

디젤 및 DME 연료의 거시적 분무특성 비교

박준규* · 전문수** · 박성욱†

Comparisons of Diesel and DME Fuel in Macroscopic Spray Characteristics

Junkyu Park, Munsoo Chon and Sungwook Park

Key Words: Dimethyl ether(디메틸에테르), Spray visualization(분무 가시화), Injection quantity(분사량), Spray tip penetration(분무도달거리)

Abstract

This study focused on comparing macroscopic characteristics of DME and diesel fuel experimentally. DME fuel is one of the most promising alternative fuels because of its superiority in atomization characteristic and clearness in terms of exhaust gas compared with existing fossil fuels. In addition, DME fuel has high cetane number so it could be applied to compression ignition engine. However because DME fuel exists in gas phase at room temperature and atmospheric pressure, and it corrodes rubber parts of fuel line, DME fuel is hard to apply to commercial vehicles. To establish knowledge about DME fuel and furthermore, to develop commercial DME vehicles such as passenger cars, many research have been proceeded steadily. The present study, by comparing spray characteristics of DME fuel to those of diesel fuel, improved atomization characteristics in DME were revealed. Injection quantity measurement and spray visualization experiment were progressed and it was revealed that DME fuel shows small injection quantity than that of diesel fuel and axial development of spray in terms of spray tip penetration decreases when DME fuel was injected.

1. 서 론

디젤 엔진은 높은 열효율 및 우수한 연비로 인하여 승용차, 선박, 건설 기계 등 다양한 분야의 차량에 적용되어 왔다. 또한 그간 많은 연구가 수행되었으며 DPF 등의 후처리 장치로 인하여 과거에 비해 배기배출물의 저감이 상당 부분 이루어 졌지만, Euro-5 및 다가오는 Euro-6 등 차량 배기배출물 제한은 더욱 엄격해지고 있으며 높아지는 유가에 의해 차세대 대체 에너지의 개발

및 차량 적용이 필요한 상황이다. 이러한 현실적인 상황에서 DME(Dimethyl ether)는 친환경 청정연료로써 차세대 대체 연료로 주목받고 있다^(1,2). DME 연료는 분자를 구성하는 탄소원자간의 직접 결합이 없어 연소 시 soot의 배출량이 디젤에 비하여 현저하게 낮으며, 내부에 포함된 산소원자가 연소에 참여하여 연소를 더욱 원활하게 한다는 장점이 있다⁽³⁾. 또한 DME는 화학적으로 높은 cetane가를 갖고 있으며 연료 자체의 낮은 분자량으로 인한 낮은 점성 역시 연료의 미립화에 유리하게 작용하기 때문에 기존의 압축착화 엔진에 적용이 가능할 것으로 전망된다^(3,4). 하지만 DME 연료의 물성 상 상온에서 기상으로 존재하여 액체 연료에 비하여 수송이 어렵다는 점과 엔진의 연료 공급라인을 구성하는 고무계열 부품의 부식을 일으킨다고 알려져 있어 이러한 단점들을 보완하고 새로운 대체연료로써 사용이 가능하도록 많은 연구가 진행되고 있다.

(2011년 월 일 접수 ~ 2011년 월 일 심사완료, 2011년 월 일 게재확정)

*한양대학교 대학원 기계공학과

**한국교통대학교 에너지시스템공학과

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : parks@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0430 FAX : (02)2220-4558

Suh⁽⁵⁾ 등은 Nd:YAG 레이저 및 ICCD 카메라를 이용하여 분사압력 및 분위기압력, 전류통전기간 등에 따른 DME 및 디젤 연료의 거시적 분무 특성을 가시화하였으며, PDPA 시스템을 통하여 분사된 연료 액적의 크기 및 속도를 측정하였고, 디젤 연료와의 SMD 비교를 통하여 DME 연료의 개선된 미립화 효과를 보고하였다.

Kim⁽⁶⁾ 등은 연소실 형상에 따른 DME 및 디젤 연료의 분무 거동특성을 실험 및 수치해석을 통하여 비교하였으며, 두 연료간의 증발율의 비교를 통해 DME 연료의 우수한 증발특성에 대해 보고하였다.

Konno⁽⁷⁾ 등은 Schlieren 법을 이용하여 DME 연료를 정적챔버 내에 고압으로 분사 하여 연료의 액상 및 기상의 거동을 관찰하였고, 연료 분사압력에 따른 연료 분사량 및 증발 정도를 규명하였다.

본 연구에서는 디젤 및 DME 연료에 대하여 연료 분사 시 전류통전에 따른 분사량 측정 및 분무가시화 실험을 통하여 연료에 따른 거시적 분무거동을 파악하고 비교하는데 그 목적이 있다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

차량용 디젤(ULSD) 및 DME 연료에 대한 거시적 분무특성을 알아보기 위하여 Bosch 5공 커먼레일 인젝터를 사용하여 연료 분사량 및 분무가시화 실험을 수행하였으며, 인젝터는 노즐 홀 직경 0.18 mm 및 분사각 142°인 제품을 사용하였다. 이 과정에서 Fig. 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 실험에 사용된 연료분사장치로는 Bosch 5공 인젝터가 사용되었으며, 연료 분사량 측정을 위하여 분사된 액상 및 기상의 연료를 취합할

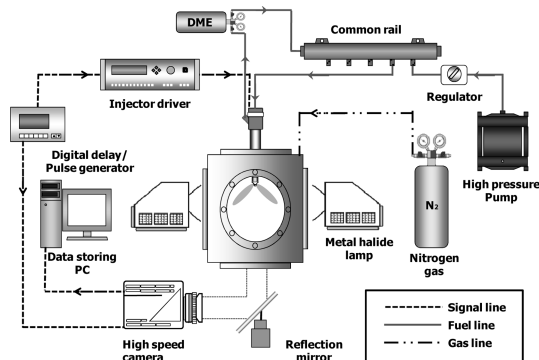


Fig. 1 Experimental apparatus for spray visualization

수 있는 정적 챔버를 사용하였다. 연료 분사량 측정은 실험조건 당 연료 분사 1000회 수행 후 1회 연료 분사량을 계산하였다. 분무가시화 실험에서는 연소실 내부를 모사할 수 있도록 질소가스로 내부를 가압한 고압 챔버 내부에 연료를 분사하였다. 고압챔버에는 시험 인젝터를 수직으로 장착하였고 고속카메라(Photron, Fastcam)를 이용하여 분무의 bottom view 이미지를 0.1 ms 간격으로 취득하였다. 이 과정에서 두 개의 metal-halide lamp(Photron, HCV-SL)를 이용하여 더 선명한 분무형상을 취득할 수 있도록 하였다. 인젝터 및 카메라의 구동은 pulse/delay generator를 이용하여 동기화하였으며 신호 발생을 기준으로 한 분사지연시간을 관찰하고자 하였다. 취득한 이미지는 MATLAB 코드를 통한 이미지 프로세싱을 이용하여 분무도달거리를 측정하는데 객관성을 확보하고자 하였다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

2.2 실험방법

DME의 경우 디젤에 비하여 분자를 구성하는 원자 간의 결합 수가 적고 이러한 화학적 구조로부터 연료의 저위발열량이 낮다는 화학적 특성을 가지고 있다. 따라서 이러한 DME연료를 실제 엔진에 적용 시 동일한 출력을 내기 위하여 더 많은 양의 연료가 분사되어야 하고, 결과적으로 동일한 분사압력 조건에서 DME 연료의 분사시간은 디젤보다 더 길게 적용되어야 한다. 본 실험에서는 분사압력 및 전류통전기간의 변화를 바탕으로 DME 및 디젤 연료에 대한 거시적 분무 특성 및 연료의 물리적 특성이 분무 발달에 미치는 영향을 파악하기 위하여 연료 별 분사 압력 및 전류통전기간을 동일하게 하여 연구를 진행하였다. 연료 분사량 측정 및 분무가시화 실험에 대한 자세한 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

분무가시화 실험의 경우 대기압 및 분위기압력 1.0 MPa, 2.0 MPa 조건에서 실험을 진행하였고 연료 분사압력은 50 MPa 및 90 MPa로 고정하였으며 전류통전기간을 0.75 ms, 1.10 ms로 하였다. 분무의 측방향 발달 속도를 대표하는 분무도달거리는 취득한 bottom view

Table 1 Experimental conditions for spray visualization

Test fuel	ULSD, DME
Energizing duration[ms]	0.75, 1.10
Injection pressure[MPa]	50, 90
Ambient pressure[MPa]	0.1, 1.0, 2.0
Ambient temperature[K]	293

이미지의 노즐 팁 중심으로부터 분무의 가장 먼 끝 부분까지의 길이로 정의하였으며, 5공 인젝터에서 분사되는 각각의 분무가 모두 균일하게 대칭을 이루고 있어 5개의 길이의 평균값으로 결과를 정리하였다. 연료 분사량 측정 실험에서는 분무가시화 실험에서와 동일한 연료 분사 압력 및 전류통전기간 조건 하에서 조건당 연료 분사 1000회 수행 이후 3회씩 반복하여 1회 연료 분사량을 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료 분사량 측정 실험 결과

DME 및 디젤 연료에 대한 연료 분사량 실험결과를 Fig. 2 및 Table 2에 나타내었다. 동일 압력 및 동일 전류통전기간 조건 시에 DME의 경우 디젤보다 연료 분사량이 더 적은 것으로 나타났으며, 전류통전기간이 길수록 디젤에 대한 DME의 연료 분사량의 감소율은 작아졌다. 이와 같은 결과는 두 시험연료간의 밀도차이에 의한 영향이 지배적일 것으로 판단된다. 연료를 가압하는 압력과 인젝터 내부의 니들이 들려있는 시간이 동일하다면 두 시험연료에 대하여 동일한 체적의 연료가 노

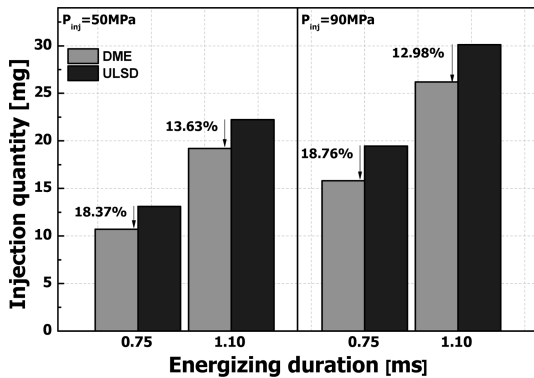


Fig. 2 Comparisons of injection quantity in dimethyl ether and diesel fuel

Table 2 Experimental result of injection quantity

		ULSD	DME
50 MPa	0.75 ms	13.10	10.73
	1.1 ms	22.24	19.21
90 MPa	0.75 ms	19.52	15.84
	1.1 ms	30.11	26.21

즐로부터 분사되며, 결과적으로 분사된 연료량을 측정할 때에 두 연료의 밀도시험연료의 밀도의 영향을 가장 크게 받게 되는데 액화된 DME연료의 경우 밀도가 디젤에 비하여 밀도가 낮기 때문에 이와같은 결과가 나타난 것으로 추정 가능하다. 분사량 측정 실험 과정에서 DME 연료 분사압력 50 MPa의 경우에는 5 Hz의 분사 속도에 대하여 연료라인의 압력이 일정하게 유지되었으나 90 MPa의 분사압력 조건에서는 빠른 분사 시 라인 내 압력이 유지되지 못하고 압력하강이 발생했다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 연료 분사속도를 1 Hz로 낮추어 관 내 압력을 유지하였지만 빠른 속도로 회전하는 실제 엔진에 적용하기에는 무리가 있으므로 향후 이러한 문제를 개선할 수 있도록 연구가 더 진행되어야 할 것으로 판단된다.

3.1 분무가시화 실험 결과

Fig. 3은 분위기압력 1.0 MPa 및 2.0 MPa 조건 하에서 DME 및 디젤 연료의 통전 후 시간에 따른 분무도달

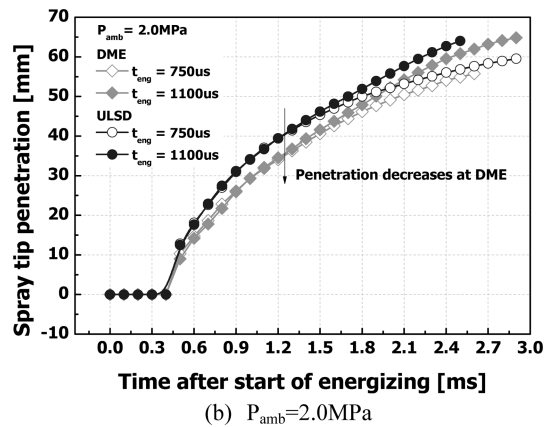
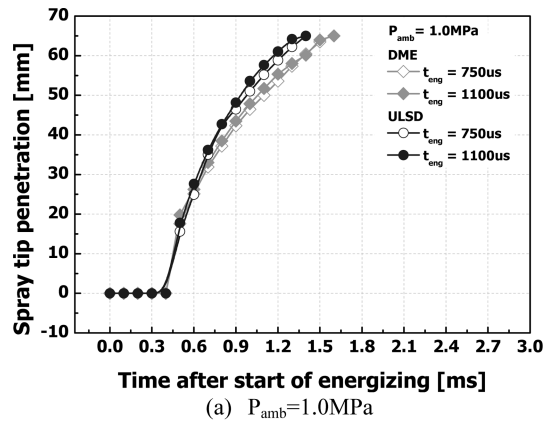


Fig. 3 Spray tip penetration with test fuels

거리를 비교한 그래프이다. 두 시험연료에 대하여 모두 전류통전시간이 길어짐에 따라 분무의 축 방향 발달이 더 오래 지속되는 것을 관찰 할 수 있었으며, 분무도달 거리는 DME의 경우 디젤에 비하여 전체 시간에 대해 짧은 것으로 나타났다. 이러한 결과에 대한 원인 역시 DME 연료의 물리적 특성인 낮은 밀도를 들 수 있다. 높은 분위기압력 조건에서의 분무는 주위 기체와의 충돌로 인하여 초기의 운동량을 잃게 되고 분무발달 속도는 점차적으로 감소하게 된다. DME의 경우 낮은 밀도의 영향으로 동일 압력 조건에서 디젤에 비해 더 작은 초기 운동량을 갖게 되며 주위 기체의 항력으로 인한 운동량 손실로 인해 분무발달이 더디지는 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 또한 DME 연료는 상온 대기압 조건에서 기상으로 존재하기 때문에 연료가 분사됨과 동시에 감압비등에 의한 미립화 효과로 인하여 분무발달도 증 무화가 원활하게 이루어지는 것을 관찰 할 수 있었으며, 통전시간 0.75 ms 조건에서 통전 후 시간에 따른 분무 이미지를 Fig. 4에 나타내었다.

연료 분사 직후 초반에는 두 연료에 대한 뚜렷한 거시적 분무 특성이 나타나지 않았으나 통전 후 시간이 흐름에 따라 DME 연료의 우수한 미립화 특성으로 인해 디젤연료에 비하여 연료의 무화 가 상당부분 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 또한 연료 분사압력이 높아짐에 따라 연료 액적의 무화 정도는 감소하는 것으로

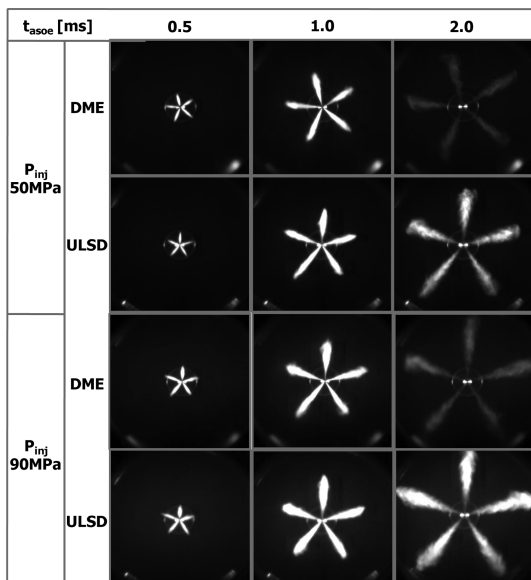


Fig. 4 Comparisons of spray images in DME and ULSD. P_{amb}=2.0 MPa, t_{eng}=0.75 ms

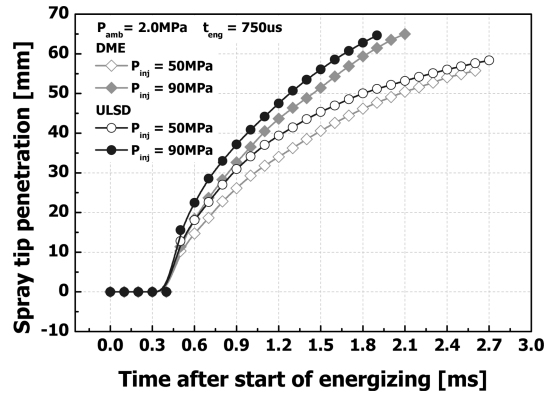


Fig. 5 Effects of injection pressure in spray tip penetration

나타났으며, 이는 90 MPa의 압력조건에서도 50 MPa일 때와 동일한 시간 동안 전류를 통전하였기 때문에 연료 분사량의 증가로 인하여 연료의 미립화가 충분히 일어나지 못한 것으로 판단된다. 연료분사압력이 분무발달에 미치는 영향을 파악하기 위하여 연료 별 분사압력에 따른 분무도달거리 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. DME 및 디젤 연료에 대하여 모두 분사압력이 높아짐에 따라 분무의 발달속도 역시 증가하는 결과가 나타났다. 또한 50 MPa 및 90 MPa 분사압력 조건에 대하여 모두 DME의 분무도달거리는 더 짧게 나타났다. 전류 통전 후 분무가 시작 되기까지의 분사지연은 DME 연료의 낮은 점도로 인하여 디젤에 비하여 분사가 더 빨리 시작될 것으로 예상했으나 두 시험연료 및 분사압력에 관계 없이 일정한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 분무가 시화 실험에서 측정된 이미지 상의 결과로부터 도출된 것으로 보다 더 정확한 분사지연을 검사하기 위하여는 분사율 실험이 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 DME 및 디젤 연료에 대하여 분사량 측정 실험 및 분무가시화 실험을 수행하여 연료에 따른 거시적 분무특성을 비교하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 연료 분사량 실험 결과 DME의 연료 분사량은 디젤에 비하여 더 적은 것으로 나타났으며 이는 두 연료간의 밀도차이에 의한 영향이 지배적인 것으로 판단된다.
- 2) 분무가시화 실험결과 전류통전시간이 증가함에 따라

라 분무의 축 방향 발달이 지속되는 것으로 나타났으며 DME의 경우 디젤에 비하여 측정 시간에 대하여 전체적으로 더 짧은 분무도달거리를 갖는 것으로 나타났다.

3) 분사압력에 따른 분무도달거리는 분사압력이 증가함에 따라 두 시험연료 모두 증가하는 것으로 나타났으며 DME연료의 분무 발달속도는 연료 분사압력을 높임으로써 보상할 수 있을 것으로 판단된다. 분사압력을 높일 시 DME 연료의 경우 빠른 속도로 분사 시 연료 공급 라인 내 압력하강이 발생하여 이러한 문제 역시 개선하여야 할 것으로 판단된다.

4) 두 시험연료에 대한 분무가시화 이미지를 관찰한 결과 DME연료의 경우에 우수한 미립화 특성 및 기화 특성으로 인하여 분무 액적의 무화가 원활히 이루어졌으며, 분사 초기에는 연료간의 뚜렷한 차이가 나타나지 않았지만 분사 종료 후 충분한 시간 후에 상당 부분 증발이 이루어진 것으로 확인되었다.

5) 두 연료에 대한 분사시연은 분무가시화 이미지 상에서는 나타나지 않았으며 보다 정확한 측정을 위하여 향후 분사를 실험이 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2단계 두뇌한국 21사업의 지원으로 수행한 연구결과이며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) H. Ofner, D. Gill, and C. Krottscheck, "Dimethyl ether as fuel for CI engines - A new technology and its environmental potential", SAE paper, 1998, 981158.
- (2) S. C. Sorenson, M. Glensvig, and D. L. Abata, "Dimethyl ether in diesel fuel injection system", SAE paper, 1998, 981159.
- (3) H. Teng, J. C. McCandless, J. B. Schneyer, "Thermochemical characteristics of dimethyl ether-An alternative fuel for compression-ignition engines", SAE paper, 2002, 2002-01-0862.
- (4) H. Teng, J. C. McCandless, J. B. Schneyer, "Thermodynamic properties of dimethyl ether-An alternative fuel for compression-ignition engines", SAE paper, 2004, 2004-01-0093.
- (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 and Fuels, Vol. 20, 2006, pp. 1471-1481.
- (6) 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 and Fuels, Vol. 22, 2008, pp. 2851-2860.
- (7) M. Konno, K. Chiba, and T. Okamoto, "Experimental and numerical analysis of high pressure DME spray", SAE paper, 2010, 2010-01-0880.
- (8) 박정환, 박수한, 이창식, 박성욱, "DME 연료의 거시적 분무특성에 관한 실험적 연구", 한국액체미립화학회지, 제 15권, 3호, 2010, pp. 115-123.
- (9) 전문수, "클린 디젤엔진 적용을 위한 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 분무특성", 한국액체미립화학회지, 제 17권, 3호, 2012, pp. 158-163.
- (10) 박세원, 박수한, 박성욱, 전문수, 이창식, "디젤-가솔린 혼합연료의 혼합안정성 및 거시적인 분무 특성에 관한 실험적 연구", 한국액체미립화학회지, 제 17권, 3호, 2012, pp. 121-127.
- (1) H. Ofner, D. Gill, and C. Krottscheck, "Dimethyl ether as fuel for CI engines - A new technology and its