

배출허용기준 및 주행모드에 따른 중형화물차의 대기오염물질 배출특성

정택호* · 김선문* · 이종철* · 임윤성* · 김인구* · 이종태* · 김형준†

A Study on Exhaust Emission Characteristics of Medium-Duty Trucks according to Emission Standards and Driving Modes

Taek Ho Chung, Sun Moon Kim, Jong Chul Lee, Yun Sung Lim, In Gu Kim,
Jong Tae Lee, and Hyung Jun Kim

Key Words: Medium-Duty Trucks(중형화물차), Driving modes(주행모드), LNT(질소산화물 흡장 촉매장치), DPF(매연저감장치)

Abstract

NOx, PN and CO emissions from diesel trucks make up a significant portion of domestic air pollutant emissions. Therefore, test vehicles with various emission standards and driving modes were selected to evaluate the emission characteristics of regulated pollutants (NOx, PN, CO) in medium-duty trucks. As a result of test, all test vehicles were satisfied with Euro 5 or 6 regulation. NOx emissions of Euro 6 vehicles with after-treatment of LNT + DPF were lower than those of Euro 5 vehicles with DPF. In WLTC mode, all vehicles have high NOx emissions at section of extra high speeds, which are determined by increased fuel consumption and high combustion temperatures. CO and PN emissions from all vehicles were found to be low at section of low speeds. Also, The NO₂/NOx ratio was analyzed at 7-23% in each mode, and the NO₂/NOx ratio increased as the average vehicle speed increased. In NIER 9 mode, the CO, HC, and PN emissions were higher under cold conditions of engine than hot conditions of engine. In addition, vehicles with after-treatment system of LNT have similar NOx emissions level in this study.

1. 서 론

최근 경유 자동차로부터 배출되는 입자상물질과 질소산화물은 대도시의 미세먼지 증가와 인체 건강에 피해를 주는 등 국내 대기오염에 영향을 미치고 있다⁽¹⁾. 2016년 국가 대기오염물질 배출량에 따르면 경유 화물차의 질소산화물(NOx)와 입자상 물질(PM-10, PM-2.5), 일산화탄소(CO) 배출량은 도로이동오염원 중 52.9%,

68.9%, 20.3% 로 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다⁽²⁾. 이에 환경부는 자동차 배출가스로 인한 대기오염 피해를 줄이고자 '제작차 배출허용기준'을 지속적으로 강화하고 있다. 특히 경유자동차의 경우, 2017년 9월 기존 인증시험 모드인 NEDC(New European Driving Cycle)에서 실제 도로 주행 특성이 반영된 신규 인증모드인 WLTC(Worldwide harmonized Light-duty vehicle Test Cycle)를 도입하여⁽³⁾ 실내 인증시험과 실제 도로 주행 시 발생하는 배출가스의 편차를 줄이는 등 제도적으로 보완하고 있다. 배출허용기준이 강화됨에 따라 자동차 제작사들은 질소산화물(NOx) 저감을 위한 배기가스 재순환 장치(EGR, Exhaust Gas Recirculation)⁽⁴⁾, 흡장촉매장치(LNT, Lean NOx Trap)⁽⁵⁾, 선택적 촉매 환원장치(SCR, Selective Catalytic Reduction)와 입자상물질(PM,

(Received: 24 Feb 2020, Received in revised form: 6 Mar 2020, Accepted: 7 Mar 2020)

*국립환경과학원 교통환경연구소

†책임저자, 회원, 국립환경과학원 교통환경연구소

E-mail : junandjin@korea.kr

TEL : (032)560-7637 FAX : (032)561-7013

PN)을 저감하기 위한 매연저감장치(DPF, Diesel particulate filter)⁽⁶⁾을 장착하여 규제기준을 만족시키고 있다.

최근 국내에서 경유 승용차를 대상으로 실제 도로주행(RDE, Real Driving Emission)을 포함한 주행모드(NEDC, WLTC)에 따른 배출가스 평가⁽⁷⁾와 WLTC 시험모드에서 후처리장치 시스템(LNT+DPF, SCR+DPF)에 따른 규제오염물질(NOx, PN 등)의 배출특성⁽⁸⁾에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. 하지만 도로이동 오염원로부터 배출되는 규제물질 중 큰 비중을 차지하는 중·소형 화물차에 대한 연구는 상대적으로 부족하다. 따라서 본 연구에서는 배출허용기준 및 주행모드에 따른 중형화물차의 규제오염물질(NOx, PN, CO)의 배출특성을 파악하기 위해 DPF만 장착된 Euro 5 규제기준의 2대와 LNT+DPF가 장착된 Euro 6 규제기준의 2대를 선정하여 기존 경유차 인증모드인 NEDC와 신규로 도입된 WLTC 모드 그리고 국내 실정을 반영한 NIER 모드를 사용하여 평가하였다. 또한 평균 차속에 따른 중형화물차의 배출특성을 알아보기 위해 WLTC 모드를 저속, 중속, 고속, 초고속구간으로 나누어 규제오염물질 및 NO₂/NOx 비율의 배출특성을 비교 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 시험차량

본 연구에서는 배출허용규제기준 Euro 5와 Euro 6에 해당하는 중형화물차를 대상으로 점유율⁽⁹⁾이 높은 차량을 각각 2대 선정하였으며, 시험차량의 제원을 Table 1에 나타내었다. Euro 5 시험차량의 저감장치는 매연저감장치(Diesel Particulate Filter; DPF)만 장착되었으나, 배출허용규제기준이 강화됨에 따라 Euro 6 차량에는 질소산화물 흡장 촉매장치(Lean NOx Trap, LNT)가 추가

로 적용됨을 확인할 수 있었다.

2.2 주행모드

주행모드는 국립환경과학원에서 국내 운행조건을 반

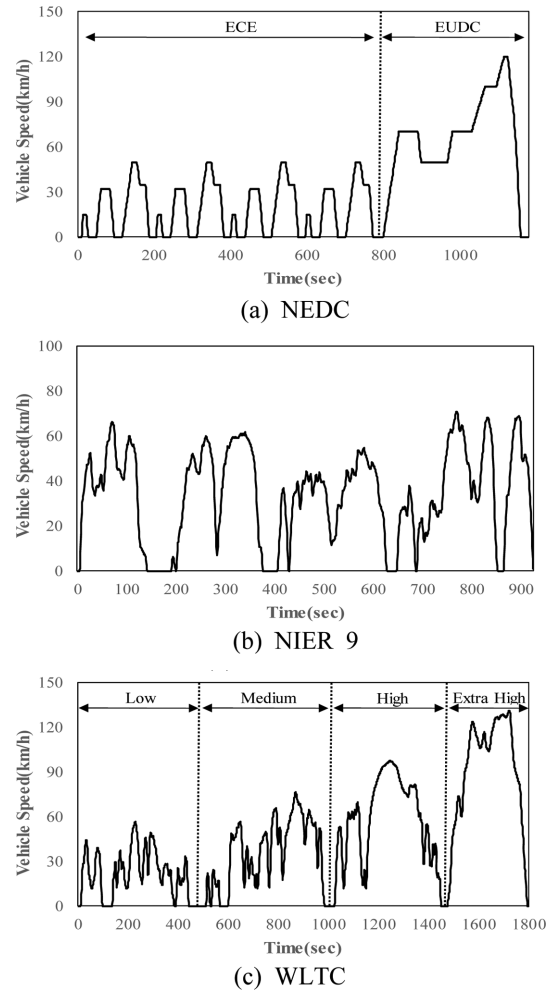


Fig. 1 Driving pattern of test modes

Table 1 Specification of test vehicles

	A	B	C	D
Emission Standard	Euro 5	Euro 5	Euro 6b	Euro 6b
Displacement (cc)	2,497	2,497	2,497	2,497
After treatment	DPF	DPF	LNT+DPF	LNT+DPF
Max Power (ps/rpm)	133/3800	133/3800	133/3800	133/3800
GVW (kg)	2,915	2,985	2,975	2,895
Test-cycle for certified	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC

Table 2 Specification of driving cycle

	Average speed (km/h)	Maximum speed (km/h)	Driving time (sec)	Driving distance (km)
NEDC	33.4	120.0	1180	10.9
NIER 9	34.1	70.9	926	8.8
WLTC	46.4	131.3	1800	23.3

영하여 개발한 국내 도로 주행패턴인 NIER 9 모드와 기존 경유자동차 배출가스 인증시험모드인 NEDC 및 신규로 도입된 경유자동차 배출가스 인증시험모드인 WLTC를 사용하였다. 시험차량의 적재 중량은 최대 적재량 50%를 반영하여 무게를 탑재하였다. Fig. 1와 Table 2에 각각의 시험모드 제원을 나타내었다.

2.3 배출가스 측정장비

Figure 2과 같이 배출가스 측정은 자동차의 실제 주행(가속, 감속, 정속) 상황을 모사할 수 차대동력계(Zollner, AVL) 롤러 위에서 시험차량이 다양한 모드를 주행할 때 배출되는 오염물질의 일부를 희석터널에서 정용량 시료채취장비(CVS-7300T, Horiba)를 이용하여 시료 채취백에 포집하였으며, 배출가스 분석기(MEXA-7200H, Horiba)로 배출된 각 성분의 농도를 분석하였다. 또한 NOx의 구성성분을 분석하기 위해 NO, NO₂, N₂O, NH₃로 실시간 측정이 가능한 NOx 분석기(MEXA-1400QL-NX, Horiba)를 사용하였다. Table 3, 4에 배출가스 분석기 및 NOx 분석기의 상세 제원을 나타내었다.

Table 3 Specifications of exhaust gas analyzer

Compounds	Principle	Measuring Conc. range
CO	NDIR	50, 100, 1000, 3000 ppm
CO ₂	NDIR	1, 2, 3, 6%
HC	HFID	20, 50, 100, 1000 ppmC
NOx	CLD	20, 50, 100, 1000 ppm

Table 4 Specification of NOx Analyzer

Item	Specification
Components	NO, NO ₂ , N ₂ O, NH ₃
Principle	Quantum Cascade Laser
Sampling speed	10 Hz
Flow rate	8 L/min ± 1 L/min
Sample line temperature	113 ± 6°C
Response time (t10-90)	NO, NO ₂ , N ₂ O : <2 s NH ₃ : <5 s
Span noise	< 2% full scale (FS)
Zero / span drift	< 1% FS / 8 h

3. 실험결과

3.1 주행모드에 따른 배출특성

배출허용기준 및 주행모드에 따른 중형화물차의 규제 오염물질 배출특성을 비교하기 위하여 경유자동차의 인증모드인 NEDC와 국내 차속 모드인 NIER 9 그리고 신규 경유자동차 인증모드인 WLTC를 선정하였으며, 그

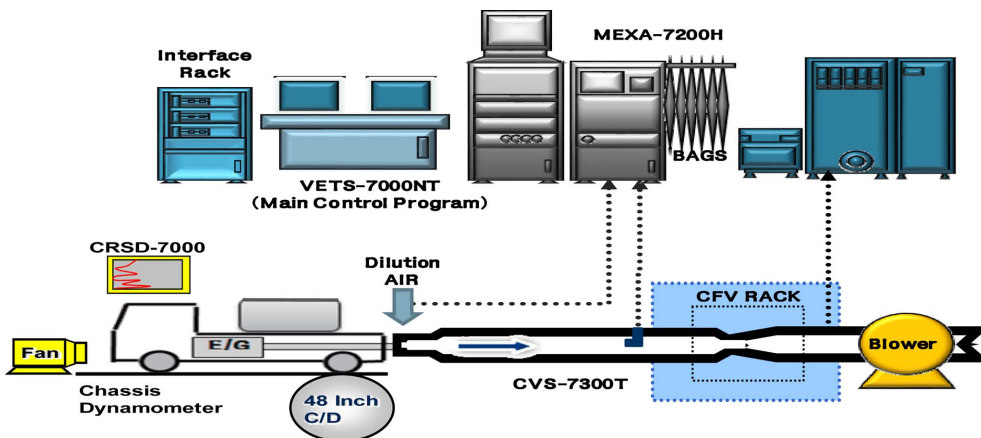


Fig. 2 Exhaust emission test system

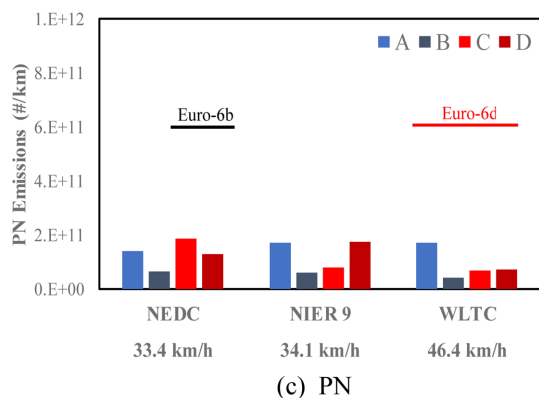
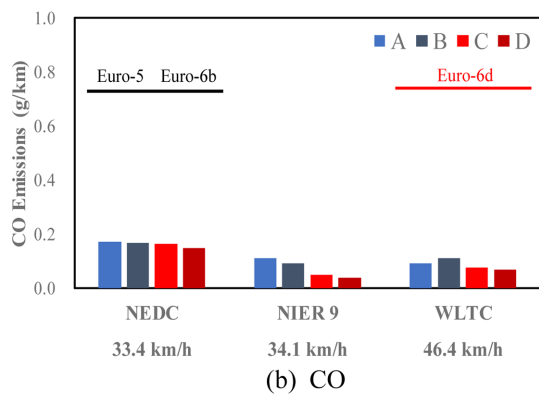
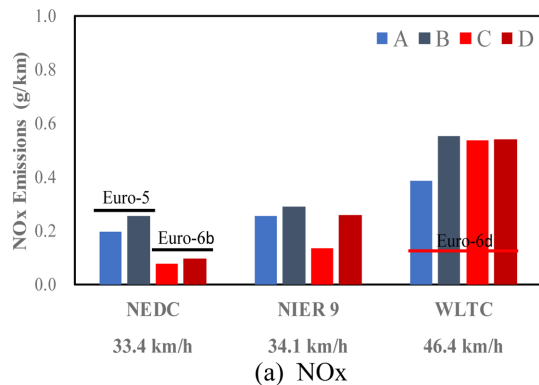


Fig. 3 Emission characteristics of trucks according to various driving cycles and emission regulation standards

결과를 Fig. 3에 나타내었다. 모든 시험차량에서 배출되는 규제오염물질은 각 차량의 배출허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.

NOx 저감장치인 LNT를 장착하여 NOx 규제에 대응하고 있는 Euro 6 차량의 질소산화물(NOx) 배출량은 NEDC 및 NIER 9 모드에서 Euro 5 차량보다 31.4~62.0%

낮은 수준으로 나타났다. 하지만 신규 인증모드인 WLTC 모드에서 NOx 배출량은 높은 수준으로 배출허용기준(0.125 g/km)을 만족하지 못하는 것으로 나타나, 신규 규제기준에 대응하기 위하여 고속구간에서 저감효율이 낮은 LNT 장치보다 고속구간에서 저감효율이 좋은 SCR 장치의 장착이 필요할 것으로 판단된다^(7,8).

일산화탄소(CO) 배출량은 NEDC 모드에서는 큰 차이 없이 비슷한 수준으로 배출되었으나, NEDC 모드에 비해 가감속구간이 많은 NIER 9 및 WLTC 모드에서는 Euro 6 차량이 Euro 5 차량 대비 약 28.3~56.5% 낮은 수준으로 배출되었다.

CO의 경우 엔진의 냉간 시동시 또는 저속구간에서 발생하는 것으로 NEDC 초기 구간에서는 냉간 및 저속 구간이 포함되어 있어 높게 나타나나 NIER 9 모드에서는 연속되는 저속구간이 적고 예열되는 시간이 빨라 CO의 배출량이 감소한 것으로 판단된다.

입자상물질 개수(PN)는 모든 시험조건에서 배출허용기준 대비 낮은 수준으로 배출되었으며, 시험조건 변화에도 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다. 각 차량에 동일한 공극률을 가진 DPF가 적용되어 일정 크기 이상의 입자상물질을 포집하는 정상적인 현상에 의한 것으로 사료된다.

3.2 평균속도에 따른 배출특성

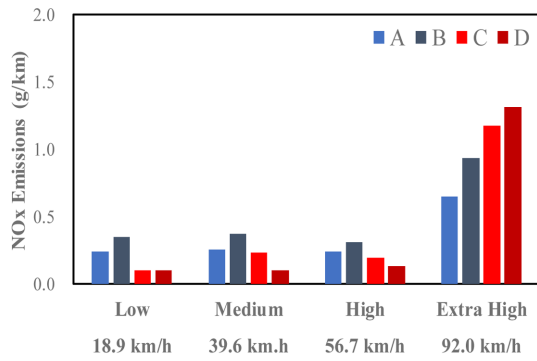
시험차량의 평균속도에 따른 배출특성을 확인하기 위하여 WLTC 모드를 저속, 중속, 고속, 초고속구간으로 나누었으며, Fig. 4에 각 규제오염물질의 배출량을 나타내었다.

모든 시험차량의 NOx 배출량은 평균속도가 높은 초고속구간(Extra High)에서 다량 배출되는 것으로 나타났으며, 이는 연료량 사용 증가와 연소온도의 상승 영향으로 판단된다. 또한 LNT+DPF가 장착된 시험차량 C와 D는 저속~고속구간에서 DPF만 장착된 차량(A, B) 대비 낮은 NOx 배출량으로 LNT 장치의 장착 여부에 따른 NOx 저감효율을 보여주었으나, 초고속구간에서는 한계를 보여 향후 초고속구간에서 저감효율이 좋은 SCR 장치의 장착이 필요할 것으로 사료된다^(7,8).

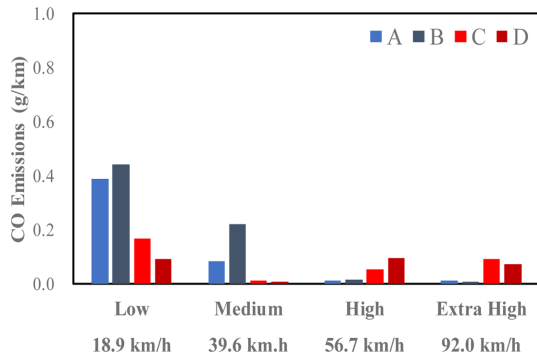
반면 CO의 배출량은 저속구간에서 높게 배출되었는데, 이는 저속구간은 상대적으로 가감속 구간이 많고 주행거리가 적을 뿐만 아니라 시동 초기로 인한 엔진 냉각수 온도와 후처리장치의 활성화가 안정화되지 않기 때문에 불완전연소가 우세한 것으로 판단된다. LNT+DPF가 장착된 차량 C와 D의 CO 배출량은 저속과 중속구

간에서 상대적으로 낮은 수준이었으나, 고속구간으로 진행됨에 따라 높아지는 것을 확인하였다. 일반적으로 LNT가 장착된 차량은 저속과 중속구간에서는 질소산화물을 흡장하며 고속과 초고속구간에서 연료분사 증가되면서 재생도 발생하기 때문으로 판단된다⁽⁵⁾.

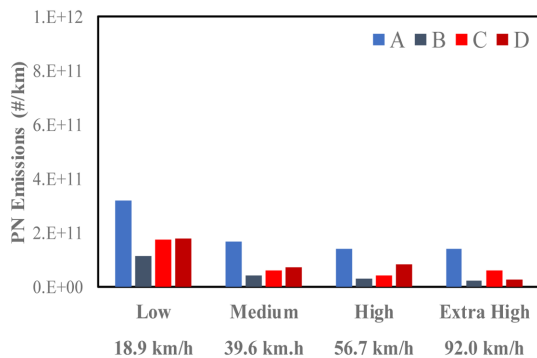
PN 배출량도 저속구간에서 배출량이 가장 높게 나타났으며, 대체로 평균차속이 높아짐에 따라 낮게 배출되



(a) NOx



(b) CO



(c) PN

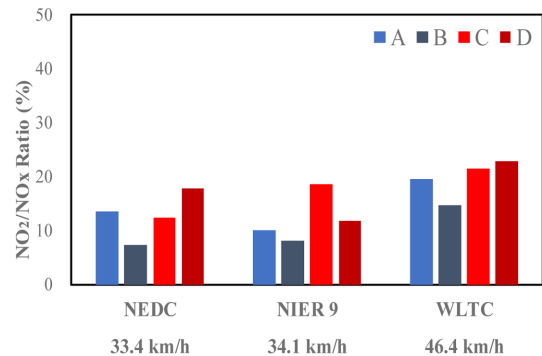
Fig. 4 Emission characteristics of trucks for each section in WLTC mode

는 경향을 보였다. 이는 고속구간 대비 완전연소가 불리한 저속구간에서 생성되는 입자상물질의 크기와 수가 상대적으로 많은 이유인 것으로 판단되며, 또한 시험차량의 시동초기에는 DPF의 극미세입자의 저감 성능이 안정화 되지 않은 상태로 판단된다⁽¹⁰⁾.

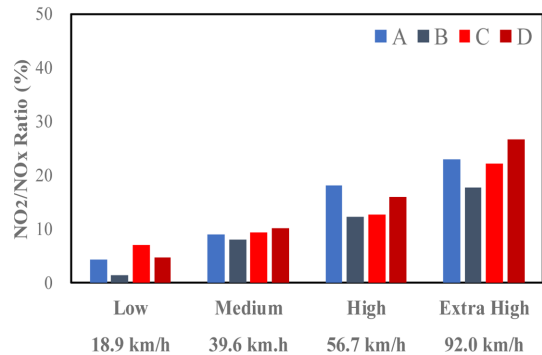
3.3 NO₂/NO_x 비율

NO_x의 배출량은 제작차 배출허용기준이 강화됨에 따라 감소하고 있으나, NO₂는 국내 주요 도시에서 비슷한 수준으로 나타나고 있다. 또한 NO₂는 인체 건강과 대기환경에 피해를 주는 물질이며, 차량의 후처리장치 및 속도변화 등에 따라 배출특성이 변하는 것으로 알려져 있다^(11,12). 이에 배출허용기준, 후처리장치 등에 따른 NO₂/NO_x 비율의 배출특성을 분석하였으며 해당 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

각 시험모드에서 NO_x 분석기로 측정된 시험차량의 NO₂/NO_x 비율은 약 7~23%로 유사한 것으로 분석되었다. Euro 6 차량의 NO₂/NO_x 비율은 Euro 5 차량에 비해 높게 분석되었는데, 이는 NO_x를 촉매 내에 흡장 시



(a) NO₂/NO_x ratio under each driving cycles



(b) NO₂/NO_x ratio under WLTC mode

Fig. 5 NO₂/NO_x ratio of trucks under each driving cycles

킨 후 환원시켜 배출시키는 LNT 장치의 영향을 받은 것으로 판단된다⁽⁵⁾.

평균차속에 따른 NO₂/NO_x 비율을 확인하기 위하여 WLTC 모드를 차속 구간별로 분석한 결과, 저속구간에서 초고속구간으로 진행될수록 NO₂/NO_x의 비율이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 NO₂가 약 350°C의 배

가스 온도에서 DOC 또는 DPF 장치의 촉매와 반응하여 생성되기 때문에 NO₂/NO_x의 비율이 높게 나타난 것으로 판단된다⁽¹¹⁾.

3.4 시험조건에 따른 배출특성

Figure 6은 국내 실정을 반영한 중형화물차의 배출가스 특성을 비교하기 위해 평균 차속과 가감속 등 실제 주행 상태를 반영하여 개발된 NIER 9 모드에서 냉간시동과 열간시동에 따른 규제오염물질의 배출량을 비교하였다. Euro 5 차량의 NO_x 배출량은 냉간시동 대비 열간시동에서 약 1.2배 높게 배출되었으나, LNT 장치가 장착된 Euro 6 차량은 약 0.9~1.0배로 시동조건에 차이에 큰 차이를 보이지 않았다. 일반적으로 열간시동에서 연소온도의 상승으로 NO_x 배출량이 증가하나, Euro 6 차량의 LNT 장치 저감효과로 비슷한 수준으로 배출됨 알 수 있었다. CO와 HC의 배출량은 냉간시동 대비 열간시동에서 46.8~80.2%, 15.9~57.5% 낮게 배출되었으며, 냉간시동에서 엔진과 냉각수 온도가 낮기 때문에 경유산화촉매 장치의 활성화되지 않아 높게 배출된 것으로 판단된다⁽¹²⁾. 또한 Euro 6 차량은 Euro 5 차량에 비해 낮은 수준으로 배출되는 것을 확인하였다. 배출허용기준에 따라 저감장치 성능 등에 영향으로 판단된다.

PN의 배출량은 열간시동 대비 냉간시동에서 1.1~2.0배 높게 배출되었으며, 이는 엔진이 가열됨에 따라 불완전연소물질인 입자상물질 배출이 적어진 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 배출허용기준과 주행모드에 따른 중형화물차의 규제오염물질 배출특성을 분석하였다.

(1) 모든 시험차량은 배출허용기준을 만족하고 있으며, 기존 인증모드인 NEDC와 국내 실정을 반영한 NIER 9 모드에서 NO_x 배출량은 LNT+DPF가 장착된 C, D 차량이 DPF만 장착된 A, B 차량보다 31.4~62.0% 낮은 수준으로 나타났다.

(2) 모든 차량의 NO_x 배출량은 구간별로 나눈 WLTC 모드 중 초고속구간에서 가장 높았으며, 이는 연료량 사용증가와 연소온도의 상승 영향으로 판단된다. CO와 PN 배출량은 저속구간에서 높게 배출되는 것으로 나타났다.

(3) NO₂/NO_x 비율은 각 모드에서 7~23%로 분석되었으며, 배출허용기준 Euro 6 차량에서 높은 것을 확인하

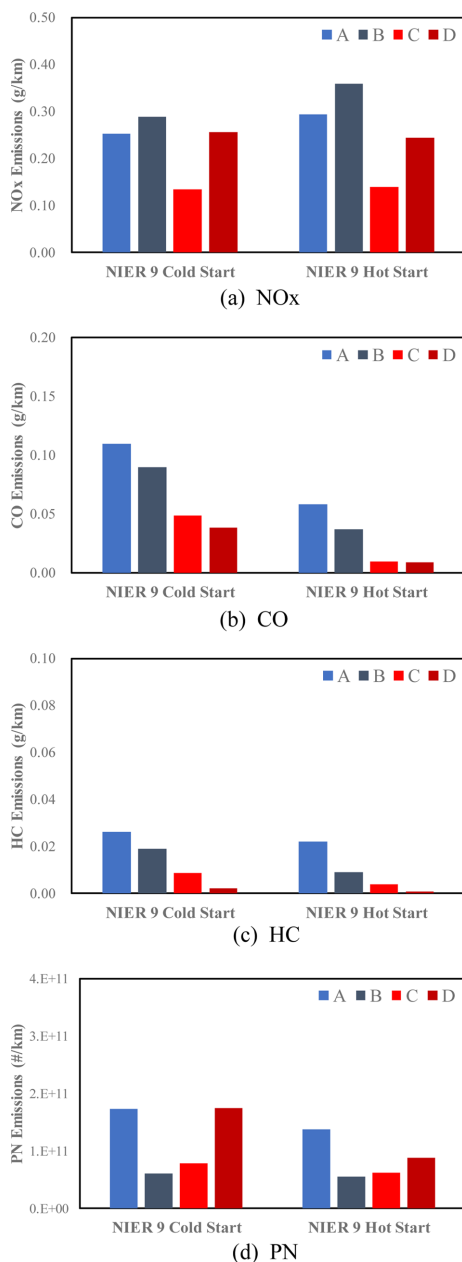


Fig. 6 Emission characteristics according to engine cold and hot start condition under NIER 9 mode

였다. 또한 WLTC 모드에서 평균차속이 증가함에 따라 NO₂/NO_x 비율이 증가하는 것으로 나타났다.

(4) 냉간시동 대비 열간시동에서 CO와 HC, PN의 배출량은 46.8~80.2%, 15.9~57.5%, 8.8~49.8% 낮게 배출되었으며, 이는 엔진 및 냉각수 온도가 낮고 후처리장치의 비활성화 때문으로 판단된다. LNT 장치가 장착된 Euro 6 차량의 NO_x 배출량은 0.9~1.0배로 비슷한 수준으로 나타났다.

후 기

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-RP2018-121).

참고문헌

- (1) T. W. Lee, J. Y. Kim, J. H. Park, S. Z. Jeon, J. T. Lee and J. S. Kim, "Influence of Driving Routes and Seasonal Conditions to Real-driving NO_x Emissions from Light Diesel Vehicles", Transactions of KSAE, Vol. 22, No. 1, 2014, pp. 148~156.
- (2) National Institute of Environmental Research, "National Air Pollutants Emission 2016", 2019.
- (3) M. Tutuianu, A. Marotta, H. Steven, E. Ericsson, T. Hanju, N. Ichikawa and H. Ishii, "Development of a Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC)", UN/ECE/WP.29/GRPE/WLTP-IG, 2013.
- (4) D. T. Hountalas, G. C. Mavropoulos and K. B. Binder, "Effect of exhaust gas recirculation (EGR) temperature for various EGR rates on heavy duty DI diesel engine performance and emissions", Energy, Vol. 33, 2008, pp. 272~283.
- (5) C. L. Myung, W. W. Jang, S. I. Kwon, J. Y. Ko, D. Y. Jin and S. S. Park, "Evaluation of the real-time de-NO_x performance characteristics of a LNT-equipped Euro-6 diesel passenger car with various vehicle emissions certification cycles", Energy, Vol. 132, 2017, pp. 356~369.
- (6) Y. Jiang, J. Yang, D. Cocker III, G. Karavalakis, K. C. Johnson and T. D. Durbin, "Characterizing emission rates of regulated pollutants from model year 2012 + heavy-duty diesel vehicles equipped with DPF and SCR systems", Science of The Total Environment, Vol. 619-620, 2018, pp. 765~771.
- (7) J. C. Lee, J. H. Park, J. W. Kim, G. W. Kang, S. T. Oh, S. H. Lee, T. H. Chung and J. T. Lee, "An Investigation on the Emission Characteristics of Diesel Vehicle with EURO-6 Standard According to Test Mode Including Real-road Driving", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 41, No. 4, 2019, pp. 235~244.
- (8) D. I. Lee, S. C. Ko, Y. S. Yu, J. H. Park, J. P. Cha and M. S. Chon, "Characteristics of NO_x and PN According to After-treatment for Light-duty Diesel Vehicles in WLTC Test Mode", Journal of ILASS-Korea, Vol. 23, No. 4, 2018, pp. 234~243.
- (9) KAMA (Korea Automobile Manufacturers Association), "2016 Automotive registration statistics report", 2017.
- (10) J. H. Park, J. T. Lee, J. S. Kim, S. M. Kim and K. H. Ahn, "Measuring Particle Number from Light-duty Diesel Vehicles in WLTP Driving Cycle", Journal of ILASS-Korea, Vol. 18, No. 3, 2013, pp. 155~160.
- (11) C. He, J. Li, Z. Ma, J. Tan and L. Zhao, "High NO₂/NO_x emissions downstream of the catalytic diesel particulate filter: An influencing factor study", Journal of Environmental Science, Vol. 35, 2015, pp. 55~61.
- (12) V. N. Matthaïos, L. J. Kramer, R. Sommariva, F. D. Pope and W. J. Bloss, "Investigation of vehicle cold start primary NO₂ emissions inferred from ambient monitoring data in the UK and their implications for urban air quality", Atmospheric Environment, Vol. 199, 2019, pp. 402~414.