(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0079698
(43) 공개일자 2023년06월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 15/02 (2006.01) *G01J 3/28* (2006.01)
G01N 15/00 (2017.01) *G01N 21/31* (2006.01)
G01N 21/84 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 15/0227 (2013.01)
G01J 3/2823 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0166739
(22) 출원일자 2021년11월29일
심사청구일자 2021년11월29일

(71) 출원인
충남대학교산학협력단
대전광역시 유성구 대학로 99 (궁동, 충남대학교)
(72) 발명자
유재형
대전광역시 유성구 계룡로88번길 403
박찬혁
대전광역시 중구 중촌로 31 금성백조아파트 2-103
박범진
대전광역시 서구 신갈마로155번길 405호
(74) 대리인
이충한

전체 청구항 수 : 총 6 항

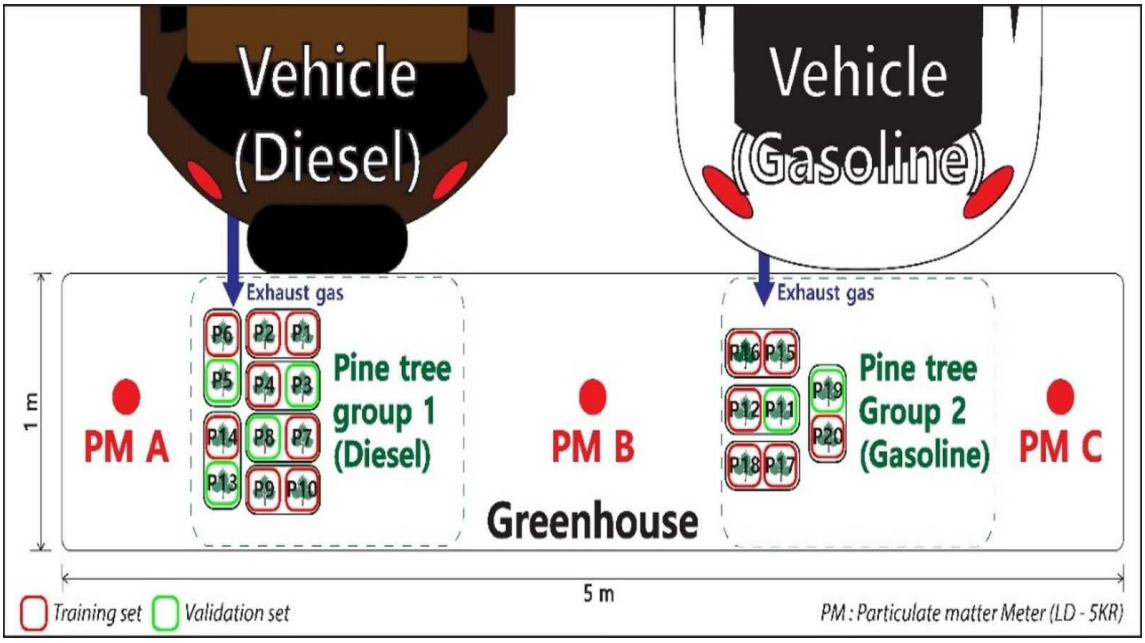
(54) 발명의 명칭 **초분광 분석을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법**

(57) 요 약

본 발명은 미세먼지 탐지 방법에 관한 것으로 보다 구체적으로는 초분광 영상을 활용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지방법에 관한 것으로, 본 발명의 하나의 양태에 따르면, 초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법이 제공되고, 이 방법은,

(뒷면에 계속)

대 표 도



초분광 카메라를 통해 수목의 초분광 영상을 획득하는 단계;

획득된 초분광 영상을 데이터 처리하는 단계;

데이터 처리된 초분광 영상의 반사 스펙트럼으로부터 미세먼지 예측 모델을 구현하는 단계를 포함하고,

상기 미세먼지 예측 모델은 다음의 식(2)로 표현되고,

$$P_{PM\,exposed\,pine\,tree} = e^{(C+\beta 1X1+\beta 2X2+\ldots+\beta nXn)}/1+ e^{(C+\beta 1X1+\beta 2X2+\ldots+\beta nXn)} \qquad (2)$$

여기서, $P_{PM\ exposed\ pine\ tree}$는 PM 노출 확률, C는 상수 Y 절편, βn은 독립변수 Xn의 기울기, Xn은 대역 n의 반사율 값을 나타낸다.

(52) CPC특허분류

G01N 21/314 (2013.01)

G01N 2015/0096 (2013.01)

G01N 2021/3148 (2013.01)

G01N 2021/8466 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711110666
과제번호	2020R1A2C2005439
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명	지질학적 인자와 분광분석을 활용한 토양오염 영상화 기법 연구
기 여 율	1/1
과제수행기관명	충남대학교
연구기간	2020.03.01 ~ 2023.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법에 있어서,

초분광 카메라를 통해 수목의 초분광 영상을 획득하는 단계;

획득된 초분광 영상을 데이터 처리하는 단계;

데이터 처리된 초분광 영상의 반사 스펙트럼으로부터 미세먼지 예측 모델을 구현하는 단계를 포함하고,

상기 미세먼지 예측 모델은 다음의 식(2)로 표현되고,

$$P_{PM\,exposed\,pine\,tree} = e^{(C+\beta 1X1+\beta 2X2+\ldots+\beta nXn)}/1+ e^{(C+\beta 1X1+\beta 2X2+\ldots+\beta nXn)} \qquad (2)$$

여기서, $P_{PM\ exposed\ pine\ tree}$는 PM 노출 확률, C는 상수 Y 절편, βn은 독립변수 Xn의 기울기, Xn은 대역 n의 반사율 값인 것을 특징으로 하는

초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 미세먼지 예측 모델에 이용되는 파장 대역은 1개의 블루 대역, 1개의 그린 대역, 1개의 레드 대역 및 11개의 근적외선 대역을 포함하는 것을 특징으로 하는

초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

블루 대역은 452 nm, 그린 대역은 584 nm, 레드 대역은 619 nm의 파장을 포함하고,

근적외선 대역은 적어도 720 nm, 735 nm, 744nm, 753nm, 757nm, 760nm, 763nm, 799nm, 850nm, 927nm, 및 948 nm를 포함하는 것을 특징으로 하는

초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

미세먼지 예측 모델은,

$P_{PM\ exposed\ pine\ tree} = e^{x}/(1 + e^{x})$로 치환되고,

여기서, x = 35.3(452 nm) - 56.5(584 nm) - 53(619 nm) + 164.2(720 nm) - 101.4(735 nm) - 103.7(744 nm) - 127.2(753 nm) + 177.5(757 nm) - 132.7(760 nm) + 98.5(763 nm) + 52.1(799 nm) + 101.5(850 nm) - 50.4(927 nm) - 31.7(948 nm) + 3.2 인 것을 특징으로 하는

초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 미세먼지 예측 모델은,

$P_{PM\ exposed\ pine\ tree}$의 값이 0.5 이상이면 미세먼지 노출인 것으로 출력하고,

$P_{PM\ exposed\ pine\ tree}$의 값이 0.5 미만이면 미세먼지 미노출인 것으로 출력하는 것을 특징으로 하는

초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

미세먼지 예측 모델을 구현하는 단계이후, 이미지 매핑 단계를 더 포함하고,

이미지 매핑 단계는 미세먼지 예측 모델로부터 출력되는 확률 값에 따라 사용자의 화면에 수목의 미세먼지 노출 여부를 표시하도록 구현된 것을 특징으로 하는

초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 미세먼지 탐지 방법에 관한 것으로 보다 구체적으로는 초분광 영상을 활용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 최근 지속적인 산업개발과 중국발 스모그 유입 등의 이유로 공기 중 부유하는 미세먼지의 농도가 크게 증가하고 있는 추세이다. 이러한 미세먼지는 인체로 흡입될 경우에 호흡 및 심혈관계 질환의 원인이 될 뿐만 아니라, 천식 및 아토피성 피부염 등의 알레르기성 질환을 악화시킨다. 이에 따라, 근래에는 미세먼지의 농도를 모니터링 할 수 있는 시스템이 보급되고 있다.

[0005] 일반적으로 고가, 대형의 장비 기반의 대기오염 측정소가 시 또는 구 단위로 설치되어, 미세먼지의 특정 시간당 평균 농도를 알려주는 광역 예보 시스템이 제공된다. 그런데, 고층 건물이 밀집되고 유동 인구 및 교통량의 변화가 큰 대도시에서는 공기 흐름 및 미세먼지의 확산 양상이 매우 복잡함에 따라 서로 인접한 지역간에도 미세먼지의 농도 편차가 크다.

[0007] 그로 인해, 일반적인 광역 예보 시스템을 통한 미세먼지의 정확한 농도 분포파악이 어렵다. 이에 따라, 근래에는 실시간으로 원하는 지역의 미세먼지를 파악할 수 있는 미세먼지 측정 시스템에 대한 다양한 연구가 지속적으로 이루어지고 있는 추세이다.

[0009] 도심지에서 발생되는 대부분의 미세먼지는 주로 자동차연료의 연소의 결과로 발생한다. 특히 자동차 배기가스 배출로 인한 PM은 질소산화물(NOx)과 유해대기오염물질(HAPs)을 다량 함유하여 심각한 공해를 유발한다. 대기오염은 지표 근처에 설치된 다양한 감지장치에 의해 면밀히 모니터링되고 있지만, 이러한 모니터링 장치는 지표면

의 작은 부분만을 관찰하므로 다른 광대한 지역은 샘플링되지 않고 대기오염 과정에 대한 우리의 이해를 방해하며, 최근에는 식생 물리화학적 및 스펙트럼 특성을 사용하여 대기 오염 모니터링에 대한 솔루션으로 원격 감지가 제안된 바 있다.

[0011] 특히, 식물 표면의 PMs 흡착은 원격 감지 장치에서도 관찰할 수 있으므로 대기 오염 연구에 사용되었다. 종래의 연구에 따르면, 발전소 연료원이 PM 생성 및 식생 반사율의 관련 변동에 영향을 미치는지 조사하기 위해 발전소 주변의 오렌지 잎의 반사율이 분석된 바 있고, 또한 나무의 종류에 따라 PM의 흡착 수준이 15배까지 다를 수 있음을 발견된 바 있다. 또한 종래의 연구에 따르면, PM 누적된 유오니무스 자포니쿠스 툰브(Euonymus japonicus thunb)와 깨끗한 유오니무스 자포니쿠스 툰브의 스펙트럼 반사율을 비교하였고 근적외선(NIR) 대역이 PM 축적에 민감하다는 것을 발견된 바 있으며, 이는 식생물의 원격 감지가 대기 오염 수준을 모니터링하는 효과적인 방법이 될 수 있음을 시사한다.

[0013] 그러나 원격탐사를 통한 미세먼지 농도 예측과 관련하여 노출시간, 거리, 식생 종류 등 초미세먼지 노출 요인에 대한 종합적인 연구는 이루어지지 않았다. 특히, 우리나라에 널리 분포하는 소나무에 대해서는 거의 조사되지 않았으며, 실제로 침엽수는 활엽수보다 대기와의 접촉면적이 넓어 더 많은 PM을 축적할 수 있는 것으로 예상된다. 즉 기존 연구들은 수관의 온도, 습도, 나이, BRDF(양방향 반사율 분포 함수)의 가변성에 관계없이 자연 환경에서 활엽수에 주로 초점을 맞추고 진행되었다.

[0015] 이러한 요소는 복잡한 환경에서 분리되어 별도로 연구되어야 하며, 따라서 이 발명의 목적은 솔잎의 스펙트럼 변화를 통해 PM의 유무를 감지하는데 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0017] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 10-1705346(2017년 2월 13일)

비특허문헌

[0018] (비특허문헌 0001) Barreto, A., Paulus, S., Varrelmann, M., Mahlein, A.-K., 2020. Hyperspectral imaging of symptoms induced by Rhizoctonia solani in sugar beet: comparison of input data and different machine learning algorithms. Journal of Plant Diseases and Protection. 127, 441-451. https://doi.org/10.1007/s41348-020-00344-8

(비특허문헌 0002) Beckett, K.P., Freer-Smith, P.H., Taylor, G., 1998. Urban woodlands their role in reducing the effects of particulate pollution. Environmental pollution. 99, 347-360. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00016-5

발명의 내용

해결하려는 과제

[0019] 본 발명은 전술한 문제점에 기반하여 안출된 발명으로서 솔잎의 스펙트럼 변화를 통해 PM의 유무를 감지할 수 있는, 초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0021] 전술한 목적을 달성하기 위해 본 발명의 하나의 양태에 따르면, 초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법이 제공되고, 이 방법은,

[0022] 초분광 카메라를 통해 수목의 초분광 영상을 획득하는 단계;

[0023] 획득된 초분광 영상을 데이터 처리하는 단계;

[0024] 데이터 처리된 초분광 영상의 반사 스펙트럼으로부터 미세먼지 예측 모델을 구현하는 단계를 포함하고,

[0025] 상기 미세먼지 예측 모델은 다음의 식(2)로 표현되고,

[0026] $$P_{PM\,exposed\,pine\,tree} = e^{(C+\beta 1X1+\beta 2X2+\ldots+\beta nXn)}/1+ e^{(C+\beta 1X1+\beta 2X2+\ldots+\beta nXn)} \quad (2)$$

[0027] 여기서, $P_{PM\ exposed\ pine\ tree}$는 PM 노출 확률, C는 상수 Y 절편, βn은 독립변수 Xn의 기울기, Xn은 대역 n의 반사율 값을 나타낸다.

[0029] 또한 전술한 양태에서, 미세먼지 예측 모델에 이용되는 파장 대역은 1개의 블루 대역, 1개의 그린 대역, 1개의 레드 대역 및 11개의 근적외선 대역을 포함하는 것이 바람직하다.

[0031] 또한 전술한 양태에서 블루 대역은 452 nm, 그린 대역은 584 nm, 레드 대역은 619 nm의 파장을 포함하고, 근적외선 대역은 적어도 720 nm, 735 nm, 744nm, 753nm, 757nm, 760nm, 763nm, 799nm, 850nm, 927nm, 및 948 nm를 포함하는 것이 바람직하다.

[0033] 또한 전술한 양태에서, 미세먼지 예측 모델은,

[0034] $P_{PM\ exposed\ pine\ tree} = e^{x}/(1 + e^{x})$로 치환되고,

[0035] 여기서, x = 35.3(452 nm) - 56.5(584 nm) - 53(619 nm) + 164.2(720 nm) - 101.4(735 nm) - 103.7(744 nm) - 127.2(753 nm) + 177.5(757 nm) - 132.7(760 nm) + 98.5(763 nm) + 52.1(799 nm) + 101.5(850 nm) - 50.4(927 nm) - 31.7(948 nm) + 3.2 인 것이 바람직하다.

[0037] 또한 전술한 양태에서, 상기 미세먼지 예측 모델은,

[0038] $P_{PM\ exposed\ pine\ tree}$의 값이 0.5 이상이면 미세먼지 노출인 것으로 출력하고, $P_{PM\ exposed\ pine\ tree}$의 값이 0.5 미만이면 미세먼지 미노출인 것으로 출력한다.

[0040] 또한 전술한 양태에서, 상기 방법은, 미세먼지 예측 모델을 구현하는 단계이후, 이미지 매핑 단계를 더 포함하고,

[0041] 이미지 매핑 단계는 미세먼지 예측 모델로부터 출력되는 확률 값에 따라 사용자의 화면에 수목의 미세먼지 노출 여부를 표시하도록 구현된다.

발명의 효과

[0043] 본 발명에 따르면 솔잎의 반사 스펙트럼 변화를 통해 PM의 유무를 감지할 수 있는, 초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0045] 도 1은 본 발명에 따른 초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법에 이용되는 실험 환경을 설명하기 위한 설명도;

도 2는 노출 시간에 따른 대기 중 PM 농도의 변화를 나타내는 그래프;

도 3의 (a)는 P 값 곡선(여기서 음영 영역은 p 값이 0.05보다 작은 스펙트럼 대역을 나타냄)과 중첩된, 0, 3, 5 시간 노출된 디젤/가솔린 그룹에서의 파장별 반사율을, 도 3의 (b)는 P 값 곡선(여기서 음영 영역은 p 값이 0.05보다 작은 스펙트럼 대역을 나타냄)과 중첩된, 0, 3, 5 시간 노출된 가솔린 그룹에서의 파장별 반사율을, 도 3의 (c)는 P 값 곡선(여기서 음영 영역은 p 값이 0.05보다 작은 스펙트럼 대역을 나타냄)과 중첩된, 0, 3, 5 시간 노출된 디젤 그룹에서의 파장별 반사율을, 도 3의 (d)는 각 샘플 그룹의 분광반사율과 차량의 배기노출시간 사이의 상관계수를 나타내는 상관도(여기서 음영 영역은 0.6 보다 낮은 컷오프 상관 계수를 나타냄)를 나타내는 도면;

도 4의 (a)는 p값 곡선(여기서 음영 영역은 0.05 미만의 P값을 갖는 스펙트럼 밴드를 나타냄)과 중첩된, 디젤/가솔린 그룹의 0, 3, 5 시간 가스 노출된 솔잎 샘플의 1차 미분 곡선을, (b)는 p값 곡선(여기서 음영 영역은 0.05 미만의 P값을 갖는 스펙트럼 밴드를 나타냄)과 중첩된, 가솔린 그룹에서의 0, 3, 5 시간 가스 노출된 솔잎 샘플의 1차 미분 곡선을, (c)는 p값 곡선(여기서 음영 영역은 0.05 미만의 P값을 갖는 스펙트럼 밴드를 나타냄)과 중첩된, 디젤 그룹에서의 0, 3, 5 시간 가스 노출된 솔잎 샘플의 1차 미분 곡선을, (d)는 각 샘플 그룹의 1차 미분과 차량의 배기노출시간 사이의 상관계수를 나타내는 상관도(여기서 음영 영역은 0.6 보다 낮은 컷오프 상관 계수를 나타냄)를 나타내는 도면;

도 5의 (a)는 P-값 곡선(여기서 음영 영역은 P값이 0.05 미만인 스펙트럼 밴드를 나타냄)과 중첩된 0, 3, 5 시간 동안 가스 노출된 디젤/가솔린 그룹의 솔잎의 평균 연속체 제거 곡선, (b)는 가솔린 그룹의 솔잎의 평균 연속체 제거 곡선, (c)는 디젤 그룹의 솔잎의 평균 연속체 제거 곡선을 나타내고, (d)는 각 샘플 그룹의 연속체 제거와 배기노출시간 사이의 상관계수를 나타내는 상관도(여기서 음영 영역은 0.6 보다 낮은 컷오프 상관 계수를 나타냄)을 나타내는 도면;

도 6은 초분광 이미지의 평균 분광 반사율을 나타내며, 각각의 실선은 PM 노출 실헌 전후의 반사율을 나타내는 도면;

도 7은 초분광 영상에 적용된 PM 노출 소나무 검출 지수에 기반한 PM 노출 소나무를 이미지를 나타내는 도면;

도 8은 전술한 바와 같이 본 발명에서 따른 초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법의 흐름을 나타내는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0046] 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부되는 도면과 함께 상세하게 후술되는 실시예를 참조하면 명확해질 것이다. 그러나, 본 발명은 이하에서 개시되는 실시예에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 것이다.

[0048] 본 명세서에서 본 실시예는 본 발명의 개시가 완전하도록 하며, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이다. 그리고 본 발명은 청구항의 범주에 의해 정의될 뿐이다. 따라서, 몇몇 실시예들에서, 잘 알려진 구성 요소, 잘 알려진 동작 및 잘 알려진 기술들은 본 발명이 모호하게 해석되는 것을 피하기 위하여 구체적으로 설명되지 않는다.

[0050] 명세서 전체에 걸쳐 동일 참조 부호는 동일 구성 요소를 지칭한다. 그리고, 본 명세서에서 사용된(언급된) 용어들은 실시예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명세서에서, 단수형은 문구에서 특별히 언급하지 않는 한 복수형도 포함한다. 또한, '포함(또는, 구비)한다'로 언급된 구성 요소 및 동작은 하나 이상의 다른 구성요소 및 동작의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.

[0052] 다른 정의가 없다면, 본 명세서에서 사용되는 모든 용어(기술 및 과학적 용어를 포함)는 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 공통적으로 이해될 수 있는 의미로 사용될 수 있을 것이다. 또 일반적으로

사용되는 사전에 정의되어 있는 용어들은 정의되어 있지 않은 한 이상적으로 또는 과도하게 해석되지 않는다.

[0054] * 실험의 설정

[0055] 도 1은 본 발명에 따른 초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법에 이용되는 실험 환경을 설명하기 위한 설명도이다.

[0057] 본 발명에서는 침엽수 잎을 통해 미세먼지의 흡착 여부를 결정하기 위해, 주로 한반도에 분포하고 있는, 평균 높이 20cm의 수령 3년생 소나무(Pinus densiflora) 총 20그루를 사용하였다. 이들의 잎의 길이는 8~12cm인 바늘 모양이고 2개의 침엽이 하나의 엽속을 이루고 있다.

[0059] 소나무는 한반도 내 가장 많이 자생하는 수종으로 주요 수종중 소나무 비율운 42%이고, 침엽수 중 소나무 비율은 70%를 차지하며, 소나무는 한반도 뿐만 아니라 전세계적으로 넓은 지역에서 자생하는 수종이며, 대부분의 지역에서 활용 가능한 이점이 있다.

[0061] 샘플로 이용된 소나무는 주차장에 설치된 길이 500cm, 너비 100cm, 높이 100cm 크기의 온실에 위치되었다(도 1 참조). PM 생산을 위해 2대의 차량을 사용하여 연료종별(휘발류, 디젤) 차이를 모니터링 하였으며, 가솔린 차량은 폭스바겐 2010 Passat 2.0T, 디젤 연료차량은 싼타페 2001을 사용하였다.

[0063] 도 1에 도시된 바와 같이 소나무는 두 그룹으로 나누어 한 그룹은 디젤 차량 배기 가스 배출구 근처에 배치하고 다른 그룹은 가솔린 차량 배기 가스 배출구 근처에 배치하여 두고 차량 배기 가스를 온실에 5시간 동안 공급하였다.

[0065] * PM 농도 모니터링

[0066] 온실 내 PM 농도는 미세먼지 계측기를 통해 측정되었으며, 미세먼지 계측기로는 일본 SIBATA사의 LD-5KR PM 미터가 이용되었다. 이 계측기는 레이저 다이오드 광원을 사용하는 광산란형 PM 미터이고, 0.001~10.000 mg/m3의 PM 농도 범위에서 0.001 mg/m3의 민감도 수준으로 대기 중 PM 농도를 측정할 수 있다. 이 계측기의 측정 정확도는 폴리스티렌 및 라텍스 보정으로 보정된 입자의 ±10% 수준이다.

[0068] 3대의 PM 미터기가 설치되었는데, 하나는 디젤 가스 공급 구역 근처, 하나는 가솔린 가스 공급 구역 근처, 다른 하나는 둘 사이의 중앙에 설치되었으며, 실험 중 1시간부터 5시간까지 온실 내 PM 농도를 측정하였다.

[0070] 두 그룹의 소나무를 디젤 차량 배기 가스와 가솔린 차량 배기 가스에 5시간 동안 노출시켰다. 실험 중 소나무 바늘의 반사 스펙트럼을 0시간, 3시간, 5시간에 3회 획득하여 노출 시간에 따른 소나무의 스펙트럼 변화를 분석하였다.

[0072] 매 라운드마다 20그루의 소나무에서 35개의 시료를 채취하여 총 105개의 시료에 대해 분광분석하였으며, 각 시료는 20~30개의 솔잎으로 이루어졌다. 반사 스펙트럼은 ASD(Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, Colorado, UAS) Labspec 5100 분광계를 사용하여 획득하였다. 계측기는 3~5 nm 스펙트럼 분해능에서 350~2500 nm의 반사 스펙트럼을 획득한다.

[0074] 분광계는 최적의 스펙트럼 획득을 위해 반사율이 99%인 황산바륨(BaSo4) 보정 패널로 보정되었다. 샘플의 반사 스펙트럼은 20~30개의 솔잎을 적층하여 측정하였으며, 이는 솔잎의 날카롭고 길쭉한 형태에 의한 스펙트럼 손실

을 보상하기 위함이다. 각 샘플의 분광 반사율은 배경 효과를 제거하기 위해 검은색 표면에서 측정되었으며, 각각은 5번의 측정에서 평균화되었다.

[0076] 획득한 반사 스펙트럼은 Savitzky-Golay 컨볼루션 방법(2nd order polynomial, 25 smoothing points)으로 평활화되었으며 Unscrambler X 소프트웨어 (version 10.4, Camo software, Oslo, Norway) 및 ENVI 소프트웨어 (version 5.3, L3Harris Technologies, Melbourne, Florida, USA)를 사용하여 1차 도함수 및 연속체 제거 변환이 얻었졌다. 반사 스펙트럼의 1차 도함수 변환은 배경 잡음을 감소시키고 식생의 물리화학적 상태의 해석에 일반적으로 사용되는 레드 에지(Red Edge) 기울기의 변화를 감지하는 데 효과적이다. 연속체 제거 변환은 식생의 흡수 특성에 해당하는 물리화학적 성분의 변화를 감지하는 데 유용한 반사 스펙트럼의 흡수 특성을 향상시킨다.

[0078] 솔잎의 배기가스 노출에 대한 분광반사율은 F-test(ANOVA)로 평가하였으며, 0.05 미만의 p-value로 Levene's test와 Brown-Forsythe's test를 기반으로 배기가스 노출을 설명하기 위해 통계적으로 유효한 분광대를 도출하였다. 통계분석은 SPSS(Statistical Package for the Social Sciences)(Version 26.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)에서 수행되었다.

[0080] * 초분광 이미지 획득 및 처리

[0081] VNIR 초분광 이미지는 노출 전과 노출 후 소나무를 나타내는 2회에 대해 획득되었다. 초분광 이미징은 Specim IQ 카메라(Specim, Spectral Imaging Ltd.)로 수행했습니다. 이 카메라는 총 203개 대역(512 * 512픽셀)에 대해 3nm 해상도에서 400~1000nm의 스펙트럼 범위를 포괄하는 푸시 브룸 모드(push-broom mode)에서 작동하는 초분광 CMOS 카메라이다. 소나무는 650W 할로겐 램프(Fomex H1000)의 광원을 사용하여 3m 거리에서 실험실 조건에서 실험 전후 2회에 걸쳐 스캔되었다. 카메라 시스템에 의해 반사율이 99%인 황산바륨(BaSO4)으로 만들어진 리퍼런스 패널이 있는 이미지 내의 흰색 참조 패널에 의해 방사 측정 보정 및 정규화가 자동으로 수행되었다. 20그루의 소나무 중 PM 노출을 고려한 실험적 위치에 따라 14그루의 나무를 훈련 데이터로 선정하고 나머지 6그루를 검증 데이터로 사용하였다(도 1).

[0083] ENVI(Environment for Visualizing Images, Version 5.5.3, L3Harris Geospatial, Colorado, USA) 소프트웨어는 초분광 데이터의 이미지 처리에 사용되었다. 초분광 데이터의 소나무는 0.3 이상의 값을 갖는 NDVI(Normalized Difference 초목 지수)에 의해 선택되었다.

[0085] 본 발명에 사용된 초분광 카메라는 400 - 450 nm 및 950 - 1000 nm의 스펙트럼 범위에서 더 높은 노이즈 대 신호 비율을 가지며 이는 VNIR 초분광 카메라에서 일반적으로 보고되는 현상이다. 따라서 본 연구에서는 분광분석 및 초분광 영상 데이터를 이용한 PM 검출 모델 개발을 위해 높은 S/N 대역을 제외하였다.

[0087] * PM 노출 검출 지수 및 PM 노출 소나무 영상에 대한 로지스틱 회귀

[0088] PM에 노출된 소나무를 검출하기 위한 지표는 로지스틱 회귀분석을 기반으로 개발되었으며, 초분광 영상에 지표를 적용하여 PM에 노출된 소나무를 시각화하였다. 로지스틱 모델 개발을 위한 훈련 데이터는 450~950 nm의 167개 대역을 사용하여 전처리된 초분광 영상의 소나무 픽셀에서 무작위로 선택되었다. 모델 구성에는 SPSS 이진 로지스틱 회귀 분석 패키지가 사용되었습니다. 이진 로지스틱 회귀는 두 개의 클래스를 가정한 훈련 데이터를 사용하고 독립 변수 X를 기반으로 종속 변수를 파생한다.

[0090] 픽셀 값 X에서 노출되지 않은 소나무(Y = 0)와 노출된 소나무(Y = 1)로 클래스를 할당하였고, 모델의 출력 범위는 식 (1)에 따라 입력 데이터 X 중 0에서 1까지이다.

[0092] $$Logit(P)_{PM\ exposed\ pine\ tree} = \ln\{P/(1-P)\} = C+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\ldots+\beta_nX_n \quad (1)$$

[0093] 여기서 $Logit(P)_{PM\ exposed\ pine\ tree}$는 PM 노출의 로지스틱 확률, C는 상수 Y 절편, βn은 독립변수 Xn의 기울기, Xn은 대역 n의 반사율 값을 나타낸다. 확률 P는 식 (2)로 정의될 수 있다

[0095] $$P_{PM\ exposed\ pine\ tree} = e^{(C+\beta 1X1+\beta 2X2+\ldots+\beta nXn)}/1+e^{(C+\beta 1X1+\beta 2X2+\ldots+\beta nXn)} \quad (2)$$

[0096] 여기서 $P_{PM\ exposed\ pine\ tree}$는 PM 노출 확률이며 0.5보다 높은 P 값은 PM 노출 샘플로 간주된다.

[0098] 회귀 모델의 정확도는 Log-likelihood ratio test, Hosmer and Lemshow test, kappa coefficient, 그리고 Log-likelihood ratio test를 pseudo R2(Cox and Snell, Nagelkerke) 값으로 평가한 전체 정확도로 평가하였다. R2 값이 0.2 이상인 모델은 허용되는 것으로 간주된다.

[0100] * PM 농도 모니터링 결과

[0101] 온실 내 PM 농도는 실험 동안 3개 위치(PM A; Diesel outlet, PM B; Center, PM C; Gasoline 출구)에서 모니터링되었고, PM 농도의 변화는 F-검정과 Pearson' 상관관계에 의해 평가되었다. PM 농도는 실험시간 1, 3, 5의 전후 10분의 시간 범위 내에서 평균을 냈다(표 1). 디젤 배출구 부근의 평균 PM 농도는 1시간에 3,781 μg/m3이었고, 5시간에 10,684μg/m3로 증가하였고, 휘발유 배출구 부근의 평균 PM 농도는 1시간, 3시간, 5시간에 각각 4,160, 5,759, 8,001μg/m3이었다. 시간에 따른 세 구역의 PM 농도 변화는 0.05 미만의 p 값에서 42.63(디젤), 132.45(중앙), 64.87(가솔린)의 F 값을 나타내어 통계적으로 유효하였다. 또한 PM 농도와 실험시간의 상관관계는 상관계수가 각각 0.674(디젤), 0.738(중앙), 0.731(가솔린)로 통계적으로 허용 가능한 수준이었다.

[0105] [표 1] 실험 1, 3, 5시간의 PM 표준, PM 농도 및 통계적 매개변수

Standard		Good	Morderate	Unhealthy for Sensitive Groups	Unhealthy	Very Unhealthy	Hazardous
USA (US EPA)	PM10 (μg/m³)	0-54	55-154	155-254	255-354	355-424	425-604
	PM2.5 (μg/m³)	0-12	12.1-35.4	35.5-55.4	55.5-150.4	150.5-250.4	250.4-500.4
Korea (ME)	PM10 (μg/m³)	0-30	31-80		81-150		151-
	PM2.5 (μg/m³)	0-15	16-35		36-75		76-

Statistics	PM A (Diesel)			PM B (Center)			PM C (Gasoline)			All data		
	1 hour	3 hour	5 hour	1 hour	3 hour	5 hour	1 hour	3 hour	5 hour	1 hour	3 hour	5 hour
N	21	21	21	21	21	21	21	21	21	63	63	63
Mean(μg/m³)	3781	5927	10684	4103	5474	10231	4160	5759	8001	4015	5720	9639
Min(μg/m³)	1834	2267	3218	850	2635	7945	2647	3559	5066	850	2267	3218
Max(μg/m³)	5082	7625	15891	5756	7391	12000	5201	6916	9475	5756	7625	15891
Std	950	1596	3873	1274	1546	952	700	1014	1448	1001	1400	2684
Correlation between PM concentration and time		0.674**			0.738**			0.731**			0.731**	

c.v. = 3.15, ** The Pearson correlation is significant level of 0.01.

[0106]

[0108] 결과적으로, 디젤 차량이 휘발유 차량에 비해 훨씬 더 많은 PM 배출량을 나타냈다(도 2 참조). 실제로 이전 연구에서는 차량에서 배출되는 배기가스로 인한 PM 배출이 주로 엔진 유형 및 연료 품질과 관련이 있다고 보고된 바 있다(Brook et al., 2007; Robert et al., 2007a, 2007b; El Haddad et al., 2009; El Haddad et al., 2011; Chen et al., 2013; Pant and Harrison, 2013). 미국 환경보호청(USA, US EPA)은 대기 PM에 대한 대기질 기준을 5단계로 정의하고 한국 환경부(ME)는 4단계로 정의한다(표 1 참조).

[0110] EPA에 의한 최고 위험 PM 농도는 PM2.5 250㎍/m3 및 PM10 425㎍/m3이고, ME에 의한 최고 위험 PM 농도는 PM2.5 76㎍/m3 및 PM10 151㎍/m3입니다. 최고 PM 농도는 베이징 지역에서 PM2.5 800㎍/m3로 보고되었다.

[0112] 본 발명에서 측정된 PM 농도는 US EPA 대기질 기준과 비교하여 20배 더 높다. 이러한 농도 수준은 짧은 실험 기간(예: 5시간) 내에서 흡착 속도를 차별화하는 데 도움이 된다. 이러한 현상은 상대습도 증가로 인해 PM 물질을 과대평가하여 수증기에 의한 추가 빛 산란으로 인해 발생할 수 있다(Di Antonio et al, 2018).

[0114] * PM 노출에 따른 소나무의 스펙트럼 변화 결과

[0115] 도 3의 (a)는 P 값 곡선(여기서 음영 영역은 p 값이 0.05보다 작은 스펙트럼 대역을 나타냄)과 중첩된, 0, 3, 5 시간 노출된 디젤/가솔린 그룹. 도 3의 (b)는 P 값 곡선(여기서 음영 영역은 p 값이 0.05보다 작은 스펙트럼 대역을 나타냄)과 중첩된, 0, 3, 5 시간 노출된 가솔린 그룹, 도 3의 (c)는 P 값 곡선(여기서 음영 영역은 p 값이 0.05보다 작은 스펙트럼 대역을 나타냄)과 중첩된, 0, 3, 5 시간 노출된 디젤 그룹, 도 3의 (d)는 각 샘플 그룹의 분광반사율과 차량의 배기노출시간 사이의 상관계수를 나타내는 상관도(여기서 음영 영역은 0.6 보다 낮은 컷오프 상관 계수를 나타냄)를 나타낸다.

[0117] 0, 3, 5시간 가스 방출에 노출된 솔잎의 분광 특성을 엔진까지의 거리에 따라 세 그룹으로 분석하였는데, 가솔린 엔진 근처에서 수집한 샘플은 가솔린 그룹;디젤 엔진 근처에서 수집한 것은 디젤 그룹; 가솔린 엔진과 디젤 엔진 중간에 있는 것은 가솔린/디젤 그룹이다(도 3 참조). 마지막 섹션의 결과에 따르면 디젤 그룹은 더 높은 수준의 PM 농도에 노출되었다. 각 그룹에 대해 세 가지 다른 노출 시간에서 솔잎의 분광 반사율을 F-test로 분

석하여 다양한 노출 조건에 민감한 밴드를 식별했다. p-값이 0.05 미만인 밴드가 강조되어 표시되었다(도 3 참조).

[0119] 솔잎의 스펙트럼 신호는 식물의 일반적인 스펙트럼 패턴을 보여 주었고, Carotinoid에 의한 그린 대역의 반사율 피크, 세포벽 구조에 의한 NIR 대역의 고반사율, 970 nm, 1270 nm, 1430 nm, 1920 nm에서 수분 효과에 의한 흡수가 관찰되었다(도 3 참조). 솔잎의 분광 패턴은 비슷했지만, PM 노출에 따른 변화는 디젤/가솔린 그룹과 디젤 그룹의 경우 그린(510~570 nm), NIR(700~1400 nm), SWIR(1400~1890 nm, 2130~2280 nm)에서, 가솔린 그룹의 경우 블루(490~510nm), 레드(610~690nm), NIR(725~1400nm), SWIR(1400~1890nm, 1995~2325nm)에서 p-값이 0.05 미만으로 정적으로 구별되었다(도 3 참조).

[0121] 특히, 스펙트럼 반사율은 세 그룹 모두에서 노출 시간이 증가함에 따라 NIR(700~1400 nm)에서 체계적으로 감소하였다. 디젤 및 경유/가솔린 그룹의 반사율은 노출 시간이 증가함에 따라 그린 및 SWIR 대역에서 감소한 반면 가솔린 그룹의 반사율은 노출 시간이 증가함에 따라 체계적인 순서를 따르지 않았다. 이는 NIR이 PM 노출을 감지하는 데 가장 신뢰할 수 있는 스펙트럼임을 나타낸다. NIR 밴드와 노출 시간 사이의 Pearson의 상관 관계는 노출 시간이 증가함에 따라 반사율이 체계적으로 감소하는 강함(<-0.6)을 나타냈다.

[0123] 본 발명에서 5시간 노출 후 세 그룹의 NIR 반사율은 디젤/가솔린 그룹에서 15%, 디젤 그룹에서 19%, 가솔린 그룹에서 10%만큼 감소했다. 또한 디젤엔진이 가솔린엔진보다 근적외선 반사율 감소에 더 큰 영향을 미쳤다. 이는 분광 변화가 PM 농도와 밀접한 관련이 있음을 나타내며, 본 발명에서 디젤 배출의 PM 농도가 가솔린 배출의 PM 농도보다 유의하게 높았다. 이것은 NIR 대역의 스펙트럼 변화가 대기 중 PM 농도와 밀접한 상관 관계가 있음을 나타낸다.

[0125] 이 현상은 NIR 영역에서 최대 60%의 반사율 감소를 나타내는 식생에 대한 먼지 입자의 흡수 효과에 대해 보고되었다(Wang et al., 2008; Saaroni et al., 2010; Wu and Wang, 2016; Yan et al., 2015; Zhu et al., 2019). 이 연구에서 반사율 감소는 최대 19%였습니다. 실제로, PM 흡착에 대한 이전 연구에서는 Carpinus betulus와 Euonymus japonicus의 가로수에서 NIR 대역의 반사율이 20%까지 감소했다고 보고되었다. 이 현상은 주로 잎 표면에 층을 형성하는 흡착 입자의 축적과 잎 표면의 형태 변화 및 광합성 교란에 의해 발생한다(Thompson et al., 1984; Brackx et al., 2017b; Popek et al., 2018). 큰 먼지 입자는 더 두꺼운 층을 형성하므로 반사율이 더 많이 감소한다. 따라서 큰 입자는 종종 블루 및 레드 대역의 반사율 증가와 그린 및 NIR 대역의 반사율 감소를 유발한다(Cuba et al., 2021). PM 흡착은 큰 입자 흡착에 비해 가시광선 대역에서 큰 변화를 보이지 않고 근적외선 대역에서 큰 변화를 보였다. NIR 밴드와 가시 밴드의 조합은 PM 흡착에 대한 우수한 검출기를 형성할 수 있다.

[0127] 도 4의 (a)는 p값 곡선(여기서 음영 영역은 0.05 미만의 P값을 갖는 스펙트럼 밴드를 나타냄)과 중첩된, 디젤/가솔린 그룹의 0, 3, 5 시간 가스 노출된 솔잎 샘플의 1차 미분 곡선을, (b)는 p값 곡선(여기서 음영 영역은 0.05 미만의 P값을 갖는 스펙트럼 밴드를 나타냄)과 중첩된, 가솔린 그룹에서의 0, 3, 5 시간 가스 노출된 솔잎 샘플의 1차 미분 곡선을, (c)는 p값 곡선(여기서 음영 영역은 0.05 미만의 P값을 갖는 스펙트럼 밴드를 나타냄)과 중첩된, 디젤 그룹에서의 0, 3, 5 시간 가스 노출된 솔잎 샘플의 1차 미분 곡선을, (d)는 각 샘플 그룹의 1차 미분과 차량의 배기노출시간 사이의 상관계수를 나타내는 상관도(여기서 음영 영역은 0.6 보다 낮은 컷오프 상관 계수를 나타냄)를 나타낸다.

[0129] 솔잎 샘플의 1차 미분 반사 스펙트럼은 블루 에지(490~530 nm), 엘로우 에지(550~580 nm), 레드 에지(680~730 nm), NIR(950~980 nm, 1140 nm, 1320 nm, 1390 nm) 및 SWIR(1870~1910 nm) 대역에 있어서 세 그룹 모두에서 P-값이 0.05보다 낮아 정적으로 구별된다. 세 그룹 모두 스펙트럼 기울기의 차이를 나타내었지만 계수가 |0.6|보다 큰 세 그룹 모두에 있어서 NIR 영역(1050 nm, 1210 nm 및 1350 nm)에서만 노출 시간과 강한 상관 관계가 관찰되었다. 이 밴드는 수분(970, 1180, 1450, 1940 nm) 및 탄화수소(1176, 1360, 1760 nm)로 나타나는 흡수 특

성과 관련이 있다. 이러한 흡수에서 체계적인 기울기 변화는 흡수가 스펙트럼 변화에 더 급격하게 영향을 미치는 노출 시간(도 4)에 따른 NIR 반사율의 체계적인 감소로 인해 발생합니다. 근적외선 대역의 1차 미분 스펙트럼은 소나무의 PM 농도에 유효하다.

[0131] 도 5의 (a)는 P-값 곡선(여기서 음영 영역은 P값이 0.05 미만인 스펙트럼 밴드를 나타냄)과 중첩된 0, 3, 5 시간 동안 가스 노출된 디젤/가솔린 그룹의 솔잎의 평균 연속체 제거 곡선, (b)는 가솔린 그룹의 솔잎의 평균 연속체 제거 곡선, (c)는 디젤 그룹의 솔잎의 평균 연속체 제거 곡선을 나타내고, (d)는 각 샘플 그룹의 연속체 제거와 배기노출시간 사이의 상관계수를 나타내는 상관도(여기서 음영 영역은 0.6 보다 낮은 컷오프 상관 계수를 나타냄)를 나타낸다.

[0133] 디젤/가솔린 그룹에서 솔잎 스펙트럼의 흡수 깊이는 블루(460~519 nm), 레드(600~700 nm) NIR(930~1080 nm, 1100~1400 nm) 및 SWIR(1100~2400 nm)에서 노출 시간에 대해 정적으로 상이하다(도 5의 (a) 참조). 가솔린 그룹의 밴드에서는 블루(470~500 nm), 레드(600~700 nm) NIR(900~1000 nm, 1100~1400 nm) 및 SWIR(1100~1890 nm, 2000~2400 nm)(도 5의 (b) 참조); 디젤 그룹에서의 밴드에서는 NIR(1100~1320 nm) 및 SWIR(1520~1780 nm, 1820 nm, 1910~1940 nm)(도 5의 (c) 참조)이다.

[0135] 반사율은 세 그룹으로 표시되는 PM 농도 수준에 의해 크게 영향을 받지만 p-값 곡선은 900nm와 같은 일부 파장에서 교차한다. 이러한 대역은 예측 모델에서 제외된다(도 5의 (d) 참조). 흡수 깊이의 변화가 주로 해당 흡수에 대한 물리화학적 변화와 관련되어 있다는 사실을 감안할 때(Sanches et al., 2014; Shin et al., 2019), 차량 가스 배출은 5시간 내에 솔잎의 물리화학적 특성을 변경하지 않는다. 소나무의 이화학적 변화는 장기간 관찰을 통해 알 수 있어 유해 요소가 판 구조(plats' structure)에 영향을 미칠 수 있다.

[0137] 도 6은 초분광 이미지의 평균 분광 반사율을 나타내며, 각각의 실선은 PM 노출 실헌 전후의 반사율을 나타낸다. 도 6에서 알 수 있듯이, 초분광 이미지에서 PM 노출에 의한 솔잎의 스펙트럼 변화는 분광 분석과 유사한 패턴을 보여 NIR 및 그린 밴드의 반사율이 감소했다. 분광 분석과 비교하여 초분광 이미지의 전체 반사율은 다른 획득 위치로 인한 것일 수 있는 모든 스펙트럼 범위에서 상대적으로 작았다. 분광계는 프로브를 목표물 가까이에 배치한 반면, 초분광 이미지는 3m 거리에서 획득하여 상대적으로 적은 에너지를 센서에 반환했다. 그러나 PM 노출에 따른 반사율 변화는 그린(400~500) 및 NIR(700~1000nm)에서 19% 반사율 감소로 매우 유사했다. 이는 PM 노출과 관련된 스펙트럼 범위 내의 관계가 PM 노출 감지에 대해 동일한 효율성을 수행하는 두 가지 방법 모두에 유효함을 의미한다.

[0139] 본 발명에서는 차량에서 배출되는 미세먼지와 관련된 침엽수의 분광 변화를 파악하기 위해 통제된 실험 환경에서 차량 배기가스에 노출된 솔잎의 분광 특성을 분석하였다. 이전 연구는 도시 및 먼지가 많은 환경에서 활엽수를 사용했으며 PM에 더 많이 노출되면 NIR 반사율과 레드 에지 기울기가 감소한다고 보고되었다. 또한, Euonymus japonicus, Styphnolobium japonicum 및 Populus tomentosa의 그린 반사율 감소와 Euonymus japonicus의 경우 레드 에지의 블루 쉬프트가 보고되었다(Yan et al., 2005; Wu and Wang, 2016; Zhu et al., 2019). 이 발명은 솔잎의 NIR 반사율에서 유사한 감소 패턴을 발견했으며 따라서 NIR 반사율을 사용하여 활엽수와 소나무 모두의 PM 노출 영향을 매핑하는 것을 확인했다. 또한 디젤 엔진은 가솔린 엔진보다 PM을 더 많이 배출하고 NIR 반사율이 더 많이 감소했다. 이는 PM 농도가 가스 방출에 노출된 솔잎의 스펙트럼 변화에 직접적인 영향을 미치며 NIR 대역이 공기 중 PM 농도 검출에 매우 유용할 수 있음을 증명하는 것이다. 또한 가시광선과 NIR 대역의 조합은 PM 흡착으로 인한 스펙트럼 변화와 더 큰 먼지 입자로 인한 스펙트럼 변화를 구별하는 데 유용할 수 있다.

[0141] * 로지스틱 회귀 모델에 의한 PM 노출 소나무 이미징

[0142] PM노출 소나무 검출을 위한 분광지수는 14개의 입력 분광반사 대역(블루밴드 1개, 그린 밴드 1개, 레드 밴드 1

개, 레드 에지 대역 1개, 근적외선 대역 10개)의 로지스틱 회귀 모델로 도출된다(표 3 참조).

[0144] [표 3] PM노출 소나무 검출을 위한 로지스틱 회귀식 변수

X[1]	β[2]	S.E.[3]	Wald[4]	Df[5]	Sig.[6]	Exp(B)[7]
452 nm	35.3	2.2	251.9	1	0	2.2×10^{15}
584 nm	-56.5	4.4	163.1	1	0	3×10^{-25}
619 nm	-53.0	4.0	175.1	1	0	9.4×10^{-24}
720 nm	164.2	3.8	1850.4	1	0	2.1×10^{71}
735 nm	-101.4	7.3	193.7	1	0	9×10^{-45}
744 nm	-103.7	7.3	203.3	1	0	9.3×10^{-46}
753 nm	-127.2	6.9	335.1	1	0	5.4×10^{-56}
757 nm	177.5	7.2	602.8	1	0	1.2×10^{77}
760 nm	-132.7	7.0	353.9	1	0	2.4×10^{-58}
763 nm	98.5	6.7	212.8	1	0	5.8×10^{42}
799 nm	52.1	4.1	162.7	1	0	4.4×10^{22}
850 nm	101.5	3.5	854.3	1	0	1.2×10^{44}
927 nm	-50.4	2.8	326.2	1	0	1.2×10^{-22}
948 nm	-31.7	2.1	227.3	1	0	1.6×10^{-14}
Constant	3.2	0.1	1810.2	1	0	24.3

[0145]

[0146] X^1=Variable(Wavelength); β^2=logistic coefficient; S.E.[3] = Standard error of estimate; Wald[4] = Wald chi-square values; Df[5] = degree of freedom; Sig.[6] = *P*-value; Exp(B)[7] = exponentiated coefficient

[0148] 이모델은 p-값이 크고 Pseudo-R2 값이 0.2 이상으로 통계적으로 유의하다(표 4, Ayalew and Yamagishi, 2005).

[0150] [표 4] 로지스틱 회귀 모델의 통계적 매개변수

Statistical Parameters	Hosmer and Lemeshow Test			Pseudo-R	
	X^2	Df	Sig.	Cox & Snell R^2	Nagelkerke R^2
PM	8.48	8	0.39	0.397	0.529

[0151]

[0152] X^2 = chi-square; Df = degree of freedom; Sig = *P*-value. Pseudo-R^2 value. 일반적으로 Pseudo-R2 값이 0.2 보다 크면 적합도를 나타냄

[0154] 뿐만 아니라 블루 및 그린 대역도 사용했다. 먼지 입자와 PM에 의해 발생하는 스펙트럼 변화는 NIR에서 유사한 패턴을 나타내는 반면 PM 입자는 가시 대역에 더 작은 영향을 미친다. 모델이 NIR과 가시광선 대역의 스펙트럼 변화를 결합한다는 사실을 감안할 때 이 모델이 PM 노출과 큰 입자의 흡착을 구별할 수 있을 것으로 기대된다.

[0156] [표 5] 로지스틱 회귀 모델의 훈련세트 및 검증세트 결과에 대한 오류 행렬(confusion matrix) - No PM(미립자 물질 없음)은 실험 전 신선한 소나무이고 PM(미립자 물질)은 실험 후 PM에 노출된 소나무

[0157]

Data set	Predicted	Observed (Number of pixels) No PM	PM	Accuracy (Producer)	Kappa Coefficient
Training set	No PM	273925	36556	75.41%	0.54
	PM	89318	162626	81.65%	
			Overall accuracy	77.62%	
Validation set	No PM	113941	14641	83.43%	0.61
	PM	22625	56075	79.30%	
			Overall accuracy	82.02%	

[0159] 유사하게, 초분광 이미지는 다양한 PM 농도 수준과 노출 시간에 서 있는 노출된 소나무를 감지할 수 있다(도 7 참조). 도 7은 초분광 영상에 적용된 PM 노출 소나무 검출 지수에 기반한 PM 노출 소나무를 이미지를 나타낸다. 도 7에서 이미지 픽셀은 로지스틱 회귀 모델에 의해 그린(노출 없음)과 레드(노출 후)으로 분류되었다. 솔잎을 통과한 고르지 않은 대기 흐름으로 인해 수관 영역(tree crown area)의 일부 솔트 및 페퍼 효과(salt and pepper effects)를 제외하고 대부분의 픽셀이 올바르게 분류되었다.

[0161] 도 8은 전술한 바와 같이 본 발명에서 따른 초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법의 흐름을 나타내는 흐름도이다. 본 발명에서 따른 초분광 영상을 이용한 수목에 흡착된 미세먼지 탐지 방법은 수목으로부터 초분광 영상 및 PM 계측기를 통해 PM 값을 측정하는 단계를 포함하는 데이터 획득 단계를 포함한다.

[0163] 데이터 획득 단계에서 수목, 특히 소나무 솔잎의 초분광 이미지를 획득하기 위해 초분광 카메라가 이용될 수 있으며, 초분광 카메라는 지상 설치 카메라 또는 드론 설치 카멜라와 같은 무인 항공 시스템을 이용하여 넓은 면적에 거쳐 획득될 수도 있다.

[0165] 데이터 수집 단계에서 수집된 수목의 초분광 이미지와 PM 계측값은 이후 데이터 처리를 통해 가공되는데, 데이터 처리로는 이에 한정되는 것은 아니지만 항공기나 인공위성 등 원격 탐사에 의해 취득된 영상에서 발생하는 기하학적인 왜곡을 보정하는 기하 보정 처리(Geometric correction), 위성으로부터 영상을 취득할 경우 태양의 고도각, 탐측기의 응답특성, 대기의 상태와 지형적 요인을 포함하여 대기 및 지형적 영향에 따라 영상의 밝기값 변화로 나타나는 방사왜곡을 보정하는 방사 보정 처리(Radiometric correction), 원격 탐사에서 항공기나 위성으로 지표면을 관측할 때, 광파나 전자기파가 대기 입자에 의해 흡수되거나 산란되면서 영상에 발생하는 왜곡을 보정하는 대기 보정 처리(Atmospheric correction) 및 반사 보정 처리(Reflectance correction)을 포함할 수 있다.

[0167] 이와 같이 처리된 초분광 데이터는 이후 통계 분석(statistical Analysis), 정규화식생지수(Normalized Difference Vegetation Index), 로지스틱 회귀법(Logistic regression)을 이용하여 미세먼지 예측 모델이 구축될 수 있고, 다음의 모델식1과 같다.

[0169] $P_{\text{PM exposed pine tree}} = e^{x}/(1 + e^{x})$ 모델식1

[0170] 여기서, x = 35.3(452 nm) - 56.5(584 nm) - 53(619 nm) + 164.2(720 nm) - 101.4(735 nm) - 103.7(744 nm) - 127.2(753 nm) + 177.5(757 nm) - 132.7(760 nm) + 98.5(763 nm) + 52.1(799 nm) + 101.5(850 nm) - 50.4(927 nm) - 31.7(948 nm) + 3.2

[0172] 상기 식에서 알 수 있듯이, PM 노출 소나무 검출을 위한 분광지수는 14개의 입력 분광반사 대역(블루밴드 1개, 그린 밴드 1개, 레드 밴드 1개, 레드 에지 대역 1개, 근적외선 대역 10개)의 로지스틱 회귀 모델로 도출되었으며, 파장 대역은 다음과 같다.

[0173] [표 6] 로지스틱 회귀 모델에 이용되는 파장 대역

[0174]

Blue(1)	Green(1)	Red(1)	NIR(11)									
452 nm	584 nm	619 nm	720 nm	735 nm	744 nm	753 nm	757 nm	760 nm	763 nm	799 nm	850 nm	927 nm	948 nm

[0176] 회귀 모델이 도출된 후, 도출된 회귀모델은 이어진 검증 및 평가단계에서 오류 행렬, 호스머&레메쇼 테스트(Hosmer&Lemeshow test)를 pseudo R 값으로 전체 정확도로 평가하였다.

[0178] 모델식에 의해 출력되는 확률 값은 0.5보다 높은 확률 P 값은 PM 노출인 것으로 간주되고 0.5보다 낮은 확률 P 값은 PM 미노출인 것으로 간주된다.

[0180] 이후 단계에서는 모델식에 의해 출력된 값에 기반하여 이미지 매핑이 실시되는데 P 값이 높을 수록 또는 P값이 0,5 이상인 경우 붉은색으로 표시되고, P 값이 낮을 수록 또는 P 값이 0.5 미만인 경우 녹색으로 이미지 매핑이 수행되어 사용자의 화면에 제공될 수 있다.

[0182] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는 하드웨어 구성요소 및 소프트웨어 구성요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(Arithmetic Logic Unit), 디지털 신호 프로세서(Digital Signal Processor), 마이크로컴퓨터, FPGA(Field Programmable Gate Array), PLU(Programmable Logic Unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(Command)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리요소(Processing Element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 콘트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(Parallel Processor)와 같은, 다른 처리 구성(Processing Configuration)도 가능하다.

[0184] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(Computer Program), 코드(Code), 명령(Command), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(Collectively)처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성요소(Component), 물리적 장치, 가상 장치(Virtual Equipment), 컴퓨터 저장매체 또는 장치에 구체화(Embody)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

[0186] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(Magnetic Media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(Optical Media), 플롭티컬 디스크(Floptical Disk)와 같은 자기-광 매체(Magneto-Optical Media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은

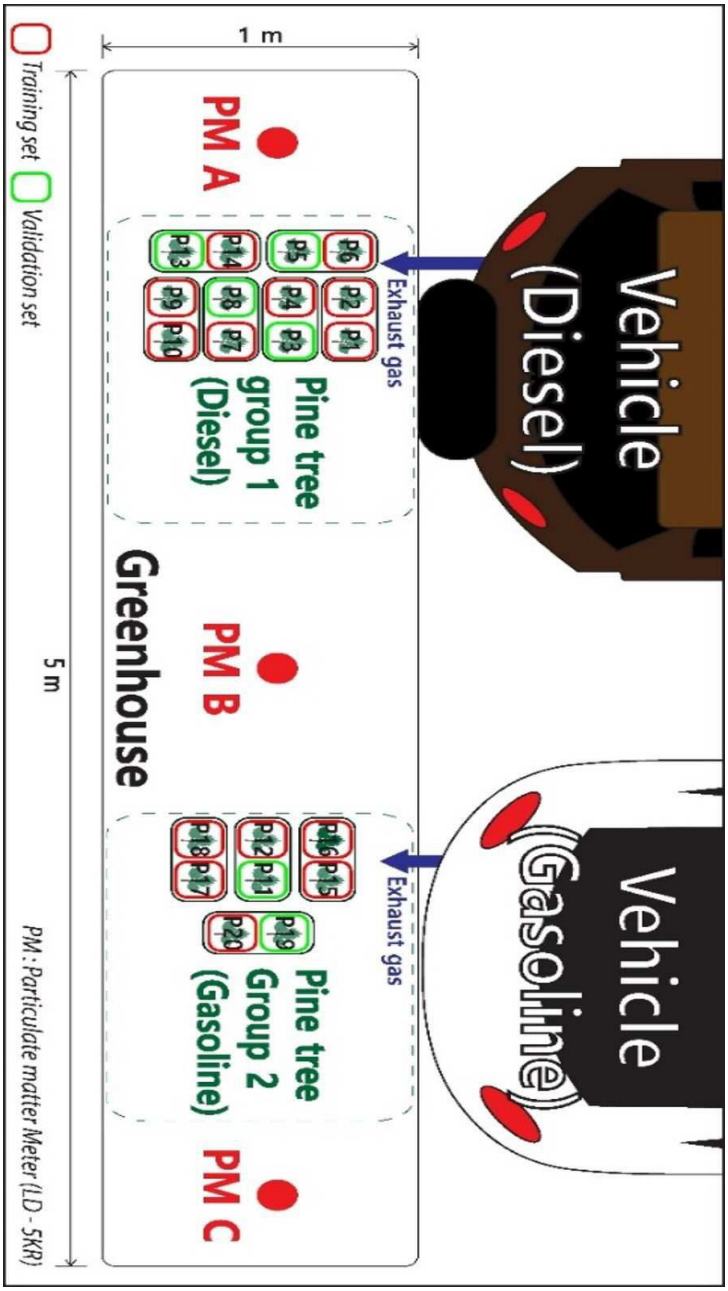
기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다.

[0188] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

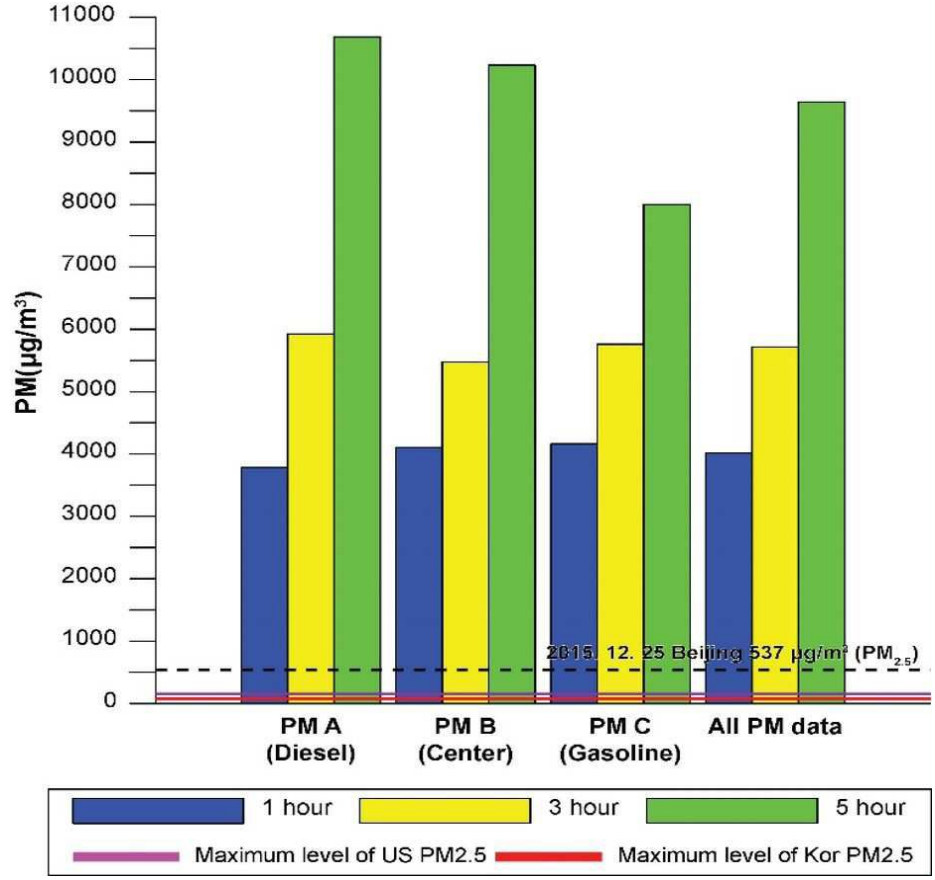
[0190] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속하는 것으로 해석되어야만 한다.

도면

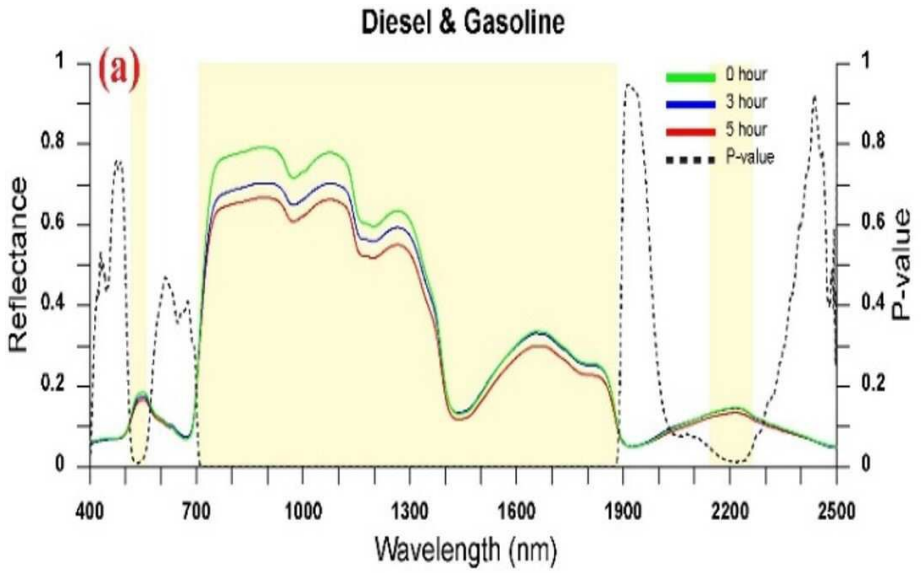
도면1


Vehicle
(Diesel)
Vehicle
(Gasoline)
1 m
5 m
Exhaust gas
Exhaust gas
PM A
PM B
PM C
Pine tree
group 1
(Diesel)
Pine tree
Group 2
(Gasoline)
Greenhouse
Training set
Validation set
PM : Particulate matter Meter (LD - 5KR)

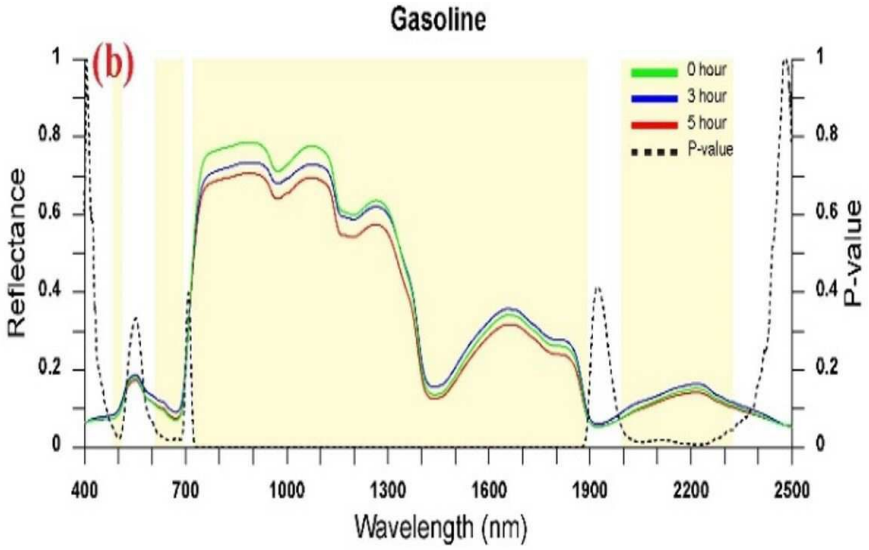
도면2


11000
10000
9000
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
PM(μg/m³)
2015. 12. 25 Beijing 537 μg/m³ (PM2.5)
PM A (Diesel)
PM B (Center)
PM C (Gasoline)
All PM data
1 hour
3 hour
5 hour
Maximum level of US PM2.5
Maximum level of Kor PM2.5

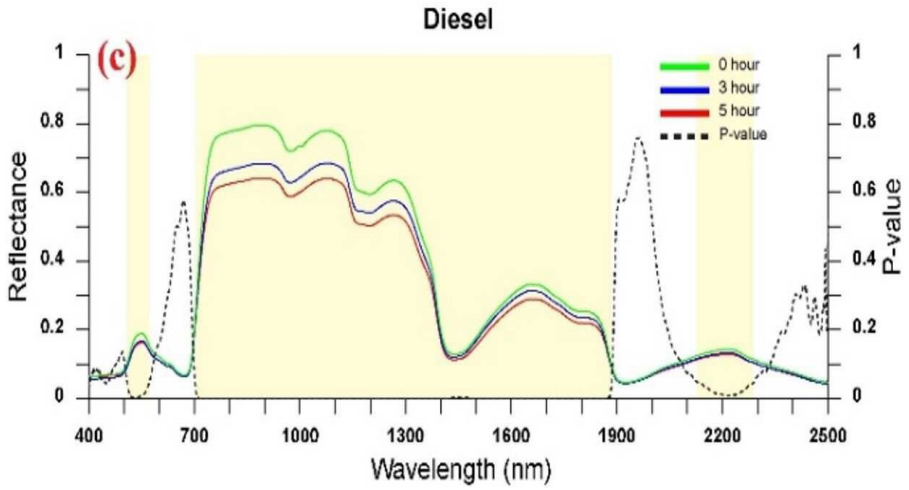
도면3a


Diesel & Gasoline
(a)
0 hour
3 hour
5 hour
P-value
Reflectance
P-value
Wavelength (nm)
400
700
1000
1300
1600
1900
2200
2500

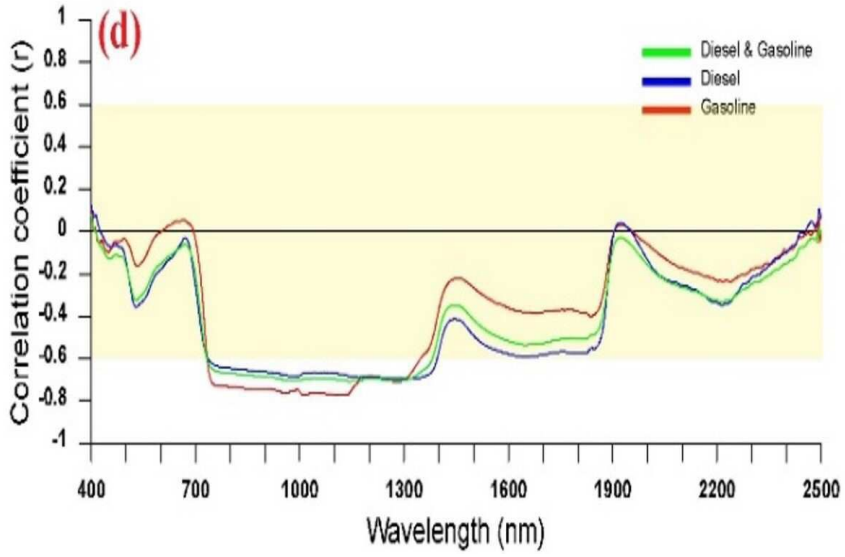
도면3b


Gasoline
(b)
0 hour
3 hour
5 hour
P-value
Reflectance
P-value
Wavelength (nm)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
400
700
1000
1300
1600
1900
2200
2500

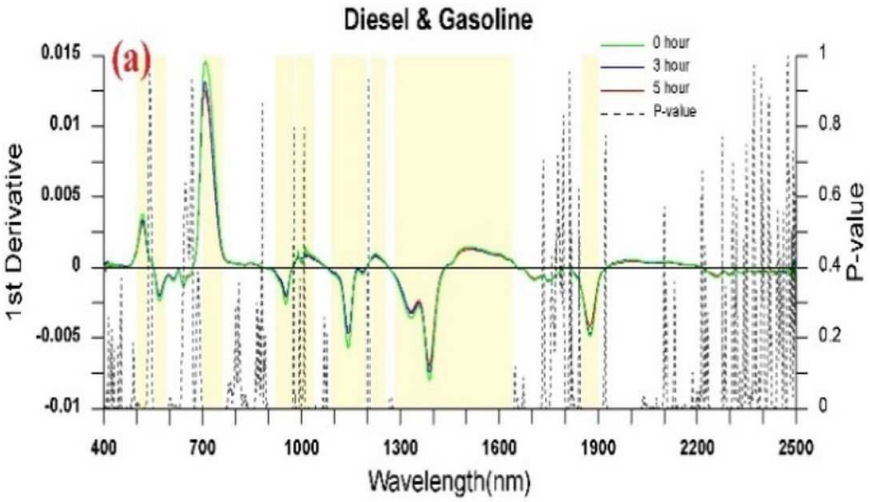
도면3c


Diesel
(c)
0 hour
3 hour
5 hour
P-value
Reflectance
P-value
Wavelength (nm)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
400
700
1000
1300
1600
1900
2200
2500

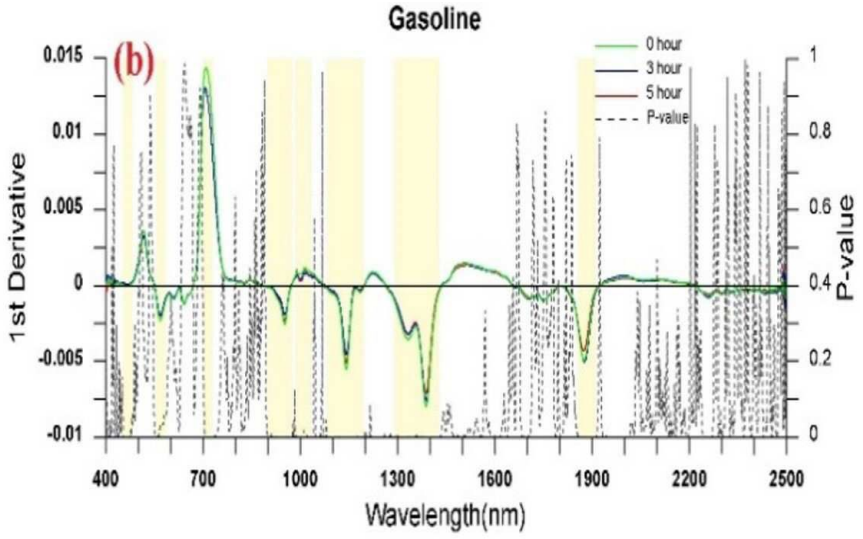
도면3d


(d)
Diesel & Gasoline
Diesel
Gasoline
Correlation coefficient (r)
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
400
700
1000
1300
1600
1900
2200
2500
Wavelength (nm)

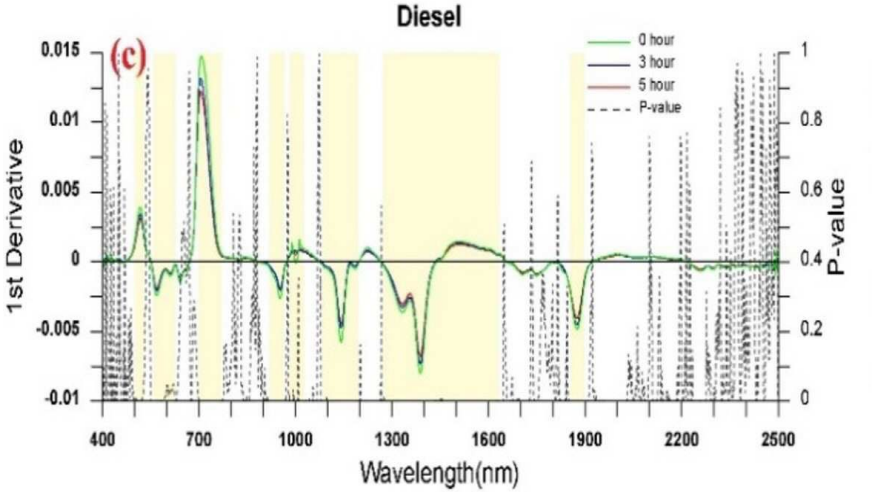
도면4a


Diesel & Gasoline
(a)
0 hour
3 hour
5 hour
P-value
1st Derivative
0.015
0.01
0.005
0
-0.005
-0.01
P-value
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
400
700
1000
1300
1600
1900
2200
2500
Wavelength(nm)

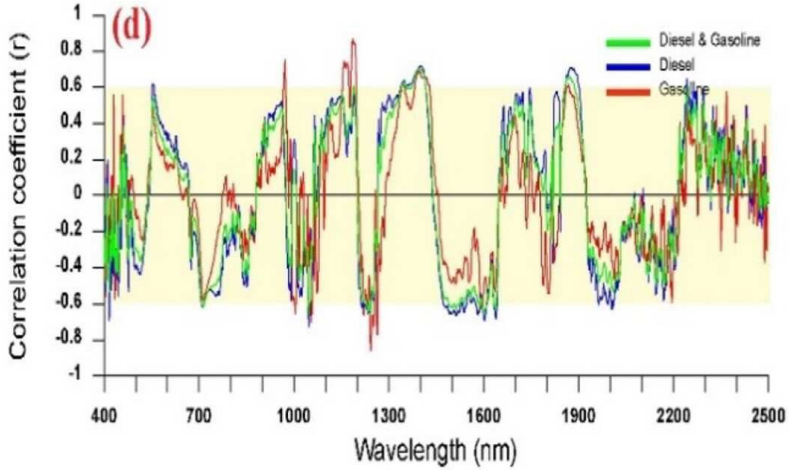
도면4b



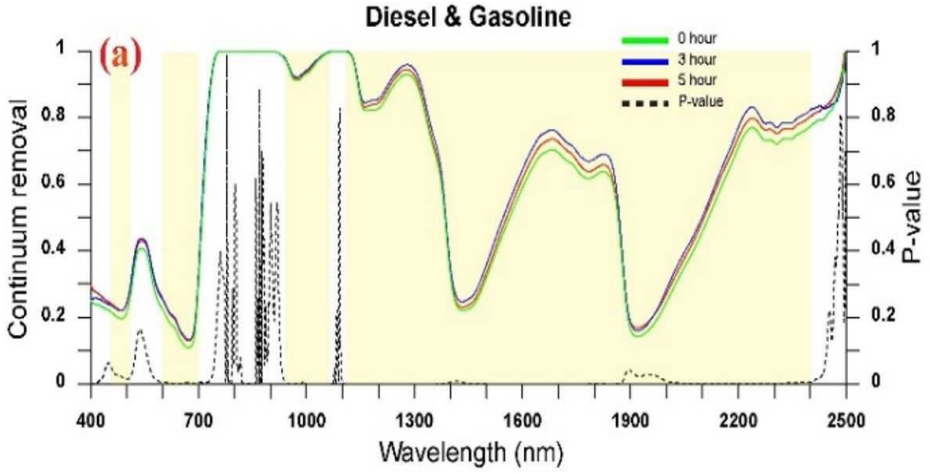
도면4c



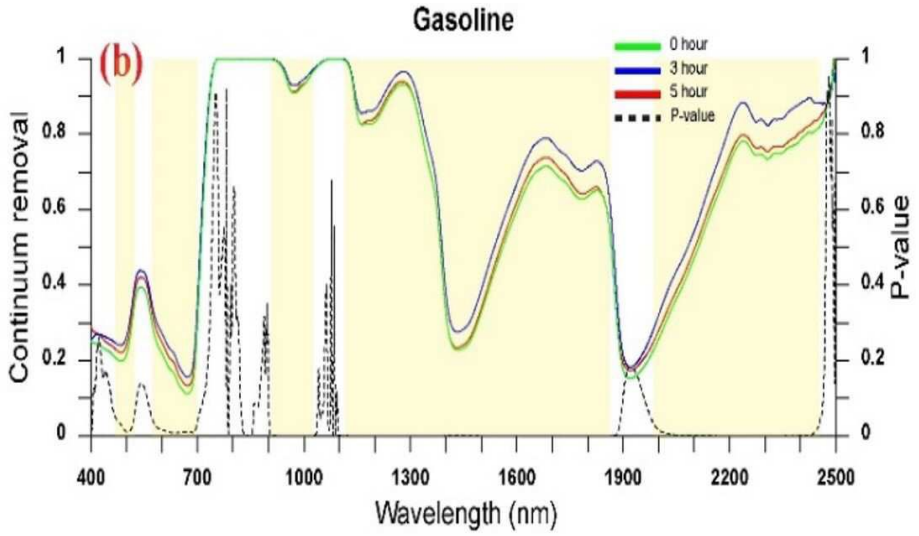
도면4d



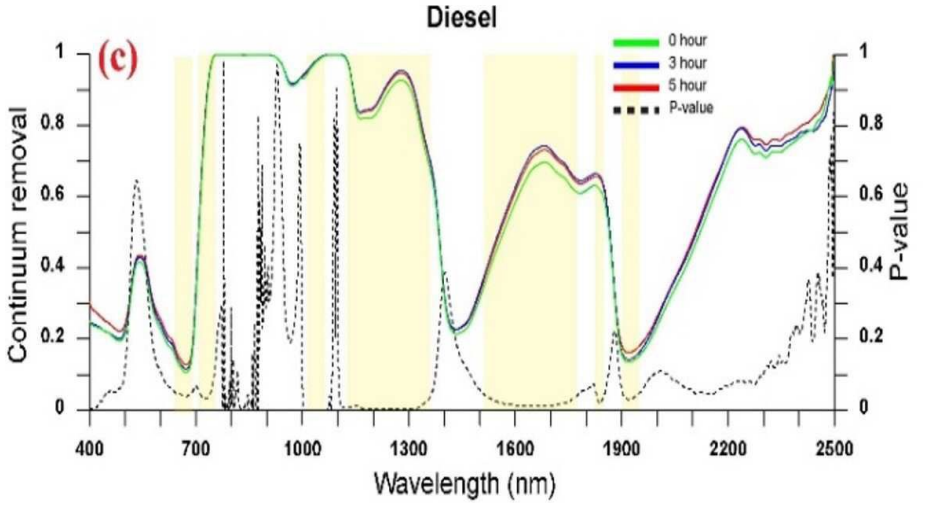
도면5a



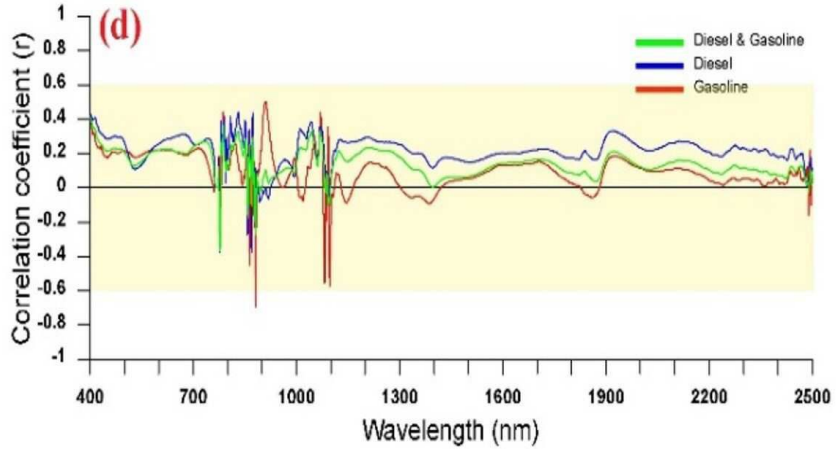
도면5b



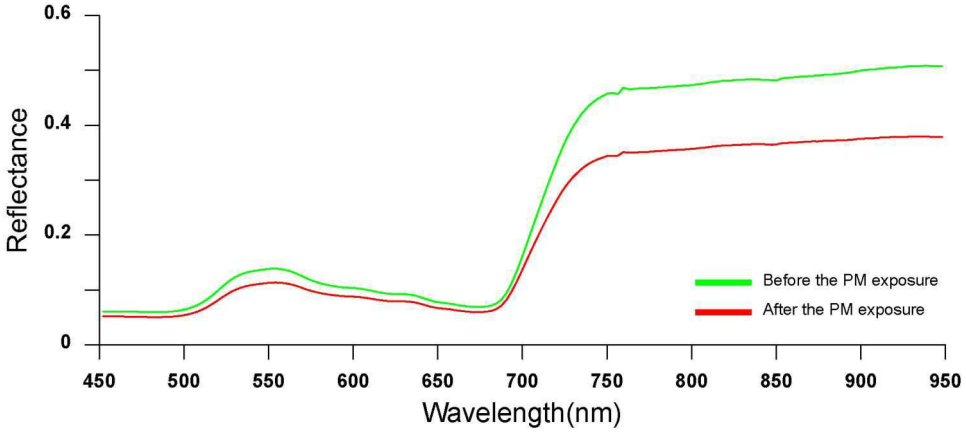
도면5c



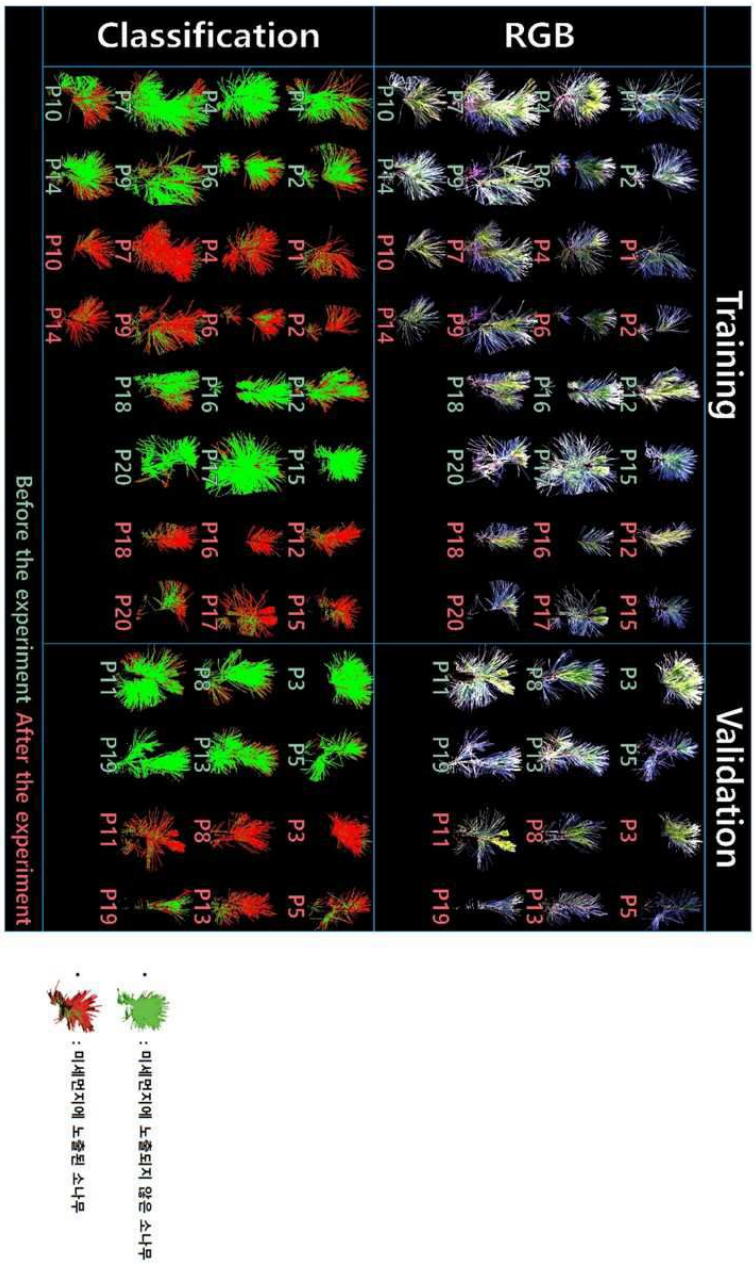
도면5d


(d)
Diesel & Gasoline
Diesel
Gasoline
Correlation coefficient (r)
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
400
700
1000
1300
1600
1900
2200
2500
Wavelength (nm)

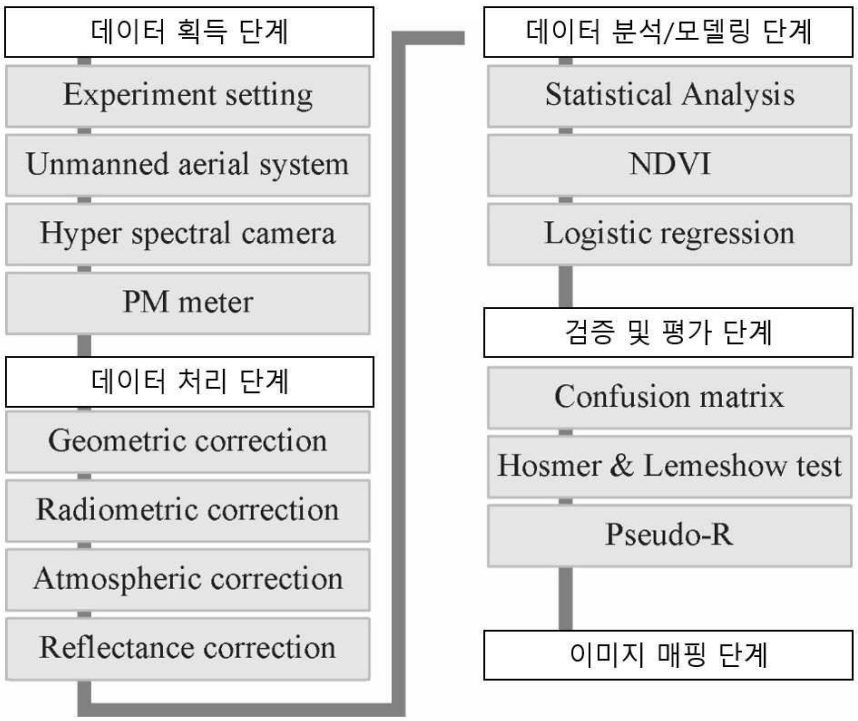
도면6


Reflectance
0.6
0.4
0.2
0
Before the PM exposure
After the PM exposure
450
500
550
600
650
700
750
800
850
900
950
Wavelength(nm)

도면7


RGB
Classification
Training
Validation
Before the experiment
After the experiment
: 미세먼지에 노출되지 않은 소나무
: 미세먼지에 노출된 소나무

도면8


데이터 획득 단계
Experiment setting
Unmanned aerial system
Hyper spectral camera
PM meter
데이터 처리 단계
Geometric correction
Radiometric correction
Atmospheric correction
Reflectance correction
데이터 분석/모델링 단계
Statistical Analysis
NDVI
Logistic regression
검증 및 평가 단계
Confusion matrix
Hosmer & Lemeshow test
Pseudo-R
이미지 매핑 단계