

# 커먼레일 디젤 인젝터에서 연료 분사 및 분위기 압력이 DME 분무 특성에 미치는 영향

김형준\* · 박수한\* · 이창식†

## Effect of High Injection Pressure and Ambient Pressure on the DME Spray Characteristics Injected Through a Common-rail Diesel Injector

Hyung Jun Kim, Su Han Park and Chang Sik Lee

**Key Words:** Ambient pressure(분위기 압력), Diesel injector(디젤 인젝터), Dimethyl ether(DME), High pressure injection (고압 분사), Spray characteristics(분무 특성)

### Abstract

The aim of this investigation is to study the effect of the high injection pressure on the dimethyl ether (DME) spray characteristics injected through a common-rail diesel injector under various ambient pressures. In order to investigate the effect of the injection pressure and ambient condition, the common-rail injection system with two high pressure pumps and high pressure chamber pressurized up to 40 bar were used, respectively. Spray images of DME fuel obtained from a visualization system composed of high speed camera and two metal halide lamps as the light source. From the obtained images, the spray behaviors such as a spray development process, spray tip penetration, spray width, and spray cone angle were measured for analyzing the DME spray characteristics under various experimental conditions. It was found that the spray development slowed as the ambient pressure increased and spray tip penetration at injection pressure of 90 MPa is longer than that at 50 MPa. In addition, the spray width at the end stage of injection decreased under the atmospheric conditions due to the evaporation property of DME fuel, and DME spray shows narrow spray cone angle according to the injection pressure increased.

### 기호설명

- $P_{amb}$  : ambient pressure
- $P_{inj}$  : injection pressure
- $t_{asoc}$  : time after the start of the energizing

### 1. 서 론

직접분사식 디젤엔진은 연료를 실린더 내에 직접 분사하기 때문에 분사된 연료의 실린더 벽면에 충돌하기 전까지의 분무특성인 연료의 미립화, 분무길이, 분무각 등은 연소특성과 엔진 성능에 많은 영향을 미친다. 자동차 수요의 지속적인 증가로 인해 자동차로부터 나오는 배출가스를 저감하기 위하여 고압 커먼레일 시스템, 다양한 분사방식, 배기가스 후처리 장치, 새로운 연소 기술 등에 대한 연구개발이 지속적으로 수행되고 있다. 이러한 기술개발 이외에도 디젤연료를 대체할 수 있는 대체연료를 이용한 배기가스를 저감에 관한 연구들도 활발히 진행되고 있다. 다양한 대체연료 중 디메틸 에테르

(2009년 3월 16일 접수 ~ 2009년 6월 26일 심사완료)

\*한양대학교 대학원 기계공학부

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : cslee@hanyang.ac.kr

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

(dimethyl ether, DME)는 연료 내 산소를 디젤보다 많이 함유하고 있는 청정연료로서 DME는 천연가스 및 석탄과 같은 여러 종류의 화석연료뿐만 아니라 재생 가능한 원료와 쓰레기 등을 이용하여 제조가 가능하다. 이러한 DME는 분자구조가 가장 간단한 에테르( $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ )로서 55-60정도의 비교적 높은 세탄가와 낮은 자발화 온도 디젤에 비해 낮은 발열량을 가지는 것이 특징이다. 또한, DME연료의 연소 시 탄소-탄소 결합이 없어 입자상 물질의 배출이 매우 낮으며 배기가스 재순환을 통해 NOx의 저감도 가능하다. 그러나 연료공급장치에 사용되는 일반적인 재질인 천연고무나 합성고무 등은 DME연료와 접촉할 경우 팽창하거나 용해되기 때문에 연료 공급 시스템의 수정이 필요하다. 따라서, DME연료의 연소와 분무특성은 디젤연료와 비교하여 많은 상이한 연료 물성 특성들이 있어 DME 연료를 디젤엔진에 적용하기 위하여 이에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

커먼레일 디젤 분사 시스템을 가지는 디젤엔진에서 DME연료를 적용하여 분무 및 연소특성에 관한 연구는 Kim 등<sup>(1)</sup>에 의하여 수행되었다. 그들은 DME연료의 분무 도달 거리는 디젤연료에 비하여 짧고 연소특성에서는 빠른 점화시기와 짧은 연소시간을 가진다고 보고하였다. Gui 등<sup>(2)</sup>은 직접분사식 디젤엔진에 DME연료를 분사하여 연소 및 배기특성에 관한 실험 및 수치해석적 연구를 수행하였으며 DME연료의 연소특성은 디젤연료보다 낮은 최대연소압력과 연소압력상승률을 가지며 점화지연기간이 짧아진다고 보고하였다. Kim 등<sup>(3)</sup>은 단기통 디젤엔진에서 DME연료와 디젤연료의 연소 및 배기 특성에 관한 실험적 연구를 수행하여 NOx배출물은 DME연료의 연소시 디젤보다 높았으나 CO와 HC는 크게 저감된다고 하였다.

DME의 연소 및 배출물 특성 이외에도 연료 물성 및 분무 특성에 관한 연구도 활발히 연구되고 있으며 Teng 등<sup>(4,5)</sup>은 온도에 따른 액상 DME의 열역학적 특성들을 기존의 화학식과 물이론을 바탕으로 해석되었다. 밀도, 표면장력, 증발잠열, 점도 등은 연료분무와 연소 및 증발을 체계적으로 해석하기 위하여 도표화 하였다. Suh 등<sup>(6)</sup>은 디젤연료와 DME의 분무 특성을 비교하였으며 디젤연료의 분무발달이 DME연료에 비하여 분무 폭이 넓고 빠르게 진행되며 DME분무가 디젤분무보다 좋은 미립화 성능을 나타내는 것으로 보고하였다. 바이오디젤, DME, 바이오디젤-에탄올 혼합연료의 분무 특성에 관한 실험과 해석적 연구는 Kim 등<sup>(10)</sup>에 의하여 수행되었다. 그들은 거시적 특성인 분무발달과 분무도달거리

는 실험결과와 해석결과가 잘 일치하는 결과를 보여주었으며 DME 연료의 경우가 미립화 특성이 가장 좋다고 하였다. 또한, Kim 등<sup>(11)</sup>은 고압의 분위기에서의 2종류의 실린더형상 내에서의 디젤과 DME 연료의 분사특성에 관한 실험 및 수치해석적 연구를 수행하였으며 고압의 조건에서는 디젤분무의 경우가 DME분무보다 빠른 분무도달거리를 가지나 증발특성은 DME 연료가 우수하다고 하였다.

본 연구에서는 DME연료를 커먼레일 시스템을 이용한 단공 디젤 인젝터에서 분사하여 고압과 저압의 분사압력과 고압체임버내의 분위기 압력증가에 따른 분무 특성을 가시화하고 이들 결과를 여러 가지 실험조건에 대하여 비료, 검토하였다. 또한, 취득된 이미지를 통해 특정시간에서의 분무발달과정, 축 방향 및 분무폭, 분무각 등의 분무특성을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

다양한 분사조건에서 DME분무특성에 관한 연구를 위한 분무 가시화 장치는 Fig. 1과 같이 구성하였다. DME연료의 고압분사를 위해 커먼레일 연료 공급 장치와 압축공기를 이용해 압력조절이 가능한 2개의 고압 펌프를 병렬로 연결하여 사용하였다. 디젤연료와는 달리 DME는 상온에서 기상이므로 질소가스를 사용하여 연료탱크를 약 10 bar로 가압하여 액상으로 변환하였다. 또한, 분위기 압력의 변화를 주기 위하여 최고 40 bar까지 가압이 가능한 고압체임버를 사용하였으며 질소가스와 밸브를 사용하여 분위기 압력을 조절하였다. 분무 영

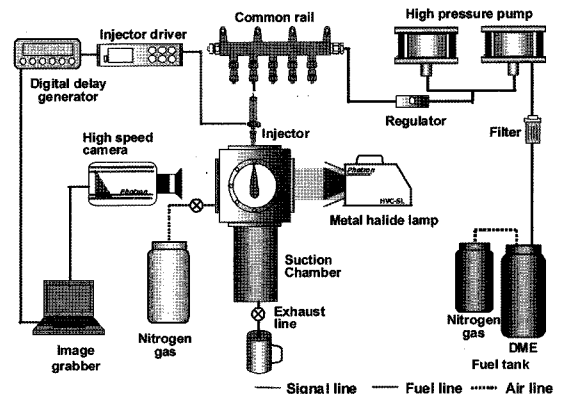


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

상을 취득하기 위하여 2개의 메탈 할라이드 램프 (Photron, HVC-SL)를 광원으로 사용하는 고속카메라 (Photron, Fastcam-APX RS)를 사용하였다. 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H)를 사용하여 인젝터의 신호를 제어하였으며 디지털 신호 발생기(Berkeley Nucleonics Corp, Model 555)를 통하여 인젝터와 고속카메라를 동기화 하였다.

2.2 실험방법

분사압력에 따른 분무특성을 연구하기 위하여 50 MPa과 90 MPa의 2가지 분사압력으로 분사하여 실험을 하였으며 분위기 압력에 따른 영향을 살펴보기 위하여 0.1, 1, 2 MPa의 다양한 분위기 압력으로 체임버를 가압하여 실험을 진행하였다. 또한, 정확한 실험을 위하여 1 회 분사 후 체임버 하단의 배기 장치를 통하여 체임버 내 잔류가스와 연료를 외부 질소가스를 사용하여 배출 하였다. 자세한 실험조건은 Table 1에 나타내었다. 본 실험에 사용된 인젝터는 연료에 따른 정확한 분무실험을 위해 제작된 노즐직경이 0.3 mm이고 깊이가 0.8 mm 인 단공인젝터를 사용하였으며 리턴되는 DME 연료의

Table 1 Experimental conditions

Injection system	Common-rail
Test fuel	Dimethyl ether (DME)
Hole diameter (mm)	0.3
Injection pressure (Mpa)	50, 90
Injection duration (ms)	1.2
Ambient temperature (K)	293.0
Ambient pressure (MPa)	0.1, 1, 2

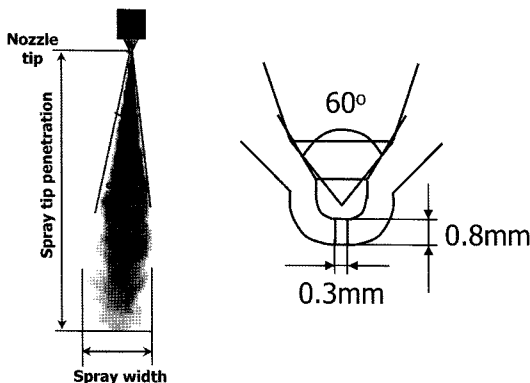


Fig. 2 Definition of spray characteristics and schematic of hole nozzle

기화를 방지하기 위해 가압하여 연료탱크로 유입되도록 하였다. 분무특성을 비교하기 위하여 Fig. 2와 같이 분무도달거리, 분무 폭, 분무각을 정의하고 측정하여 비교 하였다. 분무특성에 관한 정의와 인젝터의 세부 사항은 Fig. 2에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분위기조건과 분사압력에 따른 분무 발달

고속카메라를 통해 취득한 다양한 실험조건에 따른 분무 이미지를 시간에 따라 측정하였으며 취득된 이미지를 통해 분무발달을 비교 분석하였다.

Figure 3은 통전 후 0.7 ms와 1.4 ms에서의 분위기 압력과 분사압력에 따른 분무 발달 과정을 비교하였다. 체임버 내의 분위기 압력이 증가할수록 분무 발달이 지연 되는 것을 알 수 있으며 분사 압력 90 MPa의 분무발달이 50 MPa보다 빠르게 진행되는 것을 볼 수 있다. 그러나 분위기압력이 0.1 MPa이고 분사 후 1.4 ms에서는 분사압력의 증가에도 불구하고 유사한 분무 발달 과정을 보이는데 이는 높은 압력의 분사로 인해 분무 끝 단에서 많은 증발이 일어난 것으로 판단된다.

Figure 4는 통전 후 2.0 ms일 때의 분위기 압력과 분

$t_{asoe}(ms)$	0.7		1.4	
Injection pressure (MPa)	50	90	50	90
$P_{amb} = 0.1MPa$				
$P_{amb} = 1MPa$				
$P_{amb} = 2MPa$				

Fig. 3 Effect of the injection and ambient pressure on the spray development process at the 0.7 ms and 1.4 ms after the start of the energizing

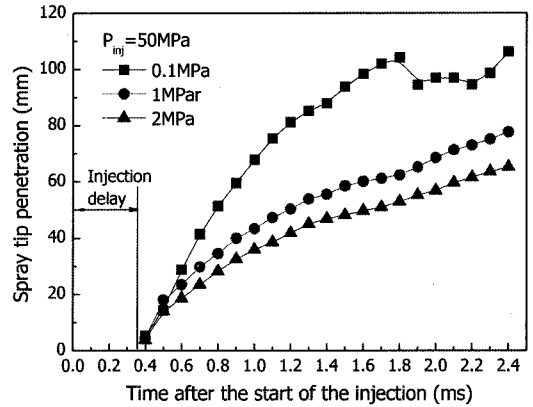
Ambient pressure	0.1MPa		1MPa		2MPa	
Injection pressure (MPa)	50	90	50	90	50	90
$t_{asoe} = 2.0ms$						

Fig. 4 The spray development process at the 2.0 ms after the start of the injection according to the injection and ambient pressure

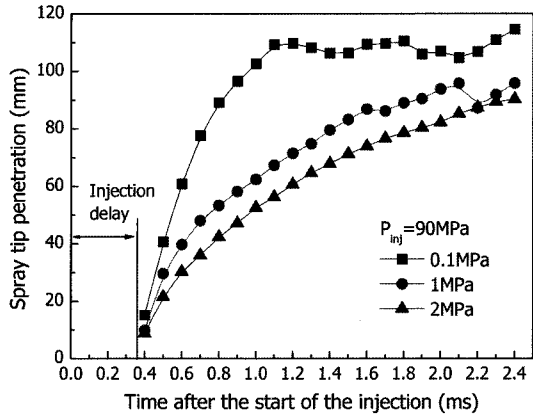
사압력에 따른 분무 이미지를 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 분위기 압력이 증가하면서 체임버 내의 분위기 밀도가 증가되어 분무 발달이 지연되는 것을 볼 수 있다. 또한, 대기압( $P_{amb}=0.1 MPa$ )의 분위기 압력에서는 DME의 낮은 증기압 때문에 가장 많이 증발되는 것을 알 수 있다. 그러나 DME의 분위기 압력이 1 MPa 이상에서 50 MPa로 분사한 경우에는 증발이 많이 일어나지 않는 반면 분사압력이 90 MPa로 증가하면 분무 끝 영역에 많은 분열로 인하여 분무 외곽과 끝 단에서 흐린 이미지를 확인할 수 있다. 이와 같이 흐려진 이미지는 액적의 밀집도가 낮아 작은 액적의 분포가 증가하고, 이에 따라 증발 현상이 활발하게 일어나는 것으로 볼 수 있다.

3.2 분위기조건과 분사압력에 따른 분무 도달 거리

분위기 압력과 분사압력에 따른 노즐 팁에서부터의 분무 도달거리를 시간에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 앞서 분무 발달 과정의 결과에서처럼 분위기 압력이 증가함에 따라 분무 도달 거리가 감소하는 것을 알 수 있다. 분위기 압력 0.1 MPa에서 분무 도달 거리가 증발에 의해 감소하는 구간은 분사압력 50 MPa에서는 분사 후 1.9 ms, 분사압력 90 MPa일 경우에는 1.1 ms부터 나타났다. 이는 노즐 출구에서 높은 압력의 분사로 인한 액적들의 분사속도가 빠르기 때문에 많은 분열을 야기시키며 이로 인하여 작은 지름의 액적들이 많이 증발한 것으로 판단된다. 또한, 분위기 압력 1 MPa에서 분사압력 90 MPa일 때 통전 후 2.0 ms에서 분무 도달 거리가 감소하는 구간도 나타났으나 DME의 증기압보다 높기 때문에 분무 도달 거리는 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.



(a)  $P_{inj} = 50MPa$

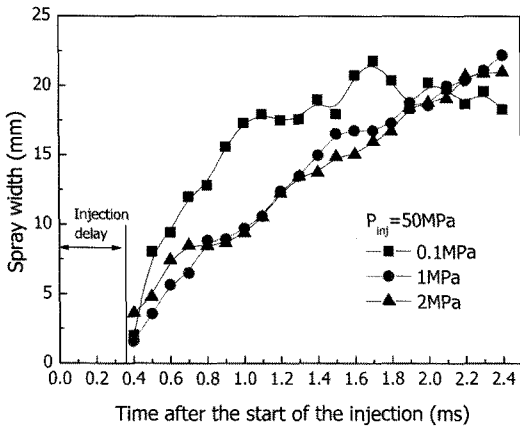


(b)  $P_{inj} = 90MPa$

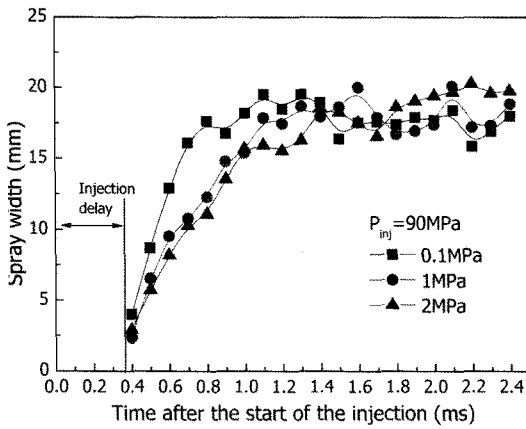
Fig. 5 Effect of the ambient pressure on the spray tip penetration according to time after the start of the energizing

3.3 분위기조건과 분사압력에 따른 분무 폭

Figure 6은 분위기 압력과 분사압력에 따른 분무폭을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 분사 압력이 높은 Fig. 6(b)에서는 Fig. 6(a)보다 분사 초기 빠른 분사 속도로 인하여 급격히 분무가 반경방향으로 확산되는 것을 알 수 있다. 그러나 분사압력 50 MPa에서는 통전 후 2.0 ms, 분사압력 90 MPa에서는 약 1.6 ms이후부터 분무 폭의 크기의 순서가 바뀌는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 인젝터에서 높은 압력으로 분사된 액적들의 분열은 분무 외곽에서 주변기체와의 마찰과 와류로 인하여 분무 중심에서보다 빠르게 진행되며 이로 인하여 작은 지름을 가지는 액적들이 빠르게 증발된다. 이러한 증발은 분위기 압력이 낮을수록 그 영향이 증가한 것으로 판단된다. 또한, 반경방향으로 분무 폭의 증감 현상을 확인할 수 있는데 이는 DME 연료의 증발 특성과 분무



(a)  $P_{inj} = 50 \text{ MPa}$



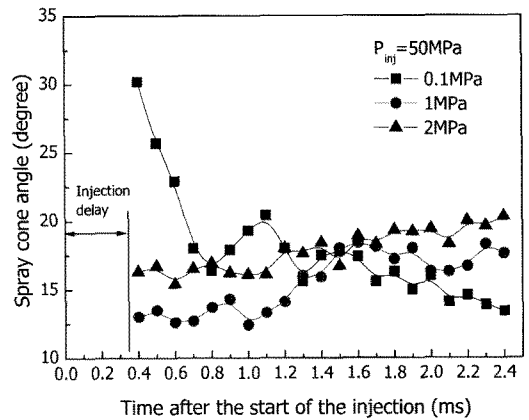
(b)  $P_{inj} = 90 \text{ MPa}$

Fig. 6 Effect of the ambient pressure on the spray width according to time after the start of the energizing

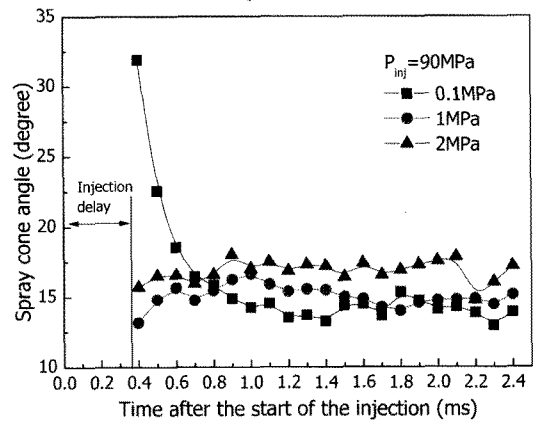
외곽의 낮은 표면장력으로 인한 많은 분열 및 불규칙적인 흐름의 형성에 따른 것으로 판단된다.

### 3.4 분위기조건과 분사압력에 따른 분무각

분위기 압력과 분사압력에 따른 분무각을 시간에 따라 Fig. 7에 나타내었다. 대기압의 분위기 조건에서 0.6 ms 이전의 분무각은 20도 이상의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 점도가 매우 낮은 DME는 노즐 틈에서 빠른 속도로 분사되면서 대기 중으로 빠르게 확산하기 때문에 반경 방향의 거리가 증가되어 큰 분무각을 가지는 것으로 판단된다. 분위기 압력이 1 MPa와 2 MPa의 경우에는 시간이 진행됨에 따라 분무각이 약간씩 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 분무외곽에서 대기압의 분위기 조건보다 증발이 더디게 일어난 것으로 생각된다. 이에 비해 대기압조건에서는 분무각이 시간이 진



(a)  $P_{inj} = 50 \text{ MPa}$



(b)  $P_{inj} = 90 \text{ MPa}$

Fig. 7 Effect of the ambient pressure on the spray cone angle according to time after the start of the injection

행됨에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 전체적으로 분사압력 90 MPa일 때의 분무각이 50 MPa 보다 작은 것을 알 수 있는데 이는 높은 분사압력이 축 방향으로의 분무 발달을 촉진시켜 분무각이 감소한 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 분사 압력과 분위기 압력의 변화가 커먼레일 디젤 인젝터에서 분사되는 DME 연료의 분무특성에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론은 얻었다.

1. 분위기 압력이 증가할수록 분무 발달은 지연되며

분사 압력이 90 MPa일 때 50 MPa보다 빠른 분무발달을 보였다. 그러나, 대기압 분위기 조건에서 통전 후 1.4 ms에서는 분사압력의 증가에도 불구하고 분무 끝 단의 빠른 증발로 인해 유사한 분무 발달 과정을 보였다.

2. 분위기 압력의 증가는 짧은 분무 도달 거리를 보여 주었으며 대기압의 분위기 조건에서는 분무 후반에서 감소하는 구간이 나타났다.

3. 분사 초기 낮은 DME 점성으로 인해 분무가 확산되어 분사 압력이 높을수록 분무 폭이 급격히 증가하였으나 분사 종료 시점에서는 주변기체와의 마찰과 와류 현상으로 분무 폭이 다소 감소하는 것으로 나타났다.

4. 대기압의 분위기 조건에서는 분무각이 0.6 ms이후 급격히 감소하였으며 1 MPa이상의 분위기 조건에서는 약간 증가하였다. 또한, 분사 압력이 높을수록 작은 분사각을 보였다.

## 후 기

본 연구는 2008년 정부재원으로 한국 학술 진흥 재단(KRF-2008-314-D00056)과 2008년도 2단계 두뇌한국21 사업의 지원으로 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) M. Y. Kim, S. H. Bang and C. S. Lee, "Experimental investigation of spray and combustion characteristics of dimethyl ether in a common-rail diesel engine", *Energy & Fuels*, Vol. 21, No. 2, 2007, pp. 793~800.
- (2) B. Gui, T. L. Chan, C. W. Leung, J. Xiao, H. Wang and L. Zhao, "Modeling study on the combustion and emissions characteristics of a light-duty DI diesel engine fueled with dimethyl ether (DME) using a detailed chemical kinetic mechanism", SAE tech. paper series, 2004, 2004-01-1839.
- (3) M. Y. Kim, S. H. Yoon, B. W. Ryu and C. S. Lee, "Combustion and emission characteristics of DME as an alternative fuel for compression ignition engines with a high pressure injection system", *Fuel*, Vol. 87, 2008, pp. 2779~2786.
- (4) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Thermochemical characteristics of dimethyl ether-An alternative fuel for compression-ignition engines", SAE tech. paper series, 2001, 2001-01-0154.
- (5) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Viscosity and lubricity of (liquid) dimethyl Ether-An alternative fuel for compression-ignition engines", SAE tech. paper series, 2002, 2002-01-0862.
- (6) 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 tech. paper series, 2003, 2003-01-0759.
- (7) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Thermodynamic properties of dimethyl ether-An alternative fuel for compression-ignition engines", SAE tech. paper series, 2004, 2004-01-0093.
- (8) H. Teng and J. C. McCandless, "Comparative study of characteristics of diesel-fuel and dimethyl-ether sprays in the engine", SAE tech. paper series, 2005, 2005-01-1723.
- (9) 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, No. 4, 2006, pp. 1471~1481.
- (10) H. J. Kim, H. K. Suh, S. H. Park and C. S. Lee, "An experimental and numerical investigation of atomization characteristics of biodiesel, dimethyl ether, and biodiesel-ethanol blended fuel", *Energy & Fuels*, Vol. 22, No. 3, 2008, pp. 2091~2098.
- (11) H. J. Kim, H. K. Suh and C. S. Lee, "Numerical and experimental study on the comparison between diesel and dimethyl Ether (DME) spray behaviors according to combustion chamber shape", *Energy & Fuels*, Vol. 22, No. 4, 2008, pp. 2851~2860.