

PEMS를 이용한 소형 경유차의 실주행 NO_x 배출특성 평가

Estimation of Real-Driving NO_x Emission Characteristics from Light-Duty Diesel Vehicles with PEMS

박연재 · 권상일¹⁾ · 박준홍¹⁾ · 이재영^{2),*}

환경부 교통환경과, ¹⁾국립환경과학원 교통환경연구소,

²⁾서울시립대학교 환경공학과

(2015년 7월 22일 접수, 2015년 9월 11일 수정, 2015년 10월 5일 채택)

Yeon Jae Park, Sang Il Kwon¹⁾, Jun Hong Park¹⁾ and Jai Young Lee^{2),*}

Environmental Transportation Division, Ministry of Environment

¹⁾*Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research*

²⁾*Department of Environmental Engineering, University of Seoul*

(Received 22 July 2015, revised 11 September 2015, accepted 5 October 2015)

Abstract

NO_x emissions from diesel vehicles have been regarded as a main cause of high NO₂ concentration in metropolitan area. Recent studies have shown that the on-road NO_x emissions of diesel vehicles are quite higher than the emission limits specified with the pre-defined test method for emission certification. To reduce air pollutants effectively, the discrepancy of emissions in certification and real-driving conditions should be tackled. In this study, the real-driving emissions have been estimated with portable emission measurement system (PEMS). The results of this study have shown that the on-road NO_x emissions from diesel vehicles have been decreased as the introduction of stricter emission regulation, EURO-6, but additional reduction should be still required and robust technologies should be applied to control NO_x in real-driving conditions. RDE-LDV (Real Driving Emission - Light Duty Vehicles) test method being developed in the European Union can represent excessive on-road NO_x emissions of diesel vehicles as applied emission technologies and can be a solution to remove discrepant NO_x emissions between certification and Korean real-driving conditions. Among the NO_x reduction technologies for EURO-6 diesel vehicles, selective catalytic reduction (SCR) system has shown the better performance than lean NO_x trap (LNT) system to control on-road NO_x emissions. Implementing RDE-LDV will require vehicle manufacturers to adopt the more effective NO_x reduction technology in real driving conditions.

Key words : Real-driving emission, NO_x, Diesel vehicle, PEMS (Portable Emission Measurement System), RDE-LDV (Real Driving Emission-Light Duty Vehicles)

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-6490-2864, E-mail : leejy@uos.ac.kr

1. 서 론

수도권은 국내 인구의 약 50%가 거주하고, 자동차 등록대수는 약 45%를 점유하고 있어 자동차로 인한 대기오염에 취약한 지역이다. 정부는 2005년부터 ‘수도권 대기환경개선 특별 대책’을 시행하여 대기 오염의 주요 원인인 운행 경유차의 매연저감장치 부착과 함께 신규 제작 자동차의 배출허용기준을 선진국 수준으로 강화해왔다. 그 결과 서울의 PM₁₀ 농도는 2005년 58 µg/m³에서 2013년 44 µg/m³로 상당히 개선되었다. 그러나 같은 기간 NO₂ 농도는 33ppb 수준에서 큰 변화는 나타나지 않았다(Seoul Metropolitan Government, 2015). NO₂의 주요 배출원이 자동차임을 고려할 때 자동차 대기오염 관리 정책 차원에서 원인 분석과 전향적인 대책 수립이 필요한 시점이다.

국립환경과학원(NIER, 2014)의 대기정책모델링지원시스템에 따르면 도로이동오염원에서 경유차의 NO_x 점유율은 2011년 기준으로 약 68% 수준이다. 경유차의 배출허용기준은 지속적으로 강화되어 왔지만, 실제로 도로 주행 조건에서의 NO_x 배출량은 인증 조건에서와 상당한 차이가 있다는 연구 결과들이 발표되고 있다. NIER(2012a)은 총중량 3.5톤 이상 대형 경유차의 실제 도로 주행 조건에서 NO_x 배출량이 인증 조건에 비하여 2배 이상 되는 문제점을 확인하고, 이동식배출가스 측정장비(PEMS, Portable Emission Measurement System)를 이용한 사후관리 제도 도입을 제안하였다. 동 연구 결과를 토대로 2014년 2월 대기환경보전법 시행규칙이 개정되어 2016년부터 PEMS를 이용한 실제 도로 주행 조건에서 대형차 결합확인검사 제도가 시행될 예정이다.

경유차의 실주행 NO_x 배출과다 문제는 총중량 3.5톤 미만의 소형 경유차에서도 확인되고 있다. 소형 경유차는 유럽연합(EU, European Union)의 규제를 도입해 왔는데, EU와 동일한 시점인 2009년 9월 EURO-5, 2014년 9월 EURO-6 배출허용기준을 적용하였다. 이에 따라 NO_x 배출허용기준은 2003년 0.75 g/km에서 2014년 0.08 g/km로 크게 강화되었다. 그러나 실제 도로 주행 조건에서의 NO_x 배출량은 허용기준의 강화에 비례하여 저감되지 않는 것으로 확인되고 있다. 유럽연합집

행위원회 공동연구센터(EC-JRC, 2011)와 Weiss *et al.* (2011)은 소형차 12대에 PEMS를 탑재하여 실주행 배출가스를 평가한 결과 경유차의 NO_x는 인증기준 대비 4~7배 높게 배출되는 것으로 보고하였다. 국내 연구에서도 이러한 문제점이 동일하게 확인되고 있는데, Park *et al.* (2013)은 PEMS를 이용하여 유종별로 소형차 3대에 대해 서울과 인천의 도로를 주행하면서 배출가스를 측정하고, 경유차의 실도로 NO_x 배출량은 인증시험 조건 대비 2.8배 수준인 것으로 나타났다. NIER(2012b)은 차대동력계에서 실제 운행 조건을 모사하여 평가한 결과 에어컨 가동, 고온 흡기, 급가속 조건에서 경유차의 NO_x는 인증 기준의 최대 10배를 초과하는 등 인증시험 모드인 NEDC(New European Driving Cycle) 이외의 운전 조건에서는 NO_x 배출량이 상당히 높은 것으로 확인되었다.

EU의 정부와 자동차 산업계간 협의체인 CARS21(Competitive Automotive Regulatory System, 2012)은 상당수 EU 대도시의 NO₂ 농도가 대기환경기준을 초과하고 있는 원인으로 소형 경유차의 실제 도로 주행 조건에서 NO_x 배출 과다를 지목하고, 이에 대한 관리 정책을 수립할 것을 제안하였다. 이에 따라 유럽연합집행위원회 공동연구센터(EC-JRC, 2013)는 실제 도로 주행 조건에서 소형경유차 NO_x 배출량을 실질적으로 저감하기 위하여 2017년 9월 도입을 목표로 PEMS를 이용한 평가 방법인 RDE-LDV(Real Driving Emission-Light Duty Vehicles)를 도입하기 위한 연구를 추진하고 있다.

국내의 경우 자동차 대기오염물질 규제는 글로벌 산업 특성상 미국과 EU와의 자유무역협정과 연계하여 강화하고 있다. RDE-LDV 제도를 EU와 동일한 시점에 국내에 적용하기 위해서는 EU의 제도 개발 단계부터 연구를 수행해야 한다. 특히 소형차에 PEMS 적용을 법제화 하는 것은 최초의 사례로서 장비탑재, 주행 경로 설정, 데이터 분석 방법 등에 대한 국내 적용성과 실제 도로 주행 조건에서의 실효성을 사전에 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 PEMS를 적용하여 국내 실도로 운전조건에서 소형 경유차의 NO_x 배출특성을 조사하고, 이를 실질적으로 저감하기 위한 방안으로 EU에서 법제화 진행 중인 RDE-LDV 제도의 국내 적용성과 실효성을 평가하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 평가대상 자동차

본 연구에서는 소형 경유차 9대와 휘발유차 2대에 대해 PEMS를 이용하여 실도로 배출가스를 평가였다. 표 1에 실도로 배출가스 평가 대상 자동차의 제원을 나타내었다. 경유차 중 5대는 EURO-5, 4대는 EURO-6 차량으로 선정하였고, 휘발유차 2대는 ULEV (Ultra Low Emission Vehicle) 배출허용기준이 적용된 차량을 선정하였다.

국내 소형차의 배출가스 규제에 대해 휘발유차는 미국 캘리포니아, 경유차는 EU의 기준과 시험방법을 도입해 왔다. 국내 경유차 배출허용기준은 유럽과 동일한 시점에서 동등한 기준을 적용 중인데, EURO-5는 2009년 9월 1일 이후 인증 차량부터 도입되어 2011년 1월 1일 이후 출고된 모든 차량에 적용되었고, EURO-6 기준은 2014년 9월 1일 이후 인증 차량을 시작으로 2015년 9월 1일 이후 출고되는 전차종에 적용되고 있다. 국내 EURO-5 소형 경유차는 대체로 SUV 차종이 주를 이루었으나, 유럽산 수입차를 중심으로 경유 승용차가 판매되었고, EURO-6부터 국내 제작사도 경유 승용차를 우선 출시하고 있다. 본 연구의 시험 차종 선정시 EURO-6 경유차는 2015년 2월까지 출시된 차량을 대상으로 하였고, 경유 승용차들이 우선 인증이 이루어지고 있어 이를 시험 대상으로 선정하였다. 휘발

유차는 2006년부터 미국 캘리포니아의 ULEV 기준이 적용되고 있는데 NO_x 배출허용기준은 0.044 g/km로서 인증 시험 모드의 차이로 인해 절대적인 비교는 어렵지만, 경유차 EURO-6 기준인 0.08 g/km보다 수치상으로는 강화되어있다. 본 연구의 주요목표는 경유차의 실도로 NO_x 배출 특성을 분석하는 것이며, 비교 대상으로 휘발유 승용차 2대를 선정하여 평가하였다.

경유차와 휘발유차에 서로 다른 국가의 배출 규제를 도입함에 따라 인증시험 방법도 다르게 적용되고 있다. 경유차는 유럽에서 적용중인 NEDC 모드, 휘발유차는 미국의 FTP-75 (Federal Test Procedure) 모드를 각각 적용한다. 각 모드의 평균차속은 NEDC 33.6 km/h, FTP-75 34.1 km/h로 유사하지만, 평균 가속도는 NEDC 모드가 0.116 m/s²으로 FTP-75 모드의 0.184 m/s²보다는 낮은 수준이다. NEDC의 경우 모드 주행시에 가속 구간에서 일정한 가속도를 유지하는데 반해 FTP-75는 실제 도로 상에서 나타날 수 있는 동적인 운행 특성이 반영되어있다.

경유차의 NO_x 저감 기술로 EURO-5는 EGR (Exhaust Gas Recirculation) 장치가 주로 적용된다. EGR은 배기가스 중의 일부를 연소실로 재유입하여 연소실 온도를 낮춤으로써 NO_x를 저감시킨다. EURO-6 경유차는 EGR 장치에 추가하여 후처리장치가 장착되는데, LNT (Lean NO_x Trap) 또는 SCR (Selective Catalytic Reduction) 기술이 적용되고 있다. LNT는 경유차의 일반 주행 조건인 연료 희박 상태에서 NO_x를 흡착하여 저장하

Table 1. Main specifications of test vehicles with PEMS.

Vehicle ID	Fuel	Vehicle	Engine volume (cc)	Emission level	Emission reduction technologies
E5-1	Diesel	SUV	1995	EURO-5	
E5-2	Diesel	SUV	1995	EURO-5	
E5-3	Diesel	SUV	1995	EURO-5	EGR ¹ , DPF ²
E5-4	Diesel	SUV	1995	EURO-5	
E5-5	Diesel	SUV	1995	EURO-5	
E6-1	Diesel	Sedan	2199	EURO-6	
E6-2	Diesel	Sedan	1685	EURO-6	LNT ³ , EGR ¹ , DPF ²
E6-3	Diesel	Sedan	2143	EURO-6	
E6-4	Diesel	Sedan	1997	EURO-6	SCR ⁴ , EGR ¹ , DPF ²
G-1	Gasoline	Sedan	2359	EURO-6	
G-2	Gasoline	Sedan	1998	EURO-6	TWC ⁵

¹Exhaust Gas Recirculation, ²Diesel Particulate Filter, ³Lean NO_x Trap, ⁴Selective Catalytic Reduction, ⁵Three Way Catalytic reduction

고, 촉매의 NO_x 저장 한계에 도달하면 일시적으로 추가 연료를 분사하여 이론 공연비 상태로 제어함으로써 촉매에 저장된 NO_x가 N₂와 O₂로 환원되어 배출된다. LNT의 흡장제로는 Ba, 환원제로는 Rd가 주로 적용된다. SCR은 배기가스 중에 요소수를 분사하여 촉매장치에서 NO_x를 선택적으로 환원하는 장치이다. 평가대상 자동차 중 E6-1와 E6-2는 LNT 기술이 적용되었고, E6-3와 E6-4는 SCR 장치가 적용되었다. 휘발유차는 삼원촉매 장치가 적용되었다.

2.2 실도로 배출가스 측정 방법

평가 대상 소형차에 PEMS 장비를 탑재하여 실도로 배출가스를 측정하였다. PEMS는 차량에 직접 탑재할 수 있도록 소형화된 배출가스 분석 장치로서 배기가스 유량계, 샘플링장치, 배기가스 농도 분석기, 측정용 가스, 전원공급장치, 제어 및 데이터 분석 장치로 구성된다. 1초 단위로 측정된 배기가스 농도와 유량데이터를 이용하여 질량단위의 실시간 배출율(g/s)을 산출할 수 있고, 주행거리는 GPS 또는 자동차의 전자제어장치에서 제공되는 차속 정보를 이용하여 계산할 수 있다. 실시간 배출율과 주행거리를 누적하여 소형차의 배출허용기준 관리 단위인 주행거리 당 배출량(g/km)을 산출할 수 있다. 그림 1에는 PEMS 측정 시스템의 개략도를 나타내었다.

PEMS는 대형차의 실주행 배출가스 관리제도에 먼저 적용되었다. 미국은 2007년 생산 대형차(US EPA, 2005)부터, 유럽(EC, 2011)은 2013년 인증 EURO-6 대형차부터 PEMS를 이용한 배출가스 사후관리 제도를 시행하였다. 국내는 2016년부터 대형차 결합확인검사를 시행할 예정으로서 PEMS 장비에 대한 신뢰성은 국제적으로 공인된 것으로 볼 수 있다. Park *et al.* (2013)은 차대동력계에서 PEMS와 인증 장비간의 상관성을 평가하였는데, 자동차 대기오염물질 규제 항목인 THC, CO, NO_x의 결정계수는 0.95 이상으로서 측정 장비간 상관성은 양호한 것으로 나타났다.

본 연구에서 PEMS 장비는 Park *et al.* (2013, 2012)의 연구에서 상관성이 확인된 HORIBA사의 OBS-2000과 Sensors사의 Eco-star를 사용하였다. NO_x 측정시 OBS-2000은 화학발광법(CLD)을 이용하고, Eco-star는 비분산자외선(NDUV) 방법을 적용하는데 NO와 NO₂를 각각 측정하여 이를 합산하는 방식으로 NO_x

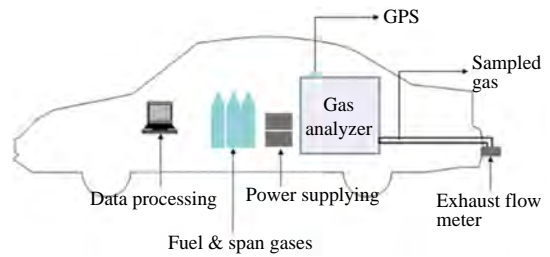


Fig. 1. Schematic diagram of PEMS system.

를 산출한다. 두 가지 방법 모두 미국과 EU의 PEMS 측정 방법으로 승인되었다. 본 연구에서 적용한 PEMS 장비들은 대형차용으로 개발되었는데, 소형차에 탑재하기 위해서 차량 내부 좌석 제거와 유량계 탑재를 위한 배기관 일부 개조가 필요하였다. PEMS 장비 탑재시 측정장비와 보조 실험자 동승으로 인해 차량 중량은 인증시험에 적용되는 중량 대비 약 100~150kg 정도 증가되었다. 장비 탑재 후의 차량 중량은 기술적인 허용 중량의 90% 미만 수준으로서 일반적인 주행 조건에서 나타날 수 있는 수준이고, 동 연구의 결론 도출에는 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 또한 이는 EC-JRC (2011)에서 수행한 PEMS 연구에서도 동일한 조건이었다. 유럽의 RDE-LDV 제도 도입이 확정되는 시점에서 중량과 탑재성이 개선된 소형차 전용 PEMS 장비가 출시될 것으로 예상되며, 소형차 분야에서도 더욱 활발히 실도로 배출가스 연구가 수행될 것으로 기대된다. 본 연구에서 적용한 PEMS 분석기의 선형성과 반복성은 측정범위의 $\pm 1\%$ 이내이고, 영점 및 스펠 드리프트는 측정범위의 $\pm 2\%$ 이내 수준이다. 이는 배출가스 인증시험용 장비와 유사한 수준이며, 실제 도로 주행 배출가스 측정의 정도 관리를 위해 시험 전후 영점 및 스펠의 드리프트가 기준 이내인지를 점검하였다.

2.3 실도로 시험 주행경로 설정

자동차의 단위 주행 거리 당 배출량은 주행특성에 영향을 받는다(Ericsson, 2001). 자동차의 배출가스에 영향을 주는 주요 주행 인자에는 차속, 가속도, 경사도, 외기온도, 보조부품의 가동 조건 등이 포함된다. 소형차의 실주행 배출가스 규제를 설정하기 위해서는 이러한 주행 인자들의 조건을 인증시험시에 어느 수준으로 반영할 것인지에 대해 검토가 필요하다. EU에서는 실

주행 배출가스 규제에 대해 일반적인 조건에서의 주행 특성을 반영하는 방향으로 추진하고 있다. 즉, 실제 도로를 주행하되 차속, 가속도, 외기온도 등에 대한 경계 조건을 설정하여 실제 도로 주행에서 빈도가 낮은 가혹한 운전 조건은 제외하는 것이다. EU에서 구체적인 시험조건과 주행경로와 관련된 규정은 2015년 중에 제정이 완료될 것으로 예상된다.

본 연구에서는 국내의 평균적인 주행 패턴을 반영할 수 있는 시험경로를 설정하기 위하여 Choi *et al.* (2012) 이 수도권 지역에서 수행한 실도로 주행 패턴 연구 내용을 반영하였다. 인천과 서울의 도심, 교외, 전용도로 및 고속도로를 조합하여 표 2 및 그림 2와 같이 3가지의 예비 주행경로를 선정하였다. 시험차량 중 2대(E5-1, G-1)에 대해 예비 경로를 주행하고 획득한 차속-가

속도 분포를 Choi *et al.* (2012)의 연구에서 제시한 국내 평균 차속-가속도 분포와 비교하였다. 두 가지 차속-가속도 분포의 유사성을 통계적으로 평가하기 위하여 카이제곱 검정방법을 적용하였고, 카이제곱 값이 가장 작은 경로를 최종 시험 주행경로로 선정하여 다양한 차종에 대한 평가를 수행하였다.

실도로 배출가스 시험시 일반적인 교통흐름에 따라 주행하였고, 히터와 에어컨 등 엔진 부하에 영향을 줄 수 있는 부가 장치는 가동되지 않는 조건인 외기온도 5~25°C의 시험 데이터를 분석하였다. 향후 실도로 배출가스 규제에서는 부가장치의 가동 조건을 포함하여 기준이 설정될 것으로 예상된다. 현행 배출가스 인증 시험에서는 부가장치를 가동하지 않았는데, 본 연구는 주행인자 중 실도로와 인증조건의 차속-가속도 차이에

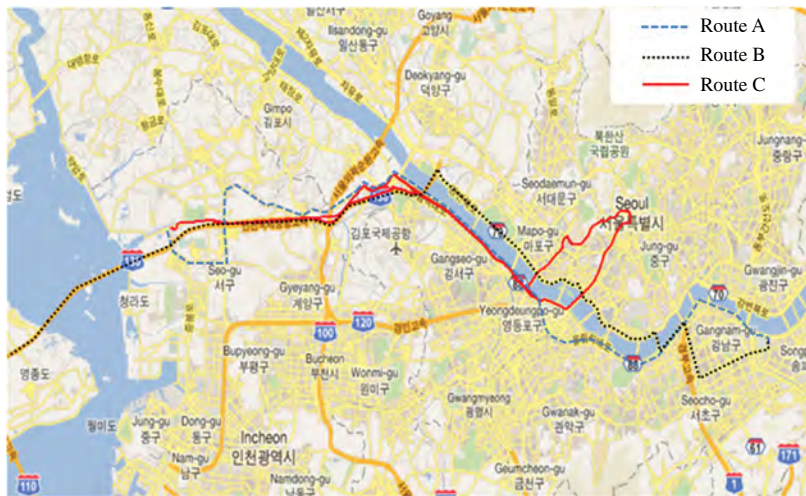


Fig. 2. Graphical map of test routes.

Table 2. Test routes for selecting a representative route.

Route ID	Sublink	Road type	Distance (km)
A	NIER → Gongchon-junction → Baekseok-overpass	Urban	9
	Baekseok-overpass → Landfill-road → Hangju-bridge	Rural	12
	Hangju-Bridge → Olympic-daero → Sports complex	Motorway	30
B	Teheran-ro → Gangnam → Banpo-bridge	Urban	12
	Banpo-bridge → Gangbyunbook-ro → Bangwha-bridge	Motorway	18
	Bangwha-bridge → Incheon airport road	Highway	41
C	NIER → Ara-road → Hangju-bridge	Rural	15
	Hangju-bridge → Olympic-daero → Yangwha-bridge	Motorway	14
	Yangwha-bridge → Seongsan-ro → Kwangwhamun → Yeouido	Urban	21

다른 영향을 분석하는 것에 초점을 맞추었다.

2.4 실주행 배출가스 데이터 분석 방법

실제 도로 주행시험의 경우 동일한 경로를 주행하더라도 교통상황에 따라 주행특성은 달라진다. 따라서 실주행 배출가스 규제를 설정하기 위해서는 특정 경로에 대한 단순 평균값보다는 다양한 주행 조건을 반영할 수 있는 데이터 분석 방법이 요구된다. EC-JRC (2013)는 유럽의 대형차 PEMS 평가에 적용되는 이동 평균구간분석방법(Moving Averaging Window)을 변형하여 소형차에 적용하는 방법을 제시하였다. EC-JRC (2013)가 제시한 방법의 특징은 실도로 배출가스 데이터 분석에서 기준 CO₂ 배출량을 적용하여 배출가스 평균값을 계산하는 구간을 정의하는 것이다. 이 계산 구간에서 NO_x 등 대기오염물질의 단위 주행 거리당 배출량을 산정하고, 1초 단위로 이동 평균하는 방식이다. 평균구간 산정을 위한 기준 CO₂ 배출량은 인증시험 모드 주행시 배출되는 값으로 설정한다. 예를 들어 시험차량의 인증시험 모드 주행시 CO₂ 배출량을 A(g)이라 한다면, 도로 주행 시험시 최초 시작 시점에서 누적 CO₂ 배출량이 A(g)이 되는 시점까지를 최초의 계산구간으로 정의하고, NO_x 배출량을 g/km 단위로 산출한다. 이후 1초를 이동하여 1초 시점부터 누적 CO₂ 배출량이 A(g)이 되는 시점까지의 NO_x 평균값을 산출하고, 계속 1초씩 이동하면서 이동 평균값을 산출하는 방식이다.

본 연구에서는 경유차에서 문제가 되고 있는 실도로 NO_x 항목을 분석하였다. 국내 주행패턴과의 유사성 분석을 통해 선정된 주행경로에서 평균적인 NO_x 배출량과 도로 유형별 배출특성을 분석하였고, EU의 RDE-LDV 제도에 도입이 예상되는 이동평균구간분석 방법을 적용하여 그 특성에 대해 평가하였다. 이를 통해 국내 경유차의 실도로 NO_x 배출 문제를 확인하고, 이에 대한 제도적인 개선 방안으로서 유럽 제도의 국내 적용 가능성과 기대 효과를 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주행경로 타당성 분석

실도로 시험 주행경로 선정을 위해 2대의 시험차량

으로 3가지의 예비 주행경로에서의 시험결과를 분석하였다. Choi *et al.* (2012)이 제시한 수도권 평균 주행 패턴과 차속-가속도 분포 측면의 유사성 분석을 위해 카이제곱 검정을 수행하였고, 그 결과를 표 3에 나타내었다. 카이제곱 통계값의 크기가 작을수록 두 집단 간의 분포 특성은 유사하다는 것을 의미한다. 3가지 예비 주행 경로 중 Route C 주행시 수도권 주행 패턴과 가장 유사한 차속-가속도 분포 특성이 나타났다. 수도권 평균 주행패턴과 인증시험 모드간의 차속-가속도 분포에 대한 카이제곱 통계값이 FTP-75 모드 1.649, NEDC 모드 11.607인 점을 고려하면, Route C 주행 경로에서는 인증시험 모드 보다 국내의 실도로 주행 패턴에 더 가까운 차속-가속도 분포에서 배출가스를 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

그림 3에는 Route C와 수도권 평균 주행 패턴과의 차속 분포 특성을 경유차 인증시험 모드인 NEDC와 함께 비교하여 나타내었다. Route C와 수도권 주행패턴 간의 차속 분포는 NEDC 분포보다 유사하지만, 차속 90 km/h 이상의 고속 주행 분포 비율이 다소 낮은 것을 볼 수 있다. Route C만을 주행 경로로 설정할 경우에는 고속도로 주행 특성이 배제될 수 있는 문제점이 있으므로, 폭넓은 주행 패턴을 반영하기 위해 방화

Table 3. Chi square values for analysing similarity between test routes and averaged driving patterns in metropolitan area.

Vehicle ID	Route A	Route B	Route C
E5-1	2.527	6.938	0.504
G1	1.253	56.304	0.592

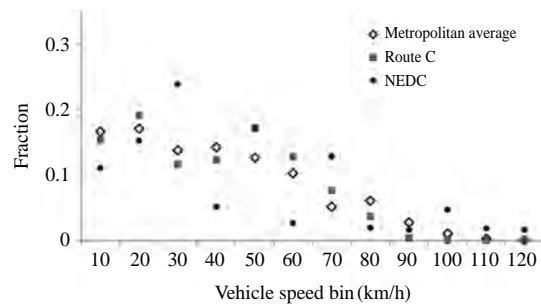


Fig. 3. Vehicle speed distributions in Route C, metropolitan-averaged driving patterns and NEDC driving cycle.

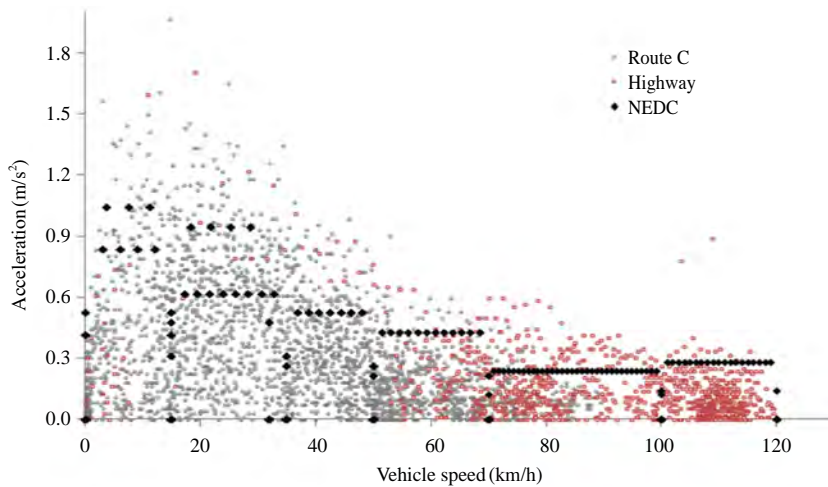


Fig. 4. Vehicle speed-acceleration distribution in Route C, Highway and NEDC driving cycle.

대교와 인천공항고속도로 주행구간을 고속도로 경로로 추가하여 분석하였다. 그림 4에는 Route C와 고속도로 주행시의 차속-가속도 분포를 경유차 인증시험 모드인 NEDC 모드와 비교하여 나타내었다. 선정된 주행 경로는 실도로에서의 차속-가속도 분포를 폭넓게 반영할 수 있는 것으로 판단된다. 경유차의 인증시험 모드로 적용되는 NEDC 모드의 차속은 120 km/h 까지 분포되지만, 가속도는 실도로 조건 만큼 변동성이 크지 않은 것을 볼 수 있다.

3.2 실도로 배출가스 평균

그림 5에는 Route C와 고속도로 주행시의 실도로 NO_x 평균값을 나타내었다. 수도권 평균 주행 패턴에 가장 가까운 운행조건에서 EURO-5 경유차의 NO_x 배출량은 0.24~1.724 g/km로 인증 기준인 0.18 g/km 대비 1.3~9.6배 높았고, 시험차량별로 배출량에 상당히 큰 차이가 있었다. EURO-5 5대의 실도로 NO_x 평균값은 0.731 g/km로서 인증기준의 약 4.1배 수준이었다. 고속도로 주행시의 실도로 NO_x 배출량은 Route C 주행보다 더 높게 나타났으며, 평균 1.01 g/km로서 인증기준의 5.6배 수준이었다. EURO-6 경유차 4대의 실도로 NO_x 평균값은 Route C 주행시 0.16 g/km로서 EURO-5 경유차 대비해서는 78% 저감되었지만, 인증기준인 0.08 g/km보다는 여전히 2배 높았다. 고속도로 주행 조건에서는 0.125 g/km로서 EURO-5 경유차와 달리

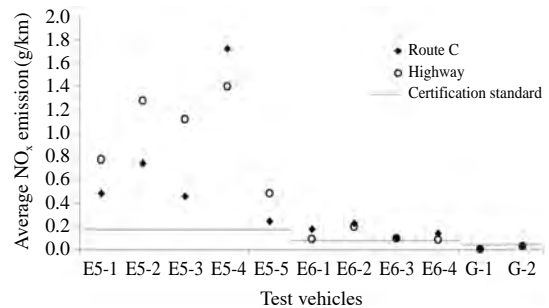


Fig. 5. Averaged on-road NO_x emissions of light-duty vehicles.

Route C 주행보다 낮게 배출되었다. 휘발유차 2 대의 실도로 NO_x는 Route C와 고속도로에서 모두 인증기준인 0.044 g/km보다 낮게 배출되었고, 평균값은 각각 0.024 g/km, 0.016 g/km 수준이었다. Park *et al.* (2013), Lee *et al.* (2013)은 EURO-5 경유차의 경우 인증 모드 이외 조건에서 NO_x 배출량이 상당히 증가하는 것을 확인한 바 있다. EURO-6의 경우 LNT, SCR 등 엔진 후처리 기술이 추가적으로 적용됨에 따라 EURO-5보다는 NO_x 배출량이 상당히 감소된 것으로 판단된다. EURO-6 경유차 중 LNT 적용 차량의 실도로 NO_x는 각각 0.176 g/km, 0.224 g/km로 SCR 적용 차종의 0.1 g/km, 0.14 g/km보다 높게 배출되었다.

그림 6에는 도로 유형을 도심, 교외, 전용도로, 고속

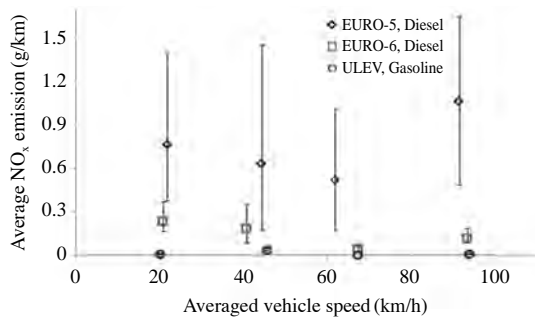


Fig. 6. Averaged on-road NO_x emissions according to averaged vehicle speeds as road types.

도로로 구분하였을 때 도로유형에 따른 평균차속별 NO_x 배출량을 분석하여 나타내었다. EURO-5 경유차는 차속이 높은 고속도로 운전 조건에서 NO_x 배출량이 1.068 g/km로 가장 높았고, 시험 차종에 따른 편차도 상당히 크게 나타났다. EURO-6 경유차는 도로 유형에 따른 NO_x 배출량이 EURO-5와 비교하여 69~90% 감소하였고, 특히 고속 운행 조건에서의 감소율이 높은 것으로 나타났다. EURO-6 경유차는 시험 차량에 따른 NO_x 편차도 상당히 줄어든 것을 볼 수 있다. 그러나 EURO-6 경유차의 실도로 NO_x 배출량은 동일한 도로 유형에서 휘발유차 배출량과 비교했을 때 5~25.8배로 여전히 높은 수준이다. 최근의 경유차 판매 비율이 증가하고, 승용차로 확대되는 상황임을 고려하면 경유차의 실도로 NO_x 배출량을 추가적으로 저감할 수 있는 대책이 필요한 것으로 판단된다.

그림 7에는 Route C 주행시 약 1100초 동안 측정된 NO_x 배출율을 시험차량의 적용 배출기준에 따라 나타내었다. EURO-5 경유차(E5-1)는 실주행시 전체 구간에서 NO_x 배출율이 높은 것을 볼 수 있다. LNT 적용 EURO-6 경유차(E6-1)는 EURO-5 경유차 대비 NO_x 배출율은 상당히 감소하였지만, 일시적으로 급격히 증가되는 구간이 나타난다. LNT 촉매는 일반적인 주행시에는 NO_x를 촉매에 포집하여 저장하지만, 촉매의 NO_x 저장 용량 한계에 도달할 경우에는 엔진제어장치가 연료 후분사를 통해 NO_x 환원 반응을 제어한다. 이러한 과정을 NO_x 재생(regeneration)이라 하는데, 재생 과정에서 촉매에 저장된 NO_x 중의 일부는 환원되지 못하고 그대로 배출되는 것으로 판단된다. SCR 적용

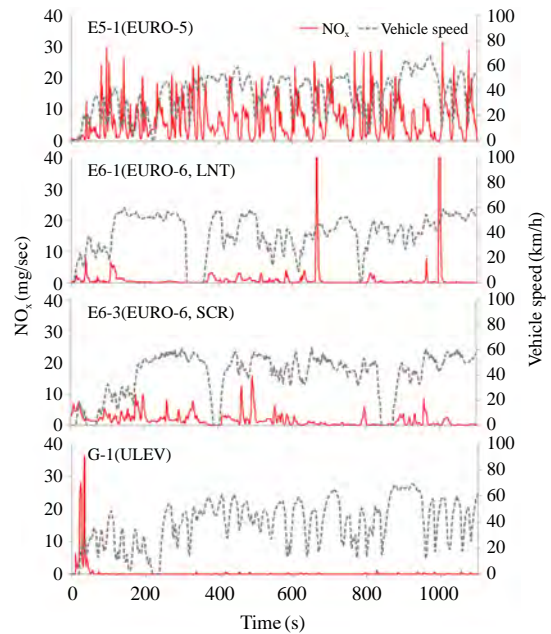


Fig. 7. Characteristics of on-road NO_x emission rate in Hz as test vehicles.

EURO-6 경유차(E6-3)는 요소수 분사를 통해 NO_x 배출율이 안정적으로 제어되는 것을 볼 수 있다. 휘발유차(G-1)는 차량 출발 초기에 NO_x 배출율이 일시적으로 높지만, 약 100초 경과 후에는 경유차 대비 매우 낮은 수준으로 배출되는 것을 확인할 수 있었다. 휘발유차의 경우 배출가스 후처리 기술의 특성상 삼원촉매와 공기연료비 제어를 위한 산소센서의 활성화에 소요되는 기간 동안에는 이론 공연비 제어가 어려우므로 NO_x 배출율이 높지만, 이후에는 안정적으로 공연비가 제어 되고, 촉매의 NO_x 저감 성능이 정상적으로 유지되는 것으로 판단된다.

3.3 이동평균구간 분석 방법 적용

그림 8에는 E6-3 차량에 대해 1회 주행시험을 실시하고 이동평균구간 분석 방법을 적용하였을 때 평균차속과 상대가속도의 분포를 실제 도로 주행시의 평균값과 비교하여 나타내었다. 실제 도로 주행시의 평균값은 Choi *et al.* (2012)의 연구 데이터를 분석하여 산출한 도로 유형별 평균값이다. 이동평균구간 분석시에 5484개의 평균구간이 생성되었는데, 각 평균구간에서

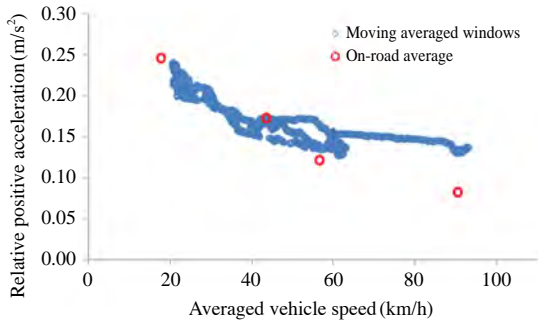


Fig. 8. Driving range covered by moving averaged window method in one test driving.

의 평균차속은 20~100 km/h 범위에서 분포되며, 상대 가속도는 실도로의 평균값과 유사한 수준에서 분포되었다. 고속주행 조건에서 상대가속도가 다소 높았지만, 실도로 주행시에 충분히 나타날 수 있는 수준으로 판단된다. 즉, 이동평균구간분석 방법을 적용할 경우 상당히 폭넓은 차속영역에서 국내 평균 수준의 가속도 특성을 반영하여 데이터를 분석할 수 있을 것으로 판단된다. EU는 실주행 배출가스 관리제도의 데이터 분석방법으로 이동평균구간분석 방법의 적용을 검토하고 있다. 인증시험의 특성상 최소의 시험회수로 다양한 주행 조건을 반영할 수 있는 데이터 분석 방법이 필요한데, 이동평균구간분석 방법은 이러한 요구 사항에 부합할 수 있는 것으로 판단된다. 주행 경로 선정에 따라 이동평균구간 분석에서 반영되는 차속-가속도 분포 특성은 달라질 수 있는데, 본 연구에서 선정한 주행 경로는 국내의 평균적인 주행 패턴을 잘 나타낼 수 있는 경로임을 재확인할 수 있었다.

그림 9에는 시험차량 중 6대에 대해 이동평균구간 분석을 수행하여 NO_x 배출량 분포를 나타내었고, 그림 10에는 각 평균구간의 실도로 NO_x 값의 인증기준 대비 비율(deviation ratio)을 나타내었다. 인증기준 대비 비율이 1보다 큰 것은 인증시험 모드로 설정된 배출허용기준보다 실도로 배출량이 더 높다는 의미이다. EURO-5 경유차의 실주행 NO_x 배출량은 그림 5와 같이 평균값이 인증기준의 4.1배 수준이었고, 이동평균구간 분석 방법에서 나타난 대부분의 운행 조건에서도 인증기준보다 높게 배출되었다. 이는 EURO-5에 적용된 NO_x 저감 장치인 EGR이 인증시험 모드의 한정된

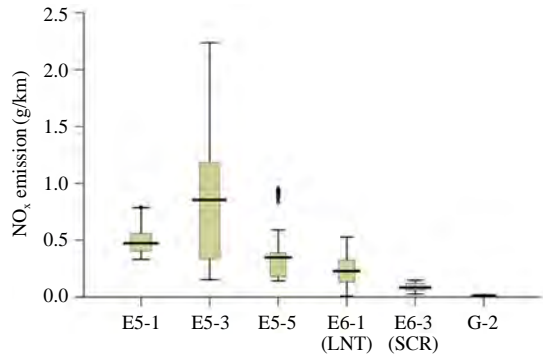


Fig. 9. Range of moving averaged on-road NO_x emissions.

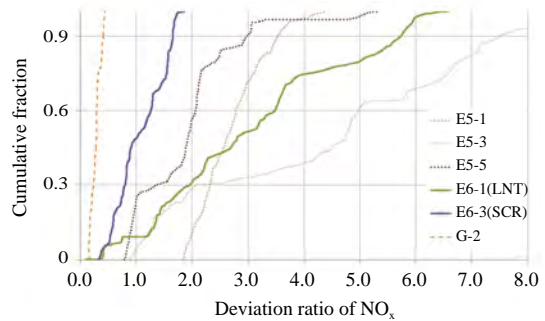


Fig. 10. Cumulative fraction of moving averaged NO_x emissions expressed as deviation ratio to emission limit.

운행조건에서 작동될 뿐 이외의 다양한 운전 영역에서는 NO_x 저감 성능이 상당히 떨어지기 때문인 것으로 판단된다. EURO-6 차량의 경우 적용 기술에 따라 실도로 NO_x 배출 특성에 다소 차이가 나타났다. LNT가 적용된 E6-1 차량의 경우 평균값은 EURO-5 차량보다 낮았지만, 상당히 많은 운전 조건에서 실도로 NO_x 배출량이 여전히 높은 수준이었다. E6-1은 전체 이동평균구간의 9.3%에서만 NO_x 배출량이 인증기준(0.08 g/km)보다 낮으며, 69%의 이동평균구간에서는 인증기준의 2배를 초과하였다. SCR이 적용된 E6-3 차량은 49%의 이동평균구간에서 실도로 NO_x 배출량이 인증기준 보다 낮았고, 최대값은 1.9배 수준이었다. 이러한 차이는 그림 7에 나타난 바와 같이 적용 기술의 NO_x 저감 특성에서 기인하는 것으로 판단된다. LNT의 경

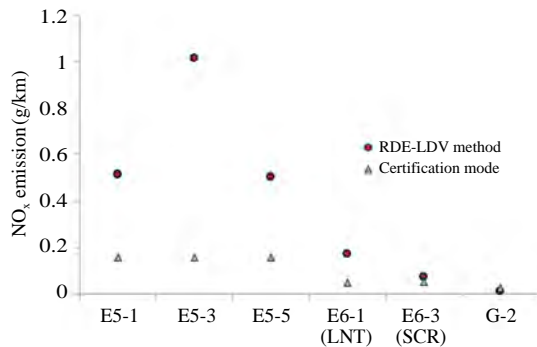


Fig. 11. Comparison of NO_x estimated with emission certification and RDE-LDV method.

우 NO_x를 포집한 후 재생과정에서 일시적으로 NO_x가 매우 높게 배출되는데, 운행조건에 따라 이러한 특성들이 다양한 경향으로 나타날 것으로 예상된다. SCR의 경우 요소수 분사를 통해 주행중에 안정적으로 NO_x를 저감시킬 수 있으므로, LNT보다는 상대적으로 실도로 NO_x 저감 특성이 높은 것으로 판단된다. 휘발유 차량의 경우 모든 이동평균구간에서 실도로 NO_x는 인증기준(0.044 g/km)보다 낮았고, 최대값은 기준의 0.5배 이내 수준이었다.

EU는 실도로 배출가스시험(RDE-LDV)의 최종결과 산정시 이동평균구간을 평균차속에 따라 45 km/h 미만, 45~80 km/h, 80 km/h 초과로 3단계로 구분하고, 각 구간에서의 가중계수를 각각 0.34, 0.33, 0.33으로 하는 방안을 제시하였다. 이는 도로유형별 배출특성을 구분하여 동등한 수준으로 반영하고자 하는 시도인 것으로 판단된다. 그림 11에는 이러한 방식을 적용하여 시험차량 6대의 실도로 NO_x 값을 산정하고, 인증시험 모드로 측정된 NO_x 값과 비교하여 나타내었다. 그림 11은 EU에서 추진중인 RDE-LDV 데이터 분석방법이 주행경로별 평균값과 이동평균구간 분석을 통해 나타난 경유차 실도로 NO_x 과다 배출 문제를 명확하게 재현할 수 있음을 보여준다. 즉 EURO-5 차량은 인증과 실도로 NO_x 배출량 간에 상당한 차이가 있고, EURO-6 차량에서는 이러한 차이들이 상당히 감소했지만, LNT 기술 적용 차량은 이러한 배출량 차이가 충분히 해소되지 않았다는 점을 보여준다. 또한 RDE-LDV 시험방법에 대한 기준을 합리적으로 설정함으로써 경유차의 인증과 실도로 NO_x 배출량 간의 차이를 줄일 수 있

며, 이를 통해 자동차 제작사들에게 실도로 NO_x 저감 특성이 높은 SCR과 같은 기술을 선택하도록 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 소형 경유차의 실도로 NO_x 배출 특성을 평가하기 위해 PEMS를 적용하여 서울과 인천의 실제 도로를 주행하면서 배출가스를 측정하였다. 경유차의 배출허용기준 및 적용기술에 따른 실도로 NO_x 배출 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) PEMS 시험 경로와 수도권 지역의 평균주행 패턴에 대한 차속-가속도 분포 카이제곱 분석을 통해 현행 인증시험에 적용중인 FTP-75, NEDC 모드보다 실도로의 평균주행 패턴과 유사한 운행 조건에서 NO_x 배출량을 산정하였다. 동 주행경로는 고속 주행패턴을 반영하지 못하는 한계가 있어 고속도로 주행구간을 포함하고, 도로유형별 실도로 NO_x 배출량을 분석함으로써 다양한 운전 조건에서의 배출 특성을 평가하였다.

2) 본 연구에서 PEMS를 이용하여 평가한 EURO-5 경유차 5대의 실도로 NO_x 평균값은 0.731 g/km로서 NEDC 모드로 설정된 인증기준인 0.18 g/km의 약 4.1배 수준으로 높게 배출되었다. EURO-6 경유차 4대의 실도로 NO_x 평균은 0.16 g/km로서 상당히 감소되었지만, 인증기준인 0.08 g/km의 2배 수준이었다. 휘발유차 2대는 모두 인증모드인 FTP-75 모드로 설정된 기준 0.044 g/km보다 낮게 배출되었다. 경유차의 EURO-6 기준 도입에 따라 NO_x 저감을 위한 엔진 후처리 장치가 신규로 적용되어 실도로 NO_x 배출량은 상당히 개선되었지만, 국내 경유차 비율이 지속적으로 높아지는 상황임을 고려할 때 추가적인 기술 개선 가능성을 검토하고, 이의 적용을 유도할 수 있는 제도적인 대책이 필요하다.

3) 이동평균구간 분석방법을 적용하여 다양한 차속-가속도 조건에서 실도로 NO_x 배출 특성을 분석하였다. EURO-5 경유차는 거의 모든 실도로 운행 조건에서 NEDC 인증기준을 초과하였고, EURO-6 경유차는 적용된 NO_x 저감기술에 따라 차이가 나타났다. LNT 적용 차종은 전체 운행 조건의 9%에서 NO_x 배출량이 인

증 기준 이하였지만, SCR 적용 차량은 49%의 운전 조건에서 실도로 NO_x 배출량이 인증 기준 이하로 나타났다. 경유차의 NO_x 후처리 기술 중 LNT보다는 SCR 장치의 실도로 NO_x 배출량 저감효과가 높으며, 이의 적용을 확대할 수 있는 제도적 장치가 요구된다.

4) EU에서 추진중인 RDE-LDV 제도는 PEMS를 이용한 실도로 시험과 이동평균구간분석방법을 기본 평가방법으로 채택할 예정이다. 본 연구의 시험결과에 RDE-LDV 데이터 분석방법을 적용한 결과, 경유차의 인증시험과 실도로 NO_x 배출량의 차이와 EURO-6 경유차의 적용기술에 따른 실도로 NO_x 저감효과의 차이를 명확히 나타내 주었다. 동 평가 방법에 따라 배출허용기준을 합리적으로 설정함으로써 인증시험과 국내의 실제 도로 주행 조건에서 경유차 NO_x 배출량의 차이를 줄일 수 있을 것이며, 또한 자동차 제작사들이 실도로 NO_x 저감 성능이 우수한 SCR과 같은 기술을 선택하도록 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Choi, K.J., J.H. Park, J.T. Lee, J.S. Kim, and K.J. Lee (2012) Research on Domestic Driving Pattern for International Standardization of Light-duty Vehicles Emission Test Method, J. Korean Soc. Transp., 30(1), 7-19. (in Korean with English abstract)
- Competitive Automotive Regulatory System (2012) CARS21 High Level Group, On the Competitiveness and Sustainable Growth of the Automotive Industry in the European Union, Final Report, 60-62.
- Ericsson, E. (2001) Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors, Transport. Res. Part D: Transport. Environ., 6, 325-345.
- European Commission (2011) Implementing and Amending Regulation (EC) No. 595/2009 of the European Parliament and of the Council with Respect to Emissions from Heavy Duty Vehicles (EURO VI) and Amending Annexes I and III to Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Regulation (EC) No. 582/2011.
- European Commission-Joint Research Center (2011) Analyzing On-road Emissions of Light duty Vehicles with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS), JRC Scientific and Technical Reports, EUR 24697 EN.
- European Commission-Joint Research Center (2013) A complementary emissions test for light-duty vehicles: Assessing the technical feasibility of candidate procedures, Conclusions of the Real-Driving Emissions-Light Duty Vehicles (RDE-LDV) working group, JRC Scientific and Policy Reports, EUR 25572 EN.
- Lee, T.W., J.H. Park, S.I. Kwon, J.T. Lee, and J.S. 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. Total Environ., 461-462, 377-385.
- National Institute of Environmental Research (2012a) The study on emission characteristics of diesel vehicle on various driving condition NIER-RP2012-203.
- National Institute of Environmental Research (2012b) Introduction of In-use Compliance Test for Heavy Duty Vehicles (II), Utilizing PEMS (Portable Emission Measurement System) NIER-RP2012-201. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research (2014) Clean Air Policy Modeling System.
- Park, J.H., J.T. Lee, T.W. Lee, J.S. Kim, and J.H. Kil (2012) An Analysis on the Emission Reduction Effect of Diesel Light-duty Truck by Introducing Electronic Toll Collection System on Highways, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 28(5), 506-517. (in Korean with English abstract)
- Park, J.H., J.T. Lee, S.M. Kim, J.S. Kim, and K.W. Ahn (2013) A Study on the Emission Characteristics of Korean Light-duty Vehicles in Real-road Driving Conditions, Transaction of KSAE, 21(6), 123-134 (in Korean with English abstract)
- Seoul Metropolitan Government (2015) Seoul Air Quality Information, <http://cleanair.seoul.go.kr>
- US EPA (2005) Control of Emissions of Air Pollution from New Motor Vehicles; In-use Testing for Heavy-duty Diesel Engines and Vehicles, Federal Register, 70(113), 34594-34626, 2005.
- Weiss, M., P. Bonnel, R. Hummel, A. Provenza, and U. Manfredi (2011) On-road Emissions of Light duty Vehicles in Europe, Environmental Science and Technology, 45, 8575-8581.