



실도로 주행에서 PEMS를 이용한 소형 경유 상용차의 가스 상 유해대기오염물질 배출계수 연구

Emission Factor of Hazardous Air Pollutants in Gas-phase from Light Commercial Vehicle using PEMS on Real-road Driving

임지혜 · 한상우 · 김 정¹⁾ · 장영기¹⁾ · 전문수²⁾ · 황성철³⁾
 김정화⁴⁾ · 정성운⁴⁾ · 김정수⁴⁾ · 한진석*

안양대학교 환경에너지공학과, ¹⁾수원대학교 환경에너지공학과,
²⁾한국교통대학교 에너지시스템공학과, ³⁾그린환경종합센터, ⁴⁾국립환경과학원 교통환경연구소
 (2018년 1월 10일 접수, 2018년 2월 5일 수정, 2018년 2월 6일 채택)

Ji Hye Lim, Sang Woo Han, Jeong Kim¹⁾, Young Kee Jang¹⁾, Mun Soo Chon²⁾,
 Sung Chul Hwang³⁾, Joung Hwa Kim⁴⁾, Sung Woon Jung⁴⁾, Jeong Soo Kim⁴⁾ and Jin Seok Han*

Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University

¹⁾*Department of Environmental and Energy Engineering, Suwon University*

²⁾*Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation*

³⁾*Green Environmental Complex Center*

⁴⁾*Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research*

(Received 10 January 2018, revised 5 February 2018, accepted 6 February 2018)

Abstract

In this study, the HAPs (Harzard Air Pollutants) emission factor level of Starex and Grand Carnival was tested using PEMS (Portable Emissions Measurement System) on real road driving. As a result of RDE (Real Driving Emission test), the overall vehicle speed pattern showed similar characteristics. The real-road driving test at constant speed revealed emission factor is inversely proportional relationship to constant speed. Results of accelerating with speed limit on the real-road were shown as followings; Urban (<45 km/h) > Rural (<45 km/h, less than 80 km/h) > Motorway (>80 km/h). Moreover, the sudden acceleration and deceleration in driving at high speed was the increasing factor to the HAPs emission factor. This tendency is considered to be influenced by the operating environment on real roads.

Key words : PEMS, HAPs, VOCs, Carbonyl, Emission factor

1. 서 론

대기오염물질로 인한 환경문제는 현재 중요한 사회적 이슈로 부각되어지고 있다. 이 중 자동차 배기가스

*Corresponding author.
 Tel : +82-(0)31-463-1292, E-mail : nierhan@anyang.ac.kr

로 인한 대기오염의 심각성은 날로 증가하고 있으나 (Oak *et al.*, 2015), 인위적으로 차량의 수를 줄이기는 쉽지 않은 실정이다. 자동차 배기가스의 피해를 줄이기 위해 저공해 기술이 적용된 경유자동차를 지속적으로 보급함에도 불구하고 서울 도심지역에서 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants, HAPs) 배출은 점점 증가 추세를 보인다(Lee *et al.*, 2015; An *et al.*, 2014). 현재 자동차에서 배출되는 유해대기오염물질에 대한 관심은 높아지고 있으며, 이와 관련하여 미국 EPA 국가위해성 평가연구인 NATA(1999)에 의하면 유해대기오염물질(HAP)에 의한 발암성의 경우 수송부문의 발암 위해도가 전체 발암 위해도의 약 29%, 비발암성 경우 수송부문의 비발암 위해도가 전체 비발암 위해도의 약 72%를 차지하는 것으로 보고하고 있다(US EPA, 1999). 또한 미국 캘리포니아 남부 연안 대기관리국(South Coast Air Quality Management District, SCAQMD)에서 1987년부터 종합적인 유해대기오염물질 노출(Multiple Air Toxics Exposure Study, MATES)에 대한 연구를 수행하고 있으며, 최근 조사된 MATES IV(2015) 연구에서 디젤 PM의 발암 위해 기여도는 가장 높은 약 68%로 평가되었고, 배출원별 위해 기여도는 도로이동오염원이 50.7%, 비도로 이동오염원에서 41.2%를 차지하는 것으로 보고하고 있다(US CARB, 2015). 국내에서도 자동차 배출가스에 대한 중요성을 인지하고, 국립환경과학원의 주관으로 이동식 배출가스 측정 장치 PEMS(Portable Emissions Measurement Systems)와 CVS(Constant Volume Sampler)를 사용하여 배출가스의 특성에 관한 연구가 진행된 바 있다. 자동차 배출가스 특성에 대한 연구는 대부분 NO_x, CO, HC 등에 관한 연구로 진행되었으며, 일부 유해대기오염물질 배출에 대한 연구는 실도로의 특성을 반영하기보다, 차대동력기를 이용한 연구가 진행되었다(Kwon *et al.*, 2015; Oak *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2012).

미국의 경우는 FTP-75(Federal Test Procedure-75) 주행 모드의 한계를 파악하고, 가혹한 운전특성, 에어컨 가동조건을 적용한 US 06, SC 03 모드를 포함하고 있는 SFTP(Supplemental Federal Test Procedure) 시험방법을 도입한 바 있으나(US EPA, 1996), EU에서는 PEMS를 이용한 소형자동차 실도로 배기가스(Real Driving Emission-Light Duty Vehicle, RDE-LDV) 시험

절차를 제도적 보완장치로 적용하기 위해 현재 다양한 연구를 수행하고 있다(Weiss *et al.*, 2013, 2011). PEMS를 이용한 배출가스 측정방법은 실도로 주행조건에서 시험차량의 배출가스 양 이외에도 GPS(Global Positioning System), ECU(Electronic Control Unit), 배기가스 유량과 함께 외기 온도 및 습도 등 많은 양의 데이터를 취득할 수 있다. 따라서 실도로의 다양한 주행조건과 환경조건을 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Kwon *et al.*, 2015). 현재 국내의 경우 EU와 동일한 판단에 PEMS를 이용한 디젤 차량의 실도로 주행 배출가스 특성에 관한 연구가 진행되고 있으며, 데이터 분석방법으로 이동평균구간(Moving Averaging Window, MAW) 방법과 가중평균 배출량 방법 등을 이용한 배출가스 데이터 분석결과가 보고 된 바 있다(NIER, 2014; Park *et al.*, 2013). 또한 디젤 화물차에 대하여 실도로 주행에 따른 HAPs 배출 특성 및 배출량 산정을 위해서 기존에 기준성 배기가스 물질 측정에 이용된 PEMS를 이용하여 실도로에서 주행평가가 진행되었다(Kim *et al.*, 2016). 실도로의 주행조건에서 자동차에 의한 유해대기오염물질의 배출특성을 파악하기 위해서 PEMS를 이용한 실도로 배출조사가 더욱 필요한 상황이다.

앞서 언급한 바와 같이 국내의 HAPs 배출량은 점점 증가하고 있는 추세이다. 이와 같은 현상이 나타나는 주요 원인을 교통량의 증가 및 경유 상용차량의 비율의 확대로 보고 있다(NIER, 2013). 따라서 본 연구에서는 소형 디젤 상용차량을 대상으로 기존 차대동력계와 PEMS 장비를 이용하여 실험한 결과로 특성을 비교하였고, PEMS 장치를 장착하여 실도로에서 다양한 주행조건에 따른 가스 상 유해대기오염물질(HAPs)의 배출계수를 산정하여 파악하였다.

2. 연구 방법

2.1 시험 대상 차량

본 연구에서는 가스상 및 입자상 배기가스 내의 HAPs를 측정하기 위해서 배기가스 후처리장치(Diesel Particulate Filter, DPF)가 장착되지 않은 Euro-4의 배출허용기준이 적용되는 그랜드카니발과 스타렉스의 디젤 차량을 선택하였다. 대상 차량에 대한 무게 및 제조일자, 주행거리, 차종 등의 제원을 표 1에 나타냈다.

2.2 이동식 배출가스 측정장치(PEMS)

그림 1과 2는 각각 본 연구에서 사용한 이동식 배출가스 측정장치인 PEMS (Sensors, Model-EcoStar) 구성에 대한 개략도와 시험 차량에 설치된 PEMS 사진을 나타낸 것이다. PEMS는 배기가스 분석기(FEM: CO, CO₂, O₂ 측정; FID: THC, 메탄 측정, NO_x: NO, NO₂ 측정), 배기가스 유량계, 배기가스 샘플링 장치, 측정용 가스, 전원 공급 장치, 제어 및 데이터 분석 장치 등으로 구성된다. 실시간(1 Hz)으로 측정된 배기가스 농도 자료는 유량계의 유량 자료와 동기화되어 g/s 단위로 저장되며, GPS 또는 ECU 데이터를 통해 측정된 차속 데이터를 이용하여 g/km 단위의 배출가스 자료로 환산된다(Oak *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2013).

2.3 측정 장비(PEMS)의 신뢰성 확보

차대동력계의 CVS (Constant Volume Sampler, CVS) 측정 방법과 PEMS (Portable Emissions Measurement Systems) 장비를 이용하여 동시에 시료를 채취하였을 시 배출계수의 경향을 평가한 결과로 PEMS에서 측정되는 데이터의 신뢰성을 확보하고자 하였다. PEMS 신뢰성 확보를 위한 상관성 시험은 차대동력계에 그랜드카니발과 스타렉스를 탑재 후 대상 차량 내에 PEMS 장치를 설치하여 동시에 진행하였다. 다양한 시험 모드를 사용하여 신뢰성을 확보하였다. CVS는 희석터널에서 청정공기에 의해 배기가스의 흡인량이 조절되어진 상태에서 시료가 유입되며, PEMS의 경우 희석 없이 원 배기가스가 PEMS 내로 유입된다. 실도로에서의 정확한 데이터 측정을 위하여 실도로 조건 사전 주행평가(RDE)를 진행하였다.

Table 1. Specification characteristics of diesel vehicles.

Vehicle name	Starex	Grand carnival
Weight (ton)	3.01	2.84
Production date (year)	2010	2011
Driving distance (km)	184,432	178,453
Vehicle type	2.5 VAN	2.2 RV
Emission level	Euro-4	Euro-4

2.4 주행모드별 실도로에서의 PEMS의 측정방법

차량 시험주행 모드로서 유럽에서 사용하는 연비측정 방식으로 ECE15(시가지 주행)과 EUDC(고속주행)로 구성된 NEDC 모드와 2017년 도입될 예정인 저속

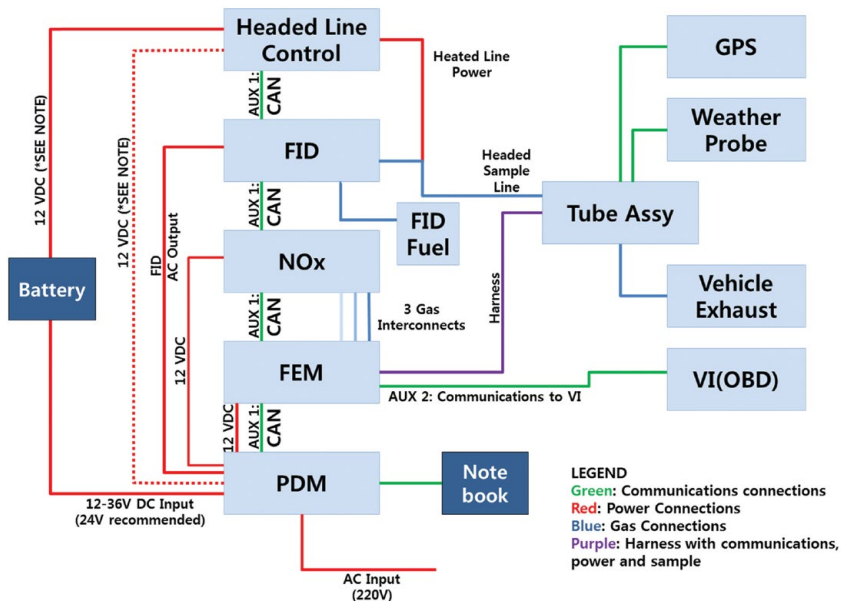


Fig. 1. Schematics of PEMS for real-driving emission measurement.

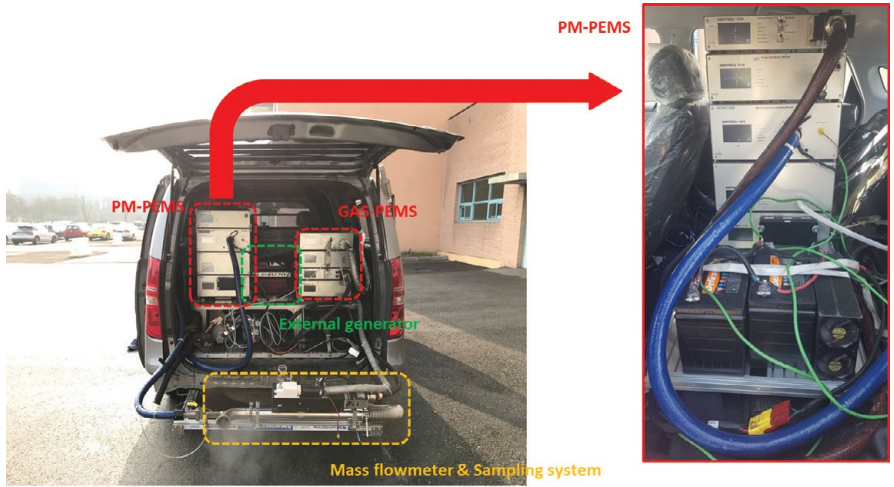


Fig. 2. Photograph of PEMS installation to test vehicle.

Table 2. Condition for each driving mode.

Driving parameters	Driving mode	
	NEDC	WLTC
Distance (km)	10.9314	23.262
Total time (sec)	1,180	1,800
Idle (standing) time	267	242
Average speed (incl. stops)	33.35	46.5
Average driving speed (excl. stops)	43.10	53.8
Maximum speed (km/h)	120	131.3
Average acceleration (m/s ²)	0.506	-
Maximum acceleration (m/s ²)	1.042	1.6

NEDC (New European Driving Cycle): European and domestic certification driving mode
 WLTC (World Harmonized Light-duty Vehicle Test Cycle): Driving mode developed based on driving data of Europe, Japan and Korea

Table 3. Parameters in constant speed test on PEMS.

Driving parameters	PEMS (on real-road driving)		
	30 km/h	60 km/h	90 km/h
Mode setting	Driving time (sec) 2,400		
	Driving distance (km) 20.14 39.86 60.00		
Exhaust factor	Dilution factor No dilution, raw gas input		
	Exhaust temp. (°C) 0~7 -2~0 -2~-1		
	Exhaust flow (m ³ /min) 27.97 26.01 26.57		
	Total sampling flow (m ³) 1,164 1,017 779		

(Low 구간 평균 속도 19 km/h), 중속 (Medium, 39.5 km/h), 고속 (High, 56.7 km/h), 초고속 (92.3 km/h) 이라고 하는 네 가지 패턴이 있는 WLTC 모드를 적용하였

Table 4. Parameters in real-road driving test using PEMS.

Driving parameters	PEMS (on real-road driving)		
	Urban	Rural	Motorway
Average speed (km/h)	22.0 km/h	74.4 km/h	106.5 km/h
Driving time (min)	73.6 min.	16.0 min.	15.3 min.
Driving distance (km)	27.0 km (36.5%)	19.8 km (26.8%)	27.1 km (36.7%)
Exhaust factor	Exhaust temp. (°C) 0~1	0~1	0~1
	Exhaust flow (m ³ /min) 25.07	27.43	25.93
	Total sampling flow (m ³) System error	4,240	4,965

다. 표 2는 주행모드별 조건을 나타낸다.

2.5 실도로에서 정속주행모드의 PEMS의 측정방법

정속주행모드 (30, 60, 90 km/h)의 시험은 실제 도로 주행에서 PEMS를 이용하여 측정하였다. 실도로 PEMS의 측정시기는 12월 중순경 겨울에 실시하였다. 각 주행모드별 설정 값과 PEMS로 유입되는 배기가스의 특성을 표 3에 나타냈다. 속도는 동일한 운전자가 운전을 하며, 패트롤 차량을 동행하여 속도에 제한을 두고 실험을 진행하였다.



Fig. 3. Route of real road driving test using Starex, Grand carnival with PEMS.

2.6 실도로에서 가속주행모드의 PEMS의 측정방법

교통 및 도로 상황에 따른 가속과 감속이 이루어지는 주행 조건을 가정하여 실도로에서 시험하였다. 주행조건으로서 Urban (45 km/h 미만), Rural (45 km/h 이상, 80 km/h 미만), Motorway (80 km/h 이상)의 3가지 형태의 속도 제한에서 도로 주행을 하였다. 각 주행모드별 설정 값과 PEMS로 유입되는 배기가스의 특성을 표 4에 나타냈다.

주행구간은 그림 3에 나타내었다. 주행구간의 경우 EC (European commission)에서 규정한 RDE-LDV (Light Duty Vehicle)시험의 주행경로는 기본적으로 도심(Urban), 교외(Rural), 전용도로(Motorway) 순서로 구성되어야 하며, 주행시험은 연속적으로 이루어져야 한다. 여기서 도심주행을 60 km/h 이하의 차속, 교외주행은 60 km/h 초과 90 km/h 이하의 차속, 전용도로 주행은 90 km/h 초과 차속으로 정의한다. 총 주행거리에 대한 백분율로 나타내는 주행 점유율은 각각 34%의 도심주행, 33%의 교외 및 전용도로 주행 점유율로 구성하며, ±10% 범위 내에서 조정이 가능하나 도심주행 점유율은 최소 29% 이상이어야 한다. 수도권 내에서 검토한 결과 KOR-NIER Route 1과 KOR-NIER Route 2가 개발하였다(Kang *et al.*, 2017). 그림 3은 그 중 KOR-NIER Route 2를 나타낸다.

2.7 시료채취 및 분석방법

그림 4는 PEMS를 장착한 차량으로 실제 도로 주행

을 하고 있는 모습이다. PEMS에 의한 시료의 채취는 희석되지 않은 원 배기가스가 유입되어 먼지 필터를 거쳐 배출이 된다. 채취된 먼지 필터로 중금속과 입자상 PAH 물질을 분석했으며, VOCs와 카르보닐화합물은 가스배출을 위한 배관라인에 Teflon tube를 연결하여 소용량 펌프로 채취하였다. 본 연구에서는 자동차 배기가스 중 HAPs 조사항목으로서 VOCs (96종), 카르보닐화합물(14종)을 국내 대기오염공정시험법에 준하여 측정 및 분석을 진행하였다. 측정 방법 및 분석기기를 표 5에 나타냈다.

2.8 정도관리

VOCs측정 정도관리는 EPA TO-17 method를 준수하였다. 저농도 수준의 자료에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 각 분석대상물질의 방법검출한계(Method Detection Limit, MDL)를 추정하였다. GC/MS를 이용한 VOCs 분석방법의 재현성을 표준혼합시료 A, B의 감응계수(Response Factor, RF)에 대한 상대표준편차(Relative Standard Deviation, RSD)로 평가하였다. 각 분석대상물질의 MDL을 추정한 결과 0.05~0.37 ppb의 범위로 권고 수준인 0.5 ppb 수준을 만족하였고, 분석 재현성은 20% 이내 수준을 만족하였다. 카르보닐화합물 분석에 사용된 HPLC 분석방법의 재현성을 표준시료의 감응계수에 대한 상대표준편차로 평가하였다. 카르보닐화합물은 HPLC 감응계수의 RSD가 5% 미만으로 재현성이 양호하였고, MDL 값은 0.35~0.77 ppb 범위를 보였다.

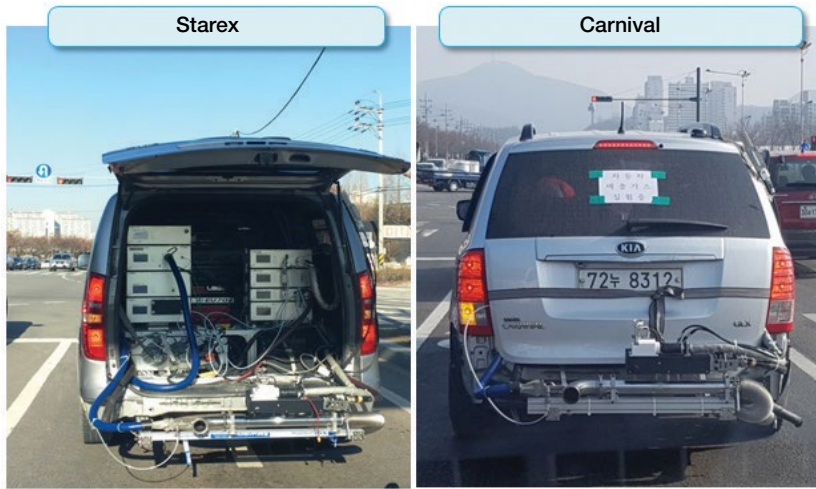


Fig. 4. Real road driving with PEMS.



Fig. 5. Photographs of correlation test for PEMS vs CVS.

Table 5. Summary of sampling methods and analysis instruments.

System	Compounds	Sampling method	Sampling flow	Sampling media	Analysis instrument
PEMS (Model-EcoStar, Sensors)	VOCs	Adsorption tube	100 mL/min	Tenax-tube	GC/MS/TD
	Carbonyl	Catridge sampling	100 mL/min	2,4-DNPH Catridge	HPLC
	Heavy metal	Particulate matter sampling	Exhaust flow of Table 2~4	47 mm Membrane filter	ICP/MS
	PAHs	Particulate matter sampling		47 mm Membrane filter	GC/MS

3. 결과 및 고찰

3.1 PEMS의 신뢰성 확보를 위한 상관성 시험결과

그림 5와 같이 PEMS 장비가 설치된 시험차량을 차대동력계에서 다양한 시험모드를 실행하여 CVS와 PEMS에서 동시에 측정되는 NO_x 및 CO₂ 결과를 비교하는 상관성 실험을 수행하였다.

그림 6은 본 연구에서 진행된 상관성 시험 결과이며, 특히 NO_x의 경우에 결정계수가 0.99이고, CO₂의 경우에는 결정계수가 0.98 이상으로 나타나 두 그래프 모두 선형적인 결과를 나타냈다.

또한, 그림 7, 8은 위의 상관성 시험에서 실시간으로 측정되는 NO_x 및 CO₂의 유량을 비교한 그래프이며, Veh. 1은 스타렉스, Veh. 2는 그랜드카니발을 나타낸다. 실시간으로 배출되는 양도 일치하는 결과를 확인

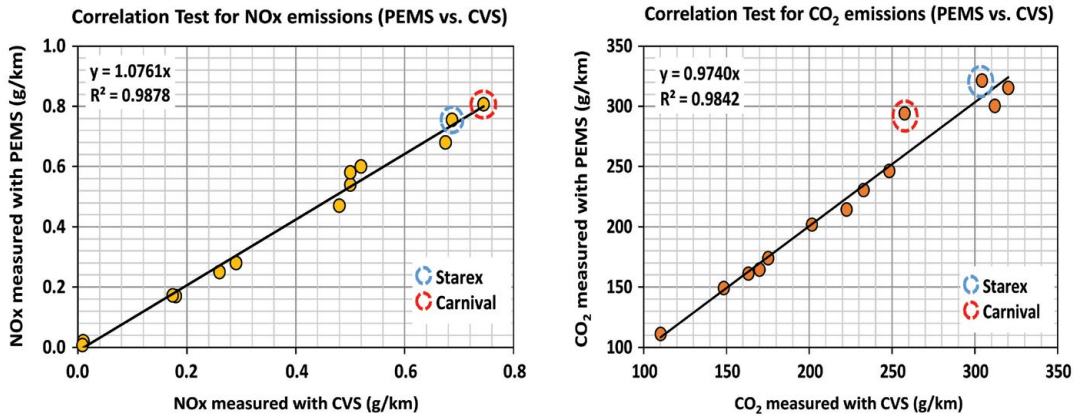


Fig. 6. Correlation of emission results between PEMS and CVS equipment.

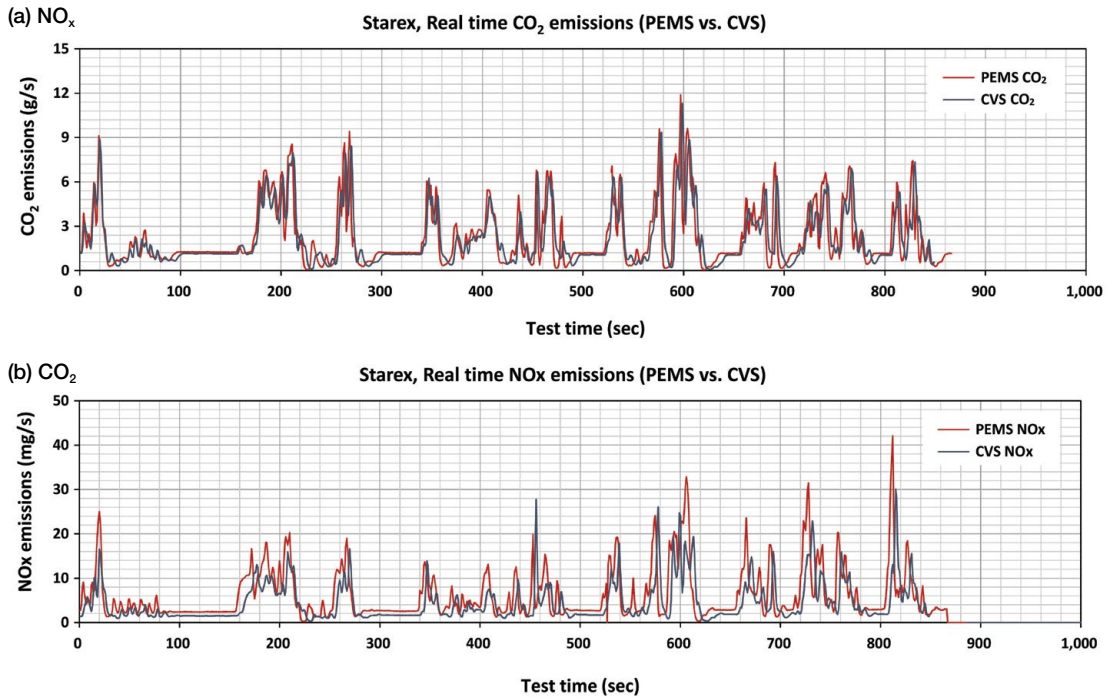


Fig. 7. Comparison of real-time NO_x and CO₂ emission rate (PEMS and CVS) - Veh. 1.

하였다. 아래의 결과를 토대로 본 연구에서 사용된 PEMS 장비는 높은 상관성을 갖고 있다고 판단된다.

3.2 실도로 조건 사전 주행 평가(RDE)

주행경로 시험결과

그림 9는 실도로 주행 배출계수를 평가하기 위한 기

본적 결과인 CO₂ 특성 곡선이며 Veh. 1과 Veh. 2가 위에서 언급한 실도로 주행 경로에서 시험을 실행한 결과이다. 주황색은 Veh. 1 (Starex)의 결과이며, 파란색은 Veh. 2 (Carnival)의 결과를 나타냈다.

실시간으로 취득되는 차량 속도 (km/h)와 NO_x 배출량 (g/s) 데이터를 비교하여 그림 10에 나타냈다. 각 시

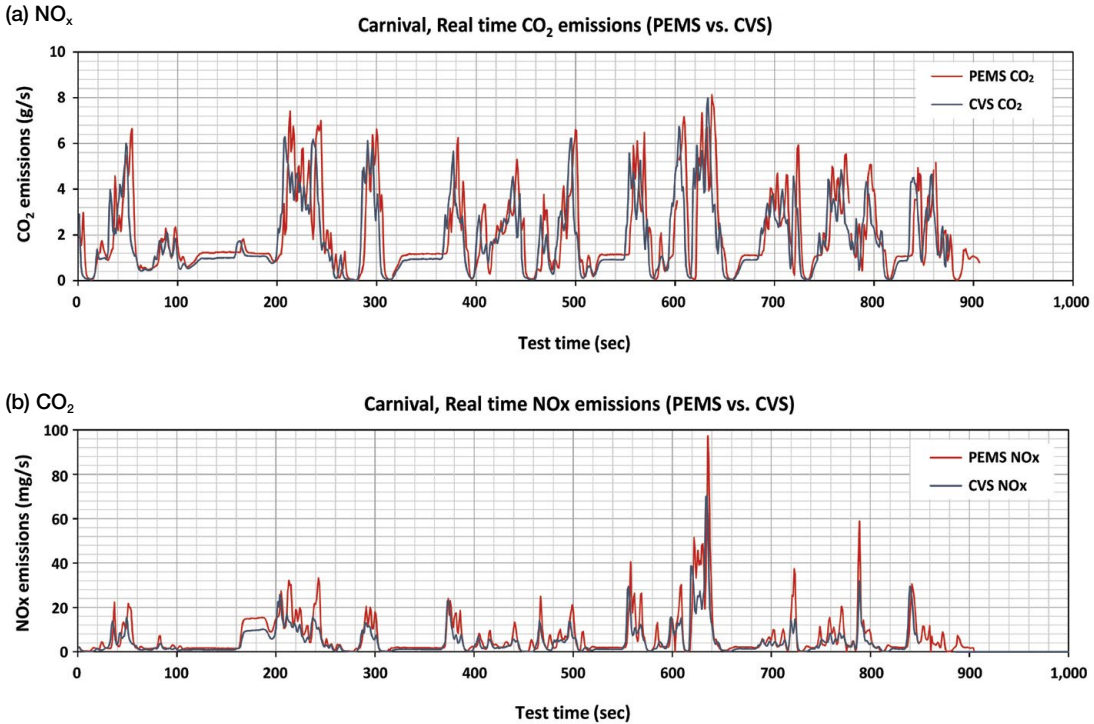


Fig. 8. Comparison of real-time NO_x and CO₂ emission rate (PEMS and CVS) - Veh. 2.

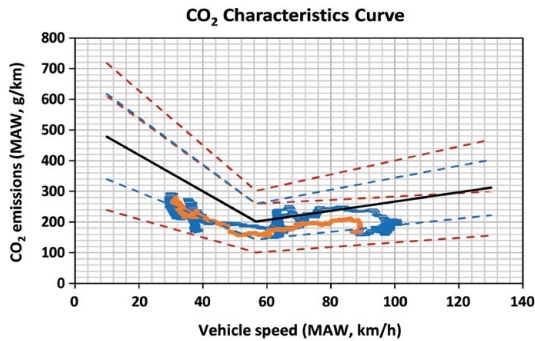


Fig. 9. CO₂ characteristics curve with veh. 1 and veh. 2 by MAW (Moving Averaging Window).

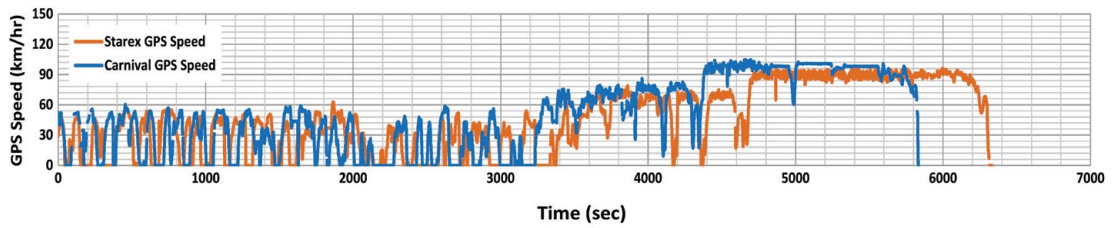
험마다 도로상황 및 운전 패턴이 다른 실도로에서 주행하는 시험이지만 두 시험차량의 속도 그래프를 비교하여 볼 때, 전체적인 차량속도 패턴은 매우 유사한 특성을 보였다. 하지만, 실시간 NO_x 배출량은 대부분의 구간에서 Veh. 2이 더 많은 NO_x 배출 특성을 보였고 이는 이동평균구간(Moving Averaging Window, MAW)

평가방법으로 분석한 결과와도 일치함을 보였다.

3.3 실도로 정속주행 시 조건별 배출계수

PEMS를 이용하여 승합차 2종을 대상으로 실도로 주행 시 VOCs 및 카르보닐화합물의 배출 수준을 파악하고자 정속주행(30, 60, 90 km/h) 조건에서 시험을 진행하였다. 표 6~8은 주행조건에서 VOCs의 배출계수를 나타낸다. 30 km/h 조건에서 스타렉스와 그랜드카니발의 배출계수를 보면 각각 Benzene 평균 0.2357, 0.8127 mg/km, Toluene 평균 0.2409, 0.3707 mg/km, m,p-Xylene의 경우 스타렉스에서 불검출되었고, o-Xylene의 경우도 스타렉스에서 불검출되었다. 60 km/h 조건에서는 각각 Benzene 평균 0.3335, 0.3121 mg/km, Toluene 평균 0.2333, 0.1683 mg/km, m,p-Xylene의 경우 스타렉스에서 불검출되었고, o-Xylene의 경우도 스타렉스에서 불검출되었다. 90 km/h 조건에서 각각 Benzene 평균 0.3718, 0.13 mg/km, Toluene 평균 0.2684, 0.0985 mg/km, m,p-Xylene의 경우 다른 조건과는 반대로 그랜드카니발에서 불검출되었고,

(a) Vehicle speed



(b) Instantaneous NO_x

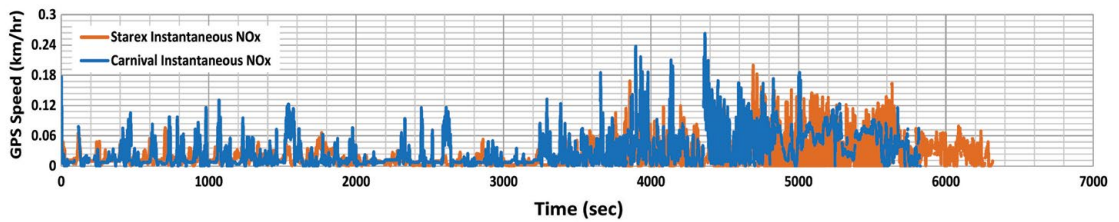


Fig. 10. Real-time results of veh. 1 and veh. 2.

Table 6. Emission factor of VOCs from 30 km/h constant speed in real road.

(Unit: mg/km)

VOCs	30 km/h									
	Starex						Average	Grand carnival		Average
	#1	#2	#3	#4	#5	#6		#1	#2	
1,3-Butadiene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzene	0.2162	0.3561	0.2097	0.2098	0.2069	0.2157	0.2357	0.5895	1.0359	0.8127
Toluene	0.1457	0.2048	0.2015	0.4446	0.2065	0.2422	0.2409	0.2543	0.4860	0.3701
Ethylbenzene	0.0063	0.0177	-	0.0228	0.0291	0.0329	0.0181	0.0299	0.0809	0.0554
m,p-Xylene	0.0028	0.0221	-	0.0272	0.0497	0.0538	0.0259	0.0355	0.0918	0.0636
Styrene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
o-Xylene	0.0311	0.0459	-	0.0484	-	-	0.0209	0.0642	0.1118	0.0880
Total VOCs	5.399	5.815	8.078	18.621	8.515	12.112	9.757	7.195	10.079	8.637

Table 7. Emission factor of VOCs from 60 km/h constant speed in real road.

(Unit: mg/km)

VOCs	60 km/h									
	Starex						Average	Grand carnival		Average
	#1	#2	#3	#4	#5	#6		#1	#2	
1,3-Butadiene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzene	0.0965	0.1153	0.7129	0.8613	0.0931	0.1218	0.3335	0.2917	0.3325	0.3121
Toluene	0.1175	0.0736	0.4459	0.5573	0.0825	0.1230	0.2333	0.1664	0.1702	0.1683
Ethylbenzene	-	-	0.1329	0.1566	-	0.0159	0.0509	0.0321	0.0329	0.0325
m,p-Xylene	-	-	0.2303	0.2861	0.0149	0.0266	0.0930	0.0479	0.0482	0.0481
Styrene	-	-	0.0382	-	-	-	0.0064	-	-	-
o-Xylene	-	-	0.2080	0.2433	-	0.0405	0.0820	0.0575	-	0.0287
Total VOCs	4.782	2.825	12.320	17.208	5.937	5.268	8.057	6.779	5.869	6.324

Table 8. Emission factor of VOCs from 90 km/h constant speed in real road.

(Unit: mg/km)

VOCs	90 km/h									
	Starex						Average	Grand carnival		Average
	#1	#2	#3	#4	#5	#6		#1	#2	
1,3-Butadiene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzene	0.5570	0.5133	0.4494	0.4015	0.1551	0.1544	0.3718	0.1495	0.1105	0.1300
Toluene	0.4078	0.3618	0.3282	0.3022	0.1045	0.1060	0.2684	0.1408	0.0561	0.0985
Ethylbenzene	0.1135	0.1004	0.0799	0.0875	0.0202	-	0.0669	0.0173	-	0.0087
m,p-Xylene	0.1988	0.1752	0.0686	0.1542	0.0368	0.0351	0.1114	0.0236	-	0.0118
Styrene	-	-	-	0.0679	-	-	0.0113	-	-	-
o-Xylene	0.1738	0.1576	0.0947	0.1407	-	-	0.0945	0.0344	-	0.0172
Total VOCs	8.389	9.436	5.292	8.104	1.558	2.148	5.821	6.026	0.922	3.474

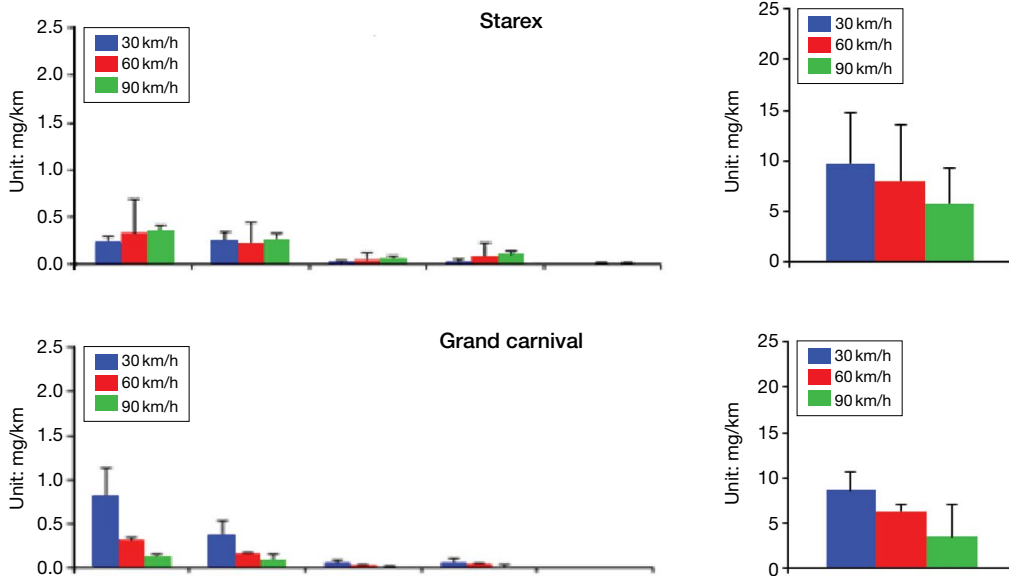


Fig. 11. Emission factor of VOCs in real road constant speed.

o-Xylene의 경우도 그랜드카니발에서 불검출되었다. 1,3-Butadiene은 2종 차량에서 불검출되었고, 승합차에서는 Styrene 성분이 불검출 빈도가 높았다. 그림 11은 VOC의 주행조건에 따른 배출경향을 나타낸다. 배출계수별 수준을 보면, 승합차는 Toluene에 비해 Benzene의 배출계수가 높게 나타나는 경향을 보였다. 정속주행의 전반적인 배출경향성은 저속일 때 배출계수가 높게 평가되는 경향을 보였으나, 배출 편차가 크게 나타나지는 않았다. 이러한 배출경향성은 실도로 상의 운전환경이 영향을 끼친 것으로 판단된다.

표 9~11은 주행조건에서 카르보닐화합물의 배출계수를 나타낸다. 카르보닐화합물의 경우 30 km/h 조건에서 각각 Formaldehyde 평균 1.0037, 1.2698 mg/km, Acetaldehyde 평균 0.8459, 0.5107 mg/km, Acrolein은 각각 불검출되어 일부만 검출되었다. 60 km/h 조건에서는 Formaldehyde 평균 0.5156, 0.5664 mg/km, Acetaldehyde 평균 0.556, 0.3004 mg/km, Acrolein은 검출되지 않았다. 90 km/h의 조건에서 각각 Formaldehyde 평균 0.496, 0.3485 mg/km, Acetaldehyde 평균 0.3231, 0.2021 mg/km, Acrolein은 60 km/h 조건과 마찬가지로

Table 9. Emission factor of Carbonyl from 30 km/h constant speed in real road. (Unit: mg/km)

Carbonyl	30 km/h									
	Starex						Average	Grand carnival		Average
	#1	#2	#3	#4	#5	#6		#1	#2	
Formaldehyde	0.8137	0.8490	1.0571	0.8573	1.4900	0.9553	1.0037	1.4561	1.0835	1.2698
Acetaldehyde	1.0613	1.4561	0.9435	0.5432	0.6390	0.4325	0.8459	0.5894	0.4320	0.5107
Acrolein	0.0598	-	-	-	-	-	0.0100	0.0776	0.0631	0.0703
Total Carbonyl	5.480	5.725	4.292	2.776	4.367	2.405	4.174	4.212	2.646	3.429

Table 10. Emission factor of Carbonyl from 60 km/h constant speed in real road. (Unit: mg/km)

Carbonyl	60 km/h									
	Starex						Average	Grand carnival		Average
	#1	#2	#3	#4	#5	#6		#1	#2	
Formaldehyde	0.5353	0.3048	0.5733	0.5888	0.6475	0.4442	0.5156	0.5813	0.5515	0.5664
Acetaldehyde	0.5607	0.6183	0.5693	0.8433	0.3202	0.4243	0.5560	0.3329	0.2678	0.3004
Acrolein	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total Carbonyl	2.666	2.317	2.554	3.018	1.684	1.629	2.311	2.515	2.610	2.563

Table 11. Emission factor of Carbonyl from 90 km/h constant speed in real road. (Unit: mg/km)

Carbonyl	90 km/h									
	Starex						Average	Grand carnival		Average
	#1	#2	#3	#4	#5	#6		#1	#2	
Formaldehyde	0.5925	0.5896	0.3449	0.3482	0.5490	0.5517	0.4960	0.3770	0.3199	0.3485
Acetaldehyde	0.0918	0.3621	0.6517	0.3892	0.0106	0.4335	0.3231	0.2256	0.1787	0.2021
Acrolein	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total Carbonyl	1.456	2.112	2.224	2.045	0.631	1.619	1.681	2.659	1.733	2.196

검출되지 않았다. Acrolein은 승합차 30 km/h 주행에서 일부 검출되었다. Formaldehyde의 배출계수가 가장 높고 Acetaldehyde 순으로 나타났으나 2성분의 배출계수 값의 차이가 더 작게 나타났다. 그림 12는 주행조건에서의 카르보닐화합물의 배출경향을 나타낸다. 정속주행의 전반적인 배출경향성은 저속일 때 배출계수가 높게 평가되는 경향을 보였으나, 앞서 언급한 VOCs와 동일하게 배출 편차가 크게 나타나지는 않았다. 이러한 배출경향성은 실도로 상의 운전환경이 영향을 끼친 것으로 판단된다.

3.4 실도로 가속주행 시 조건별 배출계수

PEMS를 이용하여 실도로 상황을 반영한 주행을 고

려했을 시 VOCs 및 카르보닐화합물의 배출 수준을 파악하고자 승합차 2종을 대상으로 감속 및 가속주행조건 (Urban (45 km/h 미만), Rural (45 km/h 이상, 80 km/h 미만), Motorway (80 km/h 이상))에서 시험을 진행하였다.

그림 13은 가속주행 시의 VOCs의 배출경향을 나타낸다. 가속주행 시의 결과는 정속주행 결과와 비교했을 시 동일한 결과를 보였다. 표 12~14는 주행조건에서 VOCs의 배출계수를 나타낸다. VOCs의 경우 스타렉스와 그랜드카니발의 경우 Urban 조건에서 각각 Benzene 평균 0.2772, 0.5608 mg/km, Toluene 평균 0.2495, 0.9299 mg/km, Ethylbenzene은 스타렉스는 평균 0.0488 mg/km, 그랜드카니발에서는 불검출되었다.

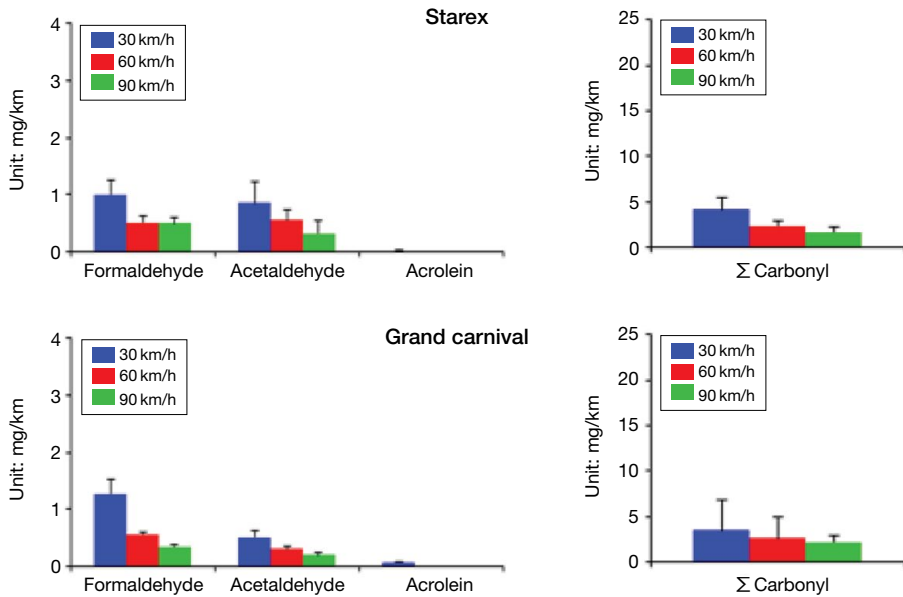


Fig. 12. Emission factor of Carbonyl in real road constant speed.

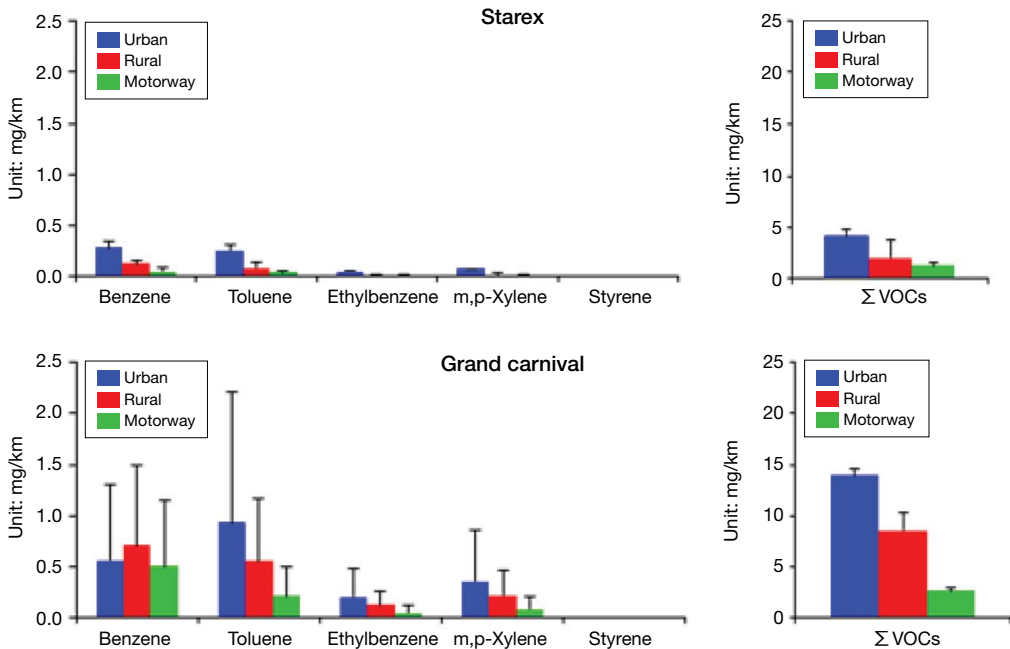


Fig. 13. VOCs emission factor of acceleration speed on real-road driving using PEMS.

m,p-Xylene은 각각 평균 0.0753, 0.3548 mg/km, o-Xylene 평균 0.0632 mg/km, 그랜드카니발에서는 불

검출되었다. Rural 조건에서는 각각 Benzene 평균 0.1242, 0.7071 mg/km, Toluene 평균 0.0779, 0.5521

Table 12. Emission factor of VOCs from Urban driving mode in real road. (Unit: mg/km)

VOCs	Urban (less than 45 km/h)					
	Starex		Average	Grand carnival		Average
	#1	#2		#1	#2	
1,3-Butadiene	-	-	-	-	-	-
Benzene	0.3182	0.2361	0.2772	1.0824	0.0391	0.5608
Toluene	0.2946	0.2044	0.2495	1.8373	0.0225	0.9299
Ethylbenzene	0.0511	0.0464	0.0488	0.3983	-	0.1992
m,p-Xylene	0.0746	0.0759	0.0753	0.7065	0.0031	0.3548
Styrene	-	-	-	-	-	-
o-Xylene	0.0618	0.0646	0.0632	0.6142	-	0.3071
Total VOCs	3.684	4.667	4.176	27.281	0.602	13.942

Table 13. Emission factor of VOCs from Rural driving mode in real road. (Unit: mg/km)

VOCs	Rural (more than 45 km/h and less than 80 km/h)					
	Starex		Average	Grand carnival		Average
	#1	#2		#1	#2	
1,3-Butadiene	-	-	-	-	-	-
Benzene	0.1000	0.1484	0.1242	1.2643	0.1498	0.7071
Toluene	0.0364	0.1194	0.0779	0.9816	0.1227	0.5521
Ethylbenzene	-	0.0166	0.0083	0.2235	0.0293	0.1264
m,p-Xylene	-	0.0293	0.0146	0.3863	0.0522	0.2193
Styrene	-	-	-	-	-	-
o-Xylene	0.0064	0.0411	0.0237	0.3751	0.0547	0.2149
Total VOCs	0.808	3.252	2.030	14.734	2.331	8.533

Table 14. Emission factor of VOCs from Motorway driving mode in real road. (Unit: mg/km)

VOCs	Motorway (more than 80 km/h)					
	Starex		Average	Grand carnival		Average
	#1	#2		#1	#2	
1,3-Butadiene	-	-	-	-	-	-
Benzene	0.0736	0.0283	0.0509	0.9644	0.0415	0.5029
Toluene	0.0501	0.0254	0.0377	0.4142	0.0053	0.2098
Ethylbenzene	0.0096	0.0016	0.0056	0.0945	-	0.0473
m,p-Xylene	0.0162	0.0034	0.0098	0.1659	-	0.0829
Styrene	-	-	-	-	-	-
o-Xylene	0.0209	0.0111	0.0160	0.1656	-	0.0828
Total VOCs	1.529	1.035	1.282	5.214	0.081	2.647

mg/km, Ethylbenzene은 스타렉스는 불검출되었고, 그랜드카니발에서는 평균 0.1264 mg/km으로 나타났다. m,p-Xylene은 불검출되었고 그랜드카니발에서는 평균 0.2193 mg/km으로 나타났으며, o-Xylene 평균 0.0237, 0.2149 mg/km로 나타났다. Motorway 조건에서는

Benzene 평균 0.0509, 0.5029 mg/km, Toluene 평균 0.0377, 0.2098 mg/km, Ethylbenzene은 스타렉스는 평균 0.0056 mg/km, 그랜드카니발에서는 불검출되었다. o-Xylene은 스타렉스는 평균 0.016 mg/km, 그랜드카니발에서는 불검출되었다. 1,3-butadiene과 Styrene는

Table 15. Emission factor of Carbonyl from Urban driving mode in real road. (Unit: mg/km)

Carbonyl	Urban (less than 45 km/h)					
	Starex		Average	Grand carnival		Average
	#1	#2		#1	#2	
Formaldehyde	0.3063	0.1016	0.2040	6.9452	1.6536	4.2994
Acetaldehyde	0.4107	0.0052	0.2080	6.4745	1.0457	3.7601
Acrolein	0.0337	-	0.0168	0.3018	0.0352	0.1685
Acetone	0.0263	0.0300	0.0281	2.6518	0.7305	1.6911
Total Carbonyl	1.607	0.373	0.990	19.517	3.833	11.675

Table 16. Emission factor of Carbonyl from Rural driving mode in real road. (Unit: mg/km)

Carbonyl	Rural (more than 45 km/h and less than 80 km/h)					
	Starex		Average	Grand carnival		Average
	#1	#2		#1	#2	
Formaldehyde	0.5361	0.1511	0.3436	1.8739	2.5913	2.2326
Acetaldehyde	0.6476	-	0.3238	1.3412	1.9357	1.6384
Acrolein	0.0546	-	0.0273	0.0089	0.1321	0.0705
Acetone	0.6501	-	0.3251	1.4141	2.4676	1.9408
Total Carbonyl	4.077	0.553	2.315	5.346	8.282	6.814

Table 17. Emission factor of Carbonyl from Motorway driving mode in real road. (Unit: mg/km)

Carbonyl	Motorway (more than 80 km/h)					
	Starex		Average	Grand carnival		Average
	#1	#2		#1	#2	
Formaldehyde	0.5068	0.1011	0.3039	1.0553	0.8455	0.9504
Acetaldehyde	0.2669	-	0.1335	1.4001	1.0590	1.2295
Acrolein	0.0428	-	0.0214	0.1639	0.1143	0.1391
Acetone	0.1734	0.0180	0.0957	0.8093	1.1824	0.9958
Total Carbonyl	2.367	0.424	1.395	5.014	4.002	4.508

2종 차량에서 불검출되었다. 2종 차량의 전반적인 실도로 배출경향은 Urban > Rural > Motorway 순으로 나타났다.

표 15~17은 주행조건에서 카르보닐화합물의 배출계수를 나타낸다. Urban 주행모드에서 Formaldehyde는 각각 평균 0.2040, 4.2994 mg/km, Acetaldehyde 평균 0.2080, 3.7601 mg/km, Acrolein은 스타렉스에서는 불검출되었고, 카니발에서는 평균 0.1685 mg/km, Acetone은 평균 0.0281, 1.6911 mg/km 발생하였다. Rural 주행모드에서는 스타렉스에서는 Formaldehyde 평균

0.3436 mg/km로 나타났으며 다른 물질들은 불검출되었다. 카니발은 Formaldehyde 평균 2.2326 mg/km, Acetaldehyde 1.6384 mg/km, Acrolein 0.0705 mg/km, Acetone 1.9408 mg/km로 나타났다. Motorway 주행모드에서 스타렉스에서는 Formaldehyde 평균 0.3039 mg/km, Acetone 0.0957 mg/km로 나타났으며, 다른 물질들은 불검출되었다. 카니발은 Formaldehyde 평균 0.9504 mg/km, Acetaldehyde 1.2295 mg/km, Acrolein 0.1391 mg/km, Acetone 0.9958 mg/km로 나타났다. 그림 14는 가속주행 시의 카르보닐의 배출경향을 나타낸

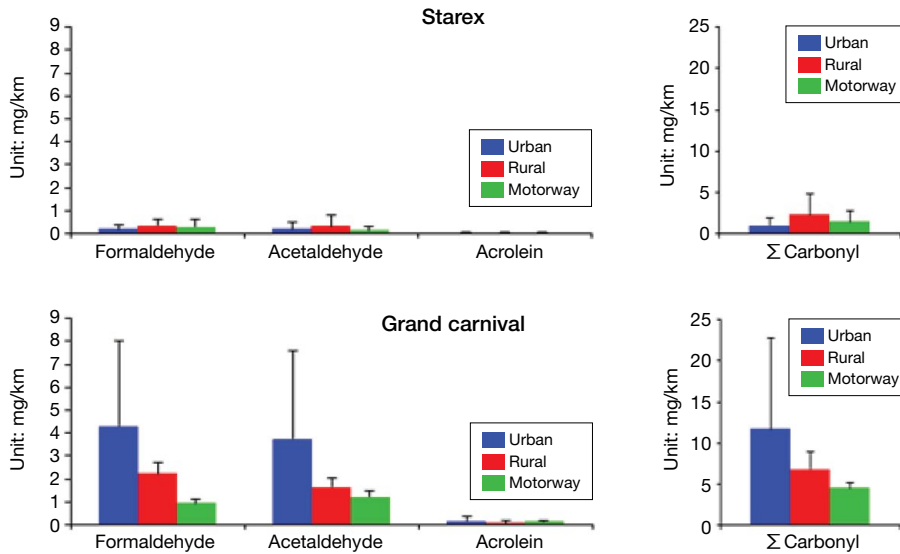


Fig. 14. Carbonyl emission factor of acceleration speed on real-road driving using PEMS.

다. VOCs 결과와 동일하게 그랜드카니발 승합차에서 배출계수가 높게 평가되었고, 차종별 가속주행에 따른 배출 경향성은 상이하였으나, 가장 배출계수가 높은 그랜드카니발의 경우 Urban > Rural > Motorway 순으로 배출 경향성이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 경향성은 실도로 상의 상황과 운전자의 과도한 운전패턴이 적지 않은 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 도로 주행 시 PEMS를 이용한 측정방법을 통하여 디젤 승합차인 스타렉스와 그랜드카니발의 배기가스 시험 중 유해대기오염물질(HAPs)인 VOCs, 카르보닐화합물의 배출계수를 파악하였다. PEMS 장비가 설치된 시험차량을 차대동력계에서 다양한 시험모드를 실행하여 CVS와 PEMS의 가스상 NO_x 및 CO₂ 상관성 실험 결과, NO_x의 배출계수에 대한 매우 높은 상관관계를 정량적으로 확인하였다. 실도로 주행조건인 배기가스를 이동평균구간(MAW) 방법으로 평가한 결과, CO₂는 도심구간(≤ 45 km/h, MAW)에서 승합 2종의 시험차량의 결과 값이 유사한 수치를 보였으나, 도심구간에서의 NO_x 배출량은 카니

발이 스타렉스보다 더 높은 NO_x 배출 특성을 보였다. 실시간 NO_x 배출량 평가에서도 카니발이 더 많은 NO_x 배출 특성을 보여 MAW 평가방법으로 분석한 결과와도 일치함을 보였다. 실도로 주행 중 정속주행(30, 60, 90 km/h)을 실시하여 배출계수를 평가하였다. 가스상(VOCs, 카르보닐화합물) 물질의 정속주행 시 전반적인 배출 경향성은 저속일 때 배출계수가 높게 평가되는 경향을 보였다. 실도로 상황을 반영한 주행을 고려하고자 감속 및 가속이 이루어지는 주행조건(Urban (45 km/h 미만), Rural (45 km/h 이상~80 km/h 미만), Motorway (80 km/h 이상))에서 시험을 진행하였다. VOCs와 카르보닐화합물의 경우 2종 차량의 전반적인 배출경향은 Urban > Rural > Motorway 순으로 나타났다. 본 연구의 결과로부터 실도로 상의 운전상황과 운전자의 가속 패턴, 또한 운전 여건 등이 시험대상 차량의 유해대기오염물질 배출계수에 적지 않은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원 교통환경연구소의 2017년 오토오일 연구사업인 “자동차 유해대기오염물질 배출량 산정 개선 연구”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- An, T.H., Kim, M.Y. (2014) Numerical Investigation of the Spray Behavior and Flow Characteristics of Urea-Water Solution Injected into Diesel Exhaust Pipe, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, 38(1), 41-48.
- Kang, G.W., Lee, J.T., Park, J.H., Cha, J.P., Chon, M.S. (2017) Development of Korea RDE Routes for On-road Emissions Measurement of Light Duty Vehicles, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, 25(3), 287-296.
- Kim, J., Jang, Y.K., Choi, S.J., Kim, J.S., Seo, C.Y., Son, J.H. (2013) Estimation of Gaseous Hazardous Air Pollutants Emission from Vehicles, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 29(1), 1-9.
- Kim, J.H., Jeon, J.M., Chae, J.S., Kim, J., Jang, Y.K., Chon, M.S., Jang, J.H., Son, J.H., Kim, J.S., Han, J.S. (2016) Characteristics of Hazardous Air Pollutants Emitted from Diesel Vehicles using PEMS on Real-road Driving, Journal of the Korean Society of Urban Environment, 16(4), 511-521.
- Kim, J.Y., Seo, C.Y., Hwan, S.J., Park, J.H., Moon, T.Y., Lee, S.E., Kim, J.S. (2012) A study of Greenhouse Gas Emission Rates from LDTs according to Emission Certification Modes and Real-World Vehicle Driving Cycles on Korea, Climate Change Research, 3(4), 235-243.
- Kwon, S.J., Kwon, S.I., Lee, J.T., Oak, S.I., Seo, Y.H., Park, S.W., Chon, M.S. (2015) Data Evaluation Methods for Real Driving Emissions using Potable Emission Measurement System, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, 39(12), 965-973.
- Lee, J., Kim, J., Park, J., Jeon, S., Kim, J. (2014) Influence of Driving Routes and Seasonal Conditions to Real-driving NO_x Emissions from Light Diesel Vehicles, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, 22(1), 148-156.
- Lee, S.G., Lee, S.W., Kang, Y.W. (2015) Development and Validation of Urea-SCR Control-Oriented Model for NO_x and NH₃ Slip Reduction, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, 39(1), 1-9.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) Trend and research example of Light-duty Vehicles real road emission management system, NIERGP 2013-033.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2014) A study on the Evaluation System Introduction of Real Driving Emission For Light-duty Vehicles, NIER-2014-051.
- Oak, S.I., Eom, M.D., Lee, J.T., Park, J.H., Kim, J.C., Chon, M.S. (2015) Characteristics of Real-road Driving NO_x Emissions from Korean Light-duty Vehicles regarding Driving Routes, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, 23(1), 130-138.
- Park, J., Lee, J., Kim, S., Ahn, K. (2013) A Study on the Emission Characteristics of Korean Light-duty Vehicles in Real-road Driving Conditions, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, 21(6), 123-134.
- Park, J.H., Kim, J.S., Lee, J.T., Kim, S.M., Ahn, K.W., Han, B.Y. (2012) Estimation on Real Road Driving Emission of Light Duty Truck with Moving Averaging Window Method, The Korea Society of Automotive Engineers, 2012(5), 406-410.
- Park, J.H., Lee, T.W., Lee, J.T., Kim, S.M., Ahn, K.W., Han, B.Y. (2012) A study on Real-road Driving Emission of Korean Heavy-duty Trucks, The Korea Society of Automotive Engineers, 2012(11), 543-547.
- Park, Y.J., Kwon, S.L., Park, J.H., Young, L.J. (2015) Estimation of Real-Driving NO_x Emission Characteristics from Light-Duty Diesel Vehicles with PEMS, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 31(6), 562-572.
- U.S. California Air Resources Board (US CARB) (2015) SCAQMD, MATES IV, 4-1-4-29.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1996) Motor Vehicle Emissions Federal Test Procedure Revision; Final Regulations, Federal Register, 61(205), 54851-54906.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1999) National Air Toxics Assessment, <http://www.ct.gov/deep/lib/deep/air/SIPRAC/2006/nata.pdf>.
- Weiss, M., Bonnel, P., Hummel, R., Provenza, A., Manfredi, U. (2011) On-road Emissions of Light-duty Vehicles in Europe, Environmental Science and Technology, 45, 8575-8581.