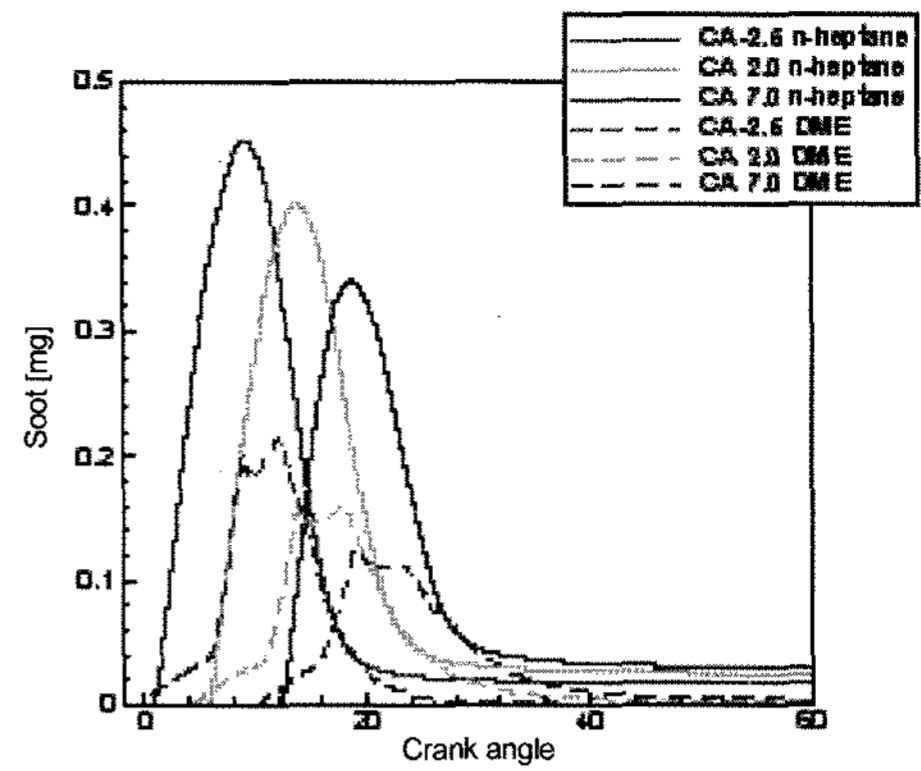


Fig. 3 Temporal evolution of soot generation for the 3 injection timings

Fig. 3에서는 DME와 n-heptane의 분사시기에 따른 Soot의 생성량을 도시하였다. 상대적 농후한 혼합기 상태에서 연소가 진행되는 DME가 합산소연료 특성 때문에 n-heptane에 비해 현저히 작은 양의 soot이 생성됨을 알 수 있다. 또한 DME의 경우에 먼저 점화가 일어나지만 soot의 생성은 더 늦게 생성되며 최대치에 도달한 이후 계속적으로 산화가 진행되어 최종적으로 배출되는 soot의 양은 거의 무시할 정도로 낮은 수준임을 알 수 있다.

Fig. 4는  $20^{\circ}\text{CA}$ 일 때 순간적인 soot의 체적 분율의 분포를 나타낸 것이다. 본 연구에서 soot생성을 예측하기 위해 Moss<sup>15)</sup>에 의해 제안된 모델을 사용하였다. 조기 분사된 경우는 DME에서는 거의 soot이 남아 있지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 점점 분사시기가 늦어질수록  $20^{\circ}\text{CA}$ 에서 DME의 경우에는 soot의 체적분율이 n-heptane인 경우보다 상대적으로 큰 값을 가지고 있으나 이는 분사시기의 지연으로 soot이 아직 산화되지 않은 때문이며 최종상태에는 DME 디젤엔진의 경우에는 거의 soot을 배출하지 않게 된다.

#### 4. 결론

- 1) 본 연구에서 개발한 고압증발모델과 상세화학 모델 기반의 Representative Interactive Flamelet 모델은 고온 고압의 정적연소실 및 직접분사식 디젤엔진내의 DME의 증발, 점화 및 난류연소특성을 대체로 잘 예측하였다.

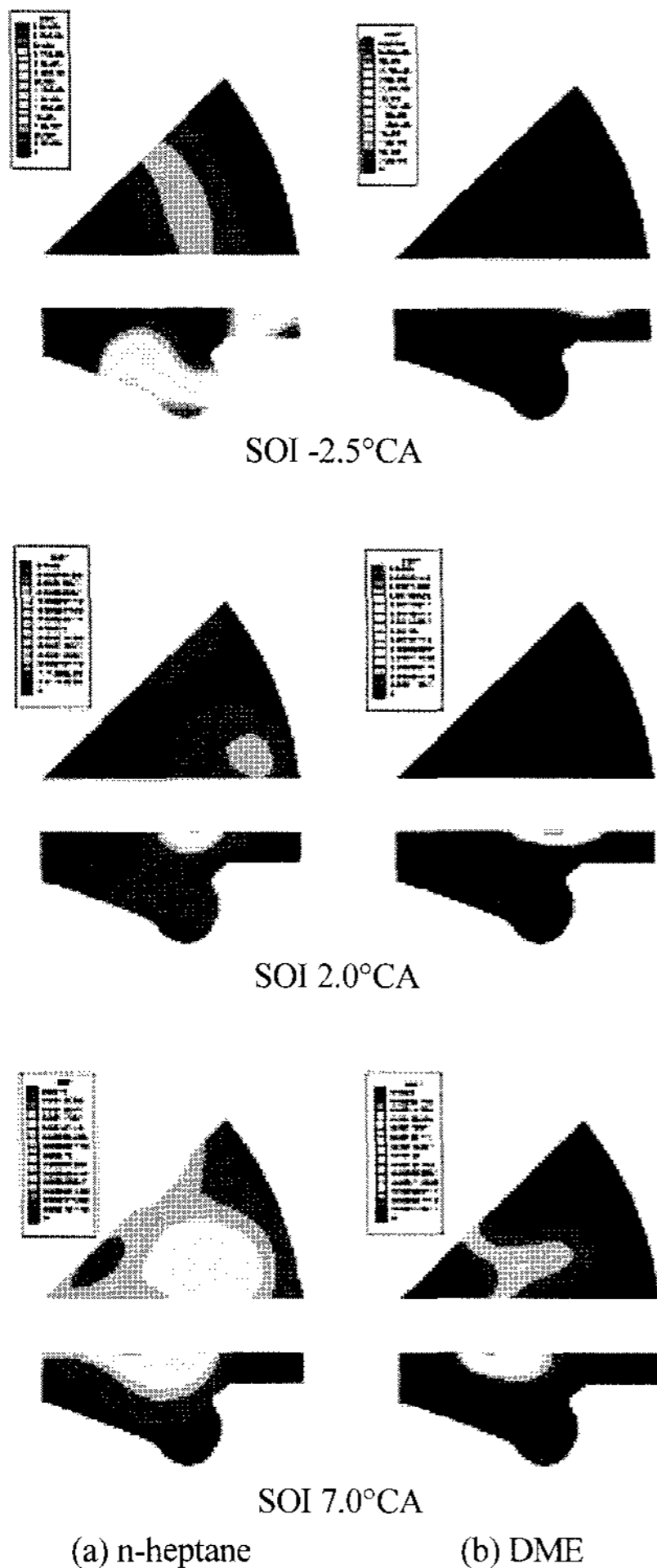


Fig. 4 Instantaneous contours of soot volume fraction at 20 CR

- 2) SOI가  $-2.5^{\circ}\text{CA}$ ,  $2.0^{\circ}\text{CA}$ ,  $7.0^{\circ}\text{CA}$  일 때는 DME의 압력의 최고값이 더 낮게 나오게 되며 이는 동일한 질량이 분사되었을 때는 단위 질량당 발열량이 n-heptane이 더 크기 때문이다.
- 3) 분사초기에 DME는 n-heptane에 비해 현저히 높은 스칼라 소산율을 나타내고 있으며 자발화가 일어나는 시점과 자발화가 일어난 후에도 DME는 n-heptane에 비해 높은 스칼라 소산율을 유지하고 있는 것을 볼 수 있으며 DME는 증발율이 상대적으로 크기 때문에 분무침투길이 짧아지며 혼합기 유동장에서의 혼합분율의 구배가 크게 되기 때문이다. 또한 상대적으로 큰 스칼라 소산율을 가지는 DME분무의 연소특성은 비평형효과에 더 민감하게 영향을 받을 것으로 사료

된다.

- 4) SOI  $-2.5^{\circ}\text{CA}$ ,  $2^{\circ}\text{CA}$ ,  $7^{\circ}\text{CA}$  일 때 DME의 점화지연 시간은 각각  $-0.36^{\circ}\text{CA}$ ,  $4.10^{\circ}\text{CA}$ ,  $10.24^{\circ}\text{CA}$  이고 n-heptane의 점화지연시간은 각각  $0.78^{\circ}\text{CA}$ ,  $5.69^{\circ}\text{CA}$ ,  $12.33^{\circ}\text{CA}$ 으로 나타나고 있으며 DME의 경우가 빠른 증발율 및 합산소연료 특성으로 인하여 점화시기가 현저히 빨라짐을 알 수 있다.
- 5) DME가 합산소연료 특성때문에 n-heptane에 비해 50% 이상 저감된 soot이 생성되며 DME가 먼저 점화가 일어나지만 soot의 생성은 DME가 더 나중에 생성된다는 것을 알 수 있다. 또한 DME의 경우에는 최종으로 배출되는 soot의 양은 거의 무시할 정도 낮은 수준임을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project (무.저공해자동차사업단)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## Reference

- 1) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Compression Ignition Delay (Physical + Chemical) of Dimethyl Ether - An Alternative Fuel for Compression - Ignition Engines," SAE 2003-01-0759, 2003.
- 2) HKK Corp., Environmental Business - DME Project, 2000 (available via <http://www.nkk.co.jp/en/environment>).
- 3) K. Wakai, K. Nishida, T. Yoshizaki and H. Hiroyasu, The 4th International Symposium COMODIA 98, Kyoto, Japan, pp.537-542, 1998.
- 4) N. Peters, "Laminar Diffusion Flamelet Models in Nonpremixed Turbulent Combustion," Prog. Energy Combust. Sci., Vol.10, pp.319-339, 1984.
- 5) C. Beatrice, P. Belardini, C. Bertoli, M. C. Cameretti and N. Cirillo, SAE 950086, 1995.
- 6) Y. M. Kim, H. M. Shang and C. P. Chen, KSME Int. J., Vol.8, No.4, pp.364-374, 1994.
- 7) P. J. O'Rourke, Los Alamos National Laboratory Report LA-9069-T, 1981.
- 8) B. Abramzon and W. A. Sirignano, Proceedings of 2nd ASME-JSME Thermal Enginee-

- ring Joint Conference, Vol.1, pp.11-18, 1987.
- 9) R. C. Reid, J. M. Prausnitz and B. E. Poling, *The Properties of Gases & Liquids*, 4th Edn, McGraw - Hill, 1987.
- 10) Y. Yu, S. K. Kim and Y. M. Kim, "Presumed pdf Modeling of Turbulent Spray Combustion," *Combustion Science and Technology*, Vol.168, pp.85-112, 2001.
- 11) F. X. Demoulin and R. Borghi, "Numerical Modeling for Autoignition and Combustion Processes of Fuel Sprays in High-Pressure Environment," *Combust. Sci. and Tech.*, 2000.
- 12) LLNL Site <http://www-cmls.llnl.gov/>
- 13) U. Pfahl, K. Fieweger and G. Adomeit, 26th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.781-789. 1996.
- 14) S. K. Kim, J. K. Lee, Y. M. Kim and J. H. Ahn, *KSME International Journal*, Vol.16, No.7, pp. 1009-1018, 2002.
- 15) J. B. Moss, C. D. Stewart and K. J. Young, "Modeling Soot Formation and Burnout in a High Temperature Laminar Diffusion Flame Burning Under Oxygen Enriched Conditions," *Combustion and Flame*, Vol.101, pp.491-500, 1995.
- 16) H. Pitsch and N. Peters, "Investigation of the Ignition process of Sprays under Diesel Conditions Using Reduced n-Heptane Chemistry," SAE 982464, 1998.
- 17) J. Yu, J. Lee and C. Bae, "Dimethyl Ether (DME) Spray Characteristics Compared to Diesel in a Common-rail Fuel Injection Equipment," SAE 2002-01-2898, 2002.