

디젤엔진에서 디젤-에탄올-바이오디젤 혼합연료의 분무 및 연소 특성에 관한 연구

박수한¹⁾ · 연인모¹⁾ · 이창식²⁾

한양대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾

A Study on the Spray and Combustion Characteristics of Diesel-ethanol-biodiesel Blended Fuels in a Diesel Engine

Su Han Park¹⁾ · In Mo Youn¹⁾ · Chang Sik Lee²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 3 December 2009 / Accepted 23 March 2010)

Abstract : The aim of this study is to analyze the effect of the ethanol blending in diesel-ethanol blended fuels on the spray and combustion characteristics in a common-rail four-cylinder diesel engine. For the analysis of the spray characteristics, the spray images were obtained using a high speed camera with metal-halide lamps. From these spray images, the macroscopic spray characteristics such as the spray tip penetration and spray cone angle were investigated. Also, the combustion characteristics including the combustion pressure and the rate of heat release were studied with the analysis of the exhaust emissions in diesel-ethanol blended fuel driven diesel engine. It can be confirmed from the experiment on spray characteristics of diesel-ethanol blended fuels that the increased ethanol blending ratio induced the decrease of the spray tip penetration after the end of the injection. The spray cone angle slightly increased by the blending of ethanol fuel. In the experiment on atomization characteristics, the ethanol blending caused the improvement of the diesel atomization performance. On the other hand, at the same engine load condition, the increase of the ethanol blending ratio lead to lengthen the ignition delays, and to decrease the peak combustion pressure and the rate of heat release. Totally, the combustion and emission characteristics of ULSD and DE10 showed similar characteristics. However, in the case of DE20, CO and HC rapidly increased, and NO_x decreased. It can be believed that 20% ethanol disturbed the combustion of diesel-ethanol blended fuel due to the low cetane number and evaporation.

Key words : Combustion pressure(연소 압력), Diesel-ethanol blended fuels(디젤-에탄올 혼합연료), Nitrogen oxides(질소 산화물), Sauter mean diameter(Sauter 평균 입경, SMD), Spray tip penetration(분무 도달 거리)

1. 서론

가솔린 엔진에 비해 높은 열효율을 얻을 수 있는 디젤엔진은 강화되는 배기 규제를 만족시키기 위해 고압분사 및 대체연료 사용 등의 다양하고 새로운 엔진 기술들이 개발되어 적용되고 있다. 기존 디젤

연료를 대체할 수 있는 것으로는 바이오디젤, DME 등이 있으며, 세계 각국의 전문가 그룹에서 활발히 연구되고 있다.^{1,2)} Zheng¹⁾ 등은 대두유, 카놀라유 등으로부터 추출된 바이오디젤을 이용하여 디젤기관에서의 엔진성능 및 배기특성에 관한 실험을 수행하였다. 그들은 디젤연료와 비슷한 세탄가를 가지는 바이오디젤의 경우 디젤 연료에 비해 높은 질소

*Corresponding author, E-mail: cslee@hanyang.ac.kr

산화물을 배출하는 반면, 디젤에 비해 월등히 높은 세탄가를 가지는 바이오디젤의 경우 착화 지연기간이 짧아져 예 혼합 연소 구간 전 연료/공기의 혼합기 형성을 위한 시간이 충분치 못해 상대적으로 낮은 질소산화물을 배출하는 것으로 보고하였다. 최근에는 바이오디젤, DME 뿐만 아니라 알코올계 연료인 에탄올 연료를 디젤 연료와 혼합하여 연소 성능 및 배기 배출 특성을 개선하고자 하는 연구 또한 활발히 진행되고 있다. Lu³⁾ 등은 디젤 단기통 엔진을 이용하여 디젤-에탄올 혼합연료에 대한 연소 및 배기 특성에 관한 연구를 수행하여, 디젤보다 낮은 일산화탄소(carbon monoxide, CO), 질소산화물 (nitrogen oxides, NO_x), 입자상 물질(particulate matter, PM)이 배출됨을 확인하였다. 또한, 연소 가시화 실험을 통해 에탄올 혼합비율의 증가와 함께 착화 지연기간이 길어지고, 연소 기간이 감소하는 것을 보고하였다. Xu⁴⁾ 등은 에탄올 혼합비율의 증가에 따라 연비가 다소 악화되지만, 제동 열효율은 증가하는 것으로 보고하였으며, soot의 배출은 디젤보다 낮은 것으로 보고하였다. 또한, 착화 지연 기간 및 연소기간에 대한 연구를 통해 에탄올 첨가가 연소실 내에서 디젤 연료의 연소를 향상시키는 것으로 보고하였다. Mohammadi⁵⁾ 등은 디젤 연료에 에탄올을 혼합하는 것은 질소산화물과 입자상 물질의 저감에 효율적이지만, HC와 CO의 증가를 야기하는 것으로 보고하였다. Marek과 Evanoff⁶⁾ 등은 디젤-에탄올 혼합연료의 사용으로 기존 디젤 대비 약 20~40% PM 저감과 약 20~30% CO 저감을 달성할 수 있다고 보고하였다. 이 외에도 에탄올 혼합연료에 대한 물성치 및 연소 특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{7,8)}

그러나 디젤과 에탄올을 직접 혼합했을 경우 상분리와 세탄가 저하라는 문제점이 발생하게 된다. 디젤-에탄올 혼합연료의 상분리 현상에 영향을 주는 주요 인자로는 연료 내 수분 함유량, 혼합연료의 온도, 에탄올 첨가 비율 등을 들 수 있으며, 연료 내 수분 함유량이 높을수록, 온도가 낮을수록 혼합연료의 상분리는 쉽게 일어난다.⁹⁾ 이러한 상분리 현상은 첨가제 등의 사용으로 방지할 수 있으며 최근 연구 결과에 의해 바이오디젤을 첨가제로 사용하여

상분리를 방지할 수 있는 것으로 보고되었다.¹⁰⁾ 본 연구에서는 바이오디젤을 첨가제로 사용하여 디젤-에탄올 혼합연료의 상분리 현상을 방지하였다.

본 연구에서는 엔진연소 및 배기특성에 중대한 영향을 끼치는 디젤-에탄올-바이오디젤 혼합연료의 안정성과 분무 및 미립화 특성에 대해 분석하고, 이들의 분석을 통해 대기통 디젤엔진을 이용하여 실험연료의 연소특성 및 배기 배출 특성에 대한 에탄올 연료의 영향을 명확히 규명하는 것에 목적이 있다.

2. 실험 연료

본 연구에서는 디젤과 에탄올 혼합연료의 분무 및 미립화 특성과 연소 및 배기 특성을 알아보기 위해 저유황 디젤 연료(ultra low sulfur diesel, ULSD) 및 디젤연료와 순도 99.9% 에탄올의 혼합연료 2가지를 사용하였다. 본 연구에서는 혼합 안정성과 분무 및 미립화 특성에 대해 조사하기 위해 5%의 바이오디젤을 혼합한 기존 연구¹¹⁾와 달리 디젤-에탄올 혼합연료의 상분리를 방지하고, 에탄올 연료 혼합에 따른 세탄가 감소를 보충하며, 상용디젤엔진의 운전안정성을 고려하여 부피비 10%의 바이오디젤(soybean oil methyl ester)을 혼합하였다.^{10,11)} 실험연료의 조성 및 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Fuel properties and composition ratio of test fuels

	ULSD	DE10	DE20	
Kinematic viscosity (mm ² /s, 20°C)	3.418	3.268	3.076	
Density (kg/m ³ , 20°C)	831	820	816	
Surface tension (N/m, 20°C)	0.03177	0.03036	0.02972	
Blending ratio (Vol. %)	Diesel	100	80	70
	Ethanol	0	10	20
	Biodiesel	0	10	10

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 분무 가시화 및 분무 미립화 분석장치

본 연구에서 디젤 및 디젤-에탄올 혼합연료의 분무 미립화 특성을 분석하기 위해 Fig. 1과 같은 실험장치를 구성하였다. 실험연료는 필터를 통과하며

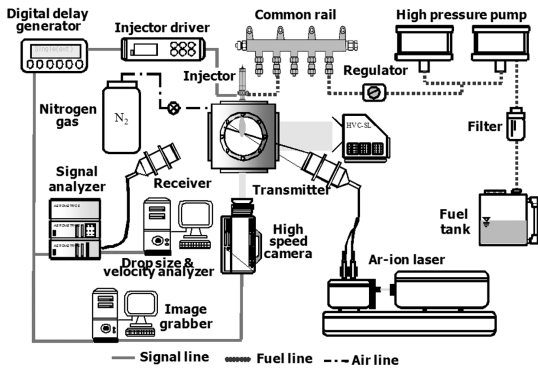


Fig. 1 Schematic of the spray visualization system and the phase Doppler particle analyzer

연료 내 포함된 불순물이 제거되었으며, 고압펌프와 커먼레일 분사시스템을 통해 인젝터로 공급되었다. 인젝터의 통전기간 등은 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H)를 이용해 조절하였다. 고압의 연료는 질소가스로 가압된 고압 체임버 내로 분사되었으며, 실험연료의 분무는 고속카메라(Photron, Fastcam-APX RS)와 메탈-할라이드 램프(Photron, HVC-SL)를 이용해 가시화 하였다. 고속 카메라의 촬영신호와 인젝터의 분사 시기는 디지털 신호 발생기(Berkeley Nucleonics Corp, Model 555)를 이용하여 동기화 하였다. 고압 체임버 안은 질소가스로 가압되었으며, 실험의 정확도를 위해 1회 분무 영상 취득 후 잔류가스 및 연료는 제거하고 실험을 반복 수행하였다.

한편, 위상 도플러 입자 분석기(phase Doppler particle analyzer, PDPA)는 최대 5W의 출력을 갖는 Ar-ion 레이저(INNOVA 70C, Coherent)를 광원으로 하고, 트랜스미터, 리시버, 신호 분석기 등으로 구성하였다. 인젝터로부터 분사되는 연료는 축 방향으로 노즐 팁으로부터 20mm 지점에서 60mm 지점까지 10mm 간격으로, 반경방향으로는 2mm 간격으로 최고 10mm 지점까지 측정하였다. PDPA 시스템은 취득하는 액적의 개수가 10,000개가 되도록 하였으며, 평균 분무 입경의 측정 유효 범위는 2~80 μ m, 레이저의 출력은 2.0W로 하였다. PDPA 시스템의 자세한 제원과 정확한 실험을 위한 설정값¹²⁾은 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서 분무 가시화 및 분무 미립화 특성 분석을 위해 이용된 인젝터는 분

Table 2 Specification and criteria for the droplet measuring system (PDPA)

Specification	Light source	Ar-ion laser
	Wave length	514.5nm, 488nm
	Focal length	500mm for transmitter and receiver
	Collection angle	30°
Criteria	Burst threshold (mV)	0.5
	Mixer frequency (MHz)	36
	Filter frequency (MHz)	40
	PMT voltage (V)	500
	Signal-to-noise ratio	65
	Diameter sub-range (μ m)	2-80

공지름이 0.3mm이고, 오리피스 깊이가 0.8mm인 단공 인젝터이다.

3.2 4기통 디젤엔진 및 배기 분석 장치

본 연구에 사용된 엔진은 4행정 직접 분사식 디젤 엔진으로 압축비 17.3, 배기량 1582cc이며, 주요 제원은 Table 3과 같다. Fig. 2는 본 연구에 이용된 4기통 디젤엔진을 비롯한 배기 분석 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험 장치는 엔진과 동력계 시스템, 엔진제어장치, 연소 해석 및 배출가스 측정 장치로 구성하였다.

또한, 본 연구에서는 ETAS사의 INCA와 EMS 장치(ETK EDC ECU)를 이용해 연료의 분사압력, 분사 시기를 제어하였다. HC, CO, NO_x와 같은 배기가스의 계측은 비 분산 적외선 방식의 배기가스 분석기

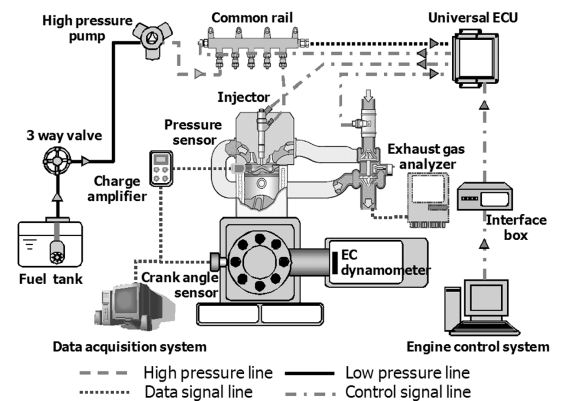


Fig. 2 Schematic of the 4-cylinder diesel engine and exhaust emissions analysis device

Table 3 Specification of 4-cylinder diesel engine

Engine type	4-stroke VGT DI diesel
Number of cylinder	4
Bore × Stroke	77.2 mm × 84.5 mm
Displacement volume	1582 cc
Fuel injection system	Bosch common rail
Valve type	DOHC 4 valves per cylinder
Compression ratio	17.3
Engine management system	Bosch EDC 16
Max. power	86 kW / 4000 rpm
Max. torque	260 Nm / 2000 rpm
Max. speed	4750 rpm

Table 4 Experimental conditions

Spray experimental condition	
Number / diameter of injector hole	1 / 0.3mm
Injection pressure	70MPa
Ambient pressure	3MPa
Ambient temperature	290K
Injection quantity	10mg
Engine experimental conditions	
Injection pressure	70MPa
Engine speed	1500 rpm
Load	30Nm
Number / diameter of nozzle hole	7 / 0.119mm
Included spray angle	153 degree
Intake pressure	1.10 MPa
Intake temperature	310±5 K
Start of energizing (° ATDC)	-3

(Horiba, MEXA-554KJNO_x)를 이용하였다. 엔진 회전 속도는 1500rpm으로 고정하였으며, 디젤 연료를 비롯한 혼합연료 두 가지를 실험연료로 사용하였다. 연료 분사압력과 엔진 부하는 70MPa과 30Nm로 일정하게 하였다. 연료 분사는 단일분사만 적용하였으며, 자세한 실험 조건은 Table 4에 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 디젤-에탄올 혼합연료의 분무 및 미립화 특성

Fig. 3은 디젤 및 디젤-에탄올 혼합연료의 분무 도달 거리를 분사압력 70MPa, 분위기압력 3MPa, 분사량 10mg에서 비교한 것이다. 분무 도달 거리는 노즐 팁으로부터 분사되는 분무의 최대 도달 지점까지의

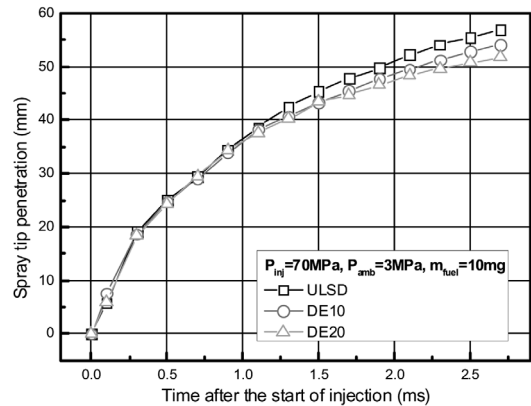


Fig. 3 Comparison of the spray tip penetration among three test fuels ($P_{inj}=70MPa$, $P_{amb}=3MPa$, $m_{fuel}=10mg$)

거리로 정의하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 실험 연료들의 분무 도달 거리는 분사 후 약 1.1ms (연료 분사 종료 시점)까지는 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 분사 기간 동안의 분무 도달 거리는 연료의 물성에 관계없이 분사압력과 분위기압력의 차이에 의해 크게 지배받는 것으로 판단할 수 있다. 한편 분사가 종료된 이후에는 연료의 밀도에 따라 디젤 연료의 분무 도달 거리가 가장 길고, 에탄올 혼합 비율에 따라 분무 도달 거리는 다소 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 연료 밀도가 낮은 에탄올의 혼합으로 인해 혼합연료의 밀도가 낮아지게 되고, 연료 액적이 가지는 운동량이 작아지기 때문이다.

Fig. 4는 세 가지 실험연료의 분무각 특성을 나타낸 것이다. 분무각은 인젝터 노즐의 형상, 분무 액체의 물성치, 주위 기체의 물성치, 분사압력 등 여러 가지 인자들에 의해 영향을 받는다.¹³⁾ 본 연구에서는 인젝터 노즐 팁과 분사된 분무의 좌우 최외곽지점이 이루는 각을 최대 분무각(θ_{max})으로 정의하였으며, 실험연료의 분포를 비교 분석하는데 활용하였다. 세 연료는 분사 초기 분무각이 급격히 감소하면서 약 0.8ms 이후에는 안정적인 값으로 수렴하며 증감을 반복하는 것으로 나타났다. 또한, 순수 디젤 연료에 비해 에탄올을 혼합한 혼합연료의 분무각이 다소 큰 것을 확인할 수 있었다. 이것은 분무각이 분사되는 액체연료의 밀도에 반비례하는 특성 때문인 것으로 판단된다.¹⁴⁾

순수 디젤 및 디젤-에탄올 혼합연료의 SMD(Sauter

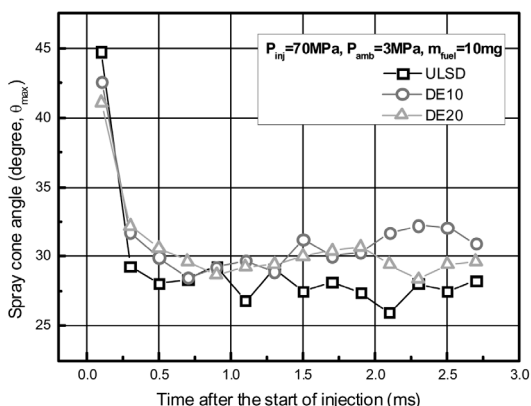
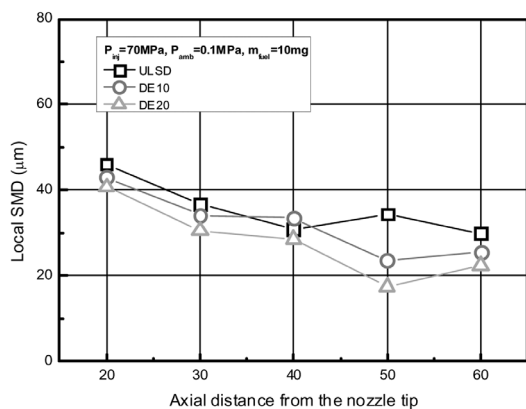
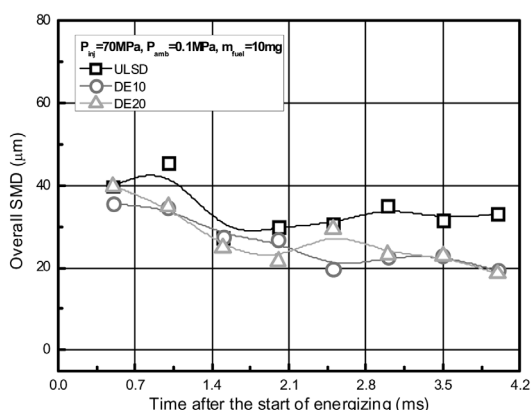


Fig. 4 Maximum spray cone angle characteristics of diesel and diesel-ethanol blended fuels ($P_{inj}=70\text{MPa}$, $P_{amb}=3\text{MPa}$, $m_{fuel}=10\text{mg}$)



(a) Local SMD



(b) Overall SMD

Fig. 5 Fuel droplet size characteristics at the specific measuring points and total measuring points of diesel and diesel-ethanol blended fuels ($P_{inj}=70\text{MPa}$, $P_{amb}=0.1\text{MPa}$, $m_{fuel}=10\text{mg}$)

mean diameter) 특성을 Fig. 5(a)에 나타냈다. SMD는 열 및 물질전달과 관련하여 가장 많이 쓰이는 값으로써, 액적군의 총 체적에 대한 총 표면적의 역수에 비례하며, 분사된 액체가 주위 기체와 표면을 통해 접촉하기 위한 미립화의 정도를 보여주는 유용한 척도이다.¹³⁾ Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이, 노즐 팁에서 멀어질수록 SMD는 감소하는 경향을 나타냈으며, 분무 하류로 갈수록 에탄올 혼합연료는 디젤 연료보다 작은 SMD값을 가졌다. 이것은 에탄올 혼합연료의 표면장력과 동점성계수가 낮아졌기 때문이다. 또한, 분무 하류로 갈수록 전체 SMD가 낮아지는 이유는 주변 공기와의 접촉으로 미립화가 촉진되었기 때문이며, 약간의 증감은 액적 간 충돌 및 흡착 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5(b)는 실험연료의 분무 영역 전체에서 동일한 시간에 측정되는 연료 액적의 크기를 평균한 값을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서와 마찬가지로 디젤 연료는 다른 혼합연료에 비해 다소 높은 SMD를 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3 ~ Fig. 5의 분무 및 미립화 특성에 관한 결과로부터 에탄올 연료를 10%에서 20% 사이로 혼합했을 경우 디젤-에탄올 혼합연료는 연소실 내에서 미립화가 잘 되고, 분무 도달 거리가 짧아지고, 분무 각이 커져 넓게 골고루 분포될 것으로 판단된다.

4.2 디젤-에탄올 혼합연료의 연소 및 배기 특성

Fig. 6은 엔진 회전 속도 1500rpm, 분사압력 70MPa, 엔진 부하 30Nm, BTDC(before top dead center) 3°의 분사시기에서 디젤 및 디젤-에탄올 혼합연료의 연소 압력 및 열 발생을 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 에탄올 혼합 비율이 증가함에 따라 착화시점은 지각되는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 에탄올의 낮은 세탄가로 인해 혼합연료의 세탄가가 낮아졌기 때문이다. 특히, 부피비 20%의 에탄올을 혼합했을 경우 착화시점의 지연으로 연소 압력과 열 발생율이 매우 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 에탄올 혼합으로 인해 늦어진 착화시점에서 연소실 내의 압력과 온도가 매우 낮아 착화가 잘 일어나지 않았기 때문으로 판단된다. 또한, 높은 증발 잠열을 갖는 에탄올이 증발하면서 연소실 내의 온도를 낮추는 것도 원인이 된다.

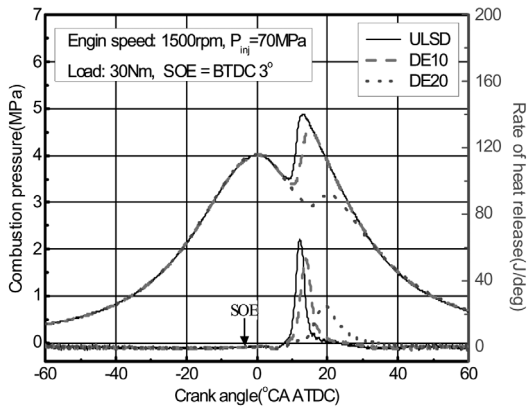
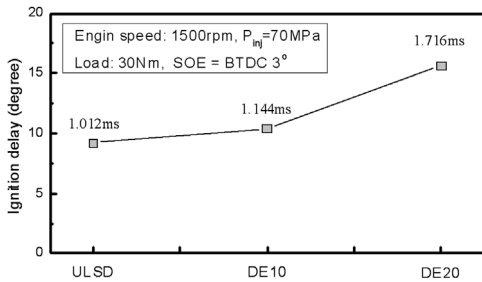
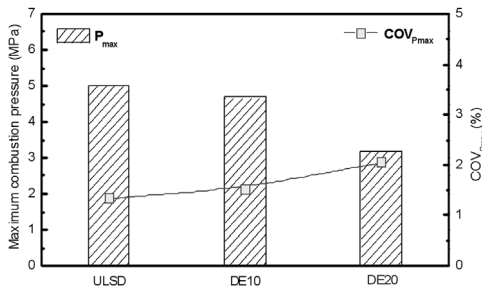


Fig. 6 Combustion and rate of heat release characteristics of three test fuels at the injection timing of BTDC 3°

착화 지연기간, 최고 연소 압력, 최고 연소 압력 변동률과 같은 실험연료의 정량적인 연소 특성은 Fig. 7에 나타내었다. 본 연구에서 착화 지연 기간은 인젝터에 통전 신호가 들어가는 시간과 열 발생률 값이 나타나는 시간 사이의 차이기간으로 정의하였다. 그림에서 보는 바와 같이 에탄올 혼합비율의 증



(a) Ignition delay



(b) P_{max} and COV_{Pmax}

Fig. 7 Ignition delay, maximum combustion pressure (P_{max}), and coefficient of variation of P_{max} characteristics in three test fuels

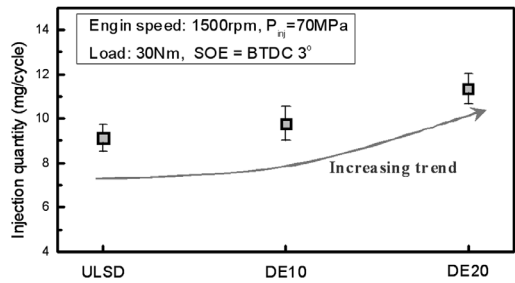


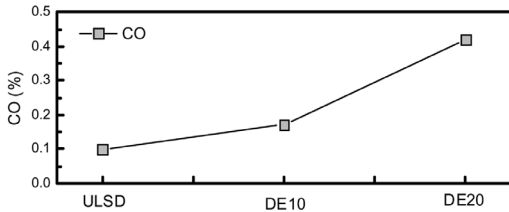
Fig. 8 Injection quantity characteristics according to the ethanol blending ratio at the same engine load

가와 함께 착화 지연기간 또한 증가하였으며, ULSD 과 DE10 사이의 차이보다 DE10과 DE20의 차이가 확실히 큰 것을 확인할 수 있다. 한편, 연소실 내 최고 연소 압력은 점차 낮아졌으며, 이와 함께 최고 연소 압력의 변동률은 증가하였다. 이것은 에탄올 혼합 비율이 증가함에 따라 착화가 불안정하며, 에탄올 혼합 및 증발로 인해 착화가 잘 일어나지 않았기 때문으로 판단된다. 이러한 결과는 배기 특성에도 영향을 주어 CO 및 HC 배출의 증가를 가져온다.

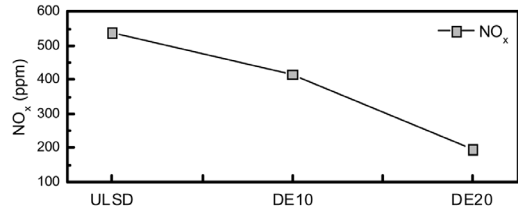
Fig. 8은 동일 엔진 부하를 유지하기 위해 세 가지의 실험 연료의 분사량을 나타낸 것이다. 각각의 조건에서 변동은 있지만, 전체 평균값은 에탄올 혼합 비율이 증가함에 따라 분사량 또한 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 에탄올 혼합연료의 저위 발열량(LHV, lower heating value)이 낮아 동일한 엔진 부하를 나타내기 위해서는 더 많은 연료를 분사해야 하기 때문인 것으로 판단된다.

에탄올 연료 혼합에 따른 CO 및 HC의 배출특성을 Fig. 9에 나타냈다. CO는 연소실 내 농후한 영역에서 주로 발생하며, 연료 내 탄소가 이산화탄소로 변환될 때 산소가 불충분할 경우 주로 발생하게 된다.¹⁵⁾ 혹은 연소실 내의 온도가 낮아 CO의 산화율이 낮은 경우에도 CO의 발생은 증가한다. 한편, HC는 연소실 내 희박 영역에서의 산소 불충분, 연소실 벽면 젖음 (wall wetting), 인젝터 sac volume 내 잔류 연료 등에 의해 주로 생성된다.¹⁶⁾

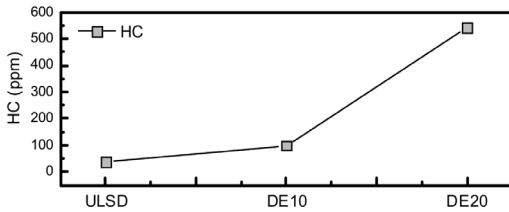
Fig. 9에서 보는 바와 같이 에탄올 혼합 비율의 증가로 인해 CO 및 HC는 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 에탄올 혼합비율이 20%일 경우, CO와 HC의 배출은 급격히 증가하는 것을 확인할



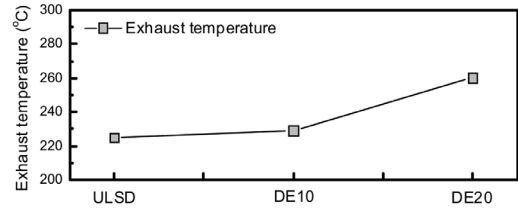
(a) CO emission



(a) NOx emission



(b) HC emission



(b) Exhaust gas temperature

Fig. 9 Effect of the ethanol blending ratio on CO and HC emissions characteristics ($P_{inj}=70\text{MPa}$, $m_{fuel}=10\text{mg}$, Load= 30Nm, SOE=BTDC 3°)

Fig. 10 Effect of the ethanol blending ratio on NO_x emission and exhaust temperature ($P_{inj}=70\text{MPa}$, $m_{fuel}=10\text{mg}$, Load= 30Nm, SOE=BTDC 3°)

수 있다. 이것은 혼합된 에탄올의 증발과정에서 연소실 온도를 낮추어 CO의 산화율이 낮아져 CO의 배출이 증가한 것으로 판단할 수 있다. 특히, CO의 배출은 엔진 부하에 크게 좌우되며, Lu¹⁷⁾ 등의 연구 결과에 따르면 저부하의 운전조건에서 에탄올의 혼합비율이 증가함에 따라 CO의 배출량도 증가하는 것으로 나타났으며, 본 연구가 저부하 운전조건임을 고려했을 때 일치하는 연구결과임을 확인할 수 있었다. 또한, 착화지연기간이 길어지게 되어, 이 기간 동안 인젝터로부터 분사된 연료의 피스톤 벽면 젖음 현상과 팽창과정 중 연소 진행으로 인해 미처 연소되지 못한 연료들의 배출로 인해 HC가 급격히 증가하였다.

Fig. 10은 질소산화물과 배기온도에 대해 나타내고 있다. 질소산화물은 주로 NO와 NO₂로 구성되며, 온도, 국부적 산소 농도, 혼합기의 연소실 내 잔류시간, 화염 전파 속도 등에 주로 영향을 받는다.¹⁶⁾ 특히, 화염 전파 속도는 혼합기의 밀도에 반비례하고, 화염 전파 속도는 질소산화물의 생성과 비례 관계에 있다.¹⁸⁾ 따라서 에탄올 혼합연료의 경우 화염 전파 속도의 증가로 인해 디젤보다 많은 양의 질소산화물이 배출될 것으로 예상되었으나, 연료 밀도의 차이가 크지 않아 화염 전파 속도의 차이에 의한 영향은 미미하며, 혼합된 에탄올의 증발로 인한 연소

실 내 온도의 저하가 질소산화물 배출 저하에 영향을 준 것으로 판단된다. 이러한 에탄올 혼합비율의 증가에 따른 질소산화물 배출의 저감특성은 Lu¹⁷⁾ 등과 Rakopoulos¹⁹⁾ 등의 연구결과와도 일치하는 결과이다. DE20의 경우에는 Fig. 6에서도 살펴본 바와 같이 연소가 잘 일어나지 않은 이유로 질소산화물의 배출이 낮게 나타난 것으로 판단할 수 있다. 이것은 HC와 CO의 배출량 증가와 같은 이유이다. 한편, 배기가스의 온도를 나타내는 Fig. 10(b)의 결과에서 에탄올의 혼합비율이 증가함에 따라 배기가스의 온도 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 에탄올 혼합비의 증가로 인해 착화지연기간이 길어지게 되어 팽창과정 후반부까지 연소가 이어져 배기가스의 온도가 증가한 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 디젤연료에 에탄올의 혼합비를 다르게 하여 분무-미립화 특성을 분석하고, 4기통 디젤엔진에서 연소 및 배기 특성을 조사하여 비교 분석하였다. 실험결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 순수 디젤 및 디젤-에탄올 혼합연료의 분무 특성에서 분사기간 동안의 분무 도달 거리는 거의 비슷하였으나, 분사가 끝난 후에는 밀도 차이에 의

한 운동량 차이로 인해 에탄올 혼합비율이 높은 혼합연료의 분무 도달 거리는 감소하는 경향을 나타냈다. 또한, 분무각은 주위 공기와의 활발한 혼합으로 인해 다소 커지는 경향을 나타냈다.

- 2) 디젤 연료에 에탄올을 혼합하였을 경우 에탄올의 낮은 표면장력과 동점성 계수로 인해 액적의 크기는 작아지는 경향을 나타냈다.
- 3) 에탄올 혼합연료는 연료의 세탄가를 낮추어 착화지연기간을 길게 하였으며, 20%까지 혼합하였을 경우 착화가 어려워 연소실 내 연소압력 및 열발생율이 매우 낮아지고, 최고 연소압력의 변동률이 증가하였다.
- 4) CO와 HC는 에탄올 10%를 혼합했을 때 큰 차이가 없었으나, 20% 혼합시에는 연소 불안정 등으로 인해 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, NO_x는 급격히 감소하고, 배기가스 온도의 증가로 연소가 잘 일어나지 않았음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 인력 양성사업과 환경부 Eco-STAR project (무·저공해 자동차 사업단), 2단계 두뇌한국21 사업의 지원으로 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

References

- 1) M. Zheng, M. C. Mulenga, G. T. Reader, M. Wang, D. S.-K. Ting, and K. Tjong, "Biodiesel Engine Performance and Emissions in Low Temperature Combustion," *Fuel*, Vol.87, pp.714-722, 2008.
- 2) J. Zhang, X. Qiao, Z. Wang and B. Guan, "Experimental Investigation of Low-Temperature Combustion(LTC) in an Engine Fueled with Dimethyl Ether(DME)," *Energy&Fuels*, Vol.23, No.1, pp.170-174, 2009.
- 3) X. Lu, Z. Huang, W. Zhang and D. Li, "Combustion Visualization and Emissions of a Direct Injection Compression Ignition Engine Fueled with Bio-diesohol," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.6, No.1, pp.15-21, 2005.
- 4) B. Y. Xu, Y. L. Qi, W. B. Zhang and S. L. Cai, "Fuel Properties and Emissions Characteristics of Ethanol-diesel Blend on Small Diesel Engine," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.8, No.1, pp.9-18, 2007.
- 5) A. Mohammadi, S. Kee, T. Ishiyama, T. Kakuta and T. Matsumoto, "Implementation of Ethanol Diesel Blend Fuels in PCCI Combustion," *SAE 2005-01-3712*, 2005.
- 6) N. Marek and J. Evanoff, "Pre-commercialization of E-diesel Fuels in Off-road Applications," *Proceeding of A&WMA 2002 Annual Conference*, Paper No.42740, 2002.
- 7) S. H. Park, S. H. Yoon, H. K. Suh and C. S. Lee, "Effect of the Temperature Variation on Properties of Biodiesel and Biodiesel-ethanol Blends Fuels," *Oil&Gas Science and Technology*, Vol.63, No.6, pp.737-745, 2008.
- 8) D. Li, H. Zhen, X. Lu, W. Zhang and J. Yang, "Physico-chemical Properties of Ethanol-diesel Blend Fuel and Its Effect on Performance and Emissions of Diesel Engine," *Renewable Energy*, Vol.30, pp.967-976, 2005.
- 9) M. Lapuerta, O. Armas and R. Garcia-Contreras, "Stability of Diesel-bioethanol Blends for Use in Diesel Engines," *Fuel*, Vol.86, pp.1351-1357, 2007.
- 10) P. Kwanchareon, A. Lyengnaruemitchai and S. Jai-In, "Solubility of a Diesel-biodiesel-ethanol Blend, Its Fuel Properties, and Its Emission Characteristics from Diesel Engine," *Fuel*, Vol.86, pp.1053-1061, 2007.
- 11) S. H. Park, S. H. Kim and C. S. Lee, "Mixing Stability and Spray Behavior Characteristics of Diesel-ethanol-methyl Ester Blended Fuels in a Common Rail Diesel Injection System," *Energy & Fuels*, Vol.23, pp.5228-5235, 2009.
- 12) L. Araneo, V. Soare, R. Payri and J. Shakal, "Setting up a PDPA System for Measurement in a Diesel Spray," *Journal of Physics, Conference Series* 45, pp.85-93, 2006.
- 13) A. H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*, Taylor & Francis, USA, 1989.
- 14) H. Hiroyasu, "Experimental and Theoretical

- Studies on the Structure of Fuel Sprays in Diesel Engine,” Proceeding of 5th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, pp.17-31, 1991.
- 15) C. R. Ferguson and A. T. Kirkpatrick, Internal Combustion Engines - Applied Thermosciences, 2nd Edn, John Wiley&Sons, Inc., New York, 2001.
 - 16) E. Sher, Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines - Pollutant Formation and Control, Academic Press, San Diego, 1998.
 - 17) X. Lu, Z. Huang, W. Zhang, and D. Li, “The Influence of Ethanol Additives on the Performance and Combustion Characteristics of Diesel Engine,” Combustion Science and Technology, Vol.176, pp.1309-1329, 2004.
 - 18) S. R. Turns, An Introduction to Combustion - Concepts and Applications, 2nd Edn, McGraw-Hill, New York, 2000.
 - 19) D. C. Rakopoulos, C. D. Rakopoulos, E. C. Kakaras and E. G. Giakoumis, “Effects of Ethanol-diesel Fuel Blends on the Performance and Exhaust Emissions of Heavy Duty DI Diesel Engine,” Energy Conversion and Management, Vol.49, pp.3155-3162, 2008.