

디젤연소가능 청정연료(ULSD, Bio-Diesel, DME)엔진의 극미세입자 정량화 및 촉매 영향

이진욱^{*1)} · 배충식²⁾ · Alessandro Schönborn³⁾ · Nicos Ladommatos³⁾

송실대학교 기계공학과¹⁾ · 한국과학기술원 기계공학과²⁾ · 런던대학교(UCL) 기계공학과³⁾

Characteristics of Nano-particle Emitted by Auto-ignited Engine with ULSD, Bio-diesel and DME Fuel and Effects of Oxidation Catalyst on Its Reduction

Jinwook Lee^{*1)} · Choongsik Bae²⁾ · Alessandro Schönborn³⁾ · Nicos Ladommatos³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-343, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, University College London, London, WC1E 7JE, U. K.

(Received 24 September 2008 / Accepted 29 October 2008)

Abstract : In this experimental study, the effects of clean alternative fuels compatible with diesel combustion on nano-sized particle emission characteristics were investigated in a 0.5L auto-ignited single-cylinder engine with a compression ratio of 15. Because the number concentration of nano-sized particles emitted by automotive engine, that are suspected of being hazardous to human health and environment, might increase with engine fuel considerably and recently attracted attention. So a ultra-low sulfur diesel(ULSD), BD100(100% bio-diesel) and Di-Methyl Ether(DME) fuels used for this study. And, as a particle measuring instrument, a fast-response particle spectrometer (DMS 500) with heated sample line was used for continuous measurement of the particle size and number distribution in the size range of 5 to 1000nm (aerodynamic diameter). As this research results, we found that this measurements involving the large proportion of particles under size order of 300nm and number concentration of 4×10^9 allowed a single or bi-modal distribution to be found at different engine load conditions. Also the influence of oxygen content in fuel and the catalyst could be a dominant factor in controlling the nano-sized particle emissions in auto-ignited engine.

Key words : Auto-ignited combustion(자기착화연소), ULSD fuel(초저유황 디젤유), Bio-diesel fuel(바이오-디젤유), DME(디메틸에테르), Oxidation catalyst(산화촉매), Nano-sized particle(극미세입자), Particle number density(입자개수농도), DMS(Differential Mobility Spectrometer)

1. 서론

대도시 대기오염의 주원인이 경유자동차로부터 배출되는 매연과 입자상물질(particulate matters)임을 고려할 때, 이의 생성 메카니즘 분석 및 측정방법의 확립을 통한 입자상물질 저감기술 개발은 매우

중요하다. 이러한 입자상물질 측정 및 저감기술은 현재 디젤엔진 배출가스 제어의 핵심이며, 이는 상대적으로 우수한 열효율과 연비(CO₂저감) 특성을 가지는 청정 디젤엔진의 장래와 관련하여 반드시 해결되어야 한다. 이런 맥락에서 2000년 12월 유럽연합(EU) 환경위원회는 디젤 입자상물질 뿐만 아니라 자동차에서 배출되는 나노크기(10억분의 1

*Corresponding author, E-mail: immanuel@ssu.ac.kr

미터) 수준의 극미세입자(nano particles)로 인한 대기오염 및 인체 유해 영향 연구를 진행하면서 현재의 PM질량 측정방법을 대체할 새로운 측정법 및 기준 마련을 위해 PMP(Particle Measurement Programme)진행을 결정하였다.¹⁾ 이러한 입자상물질은 연료의 탄화수소계의 불완전 연소에 기인하며, 일부는 엔진 윤활유에 의한 연소에서 발생되는데, Fig. 1 과 같이 대부분의 입경은 2.5 μm 보다 작으며, 이 중 0.1 μm 미만의 극미세입자가 50~90%를 차지하고 있다. 이로 인한 인체 유해성(폐암 발생률)은 이미 심각한 것으로 알려져 있는데, 특히 극미세입자를 포함한 디젤 입자상물질을 발암물질로 분류하고 있다. 이는 작은 입자일수록 인체내 깊숙이 침투하여 인체 호흡기 뿐만 아니라 폐 속 깊숙이 폐포(alveoli)까지 침착될 확률이 높은 것으로 알려져 있다.^{2,3)} 따라서 이를 통해 자동차에서 배출되는 극미세입자 특성을 체계적으로 파악하여 현재 질량농도와 동시에 향후 이의 크기와 개수농도를 본격적으로 규제할 예정이다. 이러한 입자상물질의 주요 성분은 크게 고체 탄소 입자(carbon cluster)와 유기성 용제(organic solvent)로 제거할 수 있는 성분인 용해성 유기물(SOF, soluble organic fraction) 그리고 황산염(sulfuric acid; sulfates)과 이산화황 등의 무기성분(inorganic species)으로 구성되어져 있다.⁴⁾

따라서 현재에는 청정 대체연료 사용 및 후처리 기술 적용 등을 통해 보다 효과적으로 이의 저감도모하고 있다. 청정 대체연료 관련연구에서는 주로 엔진의 별도 개조없이 일정량의 바이오 디젤을 기존 경유와 혼합한 연료의 분무 및 연소성능에 대한 분석을 통해 바이오 디젤 혼합 비율의 실용 가능성에 대한 연구결과를 제시하고 있다.^{5,6)} 또한 디메틸에테르(Dimethyl Ether, 이하 DME)는 천연가스나 석탄 그리고 바이오매스 등의 다양한 에너지원으로부터 제조 가능한데, 특히 약 35%의 산소함유율과 55이상의 높은 세탄가로 인해 디젤 차량의 청정대체연료로 주목받고 있다.⁷⁾ 현재에는 단점인 저점도 특성으로 인한 연료계의 마모와 연료누설 그리고 주위 온도/압력조건에 따른 연료 물성치(탄성계수와 밀도) 변동 억제 등에 대한 연구를 주로 수행하고 있다. 이러한 연구배경을 가지고 본 연구에서

는 연소효율 측면에서 상대적으로 유리한 압축 자기착화 엔진에 적용할 수 있는 연료인 100% 순수 바이오 디젤(이하 BD100), 100% DME 그리고 황함유량이 10ppm이하인 초저유황 디젤 연료(ultra-low sulfur diesel, 이하 ULSD)를 사용하여, 다양한 엔진 작동조건별로 오직 이들 연료자체로부터 발생되는 극미세입자의 배출 특성(크기와 개수농도 분포)을 비교·분석하고자 함이 주된 목적이다.

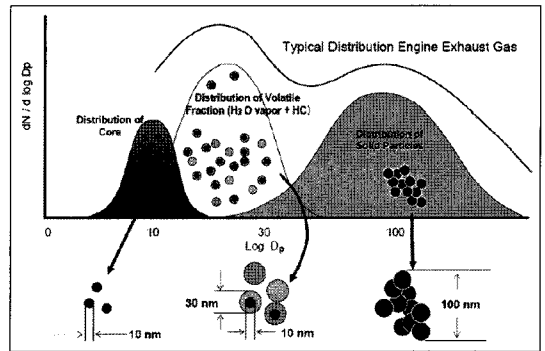


Fig. 1 Conceptual particle size distribution

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

먼저, 본 연구에서는 Table 1에 나타낸 커먼레일을 통한 고압 직접 연료분사방식의 단기통 압축착화엔진(Ricardo Hydra-설계방식적용)을 DC20kW 동력계에 연결하여 다양한 엔진운전조건에 따른 각 실험인자들의 영향을 살펴보았다.

Fig. 2는 본 연구에서 가장 핵심이 되는 소형 고압 연료시스템의 개략도이다. 실험에 필요한 일정량의

Table 1 Specification of test engine

Displacement volume	500 cm ³ (Based on 2.0L Ford Puma diesel engine)
Bore × Stroke	86 × 86 mm
Combustion chamber	Four-valve system
	Central bowl in piston
Compression ratio	15:1
Intake air supply	Naturally aspiration
Fuel equipment	Common-rail fuel system
	Direct injection
	Max. pressure of 160 MPa

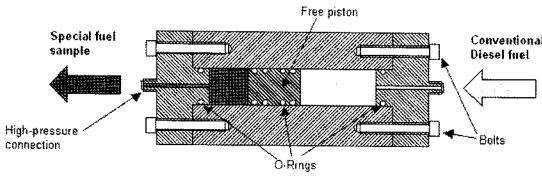


Fig. 2 Schematic of low volume bio-fuel injection system

바이오 연료를 공급하기 위한 것으로써, 기존의 디젤 연료시스템(연료필터, 고압펌프, 커먼레일, 고압파이프)을 경유하지 않은 대신에, 고압화된 커먼레일(Max. 160MPa)에 연결하여 이를 바이오 연료의 고압 분사 구동원으로 사용하였다. 또한 이들 바이오 연료의 액상 유지를 위해 가열부(200°C이내)를 설치해서 최적 상태로 연료가 공급(fuel-samples of less than 100 ml per test)되도록 설계한 특징이 있다. 이렇게 해서 생성된 고압 바이오연료는 상용 고압솔레노이드 인젝터를 통해 분사량이 정밀하게 제어되어 바이오 연료를 분사하게 된다.

Fig. 3은 이 소형 고압 연료시스템을 포함한 엔진 실험 장치이며, 특히 본 연구에서는 바이오 연료뿐만 아니라 배기 촉매를 통한 나노입자 저감 영향을 살펴보기 위해 배기매니폴드로부터 250mm 하류지점에서 Table 2와 같은 산화촉매를 설치하였다.

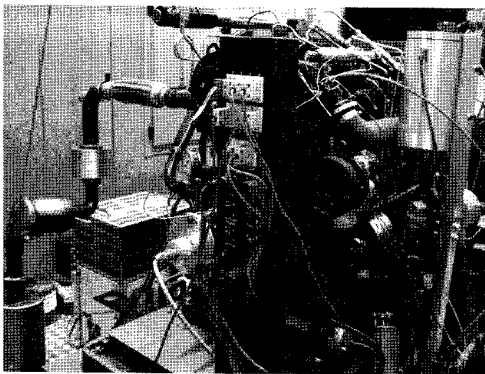


Fig. 3 Experimental set-up with bio-fuel injection system

Table 2 Specification of oxidation catalyst used

	• Honeycomb-typed monolithic substrate
	• Cell density of 400 cpsi
	• Diameter of 130 mm
	• Length of 150 mm
	• Coated by Pt-base(2g/L)

그리고 엔진에서 배출되는 극미세입자 측정을 위해 DMS(Differential Mobility Spectrometer) 500 시스템을 사용하였다. 이 시스템은 Fast Particulate Spectrometer의 일종으로, 입자 직경 5nm에서 1000nm까지의 극미세입자를 실시간으로 분석할 수 있는 특징이 있다. 이 극미세입자를 정확히 계측하기 위해, 먼저 배기관으로부터 일정 배기유량을 진공펌프를 통해 흡입하며, 흡입된 샘플유량내 1 μ m 이상 입자는 사이클론을 통해 제거된 후, 휘발성 입자제거장치를 거친 1차(회석비 4:1)회석장치와 2차(회석비 30:1)회석장치를 통해 미세 크기의 고체상 입자만이 Aerosol Charger로 들어오게 된다. 이 후, 코로나 방전을 통해 대전된 입자는 원통형의 균일한 전극채널을 따라 각 입자의 전기적 이동(electrical mobility) 특성(전하량, 유동저항)에 의해 입자크기가 분류되게 된다.

2.2 실험방법

산소함유율이 상대적으로 높은 BD100과 DME 연료를 압축착화엔진에 사용할 경우, 일반적으로 동·식물성 유지를 알코올과 반응시켜 만든 지방산 메틸 에스테르(fatty acid methyl ester, FAME)인 BD100은 유지의 지방산 조성에 따라 연소특성이 좌우된다. 반면에 DME연료의 경우, 상대적으로 점도가 매우 낮고 사용조건(온도 및 압력)에 따라 연료의 체적탄성계수와 밀도가 크게 변화하는 특징이 있다. 본 연구에서는 Table 3과 같은 물성치를 가지는 BD100(soy bean)과 DME연료를 사용하여 기존 ULSD연료와 비교해서 실험하였다.

Table 3 Properties of ULSD, BD100 and DME fuels

	ULSD	BD100	DME
Chemical formula	$C_nH_{1.8n}$	Methyl ester	$(CH_3)_2O$
Carbon (%wt)	86	77	52.2
Hydrogen (%wt)	14	12	13
Oxygen (%wt)	0	11	34.8
Density (kg/L at 20°C)	0.84	0.88	0.67
Stoichiometric A/F ratio	14.6	12.3	9.0
Cetane number	40~55	54	55~60
Kinematic viscosity (mm^2/s)	2~4.5	4.5	0.15
Low heating value (MJ/kg)	42.5	37.3	28.43
Auto-ignition temp. (°C)	250	178	235

ULSD를 제외한 바이오 연료는 실험 직전에 소형 고압 연료시스템내 연료샘플부(Fig. 2의 free piston 기준 좌측 실린더)에 모두 채워지며, 이후 1 μ m 연료 필터를 거쳐 인젝터에 연결된다. 커먼레일을 통해 free piston 우측 실린더에 공급되는 디젤연료 압력은 450bar로 일정하게 유지되도록 하였다. 그리고 좌·우측 실린더 온도가 PID제어를 통해 80°C로 유지되도록 설정하였다. 그리고 엔진실험 동안에 엔진 흡입공기온도와 엔진냉각수온도는 각각 25 \pm 3°C와 85°C를 유지하도록 하였다.

Table 4는 실험엔진의 연료와 촉매 영향에 따른 연소 및 극미세입자 배출 특성을 다양한 엔진 운전 조건별로 살펴보기 위한 본 연구의 실험조건인데, 다음과 같은 절차에 따라 이를 설정하였다. ① 엔진 회전속도 1500, 2000 그리고 2500rpm의 각 부하영역을 엔진출력 제어(EmTronix Co.사용)범위로 설정하였다. ② 본 연구에서 사용한 단기통 압축착화엔진의 기본적인 토대가 되는 상용 4기통 디젤엔진(2.0L Ford Puma diesel engine)의 실제 분사압력 분포를 참고하여, 압축착화엔진의 주요 실험인자인 분사압력을 설정하였다(Fig. 4 참조). ③ 이렇게 해서 설정된 실험조건(엔진회전수, 부하, 분사압력)하에서 먼저 ULSD연료를 사용하여, 압축 상사점후(ATDC) 크랭크각도 5~10도(COV 2%이하)사이에서 최대 연소압력이 발생하도록 분사시기를 별도 실험을 통해 설정하였다. Fig. 5는 엔진회전수 2500rpm과 지시평균유효압력(이하 IMEP) 3.5bar인 경우, 실린더내 발생된 연소압력 선도를 예로써 나타낸 것이다. ④ 그리고 BD100과 DME연료에 의한 연소 특성과 극미세입자 배출 변화 특성을 살펴보기 위해, ULSD연료와 마찬가지로 동일 실험조건(분사압력 및 분사시기)을 적용하였다.

그리고 배기매니폴드와 산화촉매의 중간지점인 촉매전단부(이하 BDOC)와 촉매 후단부(이하 ADOC)에서 측정된 극미세입자 데이터의 정확성(재현성)을 위해, 먼저 1차 희석비와 2차 희석비를 사용 연료에 상관없이 항상 일정하게 유지하였다. 이 희석장치 이전에 설치된 사이클론 내부의 오염(입경 1 μ m이상 입자 샘플시) 영향을 최소화하기 위해 주기적으로 세척하였다. 아울러 넓은 입자 계측범위 특성을

Table 4 Experimental condition

Engine speed (rpm)	IMEP (bar)	Common-rail injection	
		Pressure (bar)	Timing (CAD BTDC)
1500	2	500	4.5
	4	1000	4.5
2000	2.7	500	8
	5.7	750	8
	8.7	1000	8
2500	3.5	750	14
	6.3	1000	14

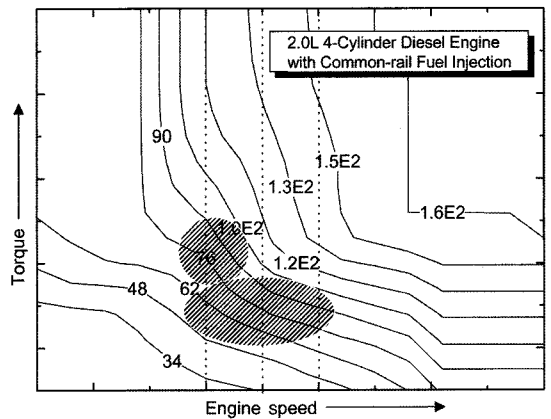


Fig. 4 Mapped data of fuel injection pressure in CRDI engine

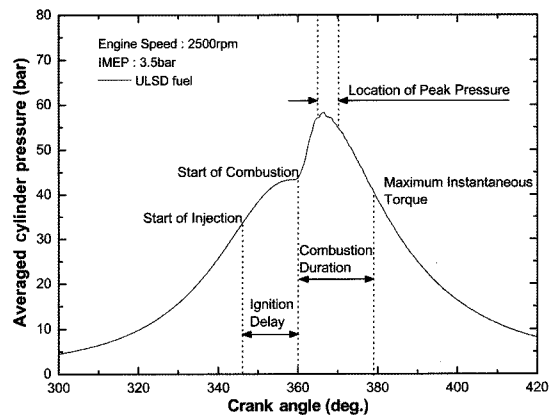


Fig. 5 In-cylinder combustion-pressure related parameters

감안하여, 실시간으로 계측된 미세입자의 동적거동 범위(dynamic range)는 항상 5% 이내로 유지되도록 하였다. 이러한 극미세입자 외의 유해 배출가스는 BDOC지점에서 측정(HORIBA사, MEXA 9100HEGR 사용)하였다.

3. 실험적 해석 결과

3.1 엔진 연소특성

Table 5는 ULSD, BD100 그리고 DME연료에 대하여 엔진회전수와 IMEP별로 연료분사기간의 변화를 나타낸 것이다. BD100과 DME연료의 경우, ULSD연료에 비해 상대적으로 낮은 발열량으로 인하여 각각 11%와 60% 분사기간이 증가하였는데, 이 증가폭은 적용한 연료분사압력을 고려할 때, 엔진회전수가 증가할수록 그리고 엔진부하가 낮을수록 커짐을 알 수 있었다. 이를 단위출력 및 시간당의 소비연료량(specific fuel consumption)으로 전 엔진 속도범위에서 비교해 볼 때, ULSD의 경우, 약 240~340 g/kWh인 반면에, BD100인 경우, 약 285~390 g/kWh의 연료소비율을 가짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 엔진회전수 2000rpm, IMEP 5.7bar, 분사압력 750bar, 분사개시 8°BTDC의 운전조건하에서 측정된 엔진 실린더내 연소압력을 바탕으로 열발생율과 질량연소율을 3가지 연료별로 비교해서 나타낸 것이다. ULSD연료의 연소과정은 착화지연과 이에 따른 연료와 공기와의 혼합지연으로 BD100과 DME연료에 비해 다소 길어짐을 알 수 있었다. 즉 바이오디젤의 경우, 기존 디젤연료보다 높은 점도를 가지지만, 세탄가가 상대적으로 높아서 착화지연시간이 줄어들게 됨을 알 수 있었다. 그리고 DME 연료에 있어서는 우수한 증발특성을 실제 분무에 반영하여 균질 혼합물을 생성할 수 있는 장점이 있기에, 보다 최적의 연소조건을 구현할 필요가 있음을 알았다.

Fig. 7은 7가지 엔진작동조건에서 배기가스 중 NOx와 THC의 농도변화를 3가지 연료별로 나타낸

Table 5 Comparison of fuel injection duration

Engine speed (rpm)	IMEP (bar)	Injection duration (μ s)		
		ULSD	BD100	DME
1500	2	472	520	745
	4	497	571	850
2000	2.7	540	586	820
	5.7	636	750	1036
	8.7	1180	1272	1570
2500	3.5	490	526	829
	6.3	610	693	1100

것이다. NOx의 농도는 연소실내부의 연소온도와 산소의 이용성에 좌우된다. DME연료의 경우, 연소

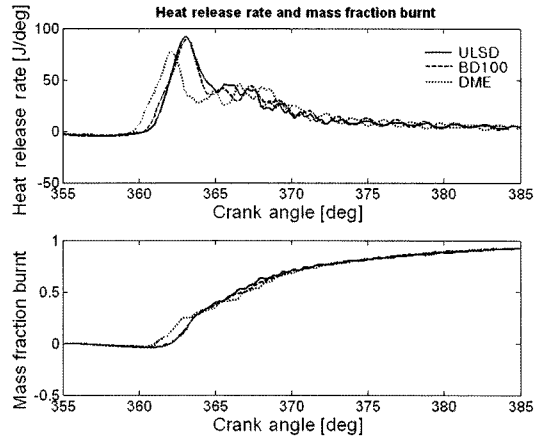
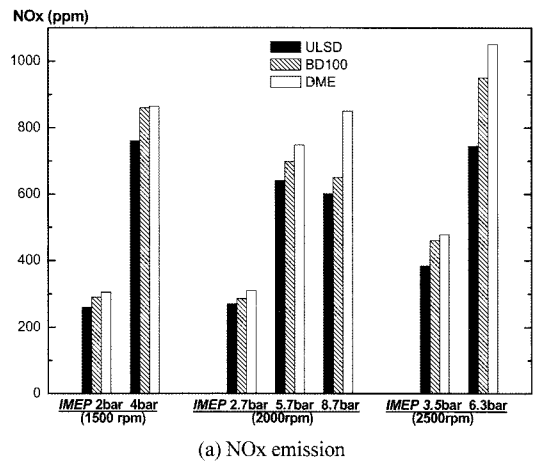
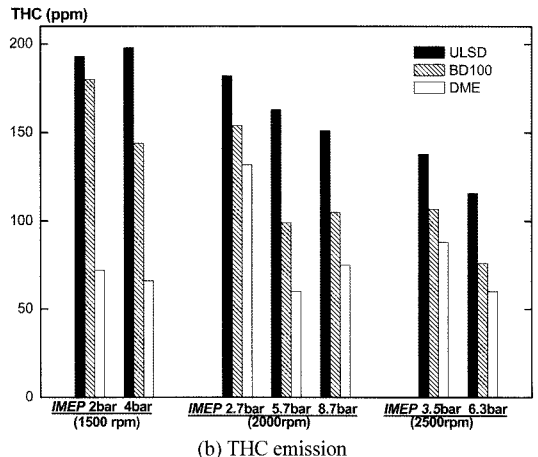


Fig. 6 Variation of heat release rate for 3 different fuels



(a) NOx emission



(b) THC emission

Fig. 7 Variation of NOx and THC emission

가 빠르고 실린더내 최고압력이 높기에 배출가스중의 NOx의 농도가 전반적으로 높게 나타나고 있다. 그리고 불완전 연소 생성물인 THC의 경우, 흡산소성의 BD100과 DME연료에 있어서 낮은 배출농도를 가짐을 알 수 있었다. 이는 연료자체에 포함된 높은 산소량의 영향으로, 자기착화방식에 따른 불완전 연소 현상이 감소된 것으로 판단된다.

3.2 극미세입자 배출특성

Fig. 8은 DMS상에서 실시간으로 측정된 극미세입자의 개수분포 스펙트럼(예)을 나타낸 것이다. 배출되는 극미세입자 분포 패턴은 매우 일정하며, 이를 바탕으로 해석시, 각 운전조건별로 정상상태 200초 동안 앙상블 평균(ensemble average)하였다.

Fig. 9는 3가지 연료별로 엔진회전수 2000rpm의 3가지 부하조건에 대하여 촉매 전후에서 측정된 극미세입자의 개수농도 분포를 나타낸 것이다. 3가지 엔진부하별로 배출되는 극미세입자의 최대 개수범위가 $4.5 \times 10^7 \sim 4 \times 10^9$ (개/cm³, 이하 단위 생략)으로 상당히 넓으며, 측정된 입자의 크기는 약 300nm이하 내임을 알 수 있었다. 즉, 사용연료보다는 엔진부하에 따라 일정값 범위내로 극미세입자의 개수농도분포가 존재함을 알 수 있었는데, 이는 자기착화가 가능한 연료의 압축착화연소 방식에 의해 결정되는 연소실내 연소의 국부적인 특성(엔진부하별)이 극미세입자의 개수농도 분포에 주된 영향을 미침을 의미한다. 이와 같이 3가지 사용연료에 관계없이, 엔진부하별 일정범위내로(IMEP 2.7bar인 경우, $4.5 \times$

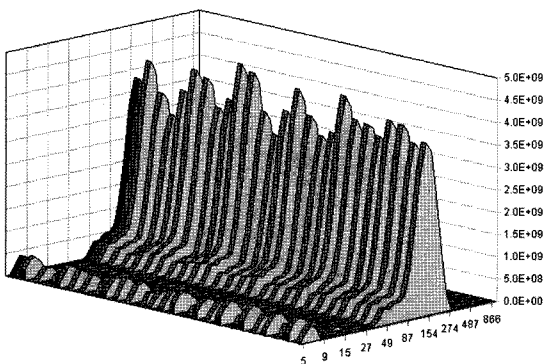
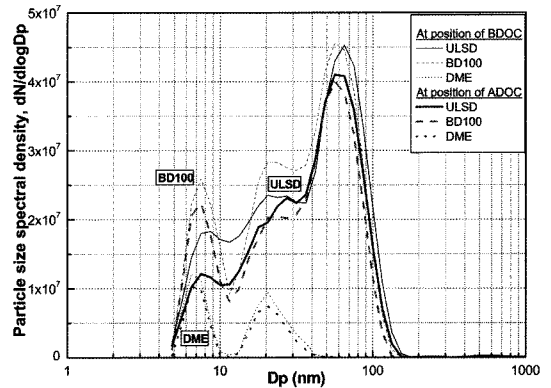
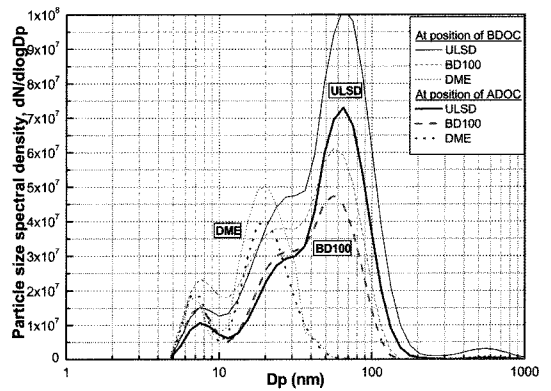


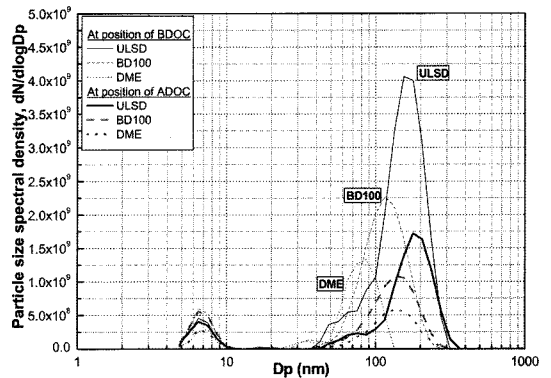
Fig. 8 Real-time dynamic particle spectrum measured by DMS system (2000rpm, IMEP 8.7bar, BDOC position)



(a) IMEP 2.7bar



(b) IMEP 5.7bar



(c) IMEP 8.7bar

Fig. 9 Effect of oxidation catalyst on nano-sized particle number distribution for three different fuels (2000rpm)

10^7 이내, IMEP 5.7bar인 경우, 1.0×10^8 이내 그리고 IMEP 8.7bar인 경우, 4.5×10^9 이내) 배출되는 극미세입자 개수 농도분포 패턴을 비교해 보면, 다음과 같

다. 먼저, 고부하인 IMEP 8.7bar인 경우, 사용연료에 관계없이 극미세입자의 배출영역은 2개로 구분(bi-modal distribution)되는데, 특히 사용연료에 의한 입자 배출량의 차이는 약 50nm 이상 입자크기영역에서 보다 뚜렷함을 알 수 있었다(ULSD > BD100 > DME 순으로 많은 미세입자 배출).

그리고 이 영역내 최대 입자개수농도를 가지는 입자의 크기(BDOC 기준)는 입자배출량처럼 ULSD, BD100 그리고 DME 순으로 각각 약 170nm, 120nm 그리고 80nm 크기로 작아짐을 알 수 있었다. 또한 이 영역내에서 사용한 촉매의 산화반응으로 인한 극미세입자의 저감 정도를 최대 입자개수농도값으로 비교해 보면, ULSD의 경우, 약 57%, BD100인 경우, 약 48% 그리고 DME의 경우, 약 50% 감소됨을 알 수 있었다. 반면에, IMEP 5.7bar인 경우, IMEP 8.7bar인 경우의 10nm 이하 입자가 배출되는 영역의 최대 입자개수농도분포값인 5×10^8 의 20%에 해당되는 1×10^8 범위내 입자 농도분포를 가짐을 알 수 있었다. 또한 IMEP 8.7bar와는 다르게, 단일 배출영역(single modal distribution)을 가지는데, 약 20nm 이하 입자의 배출농도는 ULSD보다 DME와 BD100 연료를 사용할수록 점차 증가함을 알 수 있었다.

이러한 특성은 입자개수농도분포가 상대적으로 적은(최대 4.5×10^7) IMEP 2.7bar 조건에서 BD100 연료인 경우 더욱 뚜렷해진다. 이는 BD100 연료가 ULSD보다 세탄가가 높고 연료내 산소함유량이 많음에도 불구하고 상대적으로 높은 점성과 표면장력으로 인해 분무 미립화 지연에 따른 연료의 미연소 입자 발생과 배기관내 물리적인 조건(배기압력 및 온도)에 기인하는 것으로, 저부하일수록 연료의 증발성 및 사용 연료에 적합한 최적 연소제어가 매우 중요한 것으로 사료된다. 반면에 DME 연료의 경우, 연료내 산소 함유량이 34.8%wt로 매우 높으며, 화학 구조상 탄소끼리의 결합이 없기 때문에, 연소 과정에서 입자상물질이 상대적으로 매우 적게 발생하는 현상에 기인하는 것으로 판단된다.

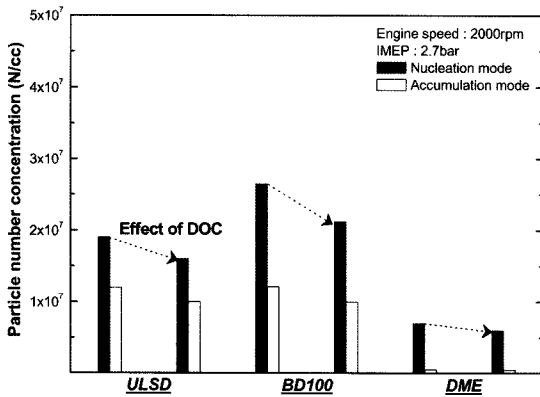
일반적으로 바이오연료를 사용할 경우, 기존 디젤연료보다 상당히 적은 양의 입자상물질(질량기준)을 배출하는 것으로 알려져 있다.⁸⁾ 이러한 낮은

PM 배출은 연료내 함유된 산소량으로 인해 연소시, 혼합물의 산화성을 증대시켜 불완전 연소를 최대한 억제할 수 있기 때문이다. 이런 맥락에서 볼 때, Fig. 9는 사용 연료에 의한 1차적 원인이 미세입자 배출에 주된 영향을 끼치고 아울러 이의 저감을 위해서는 촉매의 사용이 필수적임을 제시하고 있다.

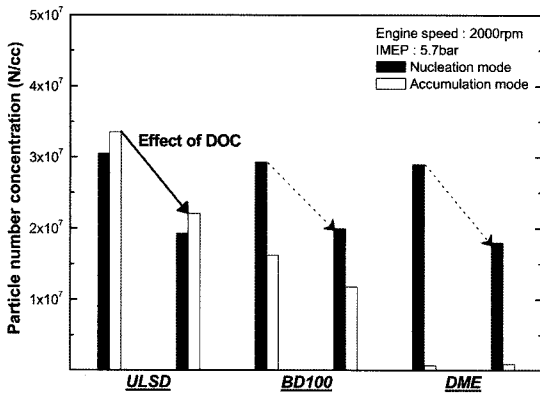
현재 적용중인 입자상물질의 질량기준 측정에서는 accumulation mode내 입자가 대부분 차지하고 있는데, 따라서 본 연구에서는 계측된 극미세입자의 개수농도분포를 나노크기인 입자의 직경이 5~50nm 범위인 nucleation mode와 입경 50~200nm 범위인 accumulation mode로 각각 구분하였다.

Fig. 10은 Fig. 9와 같은 조건하에서, nucleation mode와 accumulation mode로 구분된 극미세입자 개수농도 분포를 촉매 전후별로 비교해서 나타낸 것이다. 엔진부하가 증가할수록 accumulation mode내 배출되는 입자의 개수농도가 증가함을 알 수 있다. 반면, 엔진부하가 낮을수록 배기관내 미연소 연료 입자와 미세입자의 잔류기간 증대로 인해, nucleation mode내 입자의 개수농도가 증가하는데, 특히 BD100 연료인 경우, 이의 많은 배출 특성을 가진다. 마찬가지로 DME 연료의 경우, 저부하 조건에서는 nucleation mode내 낮은 입자의 개수농도, 그리고 고부하 조건에서는 accumulation mode내 낮은 입자의 개수농도 배출특성을 가짐을 알 수 있었다. 또한 사용한 촉매에 의한 입자 저감성능은 2가지 모드내 일정한 저감성능을 가지는데, 특히 고부하 조건에서의 accumulation mode내 배출되는 입자의 저감특성이 상대적으로 우수함을 알 수 있었다.

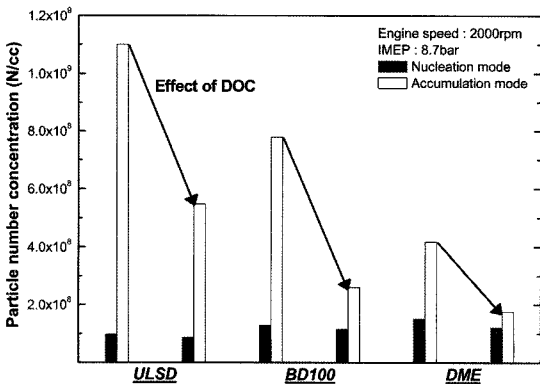
Fig. 11은 BD100과 DME 연료에 비하여, 상대적으로 많은 입자를 배출하는 ULSD 연료에 대하여 nucleation mode와 accumulation mode별로 전 엔진운전 조건에서 촉매전후 측정된 극미세입자의 개수농도 분포를 나타낸 것이다. 엔진회전수가 낮을수록 nucleation mode내 입자가 증가하며, 촉매에 의한 입자 저감 성능은 accumulation mode내 입자일수록 보다 우수함을 알 수 있었다. 따라서 향후 nucleation mode내 배출되는 극미세입자의 저감에 대해 보다 집중적인 연구(연료별 최적연소 또는 침탄 후처리기법 적용)가 필요함을 알았다.



(a) IMEP 2.7bar



(b) IMEP 5.7bar

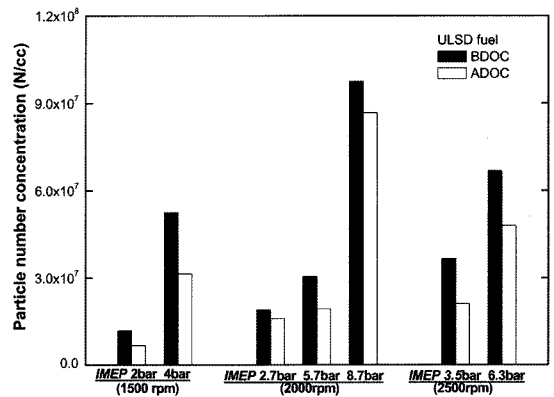


(c) IMEP 8.7bar

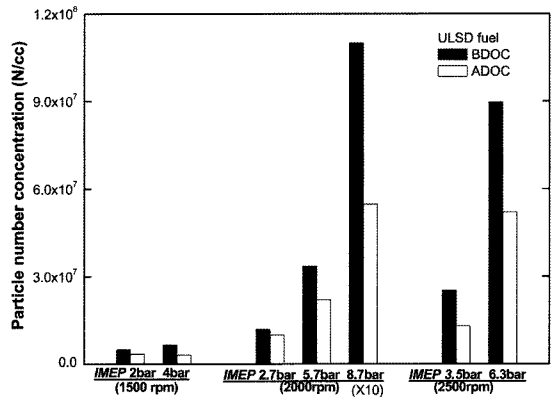
Fig. 10 Comparison of particle number concentration between nucleation and accumulation mode (2000rpm)

4. 결론

본 연구에서는 압축착화 가능한 기존 ULSD연료와 BD100그리고 DME 연료로 작동되는 디젤엔진



(a) Nucleation mode



(b) Accumulation mode

Fig. 11 Comparison of particle number concentration between two modes for ULSD fuel with various engine operating conditions

(촉매부착)에서 배출되는 극미세입자(nano-sized particle)의 배출 특성을 비교 분석하고자, 동일 연료 분사압력과 분사시기를 주된 실험인자로 설정하여 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 사용한 디젤엔진의 주된 운전영역인 엔진회전수 2000rpm조건에서 배출되는 극미세입자의 입자개수범위는 약 4×10^9 범위내이며, 측정된 미세입자의 크기는 약 300nm이하내 존재함을 알 수 있었다.
- 2) 엔진부하에 따라 배출되는 극미세입자의 개수농도 분포 형태는 달라지며(single-modal 및 bimodal distribution), 50nm 이상 입자크기영역에서의 미세입자의 배출량은 사용 연료내 함유된 산

소량에 따라 주된 영향을 받음(ULSD > BD100 > DME순)을 알 수 있었다. 하지만 엔진부하가 낮을수록 약 20nm이하 입자의 배출농도는 ULSD보다 DME와 BD100연료를 사용할수록 증가함을 알 수 있었다.

- 3) 특히 본 연구에서는 극미세입자의 개수농도분포특성을 입경 5~50nm범위인 nucleation mode와 50~200nm범위인 accumulation mode로 구분할 수 있었다. 엔진부하가 증가할수록 accumulation mode내 배출되는 입자의 개수농도는 증가하였는데, 이는 촉매의 사용에 의해 저감할 수 있음을 알았다. 반면에 엔진회전속도가 저속일수록 nucleation mode내 입자는 증가하는데, 이는 미연소연료입자(micro-fuel droplet)와 저 배기유량으로 인해 미세입자의 잔류기간(residence time) 증가에 따른 것으로 판단된다.
- 4) 그리고 상대적으로 가장 적은 극미세입자 배출량을 가지는 DME연료의 경우, 저부하 조건에서는 nucleation mode내 낮은 입자의 개수농도 그리고 고부하 조건에서는 accumulation mode내 낮은 입자의 개수농도 배출특성을 가짐을 본 연구를 통해 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2007-611-D00007)로써, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- 1) UN/ECE GRPE, "Programme Overview: GRPE Particle Measurement Programme," 42nd GRPE Agenda-Item(II), 2001.
- 2) California Environmental Protection Agency, Health Risk Assessment for Diesel Exhaust, Public and Scientific Review Panel(Draft), 1997.
- 3) HEI, Understanding the Health Effects of Components of the Particulate Matter Mix: Progress and Next Steps, Health Effects Institute, USA, 2002.
- 4) M. KASPER, "The Number Concentration of Non-Volatile Particles Design Study for an Instrument According to the PMP Recommendation," SAE 2004-01-0960, 2004.
- 5) H. K. Suh, S. W. Park, S. I. Kwon and C. S. Lee, "Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Bio-diesel Fuel," Transactions of KSAE, Vol.12, No.6, 2004.
- 6) R. L. McCormick, J. R. Alvarez, M. S. Graboski, K. S. Tyson and K. Vertin, "Fuel Additive and Blending Approaches to Reducing NOx Emissions from Biodiesel," SAE 2002-01-1658, 2002.
- 7) H. W. Wang, L. B. Zhou, D. M. Jiang and Z. H. Huang, "Study on Performance and Emissions of Compression Ignition Engine Fueled with Dimethyl Ether," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, Vol.214, pp.101-106, 2000.
- 8) J. F. Reyes and M. A. Sepulveda, "PM-10 Emission and Power of a Diesel Engine Fueled with Crude and Refined Biodiesel from Salmon Oil," Fuel, Vol.85, pp.1714-1719, 2006.

- 1) UN/ECE GRPE, "Programme Overview: GRPE