Transactions of KSAE, Vol. 29, No. 9, pp.811-821 (September, 2021)

Check for updates

Copyright © 2021 KSAE / 190-02
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2021.29.9.811

운행 경유차용 매연 원격측정기(RSD) 국산화 개발 및 현장 적용성 시험에 관한 연구

최 동 환[1] · 이 승 훈[1] · 김 계 현[2] · 류 한 규[2] · 최 기 봉[3] · 오 상 기[4] · 김 승 열[*1]

한국산업기술시험원 환경기술본부[1] · 자스텍 기업부설연구소[2] · 와보텍 기업부설연구소[3] · 경기과학기술대학교 자동차과[4]

A Study on the Domestic Development and Field Application Test of Smoke Remote Sensing Device(RSD) for In-use Diesel Vehicle

Donghwan Choi[1] · Seunghoon Lee[1] · Gyehyun Kim[2] · Hankyoo Ryoo[2] · Kibong Choi[3] · Sangki Oh[4] · Sunglyul Kim[*1]

[1]Environmental Technology Division, Korea Testing Laboratory, 87 Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul 08389, Korea
[2]Affiliated Research Center, Jastec Corp., 42 Hongnanpa-gil 87beon-gil, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi 18278, Korea
[3]Corporate Research Institute, Wabotech Corp., 127 Beobwon-ro, Songpa-gu, Seoul 05836, Korea
[4]Automobile Department, Gyeonggi University of Science and Technology, Gyeonggi 15073, Korea
(Received 1 April 2021 / Revised 10 May 2021 / Accepted 21 May 2021)

Abstract：In this study, we domestically developed a smoke remote sensing device of open-path light transmission type that can remotely measure the smoke concentration generated from an in-use diesel vehicle. The developed analyzer adopts a multi-channel optical path type by a light source of sufficient power and beam splitters, which can be used versatilely regardless of vehicle model. Measurement accuracy was secured through high performance optical sensors and signal stabilization. The laboratory test results of the developed analyzer show a sufficient correlation with the reference analyzer (r^2=0.586), which is comparable to the performance of a benchmarked foreign analyzer. However, as a result of the field test, the correlation coefficient was as low as 0.320 on flat road conditions and 0.125 on slope road conditions, and the correlation was lower on a smoke-rich condition. Thus, additional performance improvement is required to be widely utilized in the in-use vehicle management policy of the Ministry of Environment.

Key words：Smoke remote sensing device(매연 원격측정기), Smoke(매연), Light transmission smoke meter(광투과식 매연측정기), In-use diesel vehicle(운행경유차), Particulate matter(미세먼지), Open-path measurement(개방 경로 측정)

Nomenclature

a	: acceleration, m/s^2
C	: percentage concentration of smoke, %
I	: intensity of light
k	: extinction coefficient according to smoke concentration, 1/mm
l	: the distance between front and rear sensor of speed / acceleration measuring unit, m
L	: optical path length, mm
n	: sampling data size
T	: transmittance of light
V	: velocity, m/s
x	: measured value from smoke remote sensing device
y	: measured value from reference analyzer

Subscripts

i	: data number according to test time
o	: incident light
t	: transmitted light

*Corresponding author, E-mail: kslok@ktl.re.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.

1. 서 론

국내 대기환경에 대한 국민관심도는 점차 증가하고 있으며, 특히 최근에는 미세먼지 이슈가 점차 부각되고 있다. 이에 2016년 6월 정부 관계부처 합동 '미세먼지 관리 특별대책' 발표,[1] 2017년 9월 '미세먼지 관리 종합대책 및 로드맵 수립[2]' 등의 범정부 차원의 노력이 경주되고 있으며, 그에 따라 미세먼지 환경 기준 강화와 각종 저감 정책들이 발효 및 실행되고 있다. 이 중 도로이동오염원(차량)에서 발생하는 매연으로 인한 미세먼지가 국내 미세먼지 발생량의 20 %를 차지하며, 수도권에서는 미세먼지 발생의 가장 높은 원인으로 조사[3]되는 만큼 경유 차량에 대한 미세먼지 대책이 정부 대책의 주를 이루고 있다.[2]

차량에서 기인하는 매연의 대부분은 경유 엔진 차량으로부터 발생하며, 이에 환경부는 경유 차량에 대해 신규 제작차 규제와 운행차(In-use vehicle) 관리제도를 통해 오염물질 배출 감소를 위한 적극적인 노력을 경주하고 있다. 제작차 중, Euro 4와 동등 혹은 상위 규제가 적용된 2008년 식 이후 차량의 경우에는 매연(PM) 배출량 규제를 만족시키기 위해 배기가스 저감장치(Diesel Particulate Filter, DPF) 등의 후처리 장치를 별도로 설치하여야 한다.[4] 이러한 노력 덕분에 2015년 식 이후 차량인 Euro 6 차량의 경우 0.01 g/kWh 이하로 매연이 발생하여야 하며, 이는 아래 그림과 같이 후처리 장치가 별도로 장착되기 전인 Euro 3 및 이전의 규제 대비 1/10 이하 수준이다. 현행 규제 수준 대비 완화된 수준의 규제가 적용된 운행 경유차의 경우에는 노후 경유차 조기폐차 지원금 제도, 노후 경유차 운행제한 제도(Low Emission Zone, LEZ), 배출가스 저감장치 부착 지원 등의 친환경차 전환 관련 행정지원 제도[5]와, 주기적인 경유차 정기 · 정밀검사, 노상 배출가스 수시단속 검사 등의 지속적인 매연 검사[6]를 통해 제작차 인증 단계의 검증 및 관련 행정제도의 유효성 지속 여부를 검사함으로써 국내 대기환경 유지에 힘쓰고 있다.

그러나 이러한 적극적인 노력에도 불구하고 차량 노후화 혹은 인위적인 배출가스 후처리장치 조작 등으로 인해 매연 과다 배출사례들이 발생하고 있다. 제작차 인증 단계에서의 배출가스 조작사건,[7] 매연 후처리장치 파손에 따른 매연 과다 배출 문제,[8,9] 운행 경유차 정기 · 정밀검사 조작 가능성[10] 등은 운행차 에 대한 꾸준한 감시가 필요함을 시사하고 있다. 이에 한국환경공단 및 지방자치단체를 중심으로 운행차 수시점검 제도를 운영하고 있으며, 기존에는 강제정차식 배출가스 점검과 비디오 카메라를 이용한 배출가스 원격 점검 방식이 주로 사용되어져왔다. 전자는 운행 중인 차량을 불시에 갓길로 유도 정차시킨 후 배기관에 광투과식 매연측정기를 삽입하여 무부하 급가속 조건에서 배출가스를 측정하는 방식으로, 실제 운전 조건의 반영이 어렵고 점검 대수에 제한이 많으며 추돌 사고 위험성이나 운전자의 불편이 발생한다는 단점이 있다. 후자의 경우에는 인력 소요가 적고 운전자의 불편함이 발생하지 않으나, 매연측정 단위가 농도(%)가 아닌 SF단위(Smoke Factor)로 계측되어 매연농도(%)로 환산이 불가한 문제점이 있다. 이에 환경부에서는 운행차 매연 원격측정기(Smoke remote sensing device)를 통한 운행차 관리를 추진해오고 있다.

운행차 매연 원격측정기는 Fig. 2와 같이 램프 진입 구간 등의 단차선 도로 양쪽에 광원 및 광량 배분 모듈 등으로 구성된 광원부 모듈과 광학 수신 모듈 및 검출 모듈 등으로 구성된 수신부 모듈을 도로 양쪽에 설치한 후, 차량 통과 시 배출가스 플럼(Plume) 내 매연 농도에 따른 광량 감소율을 측정하고 이를 매연 농도로 환산함으로써 통과 차량의 매연 농도를 계측하는 시스템이다. 이를 통해 매연측정값과 차량 번호판 인식시스템을 통해 식별된 차량 정보를 종합하여 한국환경공단 자동차 배출가스 종합전산시스템(MECAR) 등으로 전송하며 이러한 방식을 통해 측정지점 한 개소 당 수 천 대 이상의 차량

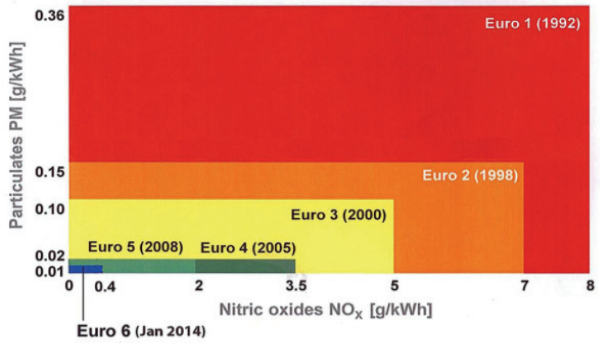

Fig. 1 EU emission standard

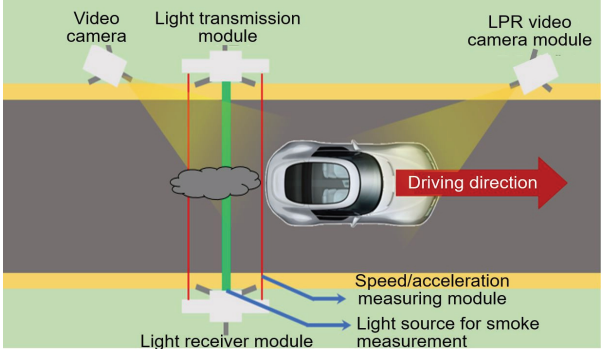

Fig. 2 Schematic of smoke remote sensing device

매연을 계측할 수 있다. 이에 고배출 차량 선별뿐만 아니라 장기간 빅데이터 수집을 통한 환경부 정책 효용성 평가[11] 등 활용성이 상당하며, 무인운용을 통한 검사자 안전문제도 해결할 수 있다. 또한 측정기기의 정확도에 대한 인증이 환경측정기기 성능시험・정도관리 고시에 의해 관리되는 만큼 측정 정확도에 대한 신뢰성을 보장할 수 있다.

다만 매연 원격측정기를 상용화 개발한 국가는 현재까지 중국이 유일하며, 전 세계적으로 가스상 배출물질에 대한 원격측정장비에 비해 그 사용 사례 또한 많지 않다. 그럼에도 불구하고 환경부에서는 여러 시범용역사업을 통해 매연 원격측정기의 현장 적용 타당성을 검증하였고 정책적 효용성에 대해서도 이미 충분한 검증을 진행한 상황이므로, 향후 정책 도입을 대비한 국산장비 마련이 시급하다.[12] 이에 본 연구를 통해 국내 최초로 매연 원격측정기를 개발함과 동시에 시험실 시험 및 현장 시험을 통한 개발 장비의 현장 적용 타당성을 평가하였다.

2. 매연 원격측정기 국산화 개발

매연 원격측정기는 광원부 모듈 등 주요 하부 모듈의 신호 송・수신 정보를 바탕으로 유기적으로 구현되는 단일 시스템이라고 할 수 있다. 각 모듈 제작 시 국내 조달이 가능한 부품을 채용하여 국산화율을 제고하였고 이에 대한 세부 개발 내용을 상술하였다. 매연 RSD는 전 세계적으로 중국의 특정 회사 제품이 유일하며, 해당 제품과 동일한 다채널 광투과 방식을 벤치마킹하여 매연 원격측정 시스템을 개발하였다. 광산란 방식 또한 고려할 수 있으나, 기존 운행차 수시점검에 사용되는 광투과 방식 측정장비와의 특성 부합화를 위해 광투과 방식이 적합하다고 할 수 있다. 또한 시험실 및 현장 시험을 바탕으로 개발 장비와의 성능을 비교분석 하였다.

2.1 매연 원격측정기 원리 및 개발 개요

2.1.1 매연 원격측정기 원리

2.1.1.1 광투과식 매연측정 원리

차량 배기구로부터 형성된 배출가스 플럼 내 존재하는 매연에 의한 선택적인 파장 대역의 광 감량을 정량적으로 계측한 후 아래와 같은 비어램버트의 법칙(Beer-Lambert's law)에 따른 공식으로 매연 농도를 산출한다. 식 (1)에 따라 투과도(T)가 계산되며, 이는 매연 농도에 따른 흡광계수(k)에 반비례한다. 이때 퍼센트 매연농도(C)는 식 (2)와 같이 계산할 수 있으며, 이는 광투과식 매연측정기의 대표적인 계측값으로 활용되는 파라미터이다. 이때 광경로는 광투과식 매연측정기의 측정셀의 설계 요건에 따라 결정되므로 광원부에서 발광한 광량 대비 수광부에서의 수광 세기를 계측할 수 있다면 매연 농도를 산출할 수 있다.

$$T = \frac{I_t}{I_0} = e^{-kL} \tag{1}$$

$$C = (1 - T) \times 100 \tag{2}$$

2.1.1.2 매연 원격측정기 작동 원리

매연 원격측정기는 아래의 네 가지 주요 모듈로 구성된 측정 시스템이라고 할 수 있다. 각 모듈의 주요 기능은 아래와 같으며, 서로 유기적으로 신호를 주고받음으로써 다량의 운행차 매연 농도를 계측하고 이를 중앙 서버로 전송하는 기능을 수행한다.

① 광원부 모듈 : 광원으로부터 가시광을 발광하여 매연 농도에 따른 광 감쇄를 유발

② 수신부 모듈 : 광원부로부터 발생된 가시광원을 수광하여 신호의 세기를 측정한 후 이를 이용하여 매연 농도 산출 수행

③ 속도/가속도 측정 모듈 : 통과 차량의 속도 및 가속도를 계측하고 이를 통해 비출력(Vehicle Specific Power, VSP)을 계산하는 모듈로서 이를 통해 계측 데이터 유/무효 판별과 매연 계측 시점 결정 기능을 수행

④ 차량번호 인식 모듈 : 통과 차량의 차량 번호판 정보를 인식하여 데이터화함과 동시에 이를 계측된 매연 농도값과 연계하여 중앙 관리 서버로 전송하는 기능을 수행

Fig. 2와 같이 차량이 통과하면 우선 속도/가속도 측정 모듈을 통해 속도 및 가속도를 계측하고 이를 통해 산출된 비출력 값을 산출하며, 매연농도 계측을 실시하게 된다. 내장 알고리즘에 따라 계측 시점이 결정되며, 해당 시점에 광원부로부터 발광 및 수신부로부터 수광 및 검출된 신호 세기를 통해 매연 농도 산출이 곧바로 진행된다. 동시에 차량번호 인식 모듈을 통한 차량번호 인식 데

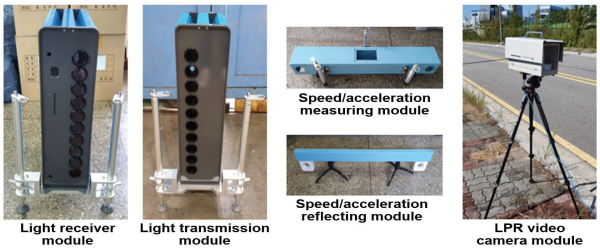

Photo. 1 Main modules of smoke remote sensing device

이터를 취득한 후 차량별 취득된 모든 데이터를 데이터베이스화 하여 자동차 배출가스 종합전산시스템으로 전송한다.

2.1.2 매연 원격측정기 개발 개요

2.1.2.1 주요 기술적 특징

① 다채널 광학계 구현 : 매연 원격측정기를 통과하는 차량은 차종에 따라 바닥으로부터 배출구가 위치하는 높이가 다르므로 단일 광학계를 사용할 경우 배기구 높이에 따른 측정값이 상이하여 측정 신뢰도가 현저히 낮아진다. 이에 여러 차량의 배출구 높이를 폭넓게 고려할 수 있도록 10개의 다채널 광원으로 구성될 수 있도록 내부 광경로를 설계 및 구현하였다.

② 개방 광경로(Open path) 보완 : 원격측정에 따라 개방 광경로 방식의 측정이 불가피하며, 이때 폐쇄 광경로 방식(Close path)에 비해 영점(Zero) 및 교정값이 시간이 지남에 따라 초기 설정값에서 벗어날 수 있는 가능성이 크다. 이에 주기적인 자체 영점 조정 및 검증(Audit)을 실시할 수 있도록 표준 매연 필터 및 자동 교정 기구부를 내장하여 주기적인 자동 검증 기능 및 자동 영점조정 기능을 구현하였다. 또한 신호 안정성을 보완하여 광원부-수신부 모듈 간 이격거리 8 m까지 측정이 가능하도록 제작하였다.

③ 단일 광경로 측정 방식 구현 : 도로 건너편에 반사 모듈 설치를 통한 이중 광경로 측정방식의 경우 충분한 광감쇄가 가능하여 신호 안정성 측면에서 장점이 있으나, 광원부 모듈 구조가 복잡해지고 설치 시 광축 정렬이 어려워 운용성이 떨어진다. 이에 단일 광경로 방식의 매연 RSD 제작을 통한 각 모듈 구조 간단화를 통한 경량화, 광축정렬 용이화, 배터리 전원 탑재를 통해 운용성이 크게 개선되었다. 또한 충분한 광 감쇄 및 광량 감응이 가능하도록 광원의 출력 증가, 광센서 감도 강화를 통해 측정기기 측정 안정성 또한 확보하였다.

2.1.2.2 제원 및 목표 성능

매연 원격측정기의 주요 제원은 Table 1과 같다. 광원부 모듈은 520 nm 녹색광을 사용하며, 내부 반사경 및 빔 스플리터(Beam splitter)를 통해 다채널 광경로를 구현하였다. 수신부 모듈은 520 nm 파장대역에 선택적 감응 부품을 사용하여 정확도를 확보하였다.

목표성능은 Table 2를 통해 확인할 수 있으며, 정확도 관련 기준은 관련 법정 고시 기준과 동일하게 선정하였다. 추가적으로 현장 상황과 운용성을 고려하여 충분한 이격거리와 데이터 취득 속도, 차량속도 인식범위, 차량번호 인식률을 달성할 수 있도록 목표 설정하였다.

Table 1 Specifications of smoke RSD

Light transmission module	
Laser source module	Wavelength : (520 ± 10) nm Output Power : 30 mW Input Voltage : 5 V DC
Light reflection mirror	Size : 60 mm × 50 mm
Beam splitter	Size : 60 mm × 50 mm (520 nm Coating)
Light receiver module	
Optical sensor	Type : Silicon PN Photodiode Viewing angle : ± 50 ° Sensitivity : 9 nA/lx
Focusing lens	Size : ø 25~40 mm / 520 nm
Optical filter	Size : ø 12~15 mm Transmittance : 70~80 % Bandwidth selectivity : 420~675 nm (peak : 565 nm)
Speed/acceleration measuring module	
Light source	Laser type (40 mW, 650 nm(red))
Sensor	Photo diode type (8ch)
Operating humidity range	15 %~90 % (R.H.)
Vehicle license plate number recognition module	
Camera resolution	1280 × 720, HDTV 720 p
Camera sensitivity	Color : 0.6 lx B/W : 0.03 lx
Shutter speed	1/10000 sec

Table 2 Objective performances of smoke RSD

Performance index	Objective performance
Measurement range	0~100 % (smoke concentration)
Linearity	< ± 10 %
Repeatability	< ± 10 %
Minimum resolution	1 %
Light transmission - receiver module maximum distance	8 m
Data acquisition speed	> 100 Hz
Measurable vehicle speed	10~110 km/h
Vehicle plate number recognition accuracy	> 85 %

2.2 매연 원격측정기 개발 주안점

2.2.1 광원부 개발

2.2.1.1 광원 선정

광원은 Photo. 2와 같이 매연 농도 특성을 반영할 수 있는 파장대역인 520 nm 녹색광을 발광하는 레이저 방식의 모듈을 선정하였으며, 노이즈 대비 충분한 광 감응이 발생할 수 있도록 충분한 출력을 가진 제품을 선정하였다. 또한 광원의 안정적인 세기를 유지하는 것이 중요하며 전원 안정화 회로 적용 등을 통해 이를 실현하였다.

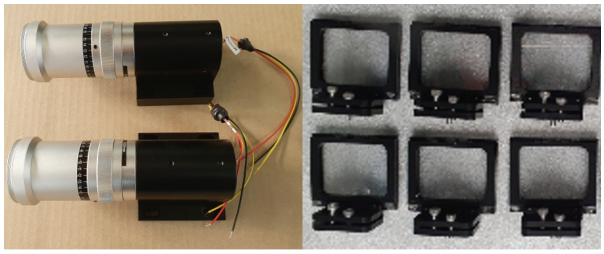

Photo. 2 Laser source module(left) and beam splitter(right)

2.2.1.2 다채널 광량 배분을 위한 광로 설계

매연 원격측정기를 통과하는 차량은 차종에 따라 바닥으로부터 배출구가 위치하는 높이가 다르므로 다채널 광경로의 구현이 필요하다. 개발품은 총 10개의 다채널 광경로를 구현하였으며, 그에 따라 광경로가복잡해진다. 그럼에도 불구하고 광량 감소 효과를 제거하고 안정적인 광경로를 보장하기 위한 설계방안을 적용하였고, 균일한 광량 분배를 위해 적절한 제원의 빔 스플리터를 선정함으로써 측정 정확도를 확보하였다.

2.2.2 수신부 모듈 개발

2.2.2.1 광센서 모듈 선정 및 신호 안정화

Photo. 3의 광센서 모듈 선정 시 충분한 감응면적을 확보하여 광 감응 신호 정확도를 개선하고자 하였다. 또한 감응 가능 입사광의 입사각도 범위가 넓은 부품을 선정

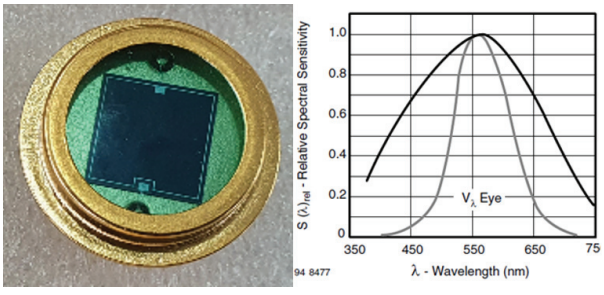

Photo. 3 Optical sensor(left) and bandwidth filter characteristic (right)

함으로써 신호 감도가 향상되었고 광축 정렬 또한 용이해져 실제 시험자의 설치 관련 현장운용성이 개선되었다. 수광 신호에 대한 노이즈 제거 및 감도 제어를 위하여 로우패스필터를 적용하였으며 수신부 입력부에 가변저항을 적용하여 수광신호의 세기를 조절할 수 있도록 하였다. 또한 고속 수신 데이터를 평균산출하여 데이터 노이즈를 보완하도록 하였다.

2.2.2.2 광학필터 선정

일사광선 등의 외부광원의 영향을 최소화시키기 위해 Photo. 3과 같은 사용광원의 파장대역만을 선택적으로 투과시킬 수 있는 광학필터를 적용하였다. 또한 높은 투광율 달성을 위해 광원의 파장대역에 대한 선택적 은나노 AR코팅(무반사 코팅)을 수행하였으며, 이에 70-80 % 수준의 광학필터 투광율을 확보하였다. 이 외, 수광부의 수신감도를 높이기 위하여 광원부에 적용한 빔 익스팬더(Beam expander)의 집광성능을 개선하고 수신된 광원의 크기를 최적화 하여 광원의 세기를 최대로 확보하였다.

2.2.3 속도/가속도 측정 모듈 개발

2.2.3.1 속도/가속도 측정 원리 및 모듈 개발

우선 일정 거리를 가지고 설치된 서로 다른 2개의 측정센서에서 차량 앞바퀴와 뒷바퀴가 지나가는 시간을 계측하여 아래의 식 (3)과 (4)를 통해 속도 및 가속도를 산출한다.

$$V = \left(\frac{l}{T_2 - T_1}\right) \tag{3}$$

$$a = \left[\left(\frac{l}{T_2' - T_1'}\right) - \left(\frac{l}{T_2 - T_1}\right)\right] / \left(T_2' - T_2\right) \tag{4}$$

where T_1 : the time when front tire is sensed by front sensor
T'_1 : the time when rear tire is sensed by front sensor
T_2 : the time when front tire is sensed by rear sensor
T'_2 : the time when front tire is sensed by rear sensor

또한 본 모듈을 통해 속도 및 가속도 측정센서 측정값을 통해 계산된 속도, 가속도, 비출력 정보를 통해 탄력주행 등 충분한 배출가스가 발생하지 않는 상황에 대한 데이터 무효 처리 작업도 수행한다.

2.2.3.2 속도/가속도 측정 정확도 검증

직선 주행로 시험장 설치 및 시험차량 통과 시 계측 및

Table 3 Test conditions and results of speed / acceleration measuring module

Test conditions	
Temperature	3.2 ℃~5.2 ℃
Operating humidity range	70 % ~ 80 % (R.H.)
Test number	52 set
Test speed range	20~110 km/h
Test results	
Maximum error	-1.03 km/h
Average error	0.29 km/h

기준장비와의 비교를 통해 본 모듈의 성능 시험을 진행하였고 그 결과는 Table 3과 같다. 평균 0.29 km/h의 오차가 확인되었으며, 최대 오차의 경우에도 -1.03 km/h에 불과하여 시험 시 본 모듈에 따른 영향이 크지 않음을 확인할 수 있었다.

2.2.4 차량번호 인식 모듈 개발

2.2.4.1 차량번호 인식 원리 및 개발

차량번호 인식을 위해 고속 피사체에 대한 고성능 카메라 모듈과 이미지에 대한 문자인식 알고리즘이 탑재된 소프트웨어 모듈이 필요하다. 전자의 경우는 고해상도 고속카메라를 통해 이미지 포착 정확도를 확보하였으며, 후자의 경우 상용화된 차량 번호판 인식(License Plate Recognition, LPR) 모듈을 적용하였다. 차량 번호판 인식은 이미지로부터 외곽선 추출 후 이를 국내 차량 번호판의 문자 형상 데이터베이스에서 검색하는 방식으로 진행되며, 신형 번호판 앞의 숫자 세 자리까지 인식할 수 있도록 모듈을 구현하였다.

2.2.4.2 차량번호 인식률 검증

차량 번호판 인식률 검증은 자동 측정 데이터와 직접 확인한 계측값의 일치 여부를 확인하는 방식으로 시험하였다. 공용 도로에 해당 모듈과 차속 측정 모듈을 동시 설치함으로써, 속도 구간 별 차량번호판 인식률 검증 시험을 실시하였다. 약 500대의 차량에 대해 검증하였으며, Table 4와 같이 속도 구간이 높아질수록 인식률이 감소하는 경향을 보이나 평균 인식률 93 %의 높은 인식률을 확인할 수 있었다.

Table 4 Test results of vehicle license plate recognition module performance

Velocity	Identified	Undiscerned	Identified ratio
10~20 km/h	1	0	100 %
20~30 km/h	18	1	94 %
30~40 km/h	114	6	95 %
40~50 km/h	245	21	91 %
50~60 km/h	83	6	93 %
60~70 km/h	6	1	83 %
Total	**467**	**35**	**93 %**

2.2.5 기타

2.2.5.1 매연 원격측정기 시스템 운용 소프트웨어 개발

매연 원격측정기 운용 소프트웨어를 통해 무인 운용 기반의 통신 프로토콜을 정의하였다. 이를 통해 대량 측정 데이터의 데이터베이스화 및 중앙 관리 서버로 전송이 가능함은 물론 Fig. 3과 같이 매연 RSD 설치 이후 운용에 필요한 영점 조정, 표준필터를 통한 검증 및 현장 문제 해결 등을 원거리 제어를 통해 무인 운용이 가능하다.

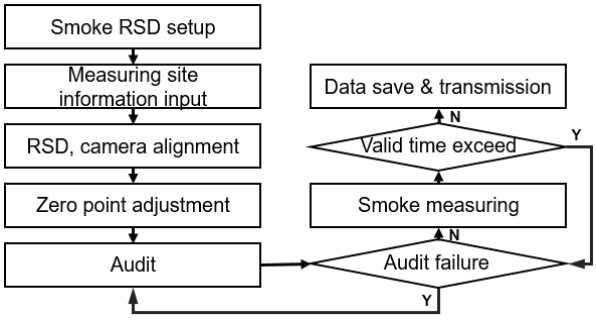

Fig. 3 Smoke RSD installation and operation flow

2.2.5.2 차량 통과 시 매연 측정 시점 결정 알고리즘

차량의 통과 시 적절한 시점에 매연 농도 계측이 이루어져야 한다. 이를 위해 속도/가속도 측정 모듈에서 계측된 차속을 감안하여 차속 통과 후 일정 거리에서 매연 계측이 이루어질 수 있도록 알고리즘을 구현하였다. 또한 차량 외형이 상이하고 차량의 배기구높이가 다르기 때문에 다채널 센서 신호와 신호 처리시간을 종합적으로 고려하여 안정적인 매연 측정 시점 결정 알고리즘을 구현하였다.

3. 매연 원격측정기 성능시험

개발 매연 원격측정기 및 부속기기(속도, 가속도 측정 모듈, 차량번호 인식 시스템) 통합 시스템에 대한 성능시험을 실시하였다. 현행 법정 시험 방법을 통해 측정 시스템 자체에 대한 시험실 시험을 진행하였으며, 추가적으로 차대동력계 비교상관성 시험을 통해 외산장비와의 성능 또한 비교하였다. 추가적으로 현장시험까지 진행함으로써 개발 제품의 현장 적용 가능성까지 확인하였다.

3.1 매연 원격측정기 시험실 시험

3.1.1 직선성 시험

3.1.1.1 시험 방법

광투과식 매연측정 모듈의 측정범위(0~100 %) 전체에 대한 측정 정확도를 확인하기 위한 시험으로, 35 %, 60 %, 80 %에 해당하는 매연필터를 교대로 장착하여 계측되는 값을 반복 측정하며 세부 시험방법은 「환경측정기기의 형식승인·정도검사 등에 관한 고시」를 준용하였다.

3.1.1.2 시험 결과

각 광로 채널 별 직선성 시험 결과는 Table 5와 같다. 각 채널 별 정확도에 대한 편차는 있으나, 최대 편차가 0.6 %에 불과할 정도로 양호한 결과를 확인할 수 있었다.

Table 5 Linearity test result of smoke RSD

Channel number	Error (%) [Filter : 80 %]	Error (%) [Filter : 60 %]	Error (%) [Filter : 35 %]
1	0.2	0.1	0.0
2	0.1	0.0	0.4
3	0.2	0.4	0.4
4	0.2	0.1	0.0
5	0.2	0.1	0.1
6	0.3	0.2	0.1
7	0.3	0.3	0.1
8	0.4	0.4	0.0
9	0.4	0.4	0.1
10	0.5	**0.6**	0.5

Table 6 Repeatability test result of smoke RSD

Channel number	Error (%)				
	1st	2nd	3rd	4th	5th
1	0.3	0.4	0.4	0.2	0.2
2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.4
3	0.3	0.4	0.5	0.2	0.4
4	0.3	0.4	0.2	0.1	0.0
5	0.3	0.3	0.1	0.0	0.0
6	0.3	0.4	0.1	0.1	0.3
7	0.2	0.4	0.1	0.0	0.0
8	0.1	**0.5**	0.1	0.0	0.1
9	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2
10	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2

3.1.2 반복성 시험

3.1.2.1 시험 방법

광투과식 매연측정 모듈의 반복성을 평가하기 위해 측정범위(0~100 %) 전체에 대한 반복성 시험을 진행하였으며, 측정 범위 별 5회 반복 측정하였다. 세부 시험방법은 「환경측정기기의 형식승인·정도검사 등에 관한 고시」를 준용하였다.

3.1.2.2 시험 결과

각 광로 채널 별 반복성 시험 결과는 Table 6과 같다(실제 계측 빈도가 가장 높은 35 % 필터 결과만 표시). 각 채널 별 정확도에 대한 편차는 있으나, 최대 편차가 0.5 %에 불과할 정도로 양호한 결과를 확인할 수 있었다.

3.1.3 차대동력계 비교 상관성 시험

3.1.3.1 시험 방법

Table 7 Test conditions(Chassis dynamometer correlation test)

Vehicle specifications	
Emission standard (model year)	Euro4 (2007)
Engine type	Diesel (D4CB)
Exhaust gas treatment equipment	DOC
Engine displacement (total)	2,497 cc
Vehicle mileage	317,930 km
Reference analyzer specifications	
Measurement method	Light transmission (sampling type)
Linearity	< ± 2 %
Repeatability	< ± 1 %
Test conditions	
Temperature	20 °C~30 °C
Operating humidity range	40 % ~ 70 % (R.H.)
Test mode	KD-147

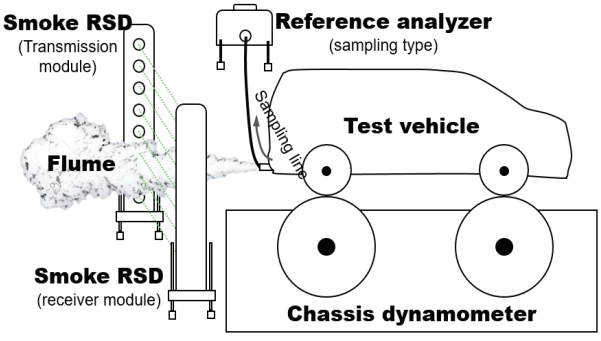

Fig. 4 Test bench schematic(Chassis dynamometer correlation test)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2} \quad (5)$$

시험차량을 차대동력계 상 위치시킨 후 운행 경유차 배출가스 정밀검사 시험모드인 KD-147 모드를 주행하면서 배출되는 매연을 기준장비와 비교장비를 통해 측정하여 위의 식 (5)를 통해 두 장비 간 상관성 계수를 비교 분석하였다. 이때 비교장비는 본 연구를 통한 개발 RSD 이외에도 외산RSD도 포함시킴으로써 개발 제품의 외산제품 대비 정확도를 추가적으로 분석하고자 하였으며, 동일한 시험 조건을 구현하기 위해 두 장비를 병렬 위치시킨 후 동시 시험하였다. 시험벤치 구성은 위의 그림과 같다. 차대동력계 상 차량으로부터 발생하는 배출가스를 기준장비와 비교 장비가 동시에 계측하며 전자는 샘플링 방식으로, 후자는 원격측정방식으로 계측한다. 기준장비 또한 동일한 광투과식 매연측정 방식의 측정기를 사용하였으며, 샘플링 시간에 따른 계측시간 차이는 시간 동기화(Time synchronize)를 통해 보정하였다. 시험 차량은 충분한 매연농도가 발생할 것으로 예상되는 2007년 식 Euro-4 사양으로 선정하였으며, 시험의 객관성 확보를 위해 동일 시험자를 통한 10회 반복 시험을 진행하였다.

Table 8 Lab-test result summary

Test number	Test analyzer	Correlation coefficient(r^2)	Slope of fitting line
1	Domestic RSD	0.586	0.189
2	Foreign RSD	0.581	0.026

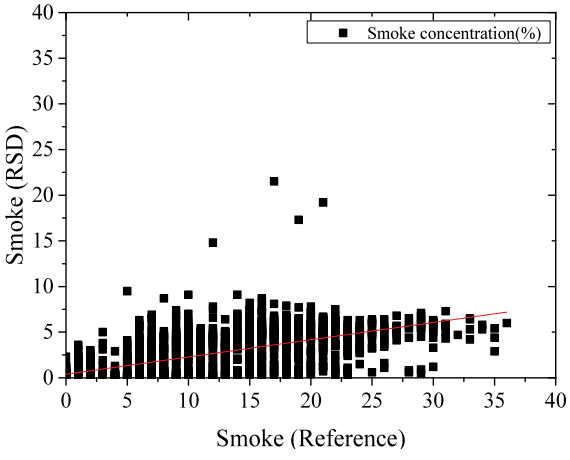

Fig. 5 Lab-test result (Domestic developed RSD)

3.1.3.2 시험 결과

Table 8을 통해 외산RSD 대비 국산화 개발 RSD의 상관성 성능시험 결과를, Fig. 5 및 Fig. 6을 통해 기준장비 대비 각 RSD 장비의 매연 계측 특성을 확인할 수 있다. 국산화 개발 RSD의 상관성은 0.586으로 기존개발품인 외산장비의 결과값(0.581) 대비 동등 이상 의 상관성이 확인되었다. 또한 기준장비 대비 상관성 그래프 기울기에서도 외산 장비 대비 상당히 양호한 결과가 확인되었다. 그러나 기준장비 대비 매연 계측 농도가 20 % 수준으로 계측되고 있는 경향이 확인되며 추가적인 시험실 시험 및 현장 적용 시험을 통한 다고 판단된다.

기준장비 대비 국산 및 외산 매연 RSD의 계측값은 서로 유사한 경향이 확인되었으며, 이는 국산 매연 RSD와 외산 장비의 기본 측정원리가 유사하기 때문으로 사료

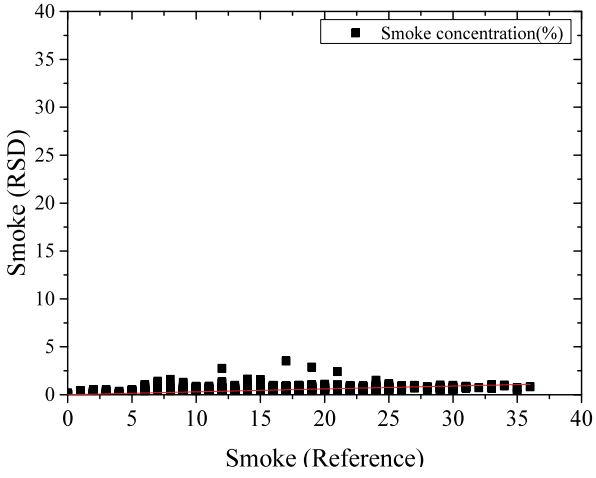

Fig. 6 Lab-test result (Foreign developed RSD)

Table 9 Test conditions(Real road correlation test)

Vehicle specifications	
Emission standard (model year)	Euro4 (2007)
Engine type	Diesel (D4CB)
Exhaust gas treatment equipment	DOC
Engine displacement (total)	2,497 cc
Vehicle mileage	317,930
Test conditions	
Temperature	0 °C~10 °C
Operating humidity range	20 % ~ 40 % (R.H.)
Road gradient (flat road)	0.0 °
Road gradient (slope road)	3.7 °
Driving speed	30, 40 km/h
Driving method	steady speed drive

된다. 다만, 기준장비 측정값 대비 개발 장비의 경우 약 20 % 수준의 농도값을, 외산 장비의 경우 약 3 % 수준의 농도값이 계측되었다. 이는 차량 배기관에서 매연농도가 높은 배출가스를 직접 채취하여 계측하는 기준장비에 반해, 충분히 확산된 상태의 배출가스 플럼을 원격으로 계측하는 매연 원격측정기의 원리에 기인하는 것으로 사료된다. 이에 향후 안정적인 현장 활용을 위해서는 추가적인 보정작업이 필요할 것으로 사료된다.

3.2 매연 원격측정기 현장 시험

3.2.1 현장 시험 개요 및 방법

실제 공용도로에서는 외부 풍속 등의 기후조건, 차량 이동에 따른 배출가스 플럼의 확산형상 차이, 차량 통과에 따른 정확한 계측시점 확보 여부, 차량 인식 정확도 등 시험실 시험에 비해 상당히 많은 변수가 존재한다. 현장적용에 대한 문제점 검토와 방법을 구체화하기 위해서 시험주행로에서의 시험을 실시하였으며, 시험벤치 구성은 차대동력계가 시험주행로로 대체된 점을 제외하면 Fig. 3과 동일하다. 시험실 시험과 동일한 기준장비를 활용하였으며, 비교장비는 개발 제품만 포함하였다. 시험주행로는 평로와 경사로(구배 3.7°) 두 곳을 선정하여 부하에 따른 경향성을 분석하고자 하였으며, 안정적인 시험 결과값을 계측하기 위해 각 시험 속도에서 정속주행 조건으로 계측장비를 통과하였다. 결과의 신뢰성 확보를 위해 각 조건에서 100회 반복시험을 수행하였다.

3.2.2 현장 시험 결과

Table 10을 통해 국산화 개발 RSD의 시험조건 별 상관성 시험 결과를, Figs. 7~10을 통해 각 시험 조건에서의 개발 RSD의 매연 계측 특성을 확인할 수 있다. 주행조건별 매연 배출농도 경향이 차이나는 관계로 각 그래프의 축 범위는 매연농도 결과값에 맞추어 설정하였으며, 다만 축의 눈금 간격은 동일하게 도시하였다. 저농도 매연 배출 조건이 형성될 수 있는 평로 주행조건에서 상관성이 비교적 높은 경향이 확인되었으며, 동일한 맥락에서 40 km/h 조건보다는 매연 배출 농도가 적은 30 km/h 조건에서 더욱 상관성이 높았다. 다만, 저부하 시험조건 일지라도 30 km/h및 40 km/h 조건에서 상관성 계수는 각각 0.357과 0.283으로 약한 양의 상관계수만이 확인되어 개방 광경로 특성 상 많은 오차요인이 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

매연 배출농도가 비교적 높은 경사로 주행 조건에서는 더욱 상관성이 낮았다. 30 km/h 및 40 km/h 조건에서 상관성 계수는 각각 0.132와 0.117로 다소 낮은 상관관계가 산출되었으며, 매연 배출 농도가 큰 40 km/h 속도조건에서는 더욱 낮은 상관관계가 확인되었다. 이는 차량의 높은 이동속도 및 과부하 운전으로 인해 배출가스 플럼이 비교적 불안정적으로 형성되는 환경에 기인한 것으로 판단되며, 이러한 경향은 평로 주행조건에서도 동일하게 관찰된다.

전반적으로 현장 시험결과는 시험실 시험결과 대비 낮은 상관성이 확인되며, 이는 차량의 실제 이동에 따른 불안정한 플럼 형성 및 풍량 등의 외부 기상상황에 기인

Table 10 Field-test result summary

Test number	Test conditions	Correlation coefficient(r^2)	Slope of fitting line
1	Flat, 30 km/h	0.357	0.032
2	Flat, 40 km/h	0.283	0.028
3	Slope, 30 km/h	0.132	0.036
4	Slope, 40 km/h	0.117	0.030

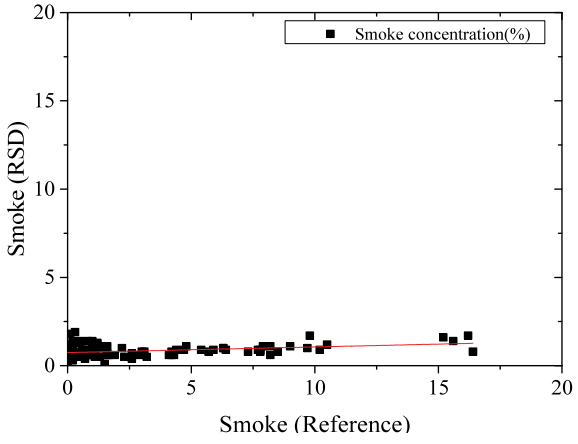

Fig. 7 Field-test result (Flat road, 30 km/h)

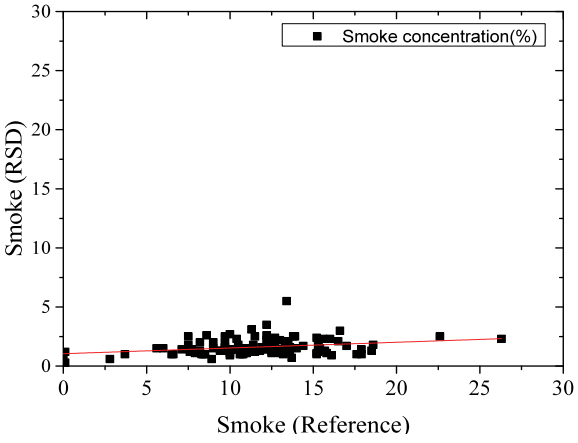

Fig. 8 Field-test result (Flat road, 40 km/h)

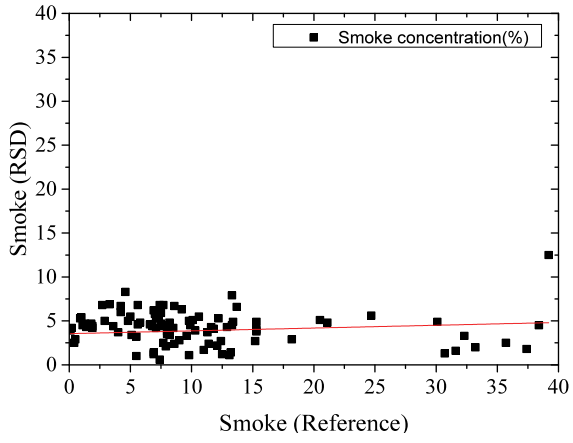

Fig. 9 Field-test result (Slope road, 30 km/h)

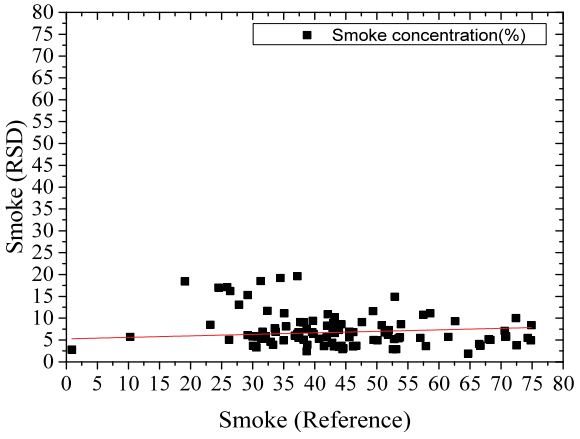

Fig. 10 Field-test result (Slope road, 40 km/h)

하는 것으로 사료된다. 이러한 문제는 광학성능 개선 등의 방식으로는 해결하기는 어려울 것으로 사료되므로, 서로 다른 운전조건 상황에 대해 시험 주행로에서 차량을 반복 통과 시키면서 보정계수를 산출하는 등의 경험적인 보정 방식이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

1) 개방 광경로형 광투과식 다채널 방식의 매연 원격측정장비를 국산화 개발하였으며, 시험실 시험결과 직선성 최대편차 0.6 %, 반복성 최대편차 0.5 %의 상당히 우수한 결과가 확인되었다. 또한 차대동력계 상에서 광투과식 기준장비를 통한 비교 시험 결과, 기존 외산장비의 상관계수 0.581 대비 상관계수 0.586의 동등 이상의 유의한 상관관계가 도출되었다.
2) 현장 시험 결과 평로 주행조건 및 경사로 주행조건에서 평균 상관계수는 각각 0.320, 0.125로, 시험실 시험 대비 상관성이 다소 낮으며, 매연 배출농도가 클수록 낮은 상관계수가 관찰되었다. 이는 차량의 움직임 및 외부 풍량 등의 외부 환경조건에 따른 불안정한 매연 플럼 형성에 기인한 것으로 사료되며 추가적인 보정 작업이 필요할 것으로 판단된다.
3) 매연 RSD의 개방 광경로 특성 상 측정 농도는 기준장비 대비 15~20 % 수준에 불과한 것으로 확인되며, 이는 시험 데이터 축적을 통한 보정계수 산출 및 적용이 필요함을 의미한다. 이때 차량 운전조건(속도, 부하) 별 경향이 다르므로 이를 고려한 보정작업이 요구된다.
4) 시료 채취 방식의 기존 기준장비 대비 측정 정확도는 비교적 낮으나 대량 측정, 무인 운용, 시험결과 축적 및 통계자료 활용 가능성 등의 장점을 고려할 때 후처리장치 파손차량 식별, 결함 확인 검사 차종 선정 등의 전반적인 운행차 관리제도 뿐만 아니라 이동오염원 파악 등의 대기 오염 방지를 위한 연구개발 목적으로도 폭넓게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1) Ministry of Environment, http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=645030& menuId=286, 2021.
2) Ministry of Environment, http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EB%AF%B8%EC%84%B8%EB%A8%BC%EC%A7%80&menuId=10259&orgCd=&condition.deleteYn=N&seq=7053, 2021.
3) H. S. Joo, Study on Integrated Management Strategies for PM(Particulate Matter), Korea Environment Institute, Sejong, 2019.
4) S. J. Kim and J. W. Park, “A Study on Control Method of DPF Regeneration according to Operation Characteristics of Light Tactical Vehicle,” Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.19, No.6, pp.689-695, 2018.
5) Korea Ministry of Government Legislation, https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=172989#0000, 2011.
6) Korea Ministry of Government Legislation,

https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99/%EC%9A%B4%ED%96%89%EC%B0%A8%EC%88%98%EC%8B%9C%EC%A0%90%EA%B2%80%EB%B0%A9%EB%B2%95%EA%B3%BC%ED%99%95%EC%9D%B8%EA%B2%80%EC%82%AC%EB%8C%80%ED%96%89%EC%9E%90%EB%93%B1%EB%A1%9D%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EA%B7%9C%EC%A0%95/(2016-227,20161212), 2021.

7) Y. S. Chae, “Quo vadis! Volkswagen Diesel Gate,” Auto Journal, KSAE, Vol.37, No.11, pp.59-61, 2015.
8) M. J. Kwon, G. Y. Park, S. J. Kim, T. H. Han, J. M. Kim and S. W. Lee, “Feasibility Study on Nondestructive Measurement of Damaged DPF Using CR X-Ray Imaging Technique,” Transactions of KSAE, Vol.27, No.10, pp.795-801, 2019.
9) Y. Chen, R. Sun and J. Broken-Kleefeld, “On-Road NO_x and Smoke Emissions of Diesel Light Commercial Vehicles - Combining Remote Sensing Measurement from across Europe,” Environmental Science &Technology, Vol.54, No.19, pp.11744-11752, 2020.
10) Y. D. Jung, U. S. Yeo, Y. A. Yun and M. S. Hong, “A Study on Emission Inspection Method Improvement of Heavy-duty Diesel Vehicles,” Transactions of KSAE, Vol.22, No.1, pp.165-173, 2014.
11) R. Smit, S. Bainbridge, D. Kennedy and P. Kingston, “A Decade of Measuring on-Road Vehicle Emissions with Remote Sensing in Australia,” Atmospheric Environment, Vol.252, Paper No. 118317, 2021.
12) Ministry of Environment, https://lod.nl.go.kr/page/CNTS-00066370026, 2009.