

바이오디젤을 적용한 압축착화 엔진에서 EGR율에 따른 연소 및 미세입자 배출물 특성

차 준 표¹⁾ · 윤 승 현¹⁾ · 이 창 식^{*2)}

한양대학교 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

Combustion and Nano-particulate Emissions Characteristics of a Compression Ignition Engine Fueled with Biodiesel according to EGR Ratio

Junepyo Cha¹⁾ · Seung Hyun Yoon¹⁾ · Chang Sik Lee^{*2)}

¹⁾Graduate School, Hanyang University, Seoul 135-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 135-791, Korea

(Received 21 January 2010 / Accepted 8 April 2010)

Abstract : An experimental investigation was conducted to analyze the effects of EGR ratio on the combustion, exhaust emissions characteristics and size distributions of particulate matter in a single cylinder diesel engine with common-rail injection system fueled with biodiesel derived from soybean. In order to analyze the combustion, exhaust emissions and measurement of size distributions of particulate matter were carried out under various EGR ratio which was varied from 20~60% and the results were compared to those of results without EGR.

The experimental results show that ignition delay was extended and maximum value of rate of heat release (ROHR) was decreased according to increasing of EGR ratio. In addition, oxides of nitrogen (NO_x) emissions were reduced but soot emissions were increased under increasing of EGR ratio. However, under higher EGR ratio region, soot was slightly decreased. And then the particulate size distribution shows that high exhaust gas temperature restrain the formation of soluble organic fraction (SOF) which were beyond the accumulation mode (100~300nm) and lead to increase of nuclei mode particles.

Key words : Biodiesel(바이오디젤), Particulate emission(입자 배출물), Exhaust gas recirculation(배기재순환), Low temperature combustion(저온연소)

1. 서 론

압축 착화 기관은 스파크 점화 기관에 비하여 높은 열효율과 연비성능을 갖고 상대적으로 CO₂의 발생이 적기 때문에 최근 지구온난화를 극복하기 위하여 활발히 연구되고 있다. 그러나 압축 착화 엔진은 매우 높은 압력에서 연료의 자착화에 의하여 연소되기 때문에 질소산화물(NO_x)과 입자상 물질(Particulate matter, PM)의 배출이 많은 단점도 갖고

있다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 대표적인 기술이 저온 연소(low temperature combustion, LTC) 방식이다. 이러한 저온 연소의 개념은 연소 온도를 NO_x와 soot의 생성 반응 온도 이하로 낮추어 미연에 억제하는 것이며, 이를 구현하기 위하여 균일 예혼합 압축 착화(homogeneous charge compression ignition, HCCI) 방법과 배기 재순환(exhaust gas recirculation, EGR) 방법 등의 기술이 연구되고 있다.¹⁻³⁾

EGR 방법은 배기가스의 일부를 흡기에 재순환시켜 연소실 내의 O₂농도를 낮추고 상대적으로 비

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

열이 큰 CO₂ 농도를 높임으로써 연소 시 방출되는 열에너지를 CO₂가 상당량 흡수하여 연소온도를 낮추게 되고 이로 인하여 NO_x를 효과적으로 저감시킨다. 그 반면에 배기가스를 재순환하여 연소상태를 악화시키는 방법이므로 soot의 배출과 미연소 생성물의 배출은 증가하는 단점을 가지고 있다. 하지만 매우 높은 EGR율을 적용한 영역에서 적당한 운전 조건에 의하여 안정된 연소를 구현하면 NO_x와 soot를 동시저감 할 수 있는 저온연소를 구현할 수 있다.^{4,5)}

본 연구에서는 soot의 저감을 위하여 합산소 연료인 바이오디젤(대두유)을 압축 착화 엔진에 적용하고 매우 높은 EGR율까지 적용시켜 그에 따른 연소 및 배기 배출물의 특성에 대하여 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Table 1은 본 연구에서 사용된 엔진과 인젝터의 주요 제원을 나타내었고, 또한 Fig. 1은 커먼레일 디젤엔진, 연료 공급 및 압력 제어장치, 연료 분사 제어장치, 연소 및 배기 분석을 위한 장치로 구성된 실험 장치를 나타내었다.

압축비가 17.8:1이고 배기량이 373.3cc인 커먼레일 분사시스템의 단기통 디젤엔진을 DC 동력계(55kW)를 이용하여 엔진의 운전속도 및 토크를 제어하였다.

연료 공급 및 압력 제어장치는 병렬로 연결된 두 개의 고압펌프(HSF-300, Haskel)를 이용하여 체임버 내에 연료를 가압하고 압력제어기를 통하여 커먼레일의 압력을 일정하게 유지하였다.

분사시스템은 크랭크 각 센서(1800pulse/rev)와 캠축 위치 센서를 설치하고 이 두 신호를 타이밍 펄스 발생기(timing pulse generator)에서 논리연산에 의하여 TDC를 인식하여 이 시점을 기준으로 0.1° 단위로 분사시기 제어가 가능하도록 했다. 그리고 타이밍 펄스 발생기로부터 인가받은 지정된 분사시기에서 인젝터 드라이버(TDA 3300, TEMS)는 통전 시간을 조절하여 인젝터에서 분사량을 제어할 수 있도록 하였다.

Table 1 Specifications of the test engine

Description		Specification
Type		Single cylinder DI engine
Bore×Stroke (mm)		75×84.5
Displacement volume (cc)		373.3
Compression ratio		17.8
Valve type		DOHC 4
Intake valve	Open	BTDC 8°
	Close	ABDC 52°
Exhaust valve	Open	BBDC 8°
	Close	ATDC 38°
Fuel injection system		Bosch common-rail
Number of injection hole		6
Nozzle hole diameter (mm)		0.128
Spray angle (°)		156

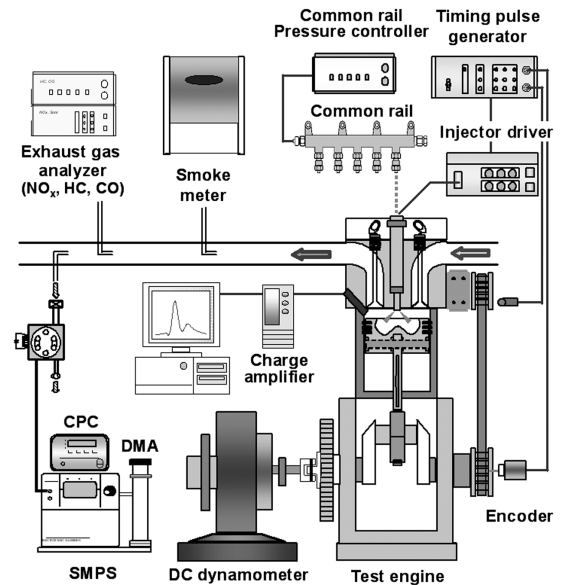


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

연소해석을 위하여 엔진 헤드에 피에조 압전 소자 방식의 압력센서(6052C, Kistler)를 설치하여 실린더 내의 압력 신호를 받고 이를 통하여 DAQ보드(PCI-MIO-16E-1, NI)와 Labview 소프트웨어를 사용하여 실시간으로 취득하였다.

배기가스 분석을 위하여 soot의 농도를 측정하는 매연측정기(Smoke meter-415S, AVL)와 입자상 물질의 10.4-392.4nm 범위에서 크기별 배출 분포를 측정하는 SMPS(Scanning mobility particle sizer, TSI)를 구성하였다. 또한 유해배출가스 농도를 측정하기

위하여 배기가스 분석기(MEXA-554JK, Horiba)를 설치하여 측정하였다.

2.2 실험 방법

본 실험은 바이오디젤 연료를 적용하여 EGR율의 변화에 따른 연소 특성과 배기 특성을 알아보기 위한 것으로 실제 배기가스를 재순환 시키는 방법으로 EGR을 구현하였으며, 배기가스의 높은 온도에 의한 영향을 억제하기 위하여 수냉식의 Cooled-EGR을 적용하였다.

또한 배기가스와 흡입공기의 균일한 혼합을 위하여 흡기부에 챔버를 설치하였고 유량계(GFC67, Aalborg)를 설치하여 정확한 유량 제어를 하였다. 이 유량값에 의하여 EGR은 총 흡기유량에 대한 배기가스 유량의 질량 퍼센트로 정의하였다. EGR은 $EGR = \dot{m}_{EGR} / \dot{m}_{total}$ 으로 표시되며, 여기서 \dot{m}_{total} 은 총 흡기의 질량 유량(mass flow rate of total intake air)이고, \dot{m}_{air} 은 흡기 공기의 질량 유량(mass flow rate of intake fresh air)을 나타내며 \dot{m}_{EGR} 은 EGR의 질량 유량(mass flow rate of EGR)이다.

실험 운전 영역으로 엔진 회전 속도는 동력계를 이용하여 1200rpm으로 고정하였으며 바이오디젤의 연소 시 당량비(Equivalence ratio) $\Phi=0.4$ 에 상응하는 8.43mg/cycle의 분사량을 TDC에서 BTDC 30°까지 진각시키며 분사압 120MPa로 분사하였다. 또한 EGR 20, 40, 60%에 대하여도 동일하게 실험을 수행하였다. 이에 대한 실험 조건을 Table 3에 나타내었다.

Table 2 Specifications of biodiesel fuel

Fuel property	Biodiesel
Specific gravity, @15°C	0.884
Density, kg/m ³ @15°C	884
Kinematic viscosity, mm ² /s @40°C	4.02
Cloud point, °C	-1
Pour point, °C	-2
Carbon, wt%	77
Hydrogen, wt%	12
Oxygen, wt%	11
Sulfur, ppm	2
Cetane number	57-58
Lower heating value, MJ/kg	37.5

Table 3 Experimental conditions

Item	Experimental condition
Engine speed (rpm)	1200
Coolant temperature (°C)	70
Oil temperature (°C)	70
Intake air pressure	Naturally aspirated
Injection pressure (MPa)	120
Start of energizing (°BTDC)	0, 3, 6, 9, 12, 15, 20, 25, 30
EGR ratio (%)	0, 20, 40, 60
Mass of fuel injection (mg)	8.43mg ($\Phi=0.4$)
Test fuel	Biodiesel

3. 실험 결과 및 고찰

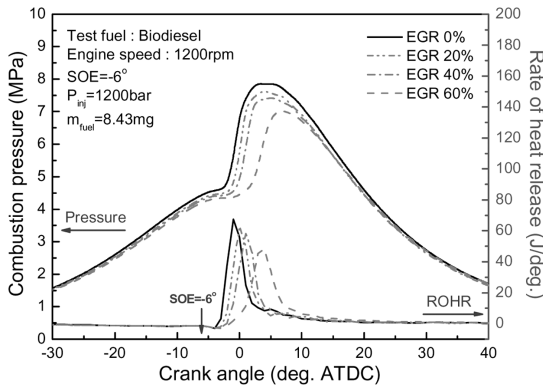
3.1 연소 특성

Fig. 2는 바이오디젤을 사용하여 $\Phi=0.4$ 에 해당하는 8.43mg/cycle을 분사하는 경우에 EGR율을 증가시켰을 때의 연소 특성에 대하여 나타낸 것이다.

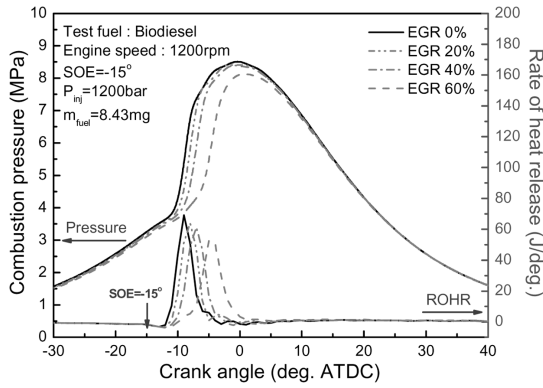
이를 위하여 엔진 회전속도 1200rpm에서 120MPa의 분사압력과 8.43mg의 분사량을 TDC에서 BTDC 30°까지 진각시키며 분사하는 운전 조건으로 실험하였고 같은 조건으로 EGR을 60%까지 증가시키면서 실험하였다.

Fig. 2(a)의 SOE(start of energizing)가 BTDC 60인 경우에는 일반적으로 우수한 연소 특성을 보이는 TDC 근처의 분사시기이며 EGR율을 증가시켜도 팽창과정 중의 연소 압력 곡선이 비슷한 경향을 나타내어 IMEP(indicated mean effective pressure)의 저감이 크지 않음을 볼 수 있다. EGR 20, 40%의 경우는 EGR율을 적용시키지 않은 경우보다 다소 길어진 착화 지연 시간과 최대 연소 압력이 점진적으로 낮아지나 그 차이는 크지 않으며 EGR 60%의 경우에는 확연히 낮아진 최대 연소 압력과 길어진 착화 지연 시간이 나타난다. 열발생을 곡선에서도 EGR율의 증가에 따라 최대 열발생율은 낮아지고 그 기울기는 완만해지는 경향을 보였고, 특히 EGR을 60%의 경우에 그 정도가 큰 것으로 나타났다. 이는 EGR 60%에서는 유입되는 공기량이 일반적인 경우에 비하여 40%로 낮아지고 많은 양의 배기가스(60%)가 재 유입되어 연소가 방해된 것으로 판단된다.

Fig. 2(b)의 SOE가 BTDC 150인 경우에도 위와 같이 EGR율의 증가에 따라 낮아지는 최대 연소 압력



(a) SOE = -6°



(b) SOE = -15°

Fig. 2 Combustion characteristics according to EGR ratio

과 길어지는 착화 지연 기간, 낮아지는 최대 열발생율과 완만해지는 열발생율의 기울기처럼 동일한 경향을 보인다. 이 중에서 EGR을 적용하지 않은 조건과 EGR 20, 40%에서는 이른 분사시기에 의하여 압축과정에서 급격하게 연소가 일어나므로 손실을 수반하여 IMEP의 감소로 이어지고 열발생율은 급격하게 상승하는 것을 볼 수 있다. 하지만 매우 높은 EGR율 영역인 EGR 60%조건에서는 상대적으로 크게 늘어난 착화 지연 기간에 의하여 TDC 근처에서 연소가 일어나며 최대 연소 압력은 ATDC 1°에서 나타나는 것으로 보아 IMEP의 감소가 이른 분사시기임에도 불구하고 다른 조건에 비하여 크지 않음을 볼 수 있다.

3.2 배기 특성

Fig. 3은 분사시기에 따른 NO_x의 배출량을 EGR

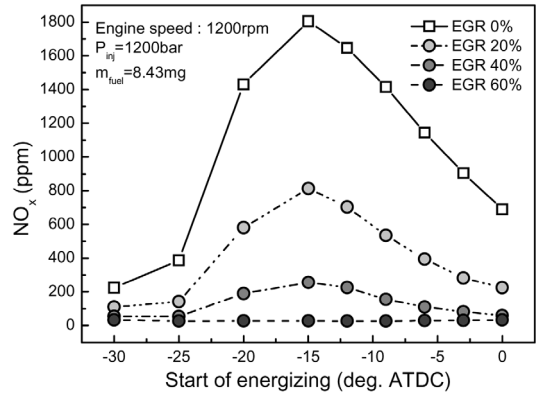


Fig. 3 Effect of EGR ratio on NO_x emission characteristics

율에 따라 비교한 것이다. NO_x 발생의 가장 큰 요인으로는 연소 온도이므로 이를 억제하는 효과적인 방법은 연소 온도를 낮추는 것이다. 이에 일반적으로 널리 쓰이는 방법인 EGR은 배기가스 중에 큰 비열을 갖고 있는 CO₂가 연소 시 열에너지를 흡수하게 되고 이는 연소온도를 낮추는 효과를 가져와 NO_x의 생성을 억제하게 된다.

Fig. 3은 이러한 EGR의 전형적인 경향을 보여주고 있으며 EGR율의 증가에 따라 NO_x의 배출량은 현저하게 저감되는 것을 볼 수 있다. 또한 분사시기 BTDC 15°에서 대부분의 경우에 NO_x의 배출량이 최대로 나타나는 것은 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 분사시기 BTDC 15°에서 압축과정 중 연소압력과 열발생율의 급격한 상승에 의하여 연소온도가 다른 분사시기보다 높기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 EGR 60%에서는 전 구간에 걸쳐 NO_x의 배출량이 현저하게 적었다. 이것은 EGR의 증가로 완만한 열발생율과 연소압력으로 인하여 연소온도가 매우 낮은 것에 기인한다.

Fig. 4는 분사시기에 따른 soot의 배출량을 EGR율에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 디젤의 경우 EGR율의 증가에 따라 혼합기의 산소농도의 감소로 인하여 soot 배출물이 다소 증가한다고 보고되고 있다.⁶⁾ 그러나 본 실험에서 바이오디젤의 경우에는 IMEP의 큰 저감이 없는 TDC 근처의 분사시기에서는 EGR의 적용의 경우에도 soot의 배출량이 적게 나타났다. 이것은 EGR율의 증가로 인하여 연소실의 산소농도가 감소되지만 바이오디젤 연료 내에

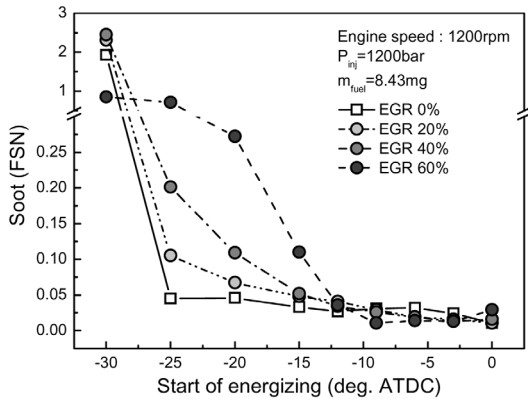
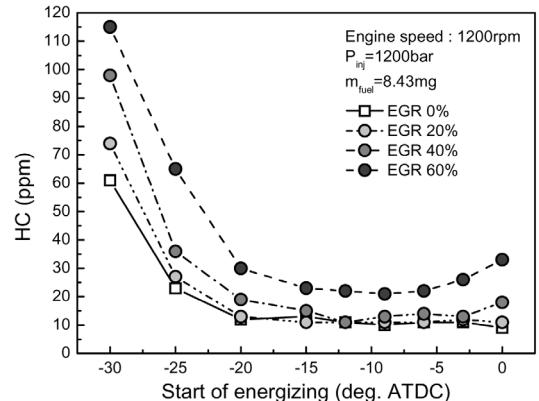


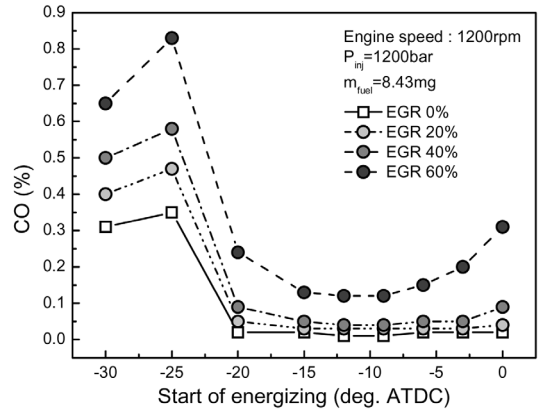
Fig. 4 Effect of EGR ratio on soot emission characteristics

포함된 산소성분이 연소를 촉진시키고, 연소과정 중에서 soot 배출물의 산화에 영향⁷⁾을 미치기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 BTDC 20°이전의 이른 분사시기에서는 EGR율의 증가에 따라 soot의 발생이 현격히 커지는 일반적인 경향을 나타내고 있다.

Fig. 5는 동일한 조건에서 HC와 CO의 배출량을 나타내었다. 분사시기를 BTDC 20°이전으로 진각시키는 경우에서 전체적으로 HC와 CO의 배출량이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 피스톤 보울 안으로 분무되어야 할 연료가 이른 분사시기에 의하여 피스톤이 적정한 위치에 도달하기 전에 분사되어 피스톤 헤드와 실린더 벽면의 연료 부착 현상(wall-wetting)에 의한 것으로 판단된다. 또한 EGR율의 증가에 따라 전체적으로 증가하는 경향을 보인다. 기본적으로 HC와 CO의 생성은 불완전 연소에 기인한 것으로 알려져 있다. EGR의 적용은 일반적으로 연소온도를 낮추어 출력 등의 손실을 다소 감소하고 연소억제효과를 이용하는 하는 것이기 때문에 EGR율의 증가에 따라 HC와 CO의 배출량은 증가하게 된다. 또한 Mark⁸⁾등은 EOI(end of injection)와 착화시점의 관계와 미연탄화수소의 생성에 대하여 EOI 전에 착화가 시작될 때에는 그 배출량이 매우 적지만 후에 착화가 시작될 때에는 그 양이 급격하게 늘어난다고 보고하였다. 특히 EGR 60%의 경우에서 상대적으로 착화 지연 기간 증가에 의하여 연료의 분무가 끝난 후에 착화가 시작함으로써 현저하게 많은 양의 HC와 CO를 배출하는 것으로 판단된다. 또한 CO에서 CO₂로의 전환되는 반응은 연



(a) HC (ppm)



(b) CO (%)

Fig. 5 Effect of EGR ratio on HC and CO emission characteristics

소 온도에 매우 민감하다고 알려져 있으며, 특히 연소 온도가 1500K 이상에서 반응이 크게 일어난다고 보고되고 있다.⁹⁾ 이에 관하여 Fig. 5(b)를 보면 분사시기가 BTDC 20° 이전으로 진각 되는 경우에 낮은 연소 온도에 의하여 CO의 배출량이 현저히 증가하고 EGR 60%인 경우에도 낮은 연소 온도에 의하여 배출량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 ISNO_x와 soot의 배출량을 EGR율의 증가에 따라 비교한 것이다. EGR율이 증가할수록 NO_x의 배출량이 급격하게 낮아지는 것을 쉽게 확인할 수 있으며 soot의 발생은 모든 조건 중의 TDC 근처의 분사시기에서 매우 적게 나타나고 있다. 특히 EGR 60% 경우에는 상대적으로 넓은 분사시기 구간에서 NO_x와 soot의 동시저감 경향이 나타나며

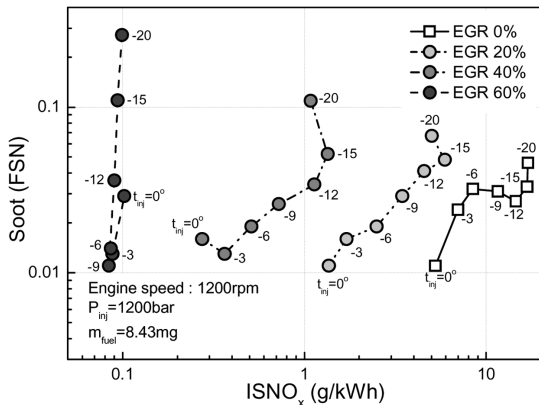
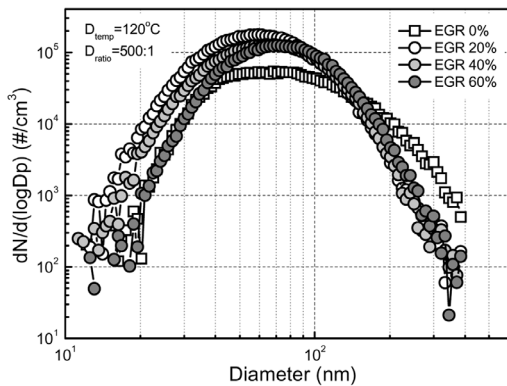
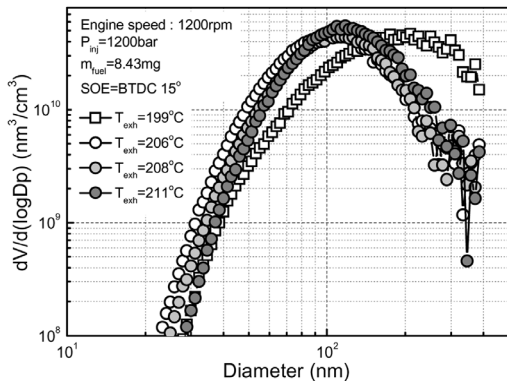


Fig. 6 Characteristics of NO_x and soot according to EGR ratio



(a) Particle size distributions



(b) Particle volume distributions

Fig. 7 Particle size and volume distributions characteristics according to EGR ratio

Fig. 5에서 HC와 CO의 배출량이 많은 경우와 비교할 때 연소 온도가 상대적으로 낮은 구간임을 알 수 있으며 이는 저온 연소(low temperature combustion)

영역인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 동일한 운전 조건에서 배출되는 배기가스를 회전판식 희석기(MD19-2E, Matter engineering)을 이용하여 120°C의 희석온도에서 500:1로 희석하여 분사시기 BTDC 15°에서의 미세입자 개수분포(Fig. 7(a))와 체적분포(Fig. 7(b))의 특성을 나타낸 것이다. EGR을 적용한 경우에 미세입자 배출물의 특성은 부피와 질량에 크게 영향을 주는 Accumulation mode(100~300nm)의 입자들이 줄어들고 Nuclei mode(5~50nm)의 입자들은 다소 늘어난 것을 볼 수 있다. 이러한 입자상 물질(particulate matter, PM) 중에는 용해성 유기물질(Soluble organic fraction, SOF)을 포함하고 있으며, 이들은 희석터널(dilution tunnel) 또는 배기가스관을 지나면서 냉각, 응축, 흡착 과정을 통하여 입자상 물질을 성장시킨다고 알려져 있다.^{10,11)} 이에 EGR을 적용하였을 때의 미세입자 입경분포의 특성은 Fig. 7에서 나타났듯이 EGR 적용에 의하여 높아진 배기가스가 미세입자를 이루는 성분 중의 용해성 유기물질을 감소시키기 때문에 상대적으로 크기가 큰 입자들의 수가 감소하며 그로 인하여 크기가 작은 입자들의 수가 증가하였다고 판단된다.

4. 결론

커먼레일 방식의 압축 착화 엔진에 바이오디젤을 적용하고 다양한 분사시기와 EGR율을 증가시켰을 경우의 연소 및 미세입자 배출물 특성을 연구한 결과는 다음과 같다.

- 1) EGR율을 증가함에 따라 연료의 착화 지연 기간은 길어지고 최대 연소 압력과 최대 열발생율은 저하하였다.
- 2) NO_x의 배출량은 EGR의 증가에 따라 현저하게 저감되었고, 특히 EGR 60%경우에서는 전 구간에 걸쳐서 NO_x의 배출이 거의 되지 않았다.
- 3) soot의 배출량은 EGR율의 증가에 따라 급격하게 증가하였으나, 바이오디젤 연료의 경우 안정적인 연소를 보여주는 TDC근처의 분사시기에서의 합산소 성분의 영향으로 soot의 배출이 매우 적었다.
- 4) 미연소 생성물인 HC와 CO의 배출량은 EGR의

증가함에 따라 배출량 또한 증가하였으며, 특히 EGR을 60%에서는 상대적으로 많은 양이 배출되었다.

- 5) 미세입자 입경분포 특성은 EGR 적용에 의하여 배기가스의 온도가 증가하였으며 이로 인하여 Accumulation mode의 입자수가 감소하고 Nuclei mode의 입자수가 증가하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 인력 양성사업 및 클린 신연료 동력시스템 개발 사업과 환경부 Eco-STAR project(무·저공해 자동차 사업단), 2단계 두뇌한국 21사업의 지원으로 진행되었으며 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

References

- 1) M. Yao, Z. Zheng and H. Liu, "Progress and Recent Trends in Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines," Progress in Energy and Combustion Science, Vol.35, Issue 5, pp.398-437, 2009.
- 2) D. S. Kim, M. Y. Kim and C. S. Lee, "Combustion and Emission Characteristics of a Partial Homogeneous Charge Compression Ignition Engine when Using Two-stage Injection," Combust. Sci. and Tech., Vol.179, pp.531-551, 2007.
- 3) D. S. Kim and C. S. Lee, "Improved Emission Characteristics of HCCI Engine by Various Premixed Fuels and Cooled-EGR," Fuel, Vol.85, pp.695-704, 2006.
- 4) C. S. Lee, Y. H. Yoon and M. Y. Kim, "Effect of Cooled-EGR on the Characteristics of Performance and Exhaust in a HCCI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.13, No.5, pp.35-41, 2005.
- 5) S. H. Yoon, M. Y. Kim, D. S. Kim, J. H. Lee and C. S. Lee, "Effect of Early Injection Strategy on the Combustion and Emission Characteristics of the Common-rail DI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.14, No.4, pp.26-31, 2006.
- 6) M. P. B. Musculus, T. Lachaux, L. M. Pickett and C. A. Idicheria, "End-of-injection Overmixing and Unburned Hydrocarbon Emissions in Low-temperature-combustion Diesel Engines," SAE 2007-01-0907, 2007.
- 7) J. Y. Heo, S. H. Yoon, S. W. Park and C. S. Lee, "Effect of EGR Ratio on Combustion and Emission Characteristics in a Single-diesel Engine with Common-rail Direct Injection," KSAE 2009 Annual Conference, KSAE09-A0060, 2009.
- 8) S. H. Yoon, H. K. Suh and C. S. Lee, "Effect of Spray and EGR Rate on the Combustion and Emission Characteristics of Biodiesel Fuel on a Compression Ignition Engine," Energy & Fuels, Vol.23, pp.1486-1493, 2009.
- 9) M. Sjöberg and J. E. Dec, "An Investigation into Lowest Acceptable Combustion Temperatures for Hydrocarbon Fuels in HCCI Engines," Proc. Comb. Inst. Vol.30, pp.2719-2726, 2005.
- 10) D. B. Kittelson, "Engines and Nanoparticles: A Review," J. Aerosol Sci., Vol.29, No.5/6, pp. 575-588, 1998.
- 11) K. J. Baumgard and J. H. Johnson, "The Effect of Fuel and Engine Design on Diesel Exhaust Particle Size Distributions," SAE 960131, 1996.