

PPS시스템 이용 바이오디젤 혼합율에 따른 극미세입자 배출특성 비교

권지원* · 김민식* · 정명철* · 이진욱**†

Comparison of Nano-particle Emission Characteristics in CI Engine with Various Biodiesel Blending Rates by using PPS System

J. W. Kwon, M. S. Kim, M. C. Chung and J. W. Lee

Key Words: PPS System(Pegasor Particle Sensor, 입자측정 센서), Nano-Particle(극미세입자), Bio-Diesel(바이오 디젤), PM(입자상물질)

Abstract

The main purpose of this study is to analyze and compare the nano-particle emission characteristics by 3-different biodiesel blending rates in a CI engine. Nano-particle number density emitted from various operating conditions of compression ignition engine can be investigated by using the PPS (Pegasor Particle Sensor) system. Namely, some particle charged through the corona discharge in real-time can be measured by PPS system. Under the steady state operation of the 2.0L CRDi diesel engine with different operating condition and biodiesel blending rates, the nano-particle number density was analyzed at the downstream position of DOC system. As this research result, more engine load-speed and higher the concentration of biodiesel blending rate showed that the nano-particle number density decreases. Also we found that DOC system for clean diesel engine is effectively useful instrument to reduce diesel particulate matter as resource of nano-particle generation.

1. 서 론

최근 고유가 문제와 고효율·고성능 디젤엔진 개발에 따른 배출가스 규제를 만족하는 친환경·저공해 차량이 판매되면서 소비자는 디젤차량에 대한 인식이 바뀌고 있으며, 승용 디젤차량 판매량은 증가추세를 가지고 있다.

바이오디젤은 기존 화석연료의 대체에너지로 연구 및 상용화 되고 있다. 1990년대 초부터 유럽을 중심으로 바이오디젤 혼합연료가 상용차부분에서 보급을 시작으로 승용차 부분으로 연료 보급 비중이 확대되고 있으며

혼합비중 또한 상향되고 있다⁽¹⁾. 국내에서는 2012년부터 기존경유에 2%를 첨가하는 것을 법적으로 시행하고 있으며, 바이오디젤 업체는 2010년 기준 15개의 제조업체로 증가하여 연간 생산 1,042,400 kL 규모로 바이오디젤 시장은 점차 커질 것으로 판단된다. 하지만 디젤엔진의 배출가스 중 입자상 물질(PM)을 1998년 미국 CARB에서 발암물질로 발표하면서 인체 유해성 측면에서 입자상 물질 저감이 클린디젤 존폐를 놓고 반드시 해결해야 할 과제로 남았다. 입자상 물질의 분포는 중량 및 수량기준에 따라 입자의 크기별 분포가 달라지는 특징이 있다. 수량기준으로 3~30 nm에 분포되어 있으며, 10~20 nm에 집중되어 있다⁽²⁾. 최근 연구결과 극미세입자(nano-sized PM)는 호흡 시 쉽게 인체에 유입되고 일부 입자는 세포막이나 혈관에 유입될 수 있으며, 입자크기가 작을수록 인체 유해도는 커지는 것으로 알려져 있다⁽³⁾. 따라서 유럽·미국을 중심으로 입자측정프로그램(PMP, Particle Measurement Program) Working Group을

(2012년 6월 13일 접수 ~ 2012년 8월 11일 심사완료, 2012년 9월 1일 게재확정)

*충실대학교 대학원 기계공학과

**충실대학교 기계공학과

†책임저자, 종신회원, 한국액체미립화학회

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : (02) 820-0929 FAX : (02) 820-0668

운영하여 기존의 입자상 물질(PM)을 계측법 보완·개발을 추진하고 인체의 유해성을 연구할 뿐만 아니라 나노입자측정법의 표준화를 추진하고 있다⁽⁴⁾. 이에 따라, 2014년 시행되는 유럽 배출가스 표준안 규제치(EURO 5b/5b+, 6×10^{11} #/km)에서는 입자상 물질(PM)의 무게와 더불어 개수에 대해서도 규제할 예정이다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 배출되는 극미세입자상 물질(PM)을 계측할 수 있는 PPS(Pegasor Particle Sensor)시스템을 사용하여 바이오디젤 혼합물과 엔진 작동조건에 따른 극미세입자 배출 농도를 정량적으로 비교·분석하였다.

2. 극미세입자 특징

디젤엔진에서 주로 배출되는 입자상 물질(PM)은 연료의 탄소가 연소열에 의해 분리된 것이다. 입자상 물질은 호흡기 장애뿐만 아니라 발암 물질로도 판정되어 인체에 대한 유해도가 입증 되었다.

입자상 물질의 입자 크기별 분포 형태는 중량기준(accumulation mode) 및 수량기준(nucleation mode)에 따라 달라진다. Fig. 1을 보면 중량 기준으로 입자상 물질의 분포상태는 입자 직경 약 0.1~0.25 μm 에 집중되어 있으며, 입자 개수 기준 입자상 물질은 입자직경 50 nm 이하 영역에 주로 집중되어 있다. 디젤 극미세입자는 입자수량 면에서 대부분을 차지하고 있는 입자직경 50 nm 이하의 입자를 총칭하는 것이 일반적이다⁽⁶⁾.

입자상 물질의 주요 구성성분은 크게 용해성 유기물(SOF, soluble organic fraction)과 무기성분(inorganic species)으로 나눌 수 있다. 디젤 극미세입자는 입자 측정 방법 및 조건에 따라 입자크기가 변하게 되는 특징이 있는데, 이는 배출가스에 존재하는 수분성분, 용해성 유기물, 황성분 등이 응축과 증발작용이 원인이 된다⁽⁷⁾.

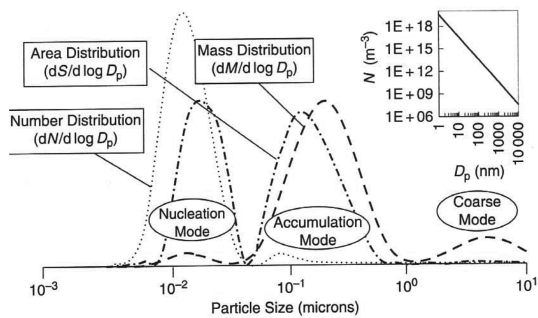


Fig. 1 Distribution of particle size

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치 및 방법

본 실험은 Table 1에 나타난 제원과 같은 배기량이 2.0L인 양산 승용 경유차량 엔진을 사용하였다. 실험 장치는 크게 230 kW급 엔진동력계, PPS(Pegasor Particle Sensor, 입자측정센서시스템)시스템으로 구성하였으며, 촉매를 통한 극미세입자 저감 영향을 연구하기 위해 DOC(Diesel Oxidation Catalyst)를 엔진 배기 대기관과 약 2 m 떨어진 위치에 Fig. 2와 같이 설치하였다. 엔진 동력계의 자세한 제원은 Table 2에 나타내었다. DOC

Table 1 Specification of test engine

| Model | 2.0 HTI |
|---------------------|--------------------|
| Engine displacement | 1,991 cc |
| Max power | 155 ps@4000 rpm |
| Max torque | 26.5 kg·m@2000 rpm |
| Bore | 83.0 mm |
| Stroke | 92.0 mm |

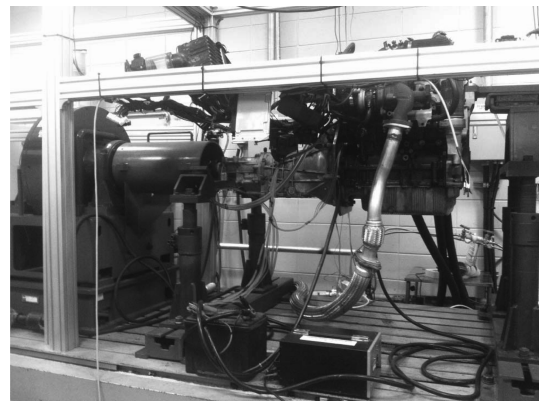


Fig. 2 Schematic diagram of an experimental

Table 2 Specification of engine dynamometer

| | |
|-------------------|------------------------|
| Absorption power | 230 kW |
| Absorption torque | 85 kg · m |
| Maximum speed | 7500 rpm |
| Rotor inertia | 0.53 kg/m ² |
| Weight | 800 kg |

Table 3 Experimental condition

| Engine speed | Engine load | Exhaust temperature |
|--------------|-------------|---------------------|
| 1000 rpm | 50% | 220°C |
| | 100% | 232°C |
| 1500 rpm | 50% | 313°C |
| | 100% | 340°C |
| 2000 rpm | 50% | 353°C |
| | 100% | 370°C |

전 · 후 배기관에 샘플링 배관을 설치하고, T자형 밸브로 DOC 전 · 후 배기관내 가스를 샘플링할 수 있도록 하였다. 배관은 PPS시스템의 입구부와 연결 후 단열 처리하였고, 정확한 PM측정을 위해 샘플링 배관의 온도는 150°C의 일정값을 유지하도록 제어하였다⁸⁾.

엔진의 작동 조건은 1000, 1500, 2000 rpm의 엔진 회전수별로 각각 부하 50, 100%로 설정하였으며, 매 조건에 대해 60초 동안 극미세입자를 측정하였다. 물론 각 기관회전수와 부하별 샘플링 가스의 온도를 측정하여 동일한 조건에서 실험이 진행되도록 유의하였다. 또한, 엔진의 냉각수 온도는 85°C, 윤활유 온도는 120°C를 유지하였으며, 동력계 냉각수는 압력이 0.8 bar 이하로 강하게 되면 동력계의 정상적 작동에 방해가 될 수 있기 때문에 1 bar로 설정하였다.

시험연료는 국내에서 판매중인 초저황경유와 자동차용 경유를 제조하는데 사용하는 품질기준에 적합한 바이오디젤을 사용했다. 바이오디젤 혼합율에 따른 극미세입자 농도 측정을 위해 경유와 바이오디젤을 각 초저황경유, BD10, BD20, BD30을 부피비(%)로 혼합하여 제조하였다. 상세한 시험조건은 Table 3에 나타내었다.

3.2 PPS 측정시스템

PPS시스템은 센서를 통해 전하를 띤 입자의 정전기

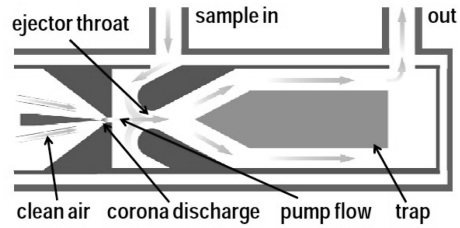
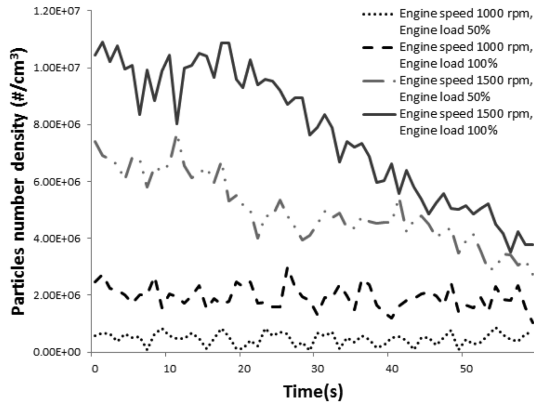


Fig. 3 Schematic diagram of PPS sensor

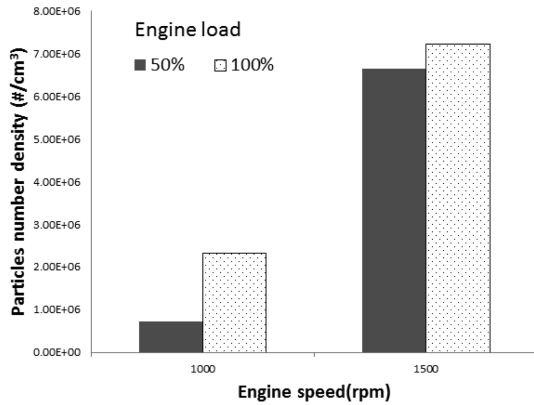
적 성질에 의해 작동되며, 동시에 센서를 지나온 하전된 입자에 의해 전류를 측정하는 것이다. 이때, 입자들은 코로나 방전에 의해 발생한 이온들에 의해 대전되며, 코로나 방전은 고전압을 띤 바늘 끝단에서 발생한다. 샘플링 가스는 HEPA(high efficiency particulate air) filter를 통과한 1.5 bar의 압축공기와 코로나 방전을 통해 하전된다⁹⁾. 하전된 입자들은 센서 본체를 지나면서 페리데이컵을 벗어나면서 전류를 생산하며, 측정된 전류는 입자(입자 직경 : 23 nm~2.5 μm)농도 수로 환산한다¹⁰⁾.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4(a)는 디젤 연료를 사용하여 엔진 회전수 1000, 1500 rpm 구간에서 엔진 부하 50, 100% 조건 별 실시간 입자 발생 개수 분포를 나타낸 것이다. 극미세입자 발생 개수 분포는 시간에 따라 엔진 회전수가 증가할수록 농도 개수가 감소하는 경향을 보였다. 특히 엔진회전수 1500 rpm의 경우, 엔진 부하별로 측정된 극미세입자 개수 분포는 sine파형의 비교적 큰 주기성 패턴을 가짐을 알 수 있었다. Fig. 4(b)는 디젤 연료 극미세입자 농도 개수 분포를 엔진 회전수 별로 비교해 나타낸 것이다. 1000 rpm 구간 엔진 부하 50%인 경우 입자 농도 개수는 대략 7.17E+5 #/cm³, 엔진 부하 100%인 경우 2.32E+6 #/cm³이고, 1500 rpm 구간 50%인 경우 6.65E+6 #/cm³, 100%인 경우 7.23E+6 #/cm³로 나타났다. 엔진 회전수가 1000 rpm에서 1500 rpm으로 증가함으로써 입



(a) Raw variation of particle number density



(b) Comparison of particle concentration

Fig. 4 Comparison of particle number density for different engine speed and load with diesel fuel only

자 농도 개수는 엔진 부하 50%인 경우 약 9.27배, 100%인 경우 약 3.12배 증가하는 것을 알 수 있었다. 입자상 물질은 연소실 내 고온(1,000K~2,800K)환경에서 연료 분자가 열분해(Thermal Craking)과정을 거쳐 생성되는데, 엔진 회전수의 증가는 극미세입자 농도 개수를 증가시키는데 기인하는 것으로 판단된다.

바이오디젤 혼합율에 따른 입자 농도 개수 분포를 분석하기 위해, 먼저 BD20(바이오디젤 혼합율 20%) 연료에 대한 엔진 회전수와 부하별 입자 배출 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 엔진 부하 50%인 경우 1000 rpm 구간에서 입자 농도 개수는 대략 $9.0E+5 \text{ #/cm}^3$, 1500 rpm 구간 $1.61E+6 \text{ #/cm}^3$ 이고, 엔진 부하 100%인 경우 1000 rpm $1.52E+6 \text{ #/cm}^3$, 1500 rpm $1.70E+6 \text{ #/cm}^3$ 로 나타났다. 디젤 엔진의 경우, 부하는 연료 분사량에 의해 조절됨으로, 엔진 부하가 높아지면 연료 분사량이 증가하게

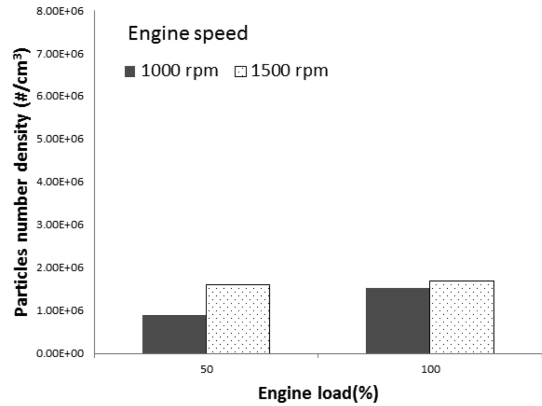


Fig. 5 Comparison of particle number density for different engine speed and load with bio-diesel blend ration of 20%

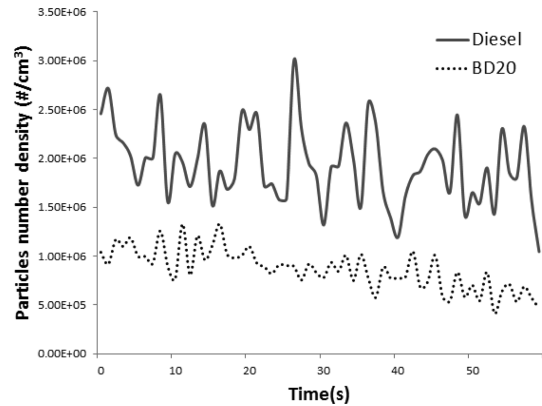


Fig. 6 Comparison of particle concentration between diesel and BD20(engine speed of 1000 rpm, engine load of 50%)

된다. 따라서 입자 농도는 엔진 부하 100%인 경우가 50%인 경우보다 증가하게 됨을 알 수 있었다.

엔진 회전수 1000 rpm, 부하 50% 조건에서 디젤 연료와 BD20 연료의 실시간 입자 농도 개수 분포를 나타낸 Fig. 6을 보면 바이오 디젤 혼합 연료 시, 극미세입자 발생은 현저히 감소함을 알 수 있었다. 일반적으로, 디젤엔진의 입자상 물질의 생성은 연소실내 국부적 연료 과다, 산소 부족 등이 원인으로 작용한다. 바이오디젤은 약 10%의 산소를 포함한 합산소연료이기 때문에 입자 농도 개수가 감소함에 기인하는 것으로 판단된다.

엔진 회전수 1500 rpm의 경우, 바이오 디젤 혼합율에 따른 극미세입자 개수 농도 분포 특성을 Fig. 7에 나타내었다. 측정된 입자 농도 개수는 대략 디젤 연료 엔진

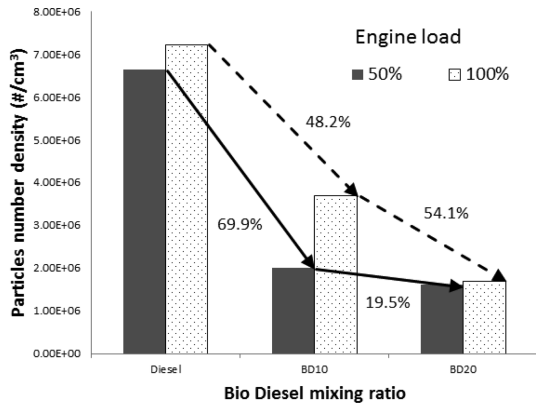


Fig. 7 Effect of bio-diesel mixing ratio on particle number emission(engine speed of 1500 rpm)

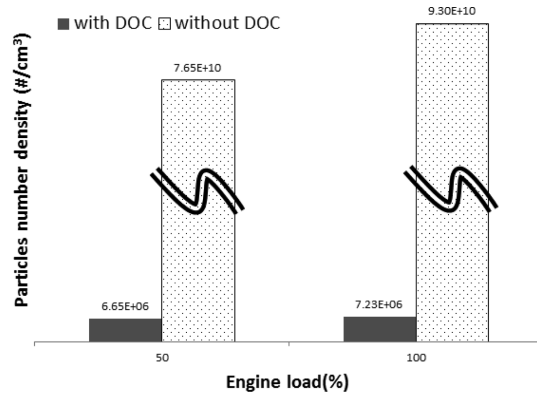


Fig. 9 Comparison of particle number density for different with DOC and without DOC at engine speed 1500 rpm

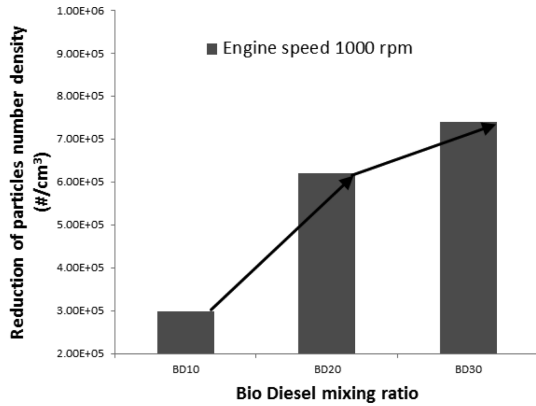


Fig. 8 Nano-particle reduction quantity according to bio-diesel blend ratio(engine speed of 1000 rpm)

부하 50%인 경우 6.65E+6 #/cm³, 100%인 경우 7.23E+6 #/cm³로 나타났다. BD10 연료 부하 50% 시 2.0E+6 #/cm³, 100%인 경우 3.70E+6 #/cm³이고, BD20 부하 50%인 경우 1.61E+6 #/cm³, 100%인 경우 1.70E+6 #/cm³로 나타났다. 바이오 디젤 혼합율이 증가할수록 극미세입자 발생은 감소하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8는 엔진 회전수 1000 rpm 작동 조건에서 바이오 디젤 혼합 연료의 입자 농도 개수를 나타내었다. 바이오 디젤 혼합율 변화에 따른 입자 저감 개수를 보면 대략 BD10 2.99E+5 #/cm³, BD20 6.20E+5 #/cm³, BD30 7.41E+5 #/cm³로 나타났다. 연료에 BD 함유량이 증가할수록 입자 감소폭이 더 작아짐을 알 수 있었다.

디젤 연료를 사용해서 엔진 회전수 1500 rpm 구간에서 측정된 DOC 전 · 후 극미세입자 배출량은 Fig. 9에 나타내었다. DOC 전 엔진 부하 50%인 경우 6.65E+6 #/

cm³, 100% 7.23E+6 #/cm³로 나타났고, DOC 후 50% 7.65E+10 #/cm³, 100% 9.30E+10 #/cm³로 측정됐다. 배기 대기관과 약 2 m 떨어진 위치에서의 배기 유동 안정성과 충분한 촉매 활성화 온도로 인해 디젤산화촉매에 의한 미세 입자 저감효과는 매우 큼을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 배기량이 2.0L인 양산 승용 경유차량 엔진에서 배출되는 극미세입자의 개수농도분포 특성을 PPS시스템을 이용하여 측정 · 분석하였다. 시험연료는 디젤과 바이오 디젤 혼합 연료를 사용하였으며, 다음과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 엔진 회전수가 1000 rpm에서 1500 rpm으로 증가할수록 디젤 연료의 극미세 입자 농도 개수는 평균적으로 약 4.67배 증가함을 알 수 있었다.
- 2) 엔진 회전수 1000, 1500 rpm에서 엔진 부하가 50%에서 100%(WOT)로 증가할수록 BD20 연료 극미세 입자 농도 개수는 평균적으로 약 28.3% 증가함을 알 수 있었다.
- 3) 디젤 연료에서 바이오 디젤 혼합율이 증가할수록 극미세 입자 개수 감소율은 증가함을 알 수 있었다(참고: 본 연구시 극미세 입자 농도 개수는 BD10 경우, 평균 약 58.7% 감소, BD20 경우, 평균 약 76.0% 감소).
- 4) 디젤산화촉매(DOC)에 의한 미세 입자 저감효과는 배기관내 배기 유동의 안정성과 충분한 촉매 활성화 온도로 인해 매우 효과적임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며, 또한 본 연구에서 사용한 바이오 디젤 연료는 (주)단석산업에서 제공 받았습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Y. I. Jeong, J. W. Lee, G. B. Cho and H. S. Kim, 2010, *Automotive & Environment*, Soongsil University, pp. 361-365.
- (2) Pelham Hawker, et al., 1998, "Effect of a continuously Regenerating Diesel Particulate Filter on Non-Regulated Emissions and Particle Size Distribution", SAE980189.
- (3) Dockery, 1999, "D. W. and C. A. Pope III Acute respiratory effects of particulate air pollution", *Annu Rev Public Health*, 15, pp. 107~132.
- (4) Korea Testing Laboratory, 2011, "A Study on Proving Type Approval-Performance Test Method for Nano-Particle from Automobile, National Institute of environmental Research, pp.1~16.
- (5) Delphi, 2012, "World Emissions Standards Passenger Cars and light Duty Vehicles, Delphi Group, pp.18~20.
- (6) J.-W. Lee, H.-S. Kim and Y.-I. Jeong, 2006, "Effects of Particle Measuring Condition on Diesel Nanoparticles Distribution", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* Vol.22, No.5.
- (7) H. S. Kim, S. S. Lee, G. B. Cho, N. W. Sung, Y. G. Jeong, 2003, "The Characteristics of ELPI and SMPS on the Measurement of Diesel Particles" KSAE03-F0043.
- (8) Pegasor Ltd, 2011, *Pegasor Particle Sensor PPS-M user manual*, Pegasor Ltd, pp.12.
- (9) L. Ntziachristos, P. Fragkiadoulakis, Z. Samaras, K. Janka, J. Tikkanen, 2011, "Exhaust Particle Sensor for OBD Application", SAE 2011-01-0626.
- (10) Timo Lanki, et al, 2011, "An electrical sensor for long-term monitoring of ultrafine particles in workplaces", *IOPscience*.