피에조 인젝터 커먼레일 시스템을 이용한 함산소연료의 분무특성에 관한 연구

이세준* · 양지웅* · 김상일** · 임옥택†

An Investigation on a Spray Characteristics of Oxygenated Fuel with a Piezo Injector Common Rail System

Sejun Lee, Jiwong Yang, Sangill Kim and Ocktaeck Lim

Key Words: Ambient pressure(분위기 압력), Oxygenated fuel(함산소연료), Piezo injector common-rail system(피에조 인젝터 커먼레일 시스템), Spray angle(분무각), Spray penetration length(분무관통길이)

Abstract

To understand oxygenated fuel characteristics including spray penetration length and spray angle at a real engine ambient pressure condition, DME was injected into a high pressure chamber by a piezo injector common rail system. The piezo injector common rail system was able to apply steady injection pressure, rapid response, and accurate injection quantity. Injection and ambient pressure were varied to confirm a relation with spray form. Using a direct photographing technique, development process of DME spray was captured. DME injection quantity was enlarged linearly as increasing of the injection pressure. In the high pressure chamber, when the injection pressure was enlarged the penetration length and velocity were increased due to a big momentum of fuel particle at the same ambient pressure. When ambient pressure was increased, the DME spray penetration length and velocity were decreased since the high ambient density of nitrogen was acted as a resistance. Although the ambient pressure and injection pressure were varied, each case of spray angle was almost same since the spray angle had a connection of the injector nozzle geometry.

기호설명

DME : Di-Methyl Ether
LHV : Low Heating Value
LPG : Liquid Propane Gas
PM : Particle Matter
PCV : Pressure Control Valve

1. 서 론

자동차산업의 발달 및 차량 보급률의 증가로 인해 화석연료 사용량이 증가하고 있다. 이로 인한 이산화탄소를 포함한 여러 종류의 배출가스가 발생되고 지구 온난화 및 대기오염이 증가하고 있다. 화석연료 고갈 및 대기오염을 줄이기 위해 기존의 연료를 대신할 대체연료 개발이 진행 중이며 디젤의 대체연료로 DME의 연구가 진행 중이다⁽¹⁻⁴⁾. DME는 세탄가가 55 이상으로 높고 연소 시의 열효율이 디젤과 비슷하기 때문에 디젤엔진으로의 적용이 용이하다. 또한 화학적으로 탄소간의 결합이 없기 때문에 연소 시 PM의 발생이 없다. 그리고 LPG와 비슷한 연료특성을 지니고 있기 때문에 현재 공급된 LPG 충전시설을 사용가능한 이점이 있어서 보급

(2012년 7월 7일 접수 ~ 2012년 7월 25일 심사완료, 2012년 12월 4일 게재확정)

*울산대학교 기계자동차공학전공

**기아자동차 부산서비스센터

†책임저자, 회원, 울산대학교 기계공학부

E-mail : otlim@ulsan.ac.kr

TEL : (052)259-2852 FAX : (052)259-1680

의 편의성이 좋다. 하지만 DME의 저위발열량은 디젤 대비 약 60%에 해당하기 때문에 디젤과 동등한 출력을 얻기 위해서는 더 많은 연료가 소비되어야 한다. 또한 탄성체에 대한 부식성 및 낮은 점도에 의한 연료공급장치 내부의 운동부분의 마모를 유발한다. 그리고 액체상태의 DME는 압축성이 있기 때문에 정확한 압력제어 및 분사제어에 차질이 있다. 디젤의 대체연료로서 DME의 보급 활성화를 위해서는 이러한 문제점들이 개선되어야 한다. DME의 낮은 저위발열량을 극복하기 위해서는 연료의 1회 분사 시 더 많은 연료를 분사해야 하기 때문에 인젝터 노즐 직경의 증가 및 고압상태에서의 연료분사가 필요하다. DME의 탄성체 부식문제 및 마모를 해결하기 위해서 연료공급장치 및 인젝터에 사용되는 부품을 내부식성으로 교체하고 점성을 높일 수 있는 첨가제를 사용하면 장치수명의 연장이 가능하다⁽⁴⁾. 이러한 조건을 바탕으로 실시된 선행연구결과⁽⁵⁾에 따르면 지금까지의 DME 분사시스템의 경우 솔레노이드 인젝터에 의한 연료분사실험이 진행되었다. 솔레노이드 인젝터는 솔레노이드 밸브에 전기를 흘려 니들의 움직임을 제어하는 방식으로 작동한다. 하지만 솔레노이드 밸브를 작동하기 위해서는 많은 전력이 필요함과 동시에 전력손실이 크다. 또한 솔레노이드 코일의 재충전 시간이 요구되기 때문에 인젝터 니들의 응답속도 지연현상이 생긴다. 이로 인해 일정한 연료공급이 원활하지 않을 수 있음과 동시에 빠른 응답을 요구하는 다단분사에 적합하지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해 피에조 인젝터의 사용이 증가하고 있다. 피에조 인젝터는 전기신호에 의해 작동하는 피에조 소자를 통해서 니들을 움직이기 때문에 솔레노이드 인젝터에 비해 응답

속도가 빠르기 때문에 정확한 시점에서의 연료분사가 가능하다. 이로 인해 동일한 조건에서 솔레노이드 인젝터에 비해 일정하고 많은 연료유량 확보가 가능하다⁽⁶⁾. 그리고 피에조 인젝터를 사용하면 솔레노이드 인젝터에 비해 연료분무의 미립화가 잘 일어나고 실린더 내부 분위기 공기와 혼합이 잘 일어난다⁽⁶⁻⁸⁾. 지금까지의 열거한 장점을 토대로 점차 피에조 인젝터의 사용률이 증가하고 있으며 이러한 추세를 바탕으로 디젤의 대체연료로 각광받고 있는 DME에 대한 분무 가시화 실험을 할 필요가 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 질소로 내부를 가압할 수 있는 정적 챔버와 피에조 인젝터 커먼레일 시스템을 사용하여 DME 분무거동을 알아보았다.

2. 실험장치

2.1 DME 연료분사 및 분무가시화 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 DME 연료분사 및 분무 가시화 장치에 대한 개략도이고 연구에 사용된 DME에 관한 물성치는 Table 1과 같다. 실험장치 개략도의 좌측 부분은 피에조 인젝터 커먼레일 시스템의 개략을 나타낸다. DME는 토출압력 1 MPa로 냉각시스템으로 둘러싸인 어큐뮬레이터로 이동한다. DME 연료통 내부의 잔존연료량이 적을 경우 토출압력이 0.8 MPa 이하가 되면서 연료의 기화가 일어날 수 있다. 이를 예방하기 위해 고압의 질소로 DME 내부를 1 MPa로 가압하여 DME의 최초 공급압력이 1 MPa이 되도록 설치하였다. 어큐뮬레이터에 설치된 냉각시스템은 약 1.5 MPa의 공압으로 작동하는 공압펌프 내부로 액상의 DME가 안정적으로

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

Fig. 2 Timing diagram for synchronization

공급될 수 있도록 고안되었다. DME가 공압펌프를 지나서 2차 어큐뮬레이터를 거친 다음 커먼레일로 공급될 때 PCV 드라이버(Zenobalti ZB-1100)에서 측정되는 초기 압력은 약 15~20 MPa이다. 커먼레일은 테스트 인젝터와 연결된 상태에서 PVC 드라이버의 제어에 의해 DME를 분사한다. 이때의 테스트 인젝터에 대한 사양은 Table 2에 표시되어 있다. 피에조 인젝터는 약 0.4~1 MPa에 해당하는 역압을 걸어줘야 정상작동이 가능하다. 피에조 인젝터의 구조상 역압을 작용하는 유체와 인젝터의 유로를 통해 들어오는 유체가 섞일 수 있기 때문에 역압을 걸어주는 유체를 DME로 결정하였다. 피에조 인젝터의 역압은 0.8~1 MPa 범위가 적당하며 DME를 액상으로 공급해야 하기 때문에 초기 DME가 공급되는 연료라인에서 역압 라인을 끌어온 다음 피에조 인젝터와 연결하였다. 피에조 인젝터는 엔진 컨트롤러(Zenobalti ZB-8035)에서 초기 트리거 신호가 발생하면 피에조 인젝터 엔진 컨트롤러(Zenobalti ZB-6201)를 거쳐서 인젝터로 신호가 전달되면서 연료가 분사된다.

실험장치 개략도의 우측부분은 DME 분무 가시화 장치의 개략을 나타낸다. 분무가시화를 위해 정적고압챔버의 내부에 빛을 조사해서 밝은 상태를 만들어줘야 한다. 이를 위해서 스트로브 라이트(Nova Strobe DBX)를 사용하였고 이미지촬영을 위해 컴퓨터로 연동된 카메라를 사용하였다.

2.2 신호 동기화

Fig. 2는 분무 이미지 촬영을 위해 필요한 장치들의 신호의 흐름을 나타낸다. 먼저 카메라 셔터속도를 1000 ms로 설정하여 작동시킨다. 엔진 컨트롤러의 초기 트리거 신호에 의해 연료 1 ms동안 분사되면 0.1 ms단위로 설정이 가능한 지연시간 이후에 스트로브 라이트가 약 8~20

Table 1 Properties of DME and diesel

Property [unit]	DME	Diesel
Boiling point at 1 atm [K]	248.1	450~643
Enthalpy of Vaporization [kJ/kg]	467.13	300
Lower heating value [MJ/kg]	27.6	42.5
Gaseous specific heat capacity [kJ/kg K]	2.99	1.7
Ignition limits [vol% in air]	3.4/18.6	0.6/6.5
Modulus of Elasticity [N/m ²]	6.37E+08	14.86E+08
Kinematic viscosity of liquid [cSt]	<0.1	3
Surface tension at 298K [N/m]	0.012	0.027
Vapor pressure at 298K [kPa]	530	<<10

Table 2 Test conditions

Property [unit]	Injection Quantity	Visualization
Fuel	DME	
Injector	Bosch Piezo Injector (Number of Nozzle Holes : 8/ $\Phi_{\text{Nozzle Hole}} : 0.134 \text{ mm}$)	
Number of Injection [times]	500	1
Injection Pressure [MPa]	35/40/45/50/ 55/60/65/70	35/70
Ambient Pressure [MPa]	1	0/2.5/5

μm동안 발광한다. 스트로브 라이트가 일시적으로 발광하면 정적고압챔버 내부에서 형성된 분무의 특정 시점에 서의 형상이 비춰지며 이때의 상이 카메라에 맺힌다.

2.3 분사량 측정장치

Fig. 1의 고압챔버 아래에는 DME 분사량 측정을 위한 분사량 측정장치에 대한 개략도가 있다. 분사량 측정장치 내부의 연료량을 확인할 수 있도록 석영으로 제작

된 창에 눈금자를 설치하여 해당눈금에 대한 연료 분사량을 읽을 수 있다. 장치의 후면에는 분위기 압력 조성을 위한 질소가압 라인이 설치되어 있다. 이를 통해서 실제 엔진 내부의 분위기 압력에 따른 연료 분사량을 측정할 수 있다. 밀폐된 장치 내부에 연료가 쌓이면 체적의 감소와 동시에 분위기 압력 증가가 일어난다. 이로 인해 연료 분사 횟수가 증가할수록 분위기 압력의 증가가 발생하기 때문에 일정한 연료분사 조건의 성립이 이루어지지 않는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 역압 레귤레이터를 설치하여 일정한 분위기 압력 조건에서의 연료분사가 가능하다.

3. 실험방법

3.1 분사량 측정

분무량 측정 실험을 위해서 Fig. 1에서 고압 챔버 옆면에 설치된 테스트 인젝터를 분무량 측정장치에 장착한다. DME가 상온에서 액상으로 유지하기 위해 분무량 측정 장치 내부를 질소를 사용하여 1MPa로 가압한다. 분사량 측정장치 전면부에 표시된 눈금을 읽어서 DME의 적산량을 확인한다. 1회 분사량이 육안으로 확인하기 힘들 정도로 적기 때문에 분사 횟수를 500회로 하여 1회 분사량으로 계산한다. 분사량 측정을 위한 실험조건은 Table 2에 제시되어 있다.

3.2 분무 가시화

분무 가시화 실험을 위한 실험조건은 Table 2에서 볼 수 있다. 정적 고압챔버 내부의 분위기 압력을 형성하기 위해 고압 질소를 사용하여 0, 2.5, 5 MPa로 각각 가압하였다. 이때 테스트 인젝터의 각 노즐 홀에서 분사되는 DME분무 형상을 모두 취득하여 전체적인 분무특성을 관찰하기 위해 인젝터 정면에 카메라를 설치하여 직접 촬영을 실시하였다. 이를 통해 획득한 이미지에서 Fig. 3와 같은 기준에 따라 분무관통길이와 분무각을 측정하

Fig. 3 Spray measurement elements

였다. 연료 분사를 위한 트리거 신호가 주어지는 시점부터 이미지 촬영을 시작하기 때문에 분사 지연 시간 확인이 가능하다.

4. 실험결과

4.1 분사량 측정

Fig. 4는 분사량 측정장치를 사용하여 피에조 인젝터에서 분사된 DME의 분사량을 질량단위의 1회 분사량으로 계산하여 얻은 결과를 보여준다. 분사압력이 5 MPa 간격으로 35 MPa 부터 70 MPa까지 증가함에 따라 DME의 1회 분사량이 거의 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 빠른 응답성을 보이는 피에조 인젝터를 사용함으로써 연료분사량이 분사압력에 비례하여 증가한다는 것을 보이고 있다.

4.2 분무 가시화

Fig. 5은 분무의 최초 발생 시점부터 완전발달 할 때까지의 분무거동을 시간순서대로 나열한 것이다. 솔레노이드 인젝터를 사용한 종전의 실험⁽⁴⁾에서는 DME 분무가 시작하는 시점이 트리거 신호 이후 평균 0.4 ms부터 관찰되었으나 피에조 인젝터의 경우 분무의 생성이 평균 0.3 ms부터 관찰되는 것을 확인할 수 있었다. 비록 예전 실험에 비해서 분사지연이 0.1 ms 줄어들었지만, 연료의 분무와 동시에 연소가 시작되는 압축착화엔진에서는 분사지연시간이 작을수록 정확한 엔진연소의 제어가 가능하다. 솔레노이드 인젝터로 DME를 분사했을 시 완전발달에 소요되는 시간이 약 3.0 ms 이었으나, 피에조 인젝터를 사용함으로써 분무의 완전발달에 소요되는 시간이 평균적으로 약 2.0 ms 감소하였다. 이는 보다 짧

Fig. 4 Injection quantity of DME

Fig. 5 Sequential images of DME spray

은 시간에 연료의 연소가 이루어짐에 의해서 정확한 연소 타이밍을 확보할 수 있음을 보여준다. 따라서 피에조 인젝터를 통해 DME를 분사하면 슬레노이드의 경우에 비해 정확한 연소제어가 가능할 것으로 판단된다.

4.2.1 분무관통길이

Fig. 6은 DME 분무의 시간에 따른 분무관통길이를 측정하여 작성한 그래프이다. 동일한 분위기 압력조건에서 연료의 분사압력이 클수록 분무의 완전발달길이는 더 길고 발달속도가 더 빠른 것을 볼 수 있다. 이는 높은 압력

Fig. 6 Spray penetration length of DME

으로 연료를 분사함에 따른 연료입자의 운동량의 증가에 의한 것으로 판단된다. 일정한 분사압력의 관점에서 볼 때, 정적고압챔버 내부의 분위기압력이 증가할수록 분무관통길이는 짧아지고 분무의 발달속도 또한 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 분위기압력이 0 MPa에서 5 MPa로 증가할수록 이러한 경향이 확연하게 보이지만 2.5 MPa에서 5 MPa로 사이에는 큰 차이를 보이지 않고 분무의 완전발달 시의 관통길이는 거의 비슷하였다. 정적고압챔버 내부의 분위기 압력의 증가는 분위기 밀도의 증가로 이해할 수 있다. 0 MPa에서 2.5 MPa로 분위기 압력이 증가하는 경우 대기압 상태에 비해서 질소가스의 밀도가 높기 때문에 연료입자의 운동에 저항요소로 작용된다. 2.5 MPa에서 5 MPa로 분위기압력이 증가하면 이에 따라 높아지는 분위기 밀도에 의해 분무의 발달속도는 조금 느려질 수는 있으나, 증발특성이 상대적으로 약하게 일어나기 때문에 더 멀리 이동할 수 있는 것으로 판단된다.

4.2.1 분무각

Fig. 7은 분무가 발달하는 시점부터 완전발달할 때까지 형성되는 분무각 크기를 나타낸다. 동일한 분위기 압력 조건에서 분사압력이 증가함에 따른 분무각의 변화는 전체적으로 형성되는 분무각에 비해 작은 값을 보이며 평균적으로 약 3 degree가 감소하였다. 같은 분사압력을 기준으로 분위기 압력이 2.5 MPa와 5 MPa일 때에

Fig. 7 Spray angle of DME

는 분무각의 크기가 거의 같다는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 분위기 압력 증가에 따른 분위기 밀도의 증가 시에 분사압력에 대한 영향은 거의 없어지는 것으로 보인다⁽⁹⁾. 분무각 형성은 인젝터 노즐 내부의 형상에 주된 영향을 받기 때문에 연료 분사압력과 분위기 압력의 변화만으로는 분무각 형성 및 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다⁽¹⁰⁾.

4. 결 론

본 연구에서는 고압질소가스로 분위기 압력형성이 가능한 정적고압챔버 내부에서 피에조 인젝터 커먼레일 시스템을 이용한 DME의 분무특성을 파악하였다. 실험 및 해석결과는 다음과 같다.

- 1) 피에조 인젝터의 빠르고 정확한 작동에 의해 DME를 분사하였을 때 분사압력의 증가에 따른 분무량의 선형에 가까운 증가를 확인할 수 있었다.
- 2) 분무가시화 실험을 하여 피에조 인젝터에서 분사되는 DME 분무의 발달거동을 확인할 수 있었다. 이때 분무의 완전발달에 소요되는 시간은 종전의 솔레노이드 인젝터를 사용한 경우에 비해 더 짧은 것을 볼 수 있었다.
- 3) DME 분무 관통길이는 분사압력이 증가할수록 발달속도가 증가한다. 반면에 분위기압력이 증가하면 분위기가스의 밀도의 저항역할의 증대로 인해 관통길이 및 발달속도가 모두 감소하였다.
- 4) 분무각 형성은 인젝터 노즐의 내부형상에 직접적인 영향을 받기 때문에 분사압력 및 분위기 압력의 변화가 있더라도 DME 분무각 크기의 변화는 미미하였다.

후 기

본 과제는 2012년 울산대학교 기계공학부의 연구비와 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2012044855)을 받아 수행된 것입니다. 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Jun Yu, Jukwang Lee, and Choongsik Bae, "Microscopic Characteristics of Evaporation Dimethyl Ether (DME) System", Transaction of the KSAE, Vol. 11, No. 3, 2003, pp. 58-64.
- (2) Hyeonsook Yoon, Kitae Yeom and Choongsik Bae, "The Effects of Pilot Injection on Combustion in Dimethyl-ether (DME) Direct Injection Compression Ignition Engine", SAE paper, 2007, 2007-24-0118.
- (3) Kazuki Chiba and Takeshi Okamoto and Mitsuru Konno, "Experimental and Numerical Analysis of High Pressure DME Spray", SAE paper, 2010, 2010-01-0880.
- (4) Ion M. Sivebaek, Spencer C. Sorenson and Joergen Jakobsen, "Dimethyl Ether (DME)-Assessment of Viscosity Using the New Volatile Fuel Viscometer (VFVM)", SAE paper, 2001, 2001-01-1213.
- (5) Sejun Lee, Sedoo Oh, Soojin Jeong and Ocktaeck Lim, "An Investigation on the Spray Characteristics of DME Common Rail Fuel Injection System with Variation of Ambient Pressure", Transaction of KSAE, Vol. 20, No. 2, 2012, pp. 90-97.
- (6) Jinwook Lee, Kuongdoug Min, Kernyong Kang and Choongsik Bae, "Hydraulic Simulation and Experimental Analysis of Needle Response and Controlled Injection Rate Shape Characteristics in a Piezo-driven Diesel Injector", SAE paper, 2006, 2006-01-1119.
- (7) Byounggul Oh, Seungsuk Oh, Kangyoon Lee and Myoungho Sunwoo, "Development of an Injector Driver for Piezo Actuated Common Rail Injectors", SAE paper, 2007, 2007-01-3537.
- (8) James Smith, Gerald Szekely Jr, Arun Solomon and Scott Parrish, "A Comparison of Spray-Guided Stratified-Charge Combustion Performance with Outwardly-Opening Piezo and Multi-Hole Solenoid Injectors", SAE paper, 2011, 2011-01-1217.
- (9) Jangsik Kong, "Effect of Nozzle Geometry on the Common-rail Diesel Spray Characteristics", Master's

Thesis of Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2003.

(10) Lisa Jacobsson, Ernst Winklhofer and Jerzy Chomiak,

“Injection Orifice Shape: Effects on Spray Characteristics and Heat-Release Rate in a Large-Size Single-Cylinder Diesel Engine”, SAE paper, 1999, 1999-01-3490.