

바이오디젤 사용에 따른 경유승용차의 나노입자 배출특성 연구

권상일* · 이창식†

A Study on the Nano-particles Emission Exhausted from Diesel Passenger Vehicle According to Using Biodiesel

Sang Il Kwon, Chang Sik Lee

Key Words: Nano Particle(미세입자), Particulate Matters(입자상물질), Condensation Particle Counter(입자개수기), Driving Cycle(주행모드)

Abstract

This paper is to investigate the characteristics of exhaust emissions and nano-particle emission from diesel passenger vehicle according to using biodiesel fuel as an alternative fuel. In this work, the particulate matters (PM) of exhaust emissions in diesel engine were investigated by number of particles and mass measurement. The mass of the total PM was measured using the standard gravimetric measurement method, the total number concentrations were measured on a ECE15+EUDC driving cycle using Condensation Particle Counter (CPC). Total PM emission was reduced 2~38% and number concentration was reduced 1~27% according to increasing blended ratio of biodiesel with diesel fuel. Total PM emission was reduced more than particle number emission because volatile particles were measured in total PM but were not measured in particle number emissions.

1. 서 론

최근 유가 상승과 화석연료의 고갈 및 지구온난화 문제로 국제사회에서 국가별 CO₂ 배출량을 규제하려는 기후변화협약이 발효되어 대체연료에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 특히 경유와 연료 특성이 비슷하고 높은 에너지 밀도를 가지고 있어서 현재의 상용 경유자동차 엔진의 구조변경 없이 사용 가능한 바이오디젤은 경유자동차의 큰 문제점인 입자상물질(PM)을 크게 저감시키는 연료로 평가되고 있고⁽¹⁻³⁾, 이산화탄소를 소비하는 식물을 다시 에너지원으로 사용하기 때문에 온실가스를 저감시키는 장점을 가지고 있다⁽⁴⁾.

그러나 최근에는 중량단위의 총 입자상물질(PM)보다 미세입자가 인체위해성 측면에서 강조되고 있으나 바이오디젤 사용에 따른 미세입자 저감특성은 잘 알려져 있지 않다.

자동차로부터 배출되는 미세입자에 대한 연구는 경유자동차를 중심으로 광범위하게 연구되고 있으며^(5,7), UNECE-GRPE 미세입자 측정 프로그램(PMP: Particulate Measurement Program)에서는 향후 디젤자동차의 미세입자 규제 설정을 위한 공동연구를 수행하고 있다⁽⁸⁾.

현재 경유차에서 배출되는 입자상물질에 대한 규제기준은 입자크기에 관계없이 전체 입자상물질에 대한 중량단위규제를 사용하고 있으나, 이를 보완하기 위한 다양한 미세입자 측정장치가 개발되어 왔다.

UNECE-GRPE 미세입자 측정 프로그램(PMP: Particulate Measurement Program)에서는 이미 모든 미세입자 측정장치에 대한 법규 적용성 검토를 통하여 규제에 적합한 장치 선정 및 시험방법을 설정하였다.

(2007년 2월 14일 접수 ~ 2007년 3월 8일 심사완료)

*한양대학교 대학원 기계공학과

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : cslee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-8963 FAX : (02)02-2281-5286

본 연구에서는 PMP에서 추천하고 있는 시험방법에 따라 정용량 시료채취장치로부터 채취한 배출가스를 회석장치와 CPC(Condensation Particle Counter)를 사용하여 국내에서 사용되고 있는 바이오디젤의 혼합비율별 배출가스 및 미세입자를 측정하여 실시간 주행모드에 따른 미세입자와 총 입자상물질의 상관관계를 분석하였다.

또한 바이오디젤 사용에 따른 미세입자 저감특성을 파악하기 위하여 혼합비율별 미세입자 배출특성을 조사하였다. 이러한 연구는 향후 저공해기술 평가 기준 및 경유차 미세입자 규제기준 마련의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 차량 및 연료

실험은 DOC 부착 경유승용차를 사용하였으며, 그 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of test vehicle

Model	Verna 1.5
Engine type	D4FA
Engine displacement	1493cc
Max. power	112/4000(ps/rpm)
Transmission	A4
Aftertreatment equipment	DOC
Injection type	DI

또한 본 실험에 사용된 연료는 대두유를 시중 경유 연료에 5%(BD5), 10%(BD10), 20%(BD20), 30%(BD30), 40%(BD40)씩 각각 혼합한 연료와 순수 100%(BD100) 바이오디젤 및 일반 시중경유연료(ULSD)를 대상으로 하였으며, Table 2에 각각의 연료에 대한 물성을 나타내었다.

연료 분석항목은 국내 석유사업법 및 대기환경보전법에서 규정하고 있는 인화점, 유동점, 90%유출온도, 동점도, 밀도, 세탄지수, 황함량, 필터막힘점 및 윤활성 등 9개 항목을 대상으로 하였으며 분석방법은 한국산업규격에서 정의하고 있는 시험방법으로 분석하였다.

분석결과 바이오디젤 함유량이 증가함에 따라 동점성 및 밀도는 증가하였고 황함량은 감소하였다. 또한 윤활성이 향상되는 것으로 나타났다.

2.2 실험장치 및 방법

배출가스 실험장치는 차대동력계, 보조운전장치, 시료채취장치, 정용량회석터널, 입자상물질측정장치 및 배출가스 분석기 등으로 구성되어있다.

차대동력계를 사용하여 주어진 모드를 주행하면서 배출되는 배기가스를 측정하였고, 정확한 총입자상물질 측정을 위하여 시료채취 온도는 회석공기에 의해 52°C 이하로 제어하였다. 총입자상물질은 자동차가 주행하면서 배출되는 배기가스를 불소탄화로 코팅된 유리섬유필터를 통과시켜 채취하고 이를 운습도가 제어된 চে임버에서 8시간 방치후 전자저울을 사용하여 전후 필터 무게로 측정한다. 또한 가스상물질은(CO, HC, NOx) HEPA필터에 의해 여과된 주변공기와 회석한후 정용량

Table 2 Properties of test fuel

Item of test	Result of test						
	ULSD	BD5	BD10	BD20	BD30	BD40	BD100
Pour point (°C)	-30.0	-27.5	-27.5	-22.5	-20.0	-17.5	0.0
Flash point (°C)	54	56	57	58	61	66	139
Viscosity (40°C. cst)	2.8	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	4.0
Distillation (90%, °C)	333	335	336	337	337	339	
Sulfur content (ppm)	18	17	16	14	12	11	1
Density 15°C (kg/m ³)	828	831	833	839	844	850	884
Centan index	56	56	56	56	55	55	
Blockng point of filter(°C)	-20	-18	-17	-16	-16	-11	1
Lubrication index(μm)	326	189	184	178	167	164	

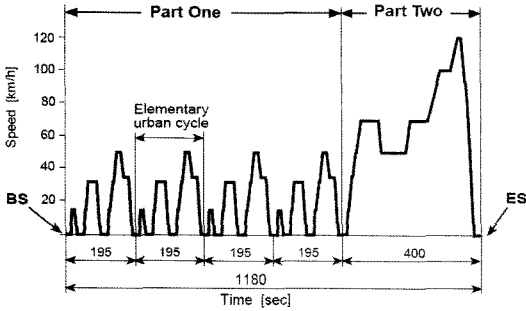


Fig. 1 Driving pattern of ECE15+EUDC mode

시료채취장치에서 채취하여 4개의 샘플백에 저장후 분석기에 의해 분석하였다.

실험은 규제시험방법에 따라 시험차량을 온도 20~30°C 및 습도 50%로 제어된 시험실에서 6시간 이상 소킹후 Fig. 1과 같이 한국과 유럽에서 규제모드로 사용하는 NEDC(ECE15+EUDC)모드에 의해 주행하면서 측정하였다.

2.3 미세입자 측정장치

미세입자를 측정하기 위한 장치 구성도를 Fig. 2에 나타내었고, 주요 장치는 사이클론, 1, 2차 희석터널, 증발 튜브 및 CPC(Condensation Particle Counter, TSI 3010D)로 구성되어 있다. 시료는 희석터널내의 총입자상물질 측정 프로브 근처에서 채취하였고, 2.5 μm이상 크기의 입자를 제거하기 위해 사이클론이 사용되었다. 1차 희석터널은 입자의 응축을 피하기 위하여 채취된 시료를

150±5°C로 가열시키면서 희석하였으며, 휘발성 입자를 제거하기 위하여 300°C로 가열하는 증발튜브를 사용하였다.

휘발성입자의 경우 희석온도에 따라 측정되는 농도 변화가 커서 규제대상에 적합하지 않다는 판단하에 PMP 규제 시험방법에서는 측정대상에서 제외되었다⁹⁾. 마지막으로 CPC로 들어가는 시료가 온도 35°C이하 및 개수농도가 10⁴(N/cm³)이 되도록 2차 희석터널에 희석한 후 측정효율이 D10(10%효율) 16±1 nm, D25(25%효율) 18±2 nm, D50(50%효율) 23±3 nm, D90(효율) 37±4 nm가 되는 CPC(TSI 3010D)를 사용하여 입자 개수농도를 연속으로 측정하였다.

미세입자를 측정하는 CPC의 원리는 입자를 하나씩 레이저 빔에 통과시켜 일정한 각도에서 반사되는 빛을 분석하는 것이다. 단 이러한 방법은 300 nm이상의 입자만 측정가능 하므로 입자에 액체를 농축함으로써 측정 가능한 크기로 성장시켜야 한다. 본 연구에서 사용한 CPC의 경우 미세입자를 부탄올 포화증기로 덮혀 있는 가열체입버를 통과시킴으로서 입자와 부탄올 증기를 혼합하고 이 혼합기를 급속히 냉각시킴으로서 성장시킨다. 위와 같은 CPC의 측정원리를 Fig. 3에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 규제물질

실험에 사용된 바이오디젤 혼합비에 따른 CO, THC,

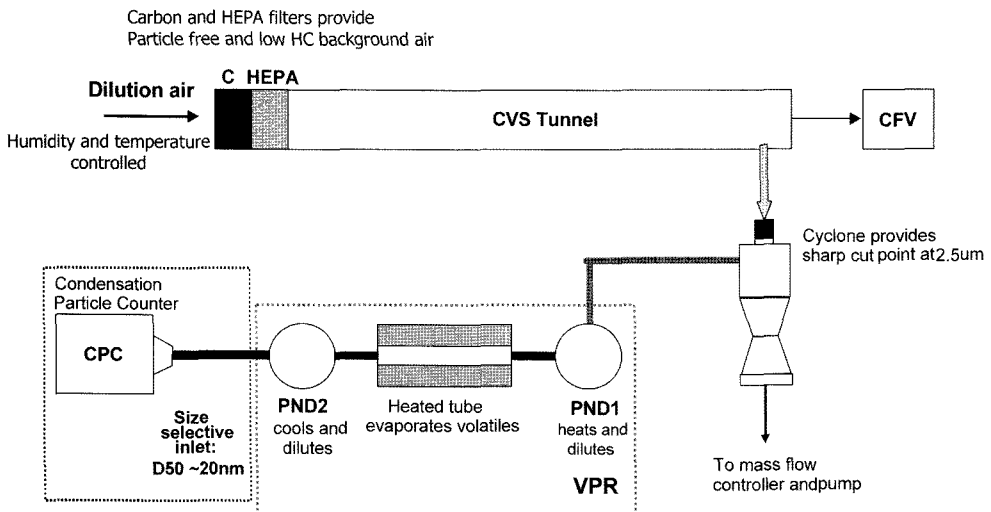


Fig. 2 Schematic diagram of particle measurement system

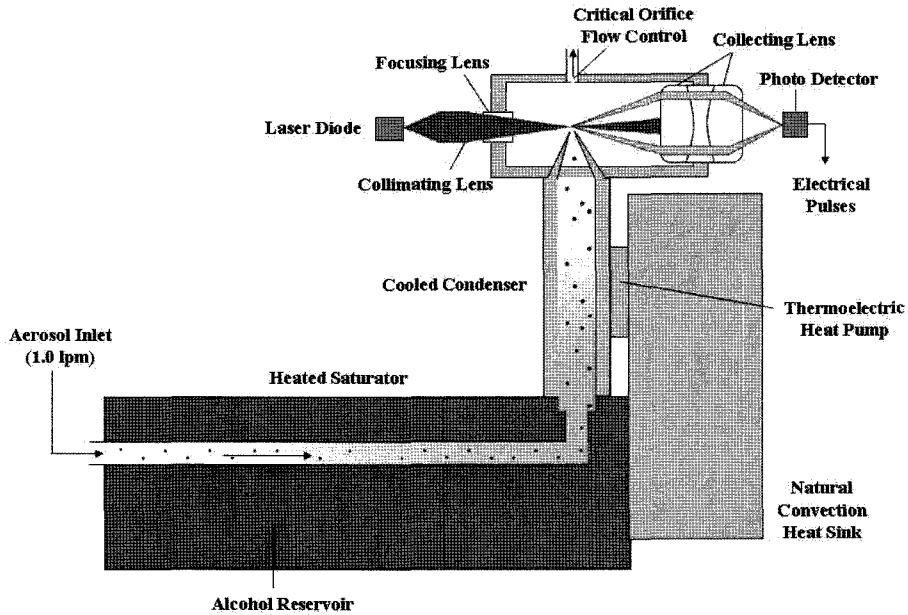


Fig. 3 Schematic diagram of CPC

NOx, PM에 대한 배출가스 저감특성을 측정, 분석하였다.

입자상물질은 바이오디젤 혼합비 증가에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 혼합비 20% 이후에서 뚜렷한 저감특성을 보여주어 혼합비 20% 미만에서는 2~9% 저감되었으나, 혼합비 20% 이상에서는 23~38%로 높은 저감률을 보여주었다. 반면 질소산화물의 경우 합산소연료인 바이오디젤의 특성에 의해 혼합비 증가에 따라 증가하는 경향을 보여주었고, 혼합비 40% 이상에서 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 일산화탄소 및 탄화수소의 경우 혼합비 증가에 따라 감소하였으나 산화촉매의 영향으로 감소율이 크지 않았다.

Fig. 4의 결과에서 알 수 있듯이 질소산화물의 증가를 억제하면서 입자상물질 저감을 최대화하기 위해서는 20~30%의 바이오디젤 혼합이 필요한 것으로 판단된다.

3.2 입자 개수 농도

ECE15+EUDC 모드 주행시 배출되는 실시간 입자 개수농도를 바이오디젤 혼합비에 따라 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 굵은 선은 차량 속도/시간 궤적을 나타낸 것이다. 전체 운전영역에서 가속시 입자 배출이 높게 나타났고 이는 가스 상의 오염물질 배출특성과 동일한 경향을 보였다. 또한 바이오디젤 혼합비 증가에 따라 전체적으로 입자 배출이 감소되었으나 가속구간보다 감속 및 정속구간에서 입자 배출 저감 효과가 크게 나타났다. 이는 합산소 함유량에 의한 연소 개선 효과가 운전조건이 급격히 변하는 가속구간보다 안정된 운전조건에서 크게 나타나는 데에서 기인하는 것으로 판단된다.

Figure 6은 바이오디젤 혼합비에 따른 총 입자 배출량을 도시한 것이다. 이 선도에서 알 수 있는 바와 같이 혼합비 증가에 따라 입자의 배출이 감소되었으나 혼합비 30% 이상에서 감소의 경향이 뚜렷하게 나타났다.

각 주행특성별 입자 배출농도를 분석하기 위해 Fig. 7에 모드별 배출되는 입자 개수 농도를 나타내었다. 저속구간인 ECE15구간에 비해 고속 고부하 조건인 EUDC구간에서 4배 이상 입자가 배출되었고, 이는 더

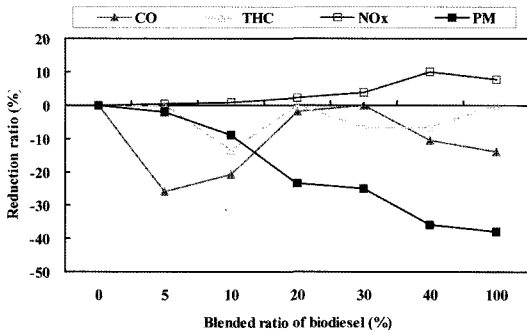
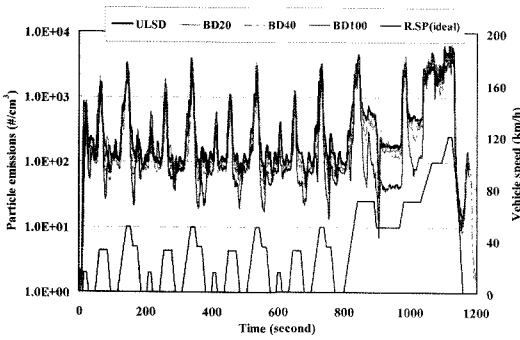
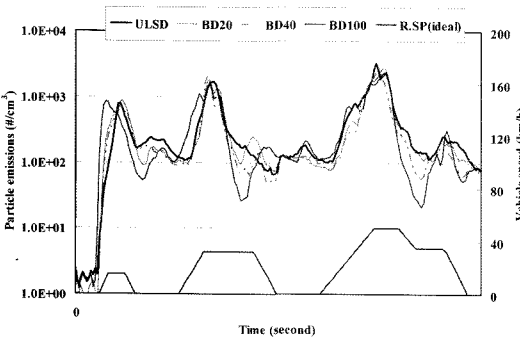


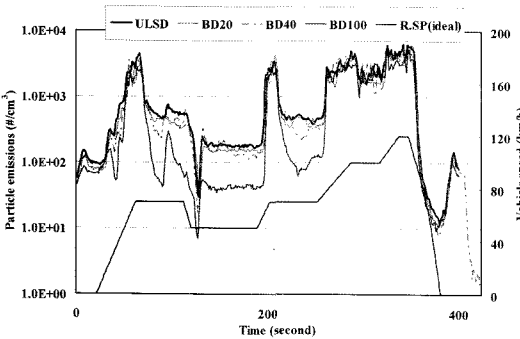
Fig. 4 Reduction characteristics of exhaust emission by blended ratio of biodiesel



(a) NEDC(ECE15+EUDC)



(b) ECE



(c) EUDC

Fig. 5 Real time particle number concentration by blended ratio of biodiesel

많은 연료가 분사되는 고속구간에서는 긴 확산연소기간, 높은 연소온도 및 팽창 행정 구간에서의 매연 산화율 감소에 기인한다. 또한 바이오디젤 혼합비 증가에 따른 입자 배출 저감율은 ECE15 및 EUDC구간에서 모두 비슷한 저감율을 보였으나 BD100 연료 사용시에는 ECE15보다 EUDC 구간에서 크게 저감됨을 보여 주었다.

이는 BD100 연료 사용시에 입자 저감특성이 저속구간보다 고속구간에서 크게 나타남을 보여 주었으며 향

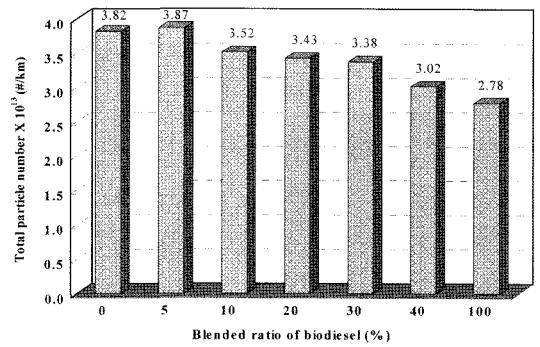


Fig. 6 Total particle number according to blended ratio of biodiesel

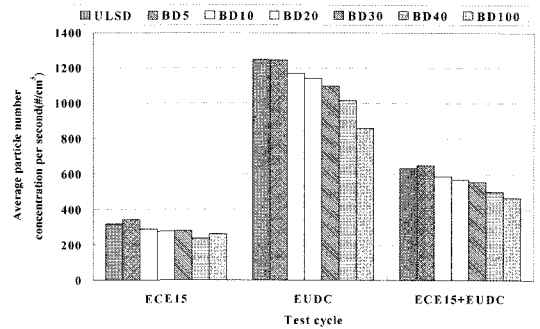


Fig. 7 Average particle number concentration according to test cycle

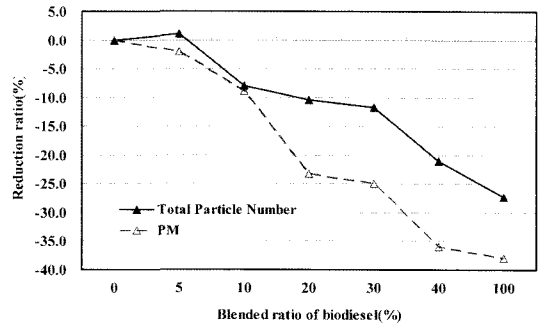


Fig. 8 Comparison of total particle number and PM reduction ratio by blended ratio of biodiesel

후 바이오디젤 사용시 엔진 최적화에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

3.3 PM과 미세입자 배출특성 비교

바이오디젤 혼합비율에 따른 PM과 미세입자 배출 저감율을 Fig. 8에 나타내었다. 실험결과 바이오디젤 혼합비 증가에 따라 PM 및 입자 배출이 모두 저감되었으나 입자 보다 PM 저감이 크게 나타났다. 이는 Schro-

der 등⁽¹⁰⁾의 결과에서 볼수 있는 바와 같이 경유에 비해 탄소수 및 휘발성유기 화합종이 많은 바이오디젤 연료의 특성으로 인하여 혼합비의 증가에 따라 PM 중량에 영향이 적은 작은 크기의 탄화수소 계열의 휘발성입자들이 증가함에 기인하는 것으로 사료된다. 또한 입자의 경우 바이오디젤 혼합비 40% 이상에서 20% 이상의 저감율을 보인데 반해 PM의 경우 혼합비 20% 이상에서 23~40%의 저감율을 나타내었다. 이러한 결과로 바이오디젤 혼합비 40% 이상에서 휘발성 입자성분이 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

ECE15+EUDC 모드 주행시 바이오디젤 사용에 따른 규제물질 및 입자의 저감특성을 파악하기 위해 바이오디젤 혼합비율별 경유승용차로부터 배출되는 CO, HC, NOx, PM 및 입자 개수농도를 측정 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 바이오디젤 혼합비 증가에 따라 입자상물질은 전체적으로 감소하며, 특히 혼합비 20%이상에서 뚜렷한 저감특성이 나타나 약 23%~38% 저감되었다. 반면 질소산화물은 혼합비 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보이며, 40%이상의 혼합비에서 크게 증가하는 경향을 나타내었다.

2) 입자 배출은 전체 운전영역에서 가속시 높게 나타났고, 바이오디젤 혼합비 증가에 따라 감소하였다. 특히 가속구간보다 감속 및 정속구간에서 입자 배출 저감효과가 크게 나타났다.

3) 각 주행특성별 입자 배출농도에서는 저속구간인 ECE15 구간에 비해 고속 고부하 조건인 EUDC 구간에서 4배이상 입자가 배출되었다. 또한 바이오디젤 혼합비 증가에 따른 입자 배출 저감율은 ECE15 및 EUDC 구간에서 모두 비슷한 저감율을 보였으나 BD100 연료 사용시에는 ECE15보다 EUDC 구간에서 크게 저감됨을 보여 주었다.

4) 바이오디젤 혼합비율에 따른 PM과 미세입자 배출 비교 결과 바이오디젤 혼합비 증가에 따라 PM 및 입자 배출이 모두 저감되었으나 입자 보다 PM의 저감특성이 뚜렷하게 나타났다.

나노 입자의 경우 바이오디젤 혼합비 40% 이상에서 20% 이상의 저감율을 보인데 비하여 PM의 경우 혼합

비 20% 이상에서 23~40%의 저감율을 나타내었다. 이러한 결과로부터 바이오디젤 혼합비 40% 이상에서 휘발성 입자성분이 증가하는 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Y. F. Lue, Y. Y. Yeh and C. H. Wu, "The Emission Characteristics of a small D.I. Diesel Engine Using biodiesel Blended Fuels", Journal of Environmental Science and Health, Vol. 36, No. 5, 2001, pp. 845~859.
- (2) K. Lang, J. Higgins, P. Nazzaro, S. Howell and G. Johnson, "Biodiesel: On the Road to Fueling the Future", National Biodiesel Board, 2001.
- (3) K. H. Ryu, Y. J. Yun and Y. T. Oh, "The Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel as an Alternative Fuel for IDI Diesel Engine", Transactions of the KSAE, Vol. 11, No.1, 2003, pp. 72~78.
- (4) Z. Samaras, "Overview of the EU DG TREN Particulate Project", Proc. of 7th ETH Zurich Conference on Combustion Generated Nanoparticles, 2003.
- (5) A. G. Konstandopoulos, "The Diesel Exhaust After-treatment (DEXA) Cluster of the EU Growth Programme", Proc. 7th of ETH Zurich Conference on Combustion Generated Nanoparticles, 2003.
- (6) Y. Kumagai, "Studies on Retrofit of CR-DPF and Diesel Particle Size Measurements", Proc. of 5th ETH Zurich Workshop on Combustion Generated Nanoparticles, 2001.
- (7) J. M. Dunne, "The GRPE Particulate Measurement Programme: Phase 2 Conclusions and Outlook", Proc. of 7th ETH Zurich Workshop on Combustion Generated Nanoparticles, 2003.
- (8) Markus KASPER, "The number Concentration of Non-Volatile Particles Design Study for an Instrument According to the PMP Recommendation", SAE 2004-01-0960, 2004.
- (9) GRPE, "Conclusion on Improving Particulate Mass Measurement Procedures and New Particle Number Measurement Procedures Relative to the Requirements of The 05 Series of Amendments to Regulation No. 83", 48th GRPE agenda item 2, 2004.
- (10) O. Schroder, J. Krahl and A. Munack, "Environmental and Health Effects Caused by the Use of Biodiesel", SAE 1999-01-3561, 1999.