실제도로주행을 포함한 주행모드 따른 EURO-6 경유자동차의 배출특성 연구

An Investigation on the Emission Characteristics of Diesel Vehicle with EURO-6 Standard According to Test Mode Including Real-road Driving

이종철 · 박준홍 · 김주원 · 강건우 · 오승택 · 이상현 · 정택호* · 이종태
Jong Chul Lee · Jun Hong Pack · Ju Won Kim · Gun Woo Kang · Seung Tak Oh ·
Sang Hyun Lee · Taek Ho Chung[†] · Jong Tae Lee

국립환경과학원 교통환경연구소

Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received March 29, 2019; Revised April 24, 2019; Accepted April 25, 2019)

Abstract : Emission certification test mode of diesel vehicles in Korea was changed to the WLTC (Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle) mode with RDE (Real-road Driving Emission) test from NEDC (New European Driving Cycle) mode in September 2017. In this study, investigation on the emission characteristics of diesel vehicle with EURO-6 standard according to NEDC, WLTC and RDE test were carried out for validation of the effectiveness in point of controlling NOx emission. The 18 passenger diesel vehicles having EURO-6 standard were selected to analyze the emission characteristics according to various test mode. In addition, test vehicles were sorted according to after-treatment system with LNT (Lean NOx Trap) and SCR (Selective Catalytic Reduction) for the confirmation of emission characteristics by NOx reduction technologies. From the results of emission characteristics, exhaust emissions of all test vehicles show lower levels than the emission standard at tests, except for NOx. However, NOx emissions of some vehicles exceeded the exhaust gas emission limits at the WLTC mode. Also, it was found that vehicles equipped with the LNT as the after-treatment device had a large fluctuation of NOx emission amount according to the test mode but vehicles using the SCR after-treatment system had less change than the LNT vehicle.

Key Words : On-road emissions, Nitrogen oxides (NOx), Light-duty diesel vehicles, LNT (Lean NOx Trap), SCR (Selective Catalytic Reduction)

요약 : 2017년 9월부터 경유자동차의 배출가스 차대동력계 인증시험이 NEDC 모드에서 WLTC 모드로 변경되었고, 실도로 시험이 추가되었다. 이 연구는 기존의 NEDC 모드와 변경된 WLTC 모드, 그리고 추가된 실도로시험, 이 각각의 시험방법에 따른 대기오염물질 배출특성의 변화를 확인하고, 새로운 배출가스 인증시험의 실효성을 파악하기 위해 진행되었다. 시험은 기존 2014년 유로6 배출인증기준을 통과하는 18대의 경유자동차로 진행되었으며, NOx 저감장치 별 배출 특성을 확인하기 위하여 LNT 차량과 SCR 차량, 두 그룹으로 분류하여 결과를 분석하였다. 배출가스 분석 결과 NOx를 제외한 배출가스규제 물질들은 시험 모드가 변경되어도 규제치를 넘지 않는 배출량을 보였지만, NOx는 시험 방법에 따라 일부 차량들이 배출가스 규제치를 넘는 결과를 보였다. LNT를 저감장치로 장착한 차량들이 시험모드에 따라 NOx 배출량 변화가 큰 경우가 많았고, SCR을 사용한 차량은 LNT 차량에 비해 변화가 적은 것으로 나타났다.

주제어 : 실도로 시험, 질소산화물 흡장 촉매, 선택적 촉매 환원장치

1. 서론

경유자동차 배출가스는 우리나라 대기오염에 큰 영향을 미치고 있다. 국립환경과학원에서 발간한 보고서 ‘대기오염물질 배출량 2015’에 따르면 도로이동오염원에서 발생하는 NOx(질소산화물), CO(일산화탄소), PM_{2.5}(입상물질)은 총 대기오염물질 배출량의 31.9%, 31.0%, 8.9%를 차지하고 있다. NOx와 CO는 전체 발생원 중 차량에서 발생되는 것이 가장 많은 비중을 차지하고 있는 것이다.¹⁾

이처럼 자동차 배출가스는 대기오염에 큰 비중을 차지하고 있기 때문에, 환경부는 이를 관리하기 위하여 제작자 배출허용 기준을 지속적으로 강화시키고 있다. 우리나라의 경유자동차 배출가스 규제기준은 유럽의 규제기준을 도입하여 사용하고 있으며, 2006년~2009년 8월까지의 EURO-4,

2009년 9월~2014년 9월까지의 EURO-5, 2014년 9월부터 현재까지는 EURO 6 규제기준을 적용하고 있다.²⁾

자동차 제작사들은 자동차 배출규제물질인 PM(Particulate Matter)을 저감시키기 위해 디젤미립자필터(DPF, Diesel particulate filter)를 사용하고 있고, NOx를 저감시키기 위해 배기가스 재순환 장치(EGR, Exhaust Gas Recirculation)와 흡장촉매장치(LNT, Lean NOx Trap), 선택적 촉매 환원장치(SCR, Selective Catalytic Reduction)를 사용하고 있다.^{3,4)}

NO₂ 농도는 뚜렷한 감소 경향을 나타내지 않고 있다. 자동차 배출가스의 NOx 규제기준이 강화됨에도 불구하고, NO₂ 농도가 감소하지 않는 이유는 실내 시험실 배출가스 규제시험이 실제 도로에서 발생하는 NOx 배출량을 제대로 반영하지 못하고 있기 때문이며, 다수의 연구결과에서 확인할 수 있다.⁵⁻⁸⁾

* Corresponding author E-mail: cth1990@korea.kr Tel: 032-560-7627 Fax: 032-561-7013

이런 부분을 제도적으로 보완하기 위해 2017년 9월부터 실내시험실 주행모드가 NEDC(New European Driving Cycle)에서 WLTC(Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle)로 변경되었고, 실제 도로에서의 배출량을 측정하기 위한 실도로시험(RDE, Real Driving Emission)이 인증시험에 추가되었다.

본 연구는 2014년 유로6 규제를 충족시키는 차량 총 18대를 선정하여 실내시험실에서 NEDC 모드와 WLTC 모드를 시험하였고, 실도로에서 PEMS(Portable emissions measurement system)를 이용한 RDE 시험을 진행하였다. 시험결과 분석을 통해 기존의 NEDC 모드와 새로운 WLTC 모드, 그리고 실도로시험에서 배출되는 규제 오염물질의 배출특성을 확인하였고, LNT 차량과 SCR 차량으로 구분하여 저감장치에 따른 배출특성 결과를 비교 분석하였다.

2. 시험차량 및 시험방법

2.1. 시험차량

시험에 사용된 차량은 EURO-6 배기규제를 충족시키는 경유자동차 총 18대이다. NOx 저감장치를 기준으로 LNT를 사용하는 차량 9대와 SCR을 사용하는 차량 9대 두 그룹으로 나누었으며, 시험에 따른 그룹별 배출가스 특성을 분석하였다. Table 1은 시험차량들에 대한 스펙이며, Table 2는 경유차 EURO-6 규제 기준을 나타낸다.

2.2. 시험장비

실내시험실에서 진행되는 차량 시험은 차대동력계 위에서 차량을 주행하며 발생하는 배출가스를 측정하는 방식이다. Fig. 1은 실내시험실에서 진행되는 시험의 개략도이다. 차대동력계는 실제 도로를 주행할 때 발생하는 도로 주행 저항 값들을 재연하는 장비로서 AVL 사의 동력계를 사용하였고, 배출가스 분석기는 HORIBA사의 MEXA-9200D, 7200 분석기를 사용하였다. CO, CO₂는 비분산적외선분석법(Nondispersive Infrared, NDIR), THC는 열식수소염이온화검출법(Heated Flame Ionization Detector, HFID), NOx는 화학발광법(Chemiluminescence Detector, CLD)을 이용해 측정하였고, 분석방법은 실시간으로 배출량을 측정하는 MODAL 분석방법과, 각 phase에 따른 총 배출가스 농도를 측정하여 최종적으로 배출량을 계산하는 bag 분석방법을 사용하였으며, 주행거리 당 배출가스량(g/km)으로 계산하였다.

Fig. 2는 실도로시험과 시험에 쓰이는 PEMS 장비 장착 사진이다. PEMS는 센서스사의 SEMTECH 장비를 사용하였다. CO, CO₂는 비분산적외선분석법(Nondispersive Infrared,

Table 1. Selected specification of test vehicles

Type	Disp. [cc]	Test Weight[kg]	After Treatment	Fuel	Emission Standard
SEDAN	1582	1470	LNT	DIESEL	EURO6
SEDAN	1969	1700	LNT	DIESEL	EURO6
SEDAN	1995	1810	LNT	DIESEL	EURO6
SEDAN	1997	1753	LNT	DIESEL	EURO6
SEDAN	2199	1930	LNT	DIESEL	EURO6
SUV	1956	1700	LNT	DIESEL	EURO6
SUV	1995	1700	LNT	DIESEL	EURO6
SUV	1995	1810	LNT	DIESEL	EURO6
SEDAN	2993	1930	SCR	DIESEL	EURO6
SEDAN	1560	1360	SCR	DIESEL	EURO6
SEDAN	1968	1810	SCR	DIESEL	EURO6
SEDAN	2143	1700	SCR	DIESEL	EURO6
SEDAN	2967	2150	SCR	DIESEL	EURO6
SEDAN	2987	2270	SCR	DIESEL	EURO6
SUV	1956	1700	SCR	DIESEL	EURO6
	1968	1810	SCR	DIESEL	EURO6
SUV	2967	2270	SCR	DIESEL	EURO6
SUV	2967	2270	SCR	DIESEL	EURO6

Table 2. EURO-6 emission standard

	CO	HC + NOx	NOx	PM	PN
EURO-6	0,5 g/km	0,17 g/km	0,08 g/km	0,0045 g/km	6*10 ¹¹ #/km

Fig. 1. Schematic view of a chassis dynamometer system,

NDIR), NO, NO₂는 비분산자외선(Non-dispersive UV)방법을 이용해 측정하였으며, 분석방법은 실시간 배출량을 측정하는 방법과 EC-JRC에서 RDE-LDV 데이터 분석방법으로 제시한 이동평균구간(MAW, Moving Averaging Window)을 이용하였다. 이동평균구간 분석 방법은 WLTC 인증모드에서 발생했던 총 CO₂ 배출량의 절반 값을 기준으로, 실제 도로에서 발생하는 CO₂ 누적 발생량이 그 값에 도달하였을 때 하나의 평균 구간을 생성하며, 평균 구간은 1초 간격으로 연속적으로 생성된다. 각 이동 평균 구간에서 NO_x 및 CO₂ 등 물질의 주행거리 당 배출가스량(g/km)으로 계산하였다.⁹⁾

이동평균구간 분석방법은 인증시험 시에 실도로 배출가스 시험 결과의 최종 값을 산정하는 방식에 적용되고 있으며, 실도로 시험 결과의 산포를 줄여주어 결과를 표준화할 수 있는 계산 방법이라 이동평균구간 분석방법 이용하여

분석하였다.

모든 시험 진행 과정과 분석방법은 인증시험에 사용되는 방법에 따라 진행되었으며, 차대동력계시험 데이터와 PEMS 시험 데이터의 신뢰성 확보를 위해 상관성 시험을 진행하였다. 상관성 시험은 PEMS를 차량에 장착 후 차대동력계에서 WLTC 모드를 주행하는 방식으로 진행하였다. 시험 중 발생하는 배출가스를 차대동력계 분석기와 PEMS로 각각 측정된 후, 두 장비의 측정값이 차량시험 고시기준의 오차범위 내에 들어오는지 확인하였다.

2.3. 시험방법

실내시험실 시험 진행 과정은 차량을 실제 도로 상황과 유사한 부하 조건을 구현하기 위해 시험모드 진행 전 차대동력계 물리 위에 차량을 올려놓고 80 km/h의 속력으로 30

Fig. 2. Photographs of PEMS installation to test vehicle,

Fig. 3. Driving cycle for laboratory test.

분 주행 후 Coast-down을 실시하였으며, 차량은 시험설정 온도가 유지되는 환경에서 6시간 이상 정차(Soaking)시킨 후 시험을 실시하여 배출가스를 측정하였다.

Fig. 3은 NEDC 모드와 WLTC 모드의 시간에 따른 자동차 차속 그래프이다. 실내 시험실에서 운전자가 그래프와 같은 속도에 따라 주행하며 시험이 진행된다. NEDC 모드는 런던, 파리 등 유럽 주요 도시의 표준 주행패턴을 이용하여 만들어진 모드이며, WLTC 모드는 UN WP.29에서 주요 5개국의 평균적인 주행패턴을 이용하여 만들어진 모드이다. Table 3은 NEDC, WLTC모드의 상세 정보들을 나타낸다.

실도로시험은 차량에 PEMS를 장착하고 실제 도로를 주행하는 동안 자동차에서 발생하는 자동차 배출가스를 측정하는 방법으로 진행하였다. 실도로 시험에 사용된 주행 경로로는 Fig. 4의 NIER Route3 경로를 사용하였는데, NIER Route3 경로에 대한 자세한 주행정보는 Table 4를 통해 확인할 수 있다. 시험 진행 과정은 도심(0~60 km/h) 34%, 교외(60~90 km/h) 33%, 고속도로(90 km/h~) 33%를 기준으로 실험을 진행하며, 도로 유형의 주행거리는 16 km 이상, 최고

Table 3. Mode driving condition

	NEDC	WLTC
Distance (km)	11,007	23,26
Ave. speed (km/h)	40,65	46,3
Max. speed (km/h)	120	131,6
Mode time (sec)	1180	1800

Table 4. Information of KOR-NIER Route 3

	NEDC	WLTC
Distance (km)	11,007	23,26
Ave. speed (km/h)	40,65	46,3
Max. speed (km/h)	120	131,6
Mode time (sec)	1180	1800

속도는 145 km/h, 도심 평균차속: 15~40 km/h, 주행시간: 90~120분 동안 시험이 진행하였다.¹⁰⁾

3. 결과 및 분석

NEDC, WLTC 모드와 RDE 시험을 진행하며 획득한 실시간 데이터와 거리당 배출량을 바탕으로 결과를 분석하였다.

3.1. 시험방법 별 주행조건 반영 특성

Fig. 5는 시험이 진행되는 동안 OBD를 통해 취득한 차량의 실시간 데이터를 이용해 만든 그래프로 엔진 회전 속도에 따른 엔진 부하의 정도를 나타낸다. 이 그래프를 통해 시험에서 주로 사용하는 엔진 회전 속도와 부하의 정도를 파악할 수 있으며, 이를 통해 각각의 시험방법이 얼마나 다양한 운행조건을 반영하고 있는지를 알 수 있다. NEDC 모드의 경우 시험이 진행되는 동안 엔진 회전 속도 1000~2000 RPM, 엔진 부하 30~90% 영역을 주로 사용하는 것을 알 수 있고, WLTC 모드는 RPM 750~2500 영역, 로드 0~100%

Fig. 4. Map of KOR-NIER Route 3.

Fig. 5. Engine speed-load distribution in each test mode.

을 이용하는 것을 알 수 있다. NEDC 모드 대비 WLTC에서 더 넓은 영역을 사용하고 있으며, 이를 통해 NEDC 재현되지 않는 엔진 운전 영역이 WLTC 조건에서 이루어지는 것을 알 수 있다. 실제로 시험은 전체적으로는 WLTC와 비슷한 750~2500 RPM 영역, 로드 0~100% 영역을 사용하고 있지만, WLTC와 비교하면 더욱더 많은 양의 데이터가 다양하게 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 WLTC 모드가 NEDC와 비교해 실도로시험 조건을 잘 재현했지만, 실제 도로 조건과 비교하면 전체적인 데이터의 양에서 부족하다는 것을 알 수 있다.

3.2. NEDC-WLTC 모드에서의 가스상물질 배출결과 비교

Fig. 6은 NEDC와 WLTC 모드에서의 가스상 물질 배출을 비교하기 위한 그래프로 LNT와 SCR이 장착된 차량을 구분하여 보여주고 있다.

CO 배출량은 LNT 장착 차량은 NEDC 모드에서 평균 0.032 g/km, WLTC 모드에서 평균 0.023 g/km이었고, SCR 장착 차량은 NEDC 0.099 g/km, WLTC 0.078 g/km이었다. NEDC 대비 WLTC에서 LNT 차량은 27.6%, SCR 차량은 21.6% 배출량이 감소되는 경향을 보였다.

NOx 배출량은 LNT 차량은 NEDC 모드에서 평균 0.027 g/km, WLTC 모드에서 평균 0.116 g/km이었고, SCR 차량은 NEDC 0.048 g/km, WLTC 0.077 g/km이었다. NEDC 대비 WLTC에서 LNT 차량은 332.7%, SCR 차량은 60.5% 증가되는 경향을 보였다.

CO₂ 배출량은 LNT 차량은 NEDC 모드에서 평균 159 g/km, WLTC 모드에서 평균 160 g/km이었고, SCR 차량은 NEDC 171 g/km, WLTC 170 g/km이었다. NEDC 대비 WLTC에서 LNT 차량은 0.2%가 증가, SCR 차량은 0.1% 감소되는 경

Fig. 6. Comparison of Gas Air Pollutant emission characteristics between NEDC Cycle and WLTC Cycle.

향을 보였다.

THC의 배출량은 LNT 차량은 NEDC 모드에서 평균 0.025 g/km, WLTC 모드에서 평균 0.018 g/km이었고, SCR 차량은 NEDC 0.012 g/km, WLTC 0.005 g/km이었다. NEDC 대비 WLTC에서 LNT 차량은 26.9%, SCR 차량은 56.3% 감소되는 경향을 보였다.

시험모드에 따른 배출량 변화 추이를 보면 NEDC 대비 WLTC에서 NOx는 증가하고, CO와 THC는 감소하였으며 CO₂는 모드에 따른 변화량이 거의 없었다. NOx의 경우에는 대부분의 차량이 WLTC 모드에서 배출량이 증가하였는데, LNT를 장착한 차량이 특히 많이 증가함을 확인할 수 있었다.

규제 기준으로 변화량을 판단하면 CO의 EURO-6 배출규제기준은 0.5 g/km인데, 한대의 차량이 WLTC 모드에서 0.43 g/km 배출되었을 뿐, 대부분은 0.2 g/km 이하로 배출되었기 때문에 두 시험 모두 규제기준을 충족시키는데 문제가 없었고, NOx의 배출허용기준은 0.08 g/km으로 NEDC에서는 모든 차량이 배출허용기준을 충족했지만, LNT 장착 차량 5대, SCR 장착 차량 3대가 WLTC에서 배출허용기준을 충족시키지 못하였다. THC는 NOx와 합산한 값으로 규제하고 있는데 NOx의 규제 기준치는 0.08 g/km 이고, HC + NOx 합산 규제치는 0.17 g/km이기 때문에 THC는

규제기준에서 0.07 g/km 정도의 여유를 가지고 있다고 볼 수 있다. 대부분의 차량 배출량이 0.04 g/km 이하로 배출되었기 때문에 NEDC와 WLTC 모드 전부 배출가스 규제기준을 충족시키는 데는 큰 문제가 없는 것을 확인할 수 있다.

3.3. NEDC-WLTC 모드에서의 입자상 물질 결과 비교

Fig. 7은 입자상 물질인 PM과 PN의 배출 결과로 LNT와 SCR이 장착된 차량을 구분하여 보여주고 있다. PM의 경우 LNT 차량은 NEDC 모드에서 평균 0.358 mg/km, WLTC 모드에서 평균 0.429 mg/km을 배출하였고, SCR 차량은 NEDC 0.318 mg/km, WLTC 0.911 mg/km을 나타내고 있다. NEDC 대비 WLTC에서 LNT 차량은 19.6%, SCR 차량은 186.6% 증가했고, SCR 차량 중 한대가 PM 배출량이 높았기 때문에 높게 배출된 차량을 제외하면 증가량은 72.4%가 됨을 알 수 있다.

PN의 경우 LNT 장착 차량은 NEDC 모드에서 평균 1.049×10^{11} #/km, WLTC 모드에서 평균 6.937×10^{10} #/km을 배출하였고, SCR 장착 차량은 NEDC 5.861×10^{10} #/km, WLTC 4.735×10^{10} #/km을 배출하였다. NEDC 대비 WLTC에서 LNT 차량은 33.8% 감소, SCR 차량은 19.2% 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 7. Comparison of Particulate Matter emission characteristics between NEDC Cycle and WLTC Cycle.

Fig. 8. Comparison of Gas Air Pollutant emission characteristics between NEDC Cycle and RDE test.

시험모드에 따른 배출량 변화 추이를 보면 NEDC 대비 WLTC에서 PM는 증가하고, PN은 감소하는 경향을 보였다.

EURO-6에서 PM은 4.5 mg/km, PN은 6.0×10^{11} 의 규제기준을 가지고 있는데, PM과 PN 대부분이 모든 시험에서 규제기준보다 많이 낮은 배출량을 보임을 알 수 있다.

3.4. NEDC-RDE 배출가스 결과 비교

Fig. 8은 NEDC와 RED 시험에서의 가스상 물질 배출을

비교하기 위한 그래프로 LNT와 SCR이 장착된 차량을 구분하여 보여주고 있다. PEMS장비는 CO, NOx, CO₂만 측정 가능하고, RDE 시험은 CO와 NOx만 규제물질로 구분하고 있기 때문에, 실내 시험실 주행모드와 실도로시험 간의 비교는 CO, NOx, CO₂로 진행하였다.

CO 배출량은 LNT 차량은 NEDC 모드에서 평균 0.032 g/km, RDE 시험에서 0.062 g/km이었고, SCR 차량은 NEDC모드에서 평균 0.099 g/km, RDE 시험에서 0.081 g/km이었다.

NEDC 모드 대비 RDE 시험에서 LNT 차량은 92.6% 증가, SCR 차량은 18.3% 감소되는 경향을 보였다.

NO_x 배출량은 LNT 차량은 NEDC 모드에서 평균 0.027 g/km, RDE 시험에서 0.208 g/km이었고, SCR 차량은 NEDC 모드에서 평균 0.048 g/km, RDE 시험에서 0.089 g/km이었다. NEDC 모드 대비 RDE 시험에서 LNT 차량은 674.6%, SCR 차량은 85.6% 증가되는 경향을 보였다.

CO₂ 배출량은 LNT 차량은 NEDC 모드에서 평균 159 g/km, RDE 시험에서 157 g/km이었고, SCR 차량은 NEDC 모드에서 평균 170 g/km, RDE 시험에서 166 g/km이었다. NEDC 모드 대비 RDE 시험에서 LNT 차량은 1.5% 감소, SCR 차량은 2.5% 감소되는 경향을 보였다.

시험모드에 따른 배출량 변화 추이를 보면 CO는 LNT 차량만 증가하는 경향을 보였고, CO₂는 변화가 거의 없었으며 NO_x는 상당수의 차량이 NEDC 대비 RDE에서 증가하는 경향을 보였다. NO_x의 경우에는 대부분의 차량이 RDE 모드에서 배출량이 증가하였는데, 이번 비교에서도 LNT 차량이 특히 많이 증가함을 확인할 수 있었다.

3.5. WLTC-RDE 배출가스 결과 비교

Fig. 9는 WLTC와 RED 시험에서의 가스상 물질 배출을 비교하기 위한 그래프로 LNT와 SCR이 장착된 차량을 구분

하여 보여주고 있다. CO 배출량은 LNT 차량은 WLTC 모드에서 평균 0.023 g/km, RDE 시험에서 0.062 g/km이었고, SCR 차량은 WLTC 모드에서 평균 0.078 g/km, RDE 시험에서 0.081 g/km이었다. WLTC 모드 대비 RDE 시험에서 LNT 차량은 165.9% 증가, SCR 차량은 4.3% 증가되는 경향을 보였다.

NO_x의 경우 LNT 차량은 WLTC 모드에서 평균 0.116 g/km, RDE 시험에서 0.209 g/km을 배출하였고, SCR 차량은 WLTC 모드에서 평균 0.077 g/km, RDE 시험에서 0.089 g/km을 배출하였다. WLTC 모드 대비 RDE 시험에서 LNT 차량은 79.0%, SCR 차량은 15.6% 증가되는 경향을 보였다.

CO₂의 경우 LNT 차량은 WLTC 모드에서 평균 160 g/km, RDE 시험에서 157 g/km을 배출하였고, SCR 차량은 WLTC 모드에서 평균 170 g/km, RDE 시험에서 166 g/km을 배출하였다. WLTC 모드 대비 RDE 시험에서 LNT 차량은 1.7% 감소, SCR 차량은 2.4% 감소되는 경향을 보였다.

시험모드에 따른 배출량 변화 추이를 보면 CO는 LNT 차량만 WLTC 대비 RDE에서 증가하는 경향을 보였고, CO₂는 변화가 거의 없었으며, NO_x는 WLTC 대비 RDE에서 증가하는 경향을 보였다. NO_x는 이번 비교에서도 LNT 차량이 더 많이 증가함을 확인할 수 있었다. LNT 차량만 NEDC와 WLTC 대비 실도로에서 CO 배출량이 증가하는 이유는 LNT 특성에 따르는 것으로 판단되는데, LNT는 촉

Fig. 9. Comparison of Gas Air Pollutant emission characteristics between WLTC Cycle and RDE test.

매 내에 흡장된 NOx를 일시적으로 농후한 공연비를 이용하여 N₂로 정화시키는 방법을 이용한다. 그 과정에서 많은 연료 분사로 인해 배출가스 온도가 증가하고, 환원제로 사용되는 THC와 CO의 농도가 증가하게 되는데, NEDC와 WLTC 모드에서는 환원 과정이 주로 일어나지 않지만 실도로시험은 시험 시간이 길기 때문에 주기적으로 환원 과정이 발생하고 그 과정에서 CO의 배출량이 늘어난 것으로 보인다.¹¹⁾ 하지만 늘어난 배출량도 배출가스 규정을 맞추기에 충분하기에 문제가 되지 않을 것으로 보인다.

3.6. 시험 평균차속에 따른 배출특성

Fig. 10은 시험 phase 단위의 평균 속도별 NOx 배출량을 보여주는 그래프로 저감장치에 따라 구분하였다. 저속구간의 경우 SCR을 장착한 차량이 LNT를 장착한 차량에 비해 배출량이 더 많은 것을 확인할 수 있으며, 중속구간과 고속구간으로 갈수록 SCR 차량이 LNT 차량에 비해 더 낮은 NOx 배출량을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10. NOx emissions of average vehicle speed.

3.7. 저감장치 별 CO₂배출량에 따른 NOx 배출특성

Fig. 11은 시험과정 중에 발생하는 CO₂와 NOx 순간 배출량을 그래프이다. 차량 한 대가 실험 진행하는 동안 발생한 양을 1 Hz 단위로 그래프로 표현한 것이다.

NOx 제어가 원활히 되고 있는 것을 확인할 수 있지만, WLTC 모드에서는 중간 영역, RDE 모드에서는 CO₂ 배출이 많은 영역에서 NOx 제어가 원활히 되지 않는 것을 확

인할 수 있다.

SCR 장착 차량의 경우 대부분의 상황에서 NOx 제어가 원활히 되는 것을 확인할 수 있었고, 특히 RDE 시험에서 CO₂ 배출이 많은 영역에서 LNT 장착 차량과 비교하여 NOx 제어가 잘 되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

시험 결과들을 종합적으로 검토하였을 때 알려진 것처럼 암모니아(NH₃)를 환원제로 사용하는 SCR이 LNT보다는 NOx를 저감하기에 더 우수한 특징을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다.¹²⁾

4. 결론

본 연구에서는 시험모드 및 방법에 따른 경유자동차의 배출가스 특성을 측정 및 분석하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

1) 기존 배출가스 시험에 사용되던 NEDC모드가 WLTC 모드로 변경되었다. WLTC가 NEDC 보다는 실제 주행했을 때의 엔진 회전 속도와 엔진 부하를 잘 반영하고 있지만, 실제 도로 시험(RDE)에 반영되는 주행조건과 비교하였을 때는 그 반영 수준에 한계가 있다.

2) 시험방식에 따른 배출가스 변화량은 NOx의 경우 대부분의 차량이 NEDC, WLTC, 실도로시험 순으로 배출량이 증가하는 경향을 보였다. CO는 LNT 차량이 SCR 차량에 비해 실도로시험에서는 배출량이 크게 증가하는 경향을 보였지만 배출허용기준은 충분히 만족하는 수준이었다. CO₂는 시험방식에 따른 영향을 크게 받지 않았다.

3) NEDC 모드에서의 NOx 배출량은 모든 차량이 배출허용기준에 적합하였지만, WLTC, RDE 시험에서는 배출허용기준을 초과하는 경우가 다수 발생되었다. NOx 저감장치 종류에 따라서도 차이를 보였는데, LNT를 사용하는 차량에 비해 SCR을 사용하는 차량이 NOx 배출량 저감에 보다 효과적이었다.

4) 변경된 인증 조건을 만족시키기 위해서는 SCR을 장착하는 것이 유리해 보이나, SCR을 장착하는 차량 중 인증기준을 충족시키기 위해 보완이 필요한 차량들도 존재하였다. 또한 WLTC 모드는 RDE 도로 조건을 대신하기에는 부

Fig. 11. NOx emission by carbom dioxide emission by each reduction device.

축하므로, 경유차의 실효적인 NOx 저감을 위해서는 실도로 배출가스 시험을 도입하는 것이 타당함을 확인할 수 있었다.

KSEE

Acknowledgement

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-RP2018-120).

References

1. National Institute of Environmental Research, "National Air Pollutants Emission 2015," National Institute of Environmental Research (2018).
2. UN ECE Regulation No. 83, "Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regards to the Emission of Pollutants According to Engine Fuel Requirements"
3. You, J. B. and Park, S. S., "Investigation of EGR and LNT control strategies for light-duty diesel engine emissions control," Master thesis, Korea University, Seoul 02841 (2013).
4. Jang, W. W. and Park, S. S., "Evaluation of nitrogen oxides (NOx) emission and its after-treatment system performance characteristics from diesel passenger vehicles on real-world driving with ambient temperature effects," Doctoral thesis, Korea University, seoul 02841 (2013).
5. Joumard, R., Andre, M., Vidon, R., Tassel, P. and Pruvost, C., "Influence of Driving Cycles on Unit Emissions from Passenger Cars," *Atmos. Environ.*, **34**(27), 4621~4628 (2000).
6. Pelkmans, L. and Debal, P., "Comparison of On-road Emissions with Emissions Measured on Chassis Dynamometer Test Cycles," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, **11**(4), 233~241(2006).
7. Andre, M., Joumard, R., Vidon, R., Tassel, P. and Perret, P., "Real-world European Driving Cycles, for Measuring Pollutant Emissions from Highand Low-powered Cars," *Atmos. Environ.*, **40**(31), 5944~5953(2006).
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Annual Traffic Volume Report 2017," Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018).
9. National Institute of Environmental Research, "A Study of Real Driving Emissions-Light Duty Vehicles (RDELDV) Measured with PEMS," NIER-SP2016-073 (2016).
10. Kang, G. W., Lee, J. T., Park, J. H., Cha, J. P. and Chon, M. S., "Development of Korea RDE Routes for On-rode Emissions Measurement of Light Duty Vehicles," *Trans. KSAE*, **25**(3), 287~296(2017).
11. Parks, J., West, B., Swartz, M. and Huff, S., "Characterization of Lean NOx Trap Catalysts with In-Cylinder Regeneration Strategies," SAE 2008-01-0448 (2008).
12. Johnson, T. V., "Diesel Emission Control in Review," SAE 2006-01-0030 (2006).