

고압 인젝터의 노즐 홀 수가 DME 연료분무의 미립화 특성에 미치는 영향

이종태* · 이상훈** · 전문수†

Effect of Nozzle Hole Number on Atomization Characteristics of DME Fuel Spray using High Pressure Injector

Jongtae Lee, Sanghoon Lee and Mun Soo Chon

Key Words: PDPA(위상도플러 입자분석기), Nozzle hole number(노즐 홀 수), Atomization characteristics(미립화 특성), DME(Di-Methyle Ether, 디메틸에테르)

Abstract

This paper presents effect of nozzle hole number on atomization characteristic of DME fuel spray using three different type of injector having the hole number of 6, 7 and 8. For this study, PDPA(phase Doppler particle analyzer) experiment was performed in terms of T_{ASOE} under various injection pressure. To compare general trend of atomization characteristic, the law data were ensemble averaged based on T_{eng} of 0.2 ms. Results showed that the droplet diameter in terms of SMD(Sauter Mean Diameter) was reduced as increase in injection pressure. Increasing the number of hole lead to reduce in droplet diameter, but no significant reduction in diameter was observed between hole number of 7 and that of 8. In addition, increasing the number of hole resulted in decrease in droplet velocity which is considered as the effect of reduction in spray momentum due to decreasing of fuel quantity per each hole.

기호설명

SMD : 사우트 평균 입경
 P_{inj} : 연료 분사 압력
 P_{amb} : 분위기 압력
 T_{eng} : 통전시간
 T_{ASOE} : 분사 후 통전 시간

1. 서 론

최근 강화되는 연비 및 배기규제는 친환경 고효율 차량에 대한 관심을 증대시키고 있으며, 이러한 규제를 만족시키기 위한 대응기술이 절실히 요구되고 있다. 이러한 측면에서 디메틸에테르(DME, Di-methyle Ether)는 높은 세탄가와 발열량으로 인해 디젤 연료를 대체할 친환경 대체에너지로서 국제적인 관심을 받고 있다.

DME연료의 높은 세탄가는 현재 압축착화 디젤 기관에 즉시 적용 가능하다는 장점이 있으며⁽¹⁻²⁾, 천연가스를 합성하는 방법으로 CO₂를 소비하는 제조과정도 이산화탄소 규제 대응을 위한 장점으로 작용한다. 또한 DME 연료는 LPG와 동일하게 상온에서 액화가 가능하며, 빠른 미립화 특성과 연료 자체가 산소를 함유한 연료이기 때문에 연소 시 입자상 물질(PM, particulate matter)을

Received: 03 Nov 2014, Received in revised form: 16 Dec 2014, Accepted: 17 Dec 2014)

*국립환경과학원 교통환경연구소

**한양대학교 대학원

†책임저자, 회원, 한국교통대학교 에너지시스템공학과

E-mail : mschon@ut.ac.kr

TEL : (043)841-5292 FAX : (043)841-5280

거의 배출하지 않는다는 장점이 있다⁽³⁻⁵⁾. 또한 세일가스 등 다양한 원료를 통해 제조 할 수 있기 때문에 에너지 원의 다양화의 측면에서 대체연료로서의 큰 장점을 가지고 있다⁽⁶⁾.

이와 같은 DME 연료의 보다 효과적인 디젤엔진의 적용을 위해서는 DME 연료에 대한 분무 특성 분석이 필수적이며, 따라서 다양한 접근을 통해 DME 연료분무의 특성을 분석 및 보고하고 있다. Kim 등⁽⁷⁾은 DME 연료의 압축착화 엔진 적용성을 확인하기 위하여 분사압력 및 분위기 압력 변화가 분무의 발달 특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였으며, Park 등⁽⁸⁾은 DME 연료 분무의 가시화 실험을 수행하여 고압분사 DME 연료의 분무 발달 과정에 대해 보고하였다. 그에 따르면, 정적 챔버의 분위기 압력 상승은 DME 분무 발달 및 분무의 모멘텀 소실에 영향을 미치게 되며, 짧은 분무 도달거리와 넓은 분무각을 가지는 경향이 있다고 보고하였다. Kim 등⁽⁹⁾은 KIVA 코드를 이용하여 고온·고압의 분위기 조건에서 DME 연료의 분무 및 증발 특성을 수치적으로 해석한 결과를 제시하였다. 연구 결과, KH-DDB 모델을 사용한 결과의 분무 발달과정이 실제 실험 결과와 매우 유사하였으며, 증발률 계산을 통해 분무 중심에서 증발이 가장 활발히 일어나고, 이러한 경향은 분위기 온도가 상승할수록 활성화된다고 보고하였다. Park 등⁽¹⁰⁾과 Kim 등⁽¹¹⁾은 디젤연료와 DME연료의 분무 발달 특성 비교를 통해 연료의 물성치 차이가 분무 발달 및 분사과정에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 상대적으로 낮은 DME연료의 밀도는 동일한 인젝터 통전기간에서 상대적으로 적은 양의 연료를 분사하고, 이에 따라 연료의 분무 도달거리 또한 줄어드는 경향이 있다고 보고하였다. Yang 등⁽¹²⁾은 디젤연료와 DME 연료를 혼합한 디젤-DME 연료의 혼합 비율이 분무 발달과정에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였으며, DME 연료의 질량 혼합률이 증가 할 수록 혼합 연료의 분사량은 작아지고 분무 도달거리가 짧아지는 경향이 있다고 보고하였다.

이와 같이 DME 연료를 이용한 많은 분무 미립화 특성에 대한 연구가 이루어지고 있으나, 최근에 적용되고 있는 고압분사 디젤엔진에 효과적인 적용을 위해서는 고압분사 DME연료의 미립화 특성에 관한 체계적인 연구가 필수적이다. 이와 같은 배경하에 본 연구에서는 PDPA 장비를 이용하여 다양한 분사 조건에서 DME 분무의 액적의 크기와 속도를 측정하였다. 또한 Euro-6용 디젤엔진의 DME 연료 적용 가능성을 위한 선행 실험

으로서 고압 인젝터의 노즐 홀 수의 증가에 따른 DME 연료의 미립화 특성을 분석하여 DME 연료 디젤 엔진의 연소시스템 설계를 위한 데이터베이스를 구축하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

인젝터 홀 수 변화에 대한 DME연료분무의 미립화 특성을 실험적으로 분석하기 위하여 연료 분무 및 PDPA(phase Doppler particle analyzer) 실험 장치를 Fig. 1과 같이 구성하였다.

DME 연료는 고압펌프(HSF-300) 와 커먼레일로구성된 연료 공급장치를 통하여 고압 DME 연료용 인젝터로 공급되며, 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H) 및 디지털 신호 발생기(BNC, Digital pulse generator)로 이루어진 인젝터 제어장치를 통하여 연료 분사를 위한 인젝터 통전시간을 제어하였다. DME 연료 분무의 입경 측정을 위한PDPA 시스템은 Ar-ion 레이저, 트랜스미터, 리시버 및 리시버로부터 취득된 액적의 도플러 신호를 분석하기 위한 신호 분석장비로 구성되어 있다. Ar-ion 레이저에서 공급되는 1W의 일정한 세기의 레이저는 트랜스미터에 의해 측정 볼륨을 생성하게 되고, 이 측정 볼륨을 지나는 연료분무의 액적에 의해 산란된 광 신호는 리시버를 통하여 취득되게 된다. 본 연구에서는 1차 산란 빛을 주로 측정하기 위해 트랜스미터와 리시버 사이의 측정각을 150°로 설정하였으며, 측정 볼륨을 지나는 연료분무의 입경 및 속도 정보는 디지털 신호 발생기와 동기화되어 신호 분석장비를 통하여

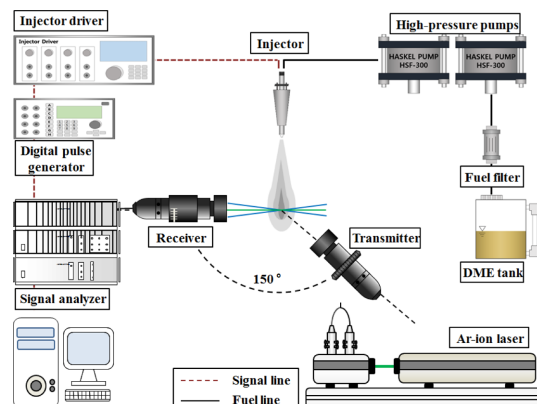


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Test injector	Injector A (6 holes) Injector B (7 holes) Injector C (8 holes)
Fuel	DME
Injection pressure (MPa)	15, 20, 30, 40, 50
Ambient pressure (MPa)	0.1
Energizing time (ms)	1.5
Measurement point (mm)	100 (from nozzle tip)

컴퓨터에 저장된다.

2.2 실험 방법

Table 1은 본 연구에서 수행한 DME 연료 적용고압 인젝터의 종류와 분사조건 및 측정위치 등 본 연구를 수행하기 위한 실험조건을 나타낸다.

실험에 적용된 인젝터는 노즐의 홀 수가 서로 다른 DME 연료분사를 위해 내부의 실링이 추가로 가공된 3종의 고압 디젤 인젝터를 사용하였으며, 분사압력과 통전시간은 각각 15, 20, 30, 40, 50 MPa과 1.5 ms로 설정하였다. 또한 연료 액적의 입경과 속도 측정을 위한 측정 위치는 주어진 분사 조건에서 자유 분사가 되는 조건인 인젝터의 노즐 팁으로부터 100 mm 하류로 설정하였다.

DME 연료의 미립화 특성을 분석하기 위하여 PDPA로부터 측정된 데이터는 동일 조건에서 평균적인 경향을 비교하기 위하여 통전시간을 기준으로 0.2 ms 단위의 앙상블(ensemble) 평균화 작업을 수행하여 분석하였으며, 분무액적 속도에 대한 앙상블 평균 결과 예를 Fig. 2에 붉은 점으로 표시하여 나타내었다.

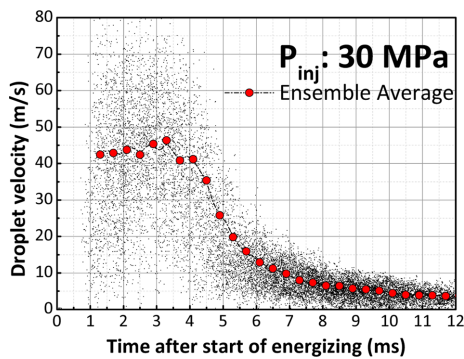


Fig. 2 Ensemble average process of law droplet data

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분사압력에 대한 DME 연료분무의 액적크기 비교

인젝터의 노즐 홀 수가 서로 다른 인젝터 A, B, C에 대한 DME 연료분무의 액적 크기를 분사 압력 변화에 대해 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

인젝터 A, B, C 모두 분사압력이 증가함에 따라 액적의 크기가 작아지는 경향을 나타내고 있으며, 40 MPa 이상의 분사 압력에서는 이러한 감소 경향이 작아지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 인젝터 노즐 홀 수가 증가함에 따라 미립화가 촉진되어 7공과 8공 인젝터의 경우 액적의 크기가 약 11 μm로 6공 인젝터에 비해 약 2 μm 정도 작아지고 있는 것으로 측정되었다.

3.2 인젝터 홀 수에 대한 DME 연료분무 액적의 크기 비교

분사압력 50 MPa 에서 노즐 홀 수가 서로 다른 인젝터 A, B, C 에 대한 DME 연료 분무의 액적의 크기 분

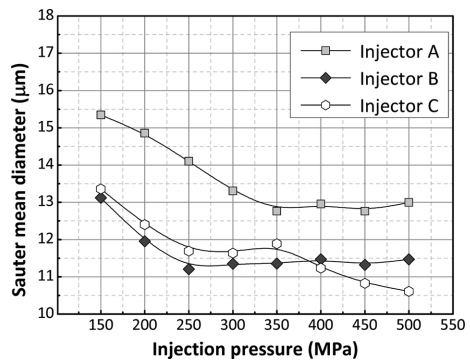


Fig. 3 Comparison of droplet diameter in terms of SMD under various injection pressures

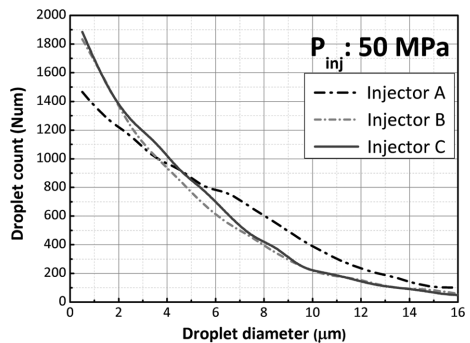


Fig. 4 Comparison of droplet diameter distribution using the injector A, B and C

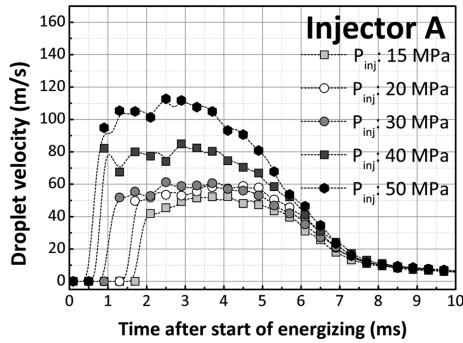


Fig. 5 Comparison of droplet velocity under various injection pressure using the injector A

포를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다.

3종의 인젝터 모두 액적의 크기가 대부분 20 μm 이하에 분포하는 것으로 나타났으며, 7공과 8공 인젝터의 경우 6공 인젝터에 비해 약 5 μm 이하의 작은 액적이 측정 되었다. 이러한 현상으로 볼 때 인젝터의 노즐 홀 수 증가에 따라 액적의 크기가 작아져 미립화가 향상되고 있음을 정량적으로 확인할 수 있다.

3.3 분사압력에 대한 DME 연료분무 액적의 속도 비교

분사 압력에 대한 DME 연료분무 액적의 속도를 분석하기 위해, 6공 인젝터를 대상으로 분사 압력 변화에 따른 DME 연료분무 선단의 속도를 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 경향성 비교를 위해 통전시간을 기준으로 0.2 ms 단위로 취득된 액적의 속도 값을 앙상블 평균화하였으며, 분사 압력의 영향을 파악하기 위하여 동일 그래프에 나타내었다.

분사압력이 상승 할수록 분무선단의 속도가 증가하는 경향을 확인 할 수 있었으며, 특히 분사 압력 30 MPa 이하의 압력에서는 분무 속도가 약 50~60 m/s 사이에 분포하여 그 차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 또한 분사압력이 상승하면서 측정지점에 도달하는 시간이 짧아 지는 경향을 확인 할 수 있었다. 그러나 30 MPa 이상의 분사압력에서, 분사압력 10 MPa 당 분무 액적의 속도가 약 30 m/s 증가하였으며, 50 MPa의 분사압력에서 본 연구에서 가장 빠른 110 m/s인 것으로 측정되었다.

3.4 인젝터 노즐 홀 수에 대한 DME 연료분무 액적의 속도 비교

인젝터 노즐 홀 수에 대한 DME 연료분무 액적의 속

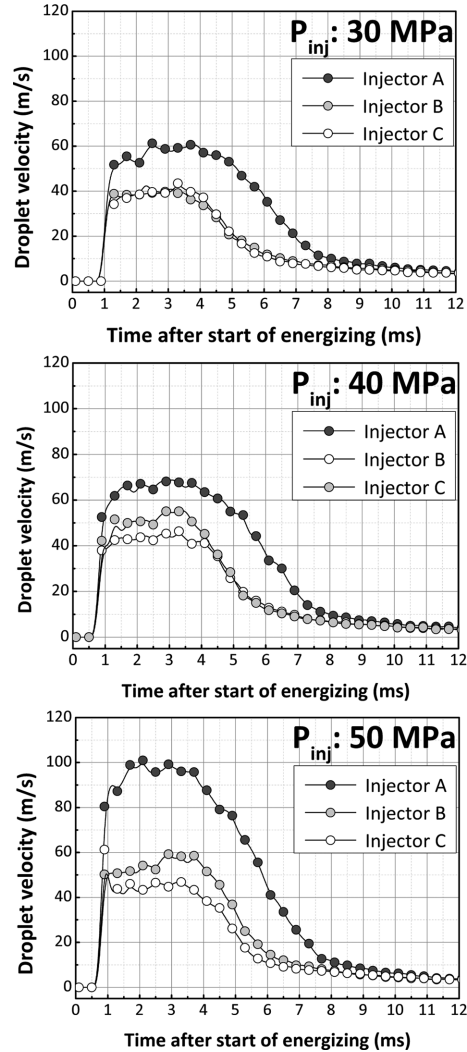


Fig. 6 Comparison of droplet velocity using the injector type of A, B and C (P_{inj} : 30 MPa, 40 MPa, 50 MPa)

도를 비교하기 위해 분사 압력 30 MPa, 40 MPa, 50 MPa에 대한 분무 선단의 속도를 Fig. 6에 나타내었다.

분사압력 30 MPa 인 경우 6공 인젝터에서 분사된 연료분무의 선단 속도가 약 60 m/s로 가장 큰 것으로 나타났으며, 7공과 8공 인젝터의 경우 약 40 m/s로, 6공 인젝터에 비해 약 20 m/s 작게 측정되어 두 인젝터 사이의 속도 값은 매우 유사한 것을 확인 할 수 있었다. 분사압력이 40 MPa와 50 MPa로 상승 할수록 7공 인젝터의 분무 선단 속도가 8공 인젝터에 비해 약 10 m/s 정도 큰 것을 확인 할 수 있었으며, 특히 6공의 경우 약 100 m/s로 3종의 인젝터 중에서 가장 큰 속도 분포를 나

타내었다. 이러한 결과는 인젝터의 노즐 홀 수가 증가함에 따라 홀의 단위면적당 지나는 분무의 유량이 감소하기 때문인 것으로 판단되며, 따라서 유량 감소로 인한 연료분무의 모멘텀 감소가 분무 선단의 속도를 감소시키는 주된 영향이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 연료 분무 및 PDPA 장비를 이용하여 다양한 분사 조건 및 노즐 홀 수가 다른 3종의 인젝터를 이용하여, DME 연료분무 액적의 크기 및 속도 분포를 측정하였다. 이를 통해 분사압력 및 인젝터 노즐 홀 수 증가에 따른 DME 연료분무의 미립화 특성을 분석하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 노즐 홀 수가 서로 다른 인젝터 A, B, C 모두 분사압력 상승할수록 액적의 크기는 감소하였으며, 40 MPa 이상의 분사압력에서는 그 경향이 완만해짐을 확인하였다 또한 인젝터 노즐 홀 수가 증가함에 따라 미립화가 촉진되어 7공과 8공 인젝터의 경우 액적의 크기가 약 11 μm 로 6공 인젝터에 비해 약 2 μm 정도 작은 것으로 측정되었다.

2) 30 MPa 이하의 분사압력에서 DME 연료분무 선단의 속도는 약 60 m/s로 측정되었으며 분사압력이 높아질수록 DME 연료의 분무 선단 속도가 증가하여 50 MPa의 분사압력에서의 분무선단 속도는 약 110 m/s 인 것으로 측정되었다.

3) 모든 분사압력 조건에서 6공 인젝터의 분무 선단의 속도가 가장 큰 것으로 나타났으며, 특히 40 MPa 이상의 분사 압력에서는 7공 인젝터의 분무 선단속도가 8공 인젝터에 비해 약 10 m/s 정도 높은 것을 확인하였다. 이러한 경향은 인젝터의 노즐 홀 수 증가에 따른 분무의 유량이 감소하기 때문으로 분무의 모멘텀 감소가 주된 영향으로 작용한 결과라고 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지식경제 기술혁신사업 에너지 기술사업의 친환경 DME 연료 실증보급을 위한 기술개발 사업의 지원을 받아 수행한 결과이며, 도움을 주신 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) S. H. Park and C. S. Lee, "Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel", *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, 2014, pp. 848~863.
- (2) S. H. Park and C. S. Lee, "Combustion performance and emission reduction characteristics of automotive DME engine system", *Energy Conversion and Management*, Vol. 39, 2013, pp. 147~168.
- (3) M. Y. Kim, S. H. Yoon, B. W. Ryu, 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, No. 12, 2008, pp. 2779~2786.
- (4) J. Jeon, S. L. Kwon, Y. H. Park, Y. Oh, and S. Park, "Visualization of combustion and fuel/air mixture formation processes in a single cylinder engine fueled with DME", *Applied Energy*, Vol. 113, 2014, pp. 294~301.
- (5) C. Liang, C. Ji, and X. Liu, "Combustion and emission performance of a DME-enriched spark-ignited methanol engine at idle condition", *Applied Energy*, Vol. 88, No. 11, 2011, pp. 3704~3711.
- (6) C. Arcoumanis, C. S. Bae, R. Crookes, and E. Kinoshita, "The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines", *Fuel*, Vol. 87, No. 7, pp. 1014~1030.
- (7) 김형준, 박수한, 이창식, "커먼레일 디젤 인젝터에서 연료 분사 및 분위기 압력이 DME 분무 특성에 미치는 영향", *한국액체미립화학회지*, 제 14권, 2호, 2009, pp. 71~76.
- (8) 박정환, 박수한, 이창식, 박성욱, "DME 연료의 거시적 분무특성에 관한 실험적 연구", *한국액체미립화학회지*, 제 15권, 3호, 2010, pp. 115~123.
- (9) 김형준, 서현규, 이창식, "고온 고압하에서의 DME 연료 분무 및 증발 특성", *한국액체미립화학회지*, 제 12권, 2호, 2007, pp. 101~107.
- (10) 박준규, 전문수, 박성욱, "디젤 및 DME 연료의 거시적 분무특성 비교", *한국액체미립화학회지*, 제 17권, 4호, 2012, pp. 205~209.
- (11) 김명운, 하성용, 이창식, "커먼레일 디젤엔진의 DME와 디젤연료의 분무 및 연소 특성", *한국액체미립화학회지*, 제 12권, 1호, 2007, pp. 30~37.
- (12) 양지웅, 이세준, 임옥택, "정적연소기에서 분위기 압력에 따른 Diesel-DME 혼합연료의 분무 특성에 관한 연구", *한국액체미립화학회지*, 제 17권, 4호, pp. 178~184.