

Dimethyl Ether와 디젤의 거시적 분무 특성 비교

Comparison of Macroscopic Spray Characteristics of Dimethyl Ether with Diesel

유 준*, 이 주 광*, 배 충 식*
J. Yu, J. K. Lee, C. S. Bae

ABSTRACT

Dimethyl ether (DME) is one of the most attractive alternative fuel 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 intrinsic properties of DME. Experimental study of DME and conventional diesel spray employing a common-rail type fuel injection system with a 5-holes sac type injector (hole diameter 0.168 mm/hole) was performed in a high pressure chamber pressurized with nitrogen gas. A CCD camera was employed to capture time series of spray images followed by spray cone angles and penetrations of DME were characterized and compared with those of diesel. Under atmospheric pressure condition, regardless of injection pressure, spray cone angles of the DME were wider than those of diesel and penetrations were shorter due to flash boiling effect. Tip of the DME spray was formed in mushroom like shape at atmospheric chamber pressure but it was disappeared in higher chamber pressure. On the contrary, spray characteristics of the DME became similar to that of diesel under 3MPa of chamber pressure. Hole-to-hole variation of the DME spray was lower than that of diesel in both atmospheric and 3MPa chamber pressures. At 25MPa and 40MPa of DME injection pressures, regardless of chamber pressure, intermittent DME spray was observed. It was thought that vapor lock inside the injector was generated under the two injection pressures.

주요기술용어 : Dimethyl ether(DME), SAC type injector(색 타입 인젝터), Spray cone angle(분무각), Spray tip penetration (분무 선단길이)

1. 서 론

최근 자동차 배기 가스에 의한 환경 문제 특히 지구 온난화의 주원인인 CO₂가 새로운 규제 대상이 되고 있으며 이에 대처하기 위한 대체연료 엔진 기술 개발의 필요성이 대두되고 있다. 현재 까지 개발된 대체 연료중 에테르계통의 저탄소

함산소 연료인 DME (Dimethyl ether)는 CO₂ 배출량이 기존 디젤 보다 적고 검댕을 비롯한 입자상 물질의 배출을 현저하게 줄일 수 있는 것으로 평가되고 있어 DME 자체를 디젤과 대체하려는 연구가 최근 유럽 및 일본을 중심으로 활발하게 진행되고 있다.¹⁻³⁾ 그동안 자발화 특성이 우수하여 메탄올 및 에탄올과 같은 알코올 계통 연료의 점화 개선제로 사용되어온 DME는 세탄가가 높

* 회원, KAIST 기계공학과

고 입자상 물질 배출이 디젤의 경우와 비교하여 현저하게 적다는 점 그리고 운전시 엔진 소음이 적다는 장점등을 가지고 있다.^{4,5)} 그러나 압축성이 높기 때문에 압축에 필요한 일은 디젤의 경우보다 더 많이 필요하고 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.^{2,6,7)} DME가 가지고 있는 이러한 단점은 커먼레일 시스템의 도입과 점도 향상제의 첨가로 해결되고 있다.⁸⁾ DME의 배기 가스 배출 특성에 대해서는 기존 디젤 엔진에 비하여 CO 및 HC는 적게 배출되는 반면, NOx는 저감할 수 있다는 일부 연구결과도 발표되고 있지만 아직 NOx에 미치는 DME의 영향은 명확하게 규명되지 않고 있다. 현재까지는 DME 자체의 물리적 특성에 의한 NOx의 저감 보다는 EGR을 적용하여 NOx를 감소 시키려는 연구가 더 활발하게 진행 중이다.^{2,6,7,9,10)} 또한 Gill 등¹¹⁾의 연구에서는 디젤의 발열량이 DME에 비해 1.8배 높기 때문에 디젤과 유사한 엔진 출력을 얻기 위해서는 분사 시간을 조절하거나 노즐 구멍의 크기를 증가시켜 DME 연료 분사량을 증가시킬 필요가 있음이 제기되었다.

본 연구에서는 DME를 디젤 엔진에 적용하기 위한 기초 자료를 제공하고 DME 적용 엔진 설계에 필요한 기반 기술을 확보하고자 하는 첫번째 단계로서 커먼레일 타입 연료 공급 장치와 상용 분사기를 이용하여 DME와 디젤의 거시적 분무 특성을 비교하고 고찰해 보고자 하였다.

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(MS110, 69MPa, Haskell Ltd), 축압기(69MPa), 배압 조절기 (back pressure regulator ; 69MPa, Tescom Ltd.)로 구성하였다. Fig. 1은 연

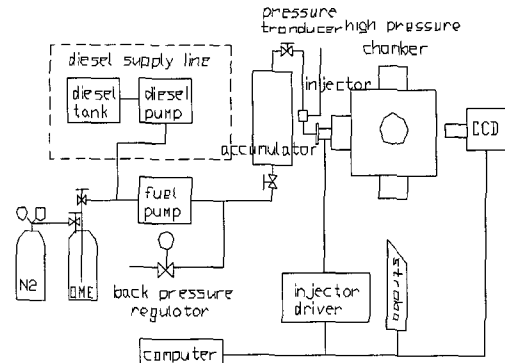


Fig. 1 Schematic diagram of experimental rig

료분사 장치 및 분무 사진 촬영 장치의 개략도이다. 디젤 분무시에는 디젤 연료를 공기로 구동되는 연료 공급 펌프를 이용하여, 축압기로 공급시켰다. 한편, DME 분무 실험시에는 연료 공급 라인상에서 DME를 액상으로 유지시키기 위하여 1MPa의 질소 가스로 DME를 가압하여 연료 공급 펌프로 이송시켰다. 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 작동시켰다.

2.2 분무 가시화 장치

DME와 디젤 연료는 상온 분위기의 고압 분사실(최대 7MPa)에서 분사시켰으며 분사실의 압력은 질소 가스를 이용하여 조정하였다. 분무의 거시적 특성을 파악하기 위하여 CCD 카메라(PCO Sensicam)를 분사기의 노즐 전면 방향으로 향하도록 하고 스트로보 라이트를 분무의 측면에서 조사하여 분무 영상을 획득하였다. 또한 커먼레일 분사기에 주어지는 분사기의 작동 신호를 이용하여 카메라를 스트로보 라이트와 동기시켰다. 이와 같은 과정으로 얻어진 분무 영상들로부터 분사 개시 후 시간 경과에 따른 분무의 변화를 관찰하였고, 분사기의 각 구멍 별로 분사각, 분무 선단 도달 거리를 측정하였다.

3. 실험 결과

본 연구에서는 분사 압력을 25MPa, 40MPa, 55MPa로 변경시켜 가며 DME와 디젤을 대기압과 3MPa의 상온 분위기에 분무시켜 획득한 결과를 나타낸다. 또한 2.1항에서 언급한 분사기 구동 장치로 분사 시간을 조정하여 연료별, 분사 압력별 분사 유량을 5.68 mg/stroke로 동일하게 유지시켰다. 표 1은 실험조건 요약이다.

Table 1 Summary of experimental conditions

인젝터	sac 타입 5 hole (직경 0.168mm/구멍)
분사 유량	5.68 mg/stroke
분사 압력	25MPa, 40MPa, 55MPa
분위기 압력	대기압, 3MPa

3.1 거시적 분무 발달

Fig. 2와 Fig. 3에 보여지는 분무 영상들은 DME와 디젤의 시간에 따른 분무 발달을 나타낸다. 분사 시점(Start Of injection, SOI)은 액상의 연료가 분출되어 나오는 것이 관찰되는 시점을 기준으로 하였다. 대기압 분위기 중에 DME를 분사 압력 25MPa로 분사 한 경우, Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 DME가 분무되는 도중에 분무 개시 후 0.3ms에서 분무가 중단된 후 다시 계속되는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 3.2항에서 설명되는 것과 같이 분사 압력 40MPa에서도 발생되었지만, 분사압력을 55MPa로 증가시키고 주변 분위기 압력을 3MPa로 증가 시킨 경우(Fig. 3(a))와 디젤 분무의 경우 (Fig. 2(b), Fig. 3(b))에서는 이와 같은 현상이 나타나지 않았는데 이것은 25MPa과 40MPa의 분사 압력으로 DME가 분사되는 도중 분사기 내부에서 베이퍼 록 혹은 스로틀링에 의해 발생하는 것으로 생각된다. Egnell¹²⁾은 sac과 커먼레일 사이의 압력 차이에 의한 스로틀링 현상이 분무 선단거리에 영향을 미칠 것이라고 보고하였지만 분무중 인젝터 내에서 변화되는 압력의 측정등과 같은 보다 구체적인 접근

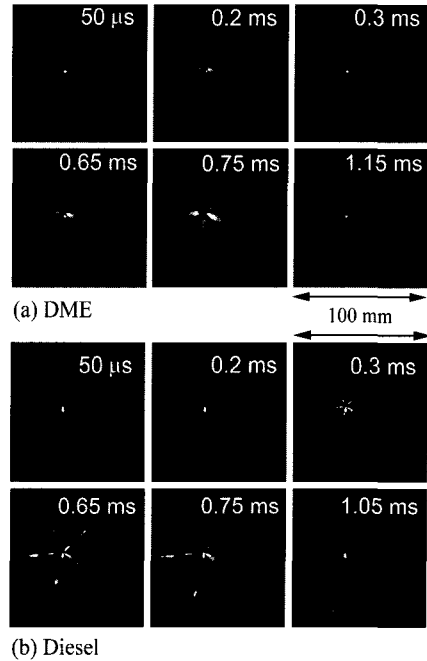


Fig. 2 Spray development of DME and diesel at 25MPa of injection pressure and atmospheric chamber pressure

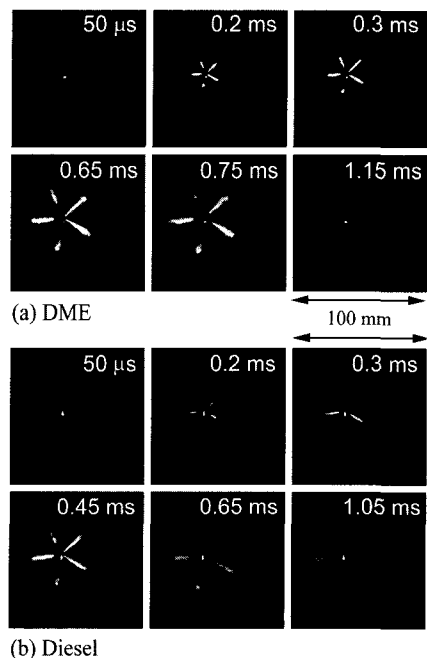


Fig. 3 Spray development of DME and diesel at 55MPa of injection pressure and 3MPa of chamber pressure

을 통하여 확인이 필요하다. 분위기 조건이 대기압인 경우, DME의 높은 증기압으로 인하여 분무 초기에 분무가 측 방향으로 확산되는 현상이 일어나지만 분위기 압력을 3MPa로 하였을 경우 이러한 현상은 현저하게 줄어들었다. 대기압 조건에서 디젤을 25MPa로 분사한 경우에 있어서는 분사 기공 별로 분무의 불균일이 DME의 경우보다 심하게 나타났다.

하지만, 높은 분위기 압력 조건에서 이러한 분무의 불균일은 현저하게 줄어드는 것으로 관찰되었다. Fig. 4에서 보여지는 바와 같이, 대기압 분위기 조건에서는 DME 분무의 선단이 ‘버섯’과 유사한 모양으로 형성되지만 분위기 압력을 3MPa로 상승시키면 소멸된다. 이러한 현상은 분사기 내에 고압의 액상으로 존재하고 있던 DME가 대기압 분위기 중으로 분출되어 나오면서 액적들이 빠르게 증발되고 개개의 액적들이 보유하고 있던 운동량이 급격하게 낮아져서 정체되는 것과 동시에 분무 상류로부터 계속해서 분출되어 나오는 액적들과 정체되고 있는 액적들이 충돌되어 나가면서 분무 주위의 유체들과 전단력이 발생되면서 일어나는 와류(vortex) 현상 때문이라고 생각된다.

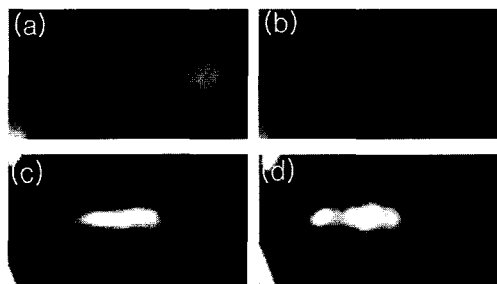


Fig. 4 Shapes of the spray tip

- (a) 25 MPa of injection pressure at atmospheric chamber pressure(ASOI 0.85 ms)
- (b) 55 MPa of injection pressure at atmospheric chamber pressure(ASOI 0.85 ms)
- (c) 25 MPa of injection pressure at 3 MPa chamber pressure(ASOI 0.25 ms)
- (d) 55 MPa of injection pressure at 3 MPa chamber pressure(ASOI 0.25 ms)

3.2 분무 선단 도달 거리

Fig. 5는 5공 분사기 홀 번호의 정의를 나타낸 것이다. 3.1에서 설명한 바와 같이, DME의 경우 분사 압력에 따라 ‘분무 중단후 재분무’되는 현상이 분사 압력 25MPa에서 발생되었다. 이러한 ‘분무 중단후 재분무’ 현상을 정량화 하기 위하여 초기 분무 선단 길이와 후 분무 선단 길이를 Fig. 6에서 보는 바와 같이 정의 하였고, 후 분무 선단 길이를 그래프의 범례에 ‘L’로 표시하여 구분하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 시간에 따른 DME와 디젤의 분무 선단 거리의 변화이고, 각 실험 값들에 대한 2차 보간(2nd order interpolation) 결과를 Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)에 실선과 파단선으로 나타냈다.

분위기 압력이 대기압인 경우(Fig. 7), DME의 분무 선단 도달 거리가 디젤에 비해 짧은데 이는 액적들이 분사기 하류 방향으로 날라 가면서 증발되는 비율이 DME의 경우가 디젤 보다 빠르게 이루어지고 또한 DME 개개의 액적들이 기화되면서 보유하고 있던 운동량의 손실이 디젤 경우보다는 빠르게 진행되기 때문인 것으로 보여진다. 하지만 분위기 압력을 3MPa로 증가시키면 DME의 분무 선단 도달 거리의 증가율은 디젤과

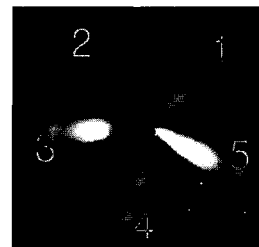


Fig. 5 Definition of nozzle hole number

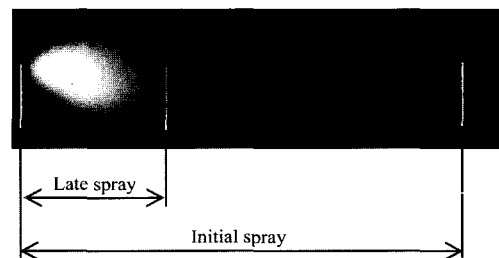


Fig. 6 Definition of spray tip penetration

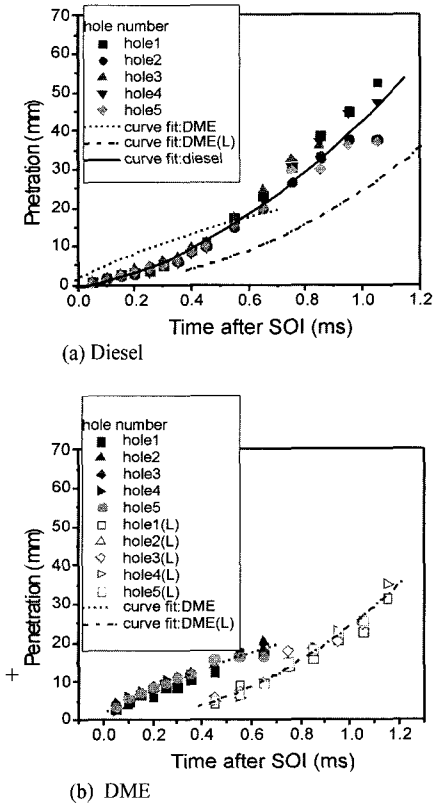


Fig. 7 Spray tip penetration of DME and diesel at 25 MPa of injection pressure and atmospheric chamber pressure

유사한데 이는 DME의 포화 증기압 보다 높은 분위 압력 조건에서는 DME 분무가 디젤과 유사한 거동을 보임을 알 수 있다.

(Fig.8). Fig. 9은 분사기로부터 분출되어 나오는 5개의 DME 분무 선단 거리를 산술 평균하여 DME의 분사 압력이 분무 선단 거리에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 분위기 조건이 대기압과 3MPa의 경우, 분사 압력이 증가 됨에 따라 분무 선단 도달 거리는 길어지고 분위기를 대기압에서 3MPa로 상승시킴에 따라 분무 선단 도달 거리는 짧아 지고 있다. 이러한 분위기 압력 및 분사 압력이 분무 선단 거리에 미치는 영향은 기존 디젤 분무에서 나타났던 일반적인 경향을 잘 따르고 있다.¹³⁻¹⁵⁾ 또한, DME의 ‘분무 중단후 재분무’ 현상이 분사 압력 25MPa과 40MPa에서 발생되었음을 알 수 있다.

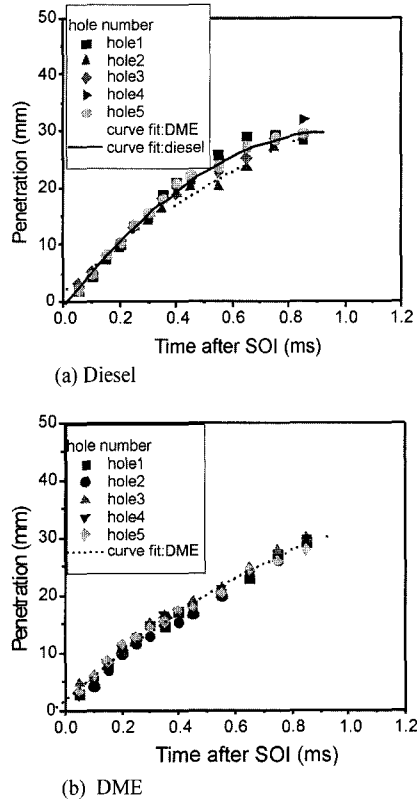
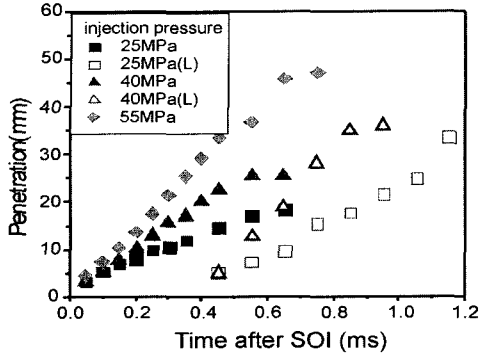


Fig. 8 Spray tip penetration of DME and diesel at 55 MPa of injection pressure and 3 MPa chamber pressure

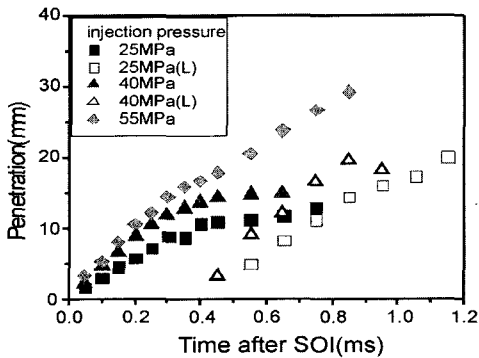
3.3 분무 각

일반적으로 디젤 분무의 경우 plain-orifice 노즐에서 분무 각은 분사기 구멍으로부터 구멍 지름의 60배되는 지점에서 분무의 두 경계점과 분사기 구멍을 연결하는 두 직선이 이루는 각(60d)으로 정의하지만, DME의 경우에 있어서는 분무의 확산이 측방향으로 더 발달되면서 분무 경계면이 곡면으로 형성되기 때문에 위에서 정의한 60d 분무 각을 사용하는 데 무리가 있다.¹⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 연료가 분사기공으로부터 분출되어 노즐 팁 부근에서 이루어지는 분무 경계에 의하여 형성되는 각을 분무 각(spray cone angle)으로 정의하였다.(Fig. 10)

Fig. 11은 25MPa의 분사압으로 대기압 분위기에 DME와 디젤을 분사한 경우, 시간에 따른 분



(a) Atmospheric chamber pressure



(b) 3 MPa of chamber pressure

Fig. 9 Effect of injection pressure on spray tip penetration of DME

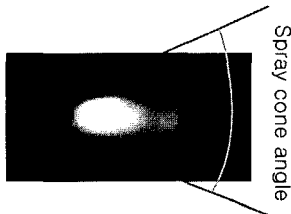
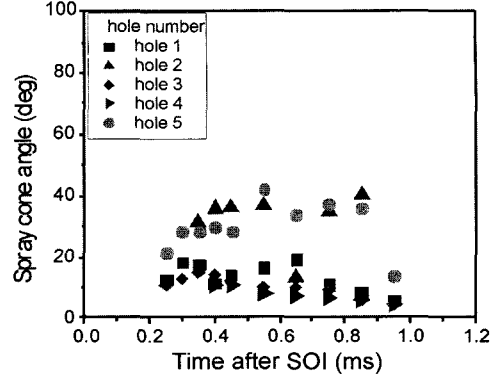
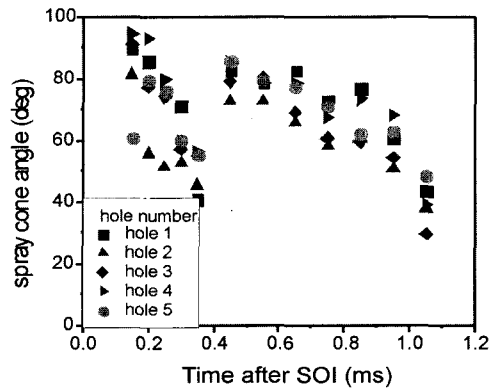


Fig. 10 Definitions of spray and spray cone angle

무 각의 변화이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 대기압 조건에서 DME의 분무각이 디젤보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 1MPa로 가압된 액상의 DME가 대기압 분위기로 분출되어 나옴과 동시에 급격하게 기화되면서 발생하는 비등 현상 때문인 것으로 생각된다. 이러한 DME의 비등 현상의 영향은 분위기 조건을 3MPa로 증가시키면 감소되어 DME의 분무각이 급격하게 작아 지기는 하지만 여전히 디젤보다는 약간 크게 나타나고



(a) Diesel

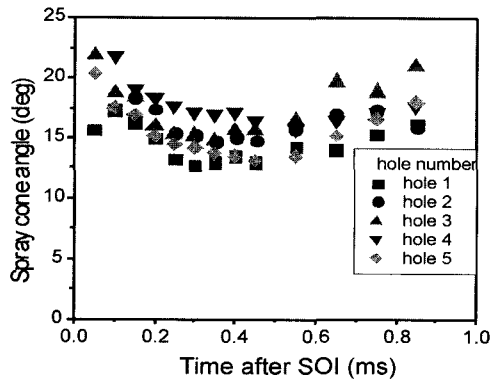


(b) DME

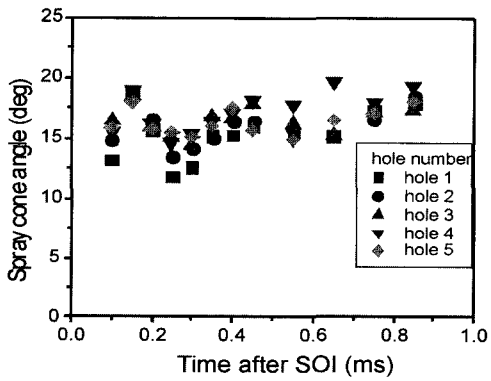
Fig. 11 Comparison of spray cone angle of DME with diesel at 25 MPa of injection pressure and atmospheric chamber pressure

있다.(Fig. 12) 또한, DME가 분무되는 도중 분사기 구멍간 DME의 분무각의 변화가 디젤보다 적은데 이는 본 연구에서 사용한 분사기가 싱글 가이드 타입이기 때문에 분사기의 니들 편심에 의한 분사기 내 압력 불균일이 DME의 높은 압축성으로 인한 분사기 각 구멍으로 분사되어 나오는 분무 형태 변화에 커다란 영향을 주지 못하고 있는 것으로 생각된다.

Fig. 13은 5개 분사기 구멍의 DME 분무각을 산술 평균 값을 나타낸 것으로 분사 압력이 분무각에 미치는 영향이다. 대기압 조건에서 분사 압력이 증가함에 따라 분무각은 감소한다. 하지만 3MPa의 분위기 조건에서 분사 압력의 증가에 따라 분사각은 약간 증가하는 경향을 나타냈다.



(a) Diesel



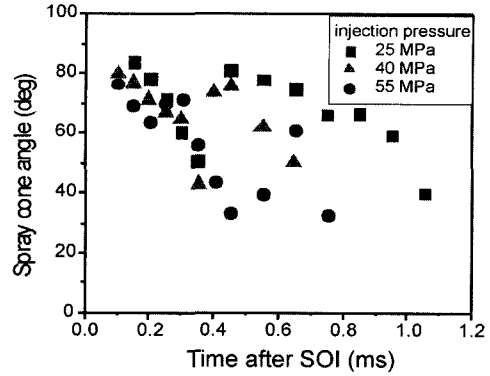
(b) DME

Fig. 12 Comparison of spray cone angle of DME with diesel at 55 MPa of injection pressure and 3 MPa of chamber pressure

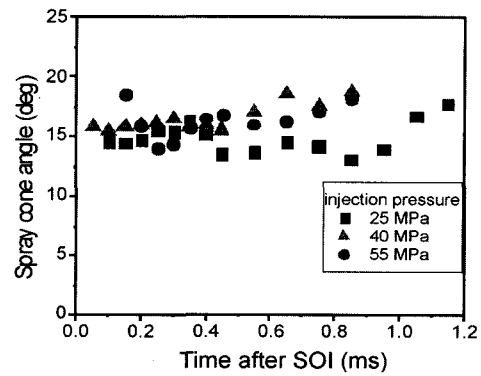
4. 결론

본 연구에서는 커먼레일 타입 분사 시스템을 이용하여 DME와 디젤 연료의 거시적 분무 특성을 실험적으로 관찰하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대기압 분위기 중으로 DME가 분사되었을 경우 비등 현상과 같은 DME 특유의 분무 특성이 나타났지만, 분위기 조건을 DME의 포화 증기압 보다 높은 3MPa로 증가시킨 경우에는 DME의 분무 특성이, 특히 분무 선단 길이에서 디젤과 유사하게 나타났다.
- 2) 분사기 구멍간의 분무 특성 변화는 DME의 경우가 디젤에 비하여 적었다.



(a) Atmospheric chamber pressure



(b) 3 MPa of chamber pressure

Fig. 13 Effect of injection pressure on spray cone angle of DME at different chamber pressures

3) 분사압이 25MPa 과 40MPa 경우 '분무 중단 후 재분무' 현상이 대기압과 3MPa의 분위기 조건에서 관찰되었으나 55MPa인 경우 사라졌다. 이러한 현상에 대한 구체적인 확인을 위하여 인젝터 내에서 변화되는 압력 측정의 필요성이 제기되었다.

4) DME 분무의 확산 특성을 보다 객관적으로 정량화 할 수 있는 분무각에 대한 새로운 정의가 필요하다.

후 기

본 연구는 연소 기술 연구 센터 (CERC)의 연구구비 지원에 의해 수행된 결과입니다.

참 고 문 헌

- 1) R. Verbeek, J. Van der Weide, "Global Assessment of Dimethyl Ether Comparison with Other Fuels," SAE 971607, 1997.
- 2) Y. Sato, A. Noda, T. Sakashi, Y. Goto, "Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Operated on Dimethyl Ether Applying EGR with Supercharging," SAE 2000-01-1809, 2000.
- 3) 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.
- 4) S. C. Sorenson, S. E. Mikkelsen, "Performance and Emission of a 0.273 Liter Direct Injection Diesel Engine Fuelled with Neat Dimethyl Ether," SAE 950064, 1995.
- 5) S. Kajitani, M. Oguma, T. Mori, "DME Fuel Blends for Low-Emission Direct-Injection Diesel Engines," SAE 2000-01-2004, 2000.
- 6) K. F. Hansen, L. Nielsen, J. B. Hansen, S. E. Mikkelsen, H. Landalv, T. Ristola, K. Vielerwerth, "Demonstration of a DME(Dimethyl Ether) Fuelled City Bus," SAE 2000-01-2005, 2000.
- 7) Z. Longbao, W. Hewu, J. Deming, H. Zuohua, "Study of Performance and Combustion Characteristics of a DME-Fueled Light-Duty Direct-Injection Diesel Engine," SAE 1999-01-3669, 1999.
- 8) S. Kajitani, C. L. Chen, M. Oguma, M. Alam, K. T. Rhlee, "Direct Injection Diesel Engine Operated with Propane-DME Blend Fuel," SAE 982536, 1998.
- 9) S. C. Sorenson, M. Glensvig, D. L. Abata, "Dimethyl Ether in Diesel Fuel Injection System," SAE 981159, 1998.
- 10) O. Anderson, R. Collin, M. Alden, R. Egnell, "Quantitative Imaging of Equivalence Ratios in DME Sprays Using a Chemically Preheated Combustion Vessel," SAE 2000-0-2785, 2000.
- 11) D. Gill, H. Ofner, E. Sturman, J. Carpenter, A. Wolvrtan, "Production Feasible DME Technology for Direct Injection CI Engines," SAE 2001-01-2015, 2001.
- 12) 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.
- 13) R. Morgan, J. Wray, D. A. Kennaird, C. Crua, M. R. Heikai, "The Influence of Injector Parameters on the Formation and Break-up of a Diesel Spray," SAE 2001-01-0529, 2001.
- 14) S. W. Lee, J. Kusaka, Y. Daisho, "Spray Characteristics of Alternative Fuels in Constant Volume Chamber (comparison of the spray characteristics of LPG, DME and n-dodecane)," SAE Review, Vol.22, p.271, 2001.
- 15) 강진석, 배충식, "VCO 노즐에서 고압으로 분사되는 디젤 분무의 특성," 한국 자동차 공학회 논문집, 제8권 제3호, pp.28-36, 2000.
- 16) 유 준, 강진석, 공장식, 배충식, "Dimethyl ether와 디젤의 분무 특성 비교," 한국자동차 공학회 추계 학술대회 논문집, pp.487-492, 2001.