

## Dimethyl Ether(DME)의 증발과 거시적 분무 특성

유 준 · 이 주 광 · 배 충 식\*

한국과학기술원 기계공학과

### Macroscopic Characteristics of Evaporating Dimethyl Ether(DME) Spray

Jun Yu · Jukwang Lee · Choongsik Bae\*

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received 2 November 2002 / Accepted 28 February 2003)

**Abstract** : Dimethyl Ether (DME) has been considered as one of the most attractive alternative fuels for compression ignition engine. Its main advantage in diesel engine application is high efficiency of diesel cycle with soot free combustion though conventional fuel injection system has to be modified due to the physical properties of DME. Experimental study of DME and conventional diesel spray employing a common-rail type fuel injection system with a 5-hole sac type injector was performed in a constant volume vessel pressurized by nitrogen gas. Spray cone angles and penetrations of the DME spray were characterized and compared with those of diesel. For evaluation of the evaporating characteristics of the DME, shadowgraphy technique employing an Ar-ion laser and an ICCD camera was adopted. Tip of the DME spray was formed in mushroom-like shape at atmospheric chamber pressure, which disappeared in higher chamber pressure. Spray tip penetration and spray cone angle of the DME became similar to those of diesel under 3MPa of chamber pressure. Higher injection pressure provided wider vapor phase area while it decreased with higher chamber pressure condition.

**Key words** : Dimethyl ether(DME), Sac type injector(색 타입 인젝터), Spray cone angle(분무각), Spray tip penetration(분무 선단길이), Evaporating characteristics (증발 특성)

### 1. 서 론

자동차 배기 가스에 의한 환경 문제 특히 지구 온난화의 주원인인 CO<sub>2</sub>가 새로운 환경 오염 물질의 규제 대상이 되고 있으며 이에 대처하기 위한 대체 연료 엔진 기술 개발의 필요성이 대두되고 있다. 현재까지 개발된 대체 연료 중 에테르 계통의 저탄소 함산소 연료인 DME(Dimethyl Ether)는 CO<sub>2</sub> 배출량이 기존 디젤보다 적고 검댕을 비롯한 입자상 물

질의 배출을 현저하게 줄일 수 있는 것으로 평가되고 있어 DME 자체를 디젤과 대체하려는 연구가 최근 유럽 및 일본을 중심으로 활발하게 진행되고 있다.<sup>1,2)</sup> 자발화 특성이 우수하고 세탄가가 디젤과 유사하며 입자상 물질의 배출이 디젤의 경우와 비교하여 현저하게 적고 엔진 소음이 적다는 장점등을 가지고 있는 DME는 압축성이 디젤보다 높고, 증기압이 높아 상온에서 기상으로 존재하며 점도가 디젤에 비해 낮기 때문에 기존 연료 계통의 내구성을 유지하기 위해서 점도 향상 및 윤활 향상제 첨가가 필요한 것으로 알려져 있다.<sup>2-6)</sup> DME의 배기 가스 배

\*To whom correspondence should be addressed.  
csbae@mial.kaist.ac.kr

출 특성에 대해서는 기존 디젤 엔진에 비하여 CO 및 HC는 적게 배출되는 반면, NOx는 저감될 수 있다는 일부 연구결과도 발표되고 있지만 아직 NOx에 미치는 DME의 영향은 명확하게 규명되지 않고 있다.<sup>5,7)</sup> 현재까지는 DME 자체의 물리적 특성에 의한 NOx의 저감 보다는 EGR를 적용하여 NOx를 감소시키려는 연구가 더 활발하게 진행 중이다.<sup>8)</sup> 현재까지 DME에 관한 연구는 DME를 연료로 사용하는 엔진의 성능이나 공해 배출물 저감에 초점이 맞추어지고 있고 기초적인 분사 특성에 관한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 커먼레일형 분사 시스템을 이용하여 DME의 증발과 거시적 분무 특성을 파악하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 연료 분사 장치

본 연구에 사용된 연료공급 장치는 상용 커먼레일 연료공급 장치를 모사할 수 있는 것으로, 연료 펌프(MS188, 69MPa, Haskel Ltd), 축압기 (69MPa), 배압 조절기 (back pressure regulator; 69MPa, Tescom Ltd.)로 구성하였다. Fig. 1에서 보여지는 바와 같이 연료 공급 라인에서 윤활 향상제 (Infineum R655)를 500ppm 첨가한 DME를 액상으로 유지시키기 위하여 1.5MPa의 질소 가스로 DME를 가압하고 연료 공급 펌프를 이용하여 축압기로 DME를 공급하여 가압하였다. 또한 분사 압력은 배압 조절기를 이용하여 수동으로 조정하였다. 본 연구에서 사용한 분사기는 상용 커먼레일 용 sac 타입 분사기(5holes, 직경 0.168mm/구멍)이었으며 전용 구동 장치(TDA 3000H, TEMS Ltd)를 사용하여 연료를 2.5Hz로 분사시켰다.

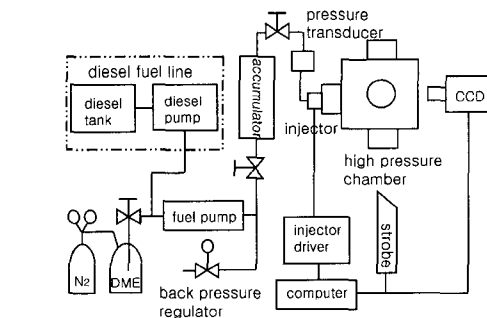


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

디젤 분무 시에는 DME 공급 라인을 디젤 라인으로 대체하였다.

### 2.2 분무 가시화 장치

DME와 디젤 연료는 3개의 가시화 창이 있는 고압 분사실(최대 7MPa) 내에서 분사시켰으며 분사실의 압력은 질소 가스를 이용하여 조정하였다. 분무의 거시적 특성을 파악하기 위하여 CCD 카메라(PCO Sencicam)를 분사기의 노즐 전면 방향으로 향하도록 하고 스트로보 라이트를 분무의 측면에서 조사하는 Mie 산란법으로 분무 영상을 획득하였다(Fig. 1). DME의 증발 특성을 파악하기 위하여 Fig. 2에서 나타낸 단공 분사를 위한 노즐 홀더를 설계 제작하여 사용하였고, Fig. 3에서 보는 바와 같이 Ar-ion 레이저를 광원으로 하는 새도 기법을 ICCD (Standford, 4Quick 05A) 카메라와 함께 사용하였다. 이렇게 얻어진 분무 영상에서 기상 성분만을 획득하기 위하여 단공 Mie 산란 이미지를 거시적 Mie 산란 이미지 획득 방법과 동일한 분무 영상 취득 시스템을 이용하여 얻었다. 사용된 카메라와 스트로보 라이트의 동기는 커먼레일 분사기에 주어지는 분사기의 작동 신호를 이용하였다. 이와 같은 과정

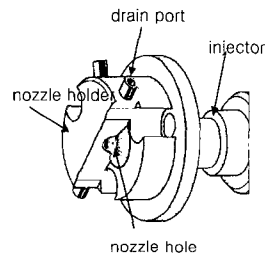


Fig. 2 Nozzle holder

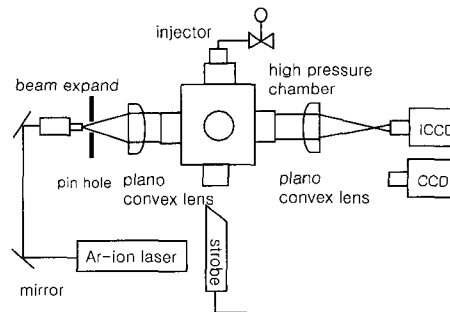


Fig. 3 Schematic diagram of single hole spray imaging

으로 얻어진 분무 영상으로부터 분무의 변화를 관찰하였고 분무 각, 분무 선단 도달 거리를 측정하였으며 증발 특성을 파악하였다.

### 3. 실험 결과

본 연구에서는 분사 압력을 25MPa, 40MPa, 55MPa로 변경시켜 가며 DME와 디젤을 대기압과 3MPa의 상온 분위기에 분무시켜 획득한 결과를 나타낸다. 또한 2.1 항에서 언급한 분사기 구동장치로 분사 기간을 조정하여 연료별, 분사 압력별 분사 유량을 5.68mg/stroke로 동일하게 유지시켰다. Table 1은 위 실험조건을 요약하여 보여주는 것이다.

Table 1 Summary of experimental conditions

Injector	sac type 5holes(dia. 0.168mm/hole)
Injection quantity	5.68mg/stroke
Injection pressure	25MPa, 40MPa, 55MPa
Chamber pressre	0.1MPa, 3MPa

#### 3.1 분무 중단 후 재분무 현상

Fig. 4에는 분사기에 주어지는 고전류 유지 시간 (high current holding time)이 DME 분무 특성에 미치는 영향을 나타낸다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 고전류 유지시간이 200  $\mu$ s 인 경우 DME가 분무되는 도중에 분무 개시 후 0.3ms에서 분무가 중단된 후 다시 계속되는 현상이 관찰되었지만, 이런 비연속적 분무는 고전류 유지시간을 400  $\mu$ s으로 증가시킨

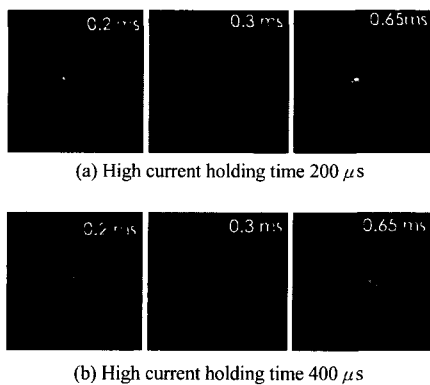


Fig. 4 Effect of high current holding time on macroscopic DME spray

후 소멸되었다 (Fig. 4(b)). 이러한 ‘분무 중단 후 재분무’ 현상은 분위기 압력에 무관하게 분사 압력 25MPa과 40MPa에서 나타났다.<sup>9,10)</sup> 이러한 현상에 대한 가능한 원인으로서는 DME의 높은 압축성 때문에 노즐 색 체적내의 압력이 분사 압력보다 낮게 형성되기 때문일 수 있다.<sup>11)</sup> 또 다른 원인으로 생각할 수 있는 것은 커먼레일 분사기의 솔레노이드 밸브 작동시 노즐의 유량 특성에 커다란 영향을 미치는 분사기 내 볼 밸브 주위에서 형성되는 힘의 평형이 디젤 연료에 맞추어져 있어 DME의 경우 고전류 유지 시간 200  $\mu$ s로 공급하고 분사 압력을 25MPa과 40MPa으로 한 경우에 힘의 평형이 디젤과는 다르게 형성되기 때문으로 생각된다. 이후 결과는 고전류 유지 시간을 400  $\mu$ s하여 얻어진 것이다.

#### 3.2 분무 선단 도달 거리

Fig. 5는 55MPa 분사 압력 3MPa 분위기 압력 조건에서 시간에 따른 DME와 디젤의 분무 선단 거리의 변화이고, 각 실험 값들에 대한 2차 보간(2nd order interpolation) 결과를 실선과 파단선으로 나타냈다. 본 연구에서 사용한 5공 노즐 홀은 한시 방향의 홀을 홀 번호 1로 시작하여 반시계 방향으로 홀 번

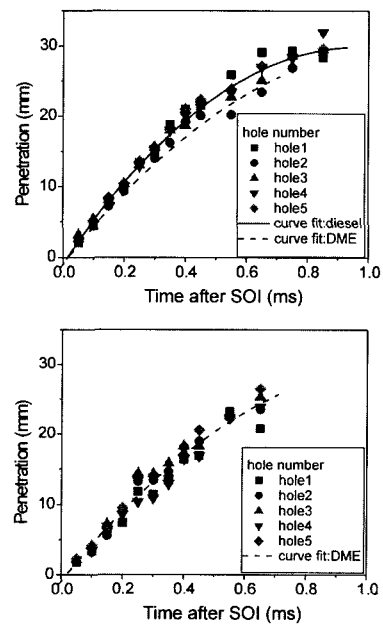


Fig. 5 Spray tip penetration of DME and diesel at 55MPa of injection pressure and 3MPa chamber pressure

호를 순차적으로 정의하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 DME의 포화 증기압보다 높은 분위기 조건인 3MPa에서 DME 분무 선단 도달 거리는 디젤과 유사하게 나타난다. 분사 압력이 DME 분무 선단 도달 거리에 미치는 영향은 Fig. 6에 나타나 있는데 분위기 압력에 무관하게 분사 압력이 증가함에 따라 분무 선단 도달거리는 증가하고 분위기 압력을 3MPa로 증가시키면 분무 선단 도달 거리는 짧아진다. 이러한 분사 압력과 분위기 압력이 분무 선단 도달 거리에 미치는 영향은 디젤의 거시적 분무 경향과 유사함을 알 수 있다.<sup>12)</sup>

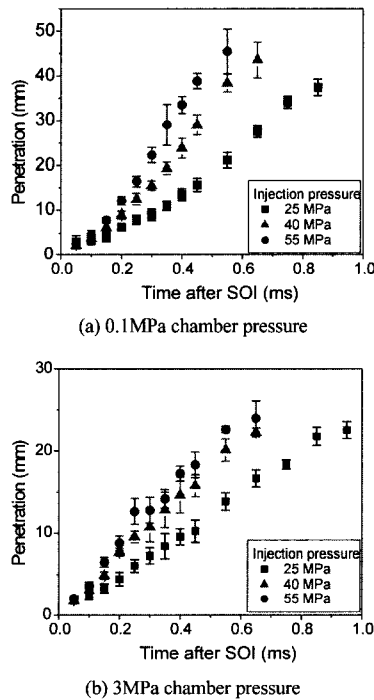


Fig. 6 Effect of injection pressure on DME spray tip penetration

### 3.3 분무각

본 연구에서는 DME의 비등 특성을 고려하기 위하여 연료가 분사기공으로부터 분출되어 나온 직후 분무 경계에 의해 형성되는 각을 분무각으로 정의하였다.<sup>10)</sup>

Fig. 7(a), (b)는 55MPa의 분사 압력으로 3MPa 분위기에 디젤과 DME를 분사한 경우 시간에 따른 각 홀분무에서의 변화이다. Fig. 7(c)는 5공의 분무각 평

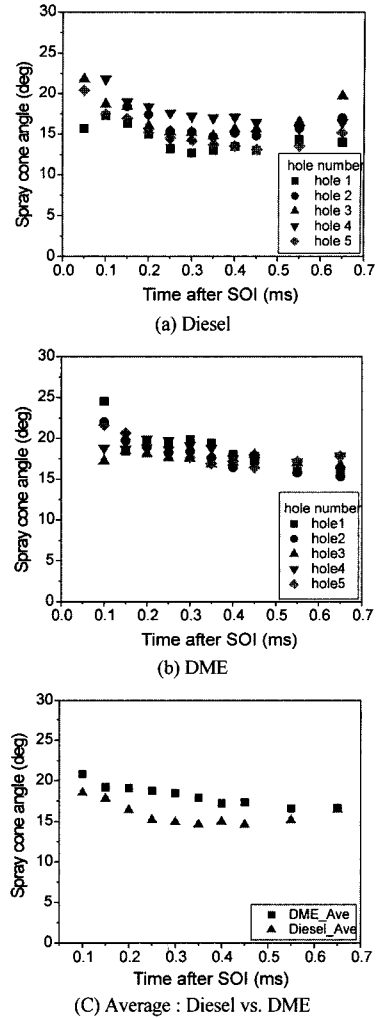


Fig. 7 Comparison of spray cone angle of DME with diesel at 55MPa of injection pressure and 3MPa of chamber pressure

균을 디젤과 DME에 대하여 비교한 것으로서, 그림에서 보여지는 바와 같이 DME의 분무각은 디젤보다 약 2° 정도 크게 형성됨을 알 수 있다. Fig. 8은 분사 압력이 분무 각에 미치는 영향을 나타내기 위한 것으로 5개 노즐 구멍으로부터 형성되는 DME 분무각의 산술 평균값을 나타낸 것이다. 대기압 조건에서 분사 압력이 증가함에 따라 분무각은 감소하지만 3MPa의 분위기 조건에서 약간 증가하는 경향을 나타냈다. 분위기 압력을 대기압에서 3MPa 상승시키면 DME 분무의 비등 현상이 현저하게 감소되는 것을 알 수 있다.

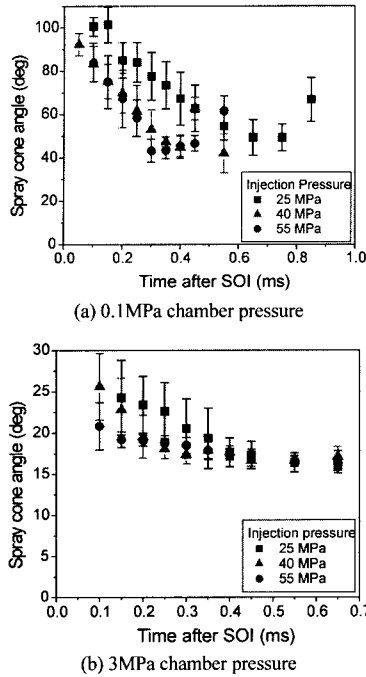


Fig. 8 Effect of injection pressure on spray cone angle of DME at different chamber pressures

### 3.4 기화 특성

Fig. 9는 25MPa의 분사 압력으로 DME를 대기압 분위기에 분사하여 Mie 산란 단공 분무 영상 취득 방법으로 얻은 것이고 Fig. 10은 동일 DME에 대하여 새도 기법으로 얻은 분무 영상이다. 웨도우 분무 영상에서 알 수 있듯이 분무 경계 및 후류 영역에서 기상의 DME가 더 잘 발달되고 있는데 이는 분무의 하류 지역과 경계부분에서 미립화가 잘 일어나고 기화가 빠르게 일어나기 때문이라고 생각된다. 또한 이러한 영역에서 연료 증기가 주위 공기와 혼합이 활발하게 일어 날수 있고 따라서 엔진 실린더 내

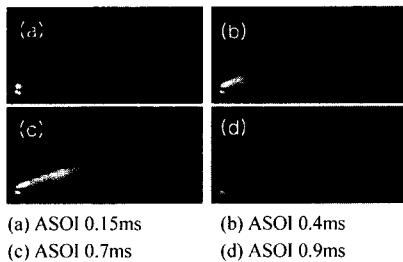


Fig. 9 Mie-scattered DME spray images at 25MPa injection pressure and 0.1MPa chamber pressure

에서 점화 가능성이 보다 높을 것으로 생각된다.<sup>13,14)</sup> Fig. 11은 55MPa의 분사 압력으로 DME를 3MPa 분위기 압력에 분사하여 Mie 산란 단공 분무 영상 취득 방법으로 얻은 것이고 Fig. 12는 동일 조건의 DME에 대하여 새도 기법으로 얻은 분무 영상이다. Fig. 11과 Fig. 12에서 보는 바와 같이, 3MPa의 분위기 압력에 DME를 분사시킨 경우에도 미약하지만 여전히 이러한 현상이 발생되는 것이 관찰되었는데 이는 고압 분위기 중에서도 DME가 디젤보다 미립화 특성이 우수하고 따라서 주위 공기와의 혼합 측면에서 유리할 것으로 생각된다. 이러한 DME의 증발 특성은 새도 분무 영역과 Mie 산란 분무 면적의

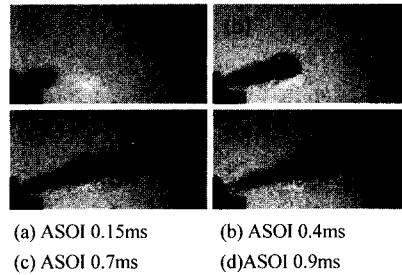


Fig. 10 Shadowgraphic DME spray images at 25MPa injection pressure and 0.1MPa chamber pressure

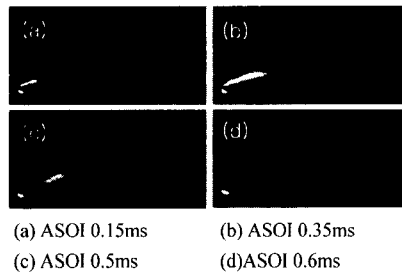


Fig. 11 Mie-scattered DME spray images at 55MPa injection pressure and 3MPa chamber pressure

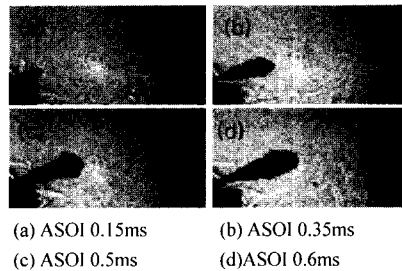


Fig. 12 Shadowgraphic DME spray images at 55MPa injection pressure and 3MPa chamber pressure

차이를 구하여 분사 압력 및 분위기 압력에 따라 살펴 보았다(Fig. 13). Fig. 13(a)에서 나타난 바와 같이 대기압 분위기 조건에서 40MPa의 분사압력인 경우가 25MPa보다 증발된 영역이 더 넓은 것을 알 수 있다. 하지만 분사 압력을 55MPa으로 더 높이면 기화 영역은 그다지 증가하지 않았다. 분위기 압력을 3MPa로 증가시키면 (Fig. 13(b)), 주변 압력 상승에 의하여 분사 압력이 연료 기화에 미치는 영향은 주위 저항이 증가하여 대기압 조건에서보다는 적어지지만 일반적 경향은 대기압 분위기 조건과 유사함을 알 수 있다. 따라서, DME의 경우 엔진의 압축 행정과 유사한 압력 조건 아래에서도 연료는 여전히 기화되고 따라서 디젤의 분무보다 엔진실린더 안에서 주위 공기와의 접촉이 더 활발할 것으로 예상된다. 이러한 DME의 증발 및 분무 특성은 엔진 조건에 보다 근접한 온도 효과를 고려하여 상세하게 고찰하여볼 필요가 있다. DME분무의 또 다른 특징은, 분무 주위의 유체들과의 전단력이 발생되면서 일어나는 와류(vortex) 현상 때문에 대기압 분위기 조건에서는 DME 분무의 선단이 '버섯'과 유사한 모양으로 형성되지만 분위기 압력을 3MPa로 상승시

키면 소멸되는 것이다.<sup>9,10)</sup>

#### 4. 결론

커먼레일형 연료 분사장치를 사용하여 고압 분사 실내에서 DME의 거시적인 분무 특성을 디젤 연료와 비교하여 설명하였고 새도 분무 영상 취득 방법을 이용하여 DME의 증발특성을 파악하였다.

1) 대기압 분위기 중에서 DME는 분무 선단의 버섯 모양 형성과 비등 현상 같은 DME 특유의 분무 특성이 나타났다. 하지만, 분위기 압력을 3MPa로 증가시키면 DME는 디젤과 유사한 분무 특성(특히 분무 선단 도달 거리)을 보인다.

2) DME 분무의 경우, 분사기에 주어지는 고전류 유지 기간 및 분사 압력과 같은 분사 조건에 따라 '분무 중단후 재분무' 현상이 발생되었다.

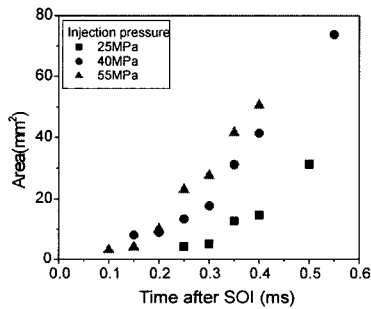
3) 분무 경계 지역과 하류 영역에서 주로 발생하는 DME의 증발은 대기압 분위기 조건은 물론 분위기 조건이 엔진 실린더 압력 조건과 유사한 3MPa에서도 여전히 일어나는 것으로 관찰되었다. 이는 DME를 디젤 엔진에 적용할 경우, 점화 측면(짧은 점화 지연)에서 디젤보다 유리할 것으로 생각되지만, 온도 효과를 고려하여 구체적으로 DME의 분무 특성을 살펴볼 필요가 있다.

#### 후 기

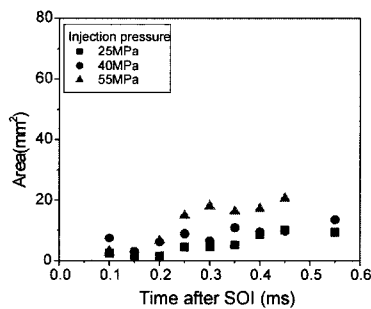
본 연구는 KAIST 연소 기술 연구 센터(CERC)의 연구비 지원에 의해 수행된 결과입니다. DME 운할 첨가제 Infineum R655를 기증해주신 Infineum Korea Ltd에 감사드립니다.

#### References

- 1) R. Verbeek, J. Van der Weide, "Global Assessment of Dimethyl Ether Comparison with Other Fuels," SAE 971607, 1997.
- 2) R. Christensen, S. C. Sorenson, M. G. Jensen, K. F. Hansen, "Engine Operation on Dimethyl Ether in a Naturally Aspirated, DI Diesel Engine," SAE 971665, 1997.
- 3) S. C. Sorenson, Sven-Erik Mikkelsen, "Performance and Emission of a 0.273 Liter Direct



(a) 0.1MPa chamber pressure



(b) 3MPa chamber pressure

Fig. 13 Apparent vapor phase area of injection pressure

- Injection Diesel Engine Fuelled with Neat Dimethyl Ether," SAE 950064, 1995.
- 4) S. Kajitani, M. Oguma, T. Mori, "DME Fuel Blends for Low-emission Direct-injection Diesel Engines," SAE 2000-01-2004, 2000.
  - 5) Z. Lonbao, W. Hewu, J. Deming, H. Zuohua, "Study of Performance and Combustion Characteristics of a DME-Fuelled Light-duty Direct-injection Diesel Engine," SAE 1999-01-3669, 1999.
  - 6) H. Teng, J. C. McCandless, J. B. Schneyer, "Viscosity and Lubricity of (liquid) Dimethyl Ether an Alternative Fuel for Compression-ignition Engines," SAE 2002-01-0862, 2002.
  - 7) S. Kajitani, Z. L. Chen, M. Kono, K. T. Rhee, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct Diesel Engine Operated with DME," SAE 972973, 1997.
  - 8) Y. Sato, A. Noda, T. Sakamoto, Y. Goto, "Performance and Emission of a DI Diesel Engine Operated on Dimethyl Ether Applying EGR with Supercharging," SAE 2000-01-1809, 2000.
  - 9) J. Yu, J. K. Lee, C. S. Bae, "Dimethyl Ether (DME) Spray Characteristics Compared to Diesel in a Common-rail Fuel Injection System," SAE 2002-01-2898, 2002.
  - 10) J. Yu, J. K. Lee, C. S. Bae, "Comparison of Macroscopic Spray Characteristics of Dimethyl Ether with Diesel," Transactions of KSAE, Vol. 10, No.5, pp.73-80, 2002.
  - 11) G. Egnell, "Comparison of Heat Release and NOx Formation in a DI Diesel Engine Running on DME and Diesel Fuel," SAE 2001-01-0651, 2001.
  - 12) J. S. Kang, C. S. Bae, "Diesel Spray Development from VCO Nozzles from High Pressure Direct Injection," Transactions of KSAE, Vol. 8, No.3, pp.28-36, 2000.
  - 13) B. S. Park, S. Y. Lee, "An Experimental Investigation of the Flash Atomization Mechanism," Atomization and Spray, Vol.4, p.159, 1994.
  - 14) R. D. Reitz, "A Photographic Study of Flash-boiling Atomization," Aerosol Science and Technology, Vol.12, p.561, 1990.