정적연소에서 분위기 압력에 따른 Diesel-DME 혼합연료의 분무 특성에 관한 연구

양지웅* · 이세준** · 임옥택†

An Investigation on the Spray Characteristics of Diesel-DME Blended Fuel with Variation of Ambient Pressure in the Constant Volume Combustion Chamber

Jiwoong Yang, Sejun Lee and Ocktaeck Lim

Key Words: DME (Di-methyl ether, 디메틸에테르), Diesel-DME blended fuel(Diesel-DME 혼합 연료), Spray penetration length(분무 관통 길이), Spray angle(분무각), Ambient pressure(분위기압력), Fuel injection pressure(연료 분사압력), Common rail injection system(커먼레일 분사장치), Reactivity(반응성)

Abstract

The aim of this study was to compare the spray characteristics of a typical fuel (100% diesel, DME) and diesel-DME blended fuel in a constant volume combustion chamber (CVCC). The typical fuel (100% diesel, DME) and diesel-DME blended fuel spray characteristics were investigated at various ambient pressures (pressurized nitrogen) and fuel injection pressures using a common rail fuel injection system when the fuel mixture ratio was varied. The fuel injection quantity and spray characteristics were measured including spray shape, penetration length, and spray angle. Common types of injectors were used.

기호설명

P_{amb} : ambient pressure, MPa
 P_{inj} : injection pressure, MPa
 ASOI : after start of injection, ms

1. 서 론

최근 강화된 환경규제에 따라 자동차 배출가스에 대한 규제 또한 한층 강화되어 기존의 연료를 대체 할 연료의 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다. 또한 기존의 연료에 새로운 연료를 첨가하여 사용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 연료 구성성분들의 비율을 변경함으로써, 분무 및 연소시의 반응성을 조절하여, 연소와 배기특성을 훨씬 향상시키는데 그 목적이 있다. Kiyoshi⁽¹⁾는 DME-Methane 혼합연료를 이용하여 연료의 엔진 내에서의 연소특성을 알아보는 실험을 진행하였고, Piotr, Rosa^(2,3)는 Ethanol-Gasoline 혼합연료를 이용하여 엔진 성능 및 배기 특성 등을 실험하였다. 또한 Sivalakshmi⁽⁴⁾는 신 연료인 DME-Biodiesel 혼합연료를 이용한 디젤엔진 내에서의 성능, 배기특성을 연

(2012년 7월 23일 접수 ~ 2012년 8월 12일 심사완료, 2012년 9월 21일 게재확정)

*울산대학교 기계자동차공학과대학원

**울산대학교 기계자동차공학과대학원

†임옥택, 회원, 울산대학교 기계공학부

E-mail : otlim@ulsan.ac.kr

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

구하였다. 이러한 일련의 혼합연료를 이용한 연구들을 통해 기존 내연기관에 혼합연료가 어떠한 반응성으로 인하여 배기가스내의 오염물질을 저감하는가에 대한 연구가 선행 되었다.

Diesel-DME 혼합연료에 대한 연구는 Jingzhou의⁽⁵⁻⁷⁾에 의해 선행되었다. 연구결과 DME의 비율이 높아질수록 분무각은 커지고, 분무관통길이는 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 선행된 연구에서는 커먼레일시스템을 적용하지 않은 기계식 연료공급시스템을 사용하여 연구가 이루어졌다. 하지만, 디젤엔진의 연소효율 향상과 배기가스의 오염물질 저감을 위하여 고압의 연료 분사를 통하여 연료의 미립화를 향상시키고, 다단분사가 가능한 커먼레일시스템의 이용이 대세를 이루고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 커먼레일시스템을 사용하여 세탄가가 높고(>55) 산소함유율이 높으며 증발특성이 좋은 합 산소 연료인 DME를 Diesel연료에 첨가하였을 때, 순수한 DME, Diesel연료와 어떠한 Reactivity에 의하여 분무특성의 차이점을 보이는가에 대한 연구를 진행 하였다.

2. 실험장치

2.1 분무 가시화 및 연료 분사장치

Fig. 1은 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 보인다. Fig. 1의 왼쪽 부분은 연료 분사 시스템이다. 본 실험에서는 연료 분사압력을 고압으로 일정하게 유지시켜주는 커먼레일시스템을 사용하였다. DME는 낮은 점성과 나쁜 윤활성 때문에 연료개통시스템의 누유 및 마모를 야기시킨다. 이를 위해, Haskel pump를 사용하였고, DME의 윤활성 개선을 위하여 2 vol% 바이오디젤을 추가하였다. DME는 낮은 증발점 때문에 대기압에서 가스 상

태로 존재하기 때문에 액체 상태를 유지하기 위해서 상온에서 0.9 MPa이상으로 가압할 필요가 있다. 0.9 MPa이상일 때 액화상태로 존재하는 DME는 질소 가압을 통해 압력을 0.9 MPa이상으로 높인 다음 연료공급시스템으로 공급된다. 공급된 연료는 Haskel pump를 거치면서 가압된 후 커먼레일 전에 설치된 어큐레이터에 저장된다. DME는 어큐레이터의 벽면의 열전달로 인해 온도가 상승하여 가스형태로 저장되는 문제가 발생 할 수 있다. 이를 방지하기 위해, 어큐레이터 벽면을 동관으로 감싸고, 컴프레서와 냉각팬을 이용하여 냉각된 냉매를 순환 시켜주어 어큐레이터 내부의 DME가 액체상태로 유지 하도록 한다. 연료는 PCV(Pressure Control Valve)드라이버에 의해 연료의 분사 압력이 조절되는 커먼레일에 공급되어 일정한 압력으로 연료가 분사되도록 한다. 인젝터는 BOSCH사의 Solenoid type으로 7홀을 가지고 있는 인젝터를 사용하였다. 인젝터는 Multi-Stage Injection Engine Controller에 의해 분사시간과 분사횟수가 제어된다. 인젝터에서 커먼레일로 리턴된 연료는 다시 저압 펌프로 돌아가 순환된다. Fig. 1의 오른쪽 부분은 분무 가시화 시스템을 나타낸다. 오른쪽 부분에 위치한 정적연소기는 질소에 의해 내부가 가압된다. 광원으로는 스트로브 라이트가 사용되고, Multi-Stage Injection Engine Controller에서 생성되는 신호에 의해 작동된다. 정적연소기 내부의 압력은 내부에 설치되어 있는 압력센서(Kistler 6056A)에 의해 측정된다. 여기서 측정된 압력 포신호는 신호증폭기(Kistler 5015)에 의해 증폭된 신호를 읽는다. 분무형상을 촬영할 때 사용되는 카메라는 컴퓨터와 연결되어 작동하고 촬영된 영상은 컴퓨터에 저장된다.

2.2 연료 분사량 측정장치

Fig. 1의 우측 하단에 연료량을 측정할 수 있는 측정

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

장치에 대한 개략도가 포함되어있다. 연료 분사량 측정 장치는 DME를 액체상태로 유지하기 위해 질소를 이용하여 0.9 MPa이상으로 가압 해주어야 하는데 이를 견딜 수 있도록 설계되었다. 측정장치의 전면 부는 분사된 연료의 양을 확인 할 수 있는 눈금이 새겨진 광학창으로 구성 되어있다. 연료 분사량 측정이 끝난 후에는 측정장치의 하단부에 있는 배출밸브를 개방하여 내부의 액화된 연료를 배출한다.

3. 실험연료

본 연구에서는 Diesel과 DME 혼합연료의 분무 특성을 알아보기 위해 저유황 Diesel연료(Ultra Low Sulfur Diesel, ULSD) 및 순도 98% DME(윤활성 개선을 위해 2 vol% 바이오 디젤 첨가)를 사용하였다. Diesel-DME 혼합연료의 조성은 Table 1과 같고, 조성 비율에 대한 식은 (1)과 같다.

$$DiDm(\%) = \frac{Diesel(kg)}{Diesel(kg) + DME(kg)} \times 100 \quad (1)$$

4. 실험방법

4.1 연료혼합방법

본 연구에서 사용된 혼합연료는 가정에서 쓰이는 20 kg LPG 가스용기에 연료를 주입하여 사용하였다. 가스통을 디지털 저울에 올려놓고, zero점을 새롭게 맞추고 중량 비(wt%)에 따라 연료를 주입하였다. Diesel과 DME는 273.15K, 96.1 kPa 이상에서 완전히 혼합 한다는 결론⁽⁸⁾을 바탕으로 저압펌프를 이용하여 Diesel을 1.1 MPa로 가압하여 주입하고 DME의 기화를 막기 위해 질소를 0.9 MPa로 가압하여 용기 내부의 압력을 0.9 MPa이상으로 유지 시킨다. 마지막으로 1.1 MPa로 질소 가압한 DME연료를 용기내로 주입한다. 안전을 위해서 용기용량의 70%이하의 용량만 충전하였다. 용기

내의 Diesel과 DME가 액체 상태로 잘 혼합되기 위하여 용기를 잘 흔들어주고, 분무량 측정시스템의 광학창을 통해 연료의 혼합정도를 확인하여 충분히 혼합되어지는 6시간 후에 사용하였다. 그리고 혼합연료의 상태를 연료 공급장치에 설치된 가시화 창을 통하여 실시간으로 확인 하였다.

4.2 연료 분사량 측정방법

본 연구에서는 연료분사압력은 70.1 MPa, BOSCH사의 solenoid type 7Hole 상용 인젝터(Hole size: Ø 0.134)를 사용하여 연료 분사량을 측정 하였다. 모든 실험 조건에서 인젝터의 통전시간은 1 ms, 분사횟수는 1000번으로 동일하게 수행되었다. 상온에서 측정 장치 내부의 DME를 액체 상태로 유지해주기 위해서는 내부 압력이 0.9 MPa 이상이 되어야 한다. 이를 위해 장치 내부의 압력을 질소가압을 통하여 1.1 MPa로 만들어 주었다.

4.3 분무 가시화 방법

연료는 분사압력이 70.1 MPa일 때 정적연소기 내의 분위기 압력이 0.1, 2.6, 5.1 MPa에서 분사된다. 모든 조건에서 인젝터 통전시간은 1 ms로 동일하게 사용되었다. 본 실험에서의 주요 측정인자는 분무관통길이와 분무각이고, Fig. 2와 같이 분무선단길이는 인젝터 노즐 팁에서부터 분무된 액적의 끝까지의 길이로 정의하여 측정하였고, 분무각은 공기와의 혼합과 터블런스의 영향으로 측정이 어려운 분무선단을 제외하고 순수한 분무가 존재하는 분무액적의 2/3되는 곳에서의 액적의 가장 바

Fig. 2 Definition of Spray penetration and spray angle

Table 1 Fuel blending ratio of test fuel

Blending ratio (wt. %)	DiDm 100	DiDm 95	DiDm 90	DiDm 0
Diesel	100	95	90	0
DME	0	5	10	100

끝부분 두 점 사이의 각도로 정의하고 측정하였다⁹⁾. ①~⑦ 각 분공 홀의 분무관통길리와 분무각을 측정하여 평균값을 구해서 결과 값으로 사용하였다.

5. 실험결과

5.1 분사량 측정결과

Table 2는 각 혼합연료의 분사량을 나타내는 표이다, 1000번 분사하여 측정된 양을 1000으로 나눠 한번 분사시의 분사된 양을 표시하였다. 가시화창의 눈금을 눈으로 읽었기 때문에 측정시의 $\pm 1 \text{ ml}(\pm 0.1\%)$ 정도의 오차가 존재한다. 기존의 Diesel 연료를 분사하였을 때 분사되는 양이 가장 많았고, 다음으로 DME의 분사량이 크게 나타났다. Diesel연료에 DME 혼합률을 높일수록 분무량이 작아지는 모습을 표를 통해 알 수 있다. 이는 액체 동점성 계수가 Diesel(3 cSt)에 비해 DME(<0.1 cSt)가 낮기 때문에 분사량이 작고, 혼합연료의 경우 Diesel은 크기가 산소보다 상대적으로 큰 탄소분자가 주로 이루어져있고, DME는 탄소원자에 비해 상대적으로 크기가

Table 2 Injection quantity[ml/1 cycle]

Fuel	Injection Quantity[ml/1cycle]
DiDm100	0.0909
DiDm0	0.0905
DiDm95	0.0898
DiDm90	0.0893

작은 산소원자가 많이 포함된 연료로 혼합시 Diesel의 분자사이로 DME분자가 침투하여 분사량이 줄어드는 모습일 보인다. 또한 DME의 함유량이 높을수록 분사량 또한 작아진다.

5.2 분무 가시화결과

Fig. 3~6은 연료 분사압력 70.1 MPa, 정적연소기내 분위기 압력 5.1 MPa일 때, BOSCH사의 동일한 인젝터를 사용한 각 연료의 분무 형상을 나타낸 그림이다. Fig. 3은 DiDm100을, Fig. 4은 DiDm95을, Fig. 5 DiDm90을, Fig. 6은 DiDm0를 사용한 경우이다. 나타낸 사진은 연

Fig. 3 DiDm 100 Spray shape (P_{inj} : 70.1 MPa, P_{amb} : 5.1 MPa)

Fig. 4 DiDm 95 Spray shape (P_{inj} : 70.1 MPa, P_{amb} : 5.1 MPa)

Fig 5 DiDm 90 Spray shape (P_{inj} : 70.1 MPa, P_{amb} : 5.1 MPa)

Fig 6. DiDm 0 Spray shape (P_{inj} : 70.1 MPa, P_{amb} : 5.1 MPa)

료가 분무된 시점(ASOI)부터 0.4 ms간격으로 분무가 완전 발달할 때까지의 분무발달과정을 보여주고 있다. Diesel 연료와 DME 연료를 비교 하였을 때, Diesel 연료의 분무 액적이 완전히 발달하여 연소실 벽에 닿기까지 3.2 ms라는 시간이 걸렸고, DME는 좋은 증발 특성으로 인해 연소실 벽면에 분무액적이 닿기 전 2.8 ms 만에 대부분이 기화되는 모습을 확인할 수 있다. 또한 DME에 비해 Diesel연료의 분무관통길이가 길고, 분무각이 작음을 알 수 있다. Fig. 4, 5에서 볼 수 있듯이 Diesel 연료에 DME연료를 함유율에 따라 ASOI 이후 동일한 시간에서의 분무관통길이는 Diesel 연료에 비해 미소한 차이기는 하나 짧아지고, 분무 각은 커지며 연료의 기화가 더 잘되는 모습을 볼 수 있다. 이는 DME연료를 혼합함으로써 연료의 미립화를 촉진시켜 실린더 내부의 공기와의 혼합률이 개선되어서 연소 특성이 개선될 것이다.

5.2 분무관통길이 측정결과

분무관통길이를 해석함에 있어서 중요한 점은 짧은 시간 내에 분무가 완전 발달하여 얼마나 공기와의 혼합이 빠르게 이루어지는가에 대한 분석이 중요하다. 즉 분무가 완전히 발달, 빠르게 발달하여 연료가 미립화 되고, 공기와 섞이는 속도가 빠르지가 관통길이를 해석함에 있어서 중요 점이 된다. Fig. 7은 분무압력 70.1 MPa, 분위기

압력 0.1 MPa일 때의 각 연료의 분무관통길이를 나타낸 그래프이다. 연소실 내부가 가압된 조건이 아닌 상태에서 고압으로 분사된 연료는 대부분이 액적상태로

Fig. 7 Spray penetration length of fuel at $P_{amb}=0.1$ MPa

Fig. 8 Spray penetration length of fuel at $P_{amb}=2.6$ MPa

Fig. 9 Spray penetration length of fuel at $P_{amb}=5.1$ MPa

연소실 벽에 1.4 ms만에 도달 하였다. 하지만 연료에 따라서 다른 거동을 보이는데, Diesel연료의 경우에 가장 빠르게 발달 하였고, DME가 가장 느린 발달 속도를 보였다. 또한 Diesel연료에 DME의 혼합률을 5에서 10%로 늘림에 따라 분무발달속도가 느려짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 8, 9에서는 2.6, 5.1 MPa로 가압된 상태에서의 분무관통거리를 나타낸 그래프로 Diesel연료가 가장 빠르게 분무가 발달되었고, DME가 가장 느리게 발달하지만 빠른 기화 특성으로 분무가 분위기 압력 2.6 MPa일 때 2.6, 5.1 MPa일 때 2.8 ms만에 완전 증발하였다. 앞에서와 같이 DME의 혼합률이 높아짐에 따라 분무관통거리가 짧아짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 10 Spray angle of fuel at $P_{amb} = 0.1$ MPa Fig. 12 Spray angle of fuel at $P_{amb} = 5.1$ MPa Fig. 11 Spray angle of fuel at $P_{amb} = 2.6$ MPa

5.3 분무 각 측정결과

Fig. 10~12는 각 연료의 분무 각을 보여준다. 분무 각은 분사압력, 분위기 압력, 인젝터 노즐의 형상, 분무 액체의 물성치 등의 여러 가지 요인들에 영향을 받는다. 동일한 인젝터를 사용하여 같은 분사압력 하에서 분위기 압력을 달리하여, 연료에 따른 분무 각을 비교 분석하였다. 2.6, 5.1 MPa로 가압하였을 때, 분무 각이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그 이유로는 주위 압력을 가압해 줄 경우 분무의 축 방향으로의 진행을 억제하여 분무 각을 증가시킨다. 하지만 2.6, 5.1 MPa 가압의 정도가 다름에 따라서는 끼치는 영향이 미미하다는 것을 볼 수 있다. Fig. 10-12에서 볼 수 있듯, 분무발달 초반 0.8 ms 이하에서는 분무 각이 분무발달 후기에 비해 갑

자기 각이 커지는 불안정한 모습을 보였고, 이후에서는 분무각이 대개 일정한 안정된 분무 각을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 DiDm0의 분무 각이 가장 크고, DiDm90, DiDm95, DiDm100순으로 분무 각이 작게 나타났다. 이렇게 나타난 이유는 DME의 좋은 증발 특성으로 인하여 분무액적의 미립화를 빠르게 진행시켜 분무 각을 크게 만들기 때문이다.

6. 결 론

본 연구에서는 Diesel과 DME 연료와 Diesel에 DME를 중량비(wt%)로 5, 10%를 혼합한 연료를 사용하여, 커먼레일 시스템에서 다양한 분위기압력 조건에 대한 분무특성을 알아보았다. 각 연료의 분무 특성의 비교 분석을 통해 다음과 같은 결론을 내리게 되었다.

- 1) 동일한 인젝터를 사용하여, 1 ms라는 동일한 통전 시간 동안 분사된 연료의 양은 Diesel이 가장 많이 분사되었고, DME가 다음으로 많이 분사되었으며, 혼합연료의 DME 혼합률이 높을수록 분사량이 작아진다.
- 2) 연료의 분무관통길이는 주위 압력이 높아 짐에 따라 축방향으로의 분무 발달을 방해 받아 길이가 짧아졌다. 연료의 기화도의 차이 때문에 Diesel의 분무관통거리가 가장 길고, DME가 가장 짧았다. 혼합연료의 경우 DME의 혼합률이 높을수록 분무발달거리가 짧아지는 것을 확인 하였다.
- 3) 연료의 분무 각은 DiDm0가 가장 크게 나타났고, DiDm 90, DiDm 95, DiDm100 순서로 나타났다. DME의 좋은 증발특성에 따라, DME의 함유율을 높일수록

분무 각이 증가하는 것을 확인하였다.

후 기

본 과제는 교육과학기술부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업과 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2012044855)을 받아 수행된 것입니다. 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Ki Komatsu and M Asanuma, "A study of an HCCI Engine Operating on a Blended Fuel of DME and Methane", SAE 2011-32-0522, 2011.
- (2) P. Bielaczyc, A. Szczotka and J. Woodburn, "A Study of Gasoline-Ethanol Blend Influence on Performance and Exhaust Emissions from a Light-Duty Gasoline Engine", SAE 2012-01-1052, 2012.
- (3) R. Delgado and S. Paz, "Effect of Different Ethanol-Gasoline Blends on Exhaust Emissions and Fuel Consumption", SAE 2012-01-1273, 2012.
- (4) S. Sivalakshmi and T. Balusamy, "Effect of Dimethylcarbonate-Biodiesel Blends on the Combustion, Performance and Exhaust Emissions of a DI Diesel Engine", SAE 2012-01-0870, 2012.
- (5) J Yu, Y Zhang, G Jiang, and Q Kui, "An Experimental Study on Steady Flash Boiling Spray Characteristics of DME/Diesel Blended fuel", SAE Technical Paper 2010-01-0879, 2010.
- (6) W Ying, L Genbao, Z Wei, Z Longbao. "Study on the application of DME/diesel blends in a diesel engine", Fuel, Volume 84, Issue 18, Pages 2289-2388, December 2005.
- (7) T Dan, Y Ryu, M Mizukura and I Asano, "Kinematic Viscosity Measurement of DME and Bunker Oil Blended Fuel for Diesel Engine Application", TFEC8 conference, songdo, Incheon, KOREA, 2012 3.18~21.
- (8) X Zhao, M Ren, Z Liu. "Critical solubility of dimethyl ether(DME)+diesel fuel and dimethyl carbonate (DMC)+diesel fuel", Fuel, Volume 84, Issue 18, Pages 2380-238, December 2005.
- (9) S. Tamura and T. Tsuji, DME Data Book, KHK, Tokyo, 2006.