Transactions of KSAE, Vol. 29, No. 2, pp.187-196 (February, 2021)

Check for updates

Copyright © 2021 KSAE / 183-11
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2021.29.2.187

주행 동특성에 따른 PEMS 장비와 SEMS 장비의 실제도로 주행 NO_x 배출량 상관성 분석

정 준 우·심 인 한·김 승 리·유 영 수·전 문 수·차 준 표*

한국교통대학교 자동차공학과

A Correlation Analysis of NO_x Emissions for Driving Condition between PEMS and SEMS Devices

Jun Woo Jeong · Inhan Sim · Seung Lee Kim · Young Soo Yu · Mun Soo Chon · Junepyo Cha*

Department of Automotive Engineering, Korea National University of Transportation, Chungbuk 27469, Korea
(Received 4 August 2020 / Revised 5 October 2020 / Accepted 26 October 2020)

Abstract : The portable emissions measurement system(PEMS) has problems with expensive cost and complex experiment process when the real driving emissions(RDE) test was carried out. Therefore, the development of the sensor-based emission measurement system(SEMS) is necessary in order to conduct the RDE test because the SEMS is a simple process with a low cost. In order to analyze the correlation between PEMS and SEMS, which were installed on a diesel vehicle with LNT and SCR systems, the chassis and RDE tests were carried out. Moreover, the route was developed in order to analyze the correlation according to altitude and acceleration condition. In the case of SEMS, the exhaust flow is measured with the on-board diagnostics(OBD) data, such as mass air flow rate and fuel flow rate, because it does not have an exhaust gas flow meter(EFM). Based on the results of the chassis and RDE tests, the correlation analysis between PEMS and SEMS showed a high correlation when high NO_x emissions were measured, i.e., the uphill and urban section. In addition, the error of NO_x emissions between PEMS and SEMS increased.

Key words : Real driving emission(실제도로 주행 배기가스), Portable emission measurement system(이동식 배기가스 측정 장비), Sensor based emission measurement system(센서 기반 배기가스 측정 장비), Nitrogen oxide(질소산화물), On-board diagnostics(자가진단장비)

1. 서 론

미국 에너지 관리청(EIA, Energy Information Administration)에서 보고한 결과에 따르면 자동차 배기가스에 따른 환경문제로 내연기관 차량의 판매량이 감소하는 추세이다. 이러한 감소되는 추세에도 불구하고 2018년부터 2050년까지 판매되는 내연기관 차량은 하이브리드 차량 및 친환경 차량인 전기 자동차, 수소 자동차를 포함한 자동차 차지 비율 중 평균 68 % 이상으로 높은 비율을 차지하고 있다.[1)]

하지만 배기가스의 배출량은 주요 유럽의 국가들이 설정한 기준치를 초과하고 있으며, 초과하는 주요성분은 승용경유차에 있어 질소산화물이다.[2)] 이러한 결과로 인해 각 국가들은 환경문제에 영향을 미치는 배기가스 저감에 대한 규제를 규정하고 더욱 강화하고 있다.

하지만, 강화되는 규제에도 불구하고 실제도로 주행조건이 매우 다양하고 그에 따른 엔진의 작동이 상이하여 자동차가 배출하는 유해 배출물질은 실내인증모드에 비해 매우 높다는 연구 결과가 지속적으로 발표되고 있다.

그 일부 예로서 EU는 이동식 배기가스 측정 장비(PEMS, Portable Emission Measurement System)를 이용하여 소형차 배기가스 연구를 수행하였으며, 실내인증모드가 실제도로 주행조건을 반영하지 못하는 한계를 가진다는 결과를 확인하였다.[3)] 이러한 연구 결과를 기반으

*Corresponding author, E-mail: chaj@ut.ac.kr
*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

로 국내에서는 2017년 9월 기존의 NEDC(New European Driving Cycle)모드는 실제 도로 주행 조건을 반영하는 WLTC(Worldwide harmonized Light-duty Test Cycle)모드로 대체되었으며, 소형차 실제 도로 주행 배기가스 제도(RDE-LDV, Real Driving Emission-Light Duty Vehicle)가 도입되었다.[4)]

소형차 실제 도로 주행 배기가스 제도는 PEMS 장비를 차량에 탑재하여 RDE규정을 준수하는 실제 도로에서 주행하면서 배기가스를 측정하는 시험이다. 시험에 사용되는 PEMS 장비는 시험 운용 절차가 복잡하며, 시험에 필요한 비용이 고가인 문제가 있다.

그리하여 최근에는 설치가 간편하고 저가이며 작동시간의 제한이 없는 범용 NO_x 센서를 기반으로 실제 도로에서 배기가스를 측정하는 센서 기반 배기가스 측정 장비(SEMS, Sensor based Emission Measurement System)의 연구가 활발히 진행되고 있다.

일부 예로 네덜란드 응용과학연구기구(TNO, Toegepast-natuurwetenschappelijk Nederlandse Organisatie)는 2011년부터 2015년까지 SEMS를 활용하여 15대의 후처리 장비가 다른 경유 차량을 대상으로 실내인증모드에서 상관성 시험을 검증하였고, 대량의 실제 도로 주행 시험을 수행하였다. 그 결과 후처리 장비에 따른 경유 차량의 NO_x 저감 특성을 확인할 수 있었다.[5,6)]

국내에서도 소형 경유 차량 4대에 SEMS를 설치하여 실제 도로 주행 시험 검증을 수행하였다. 시험결과 차량의 배기가스 특성 분석과 주행환경 변수의 배기가스 저감 장비의 영향에 대한 분석이 가능함을 확인하였다.[7)]

하지만 PEMS 장비와 SEMS 장비를 동시에 활용한 실제 도로 주행 시험 연구는 별도로 수행하지 않아 SEMS 장비에 대한 신뢰도 검증은 확인되지 않았다.

본 연구에서는 경유 차량 1대를 대상으로 PEMS 장비와 SEMS 장비 NO_x 배출량을 동시에 측정하였으며, 주행 동특성 조건에서의 NO_x 배출량의 상관성을 분석하기 위해 다양한 실내인증모드에서 상관성을 검증하였다. 실제 도로 주행 시 NO_x 배출량에 많은 영향을 미치는 도로 경사도와 가 · 감속 조건을 부여하여 시험을 수행하였다. 두 조건을 토대로 대량의 실제 도로 주행 시험을 수행하였으며, 취득된 데이터를 모니터링하여 SEMS 장비의 실제도로 주행 시험 적용에 신뢰성 검증을 수행하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 시험차량

본 연구에서는 LNT(Lean NO_x Trap)와 SCR(Selective Catalytic Reduction)이 복합적으로 탑재된 Euro 6d-Temp 경유 차량 1대를 선정하였다. 시험차량의 제원은 Table 1에 기재하였다.

Table 1 Specifications of test vehicle

	Veh. 1
Model year	2018
Fuel	Diesel
Regulation	Euro 6d-Temp
Max. power	186 hp
Max. torque	32.6 kg · m
After-treatment	LNT+DPF+SCR
Curb weight	1,795 kg

2.2 시험 장비

SEMS는 범용 NO_x 센서, GPS와 차량의 주행 데이터 취득을 위한 메인 모듈로 구성된다. 시험차량에서 배출되는 질소산화물을 측정하기 위해 SCR 후단에 NO_x 센서를 설치하여 농도(ppm) 단위로 데이터를 측정하였다.

SEMS는 PEMS와 달리 유량계가 없어 차량의 OBD를 통해 제공되는 흡입 공기 유량과 연료 유량을 합산하여 질량유량(g/s)로 변환하였다. SEMS 장비는 10 Hz로 데이터를 측정하므로 PEMS 장비와의 데이터 비교분석을 위해 1 Hz 단위로 변환하였다. SEMS의 구체적인 제원은 Table 2에 정리하였다.

PEMS는 Sensors사의 SEMTECH-LDV장비를 사용하였으며, 장비의 구성은 배기가스 분석기, 배기가스 유량계, 배기가스 샘플링 장비 등으로 구성되어 있다. 각 장비를 통해 측정되는 NO_x 배출량은 1초 단위로 측정되며 유량 데이터와 동기화되어 g/s로 변환된다. PEMS의 제원 및 원리는 Table 3에 정리하였으며 Fig. 1은 차량에 탑재된 개략도를 나타내었다.

차대동력계의 배기가스 분석계의 경우 AVL사의 i60 장비를 사용하였으며 가스 측정원리와 측정범위는 Table 4에 정리하였다.

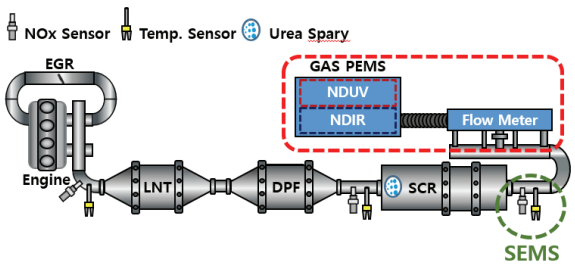

Fig. 1 Schematic diagram of PEMS and SEMS installations

Table 2 Specifications of SEMS and OBD data

	Principle	Range	Logging
NO_x	Amperometric	0～1,500 ppm	0.1 sec
Accuracy	at 100 ppm and 500 ppm (±10 %) at 0 ppm (±6 %)		
OBD signal	Exhaust temperature, Vehicle speed, Mass air flow rate, Fuel flow rate….		

Table 3 Specifications of PEMS

	Principle	Range	Accuracy
CO	Heated NDIR	0～8 vol. %	<±2 % of reading or ≤±0.3 % of full scale
CO_2	Heated NDIR	0～18 vol. %	
NO	NDUV	0～3,000 ppm	
NO_2	NDUV	0～1,000 ppm	
Exhaust flow	Pitot flow meter	0～670 kg/h	<±2 % of reading or ≤±0.5 % of full scale

Table 4 Specifications of chassis dynamometer

	Principle	Range
CO	Heated NDIR	0～2,500 ppm
CO_2	Heated NDIR	0～20 vol. %
NO_x	CLD	0～5,000 ppm

2.3 다양한 실내인증모드

PEMS와 SEMS간의 상관성을 분석하기 위해 수행한 시험 모드는 기존의 경유차 실내인증모드인 NEDC와 새롭게 대체된 WLTC 모드이며 더 많은 조건의 비교분석을 하기 위해 HWFET(고속도로 모드), US06(급가감속 운전패턴 모사 모드)과 같은 모드를 추가로 수행하였다. 또한, WLTC 모드의 경우 냉간 시동 조건과 열간 시동 조건의 시험을 모두 수행하였다. 모드의 주행특성은 Table 5에 요약하였다.

Table 5 Summaries of test modes in laboratory

Mode	Time (sec)	Mileage (km)	Avg. speed (km/h)	Avg. accel (m/s^2)
NEDC	1,180	10.93	33.35	0.374
WLTC	1,800	23.27	46.46	0.391
HWFET	765	16.45	76.92	0.176
US06	596	12.80	72.84	0.605

2.4 RDE 주행 경로

PEMS 장비와 SEMS 장비를 탑재한 실제 도로 주행 시험을 위해 주행 경로는 RDE 규제를 적용하여 한국교통대학교 인근에서 수행하였다. 시험 경로는 도심, 교외, 전용도로 구간으로 구성되며 구간별 주행거리, 주행 점유율, 평균속도, 주행시간 등 규제를 만족하는 것을 확인하였다.[8]

또한, 주행고도에 따른 연구를 진행하기 위해 추가적인 경로인 Local-Road와 UP-DOWN hill에서 연구를 수행하였다.[9] 이러한 경로의 주행특성을 RDE경로의 도심 구간과 비교하여 주행특성은 Table 6에 요약하였다.

Table 6 Trip summaries of RDE Route and UP-DOWN hill and Local road

	Urban	UP-DOWN hill	Local road
Trip distance (km)	29.35	32.75	33.87
Trip duration (min)	66.2	43.8	46.0
Avg. speed (km/h)	26.42	44.86	44.18
Max altitude (m)	96.17	465	103

본 연구에서는 실제 도로 주행에서 NO_x 배출량의 주요 원인인 가속의 영향을 비교 분석하기 위해 상대가속도(RPA, Relative Positive Acceleration)와 비출력(V×a, Vehicle speed per positive acceleration)으로 정의하였다. 이는 2015년 2nd Package에 실제 도로 주행 시험의 각 구간은 적절한 가속도와 출력으로 유지되어야 하는 개념을 제시하고 있다.[8]

RDE주행에 있어서 상대가속도는 다음과 같이 계산한다. 먼저 실시간으로 GPS 속도를 취득하고 다음 식으로 주행거리, 가속도 및 비출력을 계산한다.

$$d_i = \frac{v_i}{3.6} \quad (1)$$

$$a_i = \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2 \times 3.6} \quad (2)$$

$$(v \times a)_i = \frac{v_i \times a_i}{3.6} \quad (3)$$

d_i : distance covered in time step I, [m]
v_i : vehicle speed in time step i, [km/h]
a_i : acceleration in time step i, [m/s^2]

위의 차속을 기준으로 도심($v_i \leq 60$ km/h) 구간에서의 데이터를 식 (4)를 이용하여 주행 구간의 평균차속을 계산한다.

$$\overline{v_k} = \frac{1}{N_t}\sum(v_i)_k \quad (4)$$

N_k : total number of samples of the urban shares

$$\overline{v_k} \le 74.6 : (v \cdot a_{pos})_[95] > (0.136\overline{v_k} + 14.44) \quad (5)$$

$$\overline{v_k} > 74.6 : (v \cdot a_{pos})_[95] > (0.074\overline{v_k} + 18.96) \quad (6)$$

RDE 시험 시 인위적인 정속주행을 제외한 충분한 실제 도로 주행 시험의 동특성을 충족시키기 위해 주행 구간에서 a_i ≥0.1 m/s^2 조건에 해당하는 양의 비출력 ($v \times a_{pos}$) 데이터를 오름차순으로 정렬하고 95 % 백분위수에 해당하는$(v \times a_{pos})_k$ 늘 계산한다. 이 값을 WLTC 데이터로부터 산출된 기준비출력과 비교하여 주행상태를 평가한다. 주행 구간별 평균차속으로 계산한 아래의 비출력 조건에 부합하는 경우 주행 시험은 무효한 것으로 판단한다.

한편, 주행 구간의 평균량의 상대가속도인 RPA는 식 (7)을 이용하여 계산하고 WTLC 데이터로부터 산출된 가속도를 기준으로 RDE 시험의 가속 조건을 평가하며, 각 주행 구간의 평균차속으로 계산되는 아래의 조건에 부합하는 경우 RDE 주행 시험은 무효한 것으로 판단한다.

$$RPA_k = \frac{\sum_j [\Delta t (v \times a_{pos})]_{j,k}}{\sum_j (d_i)_k} \quad (7)$$

$$\overline{v_k} \le 94.05 : RPA_k < (-0.0016\overline{v_k} + 0.1755) \quad (8)$$

$$\overline{v_k} > 94.05 : RPA_k < 0.025 \quad (9)$$

Fig. 2는 위의 식을 기반으로 한국교통대학교 인근 RDE 경로에서 도심 구간과 Local Road에서 SOFT driving과 SEVERE driving 조건에서의 상대가속도와 비출력을 비교하였다.

SOFT driving(온순 주행)은 Local Road에서 방지턱을 제외하고 평균속도를 유지하기 때문에, 낮은 상대가속도와 비출력이 확인된다.

SEVERE driving(과격 주행)의 경우 임의의 가·감속을 반복하여 시험을 수행하였으며 이때 SOFT driving 평균속도를 동일하게 유지하여 과격한 운전패턴을 반영하였다. 그 결과 상대가속도와 비출력 모두 높게 확인된다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 PEMS 장비 유량과 OBD 유량의 상관성 분석

SEMS는 유량계가 없으므로 SEMS의 배기가스 유량을 결정하기 위해서 시험차량의 OBD(자가진단 장비) 데이터를 통해 측정한 흡입 공기 유량 및 연료소모량을 통해 산출한 배기 유량을 확인하였다. 또한, PEMS 장비의 유량계에서 취득한 배기 유량 데이터를 비교하여 상관성을 검증하였다.

Fig. 3은 차대동력계에서 WLTC 모드로 상관성 시험 시 시험차량에서 측정한 OBD 데이터로 산출한 배기 유량과 PEMS 장비에서 측정되는 배기가스 유량 상관성 시험의 결과를 나타낸 그래프이다. 그래프는 선형성을 나타내고 있으며, Pearson 수가 0.9968로 높은 신뢰성을 가지고 있는 것으로 나타났다. RDE 시험도 마찬가지로 위와 같은 OBD를 통한 배기가스 유량을 산출하여 신뢰성을 확인하였다.

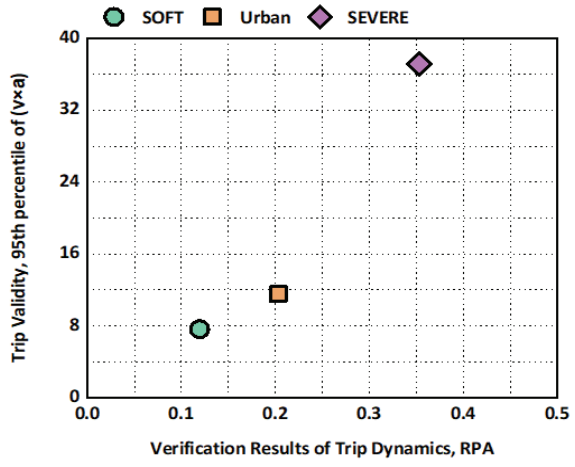

Fig. 2 Comparisons of driving dynamics(V×a) and RPA

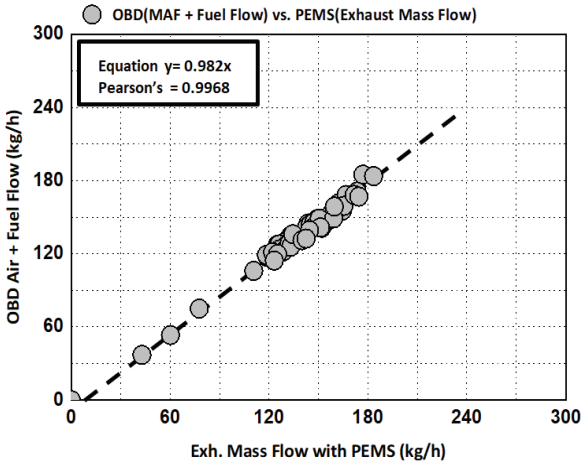

Fig. 3 Correlation of air plus fuel flow on OBD signal with exhaust mass flow measured with PEMS

3.2 다양한 실내인증모드에서의 이동식 배기가스 측정 장비(PEMS, SEMS)와 CVS장비 간 상관성 분석

본 연구에서는 실제 도로 주행 시험 전에 PEMS 장비와 SEMS 장비에서 측정된 데이터의 신뢰성을 검증하기 위해 차대동력계와 두 장비를 동시에 측정하여 비교분석하는 상관성 시험을 진행하였다. 총 5회의 상관성 시험을 수행하였으며 분석한 결과와 결과값을 Table 7, Table 8에 정리하였다. 상관성 시험 시 RDE-LDV 규정에서 제시한 NO_x 배출량(g/km) 오차율 허용기준은 허용 % 가 15 % 또는 절댓값 허용오차가 ±0.015 g/km 이내를 만족하면 상관성 시험이 유효한 결과를 나타낸다고 정의하고 있다.[10)]

Fig. 4는 다양한 실내인증모드에서 차대동력계 기준으로 PEMS 장비와 SEMS 장비에서 측정되는 NO_x 배출량을 측정하였으며, 절댓값 차이에 따른 상관성 분석 결과를 나타내었다. 동시에 PEMS 장비와 SEMS 장비 간의 NO_x 배출량의 상관성 분석을 진행하였다.

시험결과, SEMS의 NO_x 배출량이 상대적으로 높게 측정되어 차대동력계에서의 NO_x 배출량과 상관성 오차 허용 % 기준을 만족하지 못했지만, 절댓값에 따른 허용오차 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

Table 7 Results of NO_x emission

NO_x Corr.	PEMS	SEMS	CVS
	g/km	g/km	g/km
WLTC (Cold)	0.0649	0.0645	0.0689
WLTC (Hot)	0.0401	0.0530	0.0440
NEDC (Hot)	0.0479	0.0408	0.0523
HWFET (Hot)	0.0003	0.0013	0.0008
US06 (Hot)	0.2843	0.3279	0.2650

Table 8 Results of correlation tests for NO_x emission

NO_x Corr.	CVS & PEMS		CVS & SEMS		PEMS & SEMS	
	%	g/km	%	g/km	%	g/km
WLTC (Cold)	6.17	0.004	6.84	0.004	0.63	0.001
WLTC (Hot)	9.86	0.004	16.95	0.009	32.28	0.013
NEDC (Hot)	9.14	0.004	28.26	0.012	14.91	0.007
HWFET (Hot)	210.9	0.001	35.61	0.001	382.8	0.001
US06 (Hot)	6.79	0.019	19.19	0.063	15.33	0.044

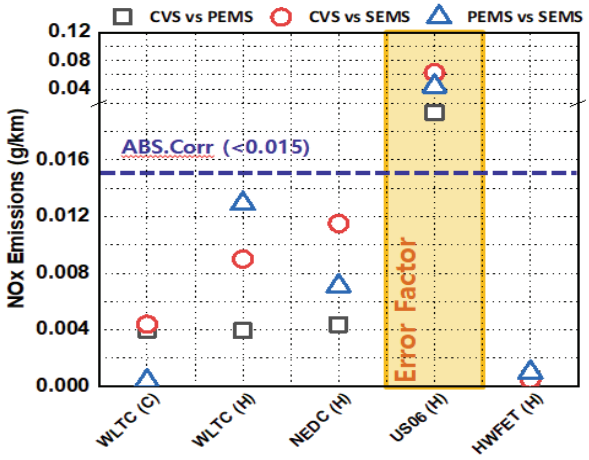

Fig. 4 Correlation of Absolute value NO_x emissions on Portable Measurement Equipments(PEMS, SEMS) and CVS equipment in laboratory test

반면, 급가감속 운전패턴 모사 모드인 US06의 경우 SEMS 장비는 상관성 기준을 만족하지 못하는 것을 확인하였다. 급가속 시 SEMS 장비의 NO_x 배출량이 PEMS 장비의 NO_x 배출량을 상회한다. 그 이유로 SEMS 장비의 NO_x 배출량은 과도한 가・감속에 따라 증가되면서 범용 NO_x 센서의 측정농도범위를 초과하게 된다. 이때 발생하는 NO_x 배출량의 오류값으로 판단된다. 가감속에 따른 PEMS 장비와 SEMS 장비의 NO_x 배출 특성은 3.3절에서 이어서 전술하였다.

3.3 고도 조건 주행에서 PEMS 장비와 SEMS 장비 상관성 분석

고도 조건 주행에서 PEMS와 SEMS 장비에서 측정되는 NO_x 배출량의 상관성을 확인하기 위해 UP-DOWN hill Route에서 시험을 수행하였다.

Fig. 5는 고도의 변화에 따른 UP hill(오르막 구간) 4개의 구간과 DOWN hill(내리막 구간) 4개의 구간에서 측정되는 NO_x 배출량(g/km)의 상관성을 분석하였다. 시험결과, UP Hill 구간에서의 두 장비의 NO_x 배출량은 기울기가 1에 매우 가까운 선형성을 보였고 Pearson 수는 0.9967로 높은 상관관계를 가지는 것을 확인하였다. 반면, DOWN Hill 구간은 기울기가 0.640으로 매우 낮은 상관성을 보였다.

UP hill 구간의 상관성 결과가 낮은 원인을 확인하기 위해 Fig. 6에서 UP hill 구간 중 PEMS 장비와 SEMS 장비에서 측정되는 NO_x 배출량의 상관성을 실시간으로 비교분석을 하였다.

시험결과, NO_x 배출량이 많게 측정되는 부분을 제외

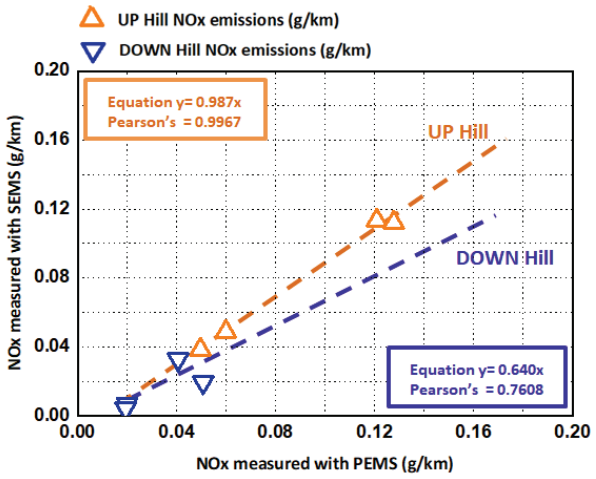

Fig. 5 Correlation of NO_x emissions between PEMS and SEMS in UP-DOWN hill route

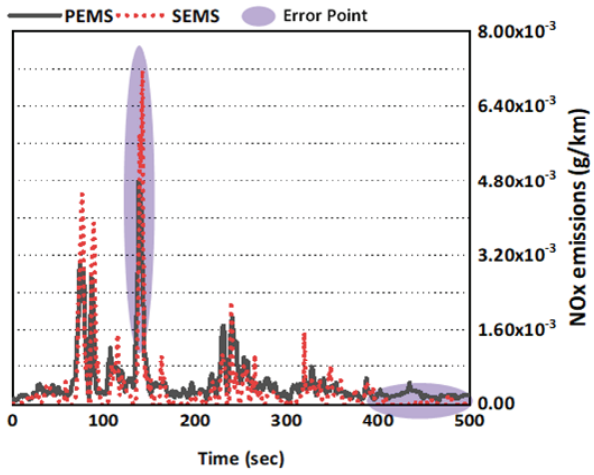

Fig. 6 Measurement error of NO_x emissions of between PEMS and SEMS equipments

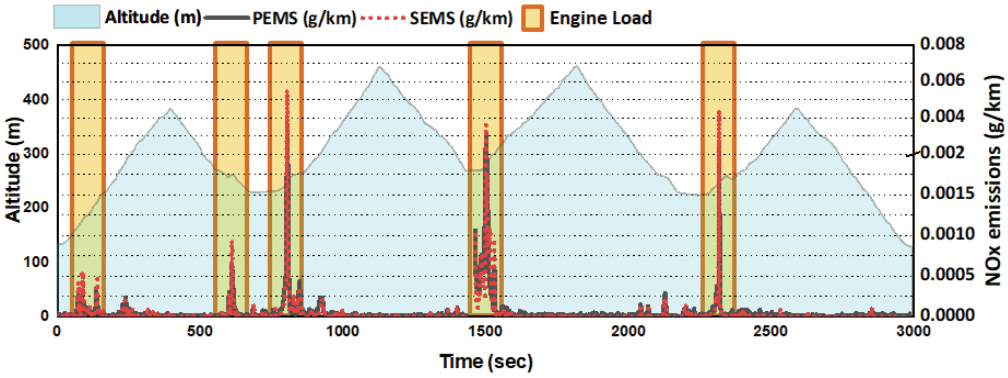

Fig. 7 Comparison of NO_x emissions between PEMS and SEMS in UP-DOWN hill route

한 구간의 경우 SEMS 장비가 PEMS 장비에서 측정되는 NO_x 배출량보다 현저히 적게 측정되었다. 특히, NO_x 배출량이 최댓값을 나타내는 구간은 SEMS 장비의 NO_x 배출량이 더 높게 측정되었다. 이는 UP hill 구간에서 주로 나타났으며, NO_x 배출량이 급격히 증가하는 경우에 발생하는 것으로 판단된다. 반면, NO_x 배출량이 매우 적은 구간의 경우 SEMS 장비의 NO_x 배출량은 0으로 측정되는 것을 확인하였다.

Fig. 7은 주행시간 경과에 따른 고도변화 및 PEMS 장비와 SEMS 장비에서 측정한 실시간 NO_x 배출량을 나타내었다. 또한, 실시간 엔진 부하가 큰 구간을 나타내었다.

시험결과, PEMS 장비에서 측정된 NO_x 배출량은 UP hill 구간에서 DOWN hill 구간보다 2.74배 더 높은 수치가 측정되었다. SEMS 장비에서 측정된 NO_x 배출량의 경우 4.92배로 PEMS 장비보다 더 많은 차이가 나타났다.

이를 토대로 UP hill 구간과 DOWN hill 구간에서의 비출력($v \times a$)과 RPA를 적용하여 두 장비에서 측정되는 NO_x 배출량에 끼치는 영향을 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 8은 경사로에서 엔진 부하와 비출력에 따른 두 장비의 NO_x 배출량의 차이를 확인하였으며, Fig. 9는 차량 속도에 따른 상대가속도에서의 NO_x 배출량의 차이를 확인하였다. 빨간 점일수록 NO_x 배출량의 차이가 크고 파란 점일수록 NO_x 배출량의 차이는 적다. 차이는 절댓값으로 계산되어 표현하였으며, SEMS 장비에서 측정되는 NO_x 배출량이 PEMS 장비에서 측정되는 NO_x 배출량보다 높은 경우 색을 채워 나타내었다.

전체적으로 PEMS 장비의 NO_x 배출량이 SEMS 장비의 NO_x 배출량을 상회하였다. UP hill 구간에서 경사도 때문에 저속에서의 높은 RPM이 다수 측정되었으며, 이에 따른 두 장비에서 측정되는 NO_x 배출량의 차이는 증가했다. 또한, Fig. 9에서도 PEMS 장비의 NO_x 배출량이 SEMS 장비의 NO_x 배출량을 상회하였다. DOWN hill 구간에서 정지구간이 없는 것으로 확인하였다. 이러한 이

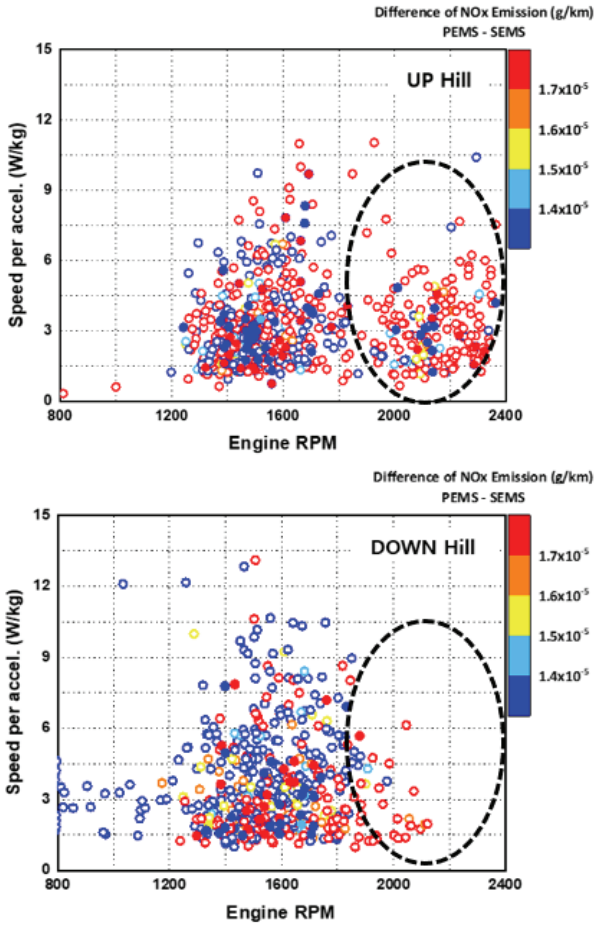

Fig. 8 Effect of vehicle speed per acceleration on NO_x emissions between PEMS and SEMS in UP- DOWN hill route

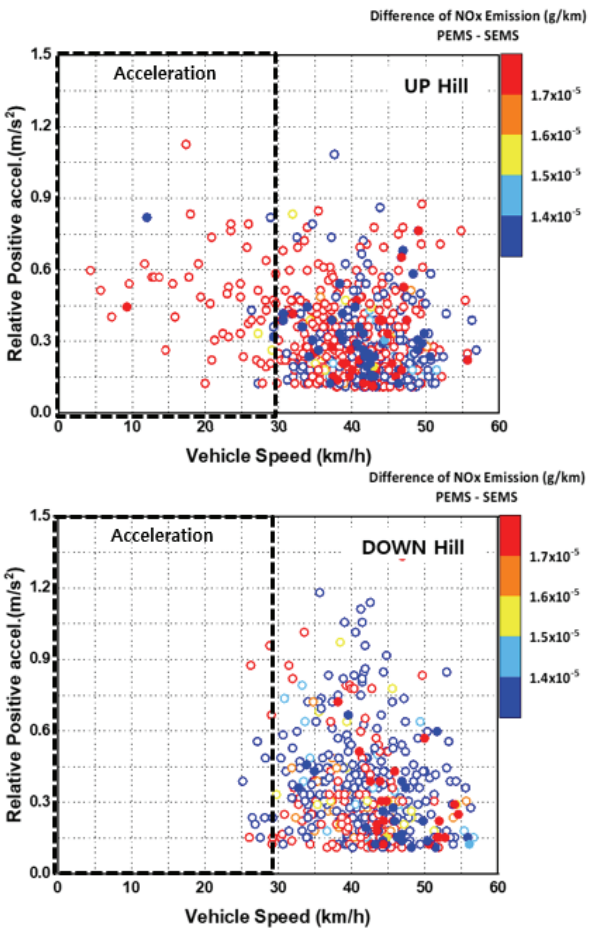

Fig. 9 Effect of vehicle acceleration on NO_x emissions between PEMS and SEMS in UP-DOWN hill route

유로 엔진 부하가 UP hill 구간보다 적은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 엔진 부하에 의해서 NO_x 배출량이 급격히 증가할수록 두 장비에서 측정되는 NO_x 배출량의 오차는 증가하는 것을 확인하였다.

하지만, SEMS 장비에서 측정되는 NO_x 배출량이 PEMS 장비에서 측정되는 NO_x 배출량보다 많게 측정되는 구간을 확인하였다. 이러한 결과는 UP hill과 DOWN hill의 커브 길에 따른 가・감속이 발생하는 지점에서 엔진 부하로 확인되었다. 가・감속 조건에 따른 두 장비 간 NO_x 배출량 분석은 3.3절에서 이어서 전술하였다.

3.4 가・감속 주행 조건에서 PEMS 장비와 SEMS 장비 상관성 분석

본 연구에서는 Local road에서 가・감속의 영향에 따라 PEMS 장비와 SEMS 장비 간의 NO_x 배출량의 상관성을 분석하기 위해 SOFT driving(온순 주행)과 임의적인 가・감속을 반복하여 SEVERE driving(과격 주행) 시험을 수행하였다.

Fig. 10은 Soft driving 조건과 Severe driving 조건에서의 상관성 분석을 수행하였다. SOFT driving에서 두 장비의 NO_x 배출량은 유사하게 측정되었으며, SEVERE driving 조건에서 SEMS 장비의 NO_x 배출량이 기울기가 3.661로 4배 가까이 높게 측정되는 것을 확인하였다. 반면, SOFT driving과 SEVERE driving 조건 모두 결정계수가 0.8976 이상으로 높은 것을 확인하였다.

결과적으로 Fig. 11처럼 가・감속이 일정 수준을 초과하고 주행 중의 가속이 이루어지는 경우 SEMS 장비의 NO_x 배출량이 증가하였다. 또한, 두 장비 간 NO_x 배출량의 오차는 상관성 결과에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이는 Amperometric 분석 방법을 적용하는 SEMS 장비는 NO_x 범용 센서를 통해 NO_x를 측정하기 위해 Sample할 때의 NO_x 배출량의 농도가 급격히 높아지는 과정에

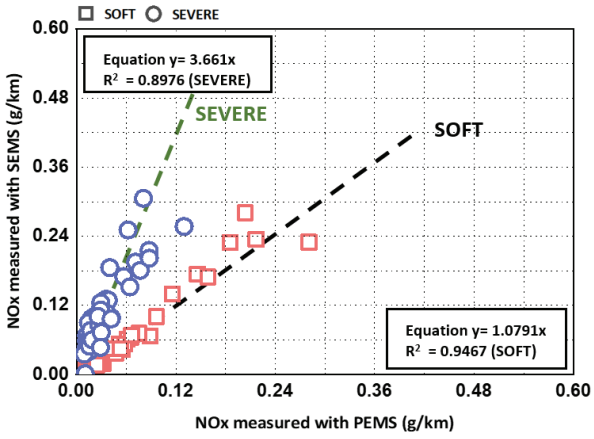

Fig. 10 Correlation of NO_x emissions between PEMS and SEMS in driving pattern

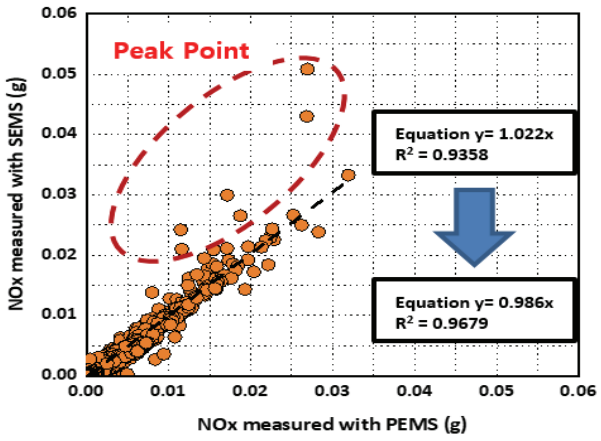

Fig. 12 Correlation of NO_x emissions between PEMS and SEMS in RDE (Urban)

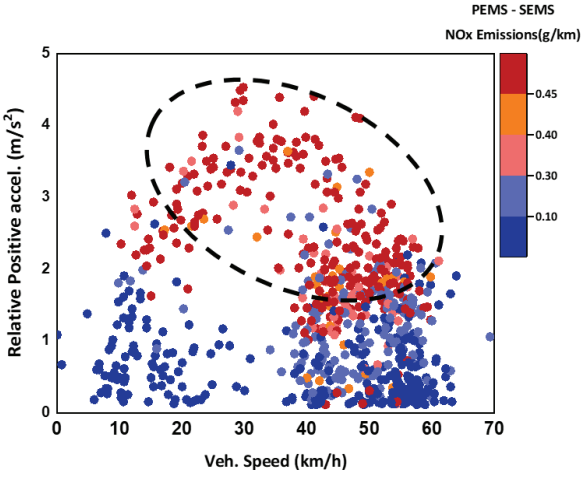

Fig. 11 Compared with NO_x emissions between PEMS and SEMS (SEVERE condition)

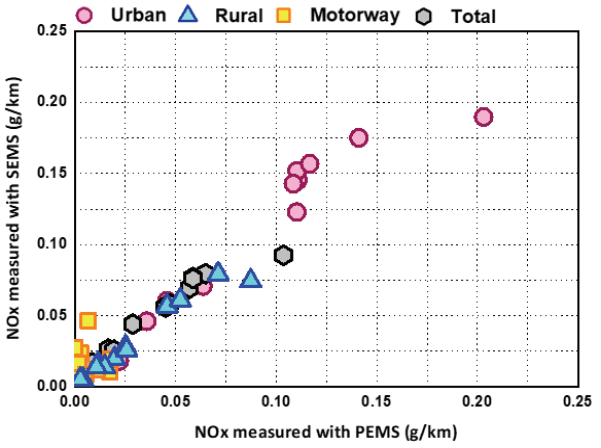

Fig. 13 Correlation of NO_x emissions between PEMS and SEMS in RDE (12 DATA)

서 O_2 측정범위의 한계로 판단된다.[11]

하지만, SEVERE driving 조건의 경우 도심 구간 RDE 시험의 비출력에 비해 4배 이상 차이 나는 이상적인 가혹 주행 조건이다. 따라서 실제 도로 주행과 비출력 및 RPA가 유사한 SOFT driving 조건처럼 SEMS 장비를 RDE 시험에 적용하는 것은 가능할 것으로 판단된다.

3.5 실제 도로 주행 시 PEMS 장비와 SEMS 장비 상관성 분석

본 연구에서는 UP-DOWN hill route와 Local road에서의 결과를 적용하여 RDE 시험을 수행하였다. Fig. 12는 RDE 시험에서의 도심 구간에서의 PEMS 장비와 SEMS 장비의 NO_x 배출량을 실시간으로 상관성 분석을 수행한 결과이다. 두 장비 간 NO_x 배출량의 기울기는 1.022이고 결정계수가 0.9358로 상관성이 높은 것을 확인하였다. 다음 Peak Point 지점은 NO_x 배출량의 최댓값이며, PEMS 장비와 SEMS 장비에서 측정되는 NO_x 배출량의 차이를 확인하였다. 이러한 Peak point를 제거하고 다시 상관성 분석을 수행한 결과, 기울기가 0.9358로 상관성이 다소 낮아지고 결정계수는 0.9679로 높아지는 것을 확인하였다.

Fig. 13은 위의 결과를 토대로 RDE의 각 구간을 구분하여 상관성 시험 결과를 나타내었다. 시험은 총 12번 RDE 시험을 수행하였다. Table 9에 각 구간의 상관성 분석 결과를 요약하였다.

시험결과, 도심 구간과 교외 구간의 경우 기울기가 1에 가까우며 결정계수가 0.9 이상으로 매우 높은 상관성을 보이는 것을 확인하였다. 전용도로 구간의 경우 상관

Table 9 Summaries of correlation analysis of NO_x emissions according to trip section

	Urban	Rural	Motorway	Total
Equation	1.069x	0.9599x	0.1433x	0.9274x
Pearson's r	0.9115	0.9503	0.0048	0.9207

성이 매우 낮은 것을 확인하였다. 전용도로 구간의 경우 도심 구간과 교외 구간과 비교하면 가・감속하는 구간이 비교적 적기 때문에 NO_x 배출량이 50 ppm 이하로 매우 낮게 측정되었다. PEMS 장비의 평균 NO_x 배출량은 0.006 g/km이고 SEMS 장비의 평균 NO_x 배출량은 0.015 g/km로 측정되었다.

하지만, 두 장비 간 NO_x 배출량의 절대오차는 0.0092 g/km도 상관성 기준을 만족하는 것을 확인하였다. 총 NO_x 배출량의 경우 전용도로 구간의 영향을 받아 기울기가 0.9274로 도심 구간과 교외 구간에 비해 다소 낮지만, 절대오차가 0.0099 g/km도 상관성 기준을 만족하는 것을 확인하였다. 전용도로 구간에서 SEMS 장비의 NO_x 배출량이 다소 높게 측정되는 이유는 PEMS 장비와 달리 Amperometric 분석방법은 NO, NO_2 이외의 질소산화물이 NO_x 센서 내부에서 O_2를 발생하는 데 그 예로 NH_3가 있다. 식 (10)과 같이 NH_3는 NO가 되어 영향을 NO_x 배출량의 영향을 끼치는 것으로 판단된다.[12] 하지만 그 영향은 매우 적기 때문에 SEMS 장비를 RDE 시험에 적용하였을 때 신뢰성을 검증하였다.

$$4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O \quad (10)$$

4. 결 론

본 연구에서는 경유 차량 1대를 대상으로 PEMS 장비와 SEMS 장비 NO_x 배출량을 동시에 측정하였으며, 실제 도로 주행에서 SEMS 장비를 적용하기 위해 다양한 실내 인증모드와 도로 경사도 및 인위적인 가・감속 조건을 반영하여 시험을 수행하였다.

1) 차대동력계에서 PEMS 장비, SEMS 장비의 NO_x 배출량을 동시에 취득하여 비교분석을 한 결과, SEMS의 NO_x 배출량이 상대적으로 높게 측정되며, 절댓값에 따른 허용오차 기준을 US06 모드를 제외하고 모든 모드에서 만족하는 것을 확인할 수 있다.
2) 도로 경사도 조건에서 PEMS 장비와 SEMS 장비의 NO_x 배출량을 취득하여 상관성을 비교분석을 한 결과, DOWN hill의 경우 NO_x 배출량이 적어 기울기와 결정계수 모두 낮은 것을 확인하였다. 이는 낮은 농도의 NO_x 배출량에서 SEMS 장비의 측정오류를 확인하였다.
3) 가・감속 조건에서 PEMS 장비와 SEMS 장비의 NO_x 배출량을 취득하여 상관성을 비교분석을 한 결과, SEVERE driving 조건에서 NO_x 배출량은 SOFT driving 조건의 NO_x 배출량과 비교하면 기울기 4배 높게 측정되었다. 이는 가・감속에 따른 SEMS 장비에서 NO_x 배출량의 최댓값이 측정 오류로 확인하였다.
4) 실제 도로 주행에서 도심, 교외, 전용도로 구간으로 나누어 데이터를 모니터링한 결과, 가・감속이 비교적 높은 도심, 교외 구간에서 NO_x 배출량이 많게 측정되어 다른 구간에 비해 높은 상관성을 확인하였다. 전용도로 구간은 DOWN hill 구간과 유사하게 농도가 적은 NO_x 배출량이 측정되어 상관성이 맞지 않는 것으로 확인하였다. 총 NO_x 배출량의 경우 절대오차를 비교하면 상관성 결과가 허용기준을 만족하는 것을 확인하였다. 전용도로 구간의 영향은 매우 적은 것으로 판단되며 SEMS 장비의 적용의 신뢰성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단(2019R1I1A3A0106277112)과 한국산업기술평가관리원(K_G012000276203)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1) EIA, Report of Annual Energy Outlook, https://www.eia.gov/outlooks/aeo/tables_ref.php, 2019.
2) Continental, Worldwide Emission Standards and Related Regulations-Passenger Cars/Light and Medium Duty Vehicles, 2019.
3) M. Weiss, P. Bonnel, R. Hummel, U. Manfredi, R. Colombo, G. Lanappe, P. Le Lijour and M. Sculati, Analyzing On-road Emissions of Light-duty Vehicles with Portable Emission Measurement System(PEMS), EUR 24967 EN ISBN 978-92-79-19072-8, 2011.
4) Commission Regulation(EU) 2018/1832, Amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation(EC) No 692/2008 and Commission Regulation(EU) 2017/1151 for the Purpose of Improving the Emission Type Approval Tests and Procedures for Light Passenger and Commercial Vehicles, Including those for in-service Conformity and Real-driving Emissions and Introducing Devices for Monitoring the Consumption of Fuel and Electric Energy, 2018.

5) F. Heepen and W. Yu, “SEMS for Individual Trip Reports and Long-Time Measurement,” SAE 2019-01-0752, 2019.
6) N. E. Ligterink, G. Kadijk and J. Spreen, NO_x Emissions of Fifteen Euro 6 Diesel Cars: Results of the Dutch LD Road Vehicle Emission Testing Programme, 2016.
7) B. H. Lee, B. S. Yun, J. W. Jung, D. J. Kim, W. S. Cha, S. W. Lee and I. G. Kim, “Study on NO_x Emission Characteristics of Diesel Light Duty Vehicles by Analyzing Massive Driving Data,” Transactions of KSAE, Vol.26, No.5, pp.684-692, 2018.
8) National Institute of Environment Research, Evaluation of Real Driving Emissions(RDE-LDV) with Light-Duty Vehicles(LDVs) - Research on Introduction of 3rd RDE Package, NIER-SP2017- 215, 2017.
9) J. P. Cha, Y. S. Yu, D. I. Lee and M. S. Chon, “RDE Characteristics of Euro 6 Light Duty Diesel Vehicles Regarding to Driving Conditions,” Journal of ILASS-Korea, Vol.22, No.4, pp.218-224, 2017.
10) Commission Regulation(EU) 2017/1151, Validation of PEMS and Non-traceable Exhaust Mass Flow Rate, 2017.
11) J. M. Rheaume, Solid State Electrochemical Sensors for Nitrogen Oxide (NO_x) Detection in Lean Exhaust Gases, Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley, 2010.
12) MHI Power Control Systems Limited Company, https://cs.power.mhi.com/en/products/diasys/detail/diasys_pro_denitration.html, 2012.