

냉간 및 열간 시동 조건에서 자동차 연료에 따른 배출가스 및 입자상 물질 (PM) 발생 특성

김현수¹, 이석환², 이진우^{1*}

¹울산과학기술대학교 기계공학부, ²한국기계연구원 모빌리티동력연구실

Characterization of Vehicular Exhaust Gas Emissions and Particulate Matter (PM) according to the Operating Fuel under Cold and Hot Starting Conditions

Hyun Soo Kim¹, Seok-Hwan Lee², Jin-Woo Lee^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Ulsan College

²Department of Mobility Power Research, Korea Institute of Machinery & Materials

요약 도심의 대기질 오염원으로 자동차에서 배출되는 유해 배출가스 및 입자상 물질 (PM)의 기여도가 매우 큰 것으로 보고되고 있으며 현재 다양한 방안을 통하여 이를 관리하고 있다. 우선 THC, CO, NO_x 등의 배출가스 및 PM의 배출량에 대한 환경 규제는 점점 강화되고 있으며 연료의 황 함량에 대한 규제도 시행 중이다. 이외에도 국내의 경우 대기오염을 저감 하기 위하여 DPF/DOC 부착, LPG 엔진 개조, CNG 버스 보급 등의 대기질 개선 정책을 정부에서 시행한 사례가 있다. 현재 배출규제에서는 주요 배출가스 및 PM의 중량 및 개수 농도만을 규제하고 있다. 하지만 미규제 물질 일부는 인체에 위해성을 줄 수 있으며 현재 시험법으로는 자동차에서 배출되는 PM이 실제 대기질에 미치는 영향을 정확하게 평가하기 어렵다. 본 연구에서는 가솔린, LPG, CNG, 디젤을 연료로 사용하는 자동차에서 배출되는 규제 및 미규제 배출가스의 배출량 및 PM의 대기 영향을 평가하였다. 실험 결과를 살펴보면 LPG, GDI, 노후 MPI 자동차의 PM 배출량이 Euro 6 규제치를 상회하였으며 DPF가 장착되지 않은 배출가스 4, 5등급의 디젤 자동차에서 규제치의 4-28배 수준의 PM이 발생하였다. VPR을 적용하지 않는 경우 가솔린 및 배출가스 4, 5등급 디젤 자동차에서 다량의 PN이 발생하였으며 VPR을 적용하면 휘발성 유기 입자들이 제거되어 가솔린 자동차의 PN이 대폭 감소하였다.

Abstract Vehicular exhaust gas emissions and particulate matter (PM) are regarded as a major source of environmental air pollution and are currently being addressed through various methods. Regulations on THC, CO, NO_x, and PM emissions are gradually being strengthened, and sulfur content of fuel is also being regulated. In South Korea, the government has implemented policies to reduce air pollution, such as installation of DPF/DOC, retrofit of old diesel engines to LPG engines, and distributing CNG buses. Currently, several exhaust gas emissions and PM are evaluated in exhaust regulations. However, some unregulated substances can also have adverse impacts on human health, and the current test method makes it difficult to accurately evaluate the effect of PM emitted from vehicles on air quality. This study evaluated regulated and unregulated exhaust gas emissions and PM from vehicles operated with gasoline, LPG, CNG, and diesel. Experimental results showed that PM from LPG, GDI, MPI, and non-DPF diesel vehicles exceeded the Euro 6 regulation. Without VPR, a large amount of PN was generated in gasoline vehicles and non-DPF diesel vehicles, whereas with VPR, volatile organic particles were removed, and the PN from gasoline vehicles was significantly reduced.

Keywords : Atmospheric Environment, Exhaust Gas Emissions, Fuels, Particulate Matter, Unregulated Emissions

*Corresponding Author : Jin-Woo Lee(Ulsan College)

email: jwlee2@uc.ac.kr

Received December 12, 2022

Accepted January 6, 2023

Revised January 2, 2023

Published January 31, 2023

1. 서론

도심 대기질 악화의 주된 원인으로 자동차에서 배출되는 미연탄화수소 (THC), 일산화탄소 (CO), 질소산화물 (NOx)과 같은 유해 배출가스와 입자상 물질 (PM)의 기여도가 매우 큰 것으로 보고되고 있으며 현재 다양한 방안을 통하여 이를 관리하고 있다. 하지만 근래에는 유해 배출물이 대기오염 뿐만 아니라 인체에 미치는 영향까지 고려하기 시작하였으며 이에 따라서 나노입자 및 다환방향족탄화수소 (PAHs)도 규제하고자 하는 움직임이 있다[1]. 이외에도 2차 미세먼지에 의한 대기오염이 심각해지면서 자동차 배출가스에 포함된 휘발성 유기화합물 (VOC; Volatile Organic Carbon), 암모니아 (NH₃), 이산화황 (SO₂)과 같은 전구물질의 배출량 관리도 필요하다[2].

전 세계 각국은 자국 실정에 맞는 배출가스 규제방안을 통해 대기오염을 관리하고 있으며 연료의 황 함량도 규제하고 있다. 또한, 디젤 자동차에만 적용하던 나노입자의 개수 농도 규제도 가솔린 자동차까지 확대하는 방안을 고려하고 있다.

국내의 경우 배출가스 및 PM에 의한 대기오염을 저감하기 위하여 노후 디젤 자동차 조기 폐차, 디젤 입자상 물질 필터 (DPF)/디젤 산화 촉매 (DOC) 부착, 노후 디젤 자동차 LPG 엔진 개조, CNG 버스 보급 등의 다양한 대기질 개선사업 정책을 시행한 사례가 있다. 현재는 자동차 배출가스 등급제를 통하여 자동차를 유종, 연식, 오염물질의 배출 정도에 따라서 5개 등급으로 분류하고 5등급 자동차의 경우 도심 진입 제한, 미세먼지 경보일 운행 제한 등의 조치를 취하고 있다. 하지만 다양한 저감 정책의 시행에도 불구하고 도심 대기질 개선 효과는 기대치보다 미미하였으며 원인을 파악한 결과 배출가스에 포함된 전구물질에 의한 2차 미세먼지 생성이 주요 원인

으로 지목되었다[3].

현재 자동차 배출규제에서는 주요 배출가스 및 PM의 질량 및 개수 농도만을 규제하고 있다. 하지만 미규제 물질 일부는 인체에 심각한 위해성을 미칠 수 있으며 그중 2차 미세먼지 전구물질들은 대기 미세먼지 농도를 증가시킬 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다[4]. 게다가 현재 시험법으로는 자동차에서 배출되는 PM이 실제 대기 미세먼지에 미치는 영향을 정확하게 평가하기도 어렵다[5,6].

본 연구에서는 가솔린, 디젤, LPG, CNG를 연료로 사용하는 자동차에서 배출되는 규제 및 미규제 물질의 배출량 및 PM의 대기 영향을 평가하였다. 디젤 자동차의 경우 배출가스 등급제에 따른 3, 4, 5등급의 자동차를 각각 평가하였다. 이를 통하여 각 사용 연료가 도심의 대기 질에 미치는 영향을 종합적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1 대상 자동차

본 연구에서는 대상 자동차로 Table 1과 같이 가솔린, CNG, LPG, 디젤을 연료로 사용하는 총 10종의 자동차를 선정하였다. LPG, CNG, 가솔린 자동차의 경우 후처리 장치로 삼원 촉매가 장착되어 있으며 가솔린 자동차는 엔진 형식에 따라서 T-GDI, GDI, MPI로 구분하였다. LPG, CNG 자동차는 엔진 형식은 모두 MPI 방식이다. 디젤 자동차의 경우 배출가스 등급제에 따라서 3, 4, 5등급의 자동차로 구분하였으며 3등급의 자동차에는 PM과 NOx를 저감하기 위한 디젤 입자상 물질 필터 (DPF)와 선택적 환원 촉매 (SCR)가 장착되어 있다.

Table 1. Specifications of test vehicles

Spec.	Fuel	Displacement (cc)	Model Year	Odometer (km)	After-treatment
LPG (1)	LPG	1,998	2018	35,500	TWC
LPG (2)	LPG	2,999	2020	13,215	TWC
CNG	CNG bi-fuel	2,700	2009	185,000	TWC
T-GDI	Gasoline	1,998	2019	23,500	TWC
GDI	Gasoline	3,342	2018	33,683	TWC
MPI (1)	Gasoline	1,998	2010	179,744	TWC
MPI (2)	Gasoline	1,999	2019	44,288	TWC
Diesel 3	Diesel	2,199	2018	63,204	DPF/SCR
Diesel 4	Diesel	1,991	2007	161,000	DOC/EGR
Diesel 5	Diesel	2,497	2004	219,310	DOC/EGR

2.2 배출가스 측정 방법

대상 자동차의 유해 배출가스 및 PM 배출량을 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 CFR 40 Part 1065의 측정 표준에 따라 차대 동력계에서 실험을 수행하였다. PM 측정을 위해서 배출가스는 CVS (Constant Volume Sampler) 터널에서 배출가스 유량에 따라 10/1에서 50/1까지 깨끗한 공기로 희석되었으며 멤브레인 필터에 포집된 PM의 중량을 측정하여 PM의 중량 농도를 결정하였다. PM의 개수 농도를 측정하는 공인 방법으로는 CPC (Condensation particle counter)를 사용하여 23 nm 이하의 크기를 가지는 입자를 cut-off 한 후 23 nm 이상의 입경을 가지는 고체 입자만을 측정하도록 규정되어 있다. 본 연구에서도 CPC (Model 5.403; Grimm, Germany)를 사용하여 23 nm 이상의 입경을 가지는 고체 입자들만 측정하였다. 대표적인 규제 배출가스인 THC, CO 및 NO_x는 배출가스 분석기 (AMA i60; AVL, Austria)를 사용하여 측정하였다. 인체에 위해성을 가지는 미규제 물질인 포름알데히드 (HCHO)와 2차 미세먼지 전구체 가스인 암모니아 (NH₃) 및 이산화황 (SO₂)의 농도는 FTIR (Fourier transform infrared spectrometer) (SESAM FTIR-278; AVL)을 자동차 배기 파이프에 직접 연결하여 측정하였다.

본 연구에서는 승용 자동차의 배출가스와 연비를 측정하기 위해 개발된 WLTC (World-wide Harmonized Light-duty Test Cycle)를 배출가스 및 PM 평가를 위한 구동 사이클로 사용하였다. WLTC는 승용 자동차의 평균 주행 패턴을 모사할 수 있는 사이클로 유럽, 미국, 한국, 일본 및 인도에서 주행하는 70만 대의 자동차에서 수집한 데이터 포인트를 사용하여 개발되었다.

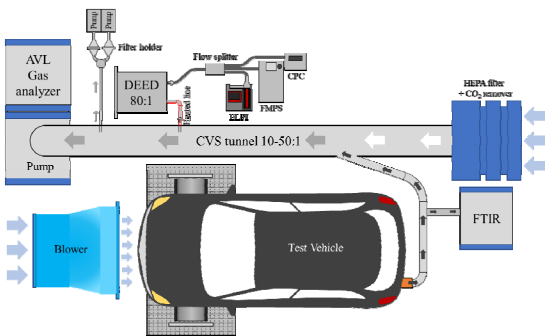


Fig. 1. Schematic of the vehicle test setup designed to measure exhaust gas using a chassis dynamometer

자동차 엔진의 워업 상태에 따라서 배출가스의 특성이 다르므로 자동차의 냉간 시동 (Cold start) 및 열간 시동 (Hot start)의 두 조건에서 시험을 수행하였다. 엔진에서 배출되는 입자가 환경에 미치는 영향을 판단하기 위하여 공인 시험법을 따르지 않고 냉간 시동-VPR (Volatile particle remover) off, 열간 시동-VPR off, 열간 시동-VPR on의 순으로 세 가지 조건에서 입자의 배출 특성을 평가하였다.

3. 실험 결과

3.1 규제 배출가스

대표적인 규제 배출가스인 THC, CO, NO_x의 자동차 유형별 배출량 결과를 Fig. 2-4에 나타내었다.

THC의 경우 Euro 6 배출규제치가 0.10 g/km로 설정되어 있는데 CNG 연료를 사용하는 자동차를 제외하고는 모든 자동차가 규제치를 만족하고 있다.



Fig. 2. THC emissions according to vehicle type under (a) cold-start and (b) hot-start conditions

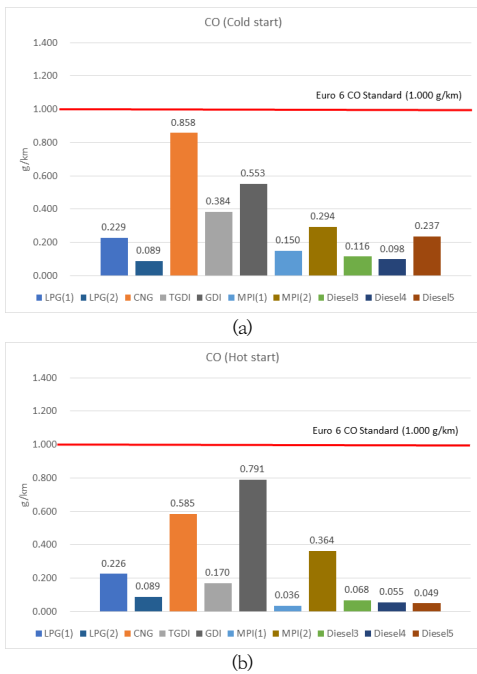


Fig. 3. CO emissions according to vehicle type under (a) cold-start and (b) hot-start conditions

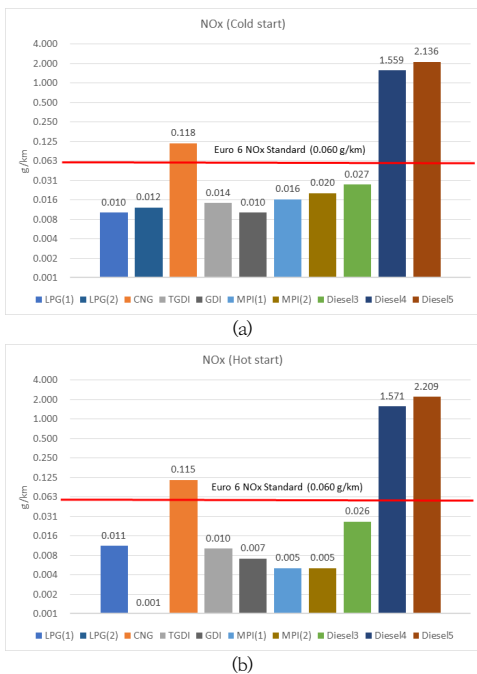


Fig. 4. NOx emissions according to vehicle type under (a) cold-start and (b) hot-start conditions

냉간 시동 대비 열간 시동의 경우 엔진 및 후처리 장치가 충분히 예열되어 있기 때문에 배출량이 현저히 감소하였다. THC의 경우 냉 시동 조건에서 연료의 Wall wetting 현상으로 상당량 발생하는데 LPG의 경우 가스 연료이므로 이를 방지할 수 있으므로 THC 배출량이 전반적으로 낮은 수준이었다. CNG의 경우에도 가스 연료이기는 하지만 본 시험 자동차가 Bi-fuel type으로 개조된 자동차이기 때문에 과도 구간에서 공연비의 최적 제어가 이루어지지 않고 농후한 조건으로 운전되었기 때문에 배출량이 매우 높게 측정되었다.

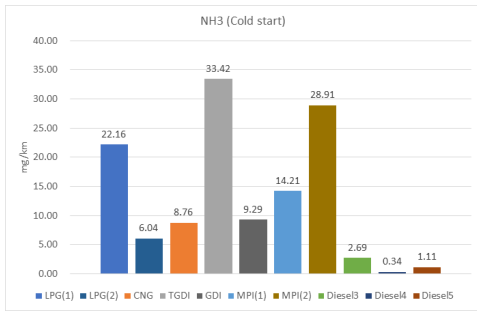
CO의 경우 Euro 6 배출규제치가 1.00 g/km로 설정되어 있는데 모든 자동차가 배출규제치를 만족하였다. THC와 마찬가지로 CNG 자동차의 CO 배출량이 다소 높은 결과를 보였으며 희박 연소를 하는 디젤 자동차들의 배출량이 매우 낮은 결과를 보였다.

NOx의 경우 Euro 6 규제치가 0.06 g/km로 설정되어 있는데 CNG 및 디젤 4, 5등급 자동차들에서는 규제치 이상의 NOx가 발생하였다. CNG 자동차의 경우 노후화 및 과다 주행거리로 인하여 촉매가 열화되어 성능이 저하되었으며 최적화되지 않은 연료 매핑으로 인하여 이론 공연비 운전이 지속되지 않아 삼원 촉매의 효율이 저하되었을 것으로 판단된다. 디젤 자동차의 경우 3등급 자동차는 SCR 적용으로 NOx를 저감할 수 있지만 4, 5등급 자동차는 EGR 적용만으로는 Euro 6 규제를 만족할 수 없으며 25-35배 정도 높은 수준의 NOx가 배출되었다.

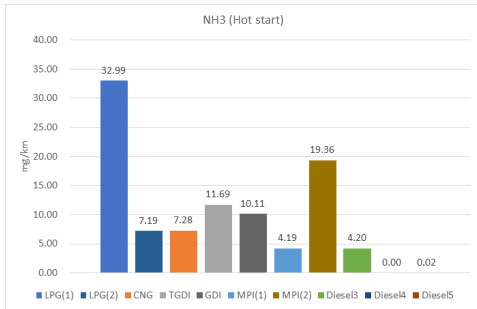
3.2 미규제 배출가스

미규제 배출가스로 2차 미세먼지의 전구체 가스인 NH₃, SO₂ 및 인체 위해성을 가지는 HCOH의 자동차 유형별 배출량 결과를 Fig. 5-7에 나타내었다.

NH₃의 경우 현재 Euro 6에서는 배출규제치가 없지만 2025년에 발효되는 Euro 7 규제에서는 20 mg/km로 설정되어 규제할 예정이다. NH₃의 배출 특성은 냉간 및 열간 시동 조건에 따라서 별다른 경향성이 보이지 않으며 삼원 촉매를 사용하는 자동차의 경우 촉매의 환원 조건에서 NH₃가 발생할 수 있으며 일부 자동차의 경우 20 mg/km의 규제치를 상회하는 NH₃가 발생하였다. 디젤 자동차의 경우 희박 조건으로 운전되기 때문에 NH₃의 발생량은 미미하였으며 3등급 디젤 자동차의 경우 환원제로 사용하는 Urea의 슬립으로 인하여 소량의 NH₃가 검출되었다.

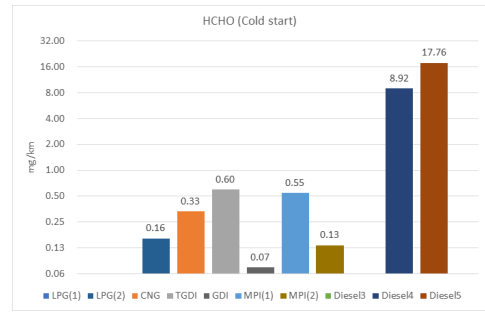


(a)

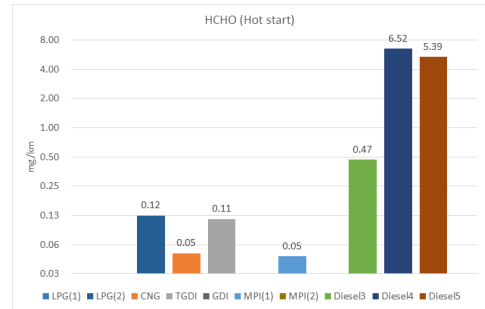


(b)

Fig. 5. NH₃ emissions according to vehicle type under (a) cold-start and (b) hot-start conditions

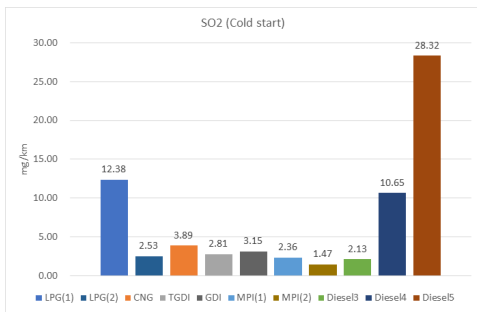


(a)

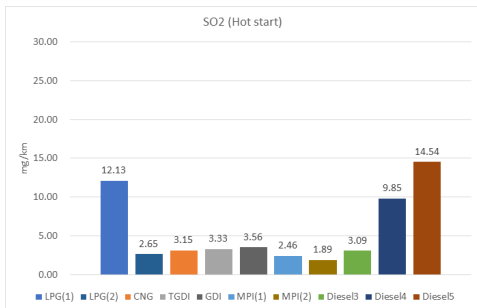


(b)

Fig. 7. HCHO emissions according to vehicle type under (a) cold-start and (b) hot-start conditions



(a)

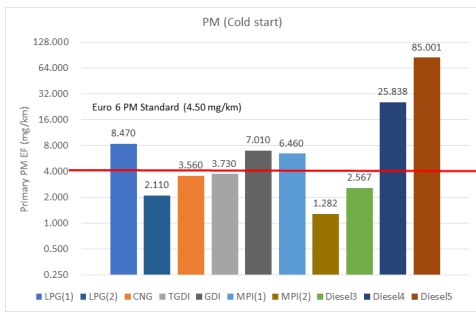


(b)

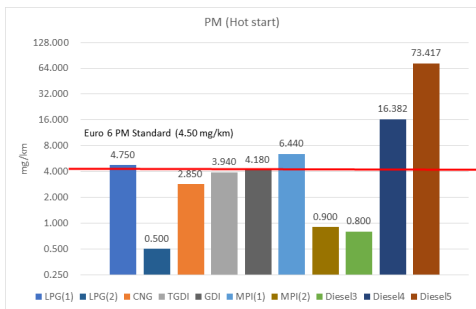
Fig. 6. SO₂ emissions according to vehicle type under (a) cold-start and (b) hot-start conditions

SO₂의 경우 4, 5등급 디젤 자동차를 제외하고는 대부분의 자동차에서 배출량이 매우 낮게 측정되었는데 특히 하계 LPG (1) 자동차에서 다량의 SO₂가 배출되었다. 이는 LPG 연료에 포함된 부취제의 주성분이 황이므로 이로 인한 효과일 가능성이 있지만 LPG(2) 자동차의 경우 배출량이 낮은 결과를 보이고 있으므로 사용 LPG 연료의 정확한 성분 분석이 필요할 것으로 판단된다. 황 성분이 포함된 디젤 연료를 사용하는 디젤 자동차의 경우 최신 후처리 장치가 적용되지 않는 경우 상당량의 SO₂가 발생하였다.

HCHO의 경우 국제 암 연구 기관인 IARC (International Agency for Research on Cancer)에서 1급 발암 물질로 분류할 만큼 인체 위해성이 매우 높은 물질이다. Clove에서 제안한 Euro 7 규제에는 5 mg/km의 규제치를 만족하는 것으로 포함 되었지만 EU에서 발효한 최종안에는 제외되어 있는데 향후 다시 포함될 가능성이 높다[7]. 가솔린 및 가스 연료를 사용하는 자동차의 경우에는 HCHO가 발생하지 않거나 발생량이 매우 미미한 수준이었지만 4,5등급 디젤 자동차의 경우 5 mg/km 이상으로 다량 발생하고 있다. 3등급 디젤 자동차의 경우 후처리 장치에 포함된 촉매에서 HCHO가 제거되므로 발생량이 매우 낮은 것으로 평가되었다.



(a)



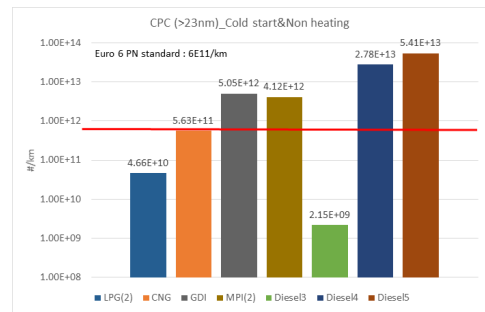
(b)

Fig. 8. PM mass emissions according to vehicle type under

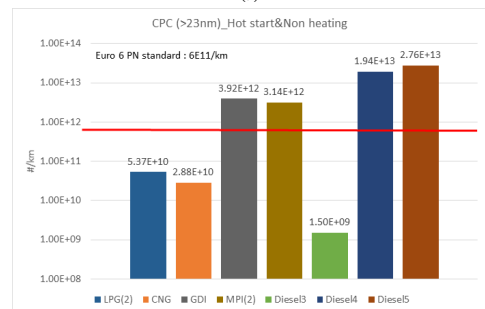
(a) cold-start and (b) hot-start conditions

3.3 입자상 물질 (PM)

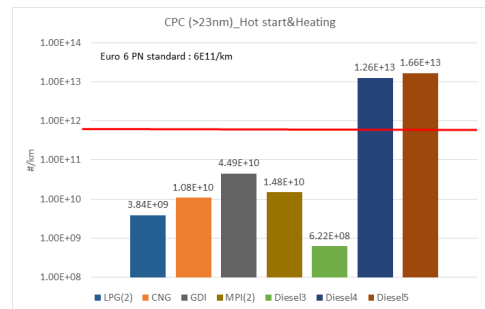
Fig. 8에는 자동차 연료별 발생하는 PM의 중량 기준 배출량을 나타내었다. PM의 경우 현재 Euro 6 배출규제치가 중량 기준 4.50 mg/km로 설정되어 있는데 LPG(1), GDI, 노후 기술된 자동차인 MPI(1), 디젤 4, 5 등급 자동차의 배출량이 규제치를 상회하고 있다. LPG 자동차의 경우 일반적으로 엔진 연소에 의한 PM은 거의 발생하지 않는데 배기관의 부식이나 촉매 파손으로 인한 퇴적물이 발생하여 다량의 PM이 측정된 것으로 유추된다. GDI 자동차의 경우 고체 입자를 제거할 수 있는 후처리 장치가 현재 장착되어 있지 않으므로 연소기 내 농후한 연소 영역에서 발생하는 PM이 다량 배출되고 있다. 노후 기술된 자동차의 경우 MPI 방식을 사용한다고 하더라도 LPG 자동차의 경우와 마찬가지로 배기관 및 촉매의 부식으로 인하여 PM이 검출될 수 있다. DPF가 장착되지 않은 디젤 4, 5등급의 자동차는 DOC가 일정량의 SOF (Soluble organic fraction)을 제거한다고 하더라도 고체 입자를 제거할 방안이 없기 때문에 규제치의 4-28배 수준의 PM이 발생하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. PM number emissions according to vehicle type under

(a) cold-start & VPR off, (b) hot-start & VPR off, and (c) hot start & VPR on conditions

Fig. 9에는 시동 조건 및 VPR 적용 유무에 따른 자동차 연료별 발생하는 PM의 개수 기준 배출량을 나타내었다. PM 개수의 경우 현재 Euro 6 배출규제치가 6×10^{11} 개/km로 설정되어 있는데 이는 자동차의 냉간 시동 및 VPR on 조건에서 측정되는 배출량으므로 본 연구의 조건과는 상이하지만 참고사항으로 표기하였다. 실제 대기 조건에서는 고체 입자 뿐만 아니라 상당량의 휘발성 유기화합물도 입자로 생성되므로 VPR을 적용하지 않고 단지 냉간 및 열간 시동의 영향만을 평가하여야 한다. Fig. 9 (a)의 결과와 같이 냉간 시동 조건에서 VPR을 적용하지 않는 경우에는 LPG, CNG 자동차 및 DPF가 장착된

디젤 3등급 자동차를 제외하고는 Euro 6 규제치의 7-90배 정도의 입자가 발생하였다. 냉간 시동 조건에서는 가솔린 자동차에서 다량의 VOC가 발생하며 VPR로 이를 제거하지 않으면 대기 조건에서 휘발성 입자로 변환될 수 있다. Fig. 9 (b)는 열간 시동 조건에서 VPR을 적용하지 않았을 때 연료별 PN 배출량을 나타내고 있다. 결과를 살펴보면 여전히 GDI, 노후 가솔린 MPI 및 디젤 4, 5등급 자동차에서 Euro 6 규제치를 5-46배 정도 상회하는 입자들이 발생하고 있음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 9 (c)와 같이 열간 시동 조건에서 VPR을 적용하게 되면 상당량의 SOF를 제거할 수 있으므로 가솔린 자동차의 경우 VPR 적용 전에 비하여 1/100 수준의 낮은 PN 배출량을 나타낸다. DPF가 없는 디젤 4, 5등급 자동차의 경우 VPR을 적용한다고 하더라도 배출 입자들의 대부분은 SOF 보다는 고체 입자들이 차지하고 있으므로 Euro 6 규제치 대비 20배 이상의 많은 입자들이 발생하였다.

4. 결론

본 연구에서는 가솔린, 디젤, LPG, CNG를 연료로 사용하는 자동차에서 배출되는 규제 및 미규제 물질의 배출량 및 PM의 대기 영향을 평가하였으며 아래와 같은 유의미한 결과를 도출하였다.

THC의 경우 CNG 자동차를 제외하고는 Euro 6 규제를 만족하였다. CNG 자동차의 경우 과도구간에서 다량의 THC가 배출되었다. CO의 경우에도 CNG 자동차의 배출량이 다소 높았지만 모든 자동차에서 Euro 6 규제치를 만족하였다.

NOx의 경우에는 CNG 자동차에서 규제치 이상이 배출되었으며 배출가스 4, 5등급의 디젤 자동차에서도 규제치의 25-35배 수준의 다량의 NOx가 발생하였다.

대표적인 2차 미세먼지 전구물질인 NH₃의 경우 삼원 촉매를 사용하는 자동차로부터 일정량 배출되는 것을 확인하였다. 디젤 자동차는 희박 운전으로 인하여 엔진 연소로 인한 배출은 거의 없었지만 디젤 3등급 자동차의 경우 SCR에서 NH₃ slip으로 인하여 소량 배출되었다.

SO₂의 경우 LPG(1) 자동차에서 특이하게 다량 배출되었는데 이는 LPG 연료의 부취제에 의한 영향일 가능성이 있다. 황 성분이 함유된 디젤을 사용하는 배출가스 4, 5등급 디젤 자동차에서 다량 배출됨을 확인하였다. HCHO는 IARC에서 분류한 1급 발암 물질이며 인체 위

해성 매우 높은 것으로 알려져 있는데 배출가스 4, 5등급 디젤 자동차에서 다량 배출되었다.

LPG, GDI, 노후 가솔린 MPI 자동차의 PM 배출량이 Euro 6 규제치를 상회하였다. DPF가 장착되지 않은 배출가스 4, 5등급의 디젤 자동차에서 규제치의 4~28배 수준의 PM이 발생하였다.

VPR을 적용하지 않는 경우 가솔린 자동차 및 배출가스 4, 5등급 디젤 자동차에서 다량의 PN이 발생하였다. VPR을 적용하는 경우 휘발성 유기 입자들이 제거되어 가솔린 자동차의 PN이 대폭 감소하였다.

References

- [1] C. Lin, S. Chen, K. Huang, W. Lee, W. Lin, J. Tsai, H. Chung, "PAHs, PAH-Induced Carcinogenic Potency, and Particle-Extract-Induced Cytotoxicity of Traffic-Related Nano/Ultrafine Particles", *Environmental Science and Technology*, Vol.42, pp.4229-4235, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1021/es703107w>
- [2] T. Liu, X. Wang, W. Deng, Y. Zhang, B. Chu, X. Ding, Q. Hu, H. He, J. Hao, "Role of ammonia in forming secondary aerosols from gasoline vehicle exhaust", *Science China Chemistry*, Vol. 58, No. 9, pp.1377-1384, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s11426-015-5414-x>
- [3] H. Han, C. Jung, S. Kum, Y. Kim, "The Revisit on the PM10 Reduction Policy in Korea: Focusing on Policy Target, Tools and Effect of 1st Air Quality Management Plan in Seoul Metropolitan Area", *Journal of Environmental Policy and Administration*, Vol.25, No.1, pp.49-79, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15301/jepa.2017.25.1.49>
- [4] D. R. Gentner, S. H. Jathar, T. D. Gordon, R. Bahreini, D. A. Day, I. E. Haddad, P. L. Hayes, S. M. Pieber, S. M. Platt, J. Gouw, A. H. Goldstein, R. A. Harley, J. L. Jimenez, A. S. H. Prevot, A. L. Robinson, "Review of Urban Secondary Organic Aerosol Formation from Gasoline and Diesel Motor Vehicle Emissions", *Environmental Science and Technology*, Vol.51, No. 3, pp.1074-1093, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04509>
- [5] J. H. Kwak, H. S. Kim, J. H. Lee, S. H. Lee, "ON-ROAD CHASING MEASUREMENT OF EXHAUST PARTICLE EMISSIONS FROM DIESEL, CNG, LPG, AND DME-FUELED VEHICLES USING A MOBILE EMISSION LABORATORY", *International Journal of Automotive Technology*, Vol.15, No. 4, pp.543-551, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-014-0057-z>
- [6] B. Giechaskiel, R. Chirico, P. F. DeCarlo, M. Clairrotte, T. Adam, G. Martini, M. F. Heringa, R. Richter, A. S. H. Prevot, U. Baltensperger, C. Astorga, "Evaluation of

the particle measurement programme (PMP) protocol to remove the vehicles' exhaust aerosol volatile phase", *Science of the Total Environment*, Vol.408, pp.5106-5116, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.010>

- [7] T. Boger, D. Rose, S. He, A. Joshi, "Developments for future EU7 regulations and the path to zero impact emissions - A catalyst substrate and filter supplier's perspective", *Transportation Engineering*, Vol.10, pp.100129, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/i.treng.2022.100129>

김 현 수(Hyun Soo Kim)

[종신회원]



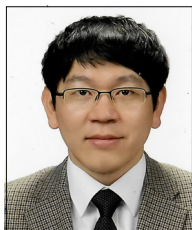
- 2002년 2월 : GIST 기전공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : GIST 기전공학과 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 2010년 8월 : GIST 기전공학과 (Post Doc.)
- 2010년 9월 ~ 2014년 2월 : 삼성 SDI 중앙연구소 책임연구원
- 2014년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 기계공학부 부교수

<관심분야>

빅데이터, 인공지능, 생산자동화, CAD, 그래픽스

이 석 환(Seok-Hwan Lee)

[정회원]



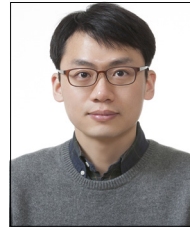
- 2001년 2월 : KAIST 기계공학부 (공학석사)
- 2005년 8월 : KAIST 기계공학부 (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 한국기계연구원 모빌리티동력연구실 책임연구원

<관심분야>

엔진공학, 자동차공학, 미세먼지

이 진 우(Jin-Woo Lee)

[정회원]



- 2005년 2월 : KAIST 기계공학부 (공학석사)
- 2011년 8월 : KAIST 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 8월 ~ 2015년 1월 : 현대 자동차 남양연구소 책임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 기계공학부 부교수

<관심분야>

에너지 시스템, 연소시스템, 친환경 시스템