

국내 EGR과 SCR 장착 중형트럭 대기오염물질 배출 특성

손지환* · 김정화* · 정성운* · 유흥민* · 홍희경* · 문선희* · 최광호** · 이종태† · 김정수*

Characteristics of Air Pollutants Emission from Medium-duty Trucks Equipped EGR and SCR in Korea

Jihwan Son, Jounghwa Kim, Sungwoon Jung, Heungmin Yoo, Heekyung Hong,
Sunhee Mun, Kwangho Choi, Jongtae Lee and Jeongsoo Kim

Key Words: Medium-duty truck(중형트럭), EGR(배기가스재순환장치), SCR(선택적촉매환원), Air pollutants emission (대기오염물질배출)

Abstract

NOx and PM are important air pollutants as vehicle management policy aspect. Medium-duty truck is the main source of the pollutants although the vehicle market share is only 3.5%. National emission portion of NOx and PM from the mobile source are 14% and 16% respectively. In this study it was investigated that characteristics of air pollutants emission on medium duty truck equipped with EGR and SCR system. Vehicle's test reflected driving cycle on the chassis dynamometer, and applied test cycle was WHVC(World Harmonized Vehicle Cycle) mode. The test cycle include three segments, represent urban, rural and motorway driving. Based on the test results NOx, PM, HC were less emitted from SCR vehicle than EGR vehicle. And CO was less emitted from EGR vehicle than SCR vehicle due to CO oxidation reaction on DPF surface. And most air pollutants reduced as average vehicle speed increased. Pollutants were less emitted on motorway section than urban and rural sections. But highly NOx emission on motorway section was verified according to increased EGR ratio on fast vehicle speed. HC and CO additional emission was identified as 68%, 58% respectively during SCR vehicle's cold engine start emission test. NOx additional emission was detected by 24% on SCR vehicle's condition of engine cold start while not detected on vehicle equipped with EGR. SCR vehicle's additional NOx emission was derived from low reaction temperature during engine cold start condition. medium-duty truck emission characteristics were investigated in this study and expected to used to improve air pollutants management policy of medium-duty truck equipped with SCR & EGR.

1. 서 론

국립환경과학원에서 조사한 국가대기오염물질 2012

년도 배출량 자료에 따르면, 도로이동오염원은 NOx와 PM₁₀이 전체 배출량의 약 32%와 11%를 차지하였다⁽¹⁾. 이중 차량 총중량이 3.5톤에서 10톤인 중형트럭은 차량 대수 점유율은 3.5%에 불과하나 도로이동오염원 NOx와 PM 배출량의 14%, 16%를 배출하여 그 기여도가 높기 때문에 배출량 측면에서 중요한 차종이라고 할 수 있다. 오염물질 배출을 저감하기 위하여 환경부에서는 2006년도와 2009년도에 각각 유로-4기준과 유로-5기준을 도입하여 국내 중형트럭의 배출허용기준을 강화하였다. 그리고 2014년부터 유로-6기준을 도입하여 NOx와

(Received: 9 June 2016, Received in revised form: 8 Aug 2016, Accepted: 12 Aug 2016)

*국립환경과학원 교통환경연구소

**남서울대학교 교양과정부

†책임저자, 회원, 국립환경과학원 교통환경연구소

E-mail : leelee@korea.kr

TEL : (032)560-7624 FAX : (032)560-7980

PM의 배출허용 기준을 유로-5 기준대비 각각 80%와 50%를 강화하였다. 강화된 자동차 배출허용기준을 만족하기 위하여 다양한 후처리장치의 적용에 대한 연구가 지속되었다. 주요 오염물질인 NOx를 저감하기 위한 후처리장치로 LNT(Lean NOx Traps), LNC(Lean NOx Catalysts), SCR(Selective Catalytic Reduction) 시스템 등 다양한 기술이 연구되고 있다^(2,3). 이들 저감방식 이전에는 NOx를 저감하기 위하여 배기가스일부를 재연소시키는 방식의 EGR(Exhaust gas Recirculation) 장치가 주로 활용되었다. EGR 시스템은 배기가스 일부를 연소실에 유입하여 산소농도를 감소시키고 연소온도를 낮추어 NOx를 저감하게 된다^(2,4-6). Heo 등(2011) 연구결과에 따르면 EGR율이 증가함에 따라서 CO와 HC 배출량은 증가하고, 50% EGR을 적용에서 NOx의 배출량이 감소하였다⁽⁴⁾.

강화된 NOx 기준을 만족하기 위하여 대형차량을 중심으로 유럽에서 2005년도부터 SCR 후처리 장치를 적용하였고 우리나라에서도 2008년도부터 SCR 시스템이 도입되었다. SCR 시스템은 요소수를 차량 배기관 내에 분사하여 요소수를 암모니아(NH₃)로 변환시키고 촉매층에서 NOx와 의 반응을 통하여 질소산화물을 질소(N₂)로 환원시키는 시스템으로^(2,4-6), 운행차에 적용하여도 NOx를 약 80% 이상 저감하는 것이 가능하다⁽²⁾.

PM은 배기가스 후단에 다공질 필터인 DPF(Diesel Particulate Filter)를 장착하여 입자상물질을 여과하고, 일정량의 PM이 필터 표면에 쌓이게 되면 재생하여 제거한다. 재생방식은 촉매를 이용한 자연재생방식(Passive type)과 강제재생방식(Active type)으로 구분된다⁽³⁾.

본 연구에서는 중형트럭의 후처리장치에 따른 대기오염물질 배출특성을 확인하기 위하여 국내에서 운행중인 중형트럭에서 주로 활용되고 있는 저감장치인 EGR과 SCR이 장착된 차량을 대상으로 운전조건별 오염물질 배출량을 조사하고자 한다.

2. 실험장치와 방법

2.1 실험장치

중형트럭의 주행패턴별 오염물질 배출특성을 조사하기 위하여 대형차대동력계를 활용하였으며 자동차 주행시 배출가스 중 PM, NOx, CO 그리고 HC 배출량을 측정하였다.

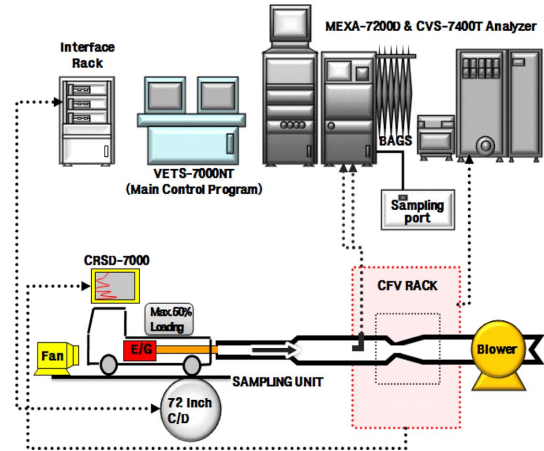


Fig. 1 Schematic diagram for exhaust emission test system

2.1.1 대형차대동력계

자동차가 정지, 가속, 정속, 감속 등을 반복하는 과정을 반영하기 위하여 모사 주행할 수 있도록 자동차에 부하를 주는 대형차대동력계(RPL1220, AVL Zollner)를 사용하였다. 본 실험에 사용된 대형차대동력계의 구성도는 Fig. 1과 같다.

2.1.2 대기오염물질 농도 분석계

자동차 대기오염물질 배출량을 측정하기 위한 오염물질 농도 측정시스템(CVS-7400T, Horiba)은 Fig. 1과 같다. 배기가스 중 오염물질의 농도는 가스분석계(MEXA-7200, Horiba)를 활용하여 분석하였으며, 자동차 배출가스와 희석공기를 혼합한 후 일정 유량을 유지하는 CVS 터널에서 정용량으로 시료를 채취하였다. CO는 비분산 적외선 분석법(Nondispersive Infrared, NDIR), HC는 불꽃이온화검출기(Heated Flame Ionization Detector, HFID), NOx는 화학발광법 (Chemiluminescence Detector, CLD)으로 측정하였으며, 1Hz 단위로 실시간 측정된 값을 기반으로 자동차 주행시 주행 단위거리 당 배출량을 산정하였다.

2.2 실험방법

주행모드는 중대형 트럭의 국제 표준화 모드인 WHVC(Worldwide Harmonized Vehicle Chassis dynamometer test) 모드를 적용하였으며 최대적재량이 4.5톤에서 5톤인 유로-4 중형트럭 2대, 유로-5 중형트럭 2대를 대상으로 조사하였다.

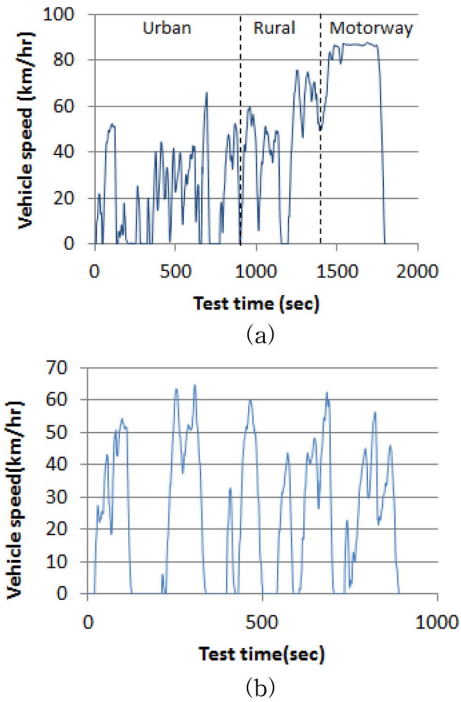


Fig. 2 Vehicle test mode, (a) WHVC, (b) NIER 7

2.2.1 주행모드

본 연구에서는 Fig. 2에 제시한 바와 같이 설정된 WHVC 모드와 NIER-7 모드에 따라서 시험차량을 차대 동력계에서 주행하였다. WHVC 모드는 실도로 운행 특성을 반영하여 도시(Urban), 교외(Rural), 고속도로(Motorway)를 구성하여 만든 모드로 평균차속과 주행거리는 Table 1에 제시한 바와 같다. 주행특성별 오염물질 배출량을 확인하기 위하여 WHVC 모드의 도시, 교외, 고속도로 각 구간별 주행거리 당 오염물질 배출량을 기반으로 배출특성을 비교하였다. 또한 엔진미가열 조건의 추가 오염물질 배출량을 확인하기 위하여 NIER-7 모드의 엔진가열조건과 엔진미가열조건에서 배출량을 비교 측

Table 1 Specifications of each tested driving mode

Test mode	Test time (sec)	Driving distance (km)	Average speed (km/h)
WHVC	1,799	20.0	40.2
Urban	900	5.3	21.3
Rural	481	5.8	43.6
Motorway	419	8.9	76.7
NIER 7	891	5.8	23.5

정하였다.

2.2.2 시험대상 차량

시험대상차량은 Table 2에 제시한바와 같이 최대적재량이 4.5톤에서 5톤인 중형트럭을 대상으로 오염물질 배출특성을 확인하기 위하여 EGR/pDPF 장착차량 2대와 DPF가 장착되지 않은 SCR 장착차량 2대를 선정하였다. 후처리장치에 따른 배출특성을 확인하기 위하여 EGR/pDPF 장착차량 2대와 SCR 장착차량 2대의 평균 배출량을 각각 산출하여 배출특성을 비교하였다.

3. 연구 결과

3.1 WHVC 주행모드 오염물질 배출 특성

Figure 3에 제시한 바와 같이 WHVC 주행모드에서 중형트럭 오염물질 배출량을 조사한 결과, 경유차량의 전형적인 특징인 NOx와 PM 배출량이 다소 높은 것으로 확인되었다.

또한 도심, 교외, 고속도로 구간을 포함하는 WHVC 주행모드에서 SCR 장치가 장착된 차량이 EGR 장착차량 대비 NOx 배출량이 다소 낮은 것으로 확인되었다. 이는 NOx 저감효율이 SCR 후처리장치가 EGR 후처리

Table 2 test vehicles

Model	Manufacturer	Max. loading capacity	After treatment device	Emission regulation
Megatruck	Hyundai	4.5 ton	EGR/pDPF	EURO-4
Cargotruck	TATA DAEWOO	5.0 ton	SCR	EURO-4
Megatruck	Hyundai	5.0 ton	EGR/pDPF	EURO-5
Cargotruck	TATA DAEWOO	4.5 ton	SCR	EURO-5

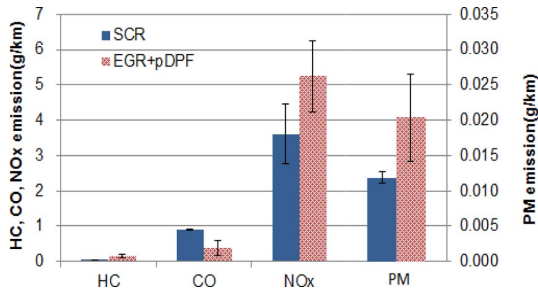


Fig. 3 Air pollutants emission on WHVC mode

장치 보다 높은 영향에 따른 결과로 사료된다. PM 배출량은 EGR 차량이 다소 높은 것으로 확인되었고, 연소조건이 EGR 차량 보다 SCR차량이 완전연소에 가까워 엔진 후단에서 발생하는 PM이 SCR 차량에서 상대적으로 낮았기 때문에 사료된다. 또한 EGR 차량의 경우 DPF가 장착되었지만 상대적으로 효율이 높지 않은 partial DPF가 장착되어 PM 배출량이 상대적으로 높았던 것으로 판단된다.

3.2 주행구간에 따른 오염물질 배출 특성

도시, 교외, 고속도로 구간에서의 오염물질 배출특성을 Fig. 4에 제시하였다. 상대적으로 감속과 가속 횟수

가 많은 도시 구간에서 오염물질의 배출량이 높았다. 또한 교외구간과 고속도로 구간에서는 상대적으로 평균속도가 높은 고속도로 구간에서 오염물질 배출량이 낮은 경향을 보였다.

항목별로 HC와 CO 배출량은 도시구간보다 교외구간이 낮았으며, 고속도로 구간에서 가장 낮은 것으로 확인되었다. 저감장치별로 SCR 차량은 EGR 차량대비 HC 배출량이 다소 낮았다. CO 배출량은 EGR차량 대비 SCR 차량이 다소 높았다. 이는 EGR 차량의 경우 EGR 후단의 partial DPF 표면에서 DOC(Diesel Oxidation Catalysts) 후처리 장치와 유사한 산화반응이 일어나 상당부분의 CO가 CO₂로 산화되어 EGR 차량에서 CO가 효율적으로 저감되었기 때문으로 판단된다. 반면 SCR 차량에는 별도의 산화촉매 과정이 없어 CO의 배출량이 다소 높았으며, SCR 주반응 외에 촉매반응에서 HC이 산화되어 CO로 전환된 것도 SCR 차량에서 CO가 높게 배출된 원인 중의 하나로 판단된다.

Zheng 등 (2015) 연구결과에 따르면 300°C이상 온도 조건의 SCR 반응에서 C₃H₆가 CO로 전환되는 것으로 확인되었다⁽⁷⁾.

SCR 장착차량의 경우 고속구간으로 갈수록 NOx의 배출량이 줄어드는 것으로 확인되었다. 반면, EGR 차량은 교외구간 대비 고속도로구간에서 NOx 배출량이 약

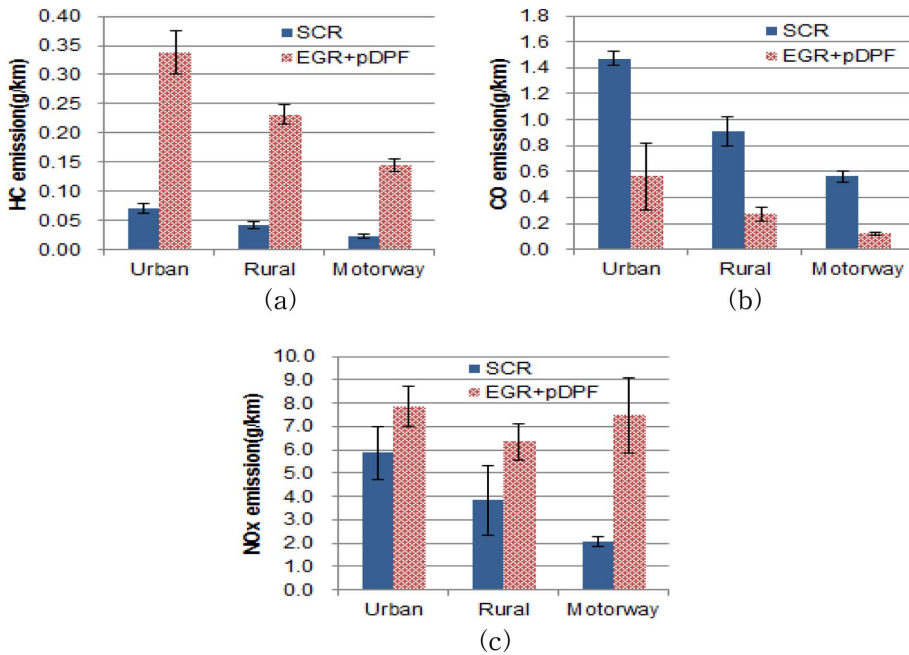


Fig. 4 air pollutants emission according to after treatment device & interval during WHVC mode, (a) THC, (b) CO, (c) NOx

16% 높았다. 이는 고온에서 생성되는 NOx의 특성으로 고속구간에서 공기 중 질소의 산화율이 높아져 NOx가 교외구간 대비 많이 생성된 것으로 판단된다. 유럽의 대기오염물질 배출량 자료에서도 EGR 장착 중형트럭은 평균차속 약 80 km/hr 이상의 고속구간에서 NOx 배출량이 증가하는 경향이 확인되어⁽⁸⁾, EGR 장착 차량은 고속구간에서 NOx의 저감효율이 다소 감소함을 확인하였다.

3.3 엔진미가열 조건 오염물질 배출특성

엔진미가열 조건의 배출특성을 확인하기 위하여 NIER-7 모드 운전조건에서 엔진가열조건과 미가열조건의 오염물질 배출량을 확인하였다.

Table 3 Engine cold/hot start emission ratio

After-treatment device Air pollutants	SCR	EGR+pDPF
HC	1.68	0.95
CO	1.58	2.10
NOx	1.24	0.98
PM	1.74	1.06

Table 3에 제시한 바와 같이 SCR 차량은 4항목 모두에서 엔진미가열시 오염물질 배출량이 증가하는 것으로 확인되었다. 이때 엔진 미가열/가열 조건 오염물질 배출량비는 1.24~1.74로 엔진 미가열에 따라서 항목별로 약 24~74%의 추가 배출이 확인되었다. 또한 불완전 연소의 지표가 되는 HC, CO, PM 항목의 엔진미가열에 따른 추가배출율은 약 58~74%로 유사한 수준을 보여 엔진미가열에 따른 추가배출이 불완전 연소에 기인한 결과로 판단된다.

반면 EGR장착차량은 CO 항목에서만 엔진 미가열에 따라서 엔진가열 조건 대비 약 110%가 추가 배출되었고, 나머지 항목에서는 엔진 미가열 조건에 따른 추가배출이 확인되지는 않았다.

Figure 5에 제시한 바와 같이 SCR차량은 HC, CO, NOx, PM의 항목에서 엔진미가열 조건에서 오염물질 배출량이 늘어나는 것으로 확인되었다. 반면 EGR차량은 엔진미가열에 의한 추가배출이 CO 항목에서만 확인되었다. HC 배출량은 SCR차량에서 엔진미가열 조건에서 다소 증가하나 EGR 차량과 비교하면 약 5배 정도 낮은 것으로 확인되었다. 반면 EGR차량은 엔진미가열 조건에서 CO 배출량은 다소 증가하는 경향을 보였으며 SCR차량 대비 약 3배 낮은 것으로 확인되었다.

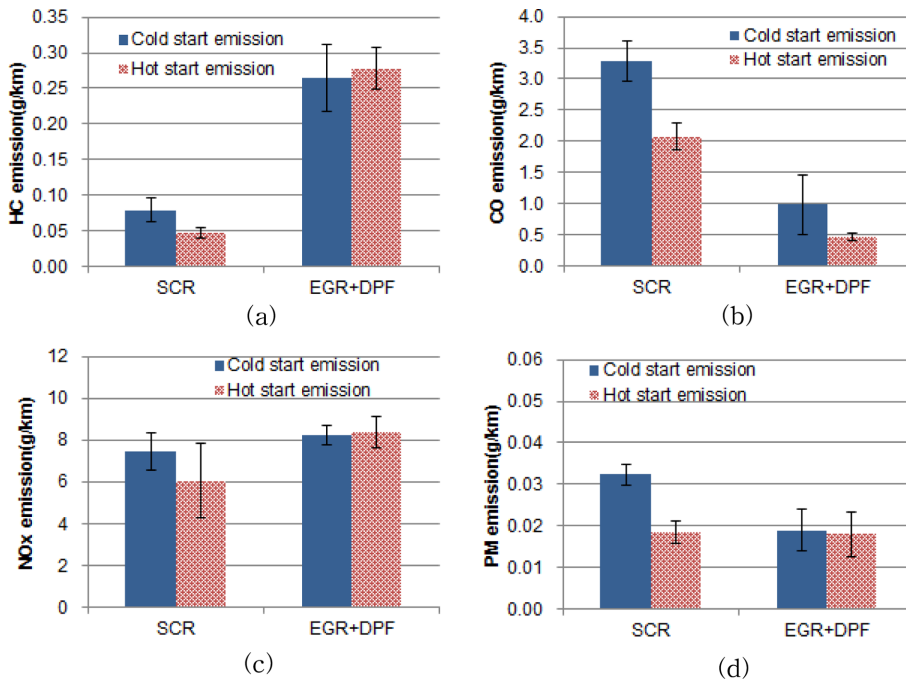


Fig. 5 air pollutants emission according to engine Hot/Cold start during NIER 7 mode, (a) THC, (b) CO, (c) NOx, (d) PM

엔진미가열조건에서 NOx 배출량은 SCR 차량과 EGR 차량간 배출량 차이가 약 10%로 유사한 수준을 보이지만 엔진가열조건에서는 EGR 차량이 약 39% 높게 배출되어 엔진가열조건에서 NOx 저감은 SCR 차량이 효과적인 것으로 확인되었다. 엔진가열조건에서 PM 배출량은 SCR 차량과 EGR 차량이 유사하였으나, 엔진미가열조건에서는 SCR 차량의 배출량이 약 70% 높은 것으로 확인되어 SCR 차량이 엔진미가열에 따른 불완전연소의 영향을 더 많이 받는 것으로 확인되었다.

엔진가열조건과 미가열조건에서의 SCR 차량의 NOx 배출량과 냉각수 온도 측정결과는 Fig. 6과 같다. 엔진가열조건에서 냉각수의 온도는 약 80~90°C 범위였으며, 엔진미가열조건에서는 주행을 시작하고 약 700초 후에 냉각수의 온도가 80°C에 도달하였다. 주행시간에 따른 NOx 배출량의 증감경향은 엔진가열조건과 미가열조건에서 유사하여 가속 등 주행패턴의 영향을 주로 받는 것으로 판단된다. 또한 주행초기 엔진미가열조건에서 NOx 배출량이 다소 높았고, 800초 이후 구간에서는 엔진미가열조건과 엔진가열조건의 NOx 배출량의 수준이 비슷한 경향을 보였다.

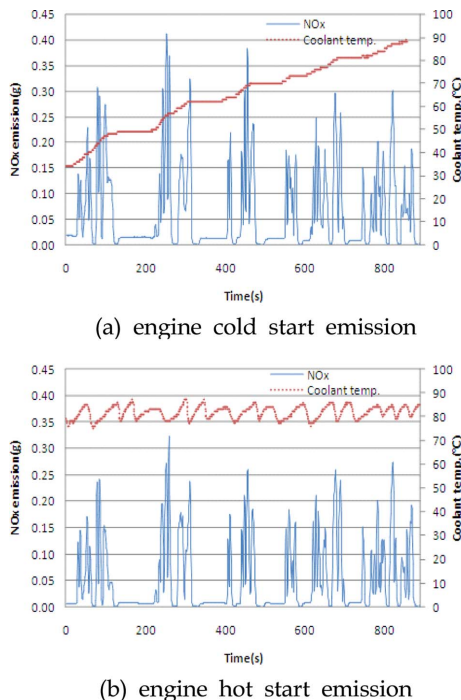


Fig. 6 NOx real-time emission of medium-duty trucks equipped with SCR on NIER-7 mode

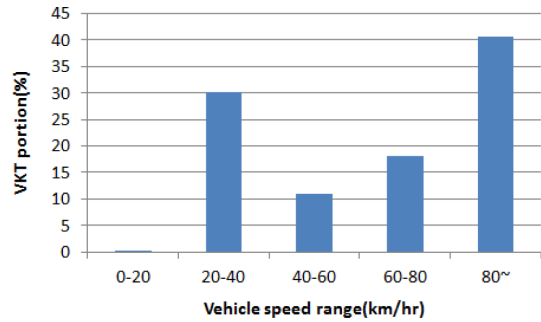


Fig. 7 Medium duty truck VKT portion on vehicle speed range

3.4 국내 중형트럭 차속구간별 주행비율

대기정책지원시스템(CAPSS, '09년 기준)에 활용되고 있는 중형트럭의 VKT를 기반으로 Fig. 7에 국내 중형트럭의 차속구간별 주행비율을 제시하였다. 화물을 이동시키는 목적에 따라 시속 80 km 이상의 고속구간의 주행비율이 약 40%로 가장 높았으며, 다음으로 20~30 km/hr 구간 주행비율이 약 30%로 확인되었다. 고속구간의 비율이 높은 국내 중형트럭의 주행 특성을 고려하였을 때 고속도로 구간에서의 오염물질 관리가 중요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 중형트럭을 대상으로 후처리장치에 따른 오염물질 배출특성을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) WHVC 구간별 오염물질 배출량을 확인한 결과 대부분의 오염물질이 도심>교외>고속도로 구간 순으로 배출되었으나 EGR 차량 NOx 배출량은 교외구간 대비 고속도로 구간에서 약 18% 높은 것으로 확인되어, 고속구간에서 EGR 차량의 NOx 저감효율이 다소 감소되는 것으로 확인되었다.

(2) CO 배출량은 EGR 장착 차량 대비 SCR 장착 차량이 약 4배 높은 것으로 확인되었다. 이는 EGR 차량의 경우 EGR 후단의 partial DPF 표면에서 CO가 CO₂로 산화되어 저감된 반면 SCR 차량의 경우 별도의 산화반응 과정이 없기 때문으로 판단된다.

(3) 엔진미가열 조건에 따라 SCR에서 불완전연소 지표항목인 HC, CO, PM이 58~74% 추가 배출되었으며, SCR NOx 환원반응 온도영향으로 NOx는 엔진미가열에

따라 약 24% 추가 배출되는 것으로 확인되었다. 반면 EGR 차량에서는 엔진기가열에 따라 CO 산화반응을 저하로 배출량이 약 110% 증가하는 것으로 확인되었다.

(4) EGR 차량 대비 SCR 차량이 NO_x 관리측면에서 우수한 것으로 확인되었다. 특히 EGR 차량은 고속구간에서의 NO_x 배출량 증가가 확인되어 고속도로 주행비율이 높은 국내 중형트럭의 주행특성을 고려하였을 때 SCR 차량이 NO_x 배출량을 저감시키는데 효과적인 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 홍지영, 김상균, 김대근, 진형아, 이향경, 설성희, 김보은, “대기오염물질 배출량 2012”, 국립환경과학원, 2014, pp. 20~57.
- (2) H. S. Kim, Y. I. Jeong, M. H. Song, S. W. Lee, H. D. Park and J. W. Hwang, “Influential factors for NO_x reduction performance of Urea-SCR System for an In-use medium duty diesel engine”, Transactions of KSAE, Vol. 17, No. 1, 2009, pp. 154~161.
- (3) N. S. Moon, S. K. Lee and J. K. Lee, “Analysis of an internal flow with multi-perforated tube geometry in an integrated Urea-SCR muffler”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 5, 2013, pp. 500~509.
- (4) J. Y. Heo, J. P. Cha, S. H. Yoon and C. S. Lee, “Effect of EGR rate on combustion and emission characteristics in a single-cylinder direct injection diesel engine with common-rail”, Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 2, 2011, pp. 20~25.
- (5) J. W. Chung, J. H. Kang and H. G. Lee, “A study on the turbocharger operating characteristics of a diesel engine according to EGR loop types”, Transactions of KSAE, Vol. 17, No. 6, 2009, pp. 20~25.
- (6) S. H. Lee, H. S. Kim, J. H. Park and G. B. Cho, “On-road investigation of PM emissions of diesel aftertreatment technologies(DPF, Urea-SCR)”, Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 5, 2011, pp. 92~99.
- (7) Y. Zheng, M. P. Harold and D. Luss, “Effect of CO, H₂, C₃H₆ on Cu-SSZ-13 catalyzed NH₃-SCR”, Catalysis Today, Vol. 264, 2016, pp. 44~54.
- (8) EMEP/EEA, European Environment Agency, Air pollutant emission inventory guidebook, 1.A.3.b., 2013, pp. 151.
- (9) J. M. Lopez, F. Jimenez, F. Aparicio and N. Flores, “On-road emissions from urban buses with SCR+Urea and EGR+DPF systems using diesel and biodiesel”, Transportations Research Part D 14, 2009, pp. 1~5.
- (10) H. G. Roh, D. J. Lee and C. S. Lee, “Effect of injection strategy on the exhaust emission and performance characteristics of a light-duty diesel engine”, Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 3, 2011, pp. 99~105.