

## Diesel-DME 혼합연료의 분무 및 엔진 연소특성에 관한 연구

양지웅\* · 정재훈\* · 임옥택†

### A Study on the Characteristics of Spray and Engine Combustion of Diesel-DME Blended Fuel

Ji Woong Yang, Jae Hoon Jung and Ock Taeck Lim

**Key Words:** Spray characteristics(분무특성), Combustion characteristics(연소특성), Emission characteristics(배기특성), Diesel-DME blended fuel(Diesel-DME 혼합연료)

#### Abstract

The purpose of this study was compared the spray, combustion and emissions (NOx, CO, HC, smoke) characteristics of a typical fuel (100% Diesel, DME) and Diesel-DME blended fuel in a Constant Volume Chamber (CVC) and a single-cylinder DI diesel engine. Spray characteristics were investigated under various ambient and fuel injection pressures when the Diesel-DME blended ratio is varied. The parameters of spray sturdy were spray shape, penetration length, and spray angle. Common types of injectors having seven holes and made by Bosch were used. As of use, the typical fuel (100% Diesel, DME) and the blended fuel by mixture ratio 95:5, 90:10 (Diesel:DME) were used. The Injection pressure was fixed by 70.1MPa, when the ambient Pressure was varied 0.1, 2.6 and 5.1 MPa. The combustion experiments was conducted with single cylinder engine equipped with common rail injection system. injection pressure is 70 MPa. The amount of injected fuels is adjusted to obtain the fixed input calorie value as 972.2 J/cycle in order to compare with the fuel conditions.

#### 1. 서 론

최근 강화된 환경규제에 따른 자동차 배출가스를 줄이려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그에 대한 대안으로 기존의 연료와 새로운 연료를 혼합한 혼합연료에 대한 연구가 Komatsu의<sup>(1-3)</sup>에 의해서 활발히 진행되고 있다.

DME(Dimethyl Ether)는 세탄가가 높고(CN≥55), 자착화 온도가 낮아 압축착화방식이 가능하다. 이로 인해 압축착화엔진의 장점인 고효율을 유지할 수 있으며 또한 비등점이 낮아(-25°C) 기화가 빨리 일어나기 때문에 혼

합특성이 우수하고 적심현상(Wall wetting)이 거의 없다. DME는 LPG와 유사하게 상온에서 약 6 bar이상 가압 시 액화가 가능하므로 기존의 LPG 인프라를 그대로 활용할 수 있는 것도 하나의 장점이다. 그리고 압축착화엔진의 가장 큰 단점인 PM 발생이 DME 연료에서는 거의 배출되지 않는다. 이는 DME분자 구조상에 탄소(C)-탄소(C) 결합이 없고 분자 내의 산소 함유량이 높으며 (34.8 %) 탄소(C)와 수소(H)의 비율이 가장적기 때문이다. 이러한 특징들이 압축착화엔진의 대체연료로써 DME가 각광받는 이유이다.

압축착화엔진에서 DME연료 적용의 방안으로써 두 종류 연료를 사용하는 혼소엔진이 검토되어져 왔다. 디젤연료와 혼소로 사용되는 연료로는 LPG, CNG, DME 등 가스 및 이를 액화시켜 사용하는 연료를 채택하여 많은 연구들이 진행되어왔다. 그 결과 기존엔진의 성능을 유지하였으나, 배기부분에서 각 조건마다 NOx의 배

(2012년 9월 21일 접수 ~ 2012년 11월 12일 심사완료, 2013년 6월 3일 게재확정)

\*울산대학교 기계자동차공학과 대학원

†임옥택, 회원, 울산대학교 기계공학부

E-mail : otlim@ulsan.ac.kr

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

출이 다르게 나타났다. 이를 보완하기 위해 추가적인 후처리 장치가 필요하였으며, 혼소엔진을 가능케 하기 위해 분사시스템 개조가 필요하여 엔진의 구조가 상대적으로 복잡해진다. 또한 세탄가 및 옥탄가량이 연료마다 다르기 때문에 연소제어가 힘들어 지는 단점들이 존재한다. 그런데 최근에 이에 대한 문제점들을 보완하고자 디젤과 증발 특성이 우수한 DME의 연료혼합에 관한 연구가 수행되어지고 있다.

Ikeda<sup>(4)</sup>는 디젤에 DME를 40% 혼합하고 분사압을 170 bar로 해서 분사방식 및 분사시점 지각에 따른 연소 및 배기영향을 확인하였다. 그 결과, 분사시점 지각할 시 NOx는 혼합연료와 디젤연료가 비슷하였으며, smoke는 줄어들고, HC는 증가하였다. 반면에 BMEP가 증가할 때는 NOx가 줄어들고, smoke는 증가하였으며, HC는 비슷하였다. 또한 이 논문에서는 분사방식과 DME 혼합량에 따른 배기특성을 나타내었지만, 순수 DME 및 디젤과의 비교데이터는 없었다. 그리고 커먼레일이 장착되지 않은 엔진이다. Jin-zhou<sup>(5)</sup>는 혼합연료에 DME를 25, 50, 75% 혼합하여 흡기온도, 분사압력, BMEP를 변화시켜 가며 연소 및 배기특성을 확인하였는데 다른 연구와 다른 점은 연료를 흡기포트에 분사 한 것이다. 그 결과 DME 혼합시 viscosity는 감소하고 vapor pressure은 조금 증가하였다. 그리고 HCCI엔진에서 DME 50%가 가장 효과적이고 순수 DME 및 디젤 문제점을 해결한다고 하였다. 또한 흡기온도에 따른 영향으로는 온도 상승시 운전범위가 좁아진다. 이는 노킹에 의한 제한으로 보며, 이를 위해 CO<sub>2</sub>를 투입하여 점화시기를 제어 할 수 있다고 명시하였다.

본 연구에서는 증발특성이 우수한 DME연료를 디젤 연료에 혼합하여 연료의 혼합비에 따른 분무가시화를 통한 분무특성 및 단기통엔진을 이용한 연소특성 및 배

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

기가스 특성을 확인 하고자 한다. 그리고 본 실험에서는 앞서 열거한 혼합연료의 선행 연구들과 달리 커먼레일 분사 시스템을 도입하여 고압의 연료 분사에 따른 영향을 알고자 한다. 또한 각 조건에서의 특성들을 순수 디젤, DME의 특성과 비교 분석하여 혼합연료에 관한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 실험 연료

Table 1은 실험에 사용된 연료의 조성비를 나타낸 표이다. 실험에는 디젤연료 및 순도 98% DME(운활성 개선을 위해 2 vol% 바이오 디젤 첨가)를 사용하였다. 선행된 Diesel-DME 혼합에 관한 연구<sup>(6)</sup>를 바탕으로 Diesel과 DME의 혼합 시 상분리가 일어나지 않는 273.83 K, 96.1 kPa 이상인 상온, 고압 293.83 K, 1000 kPa의 조건하에서 연료를 충전할 LPG 가스통을 저울에 올려놓고 wt%에 맞추어서 먼저 Diesel연료를 고압펌프를 이용하여 가스통에 주입하고, DME연료를 주입하여 혼합연료를 만들었다.

## 3. 실험 장치 및 방법

Fig. 1는 분무가시화 실험에 사용된 실험장치의 개략

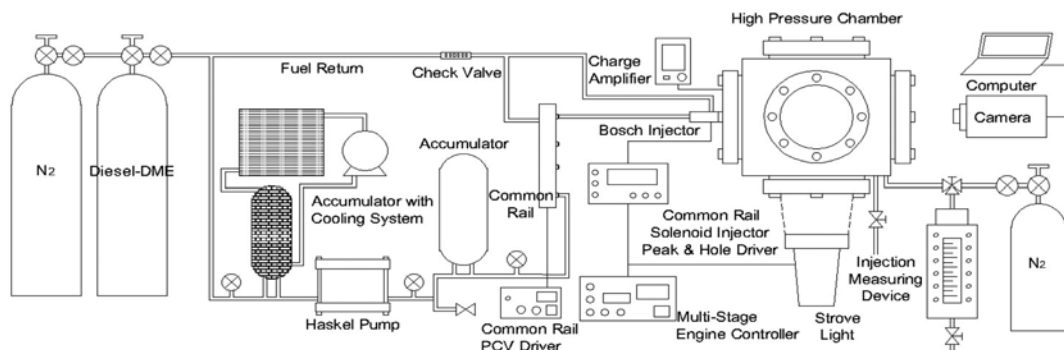


Fig. 1 Schematic of visualization experimental apparatus

도이다. 그림의 왼쪽 부분은 연료분사시스템이다. 본 실험에서는 연료 분사압력을 고압으로 일정하게 유지시켜 주는 커먼레일 시스템을 사용하였다. DME는 낮은 점성과 나쁜 윤활성 때문에 연료개통시스템의 누유 및 마모를 야기 시킨다. 이를 위해, 점성과 윤활성을 향상시킬 수 있는 바이오디젤을 2%정도 넣고, DME가 탄성증합체에 피해를 주는 것을 피하기 위해 고무제품이 사용이 되지 않은 공기압축기(Haskel pump)를 사용하였다. DME는 낮은 증발 점 때문에 대기압에서 가스 상태로 존재하기 때문에 액체 상태를 유지하기 위해서 상온에서 0.8 MPa이상으로 가압할 필요가 있다. 0.8 MPa이상일 때 액화상태로 존재하는 DME는 질소 가압을 통해 압력을 0.8 MPa이상으로 높인 다음 어큐뮬레이터로 공급된다. 액화상태의 DME는 어큐뮬레이터의 벽면의 열전관으로 감싸고, 컴프레서와 냉각팬을 이용하여 냉각된 냉매를 순환 시켜주어 액체 상태로 유지 하도록 하였다. 액화된 DME는 압축 공기로 가동되는 공기 압축기(Haskel pump)를 거치면서 약 70.1 MPa로 가압 된 후 커먼레일 전에 설치된 어큐뮬레이터에 저장된다. 연료는 PCV(Pressure Control Valve)드라이브에 의해 연료의 분사 압력이 조절되는 커먼레일에 공급되어 일정한 압력으로 연료가 분사되도록 하였다. 인젝터는 BOSCH사의 Solenoid type으로 7홀을 가지고 있는 인젝터를 사용하였다. 인젝터는 Multi-Stage Injection Engine Controller에 의해 분사시간과 분사횟수가 제어된다. 인젝터에

서 커먼레일로 리턴된 연료는 다시 저압 펌프로 돌아가 순환된다. Fig. 1의 오른쪽 부분은 분무 가시화 시스템을 나타낸다. 오른쪽 부분에 위치한 정적연소기는 질소에 의해 내부가 가압된다. 평원으로는 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 압력신호는 신호증폭기(Kistler, 5015)에 의해 증폭된 신호를 읽는다. 분무형상을 촬영할 때 사용되는 카메라는 컴퓨터와 연결되어 작동하고 촬영된 영상은 컴퓨터에 저장된다.

연소 및 배기특성 실험에 사용된 실험장치의 개략도가 Fig. 2에 나타나있다. 사용된 엔진의 제원은 Table 2에 나타나있다. 크랭크축에 장착된 로터리 엔코더(Autonic; E40S)로부터 나온 크랭크각도 신호는 엔코더 인터페이스박스(Zenobalti Co.; ZB-100)와 엔진 컨트롤러(Zenobalti Co.; ZB-8035)를 통해 인젝터 드라이버(TEMS; TDA-3300)로 전달되어 분사시간 및 횟수를 조절하였다. 커먼레일 압력은 PCV 드라이버(Zenobalti Co.; ZB-1100)를 사용해 압력을 제어한다. 엔진의 운전 속도는 150 kW급 와전류형 동력계를 엔진 크랭크축과 연결하여 제어하였다.

배기가스 분석장치(HORIBA; MEXA-7100 DEGR)를 이용하여 CO, THC, NOx를 측정하였으며 smoke는 smoke meter(AVL; 415)를 사용하여 분석하였다. 배기데

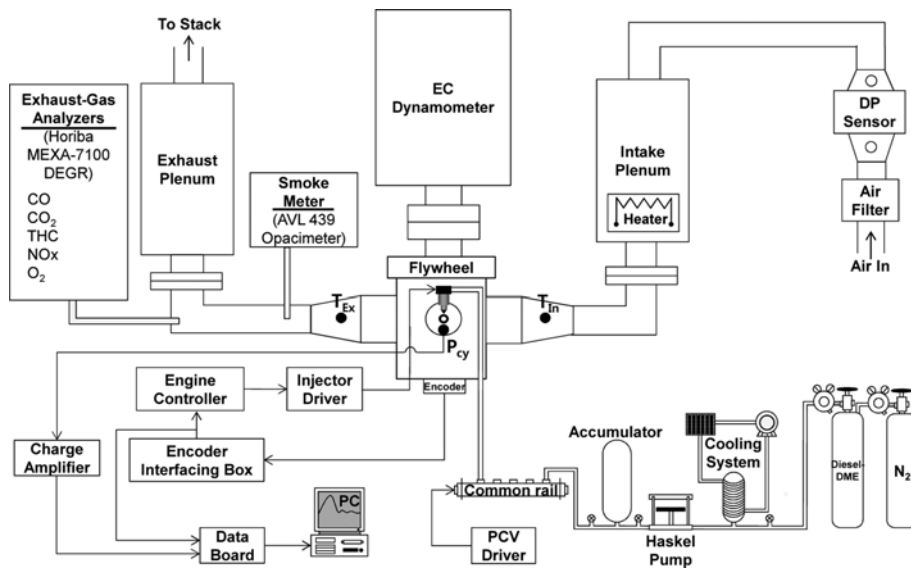


Fig. 2 Schematic of the engine facility

Table 2 Engine specification

Engine type		Water-cooled 4 cycle diesel
Number of cylinder		1
Bore×Stroke		83×92 mm
Displacement		498 cc
Number of valves		2 intake, 2 exhaust
Compression ratio		19.5
Valve timing	Intake	8°CA bTDC/44°CA aBDC
	Exhaust	54.6°CA bTDC/7.4°CA aTDC
Fuel system		Common rail
Injection type		Direct injection
Number of Nozzle holes		7 holes
Nozzle hole diameter		0.141 mm

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

이터의 모든 값은 각 조건에서의 정상 상태일 때 1분 동안 측정하여 얻은 데이터를 평균한 값이다. 연소실 내 압력측정을 위해서 piezo electric형의 압력센서(Kistler;

6056A)를 실린더헤드를 가공하여 장착하여 0.1°CA 간격으로 데이터를 취득하였다. 압력데이터 또한 엔진이 정상 상태일 때 50 cycle을 취득하여 1 cycle로 평균하였다.

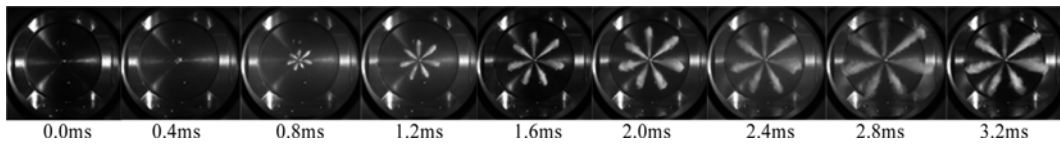
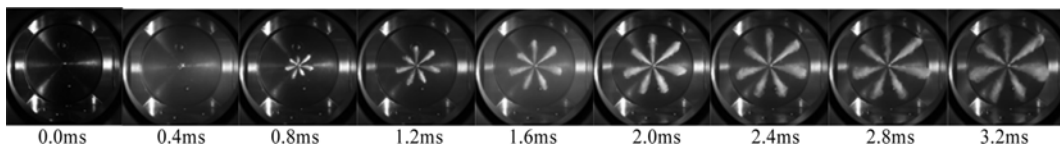
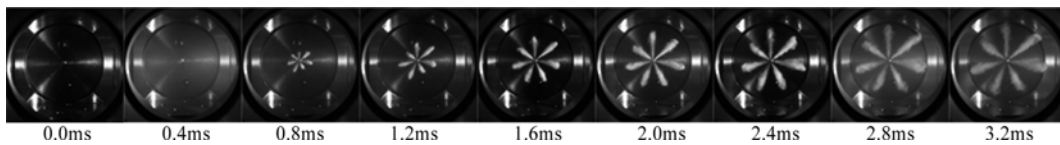
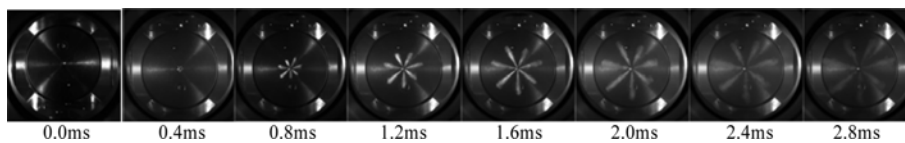
## 4. 실험결과

### 4.1 분무 가시화 결과

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. 나타낸 사진은 연료가 분무된 시점(ASOI)부터 0.4 ms간격으로 분무가 완전 발달할때까지의 분무발달과정을 보여주고 있다. Diesel 연료와 DME 연료를 비교 하였을 때, Diesel 연료의 분무 액적이 완전히 발달하여 연소실 벽에 닿기 까지 3.2 ms라는 시간이 걸렸고, DME는 높 증발 특성으로 인해 연소실 벽면에 분무액적이 닿기 전 2.8 ms만에 대부분이 기화되는 모습을 확인 하였다.

### 4.2 분무관통길이, 분무각 측정결과

Figures 7-12은 연료와 분사압력 분위기 압력에 따라

Fig. 3 DiDm 100 Spray shape ( $P_{inj} : 70.1 \text{ MPa}$ ,  $P_{amb} : 5.1 \text{ MPa}$ )Fig. 4 DiDm 95 Spray shape ( $P_{inj} : 70.1 \text{ MPa}$ ,  $P_{amb} : 5.1 \text{ MPa}$ )Fig. 5 DiDm 90 Spray shape ( $P_{inj} : 70.1 \text{ MPa}$ ,  $P_{amb} : 5.1 \text{ MPa}$ )Fig. 6 DiDm 0 Spray shape ( $P_{inj} : 70.1 \text{ MPa}$ ,  $P_{amb} : 5.1 \text{ MPa}$ )

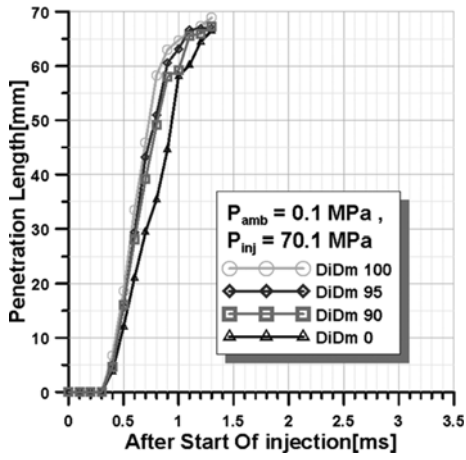


Fig. 7 Spray penetration length of fuel at  $P_{amb} = 0.1$  MPa

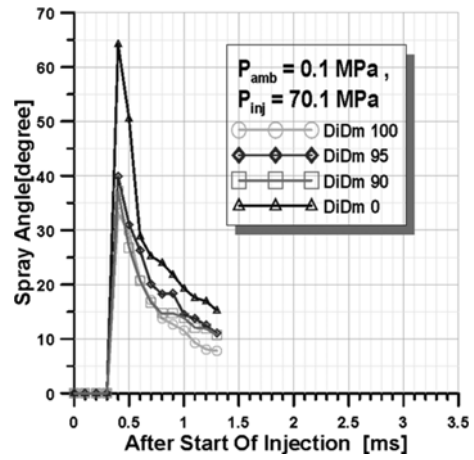


Fig. 10 Spray angle of fuel at  $P_{amb} = 0.1$  MPa

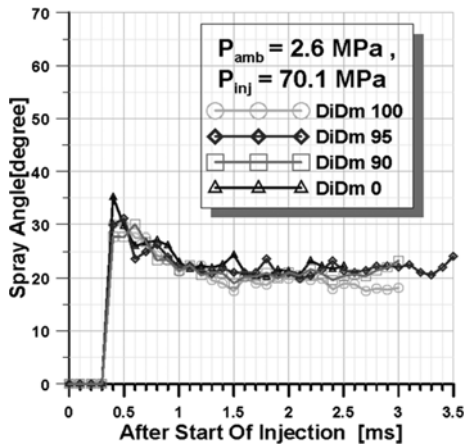


Fig. 8 Spray penetration length of fuel at  $P_{amb} = 2.6$  MPa

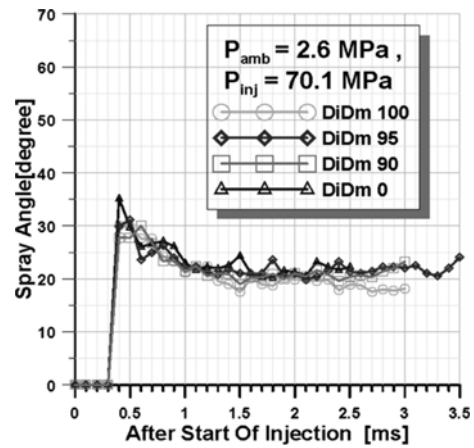


Fig. 11 Spray angle of fuel at  $P_{amb} = 2.6$  MPa

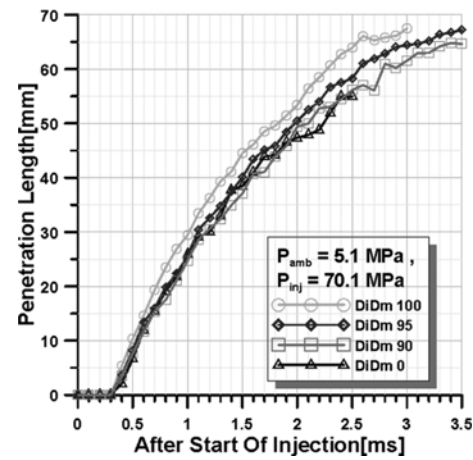


Fig. 9 Spray penetration length of fuel at  $P_{amb} = 5.1$  MPa

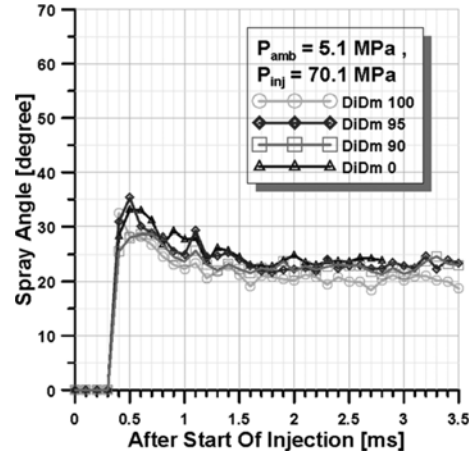


Fig. 12 Spray angle of fuel at  $P_{amb} = 5.1$  MPa

시간단위별로 분무선단길이와 분무각을 나타낸 그래프이다. 분무선단길이는 분위기 압력이 높아 짐에 따라서 축 방향으로의 연료분무거동을 방해 받아 분무길이가 짧아 졌고, 분사압력이 높아짐에 따라 길이가 길어지는 것을 볼 수 있다. 연료에 따라 Diesel연료가 가장 빠르게 액적이 발달되었고, DME가 가장 느리게 발달하지만 빠른 기화 특성으로 분무가 2.5, 2.8 ms만에 완전 발달하였다. 앞에서와 같이 DME의 혼합률이 높아짐에 따라 분무관통거리가 짧아짐을 확인 할 수 있었다.

분무 각은 분사압력, 분위기 압력, 인젝터 노즐의 형상, 분무 액체의 물성치 등의 여러 가지 요인들에 영향을 받는다. 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. 6에서 볼 수 있듯, 분무발달 초반 0.8~1.2 ms에서는 분무 각이 갑자기 크게 나타나는 불안정한 모습을 보였고, 1.2 ms이후에서는 안정된 분무각을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 DiDm 0의 분무 각이 가장 크고, DiDm 90, DiDm 95, DiDm 100순으로 분무 각이 작게 나타났다. 이렇게 나타난 이유는 DME의 높은 증발 특성으로 인하여 분무액적의 미립화를 빠르게 진행시켜 분무각을 크게 만들기 때문이다.

#### 4.3 연소특성 및 배기특성

Figure 13은 분사시점 340°CA에서 순수 디젤, DME 연료 및 혼합연료에 따른 실린더 내 압력곡선 및 열 발생률을 나타낸다. DME연료에서의 최고압력은 디젤 및 혼합연료보다 대략 10 bar 정도 더 높다. 이는 DME연

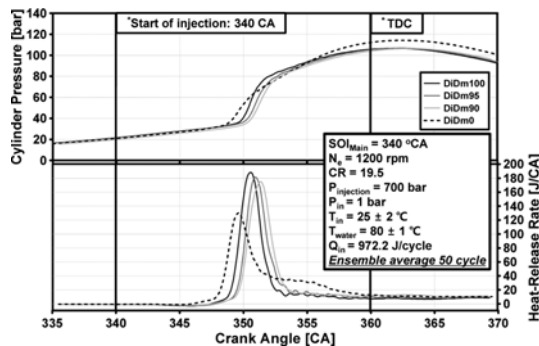


Fig. 13 Cylinder pressure and heat-release rate for blended fuels at  $SOI_{Main} = 340^{\circ}CA$

료 특성상 다른 연료보다 빠른 기화성, 높은 세탄가 및 우수한 혼합기 조성으로 인해 짧은 점화지연과 높은 연소압력을 보인다.

열 발생률 그래프를 살펴보면, DME연료의 연소시작점은 디젤연료보다 빠른 것을 확인할 수 있다. 그러나 혼합연료에서는 예상과 달리 DME연료가 증가할수록 연소 시작 시점이 지각 되는 것을 확인할 수 있다. DME연료를 디젤 연료에 첨가해 줌으로써 혼합연료가

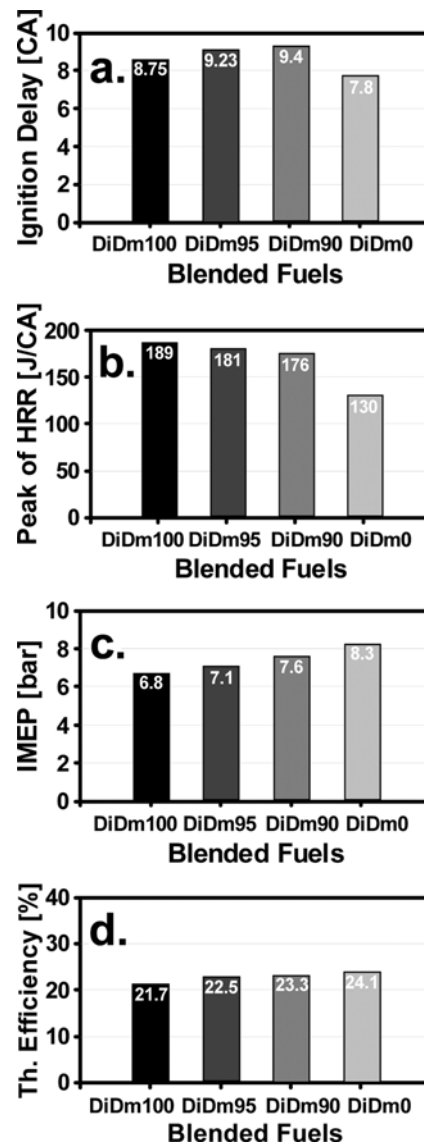


Fig. 14 Combustion of characteristic the (a) ignition delay (b) peak of HRR (c) IMEP (d) thermal efficiency for blended fuels at  $SOI_{Main} = 340^{\circ}CA$

실린더 내 분사되었을 때 디젤연료에 혼합된 DME연료가 먼저 기화되고 디젤연료 또한 밀어주면서 혼합연료의 미립화를 촉진시켜서 연소 시작 시점이 디젤연료보다 진각 될 것이라 예상하였지만, 실험 결과는 상이하였다. 이는 혼합연료가 실제 실린더 내 분사되었을 때는 DME연료가 먼저 기화되어서 디젤연료의 분무형상을 공기와 차단하는 역할을 하게 되어서 점화지연이 길어진 것으로 판단된다. 또한, Wang 등<sup>(7)</sup>에서도 혼합연료에 DME연료가 첨가될수록 점화지연이 지각되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 최고 발열량은 압력곡선 기울기가 가장 가파른 디젤연료가 제일 높았으며, DiDm 95, DiDm 90, DME연료 순으로 낮아진다.

Figure 14는 분사시점 340°CA에서 순수 디젤, DME연료 및 혼합연료에 따른 점화지연, 최고 열 발생량, IMEP, 열효율을 나타낸다. 혼합연료의 IMEP는 디젤연료보다 각각 DiDm 95는 0.3 bar, DiDm 90은 0.8 bar 더 높다. 이는 혼합연료에 DME연료가 증가할수록 점화지연이 길어지게 되고 이로 인해 TDC이전에 일어났던 압축행정에서의 음의 일이 TDC에 가까워짐으로써 양의 일로 전환되면서 IMEP가 증가한 것으로 보여 진다. 반면에 DiDm 0인 DME연료는 점화지연이 가장 짧는데 비해 IMEP가 8.3 bar로 가장 높다. 이는 DME연료의 최고압력이 다른 연료에 비해 높아서 IMEP에 영향을 미친 것으로 보인다. 그리고 열효율은 각 연료에 대해 동일한 열량을 투입시켰기 때문에 IMEP가 높은 순으로 열효율이 증가함을 확인할 수 있다.

Figure 15는 순수 디젤, DME연료 및 혼합연료에서 주 분사시기에 따른 CO, THC, NOx 그리고 smoke를 나타낸다. CO와 THC는 거의 모든 분사시점에서 DME연료가 디젤연료보다 낮게 나온다. 이유는 DME연료의 CH 성분이 작다. 그리고 DME연료가 실린더 내 분사하였을시 분무 길이가 짧고 기화성이 좋기 때문에 실린더 적심현상이 줄어들기 때문이다. 혼합연료에서는 디젤연료에 DME연료가 증가함에 따라 디젤연료 보다 낮은 수치를 보였다.

NOx는 DME연료를 첨가하였을 때 디젤연료보다 높다. 이는 DME연료가 디젤연료보다 상대적으로 출력 및 IMEP가 높기 때문에 연소온도가 상승하여 더 많은 NOx가 배출된 것으로 보여진다. 그래서 혼합연료의 경우 DiDm 95연료는 디젤연료와 NOx 배출량이 별반 차이를 보이지 않지만 DiDm 90연료에서는 디젤연료보다 증가하여 DME연료 쪽으로 가는 경향을 보인다.

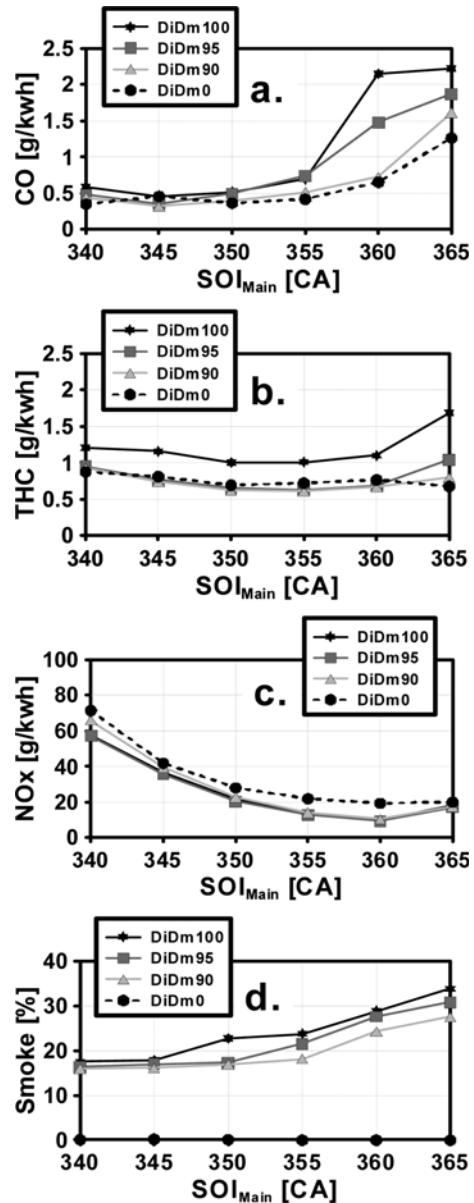


Fig. 15 Emission of characteristic the (a) CO (b) THC (c) NOx (d) smoke in various SOI<sub>Main</sub>

함산소 연료인 DME연료는 비 함산소 연료인 디젤연료에 비해 거의 smoke를 배출하지 않는다. 그래서 디젤 연료에 DME연료량이 증가할수록 smoke의 배출량이 줄어들게 된다. 혼합연료인 DiDm 95, DiDm 90 연료는 디젤연료의 smoke 배출량 보다 최대 20%가량 줄어들었다.

## 5. 후 기

이 논문은 2012년도 한국연구재단의 의 기초연구사업과(No. 2012R1A1A1044855), 2013년 울산대학교 기계공학부 일류화사업단의 연구비에 의하여 연구되었습니다. 지원에 심심한 감사를 드립니다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 Diesel-DME연료를 혼합하여 연료의 혼합비에 따른 분무특성 및 엔진연소, 배기특성을 순수 디젤과 DME연료와 비교 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) DME연료의 함유율이 증가할수록 높은 증발특성으로 인해 미립화가 촉진되어 연료의 분무관통길이는 짧아지고 분무각은 증가한다. 또한 분위기 압력이 높아짐에 따라 축 방향으로의 분무발달을 방해 받아 길이가 짧아지고, 분무각은 증가한다.

2) DME연료의 함유율이 증가할수록 점화지연은 길어지며, 최고 열 발생률은 감소한다. 이는 먼저 기화된 DME연료가 디젤연료의 점화를 지연시키는 역할을 한다. 또한, IMEP 및 열 효율은 증가한다. 이유는 혼합연료에 DME연료가 증가할수록 점화지연이 길어지게 되고 이로 인해 TDC이전에 일어났었던 압축행정에서의 음의 일이 TDC에 가까워짐으로써 양의 일로 전환되면서 IMEP가 증가한다.

3) THC와 CO는 DME 연료의 비율이 높을수록 감소한다. 이는 DME연료의 CH 성분이 작으며, DME연료의 짧은 분무 길이로 인한 실린더 적심현상이 줄어들기 때문이다. 그리고 DME연료의 함산소 영향으로, DME

연료가 첨가될수록 smoke는 감소하였다. 반면에 NOx는 DME연료의 높은 연소온도 때문에, DME비율이 많아질수록 배출되는 NOx의 양은 디젤연료보다 증가하였다.

## 참고문헌

- (1) K. 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) M Ikeda, M Mikami and N Kojima, "Exhaust Emission Characteristics of DME/Diesel Fuel Engine", SAE 2000-01-2006, 2000.
- (5) W Ying, Z Longbao and W Hewu, "Diesel emission improvements by the use of oxygenated DME/diesel blend fuels", Atmospheric Environment pp.2313-2320, 2006.
- (6) X. Zhao, M. Ren and Z. Liu. "Critical Solubility of Dimethyl Ether(DME)+Diesel Fuel and Dimethyl Carbonate (DMC)+Diesel Fuel", Fuel, Volume 84, Issue 18, Pages 2380-238, 2005.
- (7) W. Ying, L. Genbao, Z. Wei and Z. Longbao, "Study on The Application of DME/Diesel Blends in A Diesel Engine", Fuel Processing Technology 89(2008) 1272-1280, 2008.