디젤-가솔린 혼합연료의 혼합안정성 및 거시적인 분무 특성에 관한 실험적 연구

박세원* · 박수한* · 박성욱** · 전문수*** · 이창식†, **

Experimental Study on Mixing Stability and Macroscopic Spray Characteristics of Diesel-gasoline Blended Fuels

Sewon Park, Su Han Park, Sungwook Park, Mun Soo Chon and Chang Sik Lee

Key Words: Spray Tip Penetration(분무도달거리), Spray cone angle(분무각), Fuel properties(연료 물성치), Kinematic viscosity(동점도), Spray behavior(분무거동)

Abstract

The study is to investigate the mixing stability, fuel properties, and macroscopic spray characteristics of diesel-gasoline blended fuels in a common-rail injection system of a diesel engine. The test fuels were mixed diesel with gasoline fuel, which were based volume fraction of gasoline from 0 to 100% in 20% intervals. In order to analyze the blended effect of gasoline to diesel fuel, the properties of test fuels such as density, viscosity, and surface tension were measured. In addition, the spray behavior characteristics were studied by investigating the spray tip penetration and spray angle using a spray images through a spray visualization system. It was revealed that the density, kinematic viscosity and surface tension of diesel-gasoline blending fuels were decreased with the increase of gasoline fuel. The injection quantity of test fuels were almost similar level at short energizing duration condition. On the other hand, the increase of energizing duration shows the decrease of injection quantity compared to short energizing duration. The test blending fuels have similar growth in Spray tip penetration and Spray cone angle.

1. 서 론

화석연료의 고갈과 환경오염을 방지하기 위하여 자동차로부터 배출가스에 대한 환경규제는 점차 강화되고 있다. 이에 대응하기 위하여 디젤엔진의 이산화탄소 배출 저감 및 연비 성능향상을 위한 연구가 활발하게 연구되고 있다. 디젤엔진은 가솔린엔진 보다 높은 압축비

로 작동되어 열효율이 높고 출력성능이 우수한 장점이 있다.

디젤엔진은 이산화탄소 (CO_2) 및 미연탄화수소의 배출량이 적은 반면 입자상 물질(particulate matter, PM) 및 질소산화물(nitrogen oxides, NO_x)이 많이 배출되어 대기 오염의 주된 원인이 되고 있다^(1,2). 디젤엔진의 성능을 향상시키기 위하여 연료분사 시스템에 전자제어식 고압 분사시스템이 도입되면서 분사량 및 분사시기의 정밀제어가 가능해졌다. 이러한 기술 발달로 디젤엔진에서는 고압분사 및 작은 분사공을 사용함으로써 연료 미립화의 향상을 통한 양질의 혼합기 형성과 이에 따른 입자상 물질, 배출가스 저감에 기여하게 되었다. 뿐만 아니라, 디젤엔진 연구에서는 매연저감장치를 디젤산화 촉매와 함께 사용하여 고부하 영역에서 배출되는 매연

(2012년 4월 17일 접수 ~ 2012년 5월 25일 심사완료, 2012년 9월 22일 게재확정)

*한양대학교 대학원 기계공학과

**한양대학교 기계공학부

***한국교통대학교 에너지시스템공학과

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : cslee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-5286

을 가솔린 엔진의 수준으로 낮출 수 있으며^(3,4) 배기가스 재순환장치(exhaust gas recirculation, EGR)를 이용해 연소실 내로 유입되는 산소 농도의 저감을 통한 연소 온도 저하로 연소 시 발생하는 NO_x를 저감할 수 있는 기술이 개발되고 있다^(5,6). 그러나 이러한 후처리 기술은 연소효율 및 출력 감소 등에 영향을 미치는 문제점이 제기되고 있다. 따라서 최근 연료의 물성변화 및 연소상(combustion phase) 제어를 통해 배기가스를 저감하고자 하는 선행연구가 진행되고 있다. 이에 따라 신 연소기법인 예혼합 압축착화 및 부분 예혼합 압축착화 등을 압축착화 연소에 적용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다^(7,8). 그 중에서 세탄가가 순수 디젤연료보다 비교적 낮은 가솔린 연료를 디젤연료에 혼합하여 착화 지연시간 확장에 의한 저온연소 효과를 통해 NO_x와 PM의 배출을 동시 저감하고자 하는 연구도 활발히 진행 중이다⁽⁹⁻¹¹⁾. 그러나 연소기법에 관한 많은 연구에 비해 디젤-가솔린 혼합연료의 혼합 안정성 및 연료 물성에 따른 분무특성에 관한 실험적 연구는 아직 충분히 이루어져 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 디젤-가솔린 혼합연료의 가솔린 혼합비(20%, 40%, 60%, 80%)에 따른 혼합연료의 안정성과 연료 물성치(점도, 밀도, 표면장력)를 측정·분석하고, 고압분사 조건에서 분무 도달 거리 및 분무각과 같은 거시적인 분무특성을 측정하여 비교 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험에서는 디젤-가솔린 혼합연료의 거시적 분무

Fig. 1 Schematic of the visualization system

특성(분무도달거리, 분무각)을 분석하기 위하여 Fig. 1과 같은 고압분사장치 및 분무가시화장치, 분무 영상 취득·분석 장치를 이용하였다.

Fig. 1에서 점선은 분무 제어를 위한 신호라인이며, 실선은 연료공급라인, 1점 쇄선은 질소기체의 공급라인을 각각 나타낸다. 디젤-가솔린 혼합연료는 병렬로 연결된 2개의 고압펌프(Haskel, HSF-300)를 이용하여 연료 필터와 커먼레일을 통해 솔레노이드 방식으로 구동되는 단공 인젝터(분공직경 0.3 mm)에 공급하였다. 인젝터는 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H)를 사용하여 분사 기간 및 통전기간을 제어하였다. 분무 거동 형상 분석을 위해 고속 카메라(Photron, Fastcam-APX RS)와 2개의 메탈 할라이드 램프(Photron, HVC-SL, 150W)를 이용하여 분무 거동 영상을 취득하였다. 디지털 신호발생기(Berkeley Nucleonics Corp, Model 575)를 이용하여 인젝터 드라이버의 분사 신호와 고속 카메라의 영상 신호를 동기화 하여 분무 영상을 취득하였으며, 취득된 분무 영상은 영상 분석 프로그램(PFV_330)을 통해 분석하였다. 분위기 압력의 조절을 위해 최대 4 MPa까지 가압할 수 있는 정적 챔버를 이용하였으며, 불활성 기체인 질소가스를 이용해 분위기 압력을 조절하였다.

분사율 측정은 BOSCH법⁽¹²⁾을 이용하였으며 관내 압력변화를 측정하기 위해 최대 20 MPa까지 측정할 수 있는 압력센서(KISTLER, 601A)를 사용하였으며, DAQ보드(National Instrument, NI 6013)를 통해 압력 및 전류 신호를 취득하여 Labview 프로그램을 이용하여 분석하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 디젤-가솔린 혼합연료의 거시적 분무특성을 관찰하기 전에 실험연료의 혼합안정성과 물성에 관한 실험적 연구를 선행하였다. 혼합안정성은 디젤 및 가솔린 연료의 혼합비율과 저장 조건에 따라 두 연료상(phase)의 분리 유무로 판단하였다. 디젤-가솔린 혼합연료의 점도는 회전식 다이얼 점도계(Brookfield, LVT)와 저점도 측정용 어댑터(UL adapter, Brookfield, ULA-36)를 이용하여 측정하였으며, 실험연료의 질량과 부력을 이용하여 비중을 측정하였다. 표면장력은 표면장력계(Ito, 514-B2)를 사용하여 측정할 수 있었다. 가솔린 혼합비율에 따른 거시적인 분무특성(분무도달거리, 분무각)을 비교분석하기 위하여 분무 가시화 장치를 이용하여 분무 영상을 취득하였다. 체적 비율 변화에 따른 디젤-가솔린 혼합연료의 혼합비율은 Table 1에 나타내었으며, 분사압

Table 1 Test Fuels

	Diesel	Gasoline
G0	100%	0%
G20	80%	20%
G40	60%	40%
G60	40%	60%
G80	20%	80%
G100*	0%	100%

*Lubrizol 1%를 첨가

Table 2 Experimental conditions

Injection system	Common-rail
Test injector	Single hole with 0.3 mm hole diameter
Injection pressure(P_{inj})	80 MPa
Ambient pressure(P_{amb})	3 MPa
Energizing duration(t_{eng})	0.7 ms, 1.3 ms
Fuel temperature	15~25°C

력과 분위기압력은 각각 80 MPa, 3 MPa로 고정하였다. 통전기간은 0.7 ms, 1.3 ms로 나누어 비교 실험하였다. 정확한 분무 거동 영상을 취득하기 위해 영상 취득 전 체임버 내 잔류가스는 완전히 제거한 후 반복실험을 수행하였다. 자세한 실험 조건은 Table 2에 나타내었다.

취득된 분무 영상은 MATLAB 기반으로 작성된 분무 영상 분석 프로그램에 의해 계산하여 실험결과와 객관성을 유지할 수 있도록 하였다. 분무 영상프로그램은 영상 후처리 기법을 기반으로 하였으며, 취득한 이미지는 필터링 과정을 통해 취득하도록 하였다. 프로그램에서 분무도달거리는 노즐 팁에서부터 분무 선단에 도달하는 최대거리로 정의하였고, 분무각은 분사된 연료의 중심축에서 반경방향으로 가장 멀리 떨어져 있는 두 지점과 노즐팁이 이루는 사잇각으로 정의하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 디젤-가솔린 혼합연료의 혼합 안정성 및 물리적 특성

Fig. 2은 가솔린 혼합비율에 따른 상분리 변화를 관찰하여 그 상태를 나타낸 사진이다. 연료의 혼합 안정성은

(a) Closed cap condition

(b) Open cap condition

Fig. 2 Comparison of the phase separation of diesel-gasoline blended fuels

혼합연료의 저장 조건(공기와의 접촉유무) 및 가솔린 혼합비율, 저장 시간의 경과에 따라 혼합연료의 상분리(phase separation) 유무를 관찰하였다. 그림에서 보는 바와 같이 다양한 실험 조건의 변화에도 불구하고 디젤-가솔린 혼합연료는 상분리 없이 안정적으로 저장되고 있음을 관찰할 수 있었다. 이 실험결과를 바탕으로 디젤-가솔린 혼합연료는 연료 첨가제의 추가 사용없이 안정성을 확보할 수 있으며, 본 실험에 사용하기 적합한 것

(a) Density and dynamic viscosity

(b) Surface tension

Fig. 3 Fuel properties of diesel-gasoline blended fuels according to the gasoline blending ratio at atmospheric condition

으로 판단하였다.

Fig. 3는 디젤-가솔린 혼합연료의 밀도, 점도, 및 표면장력을 단일연료 및 가솔린 혼합비율에 따라 비교 분석한 것이다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 가솔린 혼합비율이 증가함에 따라 혼합 연료의 밀도는 선형적으로 감소하였으며, 가솔린 혼합비율이 20%씩 증가할 때 마다 혼합연료의 밀도는 평균 2.96%씩 감소하였다. 이것은 두 연료의 혼합 시 혼합연료의 밀도는 $\rho_{\text{mix}} = A\rho_a + B\rho_b$ (A와 B는 a, b 각 연료의 혼합 비율, ρ_a , ρ_b 는 a, b 연료의 밀도)에 따라 변하기 때문이다⁽¹³⁾.

한편, 혼합연료의 점도는 가솔린 혼합비율이 증가함에 따라 지수함수적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 순수 디젤연료에 가솔린 연료가 소량 혼합되었을 때는 점도의 낙폭이 약 33%로 컸으나, 가솔린 혼합비율이 증가함에 따라 점도의 감소폭도 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 가솔린 혼합에 따른 점도의 평균 감소율은

Fig. 4 Injection quantity characteristic of diesel-gasoline blended fuels for variation of gasoline blending ratio

약 27%였다. Fig. 3(b)는 가솔린 혼합비율에 따른 표면장력의 값을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 표면장력은 가솔린 혼합비율 변화에 따라 평균 5.85%의 감소율이 나타났다. 이와 같은 물성특성에 관한 실험으로부터 가솔린 연료의 혼합비율이 증가함에 따라 연료의 밀도와 표면장력은 선형적으로 감소하고, 점도는 지수 함수적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 디젤-가솔린 혼합비율에 따른 분사량 특성

Fig. 4는 디젤-가솔린 혼합연료에서 20%씩의 가솔린 체적비를 변화에 따른 분사유량 특성을 나타낸 것이다. 분사압력과 분위기압력은 각각 80 MPa, 0.1 MPa이며 3000회씩 2회 분사하여 평균값을 이용하였다. 통전기간 0.7 ms에서 1.5 ms까지 증가한 경우 가솔린 혼합비율에 따라서 점차 분사유량이 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 통전기간이 늘어남에 따라 분사유량 역시 선형적으로 증가하였다. 또한, 통전기간이 짧은 0.7 ms에서는 가솔린 혼합비율에 따른 분사유량의 차이가 크지 않았으나 통전기간이 점차 증가함에 따라 가솔린 혼합비율에 따른 분사유량의 차이가 크게 나타났다. 가솔린 혼합비율에 따른 분사유량의 감소는 연료 물성치 특성과 동일하게 가솔린 혼합비율에 따라서 밀도가 감소하였기 때문이며, 낮은 통전기간 일수록 분사유량이 적은 이유는 연료 분사시 인젝터 니들이 열리는 시간이 짧아 연료의 유량차이가 미비하기 때문에 혼합비율에 따라 연료유량의 차이가 낮음을 알 수 있었다.

3.3 디젤-가솔린 혼합비율에 따른 분사율 특성

Fig. 5(a), (b)는 Bosch법을 이용하여 제작한 분사율 측정 장치에서 압력 3 MPa의 관속에 분사 압력 $P_{inj}=80$ MPa의 압력으로 분사하였을 경우 분사율 곡선을 나타낸 것이다. 이 경우 통전기간은 $t_{eng}=0.7$ ms, 1.3 ms이고 가솔린 혼합비율을 6가지로 변화시켜 실험하였다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 분사 후 시간 0.77 ms에서 단일연료(디젤, 가솔린) 최대 분사율의 차이가 18.31% 나타났으며, 가솔린 혼합비율 G20과 G80의 차이에서는 12.27%의 최대 분사율 차이가 나타났다. Fig. 5(b)에서는 단일연료(디젤, 가솔린)의 최대 분사율의 차이가 24.45% 나타났으며, 가솔린 혼합비율(G20, G80)에 따른 최대 분사율의 차이가 14.91%로 나타났다. 분사 지연 시간(injection delay)은 통전기간의 변화($t_{eng}=0.7$ ms, 1.3 ms)에 따라 디젤연료에서 가장 길게 나타났으며, 실제 분사시간 또한 디젤연료에서 가장 긴 것으로 나타났다.

Fig. 5 Injection rate profile of diesel-gasoline blended fuels at the various gasoline blending ratio

분사량 특성과 동일하게 분사율 특성에서도 점성계수의 영향보다 밀도의 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 가솔린 혼합비율에 따른 최대 분사율의 크기는 통전기간 ($t_{eng}=0.7$ ms)에서 (G20: 28.42 mg/ms, G40: 27.13 mg/ms, G60: 26.22 mg/ms, G80: 24.93 mg/ms)으로 평균 4.16%, 감소하였으며, 가솔린의 혼합비율이 디젤연료보다 분사 지연 시간이 더 빨리 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 디젤-가솔린 혼합비율에 따른 분무도달거리

Fig. 6은 분사 시작 후 시간의 변화에 따른 분무도달거리를 분석하였다. 인젝터 분사공이 열린 후 짧은 시간 ($t_{eng}=0.5$ ms) 내에서도 높은 분사압력 및 연료물성(밀도, 점도)의 영향으로 가솔린 혼합비율에 따른 분무도달거리가 짧게 나타났다. 또한, 단일연료(디젤, 가솔린) 및 가솔린 혼합비율의 변화에 따른 분사 후 시간($t_{eng}=0.7$ ms, $t_{eng}=1.5$ ms)의 2.6%의 분무도달거리의 차이를 나타냈다. 이는 충분히 개방된 밸브시간을 통해 가솔린의 낮은 연료 물성(밀도, 점도)의 영향으로 판단되며, 높은 분사압력을 통해 가솔린의 증발특성이 활발해져 단일연료와 차이가 더 크게 나타난 것으로 판단된다^(14,15).

3.5 가솔린 혼합비율에 따른 분무 거동특성

Fig. 7은 가솔린 혼합비에 따른 분무 거동 이미지를 고속카메라를 통해 취득하였다. 가솔린 혼합비에 따른 분무거동 (분무도달거리, 분무각, 분무면적)의 큰 편차를 예상하였으나 가솔린 혼합비율에 따른 분무발달형태의 차이가 혼합비율에 큰 영향을 받지 않으며 순수디젤과 동일한 분무거동 이미지를 얻을 수 있었다.

Fig. 6 Spray tip penetration characteristics of diesel-gasoline fuel for after start of injection

Condition	$P_{inj}=80\text{MPa}$, $P_{amb}=3\text{MPa}$	
t_{asoe}	0.7ms	1.3
G0
G20
G40

Fig. 7 Spray development processing images compare with gasoline blending ratio. ($P_{inj}=80\text{ MPa}$, $P_{amb}=3\text{ MPa}$, $t_{asoe}=0.7\text{ ms}$, 1.3 ms)

3.6 가솔린 혼합비율에 따른 분무각

Fig. 8(a), (b)는 통전시간($t_{eng}=1.3\text{ ms}$)을 동일시 하고 분사 후 시간($t_{asoi}=0.7\text{ ms}$, 1.0 ms)의 변화에 따라 MATLAB 기반으로 작성된 분무 영상 분석 프로그램을 사용하여 분사 된 액적의 최 외곽 지점을 흑과 백으로 구분하여 실제 영상과 가장 유사한 영상을 필터링 과정 (Gaussian_Threshold Factor)을 통해 분무각을 취득하도록 하였다. 단일연료(디젤, 가솔린)와 가솔린 혼합비율의 분무각 차이가 크지 않았으며, 분사 후 시간($t_{asoi}=1.0\text{ ms}$)의 변화에서도 분무각의 차이가 미미한 것으로 나타났다. 이는 높은 분위기 압력으로 인해 시험연료간의 분무거동이 유사하여 분무각의 차이가 크게 나타나지 않는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 디젤-가솔린의 혼합연료에서 가솔린 혼합비율에 따른 거시적인 분무특성(분무도달거리, 분무각, 분무면적)을 실험적으로 규명하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 디젤-가솔린 혼합연료에서 공기 접촉 유무 및 시간

Fig. 8 Maximum spray cone angle characteristics of diesel-gasoline blended fuels according to gasoline blending ratio. The spray cone angle was calculated of imaging processing program

경과에 따른 혼합 안정성과 상변화 특성을 관찰해 본 결과 상 분리 현상이 발생하지 않아 디젤-가솔린 혼합연료의 안정성을 확인 할 수 있었다.

- 2) 가솔린 혼합비율이 높아질수록 연료 물성치(밀도, 점도, 표면장력)가 선형적으로 낮아지는 경향을 나타내었다.

- 3) 디젤-가솔린 혼합연료의 분무도달거리는 인젝터 통전시간이 증가함에 따라 특성을 연료 유량은 증가하며, 인젝터 니들이 충분히 개방된 $t_{eng}=0.7\text{ ms}$ 로부터 분무도달거리의 차이가 증가 하였다.

- 4) 높은 분사압력으로 인해 시험연료간의 물성변화에 따른 영향이 크게 미치지 않아 분무각의 차이가 크지 않게 나타났다.

후 기

본 연구는 2단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업의 지원으로 수행되었으며, 2011년도 한국연구재단의 지원으로 수행된 연구 (2011-0025295)로서 연구를 지원해주신 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) H. L. MacLean, L. B. Lave, R. Lankey and S. Joshi, "A Life-cycle Comparison of Alternative Automobile Fuels", Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 50, No. 10, pp.1769~1779, 2000.
- (2) T. V. Johnson, "Diesel Emission Control in Review", Journal of SAE technical paper, SAE2007-01-0233, 2007.
- (3) B. Scarnegie, W. R. Miller, B. Ballmert, W. Doelling and S. Fischer, "Recent DPF/SCR Results Targeting US2007 and Euro 4/5 HD Emissions", SAE technical paper, SAE2003-01-0774, 2003.
- (4) Y. He, D. B. Brown, S. Lu, J. Paratore and J. Li, "Opportunities and Challenges for Blended 2-Way SCR/DPF After-treatment Technologies", SAE technical paper, SAE2009-01-0274 2009.
- (5) M. Alriksson and I. Denbratt, "Low Temperature Combustion in a Heavy Duty Diesel Engine Using High Levels of EGR", SAE technical paper, SAE2006-01-0075 2006.
- (6) C. Noehre, M. Andersson, B. Johansson and A. Hultqvist, "Characterization of Partially Premixed Combustion", SAE technical paper, SAE2006-01-3412.
- (7) L. Pesant, L. Forti and N. Jeuland, "Effect of Fuel Characteristics on the Performances and Emissions of an Early-injection LTC/Diesel Engine", SAE technical paper, SAE2008-01-2408 2008.
- (8) P. Anselmi, J. Kashdan, G. Bression, E. F-Lesur, B. Thirouard and B. Walter, "Improving Emissions, Noise and Fuel Economy Trade-Off by using Multiple Injection Strategies in Diesel Low Temperature Combustion (LTC) Mode", SAE2010-01-2162 2010.
- (9) A. Weall and N. Collings, "Investigation into partially premixed combustion in a Light-Duty Multi-Cylinder Diesel Engine Fuelled with a Mixture of gasoline and Diesel", SAE technical paper, SAE2007-01-4058 2007.
- (10) D. Han, A. M. Ickes, S. V. Bohac, Z. Huang and D. N. Assanis, "Premixed low-temperature combustion of blends of diesel and gasoline in a high speed compression ignition engine", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 33, pp. 3039~3046, 2011.
- (11) S. Zhong, M. L. Wyszynski, A. Megaritis and D. Yap, H. Xu, "Experimental Investigation into HCCI Combustion using Gasoline and Diesel Blended Fuels", SAE technical paper, SAE 2005-01-3733, 2005.
- (12) C. Arcoumanis and M. S. Baniasad, "Analysis of Consecutive Fuel Injection Rate Signals Obtained by the Zeuch and Bosch Methods", SAE technical paper, SAE 930921 1993.
- (13) E. Alptekin, M. Canakci, "Determination of the density and the viscosities of biodiesel-diesel fuel blends", Renewable Energy, Vol. 33, pp. 2623~2630, 2008.
- (14) R. Meyer and J. B. Heywood, "Evaporation of In-Cylinder Liquid Fuel Droplets in an SI Engine: A Diagnostic-Based Modeling Study", SAE technical paper, SAE 1999-01-0567, 1999.