분사압력 변화에 따른 디젤-DME연료의 다단분사 특성에 관한연구

정연호* · 양지웅** · 오충환** · 임옥택†

An Investigation on Spray Characteristics of Diesel - DME with Change of Injection Pressure

Y. H. Jeong, J. W. Yang, C. H. Oh, O. T. Lim

Key Words: Spray characteristics(분무 특성), Multi-injection(다단분사), Dimethyl ether(디메틸에테르), Injection pressure(분사압력)

Abstract

An investigation on spray characteristics of fuels which diesel and di-methyl ether (DME) with change of injection pressure used the multi-injection in constant volume combustion chamber (CVCC). Diesel was already used famous fuel which we could use. DME showed similar features with diesel like as cetane number, auto-ignition temperature. High cetane number of diesel and DME could make possible to compression ignition. DME showed different atomization from diesel due to evaporating pressures and boiling points. Experiments were carried out in CVCC equipped with Delphi solenoid 6-hole type injector and the spray characteristics of diesel and DME were tested the various pre and pilot injection. Terms of injections and a number of injections in multi-injection has been controlled. Experiments were performed in 2 types that 1500 rpm, 2000 rpm and under the condition of injection ranging from 100 bar to 500 bar. From the results of this experiment diesel showed longer spray penetration than DME. That result showed different of atomization speed DME and diesel. Result of high injection pressure condition showed similar spray characteristics diesel and DME. After this investigation, new conditions and experiments using laser light to go forward and add the fuels like as the biodiesel and diesel and DME blend.

1. 서 론

최근 환경문제와 더불어 화석연료의 고갈이 예상된다는 연구결과가 많이 발표되고 있다. 이에 따라서 많은 나라들이 대응하기 위해서 법 규제를 강화하는 등의 대응을 보여주고 있다. 국제협회에서는 이산화탄소(CO₂)

를 지구온난화와 대기오염의 주범으로 생각 하고 집중적으로 규제를 강화하고 있으며 유럽에서는 연비규제의 지표로 이산화탄소를 기준으로 삼고 있다. 이외에도 배기가스 규제대상으로 지정된 것은 일산화탄소(CO), 탄화수소(CH), 질소산화물(NOx)가 있다. 일산화탄소와 탄화수소는 완전연소가 되지 않기 때문에 발생한다. 질소산화물은 고온에서 생성된다. 가솔린과 달리 디젤엔진은 위의 물질이외에도 미세먼지(PM)가 발생한다. 디젤 자동차에서 발생되는 미세먼지는 사람의 호흡기에도 직접적으로 영향을 미쳐서 호흡기 질환을 발생 시킨다. 그렇기 때문에 디젤의 이러한 단점을 상쇄하기 위해서 많은 기업들이 연비가 좋지만 배기가스를 줄일 수 있는 새로운 연료를 개발하고 그에 맞는 시스템을 개발하는

(2013년 10월 8일 접수 ~ 2013년 11월 15일 심사완료, 2013년 11월 29일 게재확정)

*울산대학교 자동차선박 대학원

**울산대학교 기계공학부 대학원

†임옥택, 회원, 울산대학교 기계공학부

E-mail : otlim@ulsan.ac.kr

TEL : (052)259-2852

Table 1 Properties of diesel and DME

Fuel	DIESEL	DME
Molecular formula	C12-C25	CH ₃ OCH ₃
Cetane number	40 min	55-60
Density (g/ml)	0.82-0.86	0.67(at liq)
Autoignition temperature (°C)	496	508
Flash point (°C)	64	-41
Low heating value (MJ/kg)	42.5	28.8
Boiling point (°C)	282-338	-25.1
Stoichiometric air/fuel mass ratio	14.6	9.0

데 주력하고 있다.

1.1 Diesel과 DME 연료

디젤은 가솔린보다 비교적 환경오염이 적은 연료이다. 하지만 높은 세탄가와 휘발성이 낮다는 단점이 있으며 연소를 할 때 미세먼지와 질소산화물이 발생을 하기 때문에 이전까지의 엔진으로는 최근에 강화되고 있는 환경 규제를 만족시키기에는 힘이 든다. 하지만 DME는 연료 자체에 산소가 포함되어 있으며 휘발성이 높고 다른 화석 연료 들에 비해 발화온도가 낮아서 EGR을 이용한 저온 연소가 더 용의하다. 그렇지만 연소시에 발생하는 열량이 디젤과 비교하면 적기 때문에 디젤과 같은 양의 열량을 발생하기 위해서는 더 많은 양이 필요하다. 디젤과 DME의 주요 특징은 Table 1에 표시 하였다.

Table 1에서 알 수 있듯이 디젤과 DME는 비슷한 수치를 보이는 부분도 있지만 열량이나 끓는점이 확연히 다르다는 것을 알 수 있다.

따라서 디젤과 비슷하지만 다른 DME연료를 이 실험을 통해서 분무 특성을 기존의 디젤 장비를 이용하여 실험하고 그 결과를 디젤과 비교해 보았다.

2. 실험 장치 및 실험방법

2.1 실험조건

이번 실험에서의 조건(Table 2)은 자동차부품연구원 에서 실시한 DME실증사업에서 제작된 DME엔진의 실험결과를 기반으로 선정하였다⁽¹⁾.

1500 rpm과 2000 rpm을 실험 조건으로 선택한 이유

Table 2 Experiment conditions

Fuels	Diesel, DME
rpm	1500,2000
Injection Pressure (bar)	100 to 500 (record each 50 bar)
Initial chamber temperature (°C)	25
Initial chamber pressure (bar)	20

Fig. 1 Result of torque by used the DME engine

는 토크 값이 좋지 않기 때문이다. Fig. 1에서 위에 있는 그래프는 디젤과 DME의 시뮬레이션 값이며 밑에 있는 사각 점표는 실제 DME엔진의 토크 값이다. 그래프에서 보이듯이 1500 rpm과 2000 rpm에서의 토크 값이 50이하로 내려가며 0이 되는 경우도 있었다. 따라서 위의 두 조건을 선택하였다.

2.1.1 연료분사 조건(Injection Condition)

이번 실험에서 연료의 분사 조건(Table 3)은 기존의 실험과 달리 3단 분사를 적용하였다⁽²⁾. 분사조건의 설정은 DME엔진의 출력성능평가를 기반으로 설정하였다⁽³⁾.

2.2 실험장치

이번 실험에 사용된 정적연소기는 고온과 고압에 견딜 수 있게 제작되었다. Diesel과 DME를 분사한 인젝터는 델파이(Delphi)의 솔레노이드-6홀 인젝터(EURO-3)를 사용하였다. 인젝터는 다른 개조는 없었으며 DME사용을 위해서 O-링의 재질을 고무에서 FKM으로 교체하였다.

Table 3 Multi-injection condition

1500 rpm		2000 rpm	
Timing	Duration (°C)	Timing	Duration (°C)
Pilot : 31CAD bTDC	300	Pilot : 10CAD bTDC	260
Pre : 1CAD bTDC	300	Pre : 3CAD aTDC	330
Main : 7CAD aTDC	780	Main : 6CAD aTDC	840

- aTDC : after Top Dead Center
- bTDC : before Top Dead Center

2.3 실험 진행

이번 실험은 두가지 연료를 동일한 조건을 유지하였으며 정적연소기에 질소를 이용해서 일정압력을 만들고 Diesel을 분사 하고 같은 조건을 유지하고 DME를 분사 하였다.

3. 실험 결과

3.1 분무 발달 과정

분무형상의 발달을 관찰한 결과 Diesel과 DME의 분무형상은 발달시간과 길이에서 차이점을 보였으며 형상

Fig. 2 Diesel spray shapes (P_{inj} :500 bar rpm:1500) Fig. 3 Diesel spray shapes (P_{inj} :500 bar rpm:2000) Fig. 4 DME spray shapes (P_{inj} :500 bar rpm:1500) Fig. 5 DME spray shapes (P_{inj} :500 bar rpm:2000)

표적인 이미지를 나타내었다.

Fig. 2~3은 디젤을 연료로 했을 때 분무형상을 관찰한 결과이며 Fig. 4~5은 DME의 분무형상을 관찰 한 결과이다. 위의 나타난 사진들은 연료가 분사된 후 시간의 경과(ASOI)에 따라 나타내었다.

우선 Fig. 2는 1500 rpm에서 연료를 500 bar로 분사 하였을 때의 디젤의 분무형상 사진이다. 3단 분사를 하였지만 각 분사 간격이 길지 않아서 각 분사에 따른 분무 형상이 겹쳐서 관찰되었다. 분사압력이 100 bar일 때는 3단 분사를 하였음에도 불구하고 Main분무 발달만 관찰되었다. 하지만 이후 분사압력을 증가 시켰을 때는 모두 3단 분무 발달을 육안으로 확인 할 수 있었다.

Fig. 3는 2000 rpm에서 연료를 500 bar로 분사 하였을 때의 디젤의 분무형상 사진이다. 앞선 Fig. 2와는 분사 시점을 조절하였기 때문에 3단 분무 발달 형상은 비슷 하지만 Pilot과 Pre 분사간의 시간차를 확실하게 보여 준다. 하지만 다른 점이 있다면 100 bar에서는 Main분무 발달만 관찰된다.

Fig. 4는 1500 rpm에서 연료를 500 bar로 분사 하였을 때의 DME의 분무형상 사진이다. DME는 Fig. 2~3의 디젤과 분무 형상의 시작점은 비슷하게 나오지만 증발이 빠르기 때문에 분무 발달이 비교적 빨리 종료된다. 또한 같은 조건에서의 디젤과 비교했을 때 다단분사에서 Pilot분사 부분의 분무형상이 관찰되지 않을 뿐만 아니라 저압(P_{inj} :100)에서는 전체 분무의 발달이 관찰되지 않는다. 이는 디젤에서도 동일한 현상이 관찰되었으며 디젤의 경우 150 bar에서 다단분사가 정상적으로 분사가 되었다.

하지만 DME의 경우 400 bar에서부터 온전한 다단분사를 보인다. 이는 디젤보다 밀도가 낮아서 분사력이 약하기 때문에 발생한 것으로 보인다.

Fig. 5은 2000 rpm에서의 연료를 500 bar로 분사 하였을 때의 DME의 분무 발달 형상 사진이다. 전체적인 분무발달 형상에서 Pilot분사의 분무 발달형상은 관찰되지 않으며 관찰되는 Pre분무 발달형상 또한 디젤과 비교할 때 분무 발달이 짧게 진행된다.

Fig. 2~5의 디젤과 DME의 분무발달 형상을 비교해 보았을 때 전체적으로 디젤의 분무 발달 형상은 실린더 벽에 닿는 경우가 많았지만 DME의 경우 분무 후에 최대 13 ms만에 증발되어 실린더의 벽에 닿는 모습을 관찰할 수 없었다. 이는 휘발성의 차이에서 오는 것이라 볼 수 있으며 다단분사를 적용할 때 DME의 경우 더 빠른 시간에 분무 발달이 되어 기화되기 때문에 디젤보

Fig. 6 Fuel spray overlapped between pre and main injection (at 2000 rpm, p_{inj} :500 bar)

다 실린더 내부에 묻는 연료가 적기 때문에 탄화수소(HC)의 발생이 줄어 들것으로 생각된다.

다단분사 실험을 진행하는 동안 Fig. 6과 같이 분무형상이 중첩되는 것이 관찰되었다. 이는 디젤에서만 일어났으며 분사압력과 시점, 분사시간을 바꾸었음에도 불구하고 모든 분사 결과에서 관찰되었다. DME와 디젤에 같은 분사 신호를 주었음에도 이런 차이를 나타내는 것은 디젤의 휘발 속도가 DME에 비해서 현저히 느리기 때문이다. 디젤은 DME와는 다르게 탄소사슬들(C_{12} - C_{25})이 많이 포함된 혼합물이기 때문에 분자간의 응력이 미약하나마 작용을 한다. 하지만 DME에는 산소를 포함한 연료이며 디젤과 비교하면 분자량(48 g/mol)이 작기 때문에 휘발성이 더 크다.

3.2 분무 발달 길이

분무 발달 길이 측정은 분무 시작점으로부터 가장 멀리 떨어진 곳을 기준으로 하여 측정 하였다. 분무 발달의 종료는 사진프레임을 기준으로 3프레임이 지날 때까지 정체되어 있으면 분무발달이 정체된 것으로 판단하였다. 이번 실험에서 사용된 인젝터는 다공 홀(6-Hole)이기 때문에 분무 형상 하나만을 기준으로 하지 않고 동일분사 시간에 분무 길이를 평균으로 해서 데이터를 처리 하였다. 또한 이번 실험은 다단분사 조건을 설정 하여서 실험을 진행하였기 때문에 선행분사가 진행 중임에도 불구하고 다음 분사가 시작되는 모습을 관찰할 수 있었다. 이 경우 선행분사는 종료된 것으로 생각

Fig. 7 Spray penetration length of diesel at 1500 rpm

Fig. 9 Spray penetration length of DME at 1500 rpm

Fig. 8 Spray penetration length of diesel at 2000 rpm

Fig. 10 Spray penetration length of DME at 2000 rpm

하고 다음으로 진행되는 분사의 시작으로 놓고 길이를 측정하였다.

Fig. 7~8에서의 디젤의 분사 길이를 시간에 따라 나타내었다. 분무 길이는 Main분사의 경우 평균적으로 40 mm가 넘었으며 분무 길이는 다단분사의 순서에 따라서 증가하는 경향을 보였다. 디젤의 경우 다단분사의 발달 길이가 Pilot-Pre-Main의 분사로 증가 하지만 Fig. 7에서는 저압에서는 Pilot-Pre 분사 간의 차이가 크게 나지 않으며 오히려 Pilot 분사가 Pre분사보다 더 발달한 경우도 있었다. 이는 두 분사간의 차이가 없어서 라기 보다는 앞서 Fig. 6에서도 말했듯이 분사가 중첩이 되면서

Pilot분사가 Pre분사의 발달을 방해가 되었기 때문이다. Fig. 8에서는 Pilot분사와 Pre분사 간에는 Duration의 시간차이(70 μ s)가 있기 때문에 저압에서라도 분무 길이의 차이를 확실히 알 수 있다.

Fig. 9~10는 DME의 분사 길이를 시간에 따라 나타내었다. DME의 경우 분무 길이가 디젤보다는 짧지만 증발로 인하여 다단분사의 경우 발달이 빨리 종료되는 것을 볼 수 있었다. 하지만 분무 발달이 빨리 종료되기 때문에 디젤과 달리 다단분사간의 분무 발달에 영향을 주지 않는다. 또한 저압에서는 다단분사가 되지 않았기 때문에 분사 길이에 관한 수치를 작성 하면서 DME 연료

를 다단분사하기 위해서 필요한 최소 압력에 대해서도 알 수 있었다.

Fig. 7~10에서 나타난 결과를 보면 DME는 저압에서는 분무 형상을 관찰할 수 없었기 때문에 저압부분에서는 디젤과의 비교가 무의미할 수 있다. 하지만 고압에서는 충분히 분무 형상의 발달을 관찰할 수 있으므로 고압부분의 분무 발달 길이를 위주로 비교해볼 때 DME의 경우 분무 발달의 길이가 디젤보다는 짧지만 디젤보다 분무발달 속도가 빠르다. 이는 DME의 휘발성이 크기 때문에 분무 형상이 발달하는 동안에 빠른 기화로 인하여 디젤과 달리 중첩이 생기지 않기 때문에 분무 형상의 발달이 더 빠를 수 있으나 더 이상 멀리 발달하지 않고 기화하여 분무가 종료되는 결과를 보여준다.

3.3 분무발달 각도

분무각도를 측정할 때는 분무 길이를 측정할 때와 같이 동일분사 시간에 분무 각의 평균으로 해서 데이터를 처리하였다. 또한 거리별로 각을 측정할 경우 거리설정 에 따라 분사 발달정도가 달라질 수 있으므로 최대 각도를 기준으로 해서 수치화 하였다.

분무가 발달하는 동안 각도 변화는 다음 과 같았으며 DME의 경우 디젤과 비교 할 때 증발이 특성이 있기 때문에 분무 발달 각도가 달라졌다.

Fig. 11~12는 디젤의 분무 발달 각도를 측정한 결과이다. 결과를 보면 1500 rpm에서 Pilot분사와 Pre분사 간의 최고 분무 발달각의 차이는 3° 정도 이지만 2000

Fig. 11 Spray angle of diesel at 1500 rpm

Fig. 12 Spray angle of diesel at 2000 rpm

Fig. 13 Spray angle of DME at 1500 rpm

rpm에서는 7°까지 늘어났다. 이는 1500 rpm에서는 Pilot 분사에 의해서 노즐 입구부분의 외부의 압력이 줄어들었기 때문에 분무 발달 각도의 감소의 폭이 줄었다고 할 수 있다. 반면 분사 간격이 더 넓은 2000 rpm에서 분사 시에 Pilot분사에서 분사된 연료가 기화되면서 외부의 압력이 증가하였기 때문에 분무 발달 형상이 좁게 형성되는 결과를 보여주었다.

Fig. 13~14은 DME의 분무 발달 각도를 측정한 결과이다. DME의 경우 2000 rpm에서 Pilot분사가 관찰되지 않았기 때문에 비교를 할 수 있는 결과치가 적었다.

Fig. 11~14에서 관찰되는 디젤과 DME의 분무 발달

Fig. 14 Spray angle of DME at 2000 rpm

각도의 발달은 는 압력이 증가함에 따라서 분무 발달 각도가 증가하다가 일정압력(300 bar)이후에는 감소하는 것을 알 수 있으며 분무 시간에 따라서 감소하는 정도는 DME의 감소도가 디젤보다 더 빠르다는 것을 알 수 있다. 이는 DME의 경우 디젤보다 상대적으로 가볍기 때문에 넓게 퍼지는 이미지를 보여주지만 디젤의 경우 분무가 된 이후에도 액적인 상태가 유지되기 때문에 분무중심점으로 뭉치는 현상을 보여준다.

또한 분사가 진행되는 동안에 분무형상 발달 각도를 관찰하면서 분사가 끝나는 마지막 지점에서 노즐이 닫히면서 분무형상의 끝단이 넓게 퍼지는 형상이 관찰되었다. 이는 노즐이 닫히는 순간 적으로 일어나는 현상이므로 각도측정에서는 배제하였다.

3.4 디젤과 DME비교

Fig. 15~18은 디젤과 DME의 분무 발달 길이와 각도를 비교 한 것이다. 전체를 비교하는 것보다는 특징 점을 선정 하였다. 1500 rpm에서는 디젤의 경우 100 bar를 제외하고는 다단분사가 뚜렷하게 관찰되었지만 DME의 경우 150 bar에서는 Main, 350 bar에서는 Pre와 Main, 500 bar에서는 다단분사 전체가 관찰이 된다. 반면 2000 rpm에서는 디젤은 1500 rpm과 분사 자체는 큰 차이가 없지만 DME는 전 실험에서 Pilot분사가 관찰되지 않는다. 그렇기 때문에 분사별로 나누어서 결과를 정리해 보았다.

Fig. 15~16은 1500 rpm에서의 디젤과 DME의 분무 발달 길이와 각도를 종합한 것이다. 350,500 bar는 공통

Fig. 15 Spray penetration length of diesel and DME at 1500 rpm

Fig. 16 Spray angle of diesel and DME at 1500 rpm

압력이며 디젤은 100 bar를, DME는 150 bar의 데이터를 추가 하였다.

디젤의 경우 DME와 비교를 해보면 분무 발달 각도가 일정하지 않고 튀는 형상을 보여준다. 이는 DME의 경우 쉽게 기화되면서 분무형상이 일정하게 줄어들지만 디젤은 액적상태가 오래 가기 때문에 형상의 변화가 불규칙 하게 나타났다.

Fig. 17~18은 2000 rpm에서의 디젤과 DME의 분무 발달 길이와 각도를 종합한 것이다. 250,500 bar는 공통 압력이며 디젤은 100 bar의 데이터를 추가 하였다.

디젤 100 bar를 추가한 이유는 디젤 100 bar에서는

Fig. 17 Spray penetration length of diesel and DME at 2000 rpm

Fig. 18 Spray angle of diesel and DME at 2000 rpm

Main분사만 관찰되기 때문이다. DME의 경우 250 bar까지 Main분사만 관찰되고 300 bar에서부터 Pre와 Main 분사가 관찰되기 때문에 비교 대상으로 넣은 것이다.

DME는 전 압력 실험 범위에서 Pilot분사가 나타나지 않았다. 이는 짧은 분사시간(260 μ s)으로 인해 디젤에 비해서 밀도가 낮은 DME가 충분한 분사 압력을 받지 못해서 일어난 결과라고 말할 수 있다.

결과를 비교해보았을 때 디젤이 더 길고, 넓게, 오래 분무 발달 되지만 이는 DME가 디젤보다 더 빨리 미립화되어 기화되었기 때문이라고 말할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 디젤과 DME연료의 분사타이밍과 엔진의 rpm스피드를 변화시켜서 다단분사를 이용해서 두 연료의 분무 특성을 알아보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 저압에서 DME는 디젤보다 분사가 어렵기 때문에 DME를 이용하기 위해서는 디젤보다 고압의 분사 압력이 필요하다.

2) 동일한 조건하에서 관찰한 결과 디젤의 분사거리가 DME에 비해서 길고 오래 발달하지만 이는 DME의 휘발성 영향으로 생각할 수 있다.

3) 이번 실험에서 DME의 다단분사를 할 수 있는 최저 조건은 분사시간(Duration) 300 μ s 이상에서 350 bar 이상이라고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업과 에너지기술평가원에 DME자동차 실용화 연구의 지원으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

- (1) S. J. Jeong and O. T. Lim, "Research and Development of a 2.9 Liter Light-duty DME Truck Using Common Rail Fuel Injection Systems", KSAE Paper Vol. 20, No. 6, 2012, pp. 107~116.
- (2) J. W. Yang, "A Study on the Characteristics of Spray and Engine Combustion of Diesel-DME Blended Fuel", ILASS-KOREA Vol. 18, No. 2, 2013, pp. 73~80.
- (3) S. J. Jeong, "Research and Development of Light-Duty DME Truck with Multiple injection", KSAE 12-j0023 2012, pp73~78.
- (4) Ji Zhang and Tiegang Fang, "Spray Combustion of Biodiesel and Diesel in a Constant Volume Combustion Chamber", SAE Paper 2011-01-1380, 2011.
- (5) S. H. Park, H. J. Kim, S. H. Kim and C. S. Lee, "Spray-atomization Characteristics of Biodiesel Fuel with Multiple Injection", KSAE, Vol. 18, No. 4, 2010, pp. 40~47.
- (6) M. Y. Kim, S. H. Yoon and C. S. Lee, "Impact of Split Injection Strategy on the Exhaust Emissions and Soot Particulates from a Compression Ignition Engine Fueled with Neat Biodiesel", Energy & Fuels, Vol. 22, No. 2, 2009, pp. 1260-1265.