

## Dimethyl-ether (DME) 연료의 분무, 연소 및 배기 특성에 관한 실험 및 수치해석적 연구

박수한\* · 김형준\* · 이창식†

### A Study on the Spray, Combustion, and Exhaust Emission Characteristics of Dimethyl-ether (DME) by Experiment and Numerical Analysis

Su Han Park, Hyung Jun Kim, and Chang Sik Lee

**Key Words:** dimethyl-ether (DME, 디메틸 에테르), spray tip penetration (분무 도달 거리), soot (매연), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>, 질소산화물), KIVA code

#### Abstract

The aim of this work is to investigate the spray and combustion characteristics of dimethyl-ether (DME) at various injection conditions. The spray characteristics such as spray tip penetration and spray cone angle were experimentally studied from the spray images which obtained from the spray visualization system. Combustion and emissions characteristics were numerically investigated by using KIVA-3V code coupled with Chemkin chemistry solver. From these results, it revealed that DME spray had a shorter spray tip penetration and wider spray cone angle than that of diesel spray due to the low density, low surface tension, and fast evaporation characteristics. At the constant heating value condition, DME fuel showed higher peak combustion pressure and earlier ignition timing, because of high cetane number and superior evaporation characteristics. In addition, the combustion of DME exhausted more NO<sub>x</sub> emission and lower HC emission due to the active combustion reaction in the combustion chamber. The result shows that DME had a little soot emission due to its molecular structure characteristics with no direct connection between carbons.

#### 1. 서 론

에너지 자원의 확보와 환경 보전에 대한 관심이 높아지면서 내연기관에 의한 대기 오염은 해결해야 할 중요한 환경문제가 되고 있다. 이에 따라 세계 각국은 자동차 등으로부터 배출되는 배기가스에 대한 규제를 강화하고 있으며, 배기가스 저감을 위한 새로운 연소 기술(균일 예혼합 연소, 저온 연소 등), 대체 에너지(바이오디

젤, dimethyl-ether, 알콜계 재생연료 등) 연구 및 개발에 많은 인력과 자본을 투입하고 있다. 스파크 점화 기관보다 열효율이 높은 디젤 엔진의 주 연료인 경유를 대체할 연료로 바이오디젤과 디메틸에테르(dimethyl-ether, DME)가 최근 주목 받으면서 많은 연구가 진행되고 있다<sup>(1,2)</sup>. DME는 일산화탄소와 수소를 주성분으로 하는 합성가스로부터 메탄올을 합성하고 메탄올의 탈 수소화 반응에 의해 만들어진다. DME는 기존 경유에 비해 세탄가가 높으며, 바이오디젤과 마찬가지로 연료 내 약 35%의 산소를 함유하고 있다<sup>(3,4)</sup>. 또한, 탄소 간 직접 결합이 없는 가장 간단한 에테르 구조로써 매연의 배출이 거의 없는 청정 연료이다. 또한, DME의 낮은 끓는점과 증기압은 액상 DME 연료가 연소실 내로 분사될 때 빠르게 증발하여 연소실 벽면 젖음 현상이 적어져 HC의

(2010년 1월 6일 접수~2010년 2월 25일 심사완료, 2010년 3월 3일 게재확정)

\*한양대학교 대학원 기계공학과

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : cslee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-5286

배출량이 낮은 장점이 있다. 비록 DME 연료가 낮은 연소 엔탈피, 낮은 점성, 낮은 탄성계수 등의 해결해야 할 부분들이 있지만, 환경문제와 대체 에너지 확보의 측면에서 기존 경유를 대체할 수 있는 차세대 미래 에너지임에는 틀림없다. 이러한 이유로 많은 연구자들에 의해 디젤엔진에서 DME 연료의 분무특성 뿐만 아니라 연소 및 배기 특성 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Suh 등<sup>(5)</sup>은 DME의 미립화 특성에 대한 연구에서 DME 연료의 낮은 표면장력과 빠른 증발 특성으로 인해 디젤 연료보다 작은 액적의 크기를 가진다고 결론내렸으며, Sidu 등<sup>(6)</sup>은 DME 분무 특성에 대한 분사 조건과 노즐 형상의 영향에 대해 발표하였다. 그들은 DME 연료는 디젤 연료에 비해 우수한 미립화 특성과 증발 특성으로 인해 분무 도달 거리는 짧아지고, 분무각은 다소 커지는 것으로 보고하였다. 한편, Park<sup>(7)</sup>은 DME와 n-heptane을 이용해 균일 예혼합 압축착화 (homogeneous charge compression ignition, HCCI) 엔진의 최적 운전 조건에 대한 수치해석 연구를 수행하여, 연소 및 배기특성에 대한 당량비와 최고 연소 온도의 영향을 분석하였다. 연구결과에서 DME는 n-heptane에 비해 soot, HC, NO<sub>x</sub>의 배출량은 낮지만, CO의 배출이 높은 것으로 지적하였으며, DME를 HCCI 엔진에 적용했을 때, 더 넓은 운전 영역을 확보 할 수 있는 것으로 보고하였다. 이외에도 DME 연료에 대한 많은 연구 결과들이 꾸준히 보고되고 있다<sup>(8,9)</sup>.

본 연구에서는 다양한 분사 조건에서 DME 연료의 분무 특성을 디젤 연료와 비교하고, KIVA-3V 코드를 이용하여 DME 연료의 연소압력 및 열 발생율과 같은 연소특성, HC, soot, NO<sub>x</sub> 등의 배기특성을 비교분석하여 DME 연료의 분무 및 연소, 배출물 특성을 규명하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

DME 연료의 분무 특성을 분석하기 위해 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였다. DME 분무 가시화 장치는 크게 DME 연료 공급 장치, 자료 분석 장치, 분무 영상 취득 장치로 구성하였다. DME 연료는 액상 DME 연료를 고압펌프와 커먼레일 시스템을 이용하여 인젝터로 공급하였다. 인젝터는 분공크기(D, diameter)가 0.3 mm 이고, 오리피스 길이(L, orifice length)가 0.8 mm(L/D=2.67) 인 단공 인젝터를 사용하였으며, 인젝터 드라이버

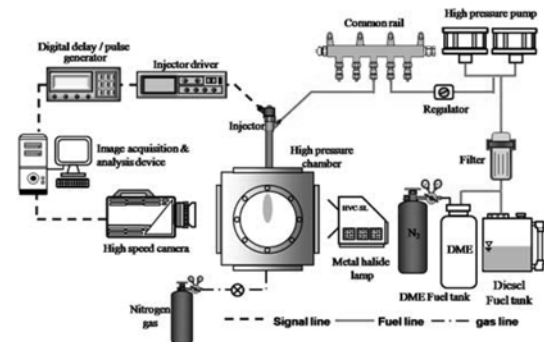


Fig. 1 Schematic of the fuel spray visualization system

Table 1. Specification of high speed camera and light source

High speed camera	
Frame rate	10,000 fps
Shutter speed	1/10,000 sec
Resolution	256×603
Light source	
Light source	Metal halide
Power	150W
Cooling method	Air-cooling

(TEMS, TDA-3200H)를 이용하여 통전기간 등을 제어하였다. 인젝터로부터 분사된 DME 연료의 가시화는 메탈-할라이드 램프(Photron, HVC-SL)를 광원으로 하는 고속카메라(Photron, Fastcam APX-RS)를 이용하였다. 고속카메라와 광원의 제원은 Table 1과 같다.

촬영된 분무 영상은 영상 분석 장치가 장착된 컴퓨터에 저장되어 분석되었다. 인젝터를 제어하기 위한 인젝터 드라이버로부터의 제어 신호와 고속 카메라의 셔터 신호는 디지털 신호 분석기 (Berkeley Nucleonics Corp., Model 555)를 이용하여 동기화하였다.

### 2.2 실험 방법

본 연구에 사용되는 DME 연료는 상온, 상압에서 기체 상태이므로 액상의 DME를 고압 펌프로 공급하기 위해 질소가스로 약 0.5 MPa 이상 가압하였다. 또한, 고압의 분위기를 형성하기 위해 최대 4.0 MPa까지 가압할 수 있는 고압 체임버 내를 질소 가스로 가압하였으며 정확한 실험을 위해 1회 분사 후 DME 잔류 연료 및 질소가스를 제거한 후 실험을 반복 수행하였다.

고속카메라를 이용해 얻어진 분무 영상은 Fig. 2와 같

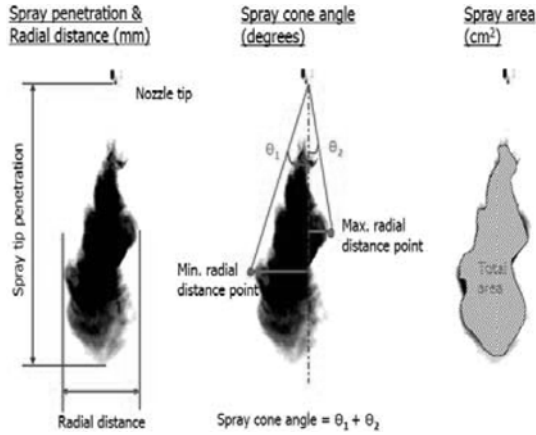


Fig. 2 Definition of the spray characteristics from the spray image

Table 2. Experimental and calculation conditions

Spray (Exp.)	
Injection pressure ( $P_{inj}$ )	50 MPa, 70 MPa
Ambient pressure ( $P_{amb}$ )	1 MPa, 3 MPa
Energizing duration ( $t_{eng}$ )	1.5 ms
Fuel and ambient gas temperature ( $T_{fuel}$ , $T_{amb}$ )	290K
Combustion and exhaust emissions (Cal.)	
Injection pressure ( $P_{inj}$ )	50 MPa, 70 MPa
Engine speed	1500 rpm
Injection mass ( $m_{fuel}$ )	8 mg (diesel) 11.9 mg (DME)
Injection timing ( $T_{inj}$ )	BTDC 8°
Fuel temperature ( $T_{fuel}$ )	290K

은 방법으로 분무 도달 거리, 분무각을 측정하였다. 분무 도달 거리는 인젝터의 노즐 팁으로부터 정지된 기체 속으로 분사되는 디젤 및 DME 연료의 최대 도달 거리로 정의되며, 분무각은 분무의 좌우 반경방향 최대 지점과 노즐팁이 이루는 사이각으로 정의하였다. 자세한 실험 조건은 Table 2에 나타내었다.

### 3. 디젤 및 DME 연소 및 배기특성 해석 모델

본 연구에서는 디젤 및 DME 분무 가시화 결과를 바

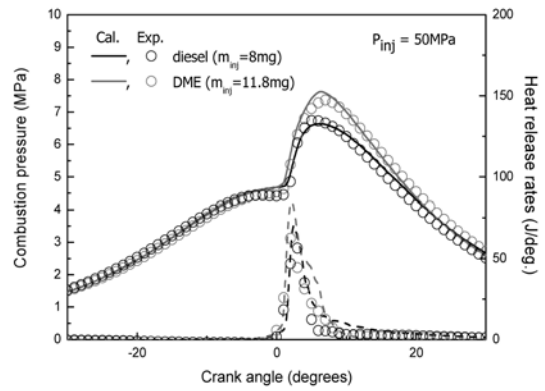


Fig. 3 Comparison between the experimental and numerical results for the results validation

탕으로 하여 KIVA-3V 코드를 사용하여 연소 및 배기특성을 해석하였다. 일반적으로 KIVA 코드에서 DME 연료는 기체상태의 물성치 정보만이 연료 라이브러리에 포함되어 있어 Teng 등<sup>(3)</sup>이 제안한 온도에 따른 액상의 물성치를 추가하였다. 연소실내의 유동과 연료의 미립화 특성을 해석하기 위하여 RNG k-ε 모델<sup>(10)</sup>과 KH-RT 분열 모델<sup>(11)</sup>을 사용하였다. 또한, 착화 및 연소과정을 해석하기 위하여 Chemkin chemistry solver<sup>(12)</sup>를 KIVA 코드와 결합시켜 연료의 산화과정을 해석하였으며 디젤의 경우에는 축소화학반응식인 ERC n-heptane mechanism(36species, 74reactions)<sup>(13)</sup>과 DME는 상세화학반응식(79species, 351 reactions)<sup>(14)</sup>을 사용하였다. 디젤과 DME 연료의 연소과정 중 발생하는 배기 배출물을 예측하기 위하여 NO<sub>x</sub>와 soot는 축소반응메커니즘인 GRI NO mechanism(4species, 9reactions)과 현상학적 soot 모델<sup>(15)</sup>을 사용하여 해석하였으며 그 외의 배출물은 상세화학반응식에 포함되어 있어 추가적인 모델을 사용하지 않았다. 해석에 사용된 연소실은 압축비 17.8이며 계산 격자는 6공 인젝터를 고려하여 60°의 부채꼴 형태로 생성하였다. 디젤과 DME 연료는 동일한 발열량에 따라 분사량을 서로 다르게 하였으며(Table 2), 흡기밸브가 닫히는 시점인 BTDC 128°부터 배기밸브가 열리는 시점인 ATDC 172°까지 계산을 수행하였다. 또한, 초기조건인 연소실의 압력과 온도는 0.1 MPa과 320K로 설정하였다.

Figure 3에서 분사압력 50 MPa에서 디젤과 DME연료의 연소특성에 대한 실험결과와 수치해석결과를 비교하여 수치해석 결과를 검증하였다. 그림에서 보는 바와 같이 연소압력곡선은 대체로 일치하는 경향을 나타냈으나

, 열 발생을 결과에서는 해석값이 약간 높은 결과를 나타내었다. 이것은 해석결과의 열 발생율은 연소 시 발생하는 연소실 벽면으로의 열손실 등을 고려하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 DME연료의 분무 발달 과정 및 분무 특성

Figure 4는 동일한 분사조건(분사압력 : 70 MPa, 분위기 압력 : 3 MPa)에서 디젤 및 DME 연료의 분무 발달 과정을 비교하고, 분사압력 및 분위기압력 변화에 대한 DME의 분무 성장을 나타낸 것이다. 인젝터 통전시간은 1.5 ms로 일정하게 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 3 MPa 분위기 압력 하에서 DME와 디젤의 분무 발달 형태는 유사하였으며, 분무 도달 거리는 낮은 밀도로 인해 다소 짧아지는 것을 확인할 수 있었다<sup>(6)</sup>. 또한, 분사 후 3.0 ms(하단)에서 디젤에 비해 노즐 팁 부근에서의 증발이 활발한 것을 확인할 수 있었다. DME는 동일한 분위기 압력 하에서 분사압력이 증가하게 되면 분무 도달 거리가 다소 커지는 것을 확인할 수 있었으며, 증발 특성은 유사하였으나 분사량의 증가(약 18.6 mg/injection → 약 24.1 mg/injection)로 인해 분무가 넓게 분포하는 것을 관찰할 수 있었다. 한편, 동일한 분사압력 하에서 분위기압력이 낮아지면 분무 발달을 억제하는 요소의 감소로 인해 분무 발달 거리는 길어지게 되고, 분무 외

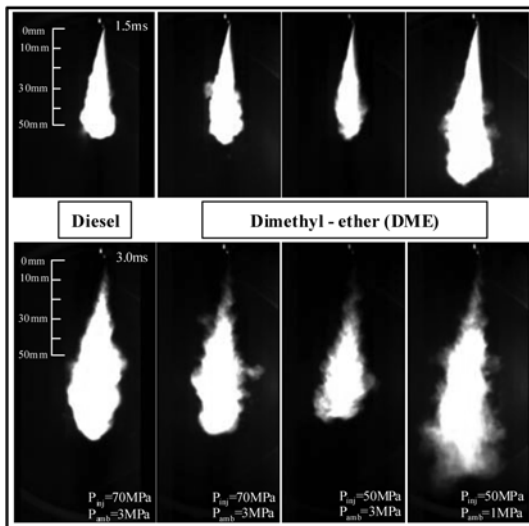


Fig. 4 Spray development process of DME and diesel fuel at  $t_{eng}=1.5$  ms

곽으로 부터의 증발은 보다 활발하게 나타났다.

Figure 4의 분무 영상을 바탕으로 디젤 및 DME 연료에 대한 정량적인 분무 특성 분석을 Fig. 5에 나타내었다. 분위기 압력이 동일할 때, 디젤 연료는 높은 밀도로 인해 DME 보다 빠른 분무의 성장을 보였으며, 분무 도달 거리 또한 길게 나타났다.

반면, 반경방향으로의 분무 발달은 약해 분무각은 디젤 보다 낮게 나타났다. DME 연료의 분사압력을 높이기 되면(50 MPa → 70 MPa) 유량의 증가 등으로 인해 분무 도달 거리는 증가하게 되나, 분무각에는 크게 영향을 주지 못하였다. 반면, 분위기 압력의 감소는 주변 기체의 밀도 감소로 인해 DME 분무 도달 거리는 다소 증가했으며, 분무각 역시 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 분무 후반부에서 분무각은 약간의 증감하는 경향을 나타내는데 이것은 분무 운동량의 감소와 주변 기체의 유입량의 변화에 기인한 것으로 판단된다.

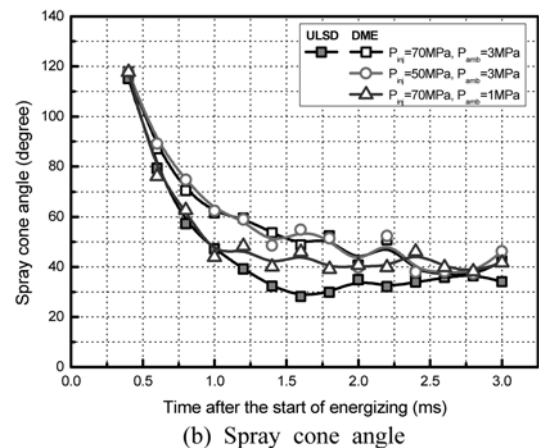
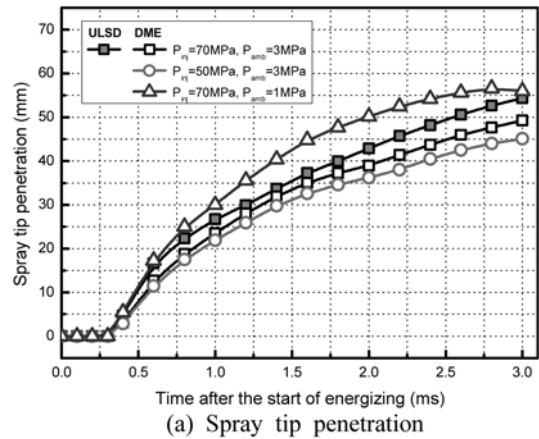


Fig. 5 Spray characteristics of DME fuel at different injection conditions

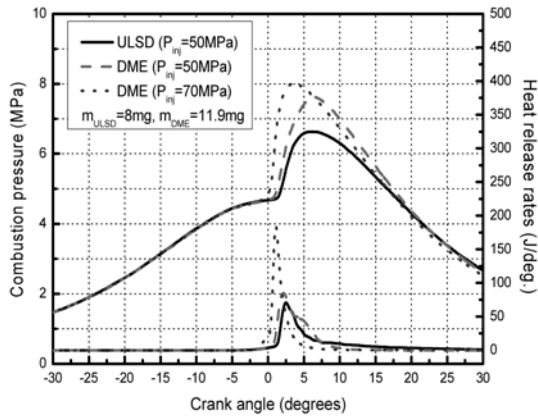
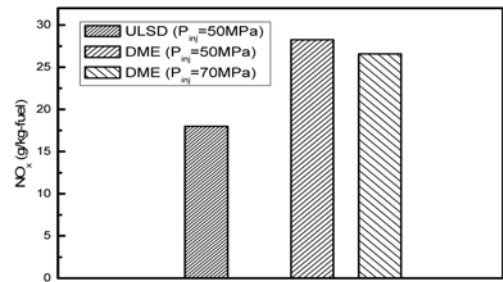


Fig. 6 Calculated combustion pressure and heat release of diesel and DME fuel at the same heating value conditions ( $T_{inj}$ =BTDC 8°)

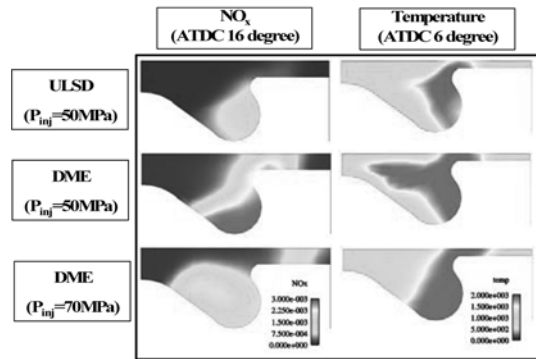
4.2 DME 연료의 연소 및 배기 특성

Figure 6은 분사시기가 BTDC 8°일 때, 디젤과 DME 연료의 연소 압력 및 열발생을 특성을 나타낸 것이다. 디젤과 DME의 분사량은 각각 8 mg, 11.9 mg으로 하여 두 연료의 발열량이 동일하도록 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 DME는 높은 세탄가와 우수한 증발 특성으로 인해 디젤 연료에 비해 빠른 착화 및 높은 최고 연소압력을 나타냈으며, 열발생을 역시 다소 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 반면, DME의 빠른 증발특성은 후 연소 영역의 감소에 영향을 준 것으로 판단된다. 후 연소 영역의 감소로 인해 최고 연소압력 이후 연소압력은 디젤에 비해 급격히 감소하였으며, 이는 HC 등 배기가스 발생에 영향을 줄 것으로 판단된다. 한편, DME 연료의 분사압력이 증가하면, 동일한 양을 분사하기 위해 분사시간이 짧아지게 되어 전체적인 연소기간이 감소하는 결과를 나타냈다. 이로 인해 최고 연소압력 및 최고 열발생율의 발생 시기는 앞당겨 지고, 그 값 또한 증가하였다.

DME의 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 Fig. 7(a)에 나타내어 디젤 연료와 비교하고, 분사압력의 변화에 따른 특성을 비교하였다. DME 연료는 디젤에 비해 착화가 빠르고, 연료 내 산소를 포함하고 있어 활발한 연소 작용이 일어난다. Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 DME는 연소실 내에서 고르게 높은 온도 영역을 나타내는 반면, 디젤은 피스톤 벽면 영역을 중심으로 높은 온도 영역을 나타내며, 보울 (bowl) 가장 안쪽은 분사된 연료의 벽면 젖음(wall wetting) 현상으로 인해 국부적으로 낮은 온도 영역을 나타



(a) NO<sub>x</sub> emission



(b) NO<sub>x</sub> and temperature distribution

Fig. 7 NO<sub>x</sub> and temperature distribution in the combustion chamber

내는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 고온 영역의 분포에 따라 DME의 NO<sub>x</sub> 배출량은 디젤보다 높게 나타난다. 한편 DME의 분사압력이 높을 때, NO<sub>x</sub>는 다소 낮게 배출되는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 NO<sub>x</sub>의 배출량은 분사된 연료가 고온의 연소실 내 머물러 있는 시간에 영향을 받기 때문에<sup>(16)</sup>, 분사압력의 증가에 따라 분사시간이 짧아지고 Fig. 6의 열발생을 곡선에서와 같이 예혼합 연소 구간 (premixed combustion phase)이 짧아졌기 때문으로 판단된다.

Figure 8은 DME의 soot와 HC의 배출량을 비교한 것이다. DME는 분자 구조 내 탄소간 직접 연결이 없기 때문에 soot의 배출량은 거의 없는 것이 확인되었다. 압축착화 엔진에서 연료와 공기의 혼합기가 너무 농후하거나 희박해서 착화 혹은 화염 전파가 잘 일어나지 않으면, 탄화수소가 미연상태로 남게 되는데 이것이 팽창과정에서 HC로 배기된다<sup>(17)</sup>. 또한, HC는 분사가 종료된 후 sac 체적 내에 남아 있는 연료가 분출되는 경우에도 생성된다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 DME는 디젤에 비해 분무 도달 거리가 짧고, 증발특성이 좋아 벽면 젖음

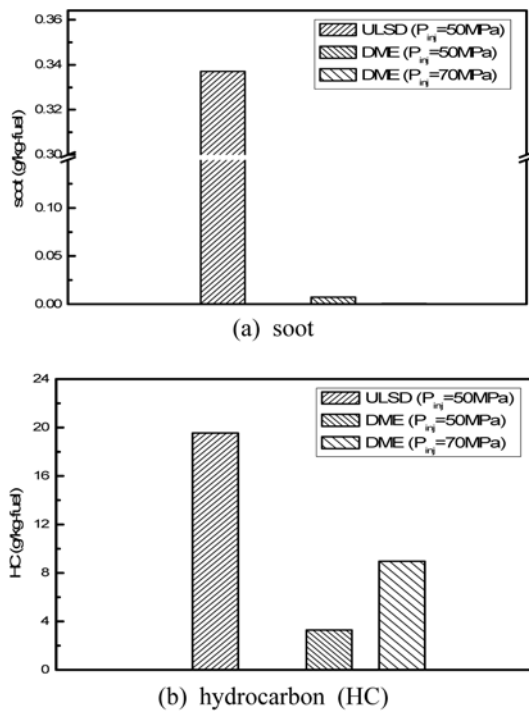


Fig. 8 Comparison of the exhaust emissions characteristics of diesel and DME fuels at different injection conditions

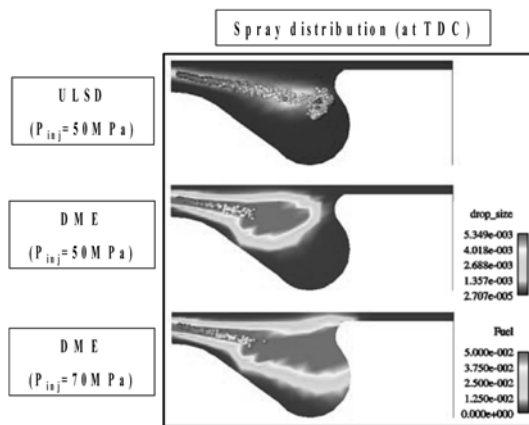


Fig. 9 DME and diesel spray distribution in the combustion chamber ( $T_{inj}$ =BTDC 8°)

현상이 나타나지 않아 HC의 배출 또한 매우 낮은 것으로 판단된다.

Figure 9는 연소실 내 DME 분무의 분포를 나타낸 것으로 DME연료는 분사되면서 증발도 함께 일어나 분무 주변의 증발된 연료가 넓게 분포하였으며, 빠른 증발로

인해 벽면까지 도달하는 액상 DME 분무는 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 한편, 디젤은 증발율이 낮아 분사된 연료가 피스톤의 벽면까지 도달하여 벽면 충돌이 발생할 것으로 예상된다. 분사압력이 70 MPa일 때의 DME 분무는 빠른 분무 속도로 인해 분사 후 동일 시간에서 분사압력 50 MPa의 DME 분무보다 넓은 영역에서 분포하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구는 DME 연료의 분무 및 연소, 배기 특성을 다양한 조건에서 비교, 분석하였다. 실험 및 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) DME는 낮은 밀도 및 표면장력과 우수한 증발 특성으로 인해 디젤 연료에 비해 분무 도달 거리는 짧아지고, 분무각은 증가하였다. 분사압력의 증가로 분무 도달 거리는 다소 증가하였으나, 분무각에는 크게 영향을 미치지 못하였다. 또한, DME는 분위기 압력이 낮을수록 분무 외곽에서부터 활발한 증발현상이 일어났다.

2) 동일 발열량 조건에서 DME는 높은 세탄가와 우수한 증발특성으로 인해 착화가 빠르고, 주변 공기와의 혼합기 형성이 원활해 최고 연소 압력 및 최고 열발생율이 디젤보다 높게 나타났다. DME의 분사압력이 증가하게 되면 분사시간 및 연소시간이 감소하게 되어 최고 연소압력과 열발생율이 크게 증가한다.

3) DME는 연소실 내 활발한 연소 작용으로 연소시 온도는 증가하고, 이로 인해 NO<sub>x</sub>의 배출량은 크게 증가하였다. 또한, DME는 탄소간의 결합이 없기 때문에 soot가 거의 발생하지 않았다. 또한, DME는 HC의 배출이 매우 낮게 나타났다. 이것은 DME 연료의 짧은 분무 도달 거리와 우수한 증발 특성으로 인해 벽면 젖음 현상이 거의 없기 때문이다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 인력 양성사업 및 클린 신연료 동력시스템 개발 사업과 환경부 Eco-STAR project(무저공해 자동차 사업단), 2단계 두뇌한국21 사업의 지원으로 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) J. Yu, J. Lee, and C. Bae, "Dimethyl ether (DME) spray characteristics compared to diesel in a common-rail fuel injection system", SAE technical paper, SAE2002-01-2898, 2002.
- (2) H. J. Kim, S. H. Park, H. K. Suh, and C. S. Lee, "Atomization and evaporation characteristics of biodiesel and dimethyl ether compared to diesel fuel in a high-pressure injection system", Energy&Fuels, Vol. 23, 2009, pp.1734~1742.
- (3) H. Teng, J. C. McCandless, and J. B. Schneyer, "Thermodynamics properties of dimethyl ether - An alternative fuel for compression-ignition engines", SAE technical paper, SAE 2004-01-0093, 2004.
- (4) C. Arcoumanis, C. Bae, R. Crookes, and E. Kinoshita, "The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression- ignition engines: A review", Fuel, Vol. 87, 2008, pp.1014~1030.
- (5) H. K. Suh, S. W. Park, and C. S. Lee, "Atomization characteristics of dimethyl ether fuel as an alternative fuel injected through a common-rail injection system", Energy & Fuels, Vol. 20, 2006, pp.1471~1481.
- (6) X. Sidu, Y. Mingfa, and X. Junfeng, "An experimental investigation on the spray characteristics of dimethyl ether (DME)", SAE technical paper, SAE 2001-01-0142, 2001.
- (7) S. W. Park, "Numerical study on optimal operating conditions of homogeneous charge compression ignition engines fueled with dimethyl ether and n-heptane", Energy & Fuels, Vol. 23, 2009, pp. 3909~3918.
- (8) M. Yao, and J. Qin, "Simulating the homogeneous charge compression ignition process using a detailed kinetic model for dimethyl ether (DME) and methane dual fuel", SAE technical paper, SAE 2004-01-2951, 2004.
- (9) M. Y. Kim, J. H. Lee, and C. S. Lee, "Combustion characteristics and NO emissions of a dimethyl-ether fueled premixed charge compression ignition engine", Energy & Fuels, Vol. 22(6), 2008, pp.4206~4212.
- (10) Z. Han and R. D. Reitz, "Turbulence modeling of internal combustion engines using RNG k-ε models", Combustion Science and Technology, Vol. 106, 1995, pp. 267~295.
- (11) J. C. Beale and R. D. Reitz, "Modeling spray atomization Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model", Atomization and Sprays, Vol. 9, 1999, pp. 623~650.
- (12) R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "CHEMKIN-II: a fortran chemical kinetics package for the analyses of gas phase chemical kinetics", Sandia Report, 1989, SAND 89-8009.
- (13) A. Patel, S. C. Kong, and R. D. Reitz, "Development and validation of a reduced reaction mechanism for HCCI engine simulations", SAE technical paper, SAE 2004-01-0558, 2004.
- (14) H. J. Curran, S. L. Fischer and F. L. Dryer, "The reaction kinetics of dimethyl ether. II: low temperature oxidation in flow reactors", International Journal of Chemical Kinetics, Vol. 32, 2000, pp. 741~759.
- (15) S. C. Kong, Y. Sun, and R. D. Reitz, "Modeling diesel spray flame lift-off, sooting tendency and NOx emissions using detailed chemistry with phenomenological soot model", J. Eng. Gas Turb. Pow., Vol. 129, 2007, pp.252~260.
- (16) R. Egnell, "Comparison of heat release and NOx formation in a DI diesel engine running on DME and diesel fuel", SAE technical paper, SAE 2001-01-0651, 2001.
- (17) J. B. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals", McGraw-Hill, 1988.