

휘발유와 LPG 자동차의 연료분사방식에 따른 극미세입자 배출 특성

박경균* · † · 권상일* · 이우석* · 홍지형*

Emission Characteristics of Ultrafine particles According to Fuel Injection Type in Gasoline and LPG Vehicle

Kyounggyun Park, Sangil Kwon, Woosuk Lee and Ji Hyung Hong

Key Words: PMP(Particle Measurement Program, 입자측정프로그램), CPC(Condensation Particle Counter; 입자개수측정기), Ultrafine particle(극미세입자)

Abstract

Recently, ultrafine particles emitted from internal combustion engine is main concern because of its well known adverse health effects. So Europe decided to start the regulation about diesel engine particle number emissions. The nanoparticles smaller than 50nm in diameter have the ability to penetrate deep into interstitial tissue of luge, where they may cause severe respiratory inflammation and acute pulmonary toxicity. Recent studies have showed that spark ignition engines emit particles number concentration comparable to those from diesel engines with DPF under high load and rich mixture conditions, including cold starts and acceleration. So this study investigated emission characteristics of ultrafine particles according to fuel injection type in gasoline vehicles and LPG vehicles. The test vehicles were tested on CVS-75 and NEDC vehicle test mode using the chassis dynamometer, CPC system applied as a particle measuring instrument at the end of dilution tunnel. As a result, the correlation between fuel injection type and particulate emission was determined. GDI vehicle emitted 10 times higher particles than PFI vehicles, and compared to Mixer and LPGI type LPG vehicle, LPLI vehicle emitted particles high.

1. 서 론

자동차 산업의 발달과 함께 지난 20여 년 동안 자동차에서 배출하는 유해물질에 대한 저감기술연구도 활발히 진행되고 있다. 앞으로는 인체에 유해한 배출가스와 더불어 지구 온난화 문제로 인한 온실가스 배출에 대한 규제가 강화되고 있다. 또 지금까지는 배출원 관점에서 오염물질을 규제하여 왔으나, 최근에는 이를 바탕으로 오염물질의 수용체인 인간의 관점에서 대기오염물질을 규제하고 관리하는 방향으로 전환하고 있다. 특히 경유

자동차에서 배출하는 발암물질인 PM(Particulate Matter, 입자상물질)은 현재 질량단위로 규제하고 있으나 자동차에서 배출하는 PM의 입경은 0.1 μm 미만의 극미세입자(ultra fine particle)가 50~90%를 차지하고 있고 극미세입자가 인체에 유해하다는 것이 알려지면서 유럽 PMP(Particle Measurement Program)은 극미세입자의 수농도 규제를 2011년부터 도입하기로 결정하였다⁽¹⁾.

일반적으로 경유자동차에서 발생하는 입자의 입경 분포는 Fig. 1에 나타난 것처럼 PM의 배출량은 30~500 nm 수준의 Accumulation Mode의 입자의 양이 결정하고 입자의 배출 개수는 3~30 nm 수준의 Nuclei Mode 입자가 지배적인 영향을 미친다.

각 입자상물질 Mode의 발생 원인이 다르기 때문에 저감하는 방안 및 측정하는 방안을 고려할 때에도 이러한 발생 원인과 결부지어 생각할 필요가 있다. 각 Mode

(2009년 12월 17일 접수 ~ 2009년 12월 21일 심사완료)

* 책임저자, 국립환경과학원 교통환경연구소

* 국립환경과학원 교통환경연구소

E-mail : orange80@korea.kr

TEL : (032)560-7661 FAX : (032)567-5096

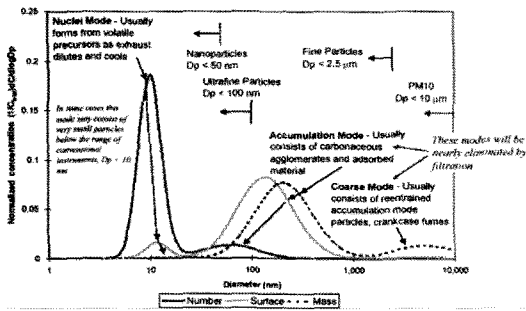


Fig. 1 Number and size distributions of particle

의 발생원인은 다음과 같이 단순화할 수 있다.

① Nuclei Mode : 연소실에서 연소 도중 발생한 탄소 입자들이 재(ash) 또는 금속 성분에 의해 전기적으로 응축되어 발생(화학반응 개시 후 수십 ms이내)

② Accumulation Mode : Nuclei Mode에서 발생된 극미세입자들이 배기관 및 대기 중에서 황산화물 또는 SOF(soluble organic fraction)에 의해 응집되고 성장하여 발생(화학반응 개시 후 1초이내)

③ Coarse Mode : Nuclei/Accumulation Mode의 입자들이 공기 중에 부유하면서 지속적으로 성장하면서 발생(화학반응 개시 후 수 초 이내)^(2, 6)

Nuclei Mode에 속하는 극미세입자 또는 나노입자들은 단위질량에 비해 큰 표면적을 차지함으로 호흡기의 깊은 내부까지 침투할 수 있을 뿐 아니라 세포 벽을 통하여 세포 내부 혈관 및 신경계에까지 도달할 수도 있는 것으로 예상된다. 또한 최근 연구에서 이러한 극미세입자는 PM배출에 있어서 경유자동차에 비해 상대적으로 청정하다고 생각되는 휘발유자동차와 LPG자동차까지도 그 배출 가능성이 높은 것으로 파악되고 있다⁽³⁾. 따라서 본 연구에서는 휘발유자동차와 LPG자동차 연료의 분사방식에 따른 극미세입자 발생 특성을 파악하는데 목적이 있다. 또한 향후 발효될 차기 환경기준(EUROVI : 엔진 배출 극미세입자 크기 및 수량 규제 적용)을 만족하는 환경 친화적 엔진 기술 개발을 위한 기초자료를 마련하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 차대동력계 및 시험자동차

실제 도로에서 주행하는 상태를 실험실에서 구현하기

Table 1 Specification of chassis dynamometer

Axle load	4500 kg
Roller track	2800 mm
Peak power	260 kW
Permanent power	150 kW
Permanent tractive force	6000 N
Peak tractive force	10000 N
Electric inertia simulation	1000 lbs - 12000 lbs
Axle distances	2100 - 4400 mm
Pit size	8200 × 1700 × 5300 mm

Table 2 Fuel injection type of test vehicles

Gasoline	PFI
	GDI
LPG	LPLi(Liquefied)
	LPGi(Gas)
	Mixer

위해 항온 항습을 유지할 수 있는 시험실과 차대동력계, Driver's Aid를 사용하였고 시험에 사용된 자동차는 2000 cc급의 중형승용자동차를 사용하였고 분사방식별로 구분하였다.

2.1.2 극미세입자 측정 장치

Figure 2는 자동차에서 배출되는 극미세입자 측정 시스템의 개략도이다. 주요 장치는 기본적으로 싸이클론, 1, 2차 희석터널 증발튜브 및 CPC(Condensation Particle Counter, TSI 3010D)로 구성되어 있다. 시료의 채취는 CVS 희석터널내의 총 입자상 물질 측정관 근처에서 샘플링 하였고, 직경 2.5 μm가 넘는 입자들을 제거하기 위해 사이클론이 사용되었다.

1차 희석장치는 입자의 응축을 피하기 위하여 채취된 시료를 150°C±5°C로 가열시키면서 희석하였으며, 휘발성입자의 경우 희석온도에 따라 측정되는 농도 변화가 커서 규제대상에 적합하지 않다는 판단 하에 PMP 규제 시험방법에서는 휘발성 입자를 제거하기 위하여 300°C로 가열하는 증발 튜브를 사용하였다.

2차 희석장치에 의해 CPC로 들어가는 시료가 온도 35°C이하 및 개수농도가 10⁴(N/cm³)이 되도록 하였고, 희석이 이루어진 후 차가워진 샘플링 가스는 CPC로 이

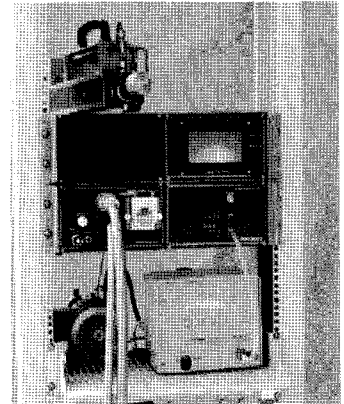
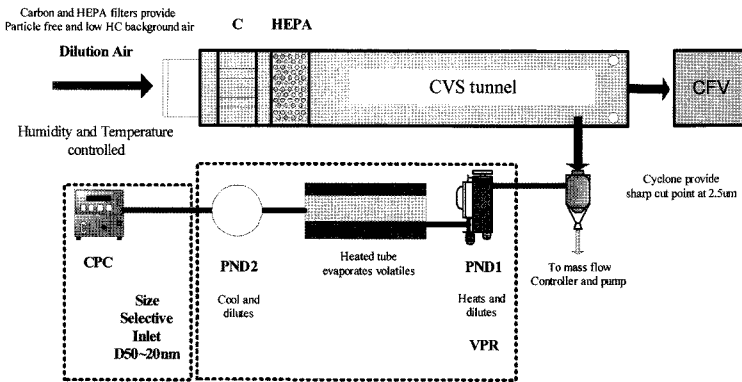


Fig. 2 Schematic diagram and photo of ultrafine particle measurement system

송되고 CPC는 연속적으로 입자 개수를 측정한다.

CPC에서 입자를 세는 원리는 먼저, 레이저 빔을 통해 입자를 하나씩 보내고, certain angle에 얇게 흩뿌려져 분석하는 것이다. 각 입자는 작은 파장에 탐지될 수 있게 만들어진다. CPC는 입자를 액체로 응축시키고, 인위적으로 측정 가능한 크기로 각 입자를 성장시켜 광학적 방법을 통해 측정범위가 10 nm 이하의 입자도 측정 가능하도록 구성되어져 있다⁽⁴⁾.

2.2 실험방법

차대동력계상에서 실차를 주행하는 방법으로 시험에 사용된 모드는 배출가스 규제 모드인 CVS-75모드와 NEDC모드를 사용하였고 각 모드별 특성은 Table 3과 Fig. 3에 나타내었다.

휘발유자동차의 PFI방식과 DI방식, LPG자동차의

LPLI방식, LPGi방식, Mixer방식으로 나뉘서 각 모드별 주행 결과 연료의 분사방식에 따라 발생하는 극미세입자의 배출 특성을 파악하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

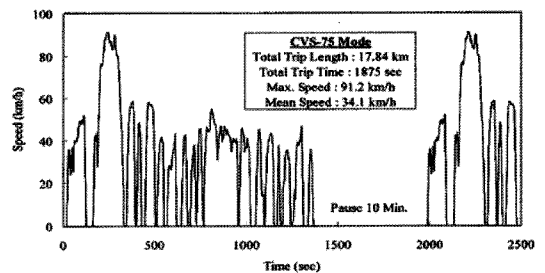
3.1 휘발유자동차에서의 극미세입자 배출 결과

휘발유자동차의 각 Mode 주행결과 발생하는 극미세입자의 개수 결과를 Fig. 4, 5에 분사 방식 별로 나타내었다.

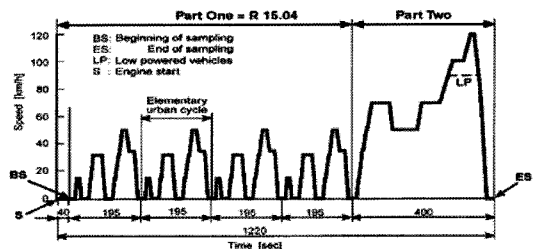
연료의 분사방식과 상관없이 시험 두 모드에서 PFI방

Table 3 Test Mode

Item	CVS-75	ECE-15	EUDC
Distance (km)	17.84	1.013	6.955
Test time (sec)	1875+600	195	400
Number of cycle/test	1	4	1
Speed_ave. (km/h)	34.3	18.7	62.6
Speed_max. (km/h)	91.2	50	120
Acc_ave. (m/s ²)	0.67	0.75	0.833
Deacc_ave (m/s ²)	0.71	0.75	1.389
Starting condition	Cold	Cold+40s idling	Hot
Driving motion	도시주행	저속 도시주행	고속 도시주행



(a)CVS-75 Mode



(b)NEDC Mode

Fig. 3 Schematic of the test mode

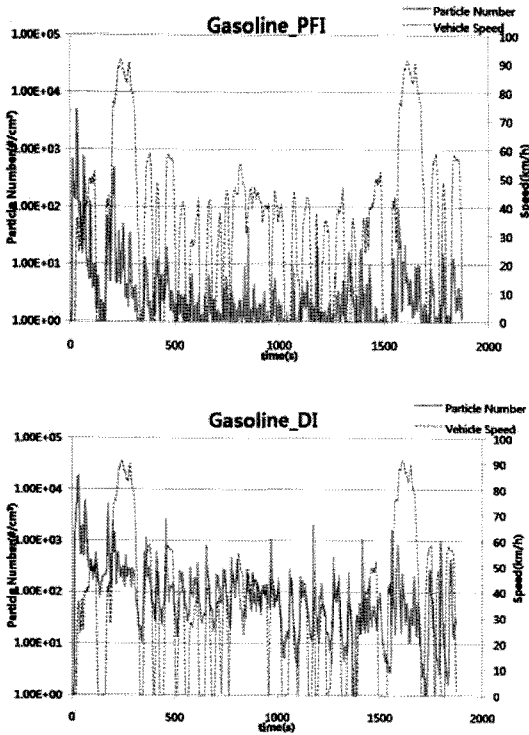


Fig. 4 Particle number of Gasoline vehicle for CVS-75 Mode

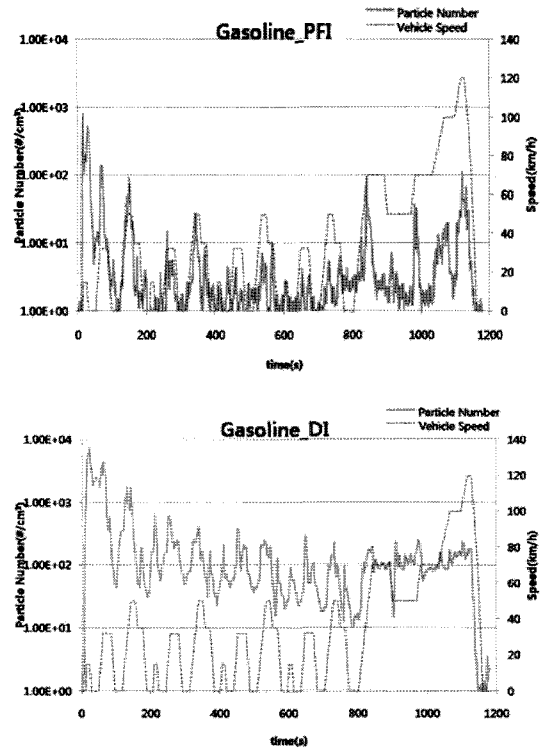


Fig. 5 Particle number of Gasoline vehicle for NEDC Mode

식과 DI방식 모두 초기 냉간 시동 시 극미세입자가 가장 많이 배출하였다⁽⁵⁾. 이는 기관의 온도가 연료가 완전히 연소되는 온도까지 도달하지 못한 상태이고 충분히 혼합기를 형성하기 전이기 때문에 액체로 분사되는 연료가 불완전연소 되면서 발생하는 입자라고 판단된다. 또한 가속구간에서 연료 분사량의 증가로 인한 미연소 연료입자의 증가로 두 방식 모두 극미세입자의 배출량이 증가함을 확인하였다.

동일한 배기량의 휘발유자동차이지만 실린더내로 직접 분사하는 DI기관의 경우 전체 구간에서 PFI기관에 비해 많은 극미세입자가 배출되었다. 이는 PFI방식의 경우 포트에 분사된 액체의 휘발유가 실린더로 흡입되기 전에 충분히 공기와 섞여 혼합기를 형성하지만 DI기관의 경우 실린더 내에 직접 액체의 연료가 분사되면서 공기와 혼합될 시간이 충분하지 못해 국부적으로 농후한 영역에서의 불완전연소가 이뤄져 전 구간 PFI기관에 비해 많은 극미세입자가 배출된다고 생각된다.

Figure 5의 NEDC 모드 중 고속구간 주행결과를 비교해보면 PFI방식과 DI방식 모두 가속구간에서 입자의 배출이 증가한다. 하지만 PFI방식은 가속구간에서 일시적으로 많이 배출한 후 정속구간에서 배출량이 줄어든 반

Table 4 Result of Particle Number for gasoline vehicle as injection type (#/km)

Injection Type	CVS-75	NEDC
PFI	4.50×10^{10}	2.54×10^{10}
DI	7.69×10^{11}	1.46×10^{12}

면 DI방식은 가속구간에 배출하는 입자개수가 정속구간에서도 일정수준 유지하면서 계속 배출된다는 것을 확인하였다. 이는 기관의 속도가 빨라지면서 실린더 내에 혼합기가 머무는 시간도 줄어들게 되고 그 결과 DI기관에서 연료의 혼합시간이 더 줄어들어 미연소 탄소가 계속 발생하기 때문이다.

Table 4는 각 모드 주행 후 단일 거리 당 배출한 극미세입자의 개수를 정리한 결과를 나타낸다.

3.2 LPG자동차에서의 극미세입자 배출 결과

LPG자동차에서의 각 Mode 주행결과 발생하는 극미세입자의 개수 결과를 Fig. 6, 7에 분사 방식별로 나타내었다.

LPG자동차의 극미세입자 배출특성은 휘발유자동차

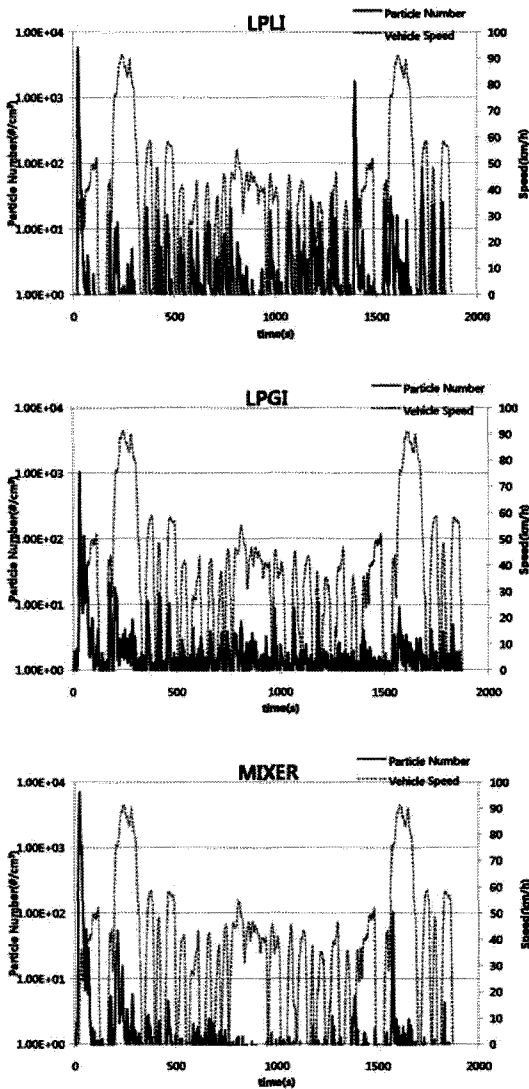


Fig. 6 Particle number of LPG vehicle for CVS-75 Mode

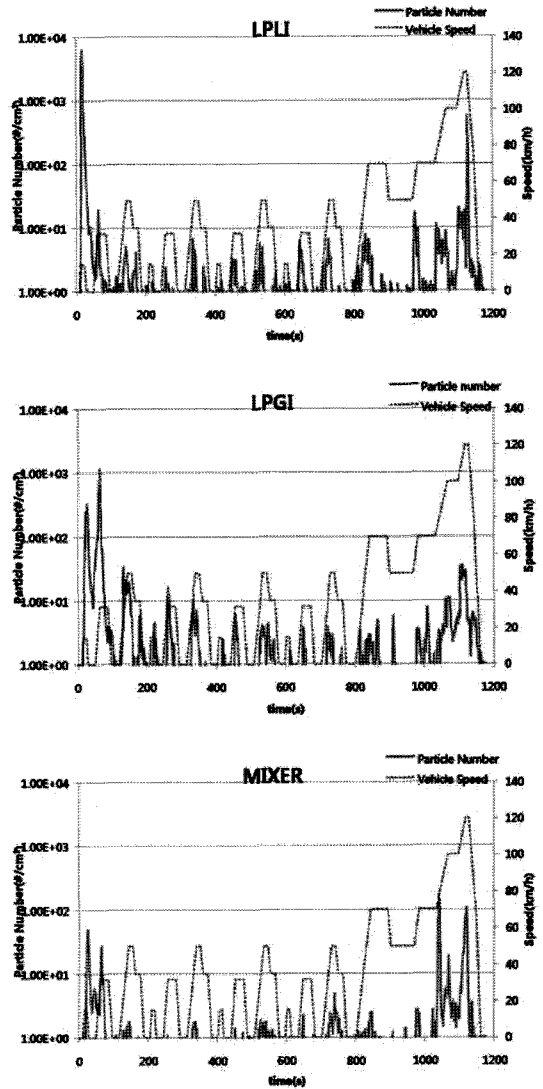


Fig. 7 Particle number of LPG vehicle for NEDC Mode

배출특성과 매우 유사하였다.

LPG자동차도 휘발유자동차의 경우와 동일하게 기관의 온도가 낮아 연료의 혼합이 원활히 이뤄지지 못해 불완전연소가 일어나고 촉매의 활성화 온도가 되지 않은 냉간 시동 시 극미세입자의 배출이 가장 많았다⁵⁾.

또한 각 모드 주행 중에 가속구간에서 급격한 연료 분사량의 증가와 기관의 회전속도의 증가로 인하여 불완전연소가 일어나 미연소탄소의 수가 증가하여 극미세입자의 배출이 급격히 증가함을 확인하였다.

분사방식별 배출 특성을 비교해보면 액상분사방식인 LPLI방식이 가장 많은 극미세입자 배출 특성을 보였고

기상분사방식인 LPGI와 Mixer방식은 약간의 차이는 있으나 비슷한 수준의 배출 특성을 보였다. LPG연료가 기관에서 연소되려면 분사 후 기화가 잘 이뤄져야하며 기화된 연료가 공기와 잘 혼합이 되어야 하지만 액상으로 분사되는 LPLI방식의 경우 기체상태 LPG연료가 혼합기를 형성하여 연소하는 다른 기관에 비해 연료의 기화성이 떨어지고 혼합기 형성에 불리하게 되어 그 결과 미연소 되는 연료가 많아져 극미세입자의 배출이 많았다.

CVS-75 모드 3구간은 600초 소킹 기간을 갖는다. 그 기간 동안 2구간까지 주행한 후 매우 높아진 연소실과 배기관의 온도가 낮아지게 되고 Fig. 6에서 나타난 결과

Table 5 Result of Particle Number for LPG vehicle as injection type (#/km)

Injection Type	CVS-75	NEDC
LPLI	7.73×10^{10}	7.50×10^{10}
LPGI	1.46×10^{10}	2.72×10^{10}
MIXER	4.07×10^{10}	6.05×10^9

Table 6 Result of Particle Number for Gasoline, LPG, Diesel vehicle (#/km)

FUEL	Injection Type	CVS-75	NEDC
Gasoline	PFI	4.50×10^{10}	2.54×10^{10}
	DI	7.69×10^{11}	1.46×10^{12}
LPG	LPLI	7.73×10^{10}	7.50×10^{10}
	LPGI	1.46×10^{10}	2.72×10^{10}
	MIXER	4.07×10^{10}	6.05×10^9
Diesel	CRDI	1.73×10^{11}	1.12×10^{11}

처럼 3구간 시작 시 연료의 기화가 불리한 LPLI기관에서 다른 기관과 달리 급격히 많은 극미세입자가 배출된다.

Table 5는 LPG자동차의 분사방식별 각 모드 주행 후 배출한 극미세입자의 개수이다.

3.3 경유자동차의 극미세입자와 비교

Table 6은 본 실험 결과와 고압직접분사방식(CRDI)의 DPF 부착 경유자동차 극미세입자 배출 특성을 비교한 결과이다. 입자상물질 배출에 있어서 항상 규제 대상이 되었던 경유자동차와 비교해서 극미세입자 배출에 있어서는 친환경자동차라 생각되는 휘발유와 LPG자동차에서도 경유자동차 수준으로 배출됨을 확인할 수 있었다. 따라서 앞으로 강화되는 미세입자배출규제에 대응하기 위해서는 휘발유자동차와 LPG자동차에서도 저감기술 개발이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 향후 강화되는 배출가스 규제와 더불어

극미세입자 수량규제에 대응하기 위해 휘발유와 LPG연료를 사용하는 실제 자동차를 대상으로 극미세입자의 배출 특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 휘발유자동차에서 PFI방식이 GDI방식보다 연료의 무화 및 기화성이 좋아 혼합기 형성이 잘 이뤄져 극미세입자 배출이 적었다.

2. GDI기관에서는 고속 주행 시 일정량의 극미세입자를 계속 배출하는 반면 PFI기관에서는 가속 시 급격히 증가 후 주행 시 감소하는 경향을 보였다.

3. LPG자동차에서도 연료의 분사가 액체상태인 LPLI방식이 기체상태로 분사되는 LPG나 Mixer방식보다 많은 극미세입자 배출 특성을 보였다.

4. 휘발유와 LPG자동차 모두 냉간 시동 시 연료의 불완전연소와 촉매의 미활성로 인해 급격히 많은 극미세입자를 배출하였다.

5. 휘발유와 LPG자동차도 극미세입자 배출에 있어서는 경유자동차 배출량 수준이므로 저감 기술개발이 필요하다.

참고문헌

- (1) Proposal for Supplement 7 to the 05 Series of Amendments to Regulation, No.83, 2008.
- (2) D. S. Kim, "Particles from Engines: Current Insights" Auto Journal Vol.3, No. 30, 2008 pp. 82~86.
- (3) P. Ericsson and A. Samson, "Characterization of Particulate Emissions Propagating in the Exhaust Line for Spark Ignited Engines", SAE 2009-01-2654, 2009.
- (4) J. C. Kim, S. I. Kwon, Y. H. Park, S. M. Kim and S. W. Jung, "Status of Diesel-Fueled Vehicle Nano Particle Measurement in PMP", Fall Conference Proceedigns, Vol. I, KSAE, 2006, pp349~353.
- (5) J. W. Kim, M. W. Jung, Y. I. Jung and K. O. Cha, "Analysis of Diessel Nano-particle Characteristics for Different Vehicle Test Mode in Diesel Passenger Vehicle" Vol. 16, No. 1, KSAE, 2008, pp.114~120.
- (6) J. B. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals", pp. 626~647, McGraw-Hill, Inc., 1988.