

배출허용기준 대응기술을 고려한 국내 소형 경유 운행차의 대기오염물질 관리 방안

Control Measures for Air Pollutant Emissions from In-Use Light-Duty Diesel Vehicles Regarding their Emission Control Technologies

이태우* · 박하나 · 박준홍 · 전상진 · 김정수 · 최광호¹⁾
국립환경과학원 교통환경연구소, ¹⁾남서울대학교 교양과정부
(2014년 4월 3일 접수, 2014년 6월 9일 수정, 2014년 6월 9일 채택)

Taewoo Lee*, Hana Park, Junhong Park, Sangzin Jeon,
Jeongsoo Kim and Kwangho Choi¹⁾

Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research

¹⁾*Department of General Education, Nam Seoul University*

(Received 3 April 2014, revised 9 June 2014, accepted 9 June 2014)

Abstract

The objective of this study is to enhance the effectiveness of Korean Inspection and Maintenance (I/M) program. Three main tasks are: to measure pollutant emissions of in-use light-duty diesel vehicles (LDVs); to evaluate the validity of existing smoke control scheme for low-smoke-emitting vehicles, which have diesel particulate filters, DPF, to meet stringent Euro-5 emission limits; and to assess the necessity and the benefit of NO_x inspection, which is not involved in current I/M program.

We measured second-by-second smoke, particulate and gaseous emissions of 27 LDVs using opacity smoke meter, photo-acoustic soot sensor, and portable emissions measurement system, respectively, under the Korean I/M test driving cycle, KD-147. We find that the DPF plays a key role in controlling soot, which can be considered as black carbon contained in particulate matter. Thus, from an I/M perspective, we believe smoke inspection strategies for Euro-5 diesel vehicles should be more focused on the capability of detecting DPF malfunctions or failures, in order to keep DPF properly functional. Fleet averaged distance-specific NO_x emissions are consistently higher than corresponding emission limits, and the values are similar among pre-Euro-3, Euro-3, and Euro-4 vehicle fleets. These findings indicate that the NO_x inspection should be incorporated into current I/M program in order to manage urban NO_x emissions. This research allows the Korean I/M program keep pace with developments in vehicle technologies, as well as the increased emphasis on NO_x with respect to air quality and human health.

Key words : In-use vehicles, Inspection and Maintenance (I/M) Program, Light-duty diesel vehicles, Soot, NO_x, Diesel Particulate Filter (DPF)

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7609, E-mail : taewoolee@korea.kr

1. 서 론

최근 환경부는 2024년까지 서울특별시 대기 중 이산화질소(NO₂)와 직경 2.5 μm 이하의 미세먼지(PM_{2.5})의 농도를 각각 21 ppb 및 20 μg/m³ 이하로 개선할 것임을 밝혔다.^a 도로이동오염원은 2011년도 수도권 배출량 중 PM_{2.5}의 35%, 질소산화물(NO_x)의 46%를 배출하고 있으며, 이 중에는 경유를 사용하는 화물차 및 레저용 차량의 기여율이 각각 92%, 75%에 이르기 때문에, 경유 자동차는 수도권 대기환경 목표를 달성하기 위해 관리해야 할 핵심 오염원의 하나라고 말할 수 있다(NIER, 2013a).

자동차의 오염물질 관리는 자동차 제작단계와 운행단계로 크게 구분하여 생각해 볼 수 있다. 새롭게 생산되는 자동차는 대기환경보전법에 규정된 제작차 배출허용기준에 적합하게 개발되어야 한다.^b 소형 경유차에 적용되는 배출허용기준을 예로 들면, 2002년 이전에는 우리나라 고유의 허용기준(K2000)을 사용하였고, 2002년부터 2006년까지는 차종별로 유럽 기준(Euro-3)과 국내 기준을 함께 사용하였다. 2006년과 2009년에 Euro-4, Euro-5 기준이 각각 도입되었는데, Euro-5는 K2000 규제 대비 PM은 96%, NO_x는 81% 강화된 수준의 허용기준이다.

운행 과정 중의 자동차 역시 운행차 배출허용기준에 적합한 오염물질 저감성능을 유지하고 있어야 한다.^c 저감성능 유지 여부는 배출가스 검사 및 점검을 통해 확인되며, 부적합 차량은 정비 및 확인검사를 통해 성능을 개선한 후 운행하여야 한다. 환경부의 대표적인 운행차 검사제도인 ‘운행차 배출가스 정밀검사’ (이하, 정밀검사)는 대도시 지역을 중심으로 2002년부터 시행 중인 제도이며, 2011년 정밀검사 대수는 428만여대에 이른다(Cho, 2012). 정밀검사는 대상 차량이 차대동력계 상에서 주행하는 동안 배출하는 오염물질의 농도를 검사하며, 휘발유차에 대해서는 NO_x, 일산화탄소(CO), 탄화수소(THC)를, 경유차에 대해서는 매연을 검사한다.

효율적인 대기오염물질 관리를 위해, 제작차 및 운

행차 대책은 기술적 측면의 일관성과 기능적 측면의 상호 보완성을 유지할 필요가 있다. 제작차 배출허용기준의 대응을 위해 도입된 핵심 기능이 자동차 사용 과정 중에 정상적인 오염물질 저감 성능을 발휘하는지의 여부를 운행차 검사를 통해 확인할 수 있어야 하는 것이다. 제작차 단계에서는 최근 수년간의 배출허용기준 강화에 대응하기 위한 개선이 꾸준히 진행되었다. 하지만 운행차 정밀검사는 제도 도입 당시의 체계를 상당 부분 유지하고 있기 때문에, 10년이 경과된 본 시점에 제작차 기술 수준을 고려한 현행 정밀검사 제도의 타당성에 대해 고찰하는 것은 매우 시의적절하다고 할 수 있다.

제작차 배출허용기준 강화와 관련된 경유 자동차 정밀검사 연구 주제의 하나는 매연여과장치(Diesel Particulate Filter, 이하 DPF) 부착 차량에 대한 매연 검사 적용 타당성에 대한 것이다(CITA, 2011; Denis and Lindner, 2005). DPF는 벌집 모양의 세라믹 필터를 이용하여 엔진 배출가스 중에 포함된 입자상물질(Particulate matter, PM)을 필터링하는 배출가스 후처리 장치의 일종으로, Euro-5 PM 기준(5 mg/km) 대응을 위한 핵심 기술로 알려져 있다(Sanchez *et al.*, 2012; Tzamkiozis *et al.*, 2010; Johnson, 2000). DPF가 부착된 2009년식 이후 Euro-5 경유 자동차는 검사 유효기간(6년) 경과시점인 2015년부터 단계적으로 정밀검사 대상으로 편입될 예정인 바, Euro-5 차량에 대해 현행 매연 정밀검사 방법이 과연 이대로 타당한 것인지, 개선점은 없는 지에 대한 연구가 필요한 상황이라 할 수 있다.

현재 정밀검사 항목에서 누락되어 있는 경유차 NO_x 검사 역시 검토가 필요하다. 최근 일련의 연구를 통해 실제 주행조건에서의 경유 소형차 NO_x 배출량이 배출허용기준 대비 수 배에 이르며, 이는 도시 대기 중 NO₂ 농도에 커다란 영향을 미치는 것을 확인하였다(Lee *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2012; Carslaw *et al.*, 2011; Weiss *et al.*, 2011). 특히 배출가스 인증시험용 주행패턴인 NEDC(New European Driving Cycle) 모드의 운전조건을 벗어나는 120 km/h 초과 고속조건이나, 에어컨 작동 조건에서 배출가스

^a 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015~2024년)

^b 대기환경보전법 제46조(제작차의 배출허용기준 등) 및 제48조(제작차에 대한 인증)

^c 대기환경보전법 제57조(운행차 배출허용기준) 및 제63조(운행차의 배출가스 정밀검사)

재순환 장치(Exhaust Gas Recirculation, EGR)가 선택적으로 작동 저하됨으로 인해 많은 NO_x가 배출되는 사례도 보고되었다(NIER, 2012) EGR은 엔진 배출가스 중 일부를 연소실로 유입하여 NO_x 배출량을 저감시키며, 이는 경유차 NO_x 저감의 핵심 기능으로 알려져 있다(Millo *et al.*, 2012; Bermudez *et al.*, 2011; Takada *et al.*, 2005). 현재까지의 선행연구들은 대부분 최근 연식 차량 위주로 진행되어 차량 노화에 따른 영향을 충분히 파악하기 어려웠다. 따라서 운행차 단계의 NO_x 관리를 위해서는 노후 운행차의 오염물질 측정 결과를 바탕으로 한 경유차 NO_x 검사 방안 도출이 필요하다고 할 수 있다. 유럽 등 경유차 보급이 활발한 해외에서도 유사한 학술적, 제도적 관심이 증가하는 추세이다(CITA, 2011).

본 연구는 차량 제작 당시에 적용된 대기오염물질 저감 기술의 특징을 감안한 운행차 관리방안 제시를 목표로 진행되었다. 운행차 검사 모드에서 소형 경유 운행차의 대기오염물질 배출량을 측정하고, 오염물질 배출특성을 적용 기술별로 분석하였다. 이에 최근 신기술 적용에 따른 소형 경유 운행차의 매연 검사 타당성과 NO_x 검사 필요성을 검토하고 개선방안을 제시하고자 한다.

2. 실험 내용 및 방법

2.1 실험 차량

실험 차량은 1.5~2.9 L의 엔진 배기량과 2000~2012년의 연식 범위를 갖는 소형 경유 운행차 27대이다. 누적 주행거리는 9천~28만 km 수준이다. 차종은 승용차, SUV (Sport Utility Vehicle), 승합차 및 화물트럭 등 현재 국내에서 사용되는 소형 경유차 4개

차종을 모두 포함하였고, 국내 5개 제작사 별로 최소 1대 이상을 포함하였다. 제작사 배출허용기준별 차량 대수는 Euro-3 대응 차량이 13대로 가장 많고, Euro-4, Euro-5 및 K2000 대응 차량이 각각 7대, 4대 및 3대 포함되어 있다. 이는 배출허용기준별 검사 도래 일정을 감안한 것으로서, 현재 정밀검사 대상인 차령 6년 이상 차량의 분포와 유사한 분포라고 할 수 있다. Euro-5 차량은 아직 검사 대상으로 편입되지 않은 상황이나, 향후 대응 방안 연구를 위해 분석 대상에 포함시켰다. Euro-3/4 및 K2000 대응 차량은 교통안전공단 서인천검사소 입고 차량을 이용하였고, Euro-5 차량은 렌트카 및 개인 차량을 임차하여 이용하였다.

측정결과 분석을 위해서는 배출허용기준 대응 목적으로 적용된 오염물질 저감기술의 특징을 이해할 필요가 있다(표 1). 대부분의 Euro-4/5 대응 차량은 PM 저감을 위해 연료 고압분사와 흡입공기 과급 및 냉각(Turbo-Charging and Intercooling, TCI) 기술을 활용하고 있다(Sanchez *et al.*, 2012; Bertola, 2001; Johnson, 2000; Mitsuishi *et al.*, 1999). TCI 기술은 연소실 내 흡입공기의 밀도를 높이고 온도를 낮춤으로써 연소에 필요한 충분한 양의 공기를 공급하게 된다. 고압으로 분사된 연료는 연소실에서 미립화되어 흡입공기와 균일하게 혼합됨으로서 'Engine-Out' PM 발생을 감소시키게 된다.

엔진에서 배출된 PM을 추가적으로 저감시켜 'Tailpipe-Out' 배출량을 감소시키기 위해 후처리장치를 사용한다. Euro-3/4 대응용 후처리장치인 디젤산화촉매(Diesel Oxidation Catalyst, DOC)는 PM 중 organic carbon (OC) 성분을 산화시켜 저감시키는 장치이며, soot 혹은 black carbon이라고도 표현되는 elemental carbon (EC) 성분에는 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 DOC 장착 차량의 PM은 EC 비중이 높은 것으

Table 1. The characteristics and the emissions reduction strategies for selected test vehicles.

| Emission regulation | Number of tested vehicle [-] | Mean of vehicles' age [year] | Mean of vehicles' mileage [km] | Summary of emission reduction strategies* | | | | |
|---------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---|------|------|------|------|
| | | | | Maximum fuel injection pressure [bar] | TCI | EGR | DOC | DPF |
| K2000 | 3 | 12 | 237 k | < 900 | None | Some | None | None |
| Euro-3 | 13 | 7 | 122 k | 900~1,300 | Some | All | All | None |
| Euro-4 | 7 | 5 | 109 k | 1,300~1,600 | All | All | All | Some |
| Euro-5 | 4 | 1 | 11 k | 1,600~1,900 | All | All | All | All |

*Source: Sanchez *et al.* (2012)

로 알려져 있다. Euro-5 차량은 대부분 DOC와 DPF를 함께 사용하고 있다. DPF는 PM 중 EC 성분을 효과적으로 저감시키기 때문에, DPF 장착 차량의 PM은 그 배출량 자체가 매우 적고, 구성 성분 중 OC의 비율은 상대적으로 높은 것으로 알려져 있다(Maricq, 2007; Shah *et al.*, 2004).

NO_x는 EGR을 이용하여 저감시키는 것이 일반적이다(Millo *et al.*, 2012; Bermudez *et al.*, 2011; Takada *et al.*, 2005). EGR 기술은 공압식 다이아프램을 이용하는 방법에서 현재는 전자식 솔레노이드 밸브를 사용하는 수준까지 발전했다(Sanchez *et al.*, 2012). EGR은 흡입공기 및 배기가스를 이용하여 연소실 내 연소 조건을 조작하는 기술이기 때문에 흡기 및 배기 유량 제어가 매우 중요하다. 따라서 EGR 밸브, 흡입 공기량 센서, TCI 등이 중요한 역할을 담당하게 된다.

2. 2 주행패턴

실험 차량의 표준 주행패턴은 KD-147 주행패턴을 사용하였다(그림 1). 이 모드는 소형 경유차 정밀검사용 주행패턴으로서, 2.16km의 거리를 평균 차속 53.0 km/h로 147초 동안 주행하는 모드이다. 순간 최고 차속은 83.5 km/h이다. 수동 변속기 차량은 KD-147 주행패턴에 제시된 변속 시점에 따라 변속하였고, 자동 변속기 차량은 변속기의 「주행(D)」단 선택 후 주행하였다.

주행 차속 및 가속도에 따라 KD-147 주행패턴은 크게 5개의 구간으로 구분될 수 있다. 정차상태에서부터 약 40 km/h 차속까지 가속하는 A 구간, 이후 30

~40 km/h 정도로 주행하는 B 구간, 80 km/h 정도까지 가속하는 C 구간, 약 80 km/h로 주행하는 D 구간, 마지막으로 감속하여 정차하는 E 구간이 그것이다. 이 중 B 구간은 40 km/h에서 정속 주행하면서 오염물질을 측정하는 휘발유 운행차용 검사용 주행패턴(ASM 2525)과 비교적 유사한 특징을 갖는다고 할 수 있다.

KD-147 주행패턴은 실제 도로상의 다양한 주행패턴과는 다르다. 따라서 KD-147 주행패턴에서 측정된 오염물질 배출량을 해석하기 위해서는 본 모드의 운전 조건이 실제 도로상의 운전 조건을 어느 정도 대표하고 있는지를 사전에 파악할 필요가 있다. 이를 위해 배기량 2.5L의 경유 승합차량에 PEMS를 탑재하여 도심지역 도로(City Hall), 올림픽대로(Olympic) 및 인천신공항 고속도로(Airport)를 주행하며 측정된 차속과 배출가스 부피 유량 결과(Lee *et al.*, 2014)를 유사한 사양을 갖는 차량의 KD-147 주행패턴 결과와 비교하였다.

도로 종류별로 측정된 1-km 단위 주행구간들 각각의 평균 차속 분포와 배출가스 부피 유량 분포를 KD-147 평균 결과와 비교하였다(그림 2). 정밀검사 차속은 도심 경로의 차속 분포 대비 높으나, 올림픽대로의 차속 분포의 중앙값과는 유사한 값을 보인다. 배출가스 부피 유량 결과 역시 올림픽대로 주행 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 위 결과로 판단할 때, KD-147 정밀검사 모드는 비교적 짧은 주행임에도 불구하고 국내 자동차 전용도로의 평균 차속 및 배출가스 부피 유량 분포의 표준적인 특성을 상당 부분 반영하는 것으로 사료된다.

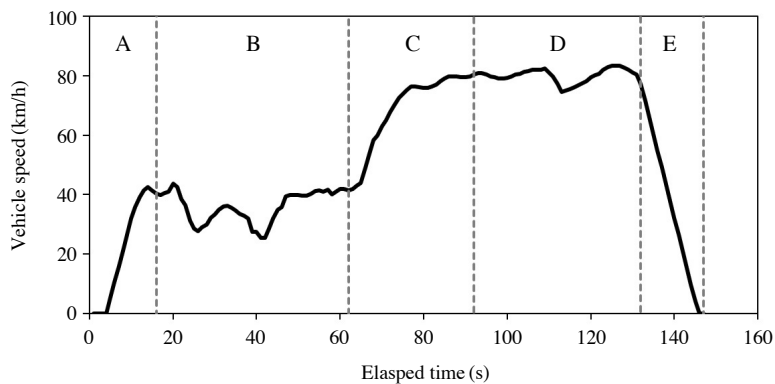


Fig. 1. Speed time profile of KD 147 driving cycle and driving modes (A, B, C, D, and E) that characterized by vehicle speed and acceleration.

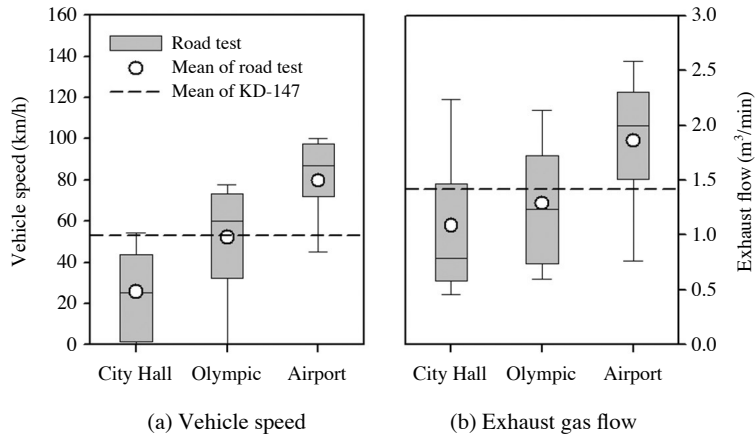


Fig. 2. Comparisons of vehicle speed and exhaust gas flow rate under KD 147 driving cycle.

2.3 자동차 오염물질 배출량 측정

실험은 교통안전공단과 한국환경공단의 정밀검사장에서 정밀검사 시행요령에 따라 실시하였다.^d 시험 중 대기온도는 20~27°C, 상대습도는 23~35% 범위를 보였으며, 인위적인 냉·온 공조는 하지 않았다. 육안검사 및 기능검사를 통과한 차량을 예열하여 실험하였으며, 차량의 에어컨 및 히터는 사용하지 않았다.

실험 차량이 차대동력계 상에서 KD-147 주행패턴을 주행할 때 배출하는 매연, 가스상 및 입자상 오염물질을 측정하였다(그림 3). 동력계 롤러의 부하는 차량 중량에 맞게 설정하였다. 광투과 방식 매연 농도는 정밀검사용 부분유량 채취식 매연측정기(Jastec)로 측정하였다. 광투과 농도는 매연측정기의 측정셀 내부로 유입된 자동차 배출가스를 발광부와 수광부 사이로 지나게 하여 이때 수광부에 인식된 빛의 투과정도(광흡수계수)를 [%] 단위로 환산한 것이다. 측정 주기는 1 Hz이다.

가스상 물질 측정용 배출가스 분석기(Horiba, OBS-2200)는 이동식 배출가스 측정용으로 개발된 제품을 사용하였고, 이는 미국 EPA의 이동식 측정장비 성능기준을 만족함을 확인하였다(Lee *et al.*, 2011a; Nakamura *et al.*, 2007). 측정물질 및 측정원리는 표 2와 같다. 배기관에 피토 튜브 유량계를 설치하여 배출가스 부피 유량을 측정하고 이 결과를 이용하여 농도 결과를 질량 결과로 환산하였다.

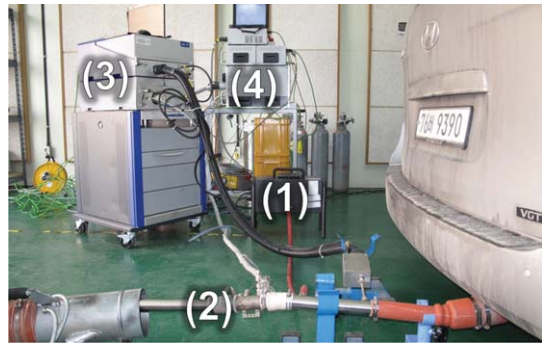


Fig. 3. Measurement systems: (1) Smoke meter; (2) Exhaust volume flowmeter; (3) Soot sensor; and (4) Gaseous emissions measurement system.

Table 2. Measuring principal of emission analyzer.

| Pollutant | Measuring principal |
|-----------------|------------------------------------|
| CO ₂ | Non-dispersive infrared (NDIR) |
| CO | Non-dispersive infrared (NDIR) |
| THC | Flame ionization detection (FID) |
| NO _x | Chemi-luminescence detection (CLD) |

입자상 오염물질로는 soot를 측정하였다. Soot 질량 농도 측정기(AVL, Micro Soot Sensor)는 광-음향(Photo-acoustic) 측정 원리를 이용하여 배출가스 중 Soot 농도를 [mg/m³] 단위로 측정한다(Giechaskiel *et*

^d운행차 배출가스 검사 시행요령 등에 관한 규정(환경부고시 제2013-86호)

al., 2014; Schindler et al., 2004). 이는 미국 EPA의 대형 운행차 결합확인 검사 제도 수립 연구에 활용된 장비로서, 인증시험용 PM 측정기로 측정된 PM 중 Soot 결과와 좋은 정량적 상관성을 갖고 있음을 확인하였다(Lee et al., 2011b; Durbin et al., 2007). 시료 가스의 희석비는 DPF 부착 여부 등, 실험 차량의 오염물질 저감기술과 측정기 측정한계 (0.01 mg/m^3)을 감안하여 2~10 범위에서 조정하였다. Soot 질량 환산에는 배출가스 분석기의 피토 튜브 유량계 측정 결과를 이용하였다. 현재 정밀검사 대상으로 편입되어 있는 소형 운행 경유차는 대부분 DOC를 장착한 Euro-3/4 차량이므로, Soot는 PM의 대표물질(Surrogate)로 가장 적합할 것으로 판단되며, 매연 측정결과와도 좋은 상관성을 보이고 있음을 확인하였다(NIER, 2013b).

DPF 장착 차량의 매연 특성 확인을 위해 미세입자 개수 농도를 측정하였다. 측정기는 코로나 방전을 통해 발생된 전자를 확산 하전식(Diffusion charging)으로 입자에 하전시켜 측정하는 미세입자 측정기(Pega-

tor, M-Sensor)를 이용하였다(Giechaskiel et al., 2014; Ntziachristos et al., 2013). 운행차 검사 조건을 재현하기 위해, 배출가스 중에 포함된 휘발성 입자 및 응결 수분을 인위적으로 제거하지는 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 소형 경유 운행차의 대기오염물질 배출특성 분석

측정 대상 차량에 적용된 제작차 배출허용기준 별로 Soot와 NO_x 배출율을 비교하였다(그림 4). 그림 1에 정의된 KD-147의 주행 특성 구간별로 배출율을 구분하고, 이산화탄소 배출율을 함께 도시하여 차량의 동력학적인 거동과 이에 따른 연료 소비 특성을 함께 관찰할 수 있도록 하였다. CO와 HC는 그 배출량이 극히 적어 도시하지 않았으며, 이후 서술에서도 다루지 않았다.

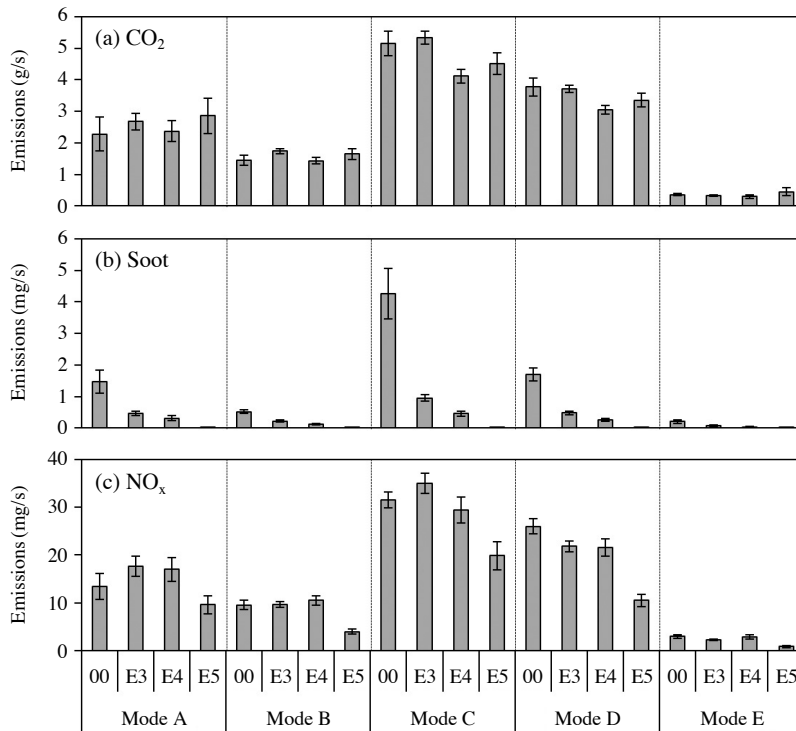


Fig. 4. Average emission rates of CO₂, soot, and NO_x that are categorized by combinations of emission regulations (K2000, Euro 3, 4, and 5) and driving modes (A, B, C, D, and E) in KD 147 cycle. Error bars denote 95% confidence intervals.

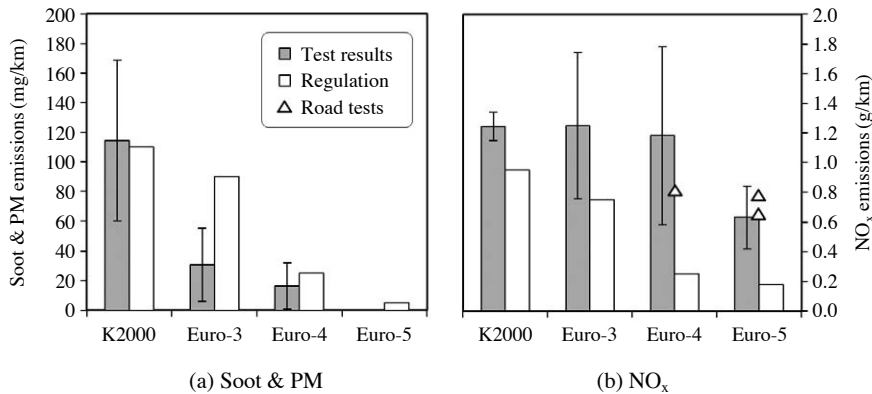


Fig. 5. Fleet average emissions of soot and NO_x from selected 27 light diesel vehicles under KD-147 driving cycle, and corresponding emission limits under standard driving cycle. Error bars denote standard deviations.

차량 주행에 필요한 구동력 요구수준과 이산화탄소 배출량은 정성적으로 잘 일치하는 경향을 보였다. 이산화탄소는 높은 엔진 출력이 요구되는 C 구간(가속 고속)에서 가장 많이 배출되었으며, 이후 D(정속 고속), A(가속 저속), B(정속 저속), E(감속) 구간의 순서로 감소하였다. 고속구간(C, D)에서 Euro-4/5 차량군은 K2000 및 Euro-3 차량군 대비 14~18% 적은 CO₂ 배출량을 보이며, 저속 및 감속구간에서는 배출허용기준 별로 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

배출허용기준 강화에 의한 배출을 감소효과는 soot 결과에서 매우 두드러지게 관찰된다. 감속구간 이외의 구간에서 Euro-3/4 차량의 soot 평균 배출율은 운전 영역별로 0.19~0.77 mg/s 수준이며, 이는 K2000 차량 대비 64~82% 감소된 결과이다. Euro-3/4 차량의 DOC가 soot에 큰 영향을 주지 않음을 감안할 때, 이와 같은 soot 감소는 연료고압분사나 TCI와 같은 'Engine-Out' 배출량 감소 기술에 의한 것으로 판단된다. 한편 DOC와 DPF가 함께 적용된 Euro-5 차량의 soot는 측정기의 측정한계 이하로 관찰되었다.

동일 배출허용기준 대응 차량군 내의 운전 영역별 soot 배출 특성은 DPF의 soot 저감 특성을 잘 보여주고 있다. K2000 차량에서는 주행특성에 대한 배출율 의존성이 매우 크나, DPF 부착시에는 soot 배출량이 전체적으로 대폭 저감되기 때문에 운전 영역의 영향을 거의 받지 않는 것으로 분석되었다. 이는 DPF의 필터링 특성이 연소 조건이나 주행 특성에 의존하는 것이 아니기 때문이며, 이는 광범위한 운전조건에서

의 오염물질 저감이 가능하다는 측면에서 매우 효과적인 장점으로 평가될 수 있다(JRC, 2013; Weiss *et al.*, 2012). DOC 장착 차량은 두 경우의 중간 정도의 경향을 보인다.

NO_x 역시 가속 및 고속 조건에서 많은 배출량을 보인다. K2000부터 Euro-4까지는 동일 운전조건 하에서 허용기준 강화에 따른 저감 경향이 그다지 뚜렷하게 나타나지 않으며, Euro-5 차량군에 이르러서야 감소 경향이 관찰된다. 이 경향은 DPF 필터링에 의한 soot 감소 경향과는 상이하며, 엔진 연소 현상과 연계된 CO₂와 유사한 경향이다. EGR이 연소 현상에 개입하여 NO_x를 저감시키는 기술임을 감안할 때 이는 어느 정도 자연스러운 결과로 볼 수 있으며, 운행차 검사 측면에서 본다면 차량 사용기간 증가에 따른 연소 관련 부품 열화 및 오작동이 운행차 NO_x 배출량 증가를 초래할 수 있음을 시사하는 결과라 할 수 있다.

각 배출허용기준 차량군의 단위 주행거리당 평균 Soot 배출량과 NO_x 배출량을 SUV 차종에 적용되는 제작차 배출허용기준과 비교하여 도시하였다(그림 5). 배출량 측정 결과는 KD-147 주행패턴을 주행하며 측정한 것이며, 제작차 배출허용기준은 인증시험용 주행패턴에 의한 것이다. Soot 측정결과와 함께 도시된 것은 PM 배출허용기준이다.

경유 운행차 soot 측정결과는 제작차 배출허용기준의 강화 경향을 잘 반영함을 확인하였다. 비록 주행패턴이 달라 직접적인 정량비교는 어렵지만, 측정값

은 배출허용기준보다 낮은 값을 보인다. 이는 제작차 허용기준 대응을 위해 차량에 적용된 PM 저감기술 성능이 차량 사용 과정 중 효과적으로 성능을 발휘하고 있으며, 아울러 운행차 검사에 의한 매연, 즉 soot 저감 관련 부품의 관리 및 정비가 적절히 이루어지고 있음을 시사하는 결과라 할 수 있다.

반면 NO_x는 제작차 배출허용기준보다 많은 배출량을 보이며, 그 경향은 Euro-5 차량에 이르러서야 다소 감소하고 있다. 실제 도로상에서 측정된 오염물질 배출량 결과(Lee et al., 2014)를 함께 도시해 보면, Euro-5 차량의 도로상 측정결과는 운행차 분포의 상위에 위치하는 반면, Euro-4 차량의 결과는 운행차 분포의 하위에 위치한다. 120 km/h 이상의 고속 주행 또는 에어컨 가동시의 EGR 닫힘 등으로 인한 운행 경유차 NO_x 과다 배출은 이미 확인된 바 있지만, KD-147 주행패턴은 최고 차속 84 km/h 수준 차속에서의 에어컨을 작동시키지 않는 무난한 정도의 검사 조건이다. 본 연구의 Euro-4 차량군이 노후 차량임을 함께 감안할 때, 그림의 NO_x 분포는 차량 사용시간 경과에 따라 NO_x 증가를 초래할 수 있는 요인들, 예를 들어 흡입 부압의 증가, 엔진 냉각 성능의 악화, EGR 오작동, 공기량 센서 오작동 등의 영향을 내포하고 있는 것으로 판단된다. 이를 운행차 검사 측면에서 본다면, 차량노화 및 관리소홀에 의한 NO_x 배출 증가를 선별하고 관리하기 위한 NO_x 검사 도입 필요성을 시사하는 결과라 할 수 있다.

3. 2 소형 운행 경유차의 대기오염물질 관리방안 고찰

3. 2. 1 DPF 장착 차량의 매연 관리

전술한 바와 같이 DPF가 장착된 Euro-5 차량의 매연 및 soot 배출량은 극히 적다. Euro-5 차량에 대한 현행 매연 정밀검사의 타당성과 선별 능력을 검토하기 위해, Euro-4 및 Euro-5 차량의 매연, soot 및 미세입자를 측정하여 비교하였다(그림 6).

Euro-5 차량의 광투과식 매연 농도는 대부분 측정기 검출한계인 0.1% 이하이며, 그림처럼 적게나마 매연이 측정되는 경우라도 soot 배출량은 측정기 검출한계 이하이다. 휘발성 입자 및 응결 수분을 포함한 배출가스 중의 미세입자 측정결과를 감안할 때, 정밀 검사를 통해 측정된 Euro-5 차량의 매연은 soot 성분이 아닌, 휘발성분 또는 가스상 에어로졸인 것으로 판단된다.

이처럼 매연 배출이 적은 Euro-5 차량의 매연을 검사하는 것은 불필요한 제도로 비춰질 수도 있다. 그러나 운행차 정밀검사의 목적이 대상 차량의 배출가스 제어 기능 오작동 선별임을 감안할 때, 검사를 통해 매연 저감의 핵심 부품인 DPF의 파손 여부를 파악하는 것은 매우 중요하다. 전통적인 엔진 부품과 비교할 때, DPF는 그 도입 역사가 비교적 짧은 새로운 부품이며, 그렇기 때문에 운행차 검사를 통한 DPF 파손 진단은 아직까지 경험이 많이 누적되지 않은 관리 분야라 할 수 있다(Kai et al., 2009).

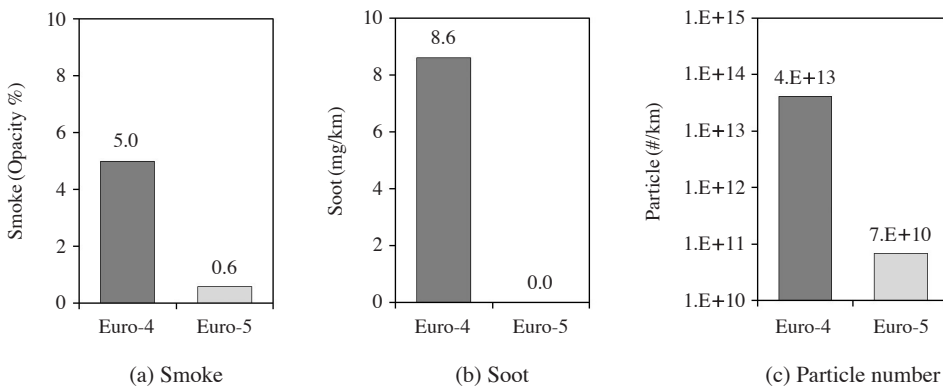


Fig. 6. Comparisons of smoke, soot, and particle number of an Euro 4 and an Euro 5 light diesel vehicle under KD 147 driving cycle.

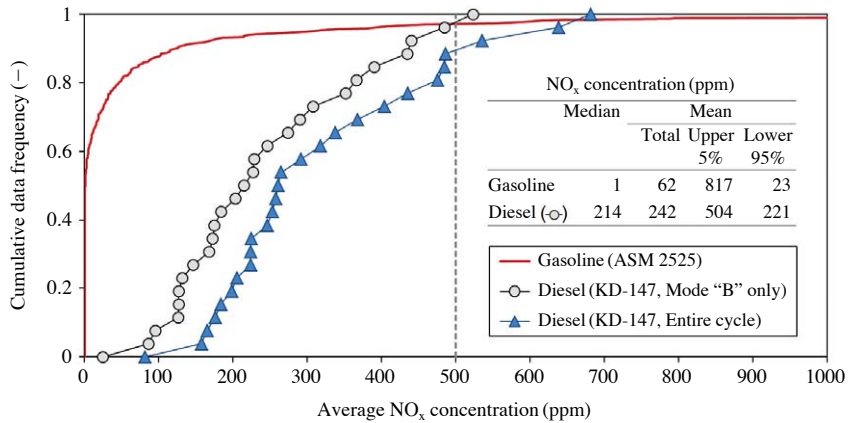


Fig. 7. Cumulative data frequency for NO_x concentrations of in use gasoline and diesel fleets.

따라서 실효적인 Euro-5 운행차 매연 검사를 위해서는 DPF 파손 등의 오작동을 정밀검사를 통해 선별해 낼 수 있도록 하는 배출허용기준 마련이 선행되어야 할 것으로 판단된다. 이는 운행차 관리정책 목표 달성을 위한 매연 수준에 대한 문제이기 때문에 배출량 측면에서 접근하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 즉, DPF 손상 정도에 따른 Soot 배출량을 파악하여 대기질 관리 측면에서 허용 가능한 매연 수준을 설정할 수 있을 것이다. 이는 현재 경험이 축적되고 있는 분야이며, 다양한 운행 조건 및 파손 거동의 영향을 받을 것으로 보이는 바, 향후 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

3.2.2 NO_x 검사 신규 도입을 위한 시사점

경유 운행차의 NO_x 도입을 위해서는 검사의 선별 능력과 효과 등을 미리 가늠해 볼 필요가 있다. 본 장에서는 현재 관리 대상인 휘발유차 NO_x 검사 결과 분포와 본 27대 경유 차량군의 NO_x 농도 분포를 비교하여 NO_x 검사 도입을 위한 통찰력을 얻어내고자 하였다.

그림 7은 휘발유 및 경유 차량군의 NO_x 농도가 어떤 형태로 분포하는지를 표현하는 누적분포도이다. 그림의 x축은 배출가스 중의 NO_x 측정 농도이고, y 축은 농도별 누적분포대수를 전체 대수로 무차원화한 결과이다. 그림의 실선은 2013년 4~5월에 서울 강남검사소에서 측정된 차량 중량 1.8톤급의 휘발유 승용차 363대의 NO_x 농도의 누적분포 결과이다. 차

령 3~18년, 누적 주행거리 2만~35만 km 범위의 운행차 측정 결과이다. 휘발유 승용차의 NO_x 허용기준은 차량중량별, 제작연식별로 차등화 되어 있다. 예를 들어, 2015년부터 정밀검사는 받는 차량 중 차량중량이 1.8톤 이상인 2005년식 휘발유 차량은 40 km/h 정속 주행 조건(ASM 2525)의 NO_x 배출농도가 500 ppm 이하로 유지되어야 한다.

경유차량의 평균 농도 중 원으로 표시된 결과는 KD-147 주행패턴 중 ASM 2525 조건과 가장 유사한 부분인 주행구간 B의 농도만을 평균한 것이다. 삼각형 결과는 전체 KD-147 구간의 농도를 평균한 결과이며, 구간 B의 농도 대비 평균 75 ppm 더 높은 농도를 갖는다.

경유차 NO_x 배출농도 분포는 휘발유차 분포 대비 높은 수준을 보인다. 경유 차량군의 평균 농도(242 ppm)는 휘발유 차량군의 평균 농도(62 ppm) 대비 3.9배 높다. 분포의 중간값은 그 차이가 훨씬 더 큰데(경유 및 휘발유 차량군 각각 214 ppm 및 1 ppm), 이는 두 결과의 분포 차이에 기인한 것으로 보인다.

분포의 형태에 있어, 휘발유차는 소수의 오염물질이 매우 높은 기여율을 보이고 있으며, 이는 정밀검사를 통한 과다배출차량 선별이 매우 효과적인 관리 대책이 될 수 있음을 의미하는 결과이다. 본 사례의 경우를 본다면, 500 ppm 이상의 NO_x 농도를 보이는 휘발유 차량(본 사례의 경우 10대)을 선별하여 정비하거나 또는 폐차한다면 차량군 전체의 평균 농도를 절반 수준(31 ppm)으로 저감시킬 수 있음을 예상할

수 있다.

반면, 경유차의 NO_x 농도는 비교적 골고루 퍼져있는 분포를 보인다. 이는 현재 경유 운행차의 NO_x 배출량은 정밀검사를 통해 소수의 과다배출차량을 선별해 낸다고 해서 현저히 개선되기는 다소 어려운 특징을 가지고 있음을 의미한다. 이를 운행차 NO_x 관리제도 개선과 연계하여 생각해 본다면 수도권 대책에서 고려중인 ‘운행차 PM-NO_x 동시저감 장치’ 등에 의한 노후 운행차 저공해화 대책과 경유 운행차 NO_x 검사가 상호 보완적으로 동반되어야 함을 알 수 있다. 이를 통해 적극적인 운행차 오염물질 저감 대책과, 해당 대책이 실제 사용 과정 중 실효성있게 작동하는 지에 대한 검사제도가 서로 연계된 효과적인 대안을 마련 할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

소형 경유 운행차의 대기오염물질 배출특성을 제작차 배출허용기준별 적용 기술과 연계하여 분석하고, 이를 바탕으로 효율적인 운행차 대기오염물질 관리방안에 대해 고찰하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 운행 경유차 Soot 측정 결과는 제작차 PM 배출허용기준의 강화 경향을 잘 반영하고 있으며, 그 배출 수준 또한 허용기준 이내로 관리되고 있음을 확인하였다. 이는 차량 제작 당시에 제작차 기준 대응을 위해 적용된 PM 저감기술의 성능이 운행차 검사에 의해 차량 사용 과정 중에서도 효과적으로 관리 및 유지되고 있음을 간접적으로 나타내는 결과이다.
- 2) Euro-5 차량의 정밀검사 매연 측정결과는 대부분 휘발성 성분 또는 가스상 에어로졸이며, 배출수준 또한 매우 낮음을 확인하였다. 이 효과가 DPF의 강력한 매연 저감효과에 의한 것임을 감안할 때, 향후 운행차 정밀검사의 실효성 제고를 위해서는 DPF의 파손 여부의 진단 및 선별이 가능한 배출허용기준이 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 반면 운행 경유차 NO_x는 제작차 배출허용기준보다 많은 배출량을 보이며, 동급 휘발유 자동차와 비교할 때도 많은 배출량을 보이고 있다. 본 연구가 KD-147 주행패턴에서의 노후 운행차 NO_x 배

출량을 측정된 것임을 감안할 때, 이는 차량 사용 시간 경과에 따라 NO_x 증가를 초래할 수 있는 다양한 요인들의 영향을 내포하고 있는 것으로 사료된다. 이를 운행차 검사 측면에서 본다면, 차량노화 및 관리소홀에 의한 NO_x 배출 증가를 선별하고 관리하기 위한 NO_x 검사 도입 필요성을 시사하는 결과라 할 수 있다.

- 4) 경유 운행차 차량군의 NO_x 배출량 분포는 소수의 과다배출차량 선별만으로 현저히 개선시키기 다소 어려운 특징을 가지고 있음을 확인하였다. 이는 효과적인 경유 운행차 NO_x 관리를 위해서는 ‘운행차 PM-NO_x 동시저감 장치’ 등과 같은 적극적인 저감 대책이 운행차 NO_x 검사와 연계되어야 함을 시사하는 결과로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원 연구 과제로서 수행되었습니다. 실험과정 중 여러 지원을 아끼지 않으신 한국환경공단과 교통안전공단 관계자 여러분들께 감사드립니다.

References

- Bermudez, V., J.M. Lujan, B. Pla, and W.G. Linares (2011) Effects of low pressure exhaust gas recirculation on regulated and unregulated gaseous emissions during NEDC in a light-duty diesel engine, *Energy*, 36, 5655-5665.
- Bertola, A. (2001) Characterization of diesel particulate emissions in heavy-duty DI-engines with common rail fuel injection: influence of injection parameters and fuel composition, SAE International, Technical Papers 2001-01-3573.
- Carshaw, D.C., S.D. Beevers, J.E. Tate, E.J. Westmoreland, and M.L. Williams (2011) Recent evidence concerning higher NO_x emissions from passenger cars and light duty vehicles, *Atmos. Environ.*, 45, 7053-7063.
- Cho, K. (2012) A study for strategic plans of Korean Inspection & Maintenance (I/M) program, Report prepared for Korean Ministry of Environment. (in Korean)
- CITA (International Motor Vehicle Inspection Committee) (2011) A new roadworthiness emission test for die-

- sel vehicles involving NO, NO₂ and PM measurements. Report prepared for DG-MOVE of European Commission.
- Denis, M. and J. Lindner (2005) Review of light-duty diesel and heavy-duty diesel gasoline inspection programs, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 55, 1876-1884.
- Durbin, T., K. Johnson, D. Cocker, J. Miller, H. Maldonado, A. Shah, C. Ensfield, C. Weaver, M. Akard, N. Harvey, J. Symon, T. Lanni, W. Bachalo, G. Payne, G. Smallwood, and M. Linke (2007) Evaluation and comparison of portable emissions measurement systems and federal reference methods for emissions from a back-up generator and a diesel truck operated on a chassis dynamometer, *Environ. Sci. Technol.*, 41, 6199-6204.
- Giechaskiel, B., M. Maricq, L. Ntziachristos, C. Dardiotis, X. Wang, H. Axmann, A. Bergmann, and W. Schindler (2014) Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number, *J. Aerosol Sci.*, 67, 48-86.
- Johnson, T. (2000) Diesel emission control - Last 12 months in review. SAE International, Technical Papers 2000-01-2817.
- JRC (European Joint Research Centre) (2013) A complementary emissions test for light-duty vehicles: Assessing the technical feasibility of candidate procedures, Joint Research Centre Scientific and policy report EUR 25572.
- Kai, R., T. Sekiya, M. Oagawa, K. Saiki, M. Matsubara, and H. Kurachi (2009) Thermal-mechanical durability of DOC and DPF after-treatment system for light heavy pickup truck application, SAE International, Technical Papers 2009-01-2707.
- Lee, T., J. Keel, J. Park, Y. Park, J. Hong, and D. Lee (2011a) Speed-based emission factor regarding vehicle specific power and acceleration during on-Road driving, *Transactions of KSAE*, 19(1), 73-81. (in Korean with English abstract)
- Lee, T., J. Keel, S. Jeon, J. Park, J. Lee, and J. Hong (2011b) Effect of payload on fuel consumption and emission of light duty freight truck during acceleration driving, *Transactions of KSAE*, 19(2), 133-141. (in Korean with English abstract)
- Lee, T., J. Kim, J. Park, S. Jeon, J. Lee, and J. Kim (2014) Influence of driving routes and seasonal conditions to real-driving NO_x emissions from light diesel vehicles, *Transactions of KSAE*, 22(1), 148-156. (in Korean with English abstract)
- Lee, T., J. Lee, and J. Kim (2012) Evaluation of on-road NO_x emission from a light duty diesel vehicle using a portable emissions measurement system, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(1), 94-104. (in Korean with English abstract)
- Lee, T., J. Park, S. Kwon, J. Lee, and J. Kim (2013) Variability in operation-based NO_x emission factors with different test routes, and its effects on the real-driving emissions of light diesel vehicles, *Sci. Tot. Environ.*, 461-462, 377-385.
- Maricq, M.M. (2007) Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review, *J. Aerosol Sci.*, 38, 1079-1118.
- Millo, F., P.F. Giacominetto, and M.G. Bernardi (2012) Analysis of different exhaust gas recirculation architectures for passenger car diesel engines, *Applied Energy*, 98, 79-91.
- Muitsuishi, S., K. Mori, N. Nishizawa, and S. Yamamoto (1999) Emission reduction technologies for turbocharged engines, SAE International, Technical Papers 1999-01-3629.
- Nakamura, H., M. Akard, S. Porter, and I. Khalek (2007) Performance test results of a new on board gaseous emission measurement system confirmed with CFR Part 1065, SAE International, Technical Papers 2007-01-1326.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2012) An evaluation of real driving emissions for light duty vehicles using PEMS, 2012 Korean Auto-Oil Program Report. (in Korean with English abstract)
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2013a) National Air Pollutants Emission 2011, NIER-GP-2013-362, Publication No. 11-1480523-001770-01. (in Korean)
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2013b) Estimation of particulate mass emissions from diesel vehicles using inspection & maintenance results, NIER-RP-2013-284, Publication No. 11-1480523-001655-01. (in Korean with English abstract)
- Ntziachristos, L., S. Amanatidis, Z. Samaras, K. Janka, and J. Tikkanen (2013) Application of the Pegasor Particle Sensor for the measurement of mass and particle number emissions, *SAE Int. Journal Fuels Lubr.*, 6(2), 2013-01-1561.
- Park, J., J. Lee, S. Kim, J. Kim, and K. Ahn (2013) A study on the emission characteristics of Korean light-duty vehicles in real-road driving conditions, *Transactions of KSAE*, 21(6), 123-134. (in Korean with English abstract)

- Sanchez, F.P., A. Bandivadekar, and J. German (2012) Estimated cost of emission reduction technologies for light-duty vehicles, Report prepared for ICCT (International Council on Clean Transportation).
- Schindler, W., C. Haisch, H. Beck, R. Niessner, E. Jacob, and D. Rothe (2004) A photo-acoustic sensor system for time resolved quantification of diesel soot emissions. SAE International, Technical Papers 2004-01-0968.
- Shah, S.D., D.R. Cocker III, J.W. Miller, and J.M. Norbeck (2004) Emission rates of particulate matter and elemental and organic carbon from in-use diesel engines, *Environ. Sci. Technol.*, 38, 2544-2550.
- Takada, Y., N. Takada, and N. Iida (2005) Transient NO_x characteristics of freight vehicles with EGR system in real traffic conditions. SAE International, Technical Papers 2005-01-1619.
- Tzamkiozis, T., L. Ntziachristos, and Z. Samaras (2010) Diesel passenger car PM emissions: From Euro 1 to Euro 4 with particle filter, *Atmos. Environ.*, 44, 909-916.
- Weiss, M., P. Bonnel, J. Kuhlwein, A. Provenza, U. Lambrecht, and S. Alessandrini (2012) Will Euro 6 reduce the NO_x emissions of new diesel cars? - Insights from on-road tests with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS), *Atmos. Environ.*, 62, 657-665.
- Weiss, M., P. Bonnel, R. Hummel, A. Provenza, and U. Manfredi (2011) On-road emissions of light-duty vehicles in Europe, *Environ. Sci. Technol.*, 45, 8575-8581.