

Dimethyl Ether(DME) 연료의 분무 거동 및 미립화 특성

서현규¹⁾ · 박지홍¹⁾ · 이창식^{*2)}

한양대학교 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Dimethyl Ether

Hyun Kyu Suh¹⁾ · Ji Hong Park¹⁾ · Chang Sik Lee^{*2)}

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 10 November 2006 / Accepted 3 May 2007)

Abstract : Dimethyl Ether(DME) is an alternative fuel for diesel engine, it is renewable and offers potential reductions in emissions. This work was conducted to figure out the macroscopic behavior and the atomization characteristics of DME using a common-rail injection system. The macroscopic behavior was visualized with the spray visualization system composed of a Nd:YAG laser and an ICCD camera. The atomization characteristics were investigated in terms of axial mean velocity, Sauter mean diameter(SMD) and droplet distributions obtained from a phase Doppler particle analyzer(PDPA) system.

In this study, it was revealed that the macroscopic behavior and the atomization characteristics of DME are similar compared with commercial diesel fuel. However, DME fuel has a shorter spray tip penetration and a small SMD due to the effect of evaporation characteristics.

Key words : Dimethyl ether(DME), Spray tip penetration(분무도달거리), Spray cone angle(분무각), SMD(Sauter mean diameter), Axial mean velocity(축방향 평균속도)

Nomenclature

D : diameter, mm
L : length, mm
P : pressure, MPa
R : radial distance, mm
t : time, ms
Z : axial distance, mm

eng : energizing
inj : injection

Subscripts

amb : ambient
asoI : after start of injection

1. 서론

최근 석유 에너지 자원의 고갈과 지구환경보존의 차원에서 대체 연료의 필요성이 부각되었고, 활발한 연구가 진행 중에 있다. 그 중에서도 디젤엔진의 저공해 대체연료로서 천연가스, LPG, 합산소 연료, 바이오매스 연료의 적용이 많은 연구자에 의하여 연구되고 있다. 이 중에서도 합산소 연료는 연료 성분 내의 산소가 연료와 공기의 산화과정을 촉진시켜줌으로써 연소 개선, 높은 열효율, 연비성능 향상 의 장점을 갖는 것으로 알려져 있다. 이러한 합산소

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

연료 중 디메틸 에테르(Dimethyl Ether, 이하 DME)는 세탄가가 높기 때문에 압축착화에 의한 디젤 사이클 운전이 가능하며, 디젤 엔진과 같은 수준의 열효율을 얻을 수 있고, PM을 거의 배출하지 않는 등 디젤의 대체 연료로서 각광을 받고 있다.¹⁾ 또한, DME는 천연가스나 석탄으로부터 생산이 가능해 국내 제조가 가능하고, 최근에 저렴한 가격으로 DME를 제조할 수 있는 방법이 개발됨에 따라 차세대 연료로서 DME가 더욱 주목을 받고 있다.

DME 연료의 엔진 적용성 및 배출물 저감 특성에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, Kajitani 등²⁾은 DME는 기화가 쉽게 되기 때문에 PM을 거의 배출하지 않는다고 발표하였다. 또한, DME는 같은 조건의 압축 착화 엔진에서 디젤에 비하여 현저히 적은 양의 PM이 배출되는 반면에 NOx는 비슷하게 배출되는 것으로 Kapus 등³⁾이 발표하였고, Sato 등⁴⁾은 DME를 연료로 사용한 압축 착화 엔진에 EGR율을 증가시켰을 경우에 NOx가 디젤의 1/3수준으로 배출된다고 발표한 바 있다.

그러나, 이러한 장점에도 불구하고 DME는 발열량이 낮으며 탄성계수가 작고, 압축성이 높아서 충분한 연료 분사량이 확보가 어렵다고 Gill⁵⁾이 보고하였다. 또한, DME는 점도가 낮아서 연료 누수의 가능성이 있고, 기관 구동부에서의 윤활성 악화에 따른 마모 문제가 예상 되는 등⁶⁾ 기존의 Diesel과 물

성차이가 크기 때문에 플린저 방식의 디젤기관에서 사용되기 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서, DME의 최적 연료 분사계는 전자 제어를 통해 고압으로 연소실 내부에 연료를 직접 분사하는 커먼 레일 방식이 적합한 것으로 인식되고 있다. Park 등⁷⁾은 커먼 레일 방식을 사용하여 DME의 분무 발달과정을 분석한 결과 분무 특성이 디젤과 유사하다고 보고하였다.

이러한 연구에도 불구하고, DME 분무특성에 대한 미규명 부분이 많으며, 특히 DME 연료의 분무 발달과정과 미립화 특성에 대한 보다 심층적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 커먼 레일식 분사시스템에서 DME의 분무 특성을 다양한 분사압력과 분사 시간에 따라 가시화 하고, 미립화 성능 실험을 통해 분무 입경과 속도를 측정하여 동일한 조건에서 디젤과 DME 연료의 분무 특성을 비교 분석하여, 미립화 특성 및 분무거동을 구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

고압의 연료를 분사하기 위한 커먼 레일 분사 시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 커먼 레일내에 고압의 연료를 안정적으로 공급하기 위하여 두개의 고압연료 펌프(Haskel, HSF-300)를 병렬로 연결하

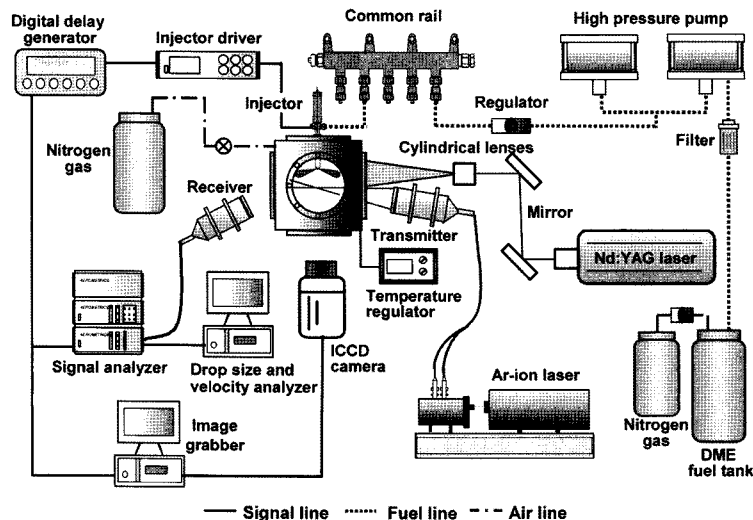


Fig. 1 Spray visualization and PDPA system

여 사용하였으며, 펌프로 공급되는 압축공기의 압력을 이용하여 커먼 레일 내의 압력을 조정하였다.

커먼 레일 고압 분사 시스템에 액상의 DME를 공급하기 위하여 DME 연료를 질소로 가압하였고, 분무 발달과정을 촬영하기 위한 가시화 시스템의 광원으로는 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 광학계로부터 형성된 레이저 시트빔을 이용하여 분무의 단면을 가시화 하였다. 또한, ICCD 카메라와 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H)를 디지털 신호발생기(BNC, Model 555 Pulse/delay generator)를 이용하여 동기화 하였고, 이미지 그래버를 이용하여 분무의 이미지를 취득하였다.

DME의 분무 액적의 입경과 속도를 구하기 위해 위상 도플러 입자 분석기(PDPA)를 사용하였다. PDPA 시스템을 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 광원은 700mW 출력의 Ar-ion 레이저를 사용하였다. 레이저 빔은 40MHz의 주파수 편이를 가지는 각각 2개의 편이 빔과 무편이 빔으로 나누어지고, 이들 빔이 광케이블을 통하여 트랜스미터에 공급되면 빔이 교차하는 지점에 프린지가 형성된다. 연료 액적이 측정 체적을 통과하면 리시버에 산란광이 검출되고, 측정되는 신호의 위상차와 도플러 신호의 주파수는 신호처리를 통하여 연료 평균 지름과 속도로 변환된다.

2.2 실험 방법

본 실험에서 사용된 커먼 레일식 디젤 인젝터는 전자 제어식 드라이버의 신호로 작동되고, 개변압이 12MPa, 최고 200MPa의 고압으로 분사가 가능하다. 노즐의 직경이 0.3mm, 길이는 0.8mm, L/D비는 약 2.67인 단공 인젝터를 사용하였다. 인젝터의 구조와 노즐의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다.

DME 연료의 분무발달과정을 가시화하기 위해 분사압력은 40MPa, 50MPa, 60MPa로 분위기 압력은 고압 체임버에서 대기압(0.1MPa)과 1MPa, 2MPa로 분사기간은 0.8ms부터 1.4ms까지 0.2ms간격으로 변화시켜가며 실험하였다. 분사의 시작점은 인젝터의 노즐 팁에서 분무가 보이는 시점으로 정의하였으며, 분무 가시화의 촬영은 분사시작 후 0.1ms부터 2.0ms까지 0.1ms간격으로 촬영하였다. 또한, DME

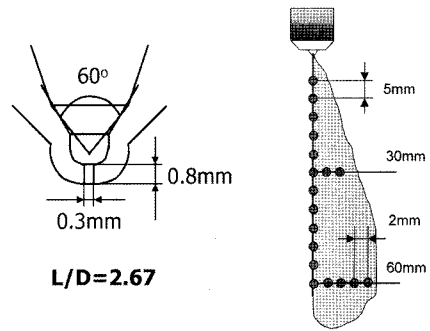


Fig. 2 Schematic of the common rail diesel injector and measuring points

의 미립화 특성을 알아보기 위해서 PDPA 실험 장치를 사용하여, 40MPa와 60MPa의 분사압력으로 실험하였으며, 분사기간은 1.0ms로 고정하였다. 측정 지점은 노즐 팁으로부터 축 방향 5mm 지점부터 60mm 지점까지 5mm 간격으로 측정하였고, 반경방향은 2mm 간격으로 측정하였다. 구체적인 실험 조건은 Table 1과 같다.

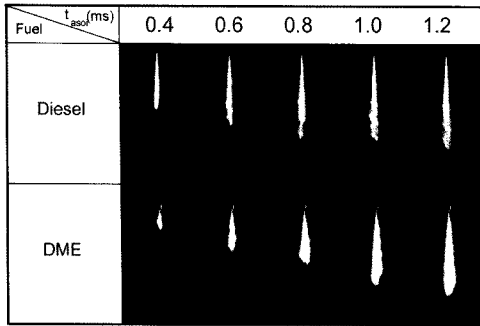
Table 1 Experimental conditions

Injection system	Common-rail	
Injection pressure(P _{inj})	Visualization	40MPa, 50MPa, 60MPa
	PDPA	40MPa, 60MPa
Ambient pressure(P _{amb})	Visualization	0.1MPa, 1MPa, 2MPa
	PDPA	0.1MPa
Energizing duration(t _{eng})	Visualization	0.8~1.4ms
	PDPA	1.0ms

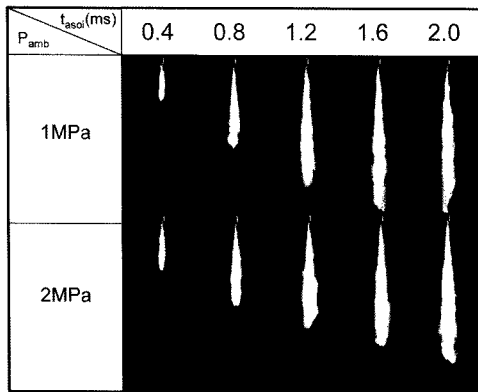
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 DME연료의 분무 발달 과정

본 연구에서는 DME 연료의 다양한 분사조건에서의 자유 분무의 발달과정을 가시화 하여 나타내었고, Diesel 연료와 비교하여 보았다. Fig. 3은 Diesel과 DME 연료의 분무발달과정과 분위기 압력이 DME 연료의 분무 발달과정에 미치는 영향을 비교한 것이다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 동일한 분사조건에서 DME의 분무 발달이 Diesel에 비하여 느리게 진행되며, 분무각 또한 넓은 것으로 나타났다. 높은 분위기 압력의 조건에서 DME 연료의 분무 발달은 주위 기체의 항력의 영향으로 분무 발달이 더디는 것으로 나타났다.



(a) Comparison of diesel and DME spray development



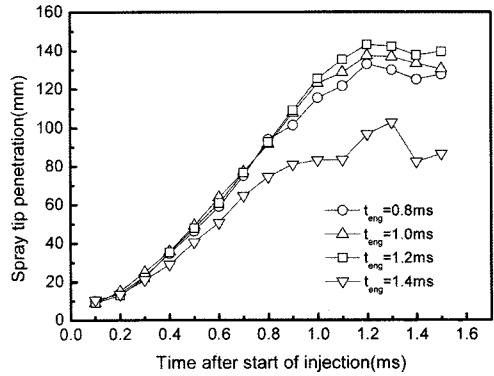
(b) Effect of ambient pressure on DME spray development

Fig. 3 Spray development process

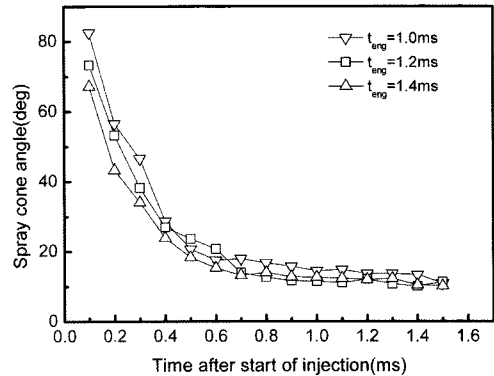
Fig. 4에는 분사압력이 40MPa일 때의 분사시간에 따른 분무도달거리와 분무각을 나타내었다. 분사시간이 0.8ms일 때에는 완전한 분무의 발달이 이루어지지 않아 최소 1.0ms이상의 분사시간이 필요함을 알 수 있다. 또한, 분사시간이 증가할수록 분무도달거리는 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. 분사 초기의 분무각은 분사시간이 길수록 작아지는 것을 알 수 있었다.

분사시간이 1.0ms인 경우의 자유분무에서 분사압력에 따른 분무 선단 도달거리와 분무각을 Fig. 5에 나타내었다. 분사압력이 증가할수록 분무도달거리는 길어지고, 분무각은 대체적으로 줄어드는 것으로 나타났다.

분사압력이 40MPa이고, 분사시간이 1.0ms일 때 분위기 압력에 따른 분무 발달과정과 분사시간이 1.0ms이고, 분위기 압력이 1MPa로 동일할 때 분사압력의 증가에 따른 분무발달과정을 Fig. 6에 나타내었다. 분위기 압력이 높을수록 분무도달거리는



(a) Spray tip penetration



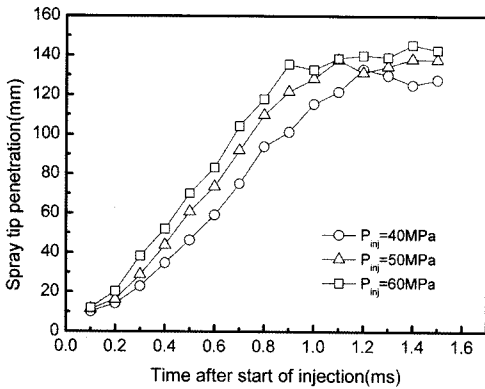
(b) Spray cone angle

Fig. 4 Effect of injection duration on the spray development ($P_{inj}=40MPa$, $P_{amb}=0.1MPa$)

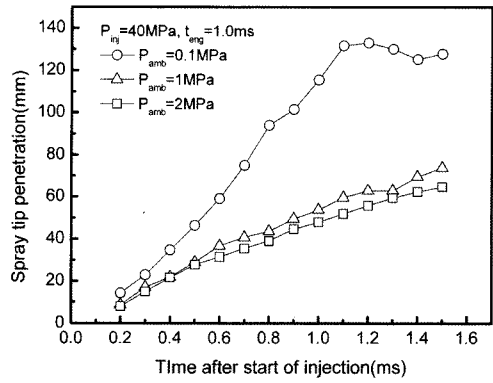
짧게 나타나지만, 분위기 압력이 1MPa과 2MPa일 때의 분무도달거리의 차이는 크지 않았다. 또한, 동일한 분위기 압력 하에서 분무도달거리는 분사압력이 증가할수록 증가하는 일반적인 분무발달의 경향을 보여주었다.

Fig. 7은 분사시간이 1.0ms일 때, DME와 Diesel의 분무 도달거리와 분무각을 비교한 것이다. DME와 Diesel이 모두 분사압력이 증가할수록 분무도달거리는 증가하고, 분무각은 감소하는 경향을 보였다. 하지만, DME가 Diesel보다 분무도달거리가 약 1.3배 정도 짧고, 분무각은 대체적으로 큰 것으로 나타났다. 이것은 DME가 Diesel보다 증발이 활발하기 때문인 것으로 판단된다.

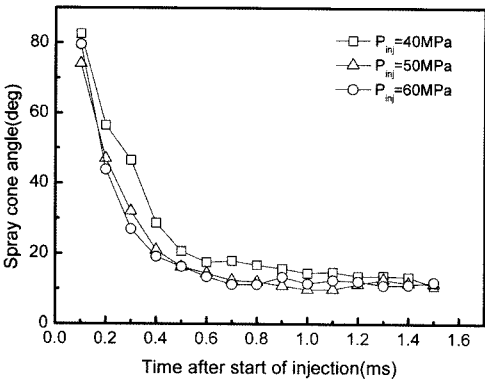
Fig. 8은 분사압력 60MPa, 분사시간 1.0ms 일 때, 1MPa의 분위기 압력하에서 DME와 Diesel을 비교한 것이다. 자유분무와 마찬가지로 DME가 Diesel에



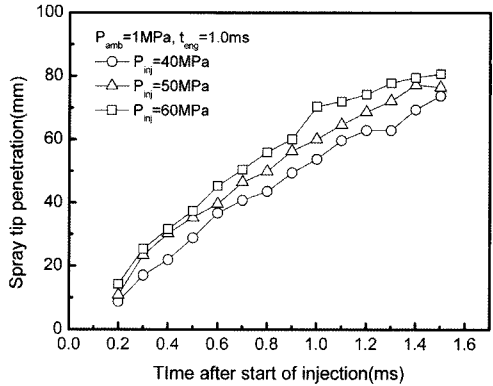
(a) Spray tip penetration



(a) Effect of ambient pressure



(b) Spray cone angle



(b) Effect of injection pressure

Fig. 5 Effect of injection pressure on the spray development ($t_{eng}=1.0\text{ms}$, $P_{amb}=0.1\text{MPa}$)

Fig. 6 Comparisons of spray tip penetration of DME fuel

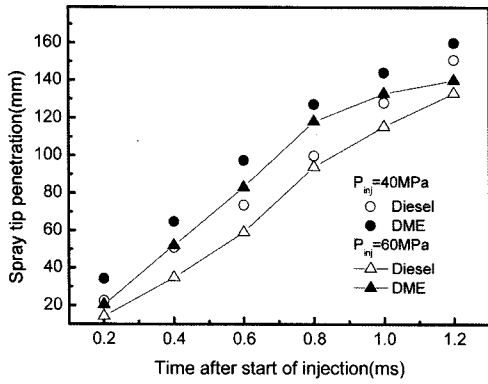
비하여 분무도달거리가 약 1.6배 짧고 분무각이 큰 것으로 나타났다. 자유분무에서는 DME의 분무도달거리가 Diesel에 비하여 1.3배 정도 짧았던 것에 비하여 분위기 압력을 가해졌을 경우에는 1.6배 정도 짧아졌다. 따라서 분위기 압력이 높아질수록 분무도달거리의 차이가 커질 것으로 판단되어 진다. 즉, DME 분무의 경우에는 분위기 압력과 분사압력이 분무도달거리와 분무각에 미치는 영향이 일반 Diesel연료의 경우와 상당히 유사한 경향을 보이면서도 DME의 증발이 Diesel보다 훨씬 활발히 일어나는 것으로 판단된다. 또한 DME가 Diesel보다 증발이 활발하여, PM을 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 DME연료의 분무 미립화 특성

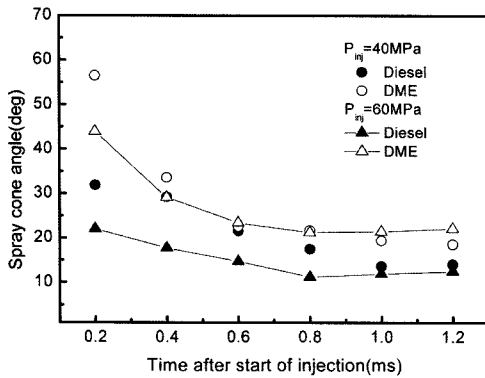
Fig. 9는 DME와 Diesel의 분사 시작 후 시간에 따

른 Overall SMD의 분포를 나타낸 것이다. 분사 시작 후 시간의 경과에 따른 SMD의 분포는 점차 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 분사 시작 후 5ms이후에 DME 연료의 SMD는 안정적이지 못한 경향을 보였다. 이는 대기압 하에서 증발특성이 뛰어난 DME의 특징으로 판단된다. 인젝터의 니들이 돌리면서 DME가 분사되기 시작할 때 처음 분사되는 소량의 DME가 대기압의 상태에서 순식간에 기화되어 버린 후 분무가 정상적으로 발달되기 때문인 것으로 판단된다.

DME의 축 방향 거리에 따른 분무입径의 분포와 축 방향 속도의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)에 나타난 바와 같이 노즐 팁으로부터 축 방향 거리가 멀어질수록 분무 미립화의 영향으로 SMD가 감소하는 경향을 보였다. 또한, 분사압력이 증가할수록 분무 미립화가 활발해져 SMD가 더 작은 값을 가지는 것으로 나타났다. 특히, 축 방향거리



(a) Spray tip penetration



(b) Spray cone angle

Fig. 7 Comparisons of macroscopic spray characteristics of diesel and DME ($P_{amb}=0.1MPa$, $t_{eng}=1.0ms$)

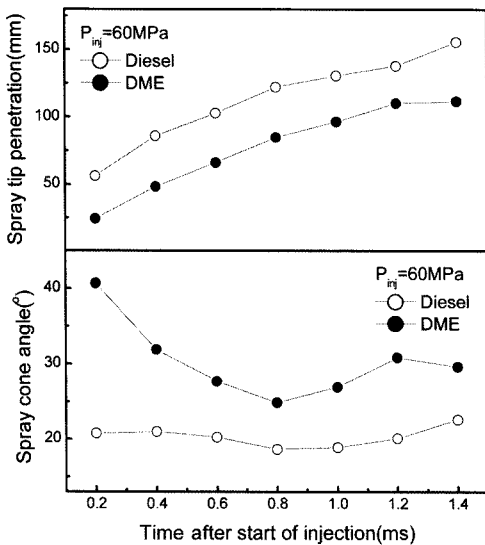


Fig. 8 Macroscopic characteristics of DME and diesel fuels ($P_{inj}=60MPa$, $P_{amb}=1MPa$, $t_{eng}=1.0ms$)

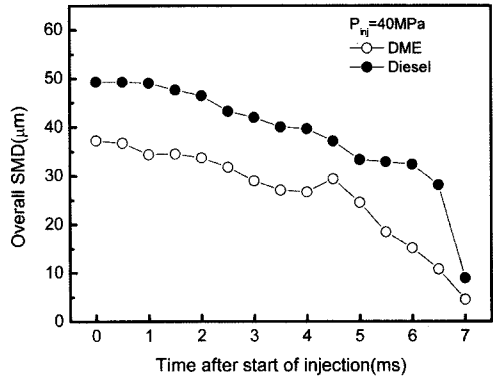
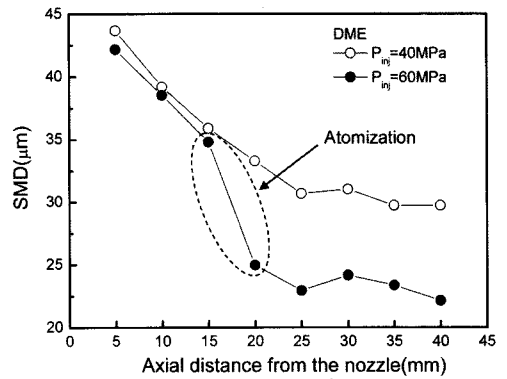
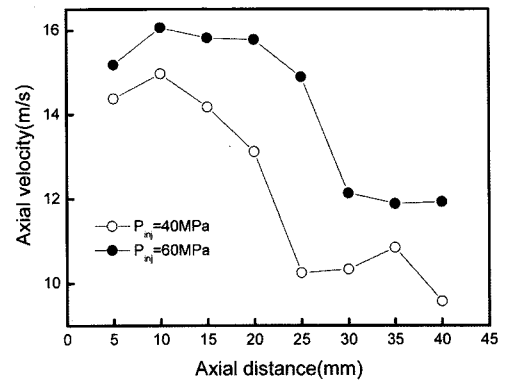


Fig. 9 Comparison of overall SMD between diesel and DME fuels



(a) Local SMD



(b) Axial mean velocity

Fig. 10 Local SMD and axial mean velocity distribution according to the axial distance

10~15mm 지점에서는 SMD값이 급격히 감소하였는데, 이 지점에서 분무의 미립화가 가장 활발히 일어나는 것으로 사료된다. 축 방향 거리에 따른 분무의 평균 속도 분포는 높은 분사압력의 영향으로 노즐

출구에서의 DME의 운동에너지가 커져 60MPa의 경우에 분사속도가 큰 경향을 보였다. 또한, 빠른 분무 속도는 분무의 미립화를 촉진시킬 것으로 사료된다.

Fig. 11은 DME 연료의 분사압력에 따른 AMD(D10)과 SMD(D32)의 분포를 비교한 결과이다. 높은 분사압력으로 인한 노즐 출구에서의 액적의 운동량 증가로 인해 미립화가 활발해져서 분사압력이 60MPa의 경우에 AMD와 SMD가 낮은 값을 가졌다. 이러한 경향은 분사 시작 후 5ms 이후에는 분무미립화의 완료로 인하여 액적의 분포 값이 비슷한 경향을 보였다. 지금까지의 결과로 미루어 보아, DME의 미립화 특성은 디젤과 유사하지만 증발이 활발하여 작은 SMD를 갖는 것으로 판단된다.

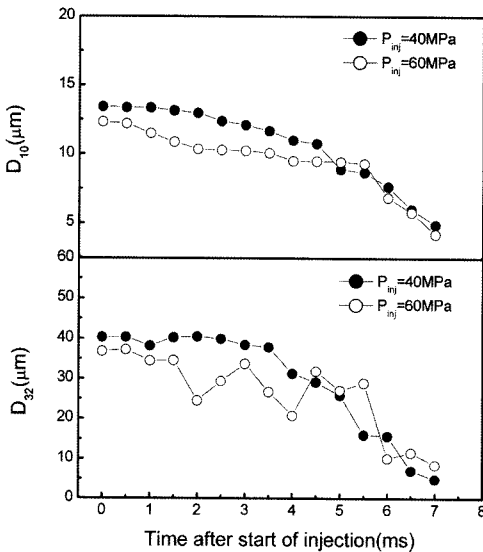


Fig. 11 Effect of injection pressure on AMD(D₁₀) and SMD(D₃₂) of DME fuel

4. 결론

본 연구에서는 커먼 레일 분사시스템에서 DME의 분무 발달과정을 가시화하고, 미립화 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자유 분무의 경우, DME는 분사압력이 크고 분사 시간이 길수록 분무도달거리가 길어지고, 분무각은 작아지는 것으로 나타났다. 또한, DME는 Diesel과 유사한 분무 발달 과정을 보이지만,

DME가 Diesel보다 분무도달거리가 짧고, 분무각이 큰 것으로 나타났다.

- 2) DME는 분위기 압력이 높을수록 분무도달 거리는 짧게 나타났고, 분무각은 크게 나타났으며 분사압력이 커질수록 분무도달거리는 증가하고, 분무각은 감소하는 디젤 분무와 유사한 발달과정을 보였다. 또한, 자유분무에서는 DME의 분무도달거리가 Diesel에 비하여 1.3배 정도 짧았던 것에 비하여 분위기 압력을 가해졌을 경우에는 1.6배 정도 짧아졌다. 따라서 분위기 압력이 높아질수록 분무도달거리의 차이가 증가할 것으로 판단된다.
- 3) 축 방향 거리에 따른 DME의 분무의 평균 속도 분포는 높은 분사압력에서 노즐 출구의 운동에너지가 커져 분사속도가 현저히 증가하는 경향을 보였다. 따라서, 빠른 분무 속도는 분무의 미립화를 촉진시킬 것으로 판단된다.
- 4) Diesel의 분무 입경은 분사 시간 전반에 걸쳐 액적이 분포하고 있으나, DME의 경우에는 분사 시작 후 3ms 이후에는 액적의 분포가 감소하는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 교육인적 자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실 지원 사업 및 환경부 ECO-STAR Project(무·저공해자동차사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) Y. J. Lee, "Dimethyl-Ether as Alternative Diesel Fuel," Transactions of KSAE, Vol.23, No.2, pp.43-49, 2001.
- 2) S. Kajitani, M. Oguma and T. Mori, "DME Fuel Blends for Low-Emission, Direct-Injection Diesel Engines," SAE 2000-01-2004, 2000.
- 3) P. Kapus and H. Ofner, "Development of Fuel Injection Equipment and Combustion System for DI Diesels Operated on Dimethyl Ether," SAE 950062, 1995.

- 4) Y. Sato, A. Noda, T. Sakamoto and Y. Goto, "Performance and Emission of a DI Diesel Engine Operated on Dimethyl Ether Applying EGR with Supercharging," SAE 2000-01-1809, 2000.
- 5) D. Gill, H. Ofner, E. Sturman, J. Carpenter and M. A. Wolverton, "Production Feasible DME Technology for Direct Injection CI Engines," SAE 2001-01-2015, 2001.
- 6) S. C. Sorenson, M. Glensvig and D. L. Abata, "Dimethyl Ether in Diesel Fuel Injection System," SAE 981159, 1998.
- 7) J. H. Park, H. K. Suh, S. W. Park and C. S. Lee, "Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Dimethyl Ether," Fall Conference Proceedings, KSAE, Vol.I, pp.752-757, 2005.