



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0018749  
(43) 공개일자 2024년02월14일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G01N 15/02 (2024.01) G01N 15/00 (2024.01)  
G01N 21/31 (2006.01) G01N 21/359 (2014.01)  
G01N 21/49 (2006.01) G06F 17/10 (2006.01)  
(52) CPC특허분류  
G01N 15/0211 (2013.01)  
G01N 21/314 (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2022-0096448  
(22) 출원일자 2022년08월03일  
심사청구일자 2022년08월03일

(71) 출원인  
국립한밭대학교 산학협력단  
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)  
국립부경대학교 산학협력단  
부산광역시 남구 용소로 45, 부경대학교내 (대연동)  
(72) 발명자  
김덕현  
대전광역시 유성구 배울1로 119, 1203동 1201호(용산동, 대덕테크노밸리12단지아파트)  
노영민  
부산광역시 남구 수영로 325번길 61, 103동 2101호(대연동, 대연 롯데캐슬)  
(74) 대리인  
특허법인도담

전체 청구항 수 : 총 12 항

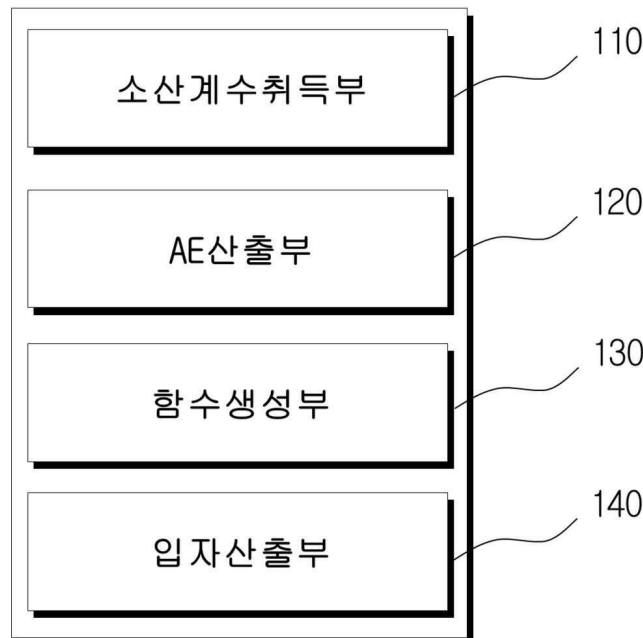
(54) 발명의 명칭 파장에 따른 먹지수 값을 이용하여 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 방법 및 시스템

### (57) 요약

본 발명은 다양한 측정장치로부터 얻은 소산계수를 이용하여 실제 환경분야나 기상 분야에 사용되는 PM2.5의 정보를 추출하는 방법에 관한 것이다.

기존의 대부분의 광학적인 장치나 방법은 소산계수와 PM2.5 사이의 상관 관계를 이용하고 있으나, 그 상관계수가 (뒷면에 계속)

대표도 - 도14



나빠 오차를 포함한다. 즉 PM2.5와 소산계수는 직접 1:1 대응관계에 있지 않고, 미세먼지를 결정하는 6개의 인자에 따라 같은 PM2.5에서도 다양한 다른 소산계수를 보여준다. 이것은 초미세먼지의 중심크기가 변해도 PM2.5에는 거의 영향을 주지 않지만, 초미세먼지의 크기에 따라 소산효율이 크게 변하여 소산계수는 변하기 때문이다. 그러므로 PM2.5를 추출함에 있어서 초 미세먼지의 크기에 대한 정보를 고려하여 상관관계를 정하고 이를 이용하여야 한다.

이에 본 발명은 소산계수와 PM2.5 사이의 상관관계를 증가시키는 방법을 제시하고 이로부터 보다 정확한 PM2.5를 얻도록 하며, 소산계수는 라이다, 카메라, 태양 추정장치로 얻은 AOD, 그리고 한 포인트에서 소산이나 산란계수를 얻은 네팔로미터, 그리고 각종 산란 현상을 이용하는 장치에 활용 가능하다.

(52) CPC특허분류

**G01N 21/359** (2013.01)

**G01N 21/49** (2013.01)

**G06F 17/10** (2013.01)

**G01N 2015/0096** (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

|             |                                                        |
|-------------|--------------------------------------------------------|
| 과제고유번호      | 1711161133                                             |
| 과제번호        | 2020R1F1A1048293                                       |
| 부처명         | 과학기술정보통신부                                              |
| 과제관리(전문)기관명 | 한국연구재단                                                 |
| 연구사업명       | 개인기초연구(과기정통부)                                          |
| 연구과제명       | 카메라를 활용한 특정 (도시) 공간의 미세먼지 핵심 물리량 및 3 차원 공간 분포 산출 기술 개발 |
| 기 여 율       | 1/2                                                    |
| 과제수행기관명     | 한밭대학교                                                  |
| 연구기간        | 2022.03.01 ~ 2023.02.28                                |

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

|             |                          |
|-------------|--------------------------|
| 과제고유번호      | 1615012898               |
| 과제번호        | 151375                   |
| 부처명         | 국토교통부                    |
| 과제관리(전문)기관명 | 국토교통과학기술진흥원              |
| 연구사업명       | 혁신성장동력프로젝트(국토부)          |
| 연구과제명       | 지역수요기반의 스마트시티 비즈니스 모델 개발 |
| 기 여 율       | 1/2                      |
| 과제수행기관명     | (재단)차세대융합기술연구원           |
| 연구기간        | 2022.01.01 ~ 2022.12.31  |

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

대기 중의 초미세먼지 PM2.5 입자를 측정함에 있어서

두 개 이상의 파장의 빛을 이용하여 각 파장별 소산계수를 얻는 소산계수취득부(110);

각 파장별 소산계수를 이용하여 옴스트롱지수를 구하는 AE산출부(120);

구해진 옴스트롱지수의 설정된 범위를 통해 얻은 소산계수와, PM2.5 입자의 상관관계함수를 구하는 함수생성부(130);

상기 상관관계함수를 이용하여 단위 부피에서의 PM2.5 입자의 총질량을 산출하는 입자산출부(140); 로 이루어지는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 시스템

#### 청구항 2

제1항에 있어서,

상기 소산계수취득부(110)는,

라이다, 카메라의 RGB 파장, 태양 추정장치로 얻은 미세먼지의 광학적 깊이, 한 포인트에서 소산이나 산란계수를 얻은 네팔로메터를 포함한 산란현상을 측정하는 수단으로부터 산란계수를 얻는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 시스템.

#### 청구항 3

제1항에 있어서,

상기 소산계수취득부(110)는,

카메라처럼 다른 범위의 넓은 파장영역에 따른 서로 다른 두 파장으로 가시광선에서 NIR(NearInfrared)영역의 파장을 활용하는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 시스템.

#### 청구항 4

제1항에 있어서,

상기 함수생성부(130)는,

상기 옴스트롱지수의 설정된 범위는 마이너스 값으로부터 4사이의 모든 영역을 선택된 범위로 나누어서 사용하는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 시스템.

#### 청구항 5

제1항에 있어서,

상기 함수생성부(130)는,

초미세먼지의 총량( $V_f$ )과 조대입자의 총량( $V_c$ )과 초미세먼지의 중심크기( $r_f$ )과 조대입자의 중심크기( $r_c$ )과 초미세먼지의 중심폭( $\sigma_f$ )과 조대입자의 중심폭( $\sigma_c$ )의 6가지 매개변수의 변화에서 얻어진 소산계수 및 PM2.5입자 질량

의 상관관계에서 옴스트롱지수가 설정범위에 있는 것만 계산하여 상관관계함수를 구하는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 시스템.

## 청구항 6

제6항에 있어서,

상기 6가지 매개변수의 변화에서 얻어진 소산계수 및 PM2.5입자 질량의 상관관계는, 설정된 기간동안의 대기측정에 따른 6가지 매개변수의 범위를 반영하되 굴절율을 일정한 값으로 고정하여 계산함으로써 얻어지는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 시스템.

## 청구항 7

대기 중의 초미세먼지 PM2.5 입자를 측정함에 있어서

두 개 이상의 파장의 빛을 이용하여 각 파장별 소산계수를 얻는 소산계수취득단계(S 110);

각 파장별 소산계수를 이용하여 옴스트롱지수를 구하는 AE산출단계(S 120);

구해진 옴스트롱지수의 설정된 범위를 통해 얻은 소산계수와, PM2.5 입자의 상관관계함수를 구하는 함수생성단계(S 130);

상기 상관관계함수를 이용하여 단위 부피에서의 PM2.5 입자의 총질량을 산출하는 입자산출단계(S 140); 로 이루어지는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 방법.

## 청구항 8

제7항에 있어서,

상기 소산계수취득단계(S 110)는,

라이다, 카메라의 RGB 파장, 태양 추정장치로 얻은 미세먼지의 광학적 깊이, 한 포인트에서 소산이나 산란계수를 얻은 네팔로메터를 포함한 산란현상을 측정하는 수단으로부터 산란계수를 얻는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 방법.

## 청구항 9

제7항에 있어서,

상기 소산계수취득단계(S 110)는,

카메라처럼 다른 범위의 넓은 파장영역에 따른 서로 다른 두 파장으로 가시광선에서 NIR(NearInfrared)영역의 파장을 활용하는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 방법.

## 청구항 10

제7항에 있어서,

상기 함수생성단계(S 130)는,

상기 옴스트롱지수의 설정된 범위는 마이너스 값으로부터 4사이의 모든 영역을 선택된 범위로 나누어서 사용하는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 방법.

## 청구항 11

제7항에 있어서,

상기 함수생성단계(S 130)는,

초미세먼지의 총량( $V_f$ )과 조대입자의 총량( $V_c$ )과 초미세먼지의 중심크기( $r_f$ )과 조대입자의 중심크기( $r_c$ )과 초미세먼지의 중심폭( $\sigma_f$ )과 조대입자의 중심폭( $\sigma_c$ )의 6가지 매개변수의 변화에서 얻어진 소산계수 및 PM2.5입자 질량의 상관관계에서 옴스트룡지수가 설정범위에 있는 것만 계산하여 상관관계함수를 구하는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 방법.

## 청구항 12

제11항에 있어서,

상기 6가지 매개변수의 변화에서 얻어진 소산계수 및 PM2.5입자 질량의 상관관계는, 설정된 기간동안의 대기측정에 따른 6가지 매개변수의 범위를 반영하되 굴절율을 일정한 값으로 고정하여 계산함으로써 얻어지는 것을 특징으로 하는 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 방법.

## 발명의 설명

### 기술 분야

[0001] 본 발명은 미세먼지의 광학적 소산계수를 이용하여 미세먼지의 총량을 얻는 기술에 관한 것으로, 자세하게는 간단한 방법으로 초미세먼지에 의한 산란계수를 두 파장이상에서 얻고 보정된 산란계수와 PM2.5의 관계 그래프 혹은 표를 이용하여 PM2.5의 값을 추정하는 파장에 따른 먹지수 값을 이용하여 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 방법 및 시스템에 관한 것이다.

### 배경 기술

[0002] 현재 환경부에서는 미세먼지의 질량을 직경 10마이크로미터보다 작은 것, 2.5마이크로미터보다 작은 것으로 분류하여 측정한다. 이때 일정 크기 이하의 미세먼지의 총량을 얻는데 있어 측정치를 충분히 얻기 위하여 일정 간격의 시간이 소요되며 국지적인 일부의 미세먼지만 흡입하여 측정하기 때문에 빠른 측정이 어렵고, 넓은 지역을 대표하는 것은 힘든 실정이다.

[0003] 따라서 대기 공간에 존재하는 입자에 의한 평균 소산계수가 사진이나 기타 레이저를 이용하여 순간적으로 얻을 수 있고 한 지점이 아니라 전체 공간에서의 평균 값을 제공하기 때문에 전체를 대표하는 값으로 선호되고 있다.

[0004] 그러나 환경부의 표준 측정 물리량이 단위 부피에 존재하는 질량이기 때문에 다른 단위의 소산계수로부터 질량을 얻는 방법은 아직까지 그 오차를 많아 포함할 수밖에 없다. 즉 소산계수는 단위부피에 존재하는 미세먼지의 질량이 아니고 면적이므로 이러한 단위차이에서 문제가 발생하는 것으로 물리량이 단위부피당 총 입자의 질량을 의미하며 장치는 대기 중의 입자를 흡입하는 부분, 크기 별로 분리하는 부분, 그리고 입자의 질량을 측정하는 부분으로 나뉘므로 이에 따른 측정 방법의 번거로움과 넓은 지역을 대표하지 못하는 점, 그리고 고가인 점 등의 이유 때문에 도시 전체를 혹은 넓은 지역을 파악하는 데는 어려움이 있다.

[0005] 또한, 주어진 크기 이하의 범위(PM2.5의 경우 2.5마이크로미터)에 존재하는 초미세입자(fine particle)는 기상 조건이나 발생 원인에 따라서 일정 폭의 분포와 특정 크기가 최대로 많은 로그노말(lognormal) 분포를 하게 된다. 즉 초미세먼지의 입자의 크기와 분포의 변화는 입자의 생성 원인과 기상조건 등의 다양한 원인에 의하여 변하게 된다.

[0006] 이때 입자에 의한 소산 정도는 입자의 크기와 사용하는 파장에 따라 그 효율을 달리한다. 이러한 이유로 같은 질량의 입자가 존재하더라도 입자의 크기가 바뀌면 소산계수 값은 달라지게 된다. 그러므로 입자의 크기 변화를 감지하는 기술이 없으면 입자에 의한 소산효율의 변화만으로 입자의 총량을 얻은 것은 이론적으로 불가능하고, 현실적으로는 많은 오차를 갖게 된다.

## 선행기술문헌

## 특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 한국 등록특허 제10-2139815호 (2020.07.24)

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0008] 본 발명은 상기와 같은 문제를 해결하기 위하여 창출된 것으로, 본 발명의 목적은 단위차이에서 발생하는 문제를 해결하기 위하여 간단한 방법으로 초미세먼지에 의한 산란계수를 두 파장이상에서 얻고 보정된 산란계수와 PM2.5의 관계 그래프 혹은 표를 이용하여 PM2.5의 값을 추정하는 과장에 따른 먹지수 값을 이용하여 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 방법 및 시스템을 제공하는 것이다.

### 과제의 해결 수단

[0009] 상기와 같은 목적을 위해 본 발명 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 시스템은 대기 중의 초미세먼지 PM2.5 입자를 측정함에 있어서, 두 개 이상의 파장의 빛을 이용하여 각 파장별 소산계수를 얻는 소산계수취득부; 각 파장별 소산계수를 이용하여 옴스트롱지수를 구하는 AE산출부; 구해진 옴스트롱지수의 설정된 범위를 통해 얻은 소산계수와, PM2.5 입자의 상관관계함수를 구하는 함수생성부; 상기 상관관계함수를 이용하여 단위 부피에서의 PM2.5 입자의 총질량을 산출하는 입자산출부; 로 이루어지는 것을 특징으로 한다.

[0010] 이때 상기 소산계수취득부는, 라이다, 카메라의 RGB 파장, 태양 추정장치로 얻은 미세먼지의 광학적 깊이, 한 포인트에서 소산이나 산란계수를 얻은 네팔로메터를 포함한 산란현상을 측정하는 수단으로부터 산란계수를 얻을 수 있다.

[0011] 또한, 상기 소산계수취득부는, 카메라처럼 다른 범위의 넓은 파장영역에 따른 서로 다른 두 파장으로 가시광선에서 NIR(NearInfrared)영역의 파장을 활용할 수 있다.

[0012] 또한, 상기 함수생성부는, 상기 옴스트롱지수의 설정된 범위는 마이너스 값으로부터 4사이의 모든 영역을 선택된 범위로 나누어서 사용할 수 있다.

[0013] 또한, 상기 함수생성부는, 초미세먼지의 총량( $V_f$ )과 조대입자의 총량( $V_c$ )과 초미세먼지의 중심크기( $r_f$ )과 조대입자의 중심크기( $r_c$ )과 초미세먼지의 중심폭( $\sigma_f$ )과 조대입자의 중심폭( $\sigma_c$ )의 6가지 매개변수의 변화에서 얻어진 소산계수 및 PM2.5입자 질량의 상관관계에서 옴스트롱지수가 설정범위에 있는 것만 계산하여 상관관계함수를 구할 수 있다.

[0014] 또한, 상기 6가지 매개변수의 변화에서 얻어진 소산계수 및 PM2.5입자 질량의 상관관계는, 설정된 기간동안의 대기측정에 따른 6가지 매개변수의 범위를 반영하되 굴절율을 일정한 값으로 고정하여 계산함으로 얻어질 수 있다.

[0015] 본 발명 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 방법은 대기 중의 초미세먼지 PM2.5 입자를 측정함에 있어서, 두 개 이상의 파장의 빛을 이용하여 각 파장별 소산계수를 얻는 소산계수취득단계; 각 파장별 소산계수를 이용하여 옴스트롱지수를 구하는 AE산출단계; 구해진 옴스트롱지수의 설정된 범위를 통해 얻은 소산계수와, PM2.5 입자의 상관관계함수를 구하는 함수생성단계; 상기 상관관계함수를 이용하여 단위 부피에서의 PM2.5 입자의 총질량을 산출하는 입자산출단계; 로 이루어지는 것을 특징으로 한다.

[0016] 이때 상기 소산계수취득단계는, 라이다, 카메라의 RGB 파장, 태양 추정장치로 얻은 미세먼지의 광학적 깊이, 한 포인트에서 소산이나 산란계수를 얻은 네팔로메터를 포함한 산란현상을 측정하는 수단으로부터 산란계수를 얻을 수 있다.

[0017] 또한, 상기 소산계수취득단계는, 카메라처럼 다른 범위의 넓은 파장영역에 따른 서로 다른 두 파장으로 가시광선에서 NIR(NearInfrared)영역의 파장을 활용할 수 있다.

[0018] 또한, 상기 함수생성단계는, 상기 옴스트롱지수의 설정된 범위는 마이너스 값으로부터 4사이의 모든 영역을 선택된 범위로 나누어서 사용할 수 있다.

[0019] 또한, 상기 함수생성단계는, 초미세먼지의 총량( $V_f$ )과 조대입자의 총량( $V_c$ )과 초미세먼지의 중심크기( $r_f$ )과 조대입자의 중심크기( $r_c$ )과 초미세먼지의 중심폭( $\sigma_f$ )과 조대입자의 중심폭( $\sigma_c$ )의 6가지 매개변수의 변화에서 얻어진 소산계수 및 PM2.5입자 질량의 상관관계에서 옴스트룽지수가 설정범위에 있는 것만 계산하여 상관관계함수를 구할 수 있다.

[0020] 또한, 상기 6가지 매개변수의 변화에서 얻어진 소산계수 및 PM2.5입자 질량의 상관관계는, 설정된 기간동안의 대기측정에 따른 6가지 매개변수의 범위를 반영하되 굴절율을 일정한 값으로 고정하여 계산함으로써 얻을 수 있다.

### 발명의 효과

[0021] 본 발명은 2개 이상의 파장에서 소산계수를 원격으로 측정하여 넓은 지역을, 빠르게, 그리고 정확하게 측정할 수 있도록 한다. 또한, 입자 크기가 어떻게 이동했는지 예측하여 소산계수로부터 보다 더 정확한 입자의 질량(PM2.5)을 얻고 동시에 입자의 크기변화를 모니터링하여 입자의 소산계수만 측정하여도 입자의 질량을 적은 오차로 얻을 수 있다.

[0022] 넓은 지역의 소산계수를 측정하는 방법으로는 카메라를 이용하여 수동적으로 측정하거나, 레이저(CW-laser 혹은 펄스 레이저)를 이용하여 능동적으로 측정하는 방법 모두에 적용이 가능하다. 하지만, 기존의 기술은 소산계수와 PM2.5의 관계를 습도만 고려하여 1:1 관계로 두는 방법을 이용하기 때문에 오차가 심하고, 환경 조건과 같이 민감한 사항에 적용하기엔 어려움이 있는데 반해, 본 발명에서는 입자의 총 적분량(PM2.5)은 같아도 입자에 의한 소산계수는 입자의 크기분포에 매우 민감하기 때문에 입자의 크기 변화를 고려한 보정이 이루어지게 된다.

### 도면의 간단한 설명

[0023] 도 1은 대기 부유 입자의 크기별 부피 및 수 밀도 분포 그래프,  
 도 2는 입자의 부피 분포 결정 매개변수 6개의 정의에 따른 그래프,  
 도 3은 산란 빛의 파장으로 규격화한 입자의 크기( $2\pi r/\lambda$ )별 소산 효율(Q)을 나타낸 그래프,  
 도 4는 부피 소산 효율( $Q_v$ )과 입자의 크기 별 부피 분포 특성 및 소산계수의 정의를 나타낸 그래프,  
 도 5는 입자의 부피 분포 밀도로부터 PM2.5와 PM10 등을 얻는 방법에 따른 그래프,  
 도 6은 대기 중에 존재하는 입자의 6개 변수의 범위를 나타낸 테이블,  
 도 7은 입자의 초미세먼지 및 조대입자의 총량( $V_f$ ,  $V_c$ ) 변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계 분포도,  
 도 8은 입자의 초미세먼지 및 조대입자의 중심 폭( $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$ ) 변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계 분포도,  
 도 9는 입자의 초미세먼지 및 조대입자의 중심크기( $r_f$ ,  $r_c$ )변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계 분포도,  
 도 10은 6개의 미세먼지 매개변수( $V_f$ ,  $V_c$ ,  $r_f$ ,  $r_c$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$ )변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계( $0.12 < r_f < 0.18$ )를 나타낸 그래프,  
 도 11은 6개의 미세먼지 매개변수( $V_f$ ,  $V_c$ ,  $r_f$ ,  $r_c$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$ )변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계( $0.12 < r_f < 0.52$ )를 나타낸 그래프,  
 도 12는 6개의 미세먼지 매개변수( $V_f$ ,  $V_c$ ,  $r_f$ ,  $r_c$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$ )변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계( $0.12 < r_f < 0.18$ )를 나타낸 그래프,  
 도 13은 6개의 미세먼지 매개변수( $V_f$ ,  $V_c$ ,  $r_f$ ,  $r_c$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$ )변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5와 상관관계( $0.12 < r_f < 0.52$ )를 나타낸 그래프, (단 AE가 일정 범위에 있는 것만 계산한 경우)  
 도 14는 본 발명에 따른 PM2.5 입자를 추출하는 시스템의 블록도,

도 15는 본 발명에 따른 PM2.5 입자를 추출하는 방법을 나타낸 순서도이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0024] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명 파장에 따른 먹지수 값을 이용하여 소산계수로부터 PM2.5 입자를 추출하는 방법 및 시스템을 구체적으로 설명한다.
- [0025] 기본적으로 초미세먼지는 초미세 먼지의 총량, 중심크기, 크기 분포 폭이라는 3가지 변수가 비선형적으로 소산계수에 영향을 주게 되므로 최종적으로는 소산계수와 PM2.5의 관계가 1:1 관계에 있지 않게 된다. 즉 단순히 소산계수만을 측정하는 방법만으로는 소산계수로부터 PM2.5를 얻을 수 없다.
- [0026] 본 발명에서는 이러한 점을 극복하기 위하여 입자의 크기 변화를 나타내는 AE(Angstrom Exponent, 옴스트롱지수, 이하 'AE'라 칭함)를 근거로 즉 같은 값의 AE를 가진 소산계수로부터 PM2.5 추출하는 방법을 적용한다.
- [0027] 즉 기존의 PM2.5를 얻는 방법은 각 파장에서 얻은 소산계수와 PM2.5를 독립적으로 대응관계를 찾는 반면 본 발명에서는 여러 개의 파장에서 얻은 각각의 소산계수를 독립적으로 PM2.5를 얻는데 사용되는 것이 아니라, 여러 파장에서 얻은 소산계수로부터 얻은 AE 구하고 이 값을 새로운 독립변수로 1:1 관계의 상관성을 높여 PM2.5를 좀더 정확하게 얻을 수 있도록 한다.
- [0028] 도 14는 본 발명에 따른 PM2.5 입자를 추출하는 시스템의 블록도, 도 15는 본 발명에 따른 PM2.5 입자를 추출하는 방법을 나타낸 순서도로서, 본 발명은 대기 중의 초미세먼지 PM2.5 입자를 측정하기 위한 구성으로 소산계수 취득부(110)과, AE산출부(120)와, 함수생성부(130)와, 입자산출부(140)를 구비하여 이를 통해 다음과 같은 절차로 PM2.5 입자의 질량을 측정한다.
- [0029] 첫 번째 단계는 두 개 이상의 파장의 빛을 이용하여 각 파장별 소산계수를 얻는 소산계수취득단계(S 110)로서, 소산계수취득부(110)를 통해 진행된다.
- [0030] 이때 상기 상기 소산계수취득단계(S 110)에서 소산계수취득부(110)는, 라이다, 카메라의 RGB 파장, 태양 추정장치로 얻은 미세먼지의 광학적 깊이, 한 포인트에서 소산이나 산란계수를 얻은 네팔로메터를 포함한 산란현상을 측정하는 수단으로부터 산란계수를 얻을 수 있으며, 카메라처럼 다른 범위의 넓은 파장영역에 따른 서로 다른 두 파장으로 가시광선에서 NIR(Near Infrared)영역의 파장을 활용할 수 있다.
- [0031] 두 번째 단계는 각 파장별 소산계수를 이용하여 옴스트롱지수를 구하는 AE산출단계(S 120)로서, AE산출부(120)를 통해 진행된다.
- [0032] 세 번째 단계는 구해진 옴스트롱지수의 설정된 범위를 통해 얻은 소산계수와, PM2.5 입자의 상관관계함수를 구하는 함수생성단계(S 130)로서, 함수생성부(130)를 통해 진행된다.
- [0033] 이때 함수생성단계(S 130)에서 상기 함수생성부(130)는, 상기 옴스트롱지수의 설정된 범위는 마이너스 값으로부터 4사이의 모든 영역을 선택된 범위로 나누어서 사용하고, 초미세먼지의 총량( $V_f$ )과 조대입자의 총량( $V_c$ )과 초미세먼지의 중심크기( $r_f$ )과 조대입자의 중심크기( $r_c$ )과 초미세먼지의 중심폭( $\sigma_f$ )과 조대입자의 중심폭( $\sigma_c$ )의 6가지 매개변수의 변화에서 얻어진 소산계수 및 PM2.5입자 질량의 상관관계에서 옴스트롱지수가 설정범위에 있는 것만 계산하여 상관관계함수를 구할 수 있다. 또한, 상기 6가지 매개변수의 변화에서 얻어진 소산계수 및 PM2.5 입자 질량의 상관관계는, 설정된 기간동안의 대기측정에 따른 6가지 매개변수의 범위를 반영하되 굴절율을 일정한 값으로 고정하여 계산함으로 얻어질 수 있다.
- [0034] 네 번째 단계는 상기 상관관계함수를 이용하여 단위 부피에서의 PM2.5 입자의 총질량을 산출하는 입자산출단계(S 140)로서 입자산출부(140)를 통해 진행된다.
- [0036] 소산계수는 라이다, 카메라, 태양 추정장치로 얻은 AOD(미세먼지의 광학 깊이, Aerosol Optical Depth), 그리고 한 포인트에서 소산이나 산란계수를 얻은 네팔로메터나, 각종 산란 현상을 이용하는 장치를 통해 얻을 수 있다.
- [0037] 이를 위해 2개 이상의 파장에서 소산계수를 얻고 이로부터 AE를 구한 다음, 기존의 다양한 방법으로 같은 AE값으로 얻은 PM2.5과 소산계수 관계에서, PM2.5/PM10를 얻는 것으로 같은 AE에서 얻은 다양한 소산계수와 PM2.5의 관계가 필요하다.

- [0038] 본 발명에서는 다양한 경우의 대기 상태에서 1년의 기간동안 얻은 약 106개 이상의 소산 계수와 PM2.5/PM10로부터 AE값에 따른 소산계수와 PM2.5관계를 얻어 이를 해결한다.
- [0039] 도 1은 대기 부유 입자의 크기별 부피 및 수 밀도 분포 그래프, 도 2는 입자의 부피 분포 결정 매개변수 6개의 정의에 따른 그래프이다.
- [0040] 미세먼지의 크기별 수(부피/면적) 분포는 도 1과 같이 초미세먼지(fine particle)와 조대입자(coarse particle)로 구성되며 그 크기의 로그값 스케일에서 정규분포를 하는 두 곡선의 합으로 표시된다. 부유 입자의 면적이거나 부피가 실제 자연현상(시정거리, 화학반응, 유해정도)을 유발하는 직접적인 변수이기 때문에 주로 부피 혹은 면적 분포를 사용한다.
- [0041] 도 1 및 2에서 알 수 있듯이 이는 두 종류의 입자는 그 입자의 발생원이 달라서 생기는 현상이며, 초미세먼지는 주로 기체에서 물리/ 화학적으로 변형 과정을 거치면서 입자가 커져서 생기는 것이고, 조대입자는 큰 입자이 쪼개짐 과 같은 물리적 현상으로 생긴 1차 생성물로 생성초기부터 그러한 조대입자 분포를 하게 된다.
- [0042] 즉 조대입자 중에서 너무 큰 입자들은 부유성을 띠기 곤란하기 때문에 부유 수밀도(부피밀도)가 낮으며, 1마이크론보다 작은 입자는 1차 생성물로 생성 자체가 많이 되지 않는다는 의미와 함께 부피/면적은 입자가 작을수록 그 면적(부피가) 작기 때문에 다시 작은 값을 지니게 된다.
- [0043] 또한 1마이크론 크기 영역에서는 초미세먼지의 경우도 작은 부피 밀도 비를 보이는데, 이는 입자의 성장 메커니즘이 충돌 확률과 충돌시 두 입자의 속도에 관계되는 양으로 초미세먼지가 1마이크론 영역까지 성장이 곤란하다는 것을 보여준다. 작은 크기 영역에서 초미세입자의 수 밀도는 작을수록 높은 수밀도(Junge power law distribution)를 갖지만, 역시 작을수록 면적과 부피가 크기의 제곱 혹은 3승에 비례하여 작아지기 때문에 부피 및 면적 분포는 아주 작은 크기에서 0에 수렴한다. 그러므로 조대입자와 초미세먼지의 크기에 따른 부피(면적) 분포는 도면과 같은 분포를 지니게 된다.
- [0044] 도 3은 산란 빛의 파장으로 규격화한 입자의 크기( $2\pi r/\lambda$ )별 소산 효율(Q)을 나타낸 그래프이다.
- [0045] 입자에 의한 소산계수는 Mie 산란 이론에 의하여 결정되고, 일반적으로 입자의 크기와 빛의 파장에 따라 그 효율(Q)이 달라지나, 기본적으로 주어진 크기의 입자에서 그 입자의 면적에 비례하며, 효율(Q)는 도 3과 같이 입자의 크기와 파장의 비가 충분히 커지면 '2'에 수렴하는 경향을 나타낸다.
- [0046] 도 3의 가로축(x-축)은 입자의 둘레( $2\pi r$ ) 크기를 파장( $\lambda$ )으로 나눈 값( $x=2\pi r/\lambda$ )을 나타낸다. 도면에서 2로 수렴하는 것은 주어진 하나의 입자가 존재하고, 사용한 파장이 입자의 크기 입자보다 충분히 크다면 면적의 두 배 정도가 산란되어 흩어진다는 것을 의미한다. 즉 산란 효율과 면적의 곱으로 산란되는 양을 구할 수 있다는 의미이다. 그러므로 입자의 부피 분포가 도 1과 같이 된다면, 산란되는 총 양은 산란 효율과 면적 대신에 부피 산란 효율( $Q_v=3Q/4r$ )과 주어진 입자의 부피 곱으로 구할 수 있다. 그러므로 소산계수는 [수학식 1]과 같이 얻어진다.
- [0047] [수학식 1]
- [0048] 
$$\alpha_{\lambda} = \int_0^{\infty} V(r) Q_v(r, \lambda) dr$$
- [0049] 도 4는 부피 소산 효율( $Q_v$ )과 입자의 크기 별 부피 분포 특성 및 소산계수의 정의를 나타낸 그래프, 도 5는 입자의 부피 분포 밀도로부터 PM2.5와 PM10 등을 얻는 방법에 따른 그래프이다.
- [0050] [수학식 1]을 그림으로 설명하면 도 4 및 5와 같다. 도 4 및 5는 입자의 부피 분포가 있고, 그 부피분포와 부피 산란 효율을 곱하여 얻어 진다는 의미이다. 도 4 및 5에서 직감적으로 알 수 있듯이 조대입자는 그 중심크기가 변해도 소산계수에 큰 영향은 없으나, 초미세먼지의 입자 크기는 작은 크기변화에도 소산계수에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.
- [0051] PM10과 PM2.5는 직경 10마이크로미터와 2.5 마이크로미터 크기 이하의 모든 부유 입자를 전부합한 질량을 나타내며, 도 5에 그 정의를 다시 표시하였다. 일반적으로 PM2.5는 초미세먼지(fine particle)의 크기가 크게 변해도 PM2.5 값에는 영향을 주지 않는다.
- [0052] 이는 PM10과 문턱치 값( $d=10, d=2.5\mu m$ )이 두 모드로 구성된(도 1 및 2) 입자 분포의 6가지 파라미터의 변화에 민감하지 않다는 의미이다. 즉 이는 소산계수와 매우 다른 양상을 보인다. 즉 소산계수는 초미먼지의 크기 변화에

매우 민감한 특징이 있다. 그러므로 언급한 것처럼 초미세먼지의 크기 변화를 감지하지 않으면 같은 PM2.5 에서도 다양한 초미세먼지의 다양한 부피분포 모두에서 같은 PM2.5 을 값을 유지하는 반면 다른 소산계수를 보인다는 것을 알 수 있다.

[0053] PM2.5는 단위 부피에 존재하는 특정 크기 이하 입자의 총질량을 의미하며 소산계수는 단위부피에 존재하는 입자의 총 면적을 의미한다. 그러므로 그 단위는 각각  $g/m^3$ 과  $m^2/m^3$ 이 된다. 즉 같은 질량의 입자가 대기 중에 존재하더라도 작은 상태로 존재하면 입자의 면적은 넓어지게 되어 면적과 질량(부피) 관계를 1:1로 대응시키기 위해서는 반드시 입자의 크기에 대한 정보도 동시에 고려되어야 한다.

[0054] 도 6은 대기 중에 존재하는 입자의 6개 변수의 범위를 나타낸 테이블이다.

[0055] 입자의 크기에 따른 부피 분포는 대기의 부유폭성, 입자의 발달과정과 성장 메커니즘, 그리고 크기에 따른 각 입자의 부피 특성 때문에 매우 복잡한 모양을 제한하고 입자 크기의 로그 스케일에서 정규분포를 이루고 있다는 것을 도 1 및 2를 통하여 이미 설명한바 있다. 이러한 입자 크기에 따른 부피 분포는 크게 3가지 변수로 그 특징을 완벽히 묘사할 수 있는데, 입자의 총량에 해당하는 값, 입자 부피 분포의 폭에 해당하는 양, 그리고 입자의 중심크기에 해당하는 것이 그것이다. 두 가지 모드(초미세먼지와 조대입자)가 존재하기 때문에 총 6개의 변수, 즉 초미세먼지의 총량( $V_f$ ), 조대입자의 총량( $V_c$ ), 초미세먼지의 중심크기( $r_f$ ), 조대입자의 중심크기( $r_c$ ), 초미세먼지의 중심폭( $\sigma_f$ ), 조대입자의 중심폭( $\sigma_c$ )이 존재 한다고 할 수 있다.

[0056] 소산계수로부터 입자의 질량(PM2.5)을 추출함에 있어서, 6개의 독립 변수에 따라서 소산 계수와 입자의 질량의 상관 관계를 이론적으로 알아보고 그 상관관계를 밝혀 해결책을 찾는 것은 매우 중요하다. 즉 6개의 입자 변수를 알 수 없는 상태에서 오직 소산계수만으로 단위가 다른 입자의 질량을 측정하는 것은 어려운 일이나, 제한된 조건에서는 그 값을 추출할 수도 있다.

[0057] 1) 이러한 6개의 변수 중에서 먼저 입자의 총량은 의심의 여지 없이 다른 두 양(다른 4변수가 일정)이 일정하면 모두 소산계수와 PM2.5 에 선형적으로 기여하기 때문에 두 측정값(소산계수와 PM2.5) 사이의 1:1 대응에 있음을 예측할 수 있다.

[0058] 도 7은 임의의 초미세먼지 및 조대입자의 총량( $V_f$ ,  $V_c$ ) 변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계 분포도로서, 그러므로 입자의 총부피 변화는 소산계수와 PM2.5 동시에 선형적으로 기여하게 되어서 입자의 총량이 변하여도 두 값은 좋은 상관관계를 이룰 것으로 예측할 수 있다.

[0059] 2) 반면에 두 모드 중에서 초미세먼지와 조대입자의 분포 폭은(다른 4 변수가 일정) PM2.5에 전혀 영향을 주지 않을 것으로 쉽게 예상할 수 있다. 왜냐하면 PM2.5의 정의에 의하면 이는 직경 2.5 $\mu m$  이하의 입자의 총량을 적분하는 것이기 때문에 그 폭이 달라져도 그 적분 값은 크게 변하지 않기 때문이다. 그러나, 두 모드의 분포 폭은 도 4 및 5에서 알 수 있듯이 소산 계수에 영향을 줄 수 있다. 이는 도 4 및 5에서 입자의 분포 폭이 변하면 소산 효율과 분포의 곱으로 계산되는 소산계수에 영향을 줄 수 있다는 의미이다.

[0060] 도 8은 임의의 초미세먼지 및 조대입자의 중심 폭( $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$ ) 변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계를 분포도로서, 정량적인 결과는 뒤에서 알 수 있다.

[0061] 3) 두 모드의 중심크기는 PM2.5 뿐만 아니라 소산계수에도 영향을 준다. 그러므로 이에 대한 정보는 고려되어야 한다. 그러나 중심크기가 변할 경우 PM2.5에 끼치는 영향과 소산 계수에 미치는 영향이 같다면 중심크기가 변해도 두 변수(소산계수와 PM2.5)의 상관관계가 변하지 않기 때문에 이를 고려하지 않아도 된다.

[0062] 도 9는 임의의 초미세먼지 및 조대입자의 중심크기( $r_f$ ,  $r_c$ )변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계 분포도로, 도 9에서 중심크기 변수가 소산계수와 PM2.5에 각각 어떻게 영향을 주는 알 알아볼 예정이다.

[0063] 앞서 입자의 6개 변수가 입자의 소산계수와 PM2.5 값에 어떻게 영향을 주는지 알아보았다. 이때 각 6개의 변수 범위는 일상에서 변하는 범주에 한정하여 결정하였다. 예를 들어 초미세먼지의 중심크기는 그 입자의 생성 기원에 관계 없이 0.12~0.18 $\mu m$  범위에 있으며, 조대입자는 1.9에서 3.2 $\mu m$  범위에 있다.

[0064] 실례로 도 7은 초미세먼지와 조대입자의 총량이 임의로(randomly) 변했을 때 소산계수와 PM2.5의 관계를 보여준다. 계산에 사용하는 파장은 시정 거리 측정에 사용되는 파장550nm를 사용하였다. 초미세먼지와 조대입자의 총량만 변하고 다른 4개의 매개변수가 일정하다면 소산 계수의 측정만으로도 PM2.5를 매우 정확하게 특정할 수 있다는 것을 보여준다. 이때 고정값으로 사용한 4개의 변수는 도 6의 중앙 값을 사용한 것이다. 그리고 굴절

물은 1.45와 0.001을 각각 고정 값으로 사용하였다.

- [0065] 도 8은 같은 방법으로 두 모드 입자의 분포 폭의 변화를 임의로 주었을 경우 얻어지는 두 측정값(소산 계수와 PM2.5)의 관계를 보여 준다. 이때 기타 4개의 다른 미세먼지 매개변수는 도 7과 같은 방법으로 고정된 일정한 값을 사용하였다.
- [0066] 도면에서 알 수 있듯이 분포 폭의 변화는 소산 계수와 PM2.5의 변화에 전혀 기여도가 없음을 알 수 있다. 즉 입자의 분포 폭은 소산 계수와 PM2.5의 변화에 기여도가 없다는 것이다. 즉 소산계수도 380부터  $470 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 까지 좁은영역에서 10% 이내 값으로 안정된 값을 보이고, PM2.5는  $41\text{--}45 \mu\text{gm}^{-3}$  정도로 10% 내외로 변한다.
- [0067] 도 9는 두 모드 입자의 중심크기의 변화를 임의로 주었을 경우 얻어지는 두 측정값(소산 계수와 PM2.5)의 관계를 보여 준다. 이때 기타 미세먼지 매개변수는 도 7과 같은 방법으로 고정된 일정한 값을 사용하였다.
- [0068] 도 9는 소산계수가 230부터  $320 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 까지 40% 이내 값으로 변위가 있는 반면 PM2.5는  $41\text{--}50 \mu\text{gm}^{-3}$  정도로 20% 내외로 비교적 안정된 범위의 값을 내고 있으나, 두 값의 상관관계를 이용하기엔 너무 큰 차이를 보이며, 특히 도 9에서 알 수 있듯이 소산 계수가 특정 값(본 경우엔  $320 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ) 근처에서 분포 밀도가 높으며, 이는 크기가 임의로(randomly) 특정값으로 측정이 될 확률이 높다는 의미이다.
- [0069] 이 경우 같은 소산계수에서 ( $\Delta \alpha / \alpha \ll 1$ ) 매우 다른 PM2.5 값을 얻을 수 있다는 의미이기 때문에 PM2.5를 얻기 위하여 소산계수와 PM2.5의 상관관계를 이용할 수 없다는 뜻이다.
- [0070] 도 10은 6개의 미세먼지 매개변수( $V_f$ ,  $V_c$ ,  $r_f$ ,  $r_c$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$ )변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계( $0.12 < r_f < 0.18$ )를 나타낸 그래프, 도 11은 6개의 미세먼지 매개변수( $V_f$ ,  $V_c$ ,  $r_f$ ,  $r_c$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$ )변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계( $0.12 < r_f < 0.52$ )를 나타낸 그래프이다.
- [0071] 도 10 및 11은 6개의 미세먼지 매개변수 모두를 임의의 값으로 변화시키면서 오직 굴절률만 도 7과 같이 일정한 값으로 고정하여 계산한 것이다. 도 10 및 11에 사용한 6개의 변수는 도 6에서 보여주는 전체 영역에서 그 값을 변화시켰다. 다만  $V_f/V_c$ 의 비는 다양한 대기 조건에서 그 영향을 얻기 위하여 두 값( $V_f$ ,  $V_c$ )을 독립변수로 두고 5배까지 그 크기를 변화시켰다.
- [0072] 또한 도 10은 초미세먼지의 중심크기를  $0.12\text{--}0.18 \mu\text{m}$ 까지 더 넓은 영역에서 변화가 생기도록 하였으며, 도 11은 초미세먼지의 중심크기를 좀더 큰 영역까지 확장이 가능하도록  $0.12\text{--}0.52 \mu\text{m}$  까지 더 넓은 영역에서 변화가 생기도록 하였다.
- [0073] 계산 결과는 도면에서 보듯이 주어진 하나의 파장에서 얻은 소산계수에서 다양한 PM2.5값을 대응시킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하는 것이 본 발명에서 해결하고자 하는 것이다.
- [0074] 본 분야에 종사하는 당업자는 AE(Angstrom Exponent)를 잘 알고 있다. 본 값은 소산계수가 파장에 따라 다른 정도를 나타내는 것으로 파장에 따른 소산계수를 수학적 2 와 같이 표현할 때 정의되는 값이다.
- [0075] [수학적 2]
- [0076] 
$$\alpha(\lambda) = \alpha_0 \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-AE}$$
- [0077] 일반적으로 AE은 입자의 크기에 의존하는 값으로 음수와 양수값을 가질 수 있다. 음수는 주로 공기 중에 큰 입자만 존재할 경우에 생기는 것으로 안개나 구름, 황사와 같은 현상이 발생하면 이 값은 음수로 된다. 즉 이 값이 일정할 경우 입자의 크기가 일정하다는 의미와도 유사한 의미를 지닌다.
- [0078] 이러한 AE의 물리적 의미를 바탕으로 AE값에 따라 도 10 및 11의 상관관계가 어떻게 변하는지 도 12 및 13에 나타내었다.
- [0079] 도 12는 6개의 미세먼지 매개변수( $V_f$ ,  $V_c$ ,  $r_f$ ,  $r_c$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$ )변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5 상관관계( $0.12 < r_f < 0.18$ )를 나타낸 그래프, 도 13은 6개의 미세먼지 매개변수( $V_f$ ,  $V_c$ ,  $r_f$ ,  $r_c$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$ )변화에서 얻어지는 소산계수 및 PM2.5와 상관관계( $0.12 < r_f < 0.52$ )를 나타낸 그래프이다. (단 AE가 일정 범위에 있는 것만 계산한 경우)

[0080] 도 12에서는 도 10의 전체 데이터 중에서 AE=1~1.1 경우와 AE=2~2.1 경우를 따로 나누어 나타낸 것이다. 도면에 서 알 수 있듯이 각각의 경우 기울기가  $0.1635 \times 10^6$  (PM2.5/  $\alpha$  (550)) 값과  $0.1552 \times 10^6$  (PM2.5/  $\alpha$  (550)) 값으로 다르게 표현되며, 도 10과 달리 두 물리량(소산계수와 PM2.5)의 상관관계도 각각 0.995와 0.986으로 더 좋은 상 관관계를 보인다. 그러므로 AE따라 다른 상관관계 함수를 적용해야 한다. 도 13도 역시 도 11에서 특정 AE 값만 추출하여 얻은 소산계수와 PM2.5의 관계를 보여주는 것으로 도 11에 비하여 기울기와 상관계수가 크게 증가했음 을 보여준다.

[0081] 도 12 및 13에서 얻은 AE 값은 두 파장 이상에서 소산계수를 얻어야만 알 수 있는 양이다. 그러므로 도 12 및 13과 같이 AE 값을 이용하여 소산계수와 PM2.5의 상관관계를 높이려면 두 파장 이상에서 소산계수를 얻어야 한 다. 두 파장 이상에서 소산계수를 얻는 방법은 카메라의 RGB 파장을 이용하거나, 라이다의 경우 다파장 라이다 가 흔하게 사용된다. 그 밖에 지점 혹은 전체 대기의 소산계수 태양광을 이용하는 법 등이 있다. 이렇게 두 파 장 이상의 여러 파장에서 소산계수를 측정하면 [수학식 2]를 이용해서 AE를 구할 수 있고, 다른 상관관계 함수 를 이용하여(도 13) PM2.5를 구할 수 있다.

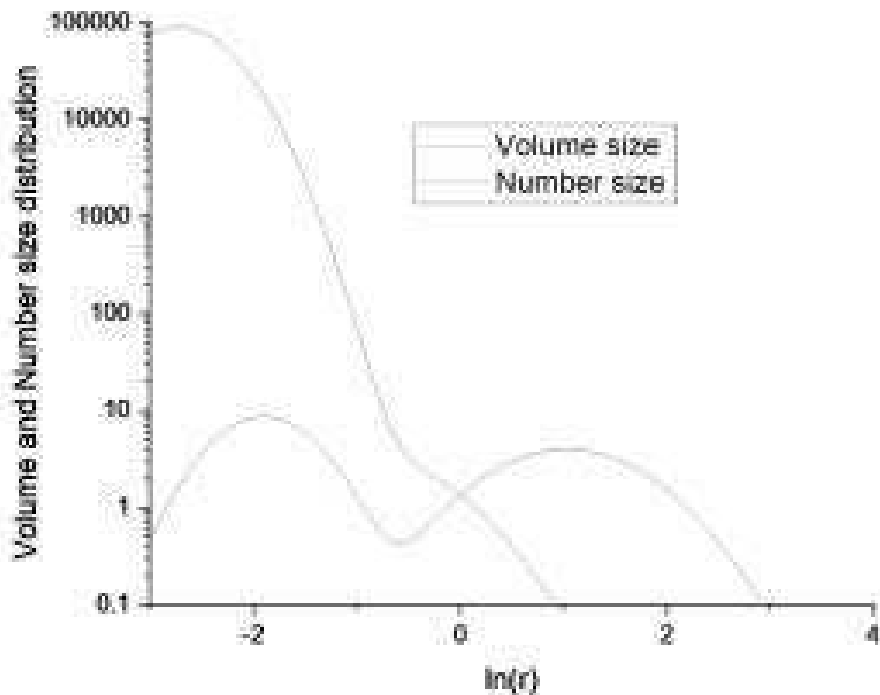
[0082] 본 발명의 권리는 위에서 설명된 실시예에 한정되지 않고 청구범위에 기재된 바에 의해 정의되며, 본 발명의 분 야에서 통상의 지식을 가진 자가 청구범위에 기재된 권리범위 내에서 다양한 변형과 개작을 할 수 있다는 것은 자명하다.

### 부호의 설명

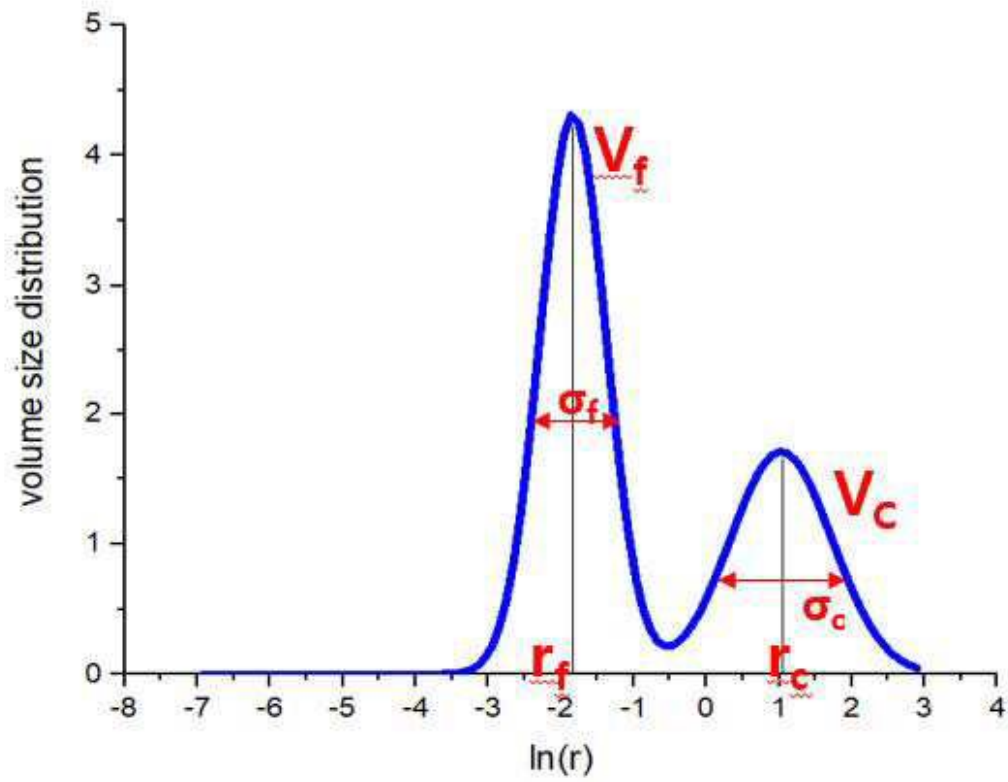
[0083] 110: 소산계수취득부 120: AE산출부  
130: 함수생성부 140: 입자산출부

### 도면

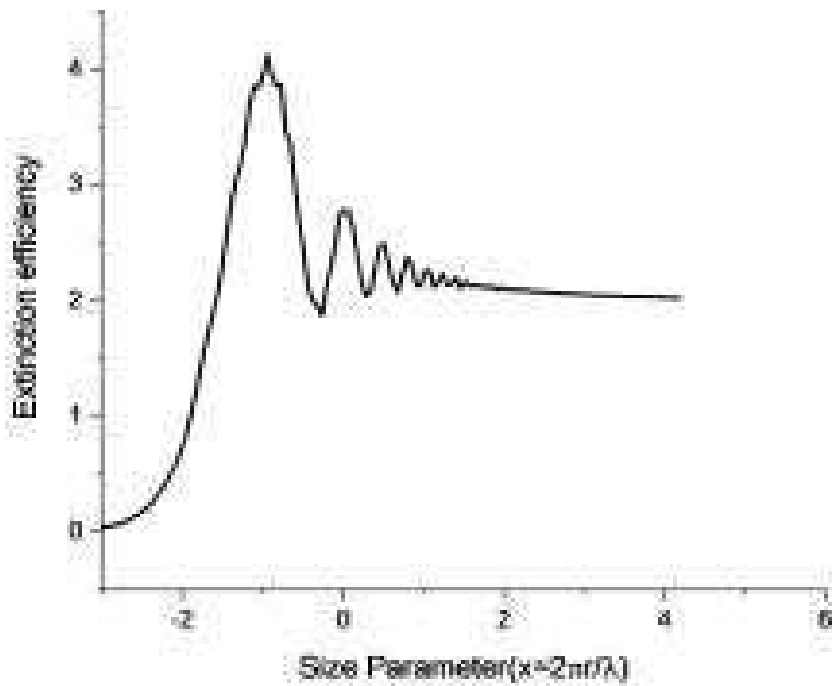
#### 도면1



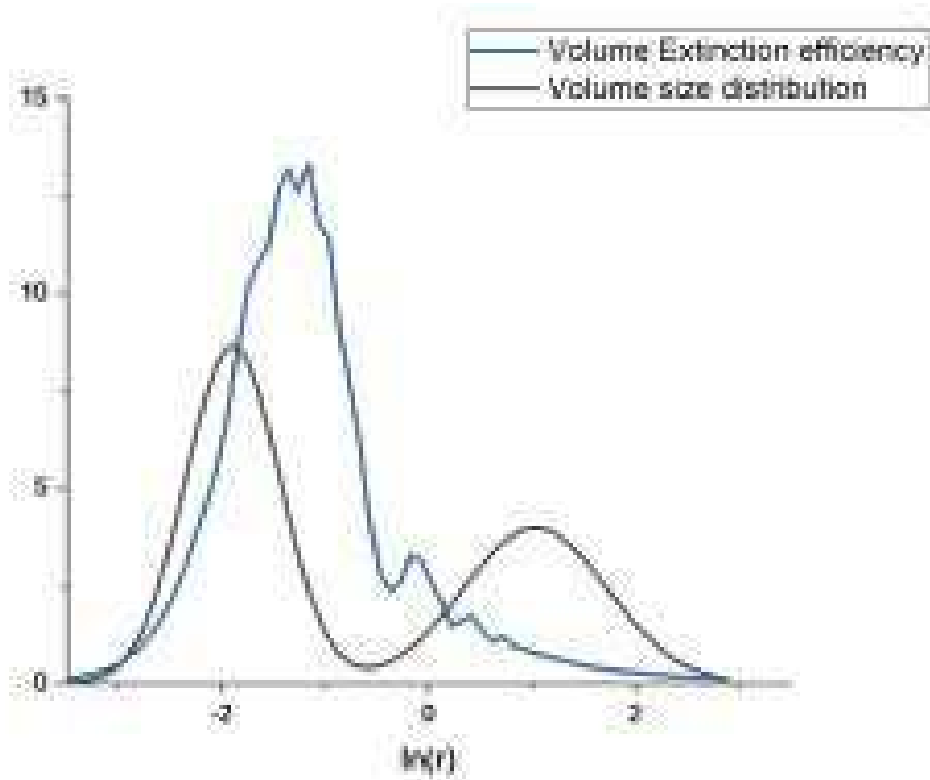
도면2



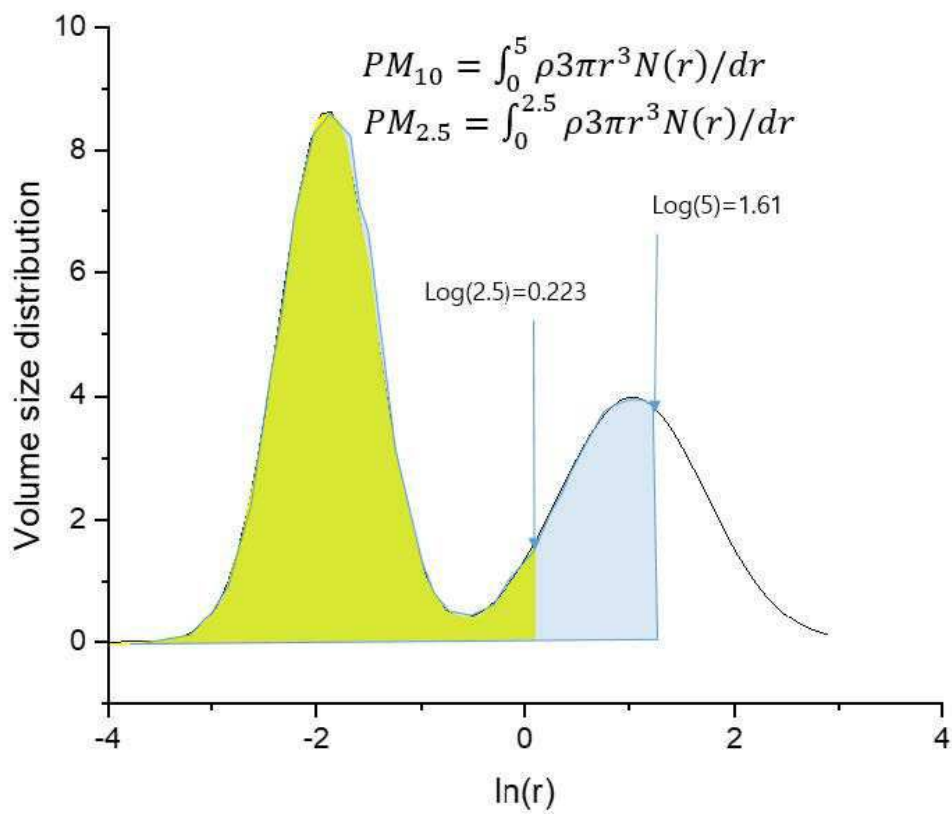
도면3



도면4



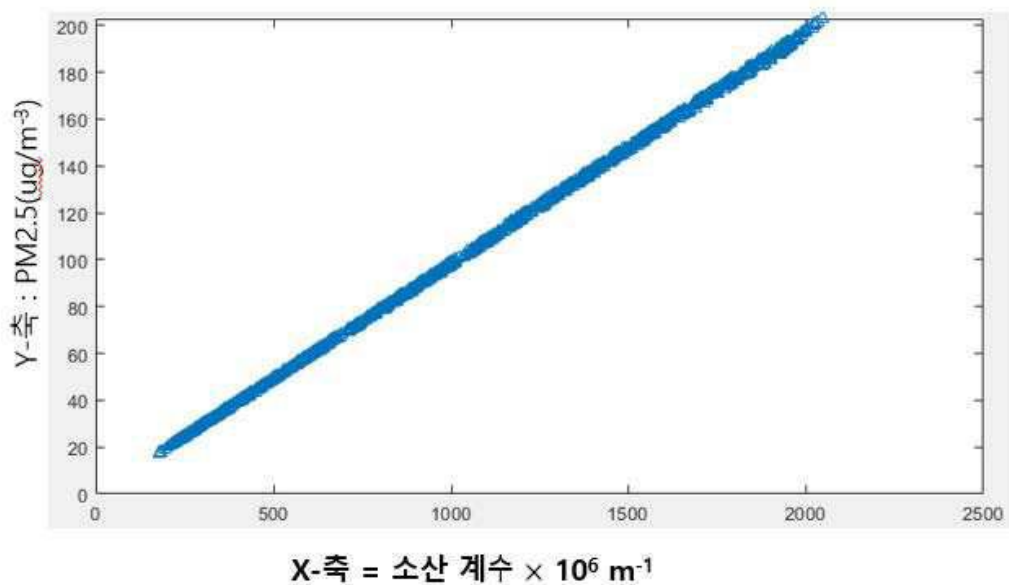
도면5



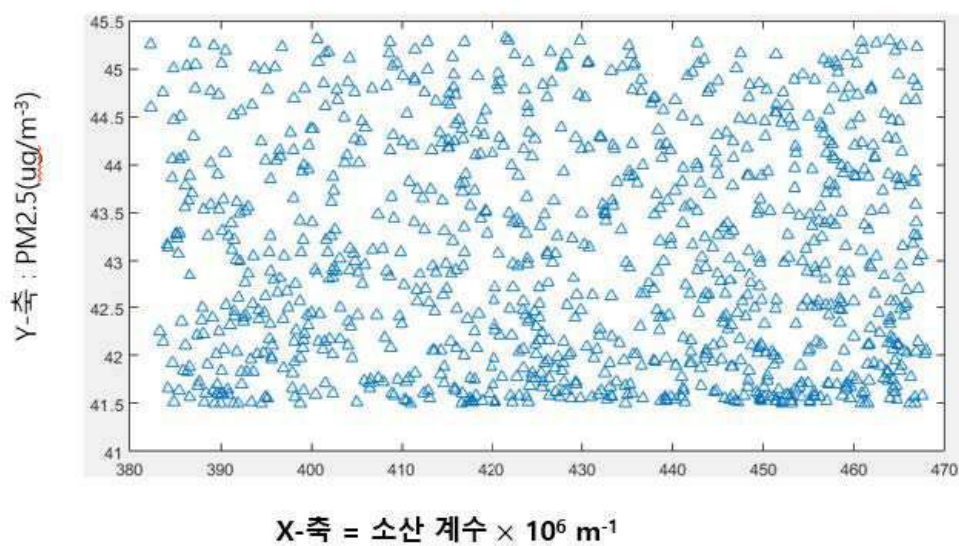
도면6

| Aerosol<br>Parameter      | Urban<br>Industrial | Biomass<br>Burning | Desert Dust<br>and Oceanic |
|---------------------------|---------------------|--------------------|----------------------------|
| $r_f^v$ ( $\mu\text{m}$ ) | 0.14–0.18           | 0.13–0.16          | 0.12–0.16                  |
| $r_c^v$ ( $\mu\text{m}$ ) | 2.7–3.2             | 3.2–3.7            | 1.9–2.7                    |
| $\ln \sigma_f$            | 0.38–0.46           | 0.4–0.47           | 0.4–0.53                   |
| $\ln \sigma_c$            | 0.6–0.8             | 0.7–0.8            | 0.6–0.7                    |
| $V_f/V_c$                 | 0.8–2.0             | 1.3–2.5            | 0.1–0.5                    |

도면7

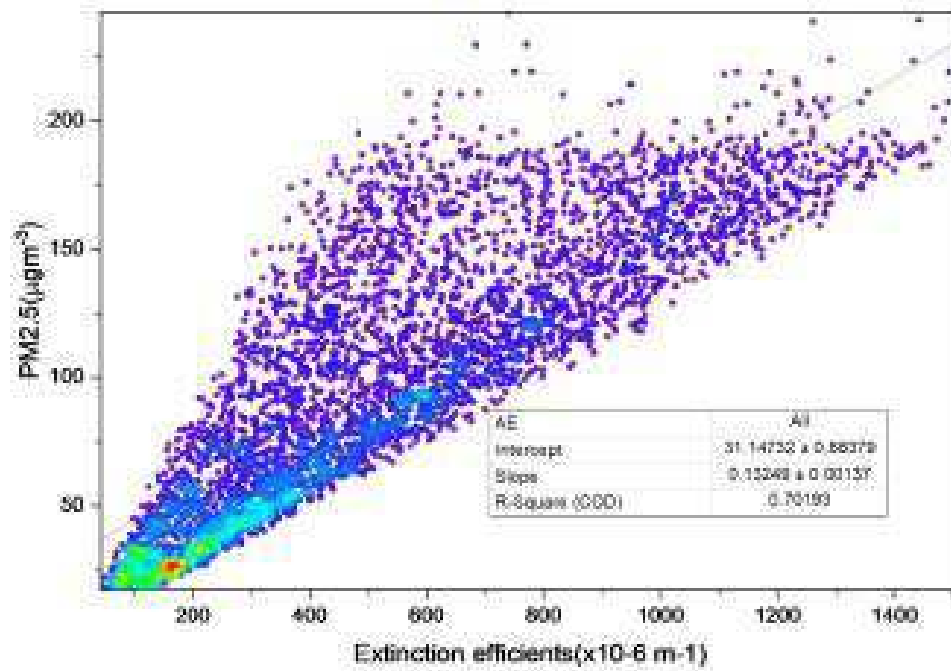


도면8

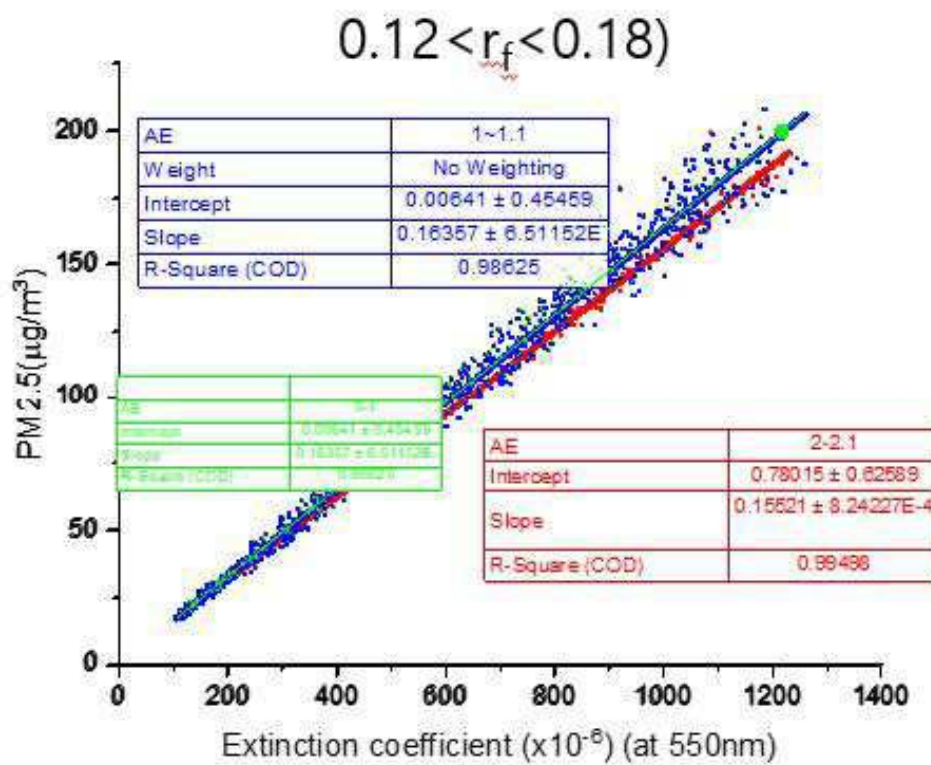




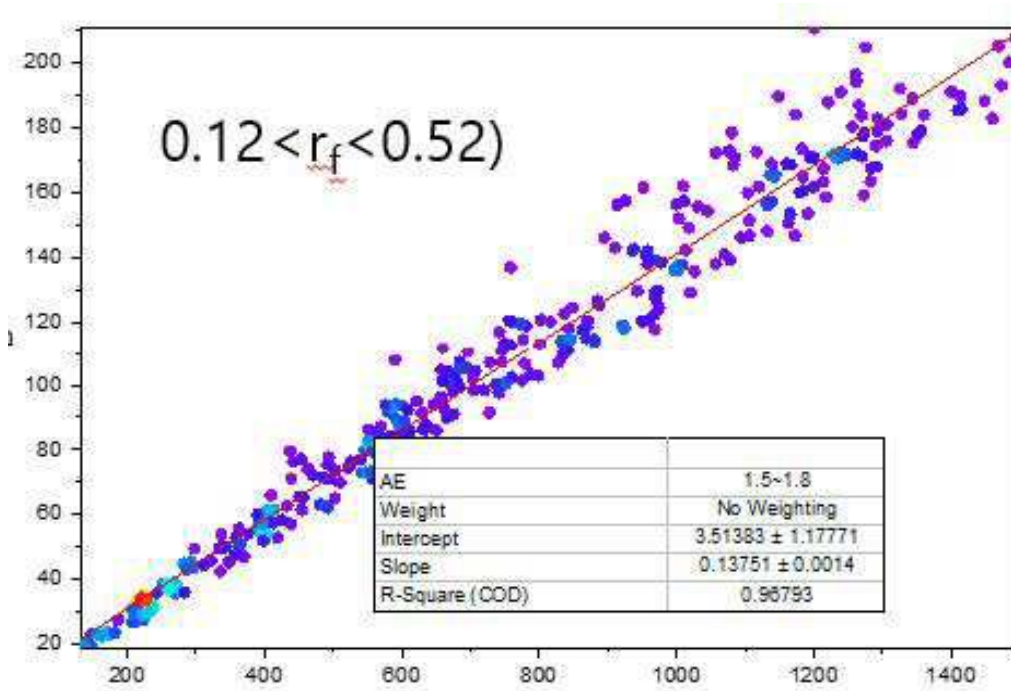
도면11



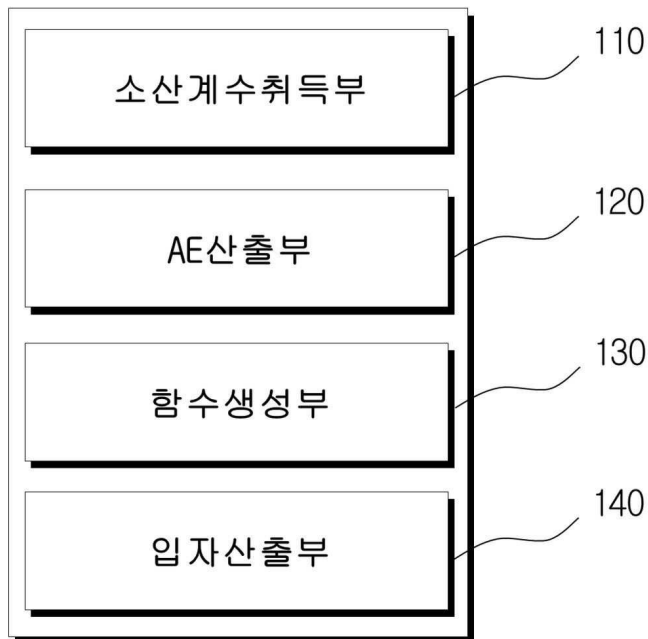
도면12



도면13



도면14



도면15

