

디젤-에탄올 혼합연료의 에탄올 함량이 미세 그을음(Soot) 입자 배출특성에 미치는 영향[§]

박수한* · 차준표* · 권석주* · 박성욱** · 이창식***†

* 한양대학교 대학원 기계공학과, ** 한양대학교 기계공학과

Effect of Ethanol Content on Fine Soot Particle Emission from a Diesel-Ethanol Blended Fuel Diesel Engine

Su Han Park*, Junepyo Cha*, Seokju Kwon*, Sungwook Park** and Chang Sik Lee***†

* Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received May 13, 2011; Revised July 28, 2011; Accepted July 30, 2011)

Key Words : Diesel-Ethanol Blended Fuel(디젤-에탄올 혼합연료), Nano-Sized Particles(나노 입자), Soot Emission (매연 배출물), Combustion Characteristics(연소특성)

초록: 본 연구의 목적은 디젤-에탄올 혼합연료로 운전되는 디젤엔진에서 에탄올 혼합비율이 나노 크기 입자 배출 특성에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 엔진의 연소 및 배기 배출물 특성은 배기량 373cc 의 단기통 디젤엔진과 배기 배출물 측정 장치, SMPS 를 이용하여 실험하였다. 그을음(soot) 배출은 착화지연 시간이 길어짐에 따라 증가하였다. 에탄올 혼합비율이 증가함에 따라 나노 입자의 총 개수 및 질량은 대체로 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 에탄올이 30% 혼합되었을 때 그을음(soot) 입자의 응결로 인해 큰 입자의 수 분포가 증가하였으며, 질량 또한 크게 증가하였다.

Abstract: The purpose of this study is to investigate the effect of ethanol content on the emission of nanosized particles from a diesel-ethanol blended fuel engine. The engine combustion and exhaust emission characteristics of a single-cylinder diesel engine were analyzed using an emission analyzer and an SMPS(scanning mobility particle sizer). The analysis revealed that soot emission increased with the ignition delay. When the ignition delay was fixed, an increase in the ethanol content caused a decrease in the soot emission. With an increase in the ethanol blending ratio, the number concentration and mass distribution of nanosized particles generally decreased. However, for 30% ethanol blending, large particles were observed because of the agglomeration of soot particles, and consequently, the particle mass increased.

1. 서 론

높은 열효율을 갖는 디젤엔진은 다량의 질소산화물 및 입자상물질 배출이라는 치명적인 단점을 가지고 있다. 이러한 디젤엔진의 유해 배기 배출물을 저감하기 위한 노력으로 균일 예혼합 압축착화(HCCI, homogeneous charged compression ignition), 저온 연소(LTC, low temperature combustion), 배기 재순환(EGR,

exhaust gas recirculation)과 같은 신 연소 전략을 통한 엔진 내 배출물 생성 저감방법과 매연 여과 장치(DPF, diesel particulate filter) 및 선택적 촉매변환 시스템(SCR, selective catalytic reduction)과 같은 생성된 유해 배출물을 후 처리하는 방법 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

또한 유럽의 배기 배출물 규제인 Euro-V 는 2009년부터 시행되었으며, 2011년부터 입자상 물질의 질량뿐만 아니라 개수 규제를 더함으로써 디젤엔진의 배기 배출물에 대한 규제가 점차 강화될 전망이다. 차량으로부터 배출되는 입자상 물질은 대기오염뿐만 아니라 호흡기 질환 및 심혈관 질환 등 인체에 유해하며, 입자 크기가 작아질수록 그 표면적이 증가하

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 열공학부문 춘계 학술대회(2011. 5. 12.-13., 롯데부여리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, cslee@hanyang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

여 유해물질의 흡착을 등에 대한 반응성이 증가하여 독성을 일으키기 쉽다.⁽¹⁾ 이에 따라 2000 년 유럽연합은 효과적인 입자상 물질 측정 방법 개발을 위한 PMP(particulate measurement program)^(2,3)의 진행을 결정하여 입자상 물질 측정 및 표준화를 위한 연구를 진행하고 있으며, 미국에서도 에너지국(DOE)의 지원 하에 입자상 물질의 발생, 유해성 및 평가방법에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한, Kim 등,⁽⁴⁾ Pang 등,⁽⁵⁾ 그리고 Leahey 등⁽⁶⁾은 에탄올 연료의 혼합으로 디젤 엔진에서 배출되는 그을음(soot)을 저감할 수 있다고 보고하였다. 국내에서도 다양한 연구그룹에서 입자상 물질 저감에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽⁷⁻¹⁰⁾ 그러나 에탄올 연료 혼합에 따른 미세 그을음(soot) 입자의 배출특성에 관한 연구는 아직 많지 않은 실정이다.

본 연구에서는 디젤-에탄올 혼합연료로 운전되는 디젤엔진에서 에탄올 혼합비율이 입자상 물질의 배출 특성에 미치는 영향을 분석하는데 목적이 있으며, 이를 위해 동일한 엔진 운전조건에서 각 실험연료로부터 배출되는 입자상 물질의 입자 크기에 따른 개수 및 질량 분포 특성을 측정하고 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 단기통 디젤엔진

디젤-에탄올 혼합연료로 운전되는 디젤 엔진의 연소 성능과 배기 배출물 특성은 Fig. 1 과 같은 실험장치를 이용하여 측정하였다. 실험 장치는 단기통 디젤엔진, 엔진 제어 시스템, 연료 공급 및 분사 시스템, 흡입 공기 제어 시스템, 연소 데이터 취득 시스템, 배기 배출물 분석 시스템, 미세 그을음(soot) 입자 측정 시스템으로 구성하였다. 실험용 디젤 엔진의 실린더 지름과 행정은 각각 75mm 와 84.5mm 이며, 압축비는 17.8:1 이다.

엔진의 운전속도 및 토크는 DC 동력계로 제어하였다. 엔진의 연료 분사시기는 크랭크 각 센서 (1800 pulse/rev)와 캠 축 위치 센서에 의해 발생하는 두 신호를 신호발생기에서 논리연산에 의해 TDC 를 인식하도록 하고, 이 시점을 기준으로 0.1° 단위로 분사시기 제어가 가능하도록 했다. 인젝터 드라이버 (TDA-3300, TEMS)를 이용하여 통전 기간을 조절함으로써 연료 분사량을 제어하였다. 연소해석을 위해 엔진 헤드에 피에조 압전 소자 방식의 압력 센서를 설치하여 실린더 내의 압력 신호를 받고 이를 통하여 DAQ 보드와 Labview 소프트웨어를 사용하여 실시간으로 취득

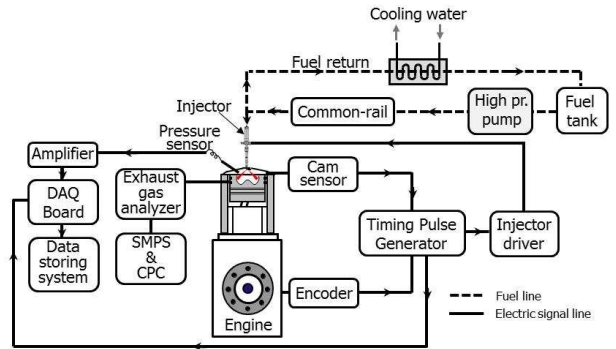


Fig. 1 Schematic of a single cylinder diesel engine with exhaust emissions analyzer and nano-sized particle measuring system

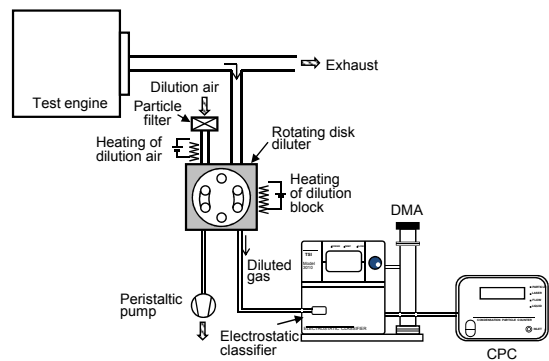


Fig. 2 Schematic of the measurement devices for the nano-sized particles

하였다. 한편, 엔진으로부터 배출되는 배기가스는 HC/CO/NO_x 분석기 (MEXA-554JKNO_x, Horiba)를 이용하였으며, 그을음(soot) 측정은 필터법을 적용한 매연측정기 (415S, AVL)를 이용하였다.

2.2 미세 그을음(soot) 입자 배출물 측정장치

본 연구에서는 디젤-에탄올 혼합연료에서 에탄올 혼합비율이 미세 그을음(soot)입자 배출에 미치는 영향을 분석하였다. 배기 후단의 샘플링 프로브를 통해 포집된 배기가스를 약 80°C 의 희석 온도에서 300:1 로 희석하고, EC (electrostatic classifier), CPC (condensation particle counter), DMA (differential mobility analyzer)로 구성된 SMPS (scanning mobility particle sizer, Model 3936, TSI)를 이용하여 크기가 10.4nm ~ 392.4nm 인 입자를 측정하였다. 미세 그을음(soot) 입자 배출물 측정장치의 개략도는 Fig. 2 와 같다.

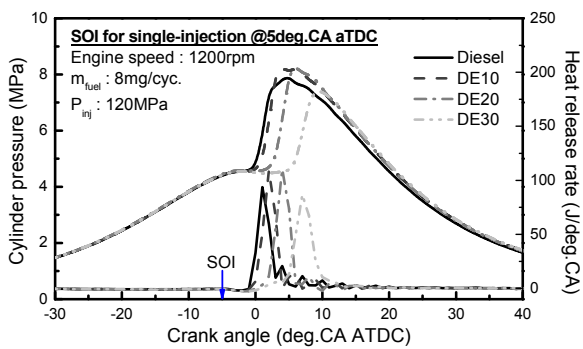
2.3 실험연료

본 연구에 사용된 연료는 100% 저유황 디젤 연료 (16.3 wt.ppm, 0.003%)와 디젤연료에 순도

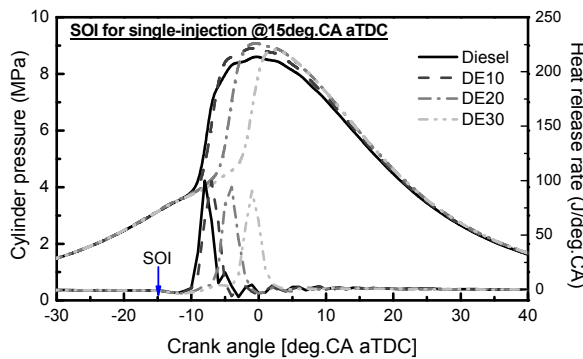
99.9%의 에탄올을 부피비로 10%, 20%, 30% 혼합한 혼합연료를 이용하였다. 디젤-에탄올 혼합연료의 상 분리를 방지하기 위해 대두유로부터 만들어진 바이오디젤 5%를 혼합하였다.

3. 실험결과 및 고찰

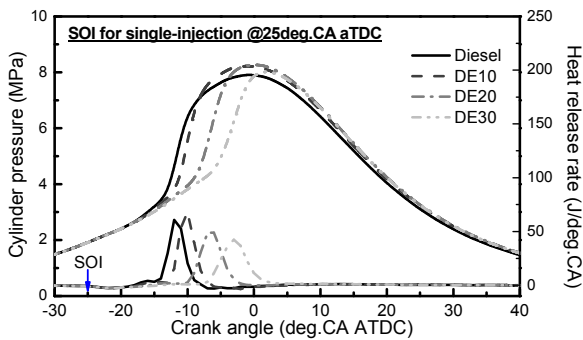
Fig. 3은 분사시기가 BTDC 5°, BTDC 15°, BTDC 25° 일 때, 에탄올 혼합비율에 따른 연소압력 및 열 발생률 특성을 나타낸 것이다. 분사압력, 분사량 및 엔진 회전 속도는 120MPa, 8mg, 1200rpm 으



(a) SOI = BTDC 5°



(b) SOI = BTDC 15°



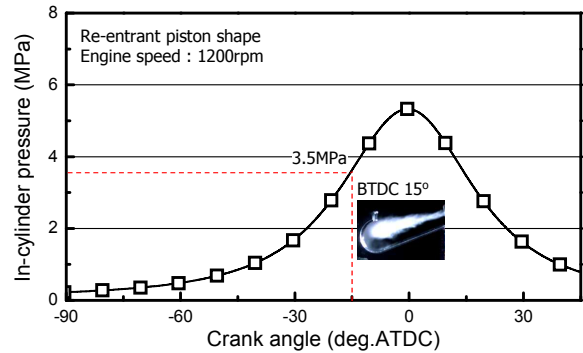
(c) SOI = BTDC 25°

Fig. 3 Combustion pressure and heat release rate of diesel-ethanol blended fuels for specific injection timing

로 고정하였다. Fig. 3(a) ~ (c)에서 보는 바와 같이 에탄올 혼합비율이 증가함에 따라 착화지연기간이 길어지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 증발 잠열이 큰 에탄올이 연소실 내에서 증발하면서 열을 흡수하여 연소실 온도를 낮추고, 낮은 세탄가로 인해 혼합연료의 세탄가를 낮추기 때문이다. 착화지연이 길어짐에 따라 연소실 내에서 연료와 공기가 혼합될 수 있는 시간이 길어지게 되어 최고 연소압력은 순수 디젤연료보다 높게 나타난다. 한편, 세 가지 분사시기 중 BTDC 15° 일 때, 가장 높은 최고 연소압력 특성을 나타냈으며, 이로부터 연료를 BTDC 15°에서 분사했을 때 연소가 가장 활발히 일어나는 것으로 판단할 수 있다. 이것은 Fig. 6의 미연탄화수소 (HC) 및 일산화탄소 (CO) 배출 특성으로부터도 확인할 수 있다.

Fig. 4는 연료가 BTDC 15°에서 분사될 때 연소실 내에서의 분무 거동을 정적체임버 내에서의 분무 거동을 통해 예측한 것이다.

Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 BTDC 15°의 경우 연소실 내 압력은 약 3.5MPa에 이르며, re-entrant 형태의 피스톤에서 분사되는 연료는 피스톤 볼 안쪽으로 들어가 연소실 내 대부분의 산소를 연소에 활용하게 된다. Fig. 4(b)는 Fig. 3(b)의 열 발생률 특



(a) Motoring pressure

	D100	DE10	DE20	DE30
Spray image $P_{inj}=120MPa$ $P_{amb}=3MPa$				
t_{base} / ignition delay	0.8ms / 5.96deg	0.9ms / 6.5deg	1.3ms / 9.2deg	1.7ms / 12.4deg
Penetration	34.1mm	38.7mm	47.5mm	49.3mm
Cone angle	18.2deg	20.2deg	20.6deg	21.6deg

(b) Spray characteristics @ ignition timing

Fig. 4 Motoring pressure of test engine and the spray characteristics at ignition timing (SOI=BTDC 15°)

성으로부터 착화지연기간을 계산하고, 착화가 시작될 무렵의 분무 발달 상태 및 정량적 분무 특성을 나타낸 것이다. 일반적으로 분사 후 동일한 시간이 경과했을 때 에탄올 혼합연료의 분무 도달 거리는 순수 디젤 보다 짧으며, 에탄올 혼합비율이 높아질수록 분무 도달 거리 역시 짧아진다.⁽⁸⁾ 그러나 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 에탄올 혼합비율이 증가함에 따라 착화지연기간은 길어지게 되고, 착화가 시작될 때까지 분사된 분무는 계속해서 발달하게 된다. 착화지연기간은 DE30 에서 가장 길게 나타났으며, 착화 직전 분무는 DE30 에서 가장 길게 나타난다. 본 실험 조건 ($P_{inj}=120MPa$, $m_{fuel}=8mg$, $SOE=BTDC 15^\circ$)에서 DE30 연료는 D100 연료에 비해 착화지연기간이 약 108% 증가 (5.96 deg. → 12.4 deg.)하게 되고, 이에 따라 착화 직전 분무 도달 거리는 약 44.5% 길어진다. 이러한 분무 특성으로부터 순수 디젤의 경우 분사된 연료가 피스톤 볼에 도달할 때 즈음 착화가 진행되는 반면, DE30 은 분사된 연료가 피스톤 볼에 충돌한 후 충분한 혼합기가 생성된 후 착화가 시작되는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 5 는 순수 디젤연료와 에탄올 혼합 연료의 착화 지연기간에 따른 ISsoot 배출 특성의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 착화지연기간이 길어짐에 따라 ISsoot 배출량은 증가한 후 다시 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 착화지연기간이 지나치게 길어지게 되면 연소가 잘 일어나지 않거나 실화(misfire)가 일어나게 되어 ISsoot 은 감소하게 된다. 착화지연 기간이 짧은 영역에서는 상대적으로 연소가 활발히 잘 일어나는 구간으로 그을음(soot)의 생성속도 보다 그을음(soot)의 산화속도가 더 빠르기 때문에 ISsoot 은 감소하게 된다. Fig. 5 내의 실선과 점선의 화살 표는 각각 분사시기가 BTDC 25°, BTDC 15° 일 때의 ISsoot 값을 나타낸 것으로 동일한 분사시기에서의 에탄올 혼합비율에 따른 착화지연기간과 ISsoot 의 관계를 확인할 수 있다. 대체로 에탄올 혼합비율이 증가함에 따라 그을음(soot) 배출량은 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 착화지연기간이 짧은 영역에서는 에탄올 혼합의 영향이 거의 나타나지 않았다.

디젤-에탄올 혼합연료의 HC 및 CO 의 배출특성을 Fig. 6 에 나타냈다. HC 는 연소에 참여하지 못한 연료로부터 주로 발생하게 되며, CO 는 불완전 연소 및 낮은 연소실 온도로 인한 낮은 CO₂ 전환을 때문에 주로 발생하게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 HC 와 CO 배출물은 BTDC 15° 의 경

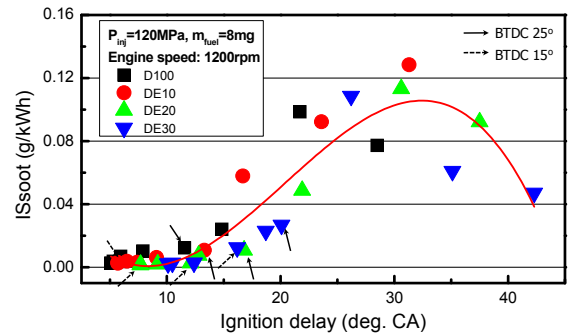
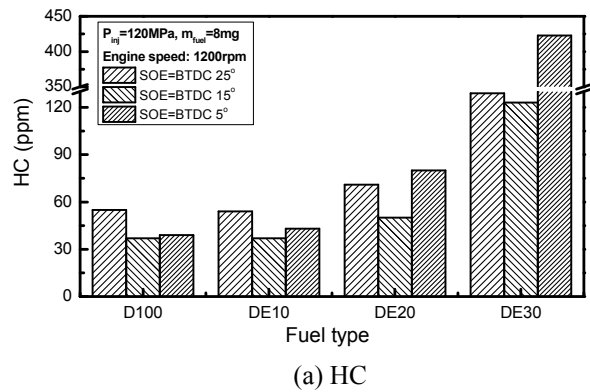
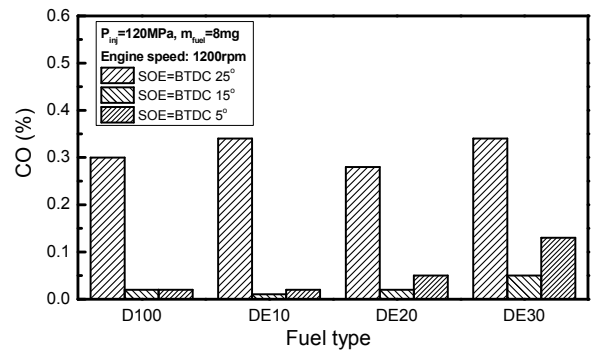


Fig. 5 Soot emission characteristics of diesel-ethanol blended fuels



(a) HC



(b) CO

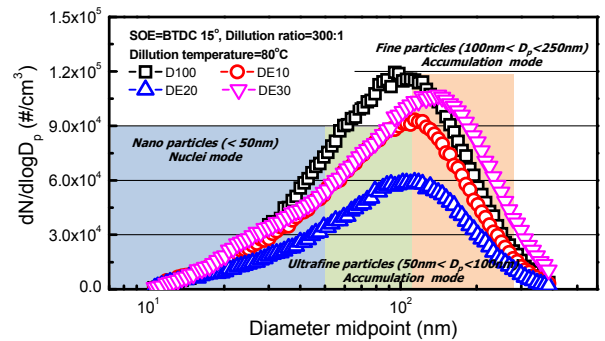
Fig. 6 HC and CO emissions characteristics at specific injection timings

우 배출량이 가장 낮았으며, 이것은 Fig. 3 에서 기술한 바와 같이 연소가 가장 활발히 일어났기 때문이다. 또한 에탄올 혼합비율이 증가함에 따라 HC 와 CO 의 배출량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

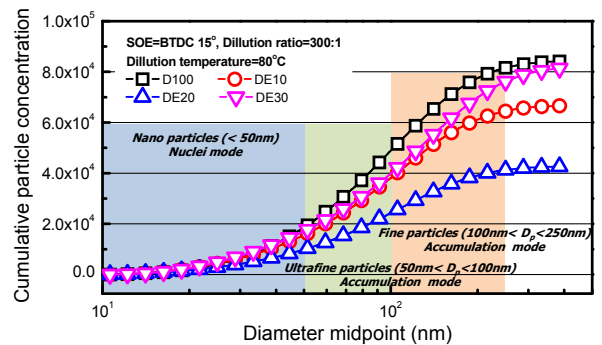
Figs. 7 ~ 10 은 연소가 가장 잘 일어나는 분사시기 BTDC 15° 에서 에탄올 혼합비율에 따른 미세 그을음(soot) 입자 배출 특성을 나타낸 것이다. Fig. 7 은 디젤-에탄올 혼합연료에서 에탄올 혼합비율에 따른 미세 그을음(soot) 입자 개수의 배출 특성

을 나타낸 것이다. 미세 그을음(soot) 입자의 개수 분포는 질량분포와 달리 엔진 배기관 조건과 배기가스의 희석비 및 희석온도 등에 상당한 영향을 받는다. 본 연구에서 나노 크기의 입자 측정을 위한 배기가스의 희석비는 300:1 로 하였으며, 희석온도는 80°C 로 고정하였다. Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 에탄올 혼합비율이 20%까지 증가했을 때 나노 입자 개수의 최대 빈도수는 낮아지는 것을 확인할 수 있었으나, 혼합비율이 30%가 되었을 때 최고 빈도수가 다시 증가하며, 모드값(가장 빈도수가 높은 입자의 크기)이 커지는 것을 확인할 수 있었다(D100: 96.48nm, DE10: 111.17nm, DE20: 109.58nm, DE30: 135.12nm). 순수 디젤의 경우 모드값은 가장 낮았으나, 빈도수는 가장 높게 나타났다. Fig. 7(a)의 그래프에서 입자 수의 증감은 Nuclei 모드 보다 Accumulation 모드에서 더 뚜렷하게 나타났다. Accumulation 모드는 주로 탄소질 덩어리(carbonaceous agglomerate)와 이와 관련된 흡착물질이 주로 존재하는 영역으로⁽¹²⁾ 에탄올 혼합에 따른 탄소 비율이 상대적으로 낮아지게 되어 Accumulation 모드에서의 입자 개수가 감소한 것으로 판단된다. 또한 Accumulation 모드의 입자는 Nuclei 모드에서 생성된 작은 입자들이 연소 사이클 후반(주로 팽창 행정) 그을음(soot) 입자들이 응결하면서 증가하게 된다. DE30의 경우 착화지연기간이 길어지게 되어, 대부분의 연소가 TDC 이후 팽창행정에서 일어나게 되며, 이 과정에서 입자들의 응결이 활발히 일어나 Accumulation 모드의 입자 개수가 증가한 것으로 판단된다.⁽¹³⁾ 한편, Fig. 7(b)는 누적 입자 개수 분포를 나타낸 것으로 디젤과 DE30 연료의 총 입자 개수가 가장 많았으며, 에탄올 혼합비율이 10%, 20% 일 때 누적 입자 개수는 감소한 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 7(b)에서 네 종류의 실험 연료의 Nuclei 모드 누적 입자 개수는 비슷하게 나타났다. Fig. 8은 Fig. 7(b)의 누적 입자 개수 분포 곡선을 Normalizing 하여 입자 크기의 총 입자 개수에 대한 누적 입자의 비를 나타낸 것이다 그림에서 보는 바와 같이 D100, DE10, DE20은 동일한 누적 패턴을 나타낸 반면, DE30은 조금 다른 패턴을 나타냈다. 그래프의 Median 값은 전체 누적 분율의 50%에 해당하는 지점의 입자 크기를 나타낸 것으로 DE30의 Median이 약 104.4nm로 다른 연료에 비해 약 16% 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 7에서 설명한 바와 같이 팽창행정에서 그을음(soot) 입자가 응결하면서 작은 크기 입자 보

다는 큰 크기의 입자가 많이 분포하기 때문이다. Fig. 9는 디젤-에탄올 혼합 연료로 운전되는 디젤엔진에서 배출되는 나노 크기 입자의 질량분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 나노 입자의 개수 분포와 질량분포는 상이한 거동을 나타낸다. Nuclei 모드에 분포하는 대부분의 입자는 질량분포에 큰 영향을 미치지 못하는 반면, Accumulation



(a) Particle concentration



(b) Cumulative particle concentration

Fig. 7 Nano-sized particle number distribution of diesel-ethanol blended fuels

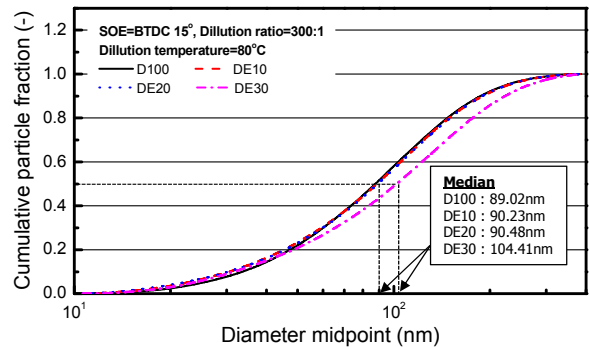


Fig. 8 Cumulative particle fraction for diesel-ethanol blended fuels

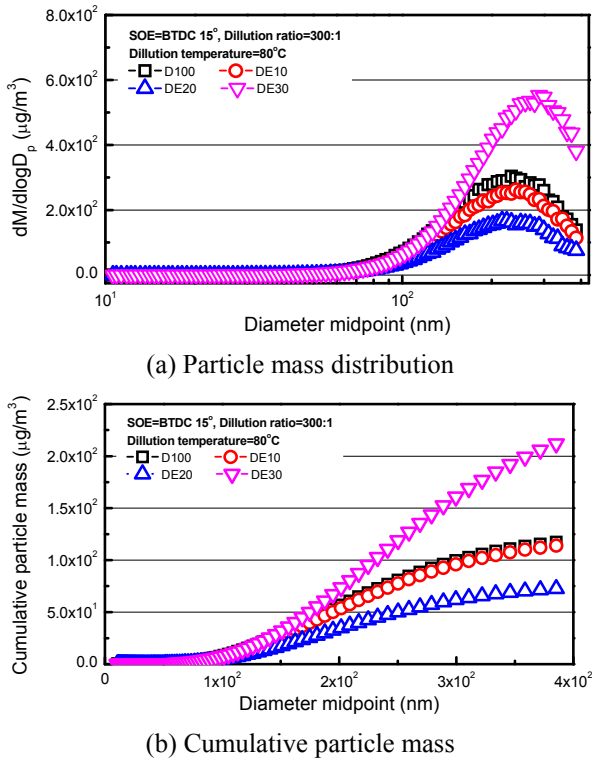


Fig. 9 Nano-sized particle mass distribution of diesel-ethanol blended fuels

모드에 분포하는 입자는 질량분포에 상당한 영향을 미치기 때문이다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 입자크기 100nm 까지의 입자 질량은 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 7의 입자 크기에 대한 수 분포 특성에 의해 에탄올 혼합비율 30%를 제외한 에탄올 혼합 연료는 순수 디젤연료보다 낮은 최고 질량값을 나타냈다. Fig. 9(b)는 입자 크기에 대한 누적 질량 분포를 나타낸 것이다. 누적 질량값 역시 DE30 연료가 가장 높은 값을 나타냈으며, D100, DE10, DE20은 에탄올 혼합비 증가에 따라 누적 질량 값도 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 디젤-에탄올 혼합연료로 운전되는 단기통 디젤엔진을 이용하여 에탄올 혼합비율이 나노 크기의 입자상 물질 배출특성에 미치는 영향을 측정하고 분석하였다. 실험결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 그을음(soot)은 착화지연기간이 길어짐에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 동일한 착화지연기간에서 에탄올 혼합비율이 증가함에 따라 그을

음(soot) 배출은 감소하였다.

(2) BTDC 15°에서 HC 및 CO의 배출량은 가장 낮게 나타났으며, 에탄올 혼합 비율이 증가함에 따라 HC 및 CO 배출량은 증가하는 경향을 나타냈다.

(3) 에탄올 혼합비율이 증가함에 따라 나노 입자의 총 개수 및 질량은 대체로 감소하는 경향을 나타냈으나, 착화지연기간이 길어져 팽창행정에서 연소가 진행되는 DE30은 반대의 경향을 나타냈다.

(4) 긴 착화지연기간을 갖는 DE30의 경우 팽창과정에서의 그을음(soot) 입자 응결로 인해 큰 크기의 입자 수가 많이 분포하며, 질량 또한 크게 나타났다.

후기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project (무저공해 자동차 사업단)와 2단계 두뇌한국 21(BK21)사업의 지원으로 수행되었으며, 연구를 지원해 주신 기관에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, N. H., Kim, K. S., Jang, B. J. and Kim, K. A., 2005, "Defining the Mechanism of Pulmonary Disease Induced by Air-Borne Particulate Matters and Development of Treatment Methods," KOSEF.
- (2) Kasper, M., 2004, "The Number Concentration of Nonvolatile Particles Design Study for an Instrument According to the PMP Recommendation," *SAE technical paper*, SAE 2004-01-0960.
- (3) Kim, S., Lee, J., Kim, G., Cho, N., Sung, Y. and Jeong, Y., 2005, "Measurement of Size Distribution of Diesel Particles: Effects of Instruments, Dilution Methods, and Measuring Positions," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 6, No. 2, pp.119~124.
- (4) Kim, H., and Choi, B., 2008, "Effect of Ethanol-Diesel Blend Fuels on Emission and Particle Size Distribution in a Common-Rail Direct Injection Diesel Engine with Warm-up Catalytic Converter," *Renewable Energy*, Vol. 33, pp.2222~2228.
- (5) Pang, X., Shi, X., Mu, Y., He, H., Shuai, S., Chen, H., and Li, R., 2006, "Characteristics of Carbonyl Compounds Emission from a Diesel-Engine Using Biodiesel-Ethanol-Diesel as Fuel," *Atmospheric Environment*, Vol. 40, pp.7057~7065.
- (6) Leahey, D. M., Jones, B. C., Gilligan, J. W., Brown L. P., Hamilton, L. J., Gutteridge, C. E., Cowart, J. S.,

- and Caton, P. A., 2007, "Combustion of Biodiesel- and Ethanol-Diesel Mixtures with Intake Injection," *SAE technical paper*, SAE 2007-01-4011.
- (7) Lee, J., Patel, R., and Ladommatos, N., 2009, "Emission Characteristics of Nano-Sized Particles in Bio-Ethanol Fuelled Engine with Different Injection Type," *Transaction of KSAE*, Vol. 17, No. 4, pp. 55~62.
- (8) Moon, G., Lee, Y., Choi, K., and Jeong, D., 2009, "An Experimental Study on the Combustion and Emission Characteristics of Blends of GTL/Biodiesel in Diesel Engine," *Transaction of KSAE*, Vol. 17, No. 5, pp.39~45.
- (9) Ko, A., Hwang, I. G., Myung, C., Park, S., and Choi, H., 2010, "Study of Particle Emission Contour Construction & Characteristics and Reduction Efficiency of Exhaust-Treatment System of Diesel Engine," *Transaction of KSME (B)*, Vol. 24, No. 8, pp.755~760.
- (10) Lee, M., Park, J., Kim, J., Jung, C., and Cha, K., 2009, "The Study on the PM Particle Characteristics of Vehicle According to the Fuel Type and Test Mode," *KSAE 2009 Annual Conference*, KSAE09-A0113.
- (11) Park, S. H., Kim, S. H., and Lee, C. S., 2009, "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.
- (12) Rakopoulos, C. D., and Giakoumis, E. G., 2009, *Diesel Engine Transient Operation – Principles of Operation and Simulation Analysis*, Springer, London, pp.149~155.
- (13) Eastwood, P., 2008, *Particulate Emissions from Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, pp.144, 391~394.