

# 운행 경유차용 다차선 매연 원격측정기(RSD) 실증 개발 및 현장 적용성 연구

최 동 환<sup>1)</sup> · 이 승 훈<sup>1)</sup> · 김 승 열<sup>1)</sup> · 김 계 현<sup>2)</sup> · 최 기 봉<sup>3)</sup>

한국산업기술시험원 환경기술본부<sup>1)</sup> · 자스텍 기업부설연구소<sup>2)</sup> · 와보텍 기업부설연구소<sup>3)</sup>

## A Study on the Development of Multi-lane Smoke Remote Sensing Device(RSD) for In-used Diesel Cars and Possibility of Field Applicability

Donghwan Choi<sup>\*1)</sup> · Seunghoon Lee<sup>1)</sup> · Sunglyul Kim<sup>1)</sup> · Gye Hyun Kim<sup>2)</sup> · Kibong Choi<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Environmental Technology Division, Korea Testing Laboratory, 87 Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul 08389, Korea

<sup>2)</sup>Affiliated Research Center, Jastec Corp., 42 Hongnanpa-gil 87beon-gil, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi 18278, Korea

<sup>3)</sup>Corporate Research Institute, Wabotech Corp., 127 Beobwon-ro, Songpa-gu, Seoul 05836, Korea

(Receive 24 May 2023 / Revised 16 June 2023 / Accepted 21 June 2023)

**Abstract** : A smoke RSD for in use diesel vehicles, which is applicable on multi-lane roads, was developed by applying a light transmission-type smoke concentration measuring module. The effect of interference on the driving lane factors and other factors related to the preceding vehicle, which were expected to be causing major errors, was analyzed. A high positive correlation of the smoke RSD for a single vehicle was verified ( $R^2=0.811$ ), and no significant measurement bias was observed based on the vehicle's driving lane. The preceding vehicle caused significant interference, and it was observed that the amount of interference increased as the preceding vehicle decreased in speed, while the driving lane difference increased between the preceding vehicle and the following vehicle. Thus, reasonable smoke RSD regulation criteria must be established to minimize the error non-conformity rate by conducting error correction through the quantitative contribution analysis of each major error factor.

**Key words** : Smoke remote sensing device(매연 원격측정기), Light transmission smoke meter(광투과식 매연측정기), In-use diesel vehicle(운행경유차), Multi-lane measurement(다차선 측정), Open-path measurement(개방 경로 측정), Error contribution analysis(오차 기여율 분석)

### 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 vehicle travel distance during each measuring time interval of speed / acceleration measuring module, m  
 L : optical path length, mm  
 T : transmittance of light

t : time, sec  
 V : velocity, m/s  
 $\alpha$  : multiple factor between reference analyzer and RSD  
 $\beta$  : interference ratio, %

### Subscripts

cor : corrected measurement value  
 fol : following vehicle  
 multi : multiple factor  
 noise : noise measurement value of RSD(ground error)  
 o : incident light

\*Corresponding author, E-mail: dhchoi90@ktl.re.kr

<sup>\*</sup>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.

- pre : preceding vehicle
- raw : raw data of RSD(uncorrected value)
- ref : reference condition(single high pollution vehicle test)
- Ref : reference analyzer(opacimeter)
- resi : residual
- RSD : remote sensing device
- t : transmitted light

### 1. 서론

미세먼지 위해성에 대한 국민 우려가 증가하고 있고 실제 미세먼지로 인한 사회 경제적 손실이 점차 증가하고 있다. 이에 정부에서는 2017년 ‘미세먼지 관리 종합대책 및 로드맵 수립’등 실효성 있는 대책을 강구하고 있다.<sup>1)</sup> 그중 자동차 배기계통에서 기인하는 매연은 WHO 1급 발암물질로 지정될 만큼 인체 위해성이 높은 것으로 분류되고 있다.<sup>2)</sup> 또한 매연입자 독성연구 결과, 치매와 관련된 신경계통 질환 및 부정맥 등 심혈관계 질환에서 매연 흡입과 보건의학적인 위해성 간의 분명한 상관관계가 있음이 보고된 바 있다.<sup>3,4)</sup> 그러나 자동차 기인 매연은 이동오염원(Mobile sources)인 관계로 체계적인 배출량 산정 및 관리가 어려운 실정이다.<sup>5,6)</sup> 2019년 기준 도로 및 비도로 이동오염원에 의한 국내 PM<sub>2.5</sub> 발생 기여도는 전체의 약 25.3%를 차지하며, 제조업 연소를 제외하면 가장 큰 발생 요인으로 확인되었다.<sup>7)</sup> 또한 이러한 1차 배출 이외에도 전구물질(Precursor)을 통한 2차 생성물까지 고려할 경우 배출기여도가 약 30%에 이를 만큼 실질적인 위해성은 더욱 높다.<sup>8)</sup> 이에 비상 미세먼지 저감조치를 통한 차량 운행 대수 제한, 미세먼지 계절관리제 시행 등 차량 운행대수 제한 및 판매 후 차량 관리 등의 대기오염 방지 정책을 실시하고 있다.

차량에서 기인하는 미세먼지 규제 및 관리 강화 기준은 국외 또한 유사하다. 유럽연합위원회(EC)에서 최근 발표한 2025년 이후 발효를 계획하고 있는 Euro 7 초안에 따르면 입자개수(PN) 측정 대상 입자를 기존의 23 nm 이상에서 10 nm 이상으로 확대하고, 대형 및 경유 차량을 중심으로 입자상 물질 총배출량(PM) 및 입자개수의 적합 기준치 또한 상향된 수치를 제시하였다.<sup>9,10)</sup> 또한 차량 형식승인 시 실도로 주행 배출가스 측정(Real Driving Emission, RDE) 시험 강화, 판매 사후 검증 제도(Market surveillance in service testing) 도입 등 차량 제작 인증단계 뿐만 아니라 판매 후 운행 단계에서의 체계적인 관리를 예고하고 있다. 이는 단순히 기술적 난이도나 시험인증 비용보다는 대기질 오염에 따른 보건 사회적 비용을 더욱 중시하는 분위기에 기인한 것이라고 할 수 있으며

환경측정기기 제작기업 또한 이러한 기조에 맞추어 기술개발에 힘쓰고 있다.<sup>10)</sup>

국내 자동차 배출물질에 대한 관리는 차량 판매 전 제작 단계에서의 형식승인 제도와 차량 판매 후 운행 단계에서의 운행차 관리제도로 구분할 수 있다. 전자의 경우 완성차 제작사 자가인증 제도를 통한 형식승인제도가 이에 해당한다. 일반적으로 고정밀 측정 장비를 활용하여 시험인증이 진행되고 샘플 조사가 실시되므로 체계적인 관리가 가능하다. 후자의 경우 주기적인 정밀검사를 통한 노후 차량 배출가스 모니터링 및 통제가 이에 해당한다. 그러나 인위적인 매연 후처리장치 파손으로 인한 과다배출차량 적발, 노후 차량 후처리장치 성능 저하로 인한 대기오염 등의 문제가 지속적으로 발생하고 있다. 이에 원격 비디오키메라 단속이나 갓길 정차 후 매연 샘플링 방식 등의 운행차 배출가스 수시점검을 통해 보다 실효성 있는 운행차(In-used car) 매연 관리 제도가 시행되고 있다.<sup>11)</sup> 그러나 비디오키메라 단속 방식의 경우 그 정밀정확도가 상당히 낮다는 문제점이 있다. 또한 정차식 매연 샘플링 방식의 경우 운전조건이 실제와 다르고 제한적인 시행환경, 가용인력의 문제로 양적인 검사 규모, 안전 등 여러 측면에서 효율성이 낮다. 이에 광계측 기반의 매연 원격측정기(Remote Sensing Device, 이하 RSD)를 활용하는 방법은 검사 규모 확대 및 자동화 측면에서 상대적으로 유리한 방식이다.

아래 Fig. 1을 통해 매연 RSD 시스템의 구성 및 매연 계측 원리를 파악할 수 있다. 매연 RSD 시스템은 매연으로 인한 광 세기 감쇄의 정량적인 정보 획득에 사용되는 발광부(Light source module) 및 수광부(Light receiving module) 모듈, 진입 차량의 속도 및 가속도를 측정하는 속도 가속도 측정 모듈(Velocity and acceleration sensing module), 차량 별 매연 농도 식별을 위한 차량 번호판 인식 모듈(Vehicle license plate recognition module), 그리고 RSD 제어룸(RSD control room)으로 구성된다. 진입 차량

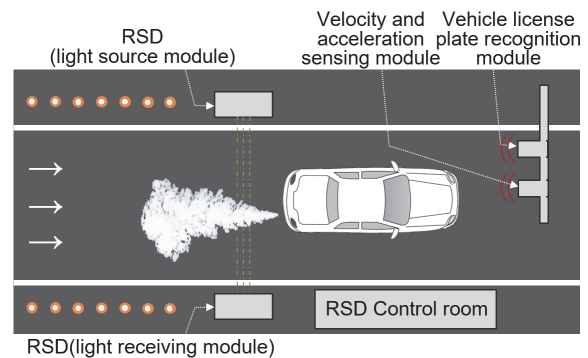


Fig. 1 Schematics of smoke remote sensing device

이 매연 RSD 시스템으로 접근 시 가장 먼저 차속 및 가속도 계측을 통한 비출력(Vehicle specific power) 산출이 이루어지며, 유효 데이터 판별 기준으로 사용한다. 동시에 RSD 수광부 및 발광부에서 차량플럼(Plume)으로 인한 광 세기 감쇄를 정량화하여 매연 농도(%)로 환산한다. 이를 차량 번호판 카메라 인식 정보와 연동하여 RSD 정보 종합 시스템인 한국환경공단 자동차 배출가스 종합전산시스템(MECAR)으로의 전송을 통해 개별 차량의 매연 농도 정보를 데이터베이스화 할 수 있다. 매연 RSD 시스템은 활용 용도에 따라 설치 및 탈거가 용이한 이동식 RSD, 혹은 고정 설치식 RSD로 구분할 수 있다. 국내의 경우 한국환경공단에서 이동식 매연 RSD 시스템 1식을 운영하고 있다. 그러나 기존 매연 RSD는 주변 차량 동시 통과에 따른 오차요인을 배제하기 위해 단일 차선(Single-lane)으로 그 활용 범위가 한정되어 개발되었다. 그에 따라 활용 가능 범위가 간선도로 진입 램프구간 등 상당히 국한되고 차속이 제한되는 경우가 많아 과다배출 차량 적발이 어렵고 검사 대수 또한 제한된다. 이에 다차선(Multi-lane) 도로에 설치가 가능한 매연 RSD에 대한 관심이 증가하고 있다. 매연 RSD의 다차선 적용 시 선행 및 후행 차량의 연속적인 운행환경은 측정결과의 정확성에 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 도로 상에서 반복적인 측정을 통해 측정결과의 유효성을 고려한 실증 가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 주요 현장 오차 요인을 식별하고 정량적인 고찰을 실시하였다.

## 2. 다차선 매연 원격측정기 개발 및 실증방법

### 2.1 매연 원격측정기 원리 및 개발 개요

중국의 경우 2017년부터 매연 원격측정기를 통한 단속을 전국으로 확대 실시하고 있으며 다차선 매연 RSD의 실증화가 이미 완료되어 관련 분야에서는 가장 선도적인 연구가 이루어진 국가라고 할 수 있다. Mintgrun, Anche사 등에서는 구조물을 이용하여 차량 통과 상부에 광원부 및 수신부를 설치하고 차량 통과 하부 도로에 반사거울을 차선 별로 설치하여 수직 이중 광경로 방식의 다차선 매연 RSD를 개발하였다. 그러나 이러한 수직 측정 방식은 도로 비산먼지 침적 및 차량 바퀴 직접 접촉 등의 문제로 유지보수가 어려운 문제점이 있다. 반면, Baolong, Mintgrun, Anche사 등에서는 차량 진행방향 수직 방향으로 측정기를 수평 설치하여 단일 광경로 방식의 다차선 매연 RSD를 개발하였다. 이러한 수평 측정 방식은 유지보수는 용이하나 차량 간 간섭을 배제하여야 하는 기술적 어려움이 존재한다.

본 연구를 통해 차량 진행방향과 수직 방향의 수평 단

일 광경로 광투과식 매연 RSD를 벤치마킹한 국산화 제품을 개발하였다. 또한 선행차량 간섭을 배제할 수 있는 독자적인 기술을 적용하였다. 측정 장비로는 선행 연구를 통해 개발을 완료한 광투과식 매연 측정 방식의 활용한 단차선 매연 RSD를 적용하였다. 해당 장비는 선행 연구에서 기준장비와 비교한 결과 상관관계수( $R^2$ ) 0.586의 유의한 양의 상관관계를 나타내었다.<sup>12)</sup>

#### 2.1.1 측정 원리

##### 2.1.1.1 광투과식 매연측정 원리

Fig. 1과 같이 차량이 매연 RSD를 통과하는 경우 연소기인 배기가스로 인한 플럼이 형성된다. 이로 인해 RSD의 광원부에서 발생한 광 세기 대비 수광부에서 수광되는 광 세기가 감쇄하게 된다. 광 세기 감쇄 비율은 매연의 농도에 따라 다음 식 (1)과 같이 비어 램버트 법칙(Beer-lambert's Law)에 의해 정량화될 수 있다. 이를 식 (2)와 같이 「환경측정기기 형식승인·정도검사 등에 관한 고시」에 의해 운행차 분야에서 통용되는 매연 농도 지표인 매연 백분율 농도(C)로 환산 할 수 있다. 매연 RSD에 사용되는 광원은 현재 경유차 매연 법정 시험에 활용되고 매연 감응성이 양호한 녹색 파장대역 가시광선을 사용하였다. 또한 다차선화에 따른 광원 거리를 감안하여 단차선 매연 RSD 대비 출력이 향상된 광원을 사용하였다.

$$T = \frac{I_t}{I_0} = e^{-kL} \quad (1)$$

$$C = (1 - T) \times 100 \quad (2)$$

##### 2.1.1.2 간섭 차량 영향 선별 알고리즘

매연 RSD를 다차선 도로에 적용할 경우 동시 혹은 선행 통과 차량으로 인한 플럼 중첩 및 유동간섭으로 인해 측정 오차가 발생한다. 이는 공용도로 특성 상 불가항력적인 요인이므로 오차를 최소화시키기 위한 데이터 선별(Screening) 및 무효처리 알고리즘 적용이 필요하다. 그에 따라 아래와 같은 데이터 무효처리 기준을 수립하였다.

- ① 선행차량 통과 후 2초 이내 통과한 후행차량의 경우
- ② 차량 가속도가 음수인 경우
- ③ 교정(Calibration) 혹은 검증(Audit) 모드 시 통과한 차량의 경우
- ④ 기상상황이 악조건(강수, 강설, 짙은 안개, 5 m/s 이상의 강풍)인 경우
- ⑤ 계측 차량의 속도, 차량 번호판 정보 계측이 원활하게 이루어지지 않은 경우

추가적으로 차량이 통과하지 않을 경우 수시로 배경 농도를 측정하고 동시에 보정함으로써 환경변화로 인한 오차를 최소화하고자 하였다.

**2.1.2 전체 시스템 및 다차선 매연 RSD 제원**

**2.1.2.1 다차선 매연 RSD 시스템 개요**

다차선 매연 RSD는 모듈 간 데이터 통신을 통해 차량 매연 농도 정보를 차대 정보와 연계하여 한국환경공단 의 중앙 관리 서버(MECAR)로 전송하는 독립 시스템 이라고 할 수 있다. 차량번호 인식 모듈을 제외한 각 모듈 은 개별 합체에 수납되어 개폐장치를 통해 측정 시간 에 한해 외부로 노출된다. 따라서 강수, 강설 등 외부환경 으로부터 보호받고 안정적인 측정이 가능하다. 매연필터 교정은 자동 교정 시스템을 이용하여 주기적으로 수행 되어 유지보수 이외 24시간 무인 운용이 가능하다. 다차 선 RSD의 경우 이동식 시스템 운용이 어려우므로 고정 식으로만 사용하며 주요 모듈은 아래와 같다.

Table 1 Specifications of multi-lane smoke RSD

Light source module	
Laser source module	Wavelength : (520 ± 10) nm Output power : 100 mW Input voltage : 5V DC
Light reflection mirror	Size : (52 × 42) mm
Beam splitter	Size : (52 × 42) mm Transmittance : (80 ~ 90)%
Operating range	Temperature : (-7 ~ 49)°C Humidity : (10 ~ 85)% (R.H.)
Light receiving module	
Optical sensor	Size : ø 22.4 mm Active area : (9.8 × 9.8) mm
Focusing lens	Size : ø 38 mm Wavelength : (530 ± 30) nm
Maximum install length	25 m (From light source)
Maximum install height	Minimum height : 138 mm Maximum height : 768 mm
Velocity & acceleration sensing module	
Measurement range	Velocity : (0 ~ 150) km/h
Sensor	Radar type, 24 GHz
Simultaneous tracking number	Maximum : 16 targets
Vehicle license plate recognition module	
Camera resolution	1280 × 720, HDTV 720p
Camera sensitivity	Color : 0.6lx B/W : 0.03lx
Shutter speed	1/10000sec

- ① 광원부 모듈: 녹색계열 가시광선을 수신부로 발광
- ② 수신부 모듈: 광원부로부터 수광된 가시광선의 광 세기 감쇄율을 측정하여 비어 램버트 법칙을 통해 매연 농도를 산출
- ③ 속도/가속도 측정 모듈: 차선 별 통과 차량의 RSD 통과 시점의 속도 및 가속도를 계측. 산출된 비출 력은 데이터 유/무효 판별과 연관
- ④ 차량번호 인식 모듈: 이미지 인식 기술을 활용하여 차선 별 통과 차량의 RSD 통과 시점 차량 번호판 정보를 인식하고 이를 산출된 매연 농도값과 연동
- ⑤ 전체 시스템 제어 모듈: 데이터의 수집 및 데이터베 이스화, 주기적인 교정, 기상상황 확인 및 그에 따 른 합체 개폐 제어, 수집 데이터 원격 전송, 원격 제 어 등의 기능 수행

**2.1.2.2 다차선 매연 RSD 제원**

실증화 완료된 다차선 매연 RSD의 외관은 Photo. 1과 같으며 주요 제원은 Table 1과 같다. 우천, 안개 등 특수 기상상황이 발생하지 않는 한 현장에서 사용 가능한 수 준으로 개발되었으며 소형화 및 경량화를 통해 설치 및 유지보수에 용이하도록 개발하였다.

**2.2 다차선 매연 원격측정기 모듈별 개발 주안점**

본 장을 통해 기존 단차선 매연 원격측정기 국산화 개 발품<sup>12)</sup> 대비 기술적 개선사항 혹은 신규 기술 적용 사 항에 대해 기술하였다.

**2.2.1 광원부 모듈**

**2.2.1.1 광원 선정**

다차선 도로 설치에 따른 광원부-수신부 이격거리 증가 로 인한 광 세기 감소를 감안하여 Photo. 2와 같이 100 mW급 고효율 광원을 채택하였다. 레이저 광원을 통해 우수한 직진성을 확보하였으며 집광 렌즈(Focusing lens)를 부착 함으로써 광 세기의 크기 및 직진성을 추가 보완하였다.

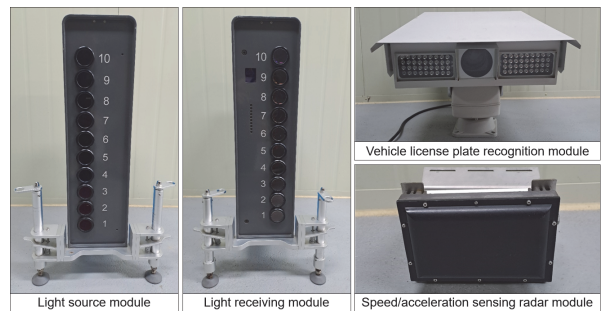


Photo. 1 Sub modules of multi-lane smoke RSD(fixed type)



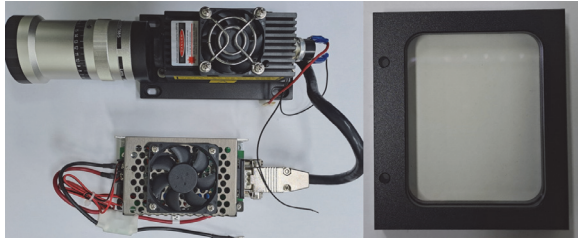


Photo. 2 Light source module(Left) and beam splitter(Right)

### 2.2.1.2 광 세기 배분

지면으로부터 차량 배기구 높이가 차종별로 상이하므로 수직으로 다수의 광원을 병렬 배치하여야 한다. 이에 빔 스플리터(Beam splitter)를 활용하여 동일한 광 세기 배분을 통해 단일 광원을 이용한 총 10개의 다채널 광원부를 구현하였다. 마지막으로 구조 개선을 통한 강성 향상을 통해 외부 진동에 따른 안정성 강화 및 미세조절나사 추가를 통한 현장 유지보수 용이성을 강화하였다.

## 2.2.2 수신부 모듈

### 2.2.2.1 수광 센서

Photo 3과 같이 감응 센서로 수광되는 광 세기를 균질화하기 위해 충분한 감응 면적(9.8 × 9.8 mm)이 확보된 센서를 사용하였다. 또한 장거리 광원의 송신에 적합하도록 메인보드 개선을 통해 수광 신호 안정성을 확보하였다.

### 2.2.2.2 밴드패스 필터

매연 RSD 수신부로 수광되는 에너지는 대부분 광원에서 기인하나 외부 일사광의 입사(Incident) 혹은 도로면에 반사된 일사광의 입사 또한 일부 존재하며 이는 오차의 원인으로 작용한다. 이를 최소화시키기 위해 광원의 파장대역과 동일한 밴드패스 필터를 적용하였고 통과 파장대역이 협소한 협대역 밴드패스 필터(520 ± 10 nm)를 적용하였다. 자체 실험을 통해 동일한 일사에서 태양 고도에 따른 오차는 무시할 수 있을 수준임을 확인할 수 있었다.

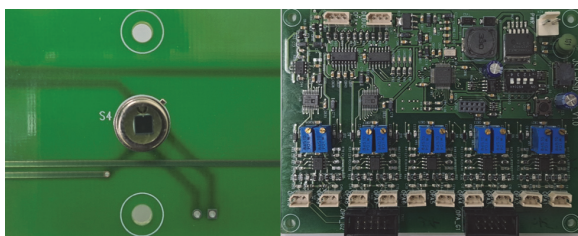


Photo. 3 Optical sensor(Left) and AD board(Right)

### 2.2.2.3 AD 보드 고도화

광원부의 채널별 광 세기 배분 불균일, 외부 환경에 따른 노이즈 등을 제거하기 위한 신호 증폭 및 감쇄를 위해 AD보드 회로구조 개선을 실시하였다.

## 2.2.3 속도/가속도 측정부 모듈 및 차량 번호판 인식 모듈

### 2.2.3.1 측정원리 및 개발 주안점

기존 단차선 매연 RSD의 경우 레이저 발광 및 수광부 모듈을 이용하여 통과 차량의 바퀴를 인식하는 방법으로 속도 및 가속도를 측정한다. 그러나 다차선 도로일 경우 동시 통과 차량으로 인해 활용이 어려우며 바닥면 진동이나 이물질으로 인해 유지보수가 어려운 단점이 있다. 이에 비접촉식 도플러 레이더 및 광학 카메라를 이용한 속도/가속도 및 차량 번호판 통합 인식 모듈을 개발하였다. Fig. 2와 같이 차량 진입 시 거리에 따라 순차적으로 서로 다른 정보가 측정되며, 이를 RSD 제어룸으로 무선 전송한다.

- ① A 영역(10 ~ 14 m): 차량 속도 및 가속도 인식 영역으로 접근 속도를 이용한 속도 및 가속도를 산출한다.
- ② B 영역(16 ~ 20 m): 차량 번호판 인식 영역으로 번호판 촬영 및 인식 알고리즘을 통해 디지털 신호로 변환하여 데이터베이스화 한다.
- ③ C 영역(26 ~ 30 m): 차량 감지 영역으로 진입하는 차량의 최초 속도를 측정하고 진입 차선을 인식한다. 이때 측정된 최초 속도는 B 영역에서 측정된 속도와 비교하여 차량의 가속도를 산출하는데 사용된다.

### 2.2.3.2 속도/가속도 측정부 모듈

2차선 이상의 다차선에 적용 가능한 레이더 방식의 속도/가속도 측정장치를 개발 및 적용하였다. 측정 원리는 레이더 반사 신호를 이용한 도플러 효과(Doppler effect)를 이용하며 이를 통해 특정 거리의 물체 속도를 정량화한다. 이를 이용하면 속도는 아래 식 (3)과 같이 서로 다

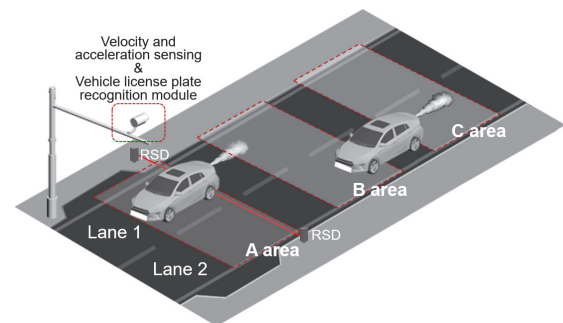


Fig. 2 Schematics of velocity, acceleration and vehicle license plate recognition integrated module

른 두 측정 데이터에 대해 차량 거리 변화량을 측정 시간 차이로 나누어 산출할 수 있다. 가속도는 식 (4)와 같이 계측된 서로 다른 두 속도를 측정 시간 차이로 나누어 산출할 수 있다.

$$V_i = \left( \frac{\Delta l_{i,i+1}}{\Delta t_{i,i+1}} \right) \tag{3}$$

$$a_i = \left( \frac{\Delta V_{i,i+1}}{\Delta t_{i,i+1}} \right) \tag{4}$$

where  $\Delta l_{i,i+1}$  : The distance difference between vehicle and measuring module at times i and i+1

$\Delta V_{i,i+1}$  : The velocity difference between vehicle and measuring module at times i and i+1

$\Delta t_{i,i+1}$  : The time difference at times i and i+1

측정을 위해 24 GHz 대역의 ISM(Industry-Science-Medical) 밴드 주파수 대역을 적용하여 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 전송신호를 생성하고 이를 RF 모듈을 통해 측정 대상 차량으로 송신한다. 차량으로부터 수신된 아날로그 레이더 반사 펄스는 AD 변환기를 통해 디지털 신호로 변환된다. 이를 푸리에 변환기(Fourier translator)를 이용하여 목표 차량과의 거리, 그리고 목표 차량의 속도 및 가속도를 측정하는 방식으로 측정이 이루어진다. 도플러 레이더와 FMCW 신호 기술을 접목하여 우수한 감도의 측정장치를 개발하였으며, 개별 모듈 실험을 통해 측정 정확도는  $\pm 2$  km/h 수준으로 확인되었다.

**2.2.3.3 차량 번호판 인식 모듈**

광학 카메라 및 이미지 센서를 이용한 카메라 촬영 이미지에 대한 디지털 신호 변환, 그리고 이미지 변환 프로그램을 이용하여 차량 번호를 인식할 수 있는 모듈을 개발하였다. 촬영 이미지 인식을 통한 차량 번호판 정보 추출은 기존에 신뢰성이 확보된 차량 번호판 인식 프로그램(License Plate Recognition, LPR)을 이용하였다.

**2.2.4 전체 제어 시스템**

매연 RSD 시스템은 제어 소프트웨어에 내장된 자동화 프로그램을 통해 무인 운용되며, Fig. 3과 같이 총 5단계로 구분된다.

**2.2.4.1 측정개시 절차(System Start Procedure)**

측정개시 시간에 도달 시 함체에 설치된 기상측정기를 통해 기상상황을 감지하여 측정여부를 결정한다. 만

일 경우, 강설과 같이 정상적인 측정이 불가하다고 판단되는 경우 기상상황이 개선될 때 까지 측정을 유보한다. 기상상황이 양호할 경우 함체의 측정부를 개방하여 신호감도를 확인하여 이상여부 확인 후 측정 모듈의 예열을 시작한다.

**2.2.4.2 교정 모드(Calibration Mode)**

영점 조절과 매연 표준필터를 이용한 스팬 교정을 실시한다. 스팬 교정의 경우 내장된 자동 교정 장치를 통해 개별 광로 별 자동 수행된다. 이때 외부 차량의 플럼에 따른 영향을 배제하기 위해 차량 감지레이더를 통해 일정시간 차량이 통과하지 않을 경우에 한해 영점 및 스팬 교정을 실시한다.

**2.2.4.3 검증 모드(Audit Mode)**

교정 후 매연표준필터를 통해 교정 정확도를 검증한다. 검증 또한 차량이 통과하지 않을 경우에 한해 실시하며, 사용자 설정횟수를 초과하는 연속 검증 실패 시, 다시 교정 모드가 진행된다. 이러한 교정, 검증 모드는 서로 연계되어 수행되며 사용자가 설정한 시간 간격마다 반복 수행된다.

**2.2.4.4 연속측정 모드(Smoke RSD Measuring Mode)**

실제 매연 측정 및 DB화, 그리고 중앙 서버 전송까지 일련의 연속측정 절차가 진행된다. 차량의 운행정보(속도, 가속도) 및 차량 정보(번호판), 차량의 매연 측정값이 동시에 임시 저장되고 데이터 유효 판별기준에 부합하는 경우 DB화 및 중앙 서버에 유효 데이터로서 전송된다. RSD는 외부환경에 직접적으로 노출되므로 주기적인 교정이 필요하다. 따라서 교정 시점이 도래할 경우 자동으로 연속측정을 멈추고 교정 모드가 수행된다.

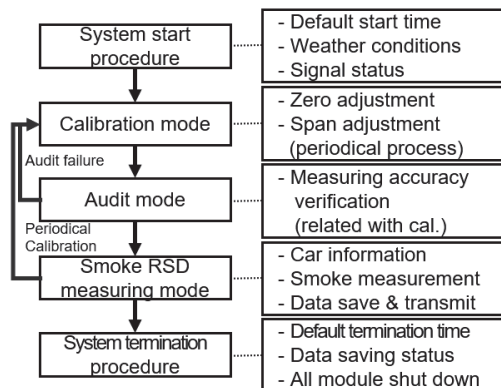


Fig. 3 Automated measuring procedure of smoke RSD

2.2.4.5 측정종료 모드(System Termination Procedure)

측정종료 시간에 도달 시 시스템은 해당 시점의 데이터 측정을 자동으로 종료하고 취합된 모든 데이터에 대한 저장 상태를 확인한다. 특이사항이 없을 경우 매연 원격측정기의 전원을 종료하고 합체의 측정부를 폐쇄함으로써 해당 일자의 자동 계측 절차를 모두 종료한다.

3. 다차선 매연 원격측정기 성능실험

3.1 실험 설계

3.1.1 개요

다차선 매연 RSD의 활용 환경을 고려하였을 때 상당한 오차요인이 존재한다. 따라서 통제된 실험 조건에서 성능 실험을 통해 실증 개발된 각 모듈에 내재된 오차를 확인하는 개별 모듈 실험을 진행하였다. 이후 이를 시스템화 하여 현장에 적용하였을 때 현장에서 발생할 수 있는 오차요인들에 의한 오차를 분석하는 현장 실험으로 분리하여 실시하였다. 이를 통해 예상되는 오차요인별 오차 기여도를 정량화 할 수 있었다. 이러한 일련의 실험들을 통해 향후 장비 활용 시 장비 운용 시행착오를 최소화 할 수 있고 측정 데이터에 대한 신뢰성 또한 확보할 수 있다.

3.1.2 주요 오차요인 식별

3.1.2.1 장비 내재 오차요인

매연 RSD 시스템의 모듈별 오차요인으로는 자체 하드웨어 및 소프트웨어로 인한 내재요인이 있으며, 이는 실험실 성능실험으로 평가할 수 있다. 매연 RSD 측정 모듈(광원부 및 수신부)에 대한 성능실험은 선행연구를 통해 충분히 확인되었으나,<sup>12)</sup> 핵심 부품의 성능 개선에 따른 오차를 확인하기 위해 추가 실시하였다.

3.1.2.2 현장 발생 오차요인

① 선행차량(Preceding vehicle) 통과에 따른 오차요인: 선행차량의 잔여 배기 플럼에 따른 간섭이 우려되므로 계측 대상 차량이 선행 차량과의 한계 간격 이하로 측정 지점을 통과할 경우 측정 데이터가 무효처리 된다. 그러나 한계 간격을 지나치게 가깝게 설정할 경우 유효 데이터 획득률이 낮아지므로 최적의 유효 한계 간격 설정이 필요하다. 선행차량과 후행차량(Following vehicle)의 운전 특성에 따른 간섭 효과를 정량화하기 위해 아래와 같은 오차 요인을 선정하였다. 이에 대한 반복 실험을 실시함으로써 선행차량에 따른 간섭 오차를 분석하였다.

- 선행차량 및 후행차량 RSD 통과 속도
- 선행차량 및 후행차량 주행 차선

② 기상조건에 따른 오차요인: 매연 RSD의 경우 기상 상황에 따라 측정 여부를 결정한다. 따라서 강우, 강설, 강풍 등의 가혹 기상조건에서는 측정을 시행하지 않는다. 태양 입사 고도에 따른 가시광선 세기, 약한 풍속 또한 어느 정도 오차요인이라고 할 수 있다. 다만 별도의 자체 실험 결과 해당 요인으로 인한 정량적 오차는 무시할 수 있는 수준으로 검증되어 기상조건에 따른 오차요인은 본 연구에서 고려하지 않았다.

3.2 개별 모듈 실험실 실험

통제된 실험 조건에서 매연 농도 계측 정확도에 대한 실험을 실시하였다. 이를 통해 개별 모듈의 H/W 혹은 S/W에 내재된 오차 정량화가 가능하다. 실험방법에 대한 공신력을 확보하기 위해 현행 법령으로 규정된 「환경 측정기기의 형식승인·정도검사 등에 관한 고시」의 시험방법을 준용하였다.

3.2.1 실험 방법

- ① 직선성: 측정기 안정화 후 광로별로 검증용 표준필터를 이용하여 서로 다른 3개 구간에 대해 측정 절대 오차를 10회 산출한다.
- ② 반복성: 측정기 안정화 후 광로별로 검증용 표준필터를 이용하여 단일 측정값에 대해 일정 시간 간격으로 반복 측정하여 최대 측정 오차를 산출한다. 이때 총 10회 반복 실험을 실시한다.

3.2.2 실험 결과

- ① 직선성: Table 2를 통해 확인할 수 있으며, 최대 오차 발생 광로의 오차값을 기재하였다. 적합기준 5.0% 대비 최대 오차율은 약 2.4%로서 적합한 측정정밀도가 확인되었다.
- ② 반복성: Table 3을 통해 확인할 수 있으며, 광로별 반복 오차 양상을 확인할 수 있다. 적합기준 5.0% 대비 최대 오차율은 약 2.6%로서 적합한 측정정밀도가 확인되었다.

Table 2 Linearity test result of smoke RSD

Repeat number	Error (%) [Filter : 26.8 %]	Error (%) [Filter : 37.2 %]	Error (%) [Filter : 60.8 %]
1	3.3	0.4	1.1
2	1.6	1.0	0.7
3	2.3	0.6	2.7
4	2.4	1.5	3.5
5	2.6	1.4	3.0
Average	2.4	1.0	2.2

Table 3 Repeatability test result of smoke RSD

Channel number	Error (%) [Filter : 37.2 %]				
	1st	2nd	3rd	4th	5th
1	1.7	0.9	1.5	1.7	2.2
2	2.3	1.3	2.0	1.9	2.6
3	0.5	0.7	0.9	1.0	1.6
4	0.8	0.9	1.4	1.5	2.3
5	0.1	0.6	0.8	0.7	1.2
6	-0.1	0.2	0.2	0.4	0.5
7	0.0	-0.3	-0.1	-0.1	0.0
8	1.1	0.7	0.8	1.4	1.8
9	-0.1	0.0	0.2	0.2	0.3
10	0.4	0.6	0.5	1.0	0.8
Max. error	2.3	1.3	2.0	1.9	2.6

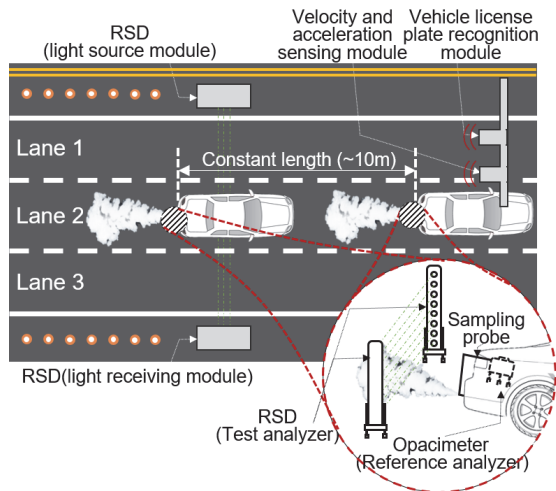


Fig. 4 Test bench schematics of vehicles and analyzers for field test

### 3.3 종합 시스템 현장 실험

#### 3.3.1 실험 조건 및 원칙

현장 실험을 통해 주요 오차 요인으로 예상되는 선행 차량 여부, 선행차량 주행 속도, 선행차량 주행 차선이 후행차량의 매연 RSD 측정값에 미치는 영향을 정량화 하고 분석하였다. Table 4를 통해 실험 조건을 확인할 수 있으며, Fig. 4와 같이 계측지점에 다차선 매연 RSD를 설치하였다. RSD 측정 정확도를 비교 확인하기 위해 선행 차량 배출구에는 국내 운행차 인증용으로 형식승인을 취득한 광투과식 매연측정기(Opacimeter)를 기준장비(Reference analyzer)로 설치하였다. 선행차량은 해당 차량 플럼의 간섭효과를 극대화하기 위해 과다 배출차량(High pollution car)으로 선정하였다. 반면 후행차량의 경

Table 4 Test conditions of field test

Vehicle specifications(Preceding high pollution car)			
Emission standard(Model year)	Euro4(2008)		
Fuel type(Powertrain type)	Diesel(J3)		
Exhaust gas treatment equipment	None		
Engine displacement(Total)	2,902 cc		
Vehicle mileage	335,075 km		
Vehicle total weight	2,945 kg		
Vehicle specifications(Following low pollution car)			
Emission standard(Model year)	Euro6(2020)		
Fuel type(Powertrain type)	Gasoline(L5Q)		
Exhaust gas treatment equipment	Three-way catalyst		
Engine displacement(Total)	999 cc		
Vehicle mileage	95,870 km		
Vehicle total weight	1,290 kg		
Test environmental conditions			
Environment conditions	Temperature	(11.7 ~ 24.5) °C	
	Humidity	(14 ~ 38) % (R.H.)	
Road conditions	Gradient	2.6°	
	Lane	3 Lanes in one way	
Driving method	Steady speed drive		
Test repeat number	20 Times for each mode		
Analyzer(Model)	Opacimeter(CSM-2500)		
Test 1(Driving lane effect test)			
Test vehicle	High pollution vehicle		
Driving speed	60 km/h		
Driving lane	1, 2, 3(single)		
Test 2(Preceding vehicle effect test)			
	Speed	Lane(Precede - Follow)	Distance
Case 1-1	40 km/h	2(Single vehicle)	> 20 m
Case 1-2	60 km/h	2(Single vehicle)	> 20 m
Case 2-1	40 km/h	2 - 2(Identical lane)	10 m
Case 2-2	60 km/h	2 - 2(Identical lane)	10 m
Case 3-1	40 km/h	1 - 3(Different lane)	10 m
Case 3-2	60 km/h	1 - 3(Different lane)	10 m

우 자체 발생 플럼에 따른 영향을 최소화하기 위하여 저 배출차량(Low pollution car)으로 선정하였다.

현장 실험은 차량 속도 및 도로 구배가 충분히 확보(2.6°)되어 매연 농도가 충분히 발생하고, 시간 당 평균 차량 통행량이 1,000대 이상 충분히 확보되면서도 정체가 발생하지 않아 유효 데이터 취득률이 높은 편도 3차선 도로를 선정하였다. 기타 설치에 필요한 설치부지 및 전력계통을 신규 인입 하였으며, Photo. 4를 통해 실제 현장 설치 모습을 확인할 수 있다.

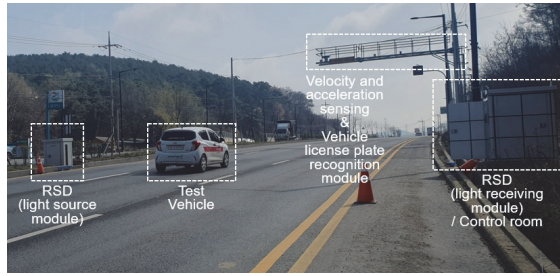


Photo. 4 Field test configuration of multi-lane smoke RSD

실험은 단일 주행 차량의 통과 차선에 따른 상관성 확인 실험과, 서로 다른 두 주행 차량의 연속 통과를 통한 후행차량에 대한 선행차량의 매연 농도 간섭 영향 확인 실험으로 구분할 수 있다. 전자의 경우 단일 과다배출 차량을 이용하여 충분히 빠른 주행(60 km/h)을 통해 상관성 분석에 충분한 매연 농도값을 확보하였다. 후자의 경우 실험 변수는 선행차량 여부, 두 차량의 통과 차속, 두 차량의 통과 차선으로 구성되며, 그에 따라 총 6가지 실험 사례를 설계하였다. 차속 조건은 RSD 설치 도로에서 가장 빈번하게 측정되는 속도(40 km/h, 60 km/h)로 선정하였다. 차선 조건은 동일 차선 주행 및 서로 다른 차선 주행을 상정하였다. 선행차량이 없는 경우를 대조군 실험

사례로 선정하였으며, 이를 위해 과다 배출차량의 단일 주행 실험 또한 실시하였다.

외부 기상 오차요인을 최소화하기 위해 서로 다른 실험 사례들은 순환하여 반복 수행하였다. 또한 최대한 주변 차량과의 간격을 최소 20 m 이상 확보함으로써 주변 차량과의 간섭을 배제하였다. 마지막으로 동일한 실험자 및 주행 절차를 준수함으로써 인적 요인에 의한 오차를 방지하고자 하였다. 데이터 처리에 있어서는 RSD 통과 시 인적 오차요인으로 인한 급격한 가감속으로 인해 측정값이 실험 평균값과 현저히 차이는 경우 해당 데이터를 무효처리 하였다.

### 3.3.2 차량 통과 차선 영향 실험(Test 1)

첫 번째 실험을 통해 단일 과다 배출차량의 RSD 통과 시 주행 차선에 따른 기준장비와의 매연 농도 측정 상관성 확인 실험을 실시하였다. 본 실험을 통해 매연 RSD의 측정 정확도, 그리고 주행 차선에 따른 측정값의 편향(Bias) 여부를 확인하는 것을 목적으로 하였다. 기준장비와 RSD의 측정 매연 농도값을 통해 Fig. 5와 같이 상관성 그래프를 도시할 수 있다. 이때 배기가스 직접 채취 방식인 기준장비 대비 어느 정도 확산된 플럼의 매연 농도를 측정하는 RSD 장비의 특성으로 인해 기준장비에서는

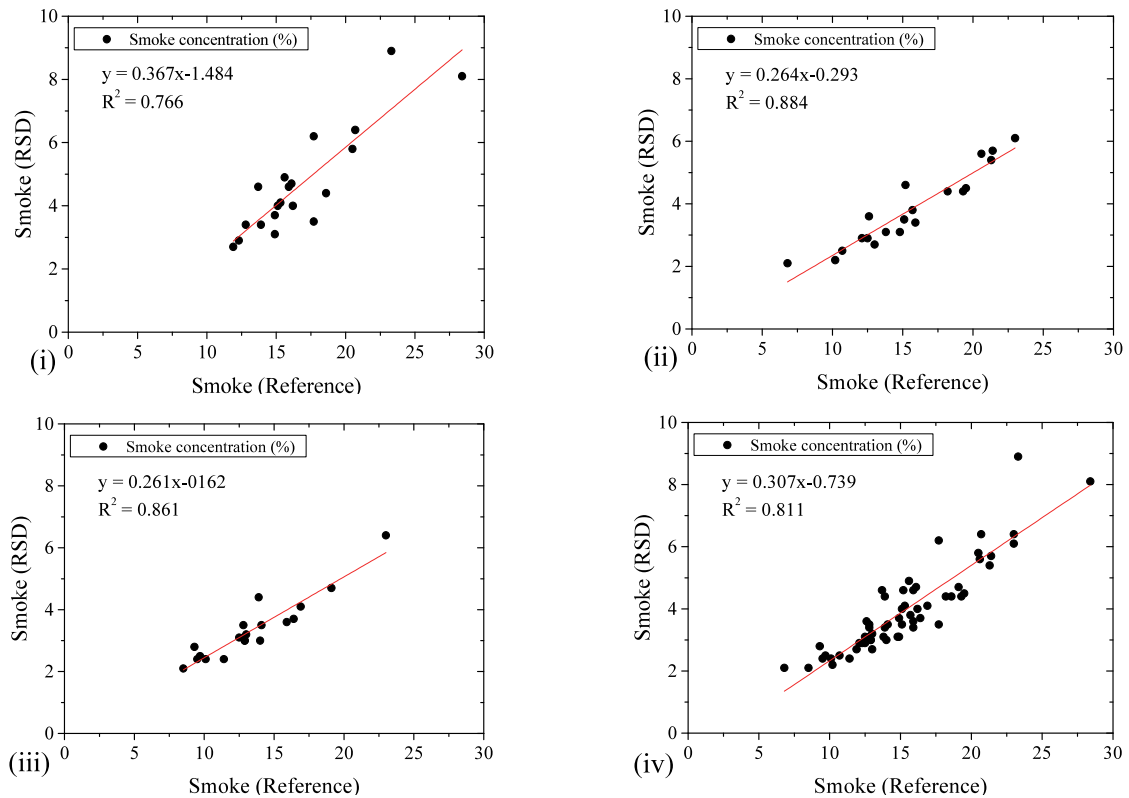


Fig. 5 Smoke concentration according to driving lane(i: Lane 1, ii: Lane 2, iii: Lane 3, iv: Total(superposed))



Table 5 Test results of test 1(driving lane effect test)

Driving lane	Smoke concentration (%)		Correlation coefficient	Multiple factor
	Reference	RSD		
Lane 1	16.78	3.75	0.77	3.75
Lane 2	15.59	3.83	0.88	4.13
Lane 3	13.44	3.35	0.86	4.06
Total	15.27	3.94	0.81	3.98

RSD 계측값 대비 약 3~4배 높은 매연 농도가 계측된다. 따라서 Fig. 5의 그래프는 이를 반영하여 RSD 측정값 대비 기준장비 측정값을 1:3의 축척으로 축소 도시하였다. 각 실험 조건 별 평균값은 Table 5를 통해 확인할 수 있다.

우선 산출된 상관성 계수(Correlation coefficient)는 모든 차선에서 0.77 이상으로 확인되었으며, 이는 상당히 높은 양의 상관성이 있음을 의미한다. 차선 별 상관성 계수의 차이는 있으나, 현장 실험임을 고려하였을 때 차선에 따른 측정값의 편향은 존재하지 않는다고 보인다.

RSD 측정값 대비 기준장비 계측값으로 정의되는 배수값(Multiple factor)은 모든 실험 조건에서 약 ±5% 수준으로 유사한 값이 산출됨을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5를 통해 외부 현장 실험임에도 불구하고 양호한 상관성 그래프가 확인되며, 이는 우측 하단의 모든 차선의 실험 결과를 중첩한 그래프(iv)를 통해 더욱 직관적으로 확인할 수 있다.

본 실험 결과를 통해 현장 실증 설치된 매연 RSD의 단일 차량에 대한 측정값이 기준장비와 상관성 계수 0.8 이상의 높은 양의 상관성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 예상되는 현장 주요 오차 요인 중 차량 통과 차선에 따른 오차 요인은 무시할 수 있는 수준인 것으로 확인되었다.

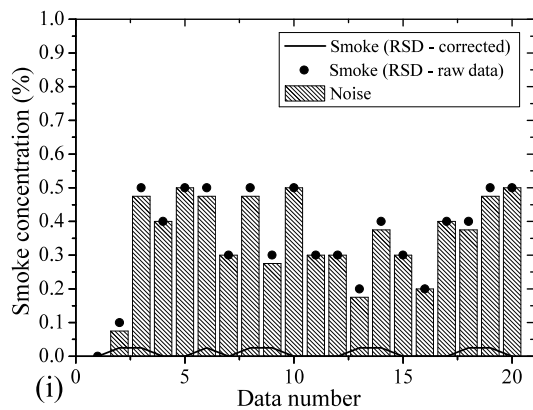


Table 6 Test results of test 2(driving speed effect test)

Driving speed	Smoke concentration (%)			
	Reference	RSD	Noise	RSD-corrected
40 km/h	0.045	0.355	0.344	0.011
60 km/h	0.050	0.335	0.322	0.013
Total	0.048	0.345	0.333	0.012

3.3.3 저농도 차량 단일 통과 실험(Test 2 - Case 1)

우선 선형차량의 영향이 없는 대조군에 대한 데이터를 확보하기 위해 저농도 차량의 단일 주행 실험(Test 2 - Case 1)을 실시하였다. 속도에 따른 영향을 확인하기 위해 40 및 60 km/h 두 조건에서 실험하였으며 Fig. 6 및 Table 6을 통해 실험 결과를 확인할 수 있다. 실험결과 두 조건 모두 약 0.05% 수준의 기준장비 매연 농도값이 확인되었다. 속도가 증가함에 따라 기준 장비로 측정된 저농도 차량 매연 측정값이 약 10% 정도 상승(0.045% 대비 0.050%)하였으나, 이는 반복 측정에 따른 경미한 오차로 판단된다.

이전 실험과 반대로 기준장비 대비 매연 RSD의 농도값이 약 7~8배 수준으로 높은 이유는 매연 RSD의 배경 오차(Ground error)가 존재하기 때문이며 이에 대한 정량화가 필요하다. 기준장비를 신뢰할 수 있다고 가정할 경우 매연 RSD에서 계측되어야 할 매연 농도는 기준장비 계측 매연 농도를 Table 5에서 계산한 배수 계수(Multiple factor) 만큼 나눈 값이라고 할 수 있으며, 이를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

상기 가정 하, 노이즈( $C_{noise}$ )는 매연 RSD 최초 측정값( $C_{RSD,raw}$ )에서 실제 차량으로부터 발생한 플럼으로 인한 매연 농도로 추정되는 농도를 제외한 값이라고 할 수 있다. 이때 매연 농도 추정 참값( $C_{RSD,cor}$ )은 기준장비 계

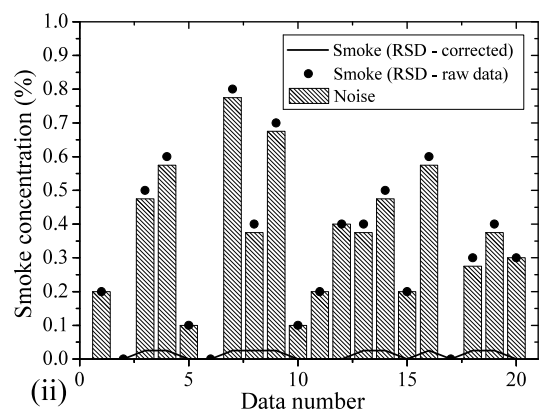


Fig. 6 Smoke concentration according to driving speed(i: 40 km/h 1, ii: 60 km/h, single vehicle test)

측값( $C_{Ref}$ )에 속도 별 배수 계수( $\alpha_{multi}$ )를 곱한 값이라고 할 수 있다. 따라서 식 (6)과 같이 매연 RSD 노이즈 ( $C_{noise}$ )를 정량화 할 수 있으며, 식 (7)과 같이 매연 RSD 최초 측정값에서 이를 제외함으로써 RSD 매연 농도 보정값( $C_{RSD,cor}$ )을 계산할 수 있다.

$$\alpha_{multi} = \frac{C_{Ref,ref}}{C_{RSD,ref}} \quad (5)$$

$$C_{noise} = C_{RSD,raw} - C_{Ref} \times \alpha_{multi} \quad (6)$$

$$C_{RSD,cor} = C_{RSD,raw} - C_{noise} \quad (7)$$

where  $C_{Ref,ref}$  : Smoke concentration measured by reference analyzer at reference test condition (Test 1)

$C_{RSD,ref}$  : Smoke concentration measured by RSD at reference test condition (Test 1)

상기 식 (5) ~ (7)을 통한 배경 오차 보정 결과 Table 6 을 통해 확인할 수 있듯이 0.3 % 이상의 무시할 수 없는

수준의 배경 오차가 존재하는 것으로 파악된다. 따라서 후속 실험에서는 산출 결과에서 배경 오차에 따른 노이즈(Noise)를 보정함으로써 배경 오차 요인을 배제하고자 하였다. 상기 보정 적용 결과 저농도 배출차량 플럼에 의한 RSD 매연 농도값은 0.01 % 수준으로 산출되며, 고농도 차량 배출 매연 농도 대비 무시할 수 있는 수준으로 판단된다.

### 3.3.4 선행 차량 통과 영향 실험(Test 2 - Case 2, 3)

본 실험(Test 2 - Case 2, 3)을 통해 선행 차량 통과 조건에 따라 발생한 고농도 매연 플럼이 후행 차량의 RSD 매연 농도 측정값에 미치는 영향을 분석하였다. 본 실험의 모든 데이터는 3.3.3에서 제시한 노이즈 제거 공식을 적용하여 보정하였으며 실험 결과는 Fig. 7, Fig. 8 그리고 Table 7을 통해 확인할 수 있다. 우선 선행 차량의 매연 농도 배수 계수가 이전 실험(Test 1)에서 산출된 결과값과 유사하므로 이를 통해 실험 결과에 있어 신뢰성이 확보된 것으로 판단된다. 매연 보정이 적용되었으며 후행 차량의 매연 농도가 거의 없음을 확인하였으므로(Test 2 - Case 1), 후행 차량에서 산출된 보정된 매연 농도는 모두 선행 차량의 영향으로 간주할 수 있다. 이를 정량화하기 위해 식 (8)과 같이 잔여 간섭 비율(Residual interference

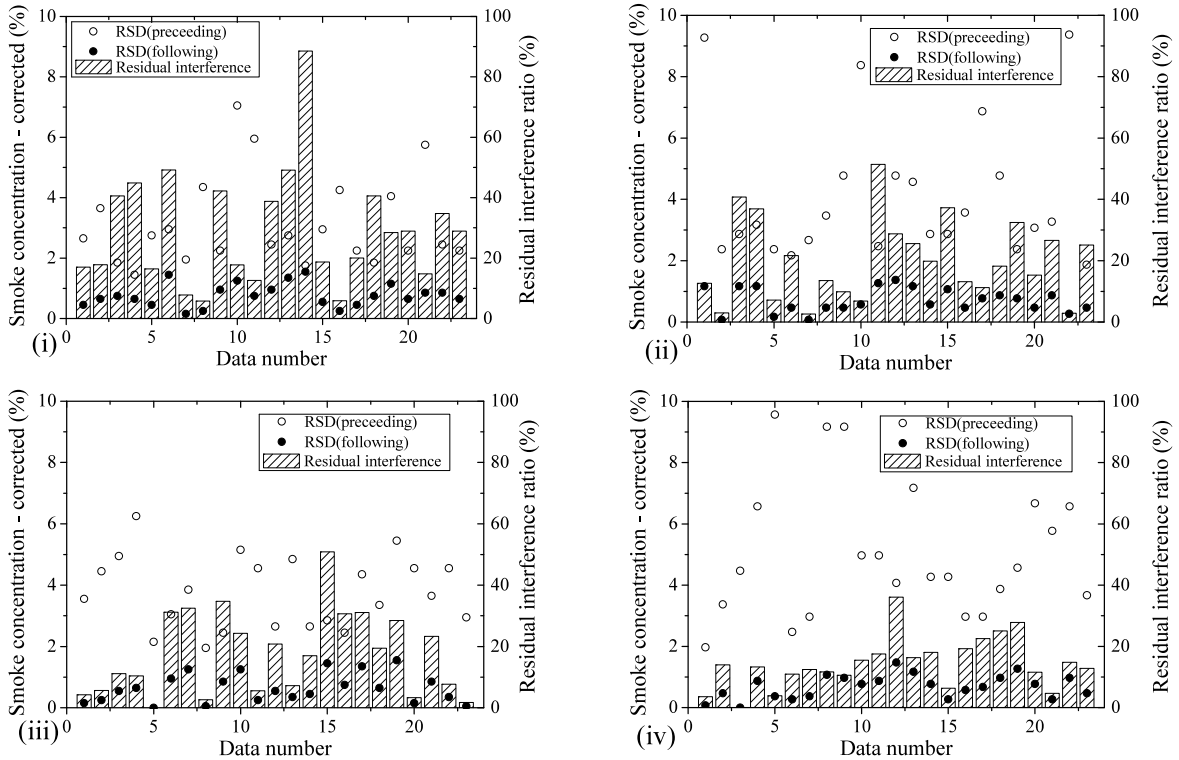


Fig. 7 Smoke concentration according to preceding vehicle driving characteristics(i: Case 2-1 1, ii: Case 2-2, iii: Case 3-1, iv: Case 3-2)

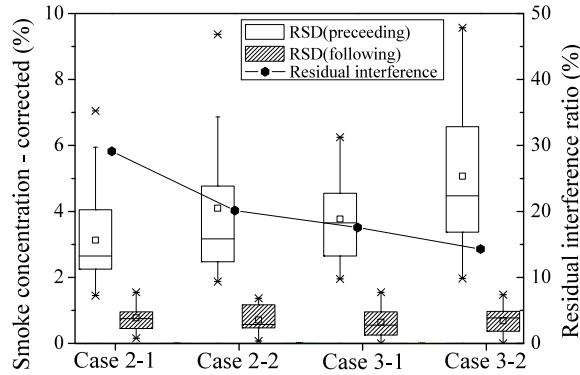


Fig. 8 Smoke concentration according to preceding vehicle driving characteristics(Summary)

Table 7 Test results of test 2(Summary)

Driving case	Smoke concentration (%) - raw data(RSD)		Multiple factor (Only preceding)	Smoke concentration (%) - corrected(RSD)		Residual interference ratio (%)
	Preceding	Following		Preceding	Following	
Case 2-1	3.47	1.12	4.81	3.13	0.77	29.11
Case 2-2	4.43	1.03	4.24	4.10	0.70	20.12
Case 3-1	4.11	0.98	4.09	3.77	0.64	17.56
Case 3-2	5.40	1.01	3.92	5.07	0.68	14.28

ratio)이라는 정량적 지표를 정의할 수 있다. 실험 사례 별 잔여 간섭 비율은 Table 7을 통해 확인할 수 있다.

$$\beta_{resi} = \frac{C_{RSD,cor,pre}}{C_{RSD,cor,fol}} \quad (8)$$

차량 주행속도가 높을수록 선행 차량의 매연 배출 농도값이 높아지는 경향이 관찰된다. 그러나 후행 차량의 매연 농도값은 이와는 상반된 결과를 보이며, 이는 선행 차량 주행 특성에 따른 선행 차량의 매연 플럼이 후행 차량의 매연 농도 측정값에 미치는 간섭 정도가 다르다는 것을 의미한다.

우선 차량 속도가 느릴수록 선행 차량의 플럼으로 인한 잔여 간섭 비율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 차선이 동일한 경우 잔여 간섭 비율이 20.12% 대비 29.11%로 약 1.4배 차이이며, 이는 차선이 차이나는 경우 잔여 간섭 비율 14.28% 대비 17.56%로 약 1.2배 차이나는 것과 대비하여 그 차이가 큰 경향이 관찰되었다. 차량 배기구에서 발생하는 배출가스는 즉시 확산되며 유동의 확산 특성은 차량 운행 조건 및 차량 외형에 따른 유동장의 항적(Wake)에 의존한다. Woo 등<sup>13)</sup>은 후행 차량에 설치된 이동식 배출가스 측정 시스템(PEMS)을 통해 선행 차량으로부터 발생하는 배기 플럼의 확산 특

성을 관찰하였다. 실험 결과 차량의 속도가 빠를수록 유동장의 난류 운동 에너지 강도가 강해지기 때문에 진행 단면의 모든 원주 방향으로의 확산이 촉진되는 현상을 관찰하였다. 이는 후행 차량에 대한 간섭량이 줄어들 수 있음을 의미한다. Kanda 등<sup>14)</sup>은 차량의 풍동 터널 실험을 통해 차량 주변 유동장 속도가 느릴수록 배기구 후단에서 난류가 발생하여 유동장 항적이 끌어들여지는 특성을 관찰하였다. 이러한 유동 특성으로 인해 차량 속도가 빠를수록 배기가스가 차량 진행 방향으로 낮게 깔려 확산된다. 반면 차량 속도가 느릴수록 연직 방향으로 확산됨으로써 해당 자리에 머무는 경향이 발생한다. 이러한 속도에 따른 전후 차량 행렬 간 유동 특성들로 인해, 차량의 속도가 느릴수록 두 차량 간 매연 농도 간섭량이 증가하는 것으로 사료된다. 다만 어느 이상의 속도가 확보될 경우 속도에 따른 유동 확산 특성 차이는 크지 않으며<sup>14)</sup> 이에 대한 추가 실험도 의미가 있을 것으로 사료된다.

차량 주행차선이 동일한 경우 선행 차량의 플럼으로 인한 잔여 간섭 비율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 속도가 40 km/h인 경우가 잔여 간섭 비율이 17.56% 대비 29.11%로 약 1.7배 차이이며, 속도가 60 km/h인 경우 잔여 간섭 비율 14.28% 대비 20.12%로 약 1.4배 차이나는 것과 대비하여 그 차이가 큰 경향이 관찰되었

다. 또한 실험결과를 통해 속도보다 더 큰 간섭 요인임을 확인할 수 있다. Kanda 등<sup>15)</sup>은 차량 모형을 일련의 행렬(Queue)로 배치하고 이에 대한 풍동 터널 실험을 통해 선행 차량 플럼 확산 특성으로 인한 후행 차량 주위의 유동 특성을 연구하였다. 이러한 차량 행렬에서는 후행 차량이 선행 차량 배기가스 플럼을 진행 방향 양 옆으로 확산 시킴과 동시에 이를 후행 차량의 뒷부분에서 수직 아래 방향으로 끌어내리는 특성이 관찰되었다. 이는 후행 차량 주위의 유동이 선행 차량의 배기가스 플럼을 후행 차량의 배기가스 플럼과 중첩시킬 수 있음을 의미하며, 이로 인해 동일 차선 주행 실험 사례의 잔여 간섭 비율이 증가된 것으로 사료된다. 다만 이러한 특성은 주로 유선형(Streamlined shape)으로 설계된 승용차에서 강하며 트럭의 경우에는 다가오는 플럼 유동을 막아 수직 위 방향으로 밀어내는 유동이 강한 특성이 있다. 이로 인해 승용차 대비 선행 차량의 배기가스 플럼을 트럭 뒷부분으로 끌어내리는 힘이 상대적으로 약하므로, 본 실험 결과와는 다소 상반되는 결과가 도출될 수도 있음을 의미한다.

Fig. 8을 통해 선행 차량 통과 영향 실험 결과를 요약할 수 있다. 선행 차량의 속도가 빠를수록 배출 매연 농도는 증가하나, 후행 차량에 미치는 잔여 간섭량에 따라 후행에 대한 계측 매연 농도 경향은 상이하였다. 매연 RSD를 통과하는 두 차량의 속도가 느릴수록, 그리고 두 차량의 운행 차선이 동일할수록 선행 차량의 배기 플럼이 후행 차량의 배기 플럼과 중첩되는 현상이 강해졌으며 그에 따른 매연 측정 간섭량도 증가되는 경향이 확인되었다. 다만 이는 유선형 승용차에 국한된 실험 결과이며 트럭, 버스 등 차체 유선형 적용도가 낮은 차량의 경우에는 추가적인 실험을 통한 경향성 확인이 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 다차선용 매연 RSD를 국산화 개발하였으며, 현장 실험을 수행하였다. 실험실 실험을 통해 개별 시스템에 대한 측정 정확도를 확인하였고 현장 실험을 통해 현장 적용성에 대해서도 연구하였으며, 아래와 같은 결론이 도출되었다.

- 1) 주행 차량의 차선에 따른 매연 RSD의 편향된 측정경향은 발생하지 않는 것으로 확인되었으며, 평균 0.81의 높은 양의 상관관계수가 산출되므로 단일 차량에 대한 현장 계측 신뢰도는 충분한 것으로 파악되었다.
- 2) 단일 차량 주행 실험을 통해 배경 농도에 따른 매연 RSD의 배경 오차는 매연 백분율 농도 기준 약 0.333 % 수준으로 산출되었으며, 향후 매연 RSD를 통한 행정 활용 시 이러한 오차는 보정되어야 한다.

- 3) 서로 다른 두 차량이 일정 간격 이하로 매연 RSD를 통과할 경우 선행 차량에서 발생한 배기가스 플럼이 후행 차량에 미치는 영향은 유의하며 그 값은 두 차량 속도가 느릴수록, 그리고 두 차량의 운행차선이 가까울수록 증가하는 경향이 관찰되었다.
- 4) 향후 매연 RSD를 통한 차량 단속, 차량 배출가스 검사 권고 통지 등의 행정 적용 시 본 연구 결과를 통한 매연 RSD 내재 오차 요인에 대한 정량적인 보정 및 이를 반영한 매연 배출 허용기준 설정을 통해 오류 부적합률(Error Non-conformity rate)을 최소화 할 수 있다.
- 5) 본 연구의 실험 조건은 특정 운전조건, 특정 차종에 국한되었으며 이에 반해 실제 매연 RSD를 통과하는 차량의 운전조건과 차종은 매우 다양할 것으로 예상된다. 따라서 매연 RSD의 현장적용 시 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위한 적절한 추가적인 실험 연구가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 환경부 한국환경산업기술원의 대기환경 관리기술 사업화 연계 기술개발사업(2021003400003)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### References

- 1) Ministry of Environment, Fine Dust Act, [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](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.
- 2) WHO, "IARC: Diesel Engine Exhaust Carcinogenic," International Agency for Research on Cancer, Vol. 213, 2012.
- 3) S. J. Park, J. M. Lee, S. H. Lee, S. C. Lim, J. H. Noh, S. Y. Cho, J. H. Ha, H. J. Kim, C. S. Kim, S. H. Park, D. Y. Lee and E. S. Kim, "Exposure of Ultrafine Particulate Matter Causes Glutathione Redox Imbalance in the Hippocampus: A Neurometabolic Susceptibility to Alzheimer's Pathology," Science of the Total Environment, Vol.718, Paper No. 137267, 2020.
- 4) H. W. Park, S. C. Lim, S. H. Lee, D. S. Mun, J. Y. Kang, H. E. Kim, H. L. Park, C. S. Kim, S. H. Park, Y. M. Lim and B. Y. Joung, "High Level of Real Urban Air Pollution Promotes Cardiac Arrhythmia in Healthy Mice," Korean Circulation Journal, Vol. 51, No.2, pp.157-170, 2021.

- 5) S. G. Shin, Analysis of Emission Gas Characteristics of On-road Vehicle Using Remote Sensing Device, Master Dissertation, Korea National Open University, Seoul, 2020.
- 6) D. K. Lee, Y. L. Kim and J. H. Kim, "Basic Research on the Effect of Particular Matter Emitted by Automobiles," Korea Institute of Public Finance, 2017.
- 7) National Air Emission Inventory and Research Center, CAPSS, <https://www.air.go.kr/capss/emission/sector.do?menuId=30>, 2023.
- 8) Y. G. Jang, "Current Status and Problems of Particular Matter," Journal of Environmental Studies, Vol.58, pp.4-13, 2016.
- 9) Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on Type-approval of Motor Vehicles and Engines and of Systems, Components and Separate Technical Units Intended for such Vehicles, with Respect to Their Emissions and Battery Durability (Euro 7) and Repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009, European Commission, Brussels, 2022.
- 10) B. Giechaskiel, A. Melas, G. Martini and P. Dilara, "Overview of Vehicle Exhaust Particle Number Regulations," Processes, Vol.9, No.12, pp.2216-2239, 2021.
- 11) S. I. Kwon, "The Domestic Regulations on In-use Vehicle Emissions by Remote Sensing Device," Journal of KSAE, Vol.40, No.9, pp.23-25, 2018.
- 12) D. H. Choi, S. H. Lee, G. H. Kim, H. K. Ryoo, K. B. Choi, S. K. Oh and S. L. Kim, "A Study on the Domestic Development and Field Application Test of Smoke Remote Sensing Device(RSD) for In-use Diesel Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.29, No. 9, pp.811-821, 2021.
- 13) S. H. Woo, K. H. Kwak, G. N. Bae, K. H. Kim, C. H. Kim, S. J. Yook, S. J. Jeon, S. I. Kwon, J. S. Kim and S. B. Lee, "Overestimation of On-road Air Quality Surveying Data Measured with a Mobile Laboratory Caused by Exhaust of a Vehicle Ahead in Dense Traffic Areas," Environmental Pollution, Vol.218, pp.1116-1127, 2016.
- 14) I. Kanda, K. Uehara, Y. Yamao, Y. Yoshikawa and T. Morikawa, "A Wind-Tunnel Study on Exhaust Gas Dispersion from Road Vehicles - Part I: Velocity and Concentration Fields Behind Single Vehicles," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.94, No.9, pp.639-658, 2006.
- 15) I. Kanda, K. Uehara, Y. Yamao, Y. Yoshikawa and T. Morikawa, "A Wind-Tunnel Study on Exhaust Gas Dispersion from Road Vehicles - Part II: Effect of Vehicle Queues," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.94, No.9, pp.659-673, 2006.