

GDI와 MPI 자동차의 미세입자 배출특성 비교

이종태*[†] · 김기준* · 김정수* · 장지환** · 박성욱***

Comparisons of the Particle Emission Characteristics Between GDI and MPI Vehicles

Jongtae Lee, Kijoon Kim, Jeongsoo Kim, Jihwan Jang and Sungwook Park

Key Words: Constant speed driving mode(정속주행모드), Normal driving mode(일반주행모드), Particulate Matter (미세입자 중량), Particle Number(미세입자 개수)

Abstract

As the regulations for Particulate Matter (PM) and Particle Number (PN) emissions from Gasoline Direct Injection (GDI) Vehicle stringent recently, a lot of studies have been made on the emission characteristics of PM and PN. In this study, PM and PN emission characteristics were compared to GDI and Multi Port Injection (MPI) Vehicles using the Condensation Particle Counter (CPC) measurement equipment. And driving mode is divided into normal driving mode (CVS-75, NEDC, NIER 6, NIER 9) and a constant speed driving mode (10 km/h, 35 km/h, 80 km/h, 110 km/h) to evaluate the characteristics in the various operating conditions. In the results, most of the driving mode, PM and PN were emitted from GDI Vehicle more than MPI Vehicle. However, in the constant speed mode of 110 km/h, PM and PN from MPI Vehicle were also a lot of emission. It is determined to cause a difficulty in the fuel injection control of the MPI Vehicle.

기호 설명

GDI : Gasoline Direct Injection
MPI : Multi Point Injection
PM : Particulate Matter
PN : Particle Number
CPC : Condensation Particle Counter
PNC : Particle Number Count

1. 서 론

최근 우리나라를 비롯하여 전세계적으로 미세입자 농도의 증가로 인한 인체유해성의 문제가 대두되면서 미세입자 저감에 대한 관심이 높아지고 있다. 이와 같은 미세입자 증가의 원인 중 자동차의 증가가 중요한 원인이라는 연구가 발표되고 있다⁽¹⁾. 이러한 이유로 국내 및 해외에서는 자동차에서 배출되는 미세입자에 대한 배출 허용기준을 강화하고 있는데 과거에는 디젤 자동차에서 배출되는 미세입자에만 초점을 맞추어 규제강화가 실시되었고 디젤 자동차의 미세입자 특성과 저감에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 하지만 최근 가솔린 자동차에 Gasoline Direct Injection(GDI) 방식의 엔진이 도입되면서 GDI자동차가 증가하였고, 기존의 Multi Port Injection(MPI) 방식의 엔진보다 연비와 출력이 향상된다는 장점을 가지지만 연료를 고압으로 압축된 실린더 내부에 직접 분사하기 때문에 균일하지 않은 내부 연소가

Received: 24 Sep 2014, Received in revised form: 15 Dec 2014, Accepted: 16 Dec 2014)

*교통환경연구소

**한양대학교 융합기계공학과

***한양대학교 기계공학부

[†]책임저자, 회원, 교통환경연구소

E-mail : leelee@korea.kr

TEL : (032)560-7606 FAX : (02)123-1234

발생하여, 기존 MPI 자동차에서 발생하지 않았던 미세 입자가 발생하는 단점을 가진다. 이런 이유로 최근 GDI 자동차에서 배출되는 미세입자에 대한 배출허용기준이 생겼으며 향후 강화될 예정이다. 특히 유럽에서는 GDI 자동차에서 배출되는 미세입자에 대해 중량기준인 Particulate Matter(PM) 뿐만 아니라 Particle Number(PN) 또한 규제하고 있으며 현재에는 EURO-6b의 배출허용기준으로서 PM의 경우 4.5 mg/km, PN은 6×10^{12} #/km로 규제 중이지만 2017년 발표 예정인 EURO-6c에서의 PM은 동일하나 PN의 경우에는 기존의 Diesel 자동차의 PN에 대한 배출허용기준과 동일하게 6×10^{11} #/km로 규제를 할 예정이다. 이에 본 연구에서는 GDI 자동차의 증가와 배출허용기준 강화에 발맞춰 GDI 자동차에서 배출되는 미세입자 특성을 알아보기 위해 동급자동차의 MPI 자동차와의 PM과 PN 특성을 Condensation Particle Counter(CPC)를 통해 비교하였다. 그리고 다양한 운전 조건에서의 미세입자 특성을 알아 보고자 유럽과 미국의 실제 인증시험 주행모드와 속도에 따른 주행모드 등 주행모드를 다양화하여 실험을 진행하였다.

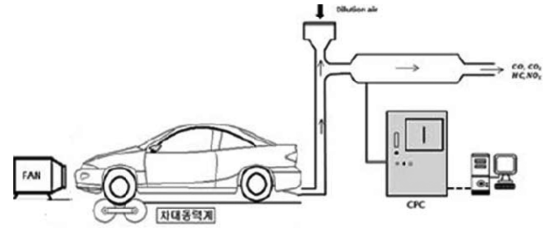


Fig. 1 Schematic diagram of emission measurement equipment

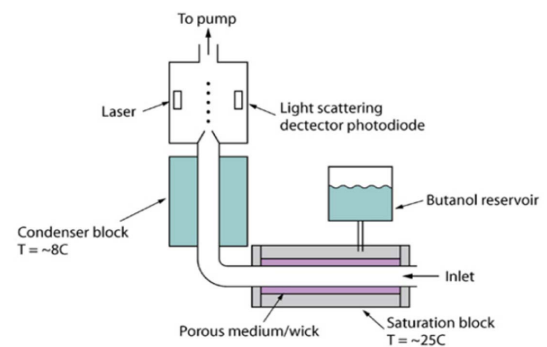


Fig. 2 Schematic diagram of CPC

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치

본 실험에서 실험한 자동차의 제원을 Table 1에 나타내었다. 실험자동차는 모두 배기량 1999cc, 중량 1587 kg으로서 동급 배기량과 중량의 자동차이다. A 자동차는 GDI 연료분사방식의 Turbo-GDI 자동차이며, B 자동차는 MPI 연료분사방식이 탑재된 MPI자동차이다. 본 실험에서 사용된 실험 장치는 자동차의 배출가스 규제물질인 PM과 PN을 측정하기 위하여 CPC장치를 사용하였다. Fig. 1에는 차대동력계와 CPC로 구성된 실험장치를 나타내었다.

CPC는 현재 UN-ECE에서 권장하고 있는 Particle Measurement Program(PMP)의 입자 개수 측정기(Particle number count, PNC)이다. 입자를 포함한 공기는 작

동유체가 있는 다공형 관을 지나면서 포화상태가 된다. 포화상태가 된 유체는 Condenser를 거쳐 냉각되고 입자는 특정 크기의 입자로 성장한다. 이와 같은 과정을 거쳐 측정 가능한 크기로 성장한 입자는 노즐을 통해 광학부로 유입되고 laser beam을 지나면서 개수가 측정되는 방식이다. Fig. 2에 본 실험에 사용된 CPC의 개략도를 나타내었다.

2.2 실험조건 및 방법

본 실험은 동력흡수장치, 관성중량 부여장치, 구동장치, 롤러장치, 차량속도 측정장치, 엔진회전속도 측정장치, 자동차 구동출력 측정장치, 운전모드 보조장치, 송풍장치, 안전장치 등으로 구성되고 5.5톤 이하 자동차의 배출가스를 측정하기 위한 소형운행차용 차대동력계를 이용하였다. 또한 Control Volume Sampling(CVS) 터널을 통과하는 미세입자를 CPC로 측정하였으며 CPC의 경우 자동차에서 배출된 배기가스는 온도가 조절된 후, Carbon 필터와 HEPA필터를 거쳐 미세먼지가 여과된 희석가스와 와류발생기를 통해 희석된다. 1차 희석터널에서는 $150 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 가열하여 입자가 응축되는 것을 방지하면서 희석시키고, 증발튜브를 300°C 로 가열하여 휘발

Table 1 Specification of test vehicles

Vehicle	Fuel injection	Displacement (cc)	Weight (kg)
A	GDI(turbo)	1999	1587
B	MPI		

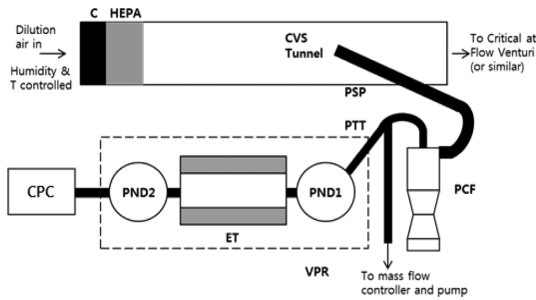


Fig. 3 Schematic diagram of Measuring method of PM and PN

성 입자를 제거한다. 그리고 2차 희석터널은 입자의 온도가 35°C 이하가 되도록 유지해주면서 희석된다. 그 이후에 측정효율 D50(효율 50%, 입경크기 23±3 nm)이 되는 CPC를 이용하여 PN을 연속으로 측정한다.

PM은 사이클론을 통과한 후 터널 내의 중량법을 이용하여 필터에 포집하여, 포집전후 무게차이를 측정하였다. 또한 자동차가 도로 주행 시에 받는 구름저항과 공기저항 등 주행저항을 전기적인 제동력을 통해 모사하여 실험을 진행하였다. Fig. 3에 PM과 PN의 측정방법에 대해 나타내었다.

2.2.1 주행모드

차대동력계에서 실험을 진행할 때에는 실제 도로 주행특성을 반영한 주행모드로 진행한다. 본 실험에서는 일반주행모드 4가지와 정속주행모드 4가지를 진행하였다. Table 2에 본 실험에 적용된 주행모드의 특성을 나타내었다.

Table 2 Characteristics of test mode

Name	Condition	Average/High Speed(km/h)	Distance (km)	Time (s)
CVS-75	Cold	34.2/91.2	17.77	1874
NEDC	Cold	33.6/120	11.01	1180
NIER 6	Hot	19.5/60.1	4.89	846
NIER 9	Hot	34.1/70.9	8.8	920
Constant	Hot	10	1.66	600
		35	5.83	
		80	13.33	
		110	18.33	

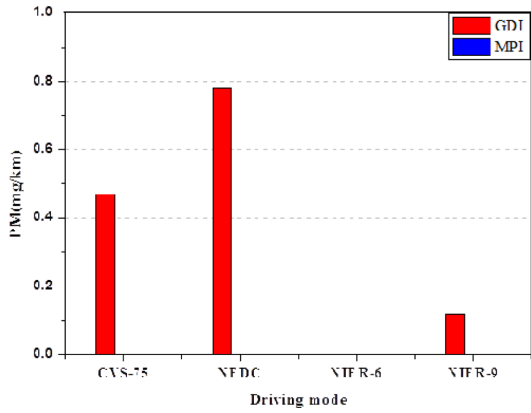
일반주행모드로는 CVS-75모드, NEDC모드, NIER모드 중 6번과 9번 모드를 진행하였다. 국내와 미국의 인증시험 주행모드인 CVS-75는 70년대 미국 LA의 도심주행을 반영한 주행모드로서 저온시동주행으로 505초의 Transient phase와 약 1100초의 Stabilized phase를 운전한 후에 시동을 끈다. 그 후 약 10분간 Soaking을 가지고 다시 시동을 켜고 다시 Transient phase에서 505초간 고온시동주행을 한다. 또한 유럽의 인증시험 주행모드인 NEDC는 1960년대 파리의 도심주행을 반영한 ECE15모드4번과 최고속도 120 km/h를 포함한 고속주행모드인 EUDC 1번으로 구성되어 있다. 이 외의 NIER모드는 2000년도에 국립환경과학원에서 국내 자동차의 주행패턴을 고려하여 평균자동차 속도에 따른 주행모드를 개발하였고 배출계수 산정에 활용되는 주행모드이다. 본 실험에서는 유럽 및 미국, 그리고 국내에서의 인증시험모드뿐만 아니라 국내 도심주행모드와 유사한 주행모드를 분석하기 위해 낮은 속도주행을 가지고 있는 NIER 모드 중 임의로 6번과 9번을 선정하였다. CVS-75와 NEDC의 경우 저온에서의 배출특성을 알아보기 위해 실험자동차를 약 12~36시간동안 20~30°C 상태로 주차한 후에 운전하는 저속시동모드의 실험을 진행하였다.

본 실험에서는 자동차 속도에 따른 미세입자 특성을 알아보기 위해 10 km/h, 35 km/h, 80 km/h, 110 km/h의 속도로 10분간 운전하는 정속주행모드를 추가적으로 실험하였다. 이는 각 자동차 속도에서의 배출되는 미세입자가 어떠한 차이를 가지며 또한 GDI와 MPI자동차에서의 차이를 분석하고자 실험을 진행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Particulate Matter 특성

Figure 4는 일반주행모드(a)와 정속주행모드(b)에서의 GDI와 MPI자동차에서 배출되는 PM을 비교한 것이다. PM의 경우 일반주행모드에서 GDI자동차에서 MPI자동차와 비교하였을 때, 압도적으로 많이 배출되었다. Table 3에는 실제 실험에서의 여과지 상태를 나타내었다. MPI의 경우는 대부분의 주행모드에서 포집 전의 여과지와 비슷한 수준의 상태를 보여주고 있다. 반면 GDI 자동차 실험 때의 여과지의 경우 분명한 PM 농도 차이가 육안으로 확인이 가능하며 특히 저온시동모드인



(a) The result of PM at normal driving mode

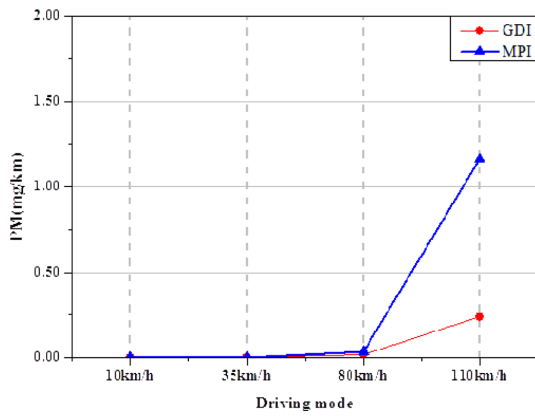


Fig. 4 Comparison of the PM characteristics between GDI and MPI Vehicles with various driving modes

CVS-75와 NEDC의 경우에는 상당히 많은 양의 PM이 발생한 것을 볼 수 있다. 이는 고온시동주행보다 저온시동주행에서의 미세입자 배출이 많은 일반적인 경향을 나타낸다. 또한 고속주행을 포함한 NEDC의 경우가 가장 높은 PM 결과를 나타내고 있다.

NIER-6와 NIER-9의 경우 분석이 불가능할 수준의 낮은 미세입자 배출을 보이고 있는데 이는 모드 자체의 낮은 평균속도 Cycle로 이루어져 있으며 고온시동모드에서의 운전으로 인해 CVS-75와 NEDC모드와는 상대적으로 연료의 미립화와 균일혼합기형성의 원활함으로 인한 결과라고 판단된다. 특히 NIER-6의 경우 평균속도가 19.5 km/h로 가장 낮기 때문에 NIER-9 보다 낮은 배출을 보였으며 실제 여과지로의 중량측정이 어려운 수준의 낮은 배출을 보이고 있다.

정속주행모드의 경우 속도가 증가할수록 점차 증가되고 있으며 특히 110 km/h의 고속주행에서는 GDI와

Table 3 Comparison of collected the filter paper between GDI and MPI Vehicles at normal driving mode

Mode	GDI	MPI
CVS-75		
EDC		
NIER 6		
NIER 9		

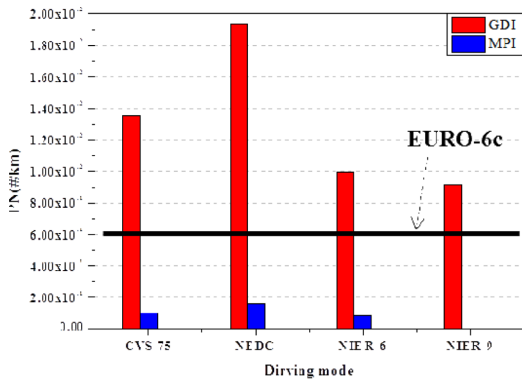
MPI 두 자동차 모두 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

특히 MPI 자동차에서 상당히 높은 PM을 보이고 있는데 이는 앞서 120 km/h의 NEDC에서도 볼 수 있었듯이 일정 속도이상의 고속주행에서는 상당히 많은 양의 PM이 배출되고 있는 것으로 확인되고 있다. 이는 GDI와 MPI 경우 모두 높은 RPM에서의 균일한 혼합기 형성에 어려움이 원인이라 판단되고, 정속주행모드에서의 GDI와 MPI 자동차의 차이는 GDI에서의 보다 정밀한 연료분사제어로 인한 차이라고 판단된다.

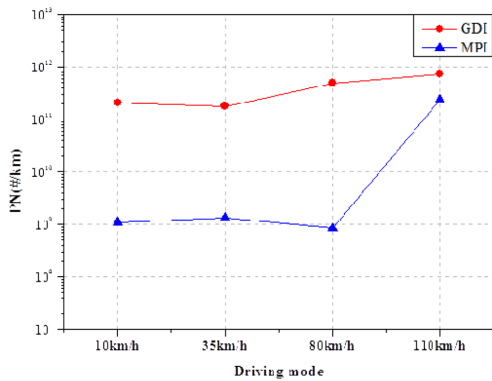
3.2 Particle Number 특성

Fig. 5은 일반주행모드(a)와 정속주행모드(b)에서의 GDI와 MPI자동차에서 배출되는 PN을 비교한 것이다.

정속주행모드의 결과는 각각의 주행모드에서의 비교 분석을 원활하게 하기 위해 Log scale로 변환하여 나타내었다. 역시 110 km/h의 고속주행모드에서 GDI와 MPI 자동차 모두 가장 높은 PN을 보이고 있다. GDI자동차의 경우는 주행모드의 속도 증가에 따라 조금씩 증가하고 있지만 일정한 값을 유지하지만 MPI의 경우



(a) The result of PN at normal driving mode



(b) The result of PN at constant speed driving mode

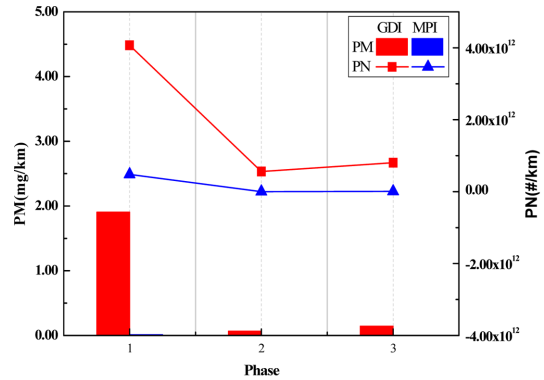
Fig. 5 Comparison of the PN characteristics between GDI and MPI Vehicles with various driving modes

에는 110 km/h에서의 상당히 큰 증가를 보이고 있다. 이는 앞서 PM의 경우와 동일한 높은 RPM에서의 연료분사 제어의 어려움과 균일하지 못한 혼합기의 불완전 연소에 의한 결과라고 판단된다.

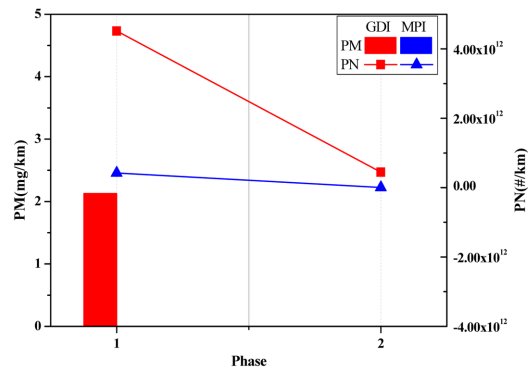
3.3 Phase에 따른 PM, PN 특성

Fig. 6은 CVS-75(a)와 NEDC(b)에서의 GDI와 MPI자동차에서 배출되는 PN을 각 Phase에 따라 비교한 것이다.

GDI 자동차의 경우 CVS-75와 NEDC 모두 1Phase에서의 미세입자 배출이 높게 나타나고 있는데 이는 저온 시동주행에서의 높은 배출이 이루어 지며 엔진의 열이 서서히 증가하면서 미세입자의 배출이 줄어드는 것이 보여진다. 하지만 CVS-75 모드의 경우 다시 3Phase에서의 증가가 보이는데 이는 Stabilized Phase인 2Phase에서는 Transient Phase인 3Phase보다 평균 자동차 속도가 낮기 때문에 미세입자 배출량 역시 낮은 결과를 나타내고



(a) The result of PM and PN at CVS-75 mode



(b) The result of PM and PN at NEDC mode

Fig. 6 Comparison of PM and PN at CVS-75 and NEDC modes according to driving Phase

있으며 MPI 자동차의 경우 1Phase에서의 미세입자 배출이 가장 높지만 GDI 자동차에 비해 상당히 낮은 배출을 보이고 있다. 이는 GDI 자동차의 경우 실린더 내부로 직접 차가운 연료를 분사하기 때문에 실린더 내부 온도에 대한 영향이 MPI 자동차보다 큰 것으로 판단되며 연료미립화가 원활히 이루어지지 못해 불완전연소가 증가하게 된다. 따라서 미세입자 배출 증가가 발생한다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 GDI와 MPI 자동차에의 PM과 PN의 배출특성을 비교한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 저온시동주행 시에 고온시동주행 때 보다 GDI와

MPI 자동차 모두 PM과 PN이 많이 배출되는 결과를 나타내었다.

(2) PM의 경우 GDI와 MPI 자동차를 비교하였을 때, 일반주행모드에서 GDI 자동차의 PM 배출이 압도적으로 많았으나 10, 35, 80 km/h의 정속주행모드에서는 GDI와 MPI 자동차 모두 적은 PM 배출을 보였고, 고속주행인 110 km/h의 정속주행에서는 MPI 자동차에서 더 높은 PM을 나타내었다. 이는 GDI와 MPI의 정밀연료분사의 차이가 원인이라고 판단된다.

(3) PN의 경우 PM과 마찬가지로 일반주행모드에서는 GDI 자동차의 높은 PN을 나타내었으며 정속주행모드에서의 비교 역시 GDI 자동차에서 높은 PN이 확인됐다. 또한 GDI 자동차에서의 PN은 현재 유럽 배출가스규제인 EURO-6의 배출허용기준인 6×10^{12} #/km에는 만족하지만 향후 규제가 강화되는 EURO-6c의 배출허용기준인 6×10^{11} #/km에는 만족하지 못한다. 이에 따라 PN에 대한 저감기술이 필요하다고 판단된다.

(4) 고속주행모드인 110 km/h의 정속주행모드에서의 PN 역시 다른 정속주행모드에 비하여 급격한 PN의 증가를 보이는데 이는 앞서 PM의 급격한 증가의 이유와 같은 높은 RPM에서의 연료분사제어의 어려움과 균일하지 못한 혼합기에서의 연소의 원인으로 판단된다.

(5) 저온시동주행에서의 GDI와 MPI 자동차에서 배출되는 PM 및 PN의 경우 GDI 자동차에서는 급격한 증가를 보이고 있으나 MPI 자동차에서는 상대적으로 크지 않은 증가를 보이고 있다. 이는 GDI 자동차의 경우 연료를 직접 실린더 내부로 분사하기 때문에 실린더 내부 온도상승 저지 효과와 함께 연료 미립화의 어려움이 발생으로 인한 불완전연소가 증가한다. 따라서 보다 높은 미세입자 배출이 나타나는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국립환경과학원 지원으로 수행되었으며,

연구를 지원해 주신 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김동영, “건강을 위협하는 미세먼지, 원인과 대책”, 경기개발연구원(행정간행물 이슈&진단 No. 121 2013. 11. 20).
- (2) Regulation (EC) No 715/2007, “on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information”, 2007.
- (3) 유철호 외 4명, “GDI 엔진의 PN 생성 원인 규명 및 저감에 대한 연구”, 2012 한국자동차 공학회 부분종합 학술대회, 2012.5, pp. 53~58.
- (4) F. Zhao, M. Lai, and D. Harrington, “Automotive Spark Ignited Direct-Injection Gasoline Engines”, Pergamon, 1999.
- (5) B. R. Graskow, D. B. Kittelson, M. R. Ahamdi, and J. E. Morris, “Exhaust Particulate Emissions from Direct Injection Spark Ignition Engine”, SAE paper 1999-01-1145, 1999.
- (6) J. W. Kim, K. H. Choi, C.-L. Myung, Y. J. Lee, and Simsoo Park, “Comparative investigation of regulated emissions and nano-particle characteristics of light duty vehicles using various fuels for the FTP-75 and the NEDC mode”, FUEL 2012-12-047, 2012.
- (7) Catapano, F., Di Iorio, S., Sementa, P., and Vaglieco, B., “Characterization of Ethanol-Gasoline Blends Combustion processes and Particle Emissions in a GDI/PFI Small Engine”, SAE Technical Paper 2014-01-1382, 2014.
- (8) Braisher, M., Stone, R., and Price, P., “Particle Number Emissions from a Range of European Vehicles”, SAE Technical Paper 2010-01-0786, 2010.