



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년07월30일
(11) 등록번호 10-2139815
(24) 등록일자 2020년07월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 15/02 (2006.01) G01N 15/10 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 15/0205 (2013.01)
G01N 15/10 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-0050683
(22) 출원일자 2020년04월27일
심사청구일자 2020년04월27일
(56) 선행기술조사문헌
JP10010044 A*
(뒷면에 계속)

(73) 특허권자
한밭대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(72) 발명자
김덕현
[Redacted]
(74) 대리인
특허법인도담

전체 청구항 수 : 총 4 항

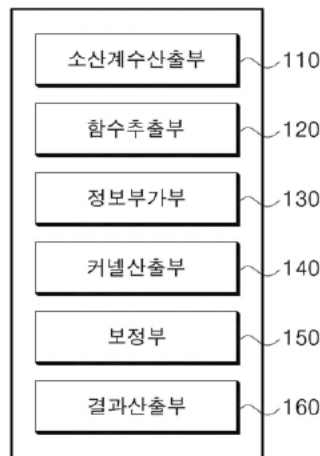
심사관 : 인치현

(54) 발명의 명칭 두 파장 이상의 소산계수를 이용한 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 방법 및 시스템

(57) 요약

본 발명은 PM10 및 PM2.5 측정값과 동시에 2개의 파장을 이용하거나 4개 이상의 다른 파장으로부터 소산계수를 이용하여 초미세먼지와 조대입자의 총량 및 크기정보를 모두 얻을 수 있는 두 파장 이상의 소산계수를 이용한 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 방법 및 시스템에 관한 것이다.

대표도 - 도9



(52) CPC특허분류
G01N 2015/1087 (2013.01)

(56) 선행기술조사문헌
JP2012243288 A*
KR101609740 B1
KR101156103 B1
JP03013846 A
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 201904230002

부처명 국토부

연구관리전문기관 국토교통과학기술진흥원

연구사업명 국가전략프로젝트(지원사업)

연구과제명 라이다 스캐닝을 이용한 미세먼지 모니터링 시스템 구축 및 실증

기여율 1/1

주관기관 부경대학교

연구기간 2019.10.18 ~ 2020.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

측정대기에 대하여 각기 다른 파장의 빛을 통해 얻은 복수의 소산계수를 산출하는 소산계수산출부(110);

측정대기 중에 존재하는 입자를 크기에 따라 정의한 조대입자와 초미세먼지의 총량과 크기를 소산계수에 대한 미지수로 적용하여 복수의 방정식을 도출하는 함수추출부(120);

상기 소산계수산출부(110)의 산출 소산계수가 4개 미만인 경우 4개 이상이 되도록 하는 추가적인 복수의 소산계수 또는 측정대기의 PM10 및 PM2.5정보 또는 미세먼지 상세 측정데이터 중 선택되는 추가정보를 수집하는 정보부가부(130);

산출된 소산계수를 포함하는 추가정보를 통해 상기 복수의 방정식의 해를 산출함으로써 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기값을 계산하는 결과산출부(160); 를 포함하고,

상기 측정대기의 PM10 및 PM2.5정보는, PM10과 PM10 및 PM2.5의 관계비를 활용하는 것을 특징으로 하는 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 시스템.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 복수의 방정식에서 각 미지수가 소산계수를 포함하는 추가정보에 대한 기여도를 산출하는 커널산출부(140);

미세먼지 상세측정 데이터를 초기값으로 하여 소산계수 및 추가정보에 따른 미지수의 해를 산출하며 수렴되는 값을 산출하는 보정부(150); 를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 시스템.

청구항 4

각기 다른 파장의 빛을 통해 각각 측정대기에 대한 복수의 소산계수를 산출하는 단계(S 110);

측정대기 중에 존재하는 입자를 크기에 따라 정의한 조대입자와 초미세먼지의 총량과 크기를 소산계수에 대한 미지수로 적용하여 복수의 방정식을 도출하는 단계(S 120);

산출된 소산계수가 4개 미만인 경우 4개 이상이 되도록 하는 추가적인 복수의 소산계수 또는 측정대기의 PM10 및 PM2.5정보 또는 미세먼지 상세 측정데이터 중 선택되는 추가정보를 수집하는 단계(S 130);

산출된 소산계수를 포함하는 추가정보를 통해 상기 복수의 방정식의 해를 산출함으로써 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기값을 계산하는 단계(S 140); 를 포함하고,

상기 측정대기의 PM10 및 PM2.5정보는, PM10과 PM10 및 PM2.5의 관계비를 활용하는 것을 특징으로 하는 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 방법.

청구항 5

삭제

청구항 6

제4항에 있어서,

상기 복수의 방정식에서 각 미지수가 소산계수를 포함하는 추가정보에 대한 기여도를 산출하는 단계(S 150);

미세먼지 상세측정 데이터를 초기값으로 하여 소산계수 및 추가정보에 따른 미지수의 해를 산출하며 수렴되는 값을 산출하는 단계(S 160); 를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출에 관한 것으로, PM10 및 PM2.5 측정값과 동시에 2개의 과정을 이용하거나 4개 이상의 다른 과정으로부터 소산계수를 이용하여 초미세먼지와 조대입자의 총량 및 크기 정보를 모두 얻을 수 있는 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근 들어 고농도 미세먼지의 발생이 빈번해지면서, 미세먼지 측정의 중요성이 부각되고 있음에도 미세먼지의 구체적인 크기 분포와 크기에 따른 정보는 여전히 부족한 실정이다.

[0003] 현재 측정되고 있는 미세먼지의 물리량은 PM10과 PM2.5로, 이는 각각 직경 10 μ m 이하 및 2.5 μ m 이하 크기의 미세먼지 총 질량 등을 측정하므로 실질적으로는 어떤 크기의 입자가 얼마나 있지는 정확히 알 수 없어 미세먼지의 인식과 실제 측정되는 미세먼지의 누적 총량에는 상당한 괴리가 있다.

[0004] 미세먼지는 입자의 크기가 작을수록 폐를 통하여 몸의 각 기관으로 쉽게 침투할 수 있고, 대기 중에 같은 질량이 존재하더라도 작은 입자가 큰 입자보다 단위 질량당 표면적이 커서 화학적 반응 속도도 높고 더 위험하므로, 단위부피당 질량(μ g/m³)보다는 미세먼지의 크기 분포가 더 중요하다. 즉 현재 측정되고 있는 미세먼지 질량과 함께 입자의 크기 정보도 매우 중요하므로 이를 측정할 정보를 제공할 필요가 있다.

[0005] 그러나 광학적으로 측정하는 OPC(Optical Particle Counter)의 경우 레이저의 출력을 높일 경우 0.25 μ m 이하까지 가능하나 사용되는 파장의 물리적 한계 때문에 0.25 μ m 이하의 입자는 측정이 불가능하므로 현실적으로는 0.3 μ m 이상의 크기만 측정하는 장비가 대부분이다.

[0006] 실제 다양한 분야에서 요구하고 또 중요한 역할을 하는 초미세먼지의 측정은 인위적으로 입자를 키워 그 크기를 측정하는 고가의 CPC(condensed particle counter)를 활용하나 이 경우 인위적으로 그 크기를 키우기 때문에 중간과정에서 오차가 발생할 소지가 있을 뿐 아니라 실시간 측정이 어렵다. 즉 이러한 기존 방법은 개개의 입자를 측정하기 때문에 많은 시간을 두고 측정해야만 입자의 통계적인 정보를 얻을 수 있다.

[0007] 근래 미세먼지에 대한 높은 관심으로 미세먼지 측정을 위한 다양한 장비들이 개발되고 있으나, 미세먼지의 기초 물리량인 미세먼지 크기분포는 제한적인 기술만으로 측정되고 있다.

[0008] 전 세계적으로 네트워크를 만들어 측정하고 있는 AERONET의 경우 입자의 크기를 측정하지만 전체 대기(지상에서 대기 끝까지)에 대한 평균값에 대한 정보를 제공하기 때문에 실제 지표면에 거주하는 사람들은 이러한 입자의 분포를 체감하기 어렵다.

[0009] 또한, 이는 너무 많은 파장에서의 소산 값과 다양한 정보(각도에 따른 산란: sky radiometer)를 동시에 요구하고 있어 복잡하며, 실제로 연중 약 70% 는 구름이 존재한 상태로 구름이 있는 날에는 측정이 어렵다. 또한, 대기 중에 존재하는 미세먼지는 중심입자 반경이 1.9~3.8 μ m 영역에 있는 조대입자와 중심입자 반경이 0.12~0.18 μ m 크기 영역에 있는 초미세먼지로 크게 두 부분에 존재하며, 현재 측정된 대부분의 측정값은 직경 10 μ m 혹은 2.5 μ m 이하를 측정하기 때문에 실제 유해한 크기인 0.1~0.2 μ m 근처의 초미세먼지도 총량에 흡산되어 초미세먼지의 구별이 어렵고 모호한 실정이다.

[0010] 라이다를 이용하는 경우 6개 이상의 파장에서 소산 및 후방산란계수를 얻기 위하여 복잡한 광학계를 구비하여야 하며, 또한 그 역산 과정이 복잡하여 로컬 최적 조건(Local minimum)에 그 값이 안착하는 경향도 보이고 있다. 이러한 이유 때문에 실제로 더 중요한 초미세먼지 정보가 오염되거나 다른 값으로 수렴하는 경향도 있다.

[0011] 게다가 미세먼지는 지역적, 시간적 변화가 심하기 때문에 빠른 속도로 넓은 지역을 측정할 필요가 있으며, 이러한 요소를 Mie 라이다와 같은 시스템을 통해 측정하도록 하나, 지금까지 라이다 장치는 미세먼지에 소산계수만 측정했을 뿐 미세먼지의 기초 물리량인 입자의 크기분포의 측정은 매우 복잡하고 어려운 과정을 거쳐야 한다. 또한, 여러 과정에서 얻은 정보를 비선형적으로 분석하면 라이다를 이용하고도 미세먼지분포를 얻을 수 있으나, 기존의 방법은 분포 폭도 동시에 고려하기 때문에 오히려 계산에서 오차가 발생할 여지가 있다.

[0012] 가우시안 분포를 하는 입자들의 그 폭은 소산계수에 미미하게 영향을 주는데, 역으로 소산계수로 미미하게 영향을 주는 분포 폭을 구하는 것은 태생적으로 오차 유발 인자를 포함하기 때문이다. 즉 작은 측정 오차로도 매우 다른 값의 분포 특성을 얻게 될 수 있으며, 이러한 효과는 실제 중요한 정보 추출에도 한계를 가져온다.

선행기술문헌

특허문헌

[0013] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 제10-1751642호(2017.06.21)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0014] 본 발명은 상기와 같은 문제를 해결하기 위하여 창출된 것으로, 본 발명의 목적은 소산계수를 측정하여 초미세먼지의 총량과 그 크기, 조대입자의 총량을 얻되 기존의 소산계수만 측정하던 방식에서 더 기본적인 입자의 정보를 추출함으로써 소산계수나 시정, 건강 유해도, 기상효과, 기후효과 등을 추출하는데 사용될 수 있는 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 방법 및 시스템을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0015] 상기와 같은 목적을 위해 본 발명에 따른 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 시스템은 측정대기에 대하여 각기 다른 파장의 빛을 통해 얻은 복수의 소산계수를 산출하는 소산계수산출부; 측정대기 중에 존재하는 입자를 크기에 따라 정의한 조대입자와 초미세먼지의 총량과 크기를 소산계수에 대한 미지수로 적용하여 복수의 방정식을 도출하는 함수추출부; 상기 소산계수산출부의 산출 소산계수가 4개 미만인 경우 4개 이상이 되도록 하는 추가적인 복수의 소산계수 또는 측정대기의 PM10 및 PM2.5정보 또는 미세먼지 상세 측정데이터 중 선택되는 추가정보를 수집하는 정보부가부; 산출된 소산계수를 포함하는 추가정보를 통해 상기 복수의 방정식의 해를 산출함으로써 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기값을 계산하는 결과산출부; 를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0016] 이때 상기 측정대기의 PM10 및 PM2.5정보는, PM10과 PM10 및 PM2.5의 관계비를 활용할 수 있다.

[0017] 또한, 상기 복수의 방정식에서 각 미지수가 소산계수를 포함하는 추가정보에 대한 기여도를 산출하는 커널산출부; 미세먼지 상세측정 데이터를 초기값으로 하여 회귀접근에 따른 소산계수 및 추가정보에 따른 미지수의 해를 산출하며 수렴되는 값을 산출하는 보정부; 를 더 포함할 수 있다.

[0018] 또한, 본 발명에 따른 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 방법은 각기 다른 파장의 빛을 통해 각각 측정대기에 대한 복수의 소산계수를 산출하는 단계; 측정대기 중에 존재하는 입자를 크기에 따라 정의한 조대입자와 초미세먼지의 총량과 크기를 소산계수에 대한 미지수로 적용하여 복수의 방정식을 도출하는 단계; 산출된 소산계수가 4개 미만인 경우 4개 이상이 되도록 하는 추가적인 복수의 소산계수 또는 측정대기의 PM10 및 PM2.5정보 또는 미세먼지 상세 측정데이터 중 선택되는 추가정보를 수집하는 단계; 산출된 소산계수를 포함하는 추가정보를 통해 상기 복수의 방정식의 해를 산출함으로써 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기값을 계산하는 단계; 를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0019] 이때 상기 측정대기의 PM10 및 PM2.5정보는, PM10과 PM10 및 PM2.5의 관계비를 활용할 수 있다.

[0020] 또한, 상기 복수의 방정식에서 각 미지수가 소산계수를 포함하는 추가정보에 대한 기여도를 산출하는 단계; 미세먼지 상세측정 데이터를 초기값으로 하여 회귀접근에 따른 소산계수 및 추가정보에 따른 미지수의 해를 산출하며 수렴되는 값을 산출하는 단계; 를 더 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0021] 본 발명에 따르면, 두 개의 파장과 기존의 측정 장치를 통하여 얻을 수 있는 PM10, PM2.5 혹은 4개 이상의 파장에서 얻은 소산계수들을 통하여 초미세먼지의 총량과 크기 그리고 조대입자의 총량을 구별하여 얻을 수 있다.
- [0022] 기존의 PM10이나 PM2.5 는 질량 단위를 나타내고 실제 건강이나 기후 등에 별로 영향을 미치지 못하는 조대입자 정보까지 포함하고 있었기 때문에 그 값이 지표로 활용이 불가능했으나, 본 발명에서는 실질적으로 국민 건강과 시정거리에 영향을 미치는 초미세먼지의 크기와 총량을 건강지표로 활용할 수 있다.
- [0023] 즉 종래방식에서는 PM10이나 PM2.5가 증가하더라도 조대입자가 증가해서 그 값이 증가했다면 이는 시정에 영향을 주지 못하고, 기상 변화에도 기여를 할 수 없으며, 태양광을 차단하고 지표면에서 복사된 적외선을 흡수 및 다시 산란하는 등 면적과 관련된 물리량을 산정하는데 어려움이 있었으나, 본 발명에서는 초미세먼지와 조대입자를 구별하여 총량, 크기 정보를 동시에 제공하는 것은 미세먼지 관련 분야에 새로운 지표로 활용될 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0024] 도 1은 산란효율과 면적 분포로 표현되는 소산 계수를 나타낸 그래프,
- 도 2는 부피 산란효율과 부피 분포로 표현되는 소산 계수를 나타낸 그래프,
- 도 3은 대기 입자의 부피, 면적 및 수 분포의 바이모달 분포 특성을 나타낸 그래프,
- 도 4는 지난 15년간 대한민국에서 측정된 PM10과 PM2.5 측정그래프,
- 도 5는 지난 15년간 대한민국에서 측정된 PM10과 PM2.5의 관계비 그래프,
- 도 6은 조대입자와 초미세입자의 크기, 분포 폭 그리고 총량에 따른 PM10, PM2.5의 상대적 비율을 나타낸 그래프,
- 도 7은 소산계수를 구하는 개념을 나타낸 그래프,
- 도 8은 조대입자와 초미세입자의 크기, 분포 폭 그리고 총량에 따른 PM10,PM2.5 그리고 소산계수의 변화를 나타낸 그래프,
- 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 시스템 블록도,
- 도 10은 본 발명의 실시예에 따른 방법의 순서도,
- 도 11은 초미세먼지 조대입자의 총량과 중심크기를 구하는 순서도 이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0025] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명 두 파장 이상의 소산계수를 이용한 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 방법 및 시스템을 구체적으로 설명한다.
- [0026] 본 발명에 따른 두 파장 이상의 소산계수를 이용한 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 시스템은 소산계수산출부(110)와, 함수추출부(120)와, 정보부가부(130)과, 커널산출부(140)와, 보정부(150)와, 결과산출부(160)로 이루어지며, 두 파장 이상의 소산계수를 이용한 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기 추출 방법은 상술한 시스템의 각 구성을 통해 이루어진다.
- [0027] 미세먼지 농도는 2002년 이후에 발표된 2016년까지 통계치를 보면 꾸준히 감소하는 것으로 보고되고 있다. 이는 미세먼지의 단위부피당 질량($\mu\text{g m}^{-3}$)을 측정을 수행한 것으로, 일반 국민이 느끼는 체감 미세먼지가 시정거리(Visual range)라는 것을 통해서 본다면 서로 다른 물리량을 측정하고 있었다는 뜻이다. 즉 시정거리는 소산 계수(cm^2m^{-3})의 역수 값으로 기존의 측정치인 PM10/PM2.5($\mu\text{g m}^{-3}$)와는 완전히 다른 물리량이다.
- [0028] 또한, 미세먼지의 유해도는 신체 내부에서 화학적 반응을 통하여 나타나며, 그 활성화는 그 단위 질량당 면적에 비례하기 때문에 환경/보건학적으로도 단위 부피에 존재하는 미세먼지의 질량보다 단위 부피에 존재하는 미세먼지의 총 면적이(cm^2m^{-3}) 더 중요한 물리량이다.
- [0029] 이 양이 바로 소산계수이며 이런 의미에서 소산계수를 측정하는 것은 매우 중요하며 다양한 방법으로 이를 측정

하고 있다.

- [0030] 국내에서는 2002년 이후 PM10과 PM2.5를 모든 지역에서 골고루 측정하고 있다. 그러나 PM2.5와 PM10은 그 구별이 조대 입자 영역에서 모호한 경계영역에 겹쳐있으며 초미세먼지 추출이 불가능하며 또한 적분값(특정 크기 이하의 미세먼지를 모두 더한 것)을 측정하기 때문에 크기에 따른 초미세먼지의 양은 미지수로 남아 있게 된다. 즉 PM 2.5를 초미세먼지라 칭하고 있으나, 엄격히 표현한다면 문제가 있는 표현이며, 0.3 μ m 이하에 있는 초미세먼지는 두 값에 모두 포함되어 실질적으로 구분이 되지 않고 있다.
- [0031] 대기 중에 존재하는 입자의 크기 측정을 위한 다른 많은 연구가 시행되었으며 대부분 바이모달 분포를 하고 있다. 전형적인 바이모달 분포는 초미세먼지는 반경 0.12~0.18 μ m 사이에서 그 개수가 최댓값을 가지고 조대입자는 반경 1.9~3.7 μ m에서 그 개수가 최댓값을 갖는 것으로 알려졌다. 따라서 대기 중에 존재하는 미세먼지는 초미세먼지와 조대입자 크기로 구성된 입자의 크기에 대하여 로그를 취한 것에서 두 개의 봉우리를 가지는(Bimodal mode) 가우시안 크기 분포를 하게 된다.
- [0032] 그러므로 입자의 분포를 결정하는 것은 두 개의 가우시안 분포를 하는 입자의 크기(부피 혹은 면적)함수가 된다. 가우시안 함수는 3개의 매개변수로 표현이 되는데, 바로 입자의 총수량(부피의 경우 총 부피, 면적의 경우 총 면적)과 중심 크기의 입자크기, 그리고 가우시안 분포의 폭을 결정하는 분포의 폭이다. 그러므로 총 6개의 변수를 측정하면 입자의 크기분포를 얻을 수 있다.
- [0033] 즉 전체 미세먼지의 크기 분포를 결정하는 것은 총량(V)에 해당하는 값과 분포 폭(σ)에 해당하는 그리고 중심 크기에(r) 해당하는 값으로 정할 수 있는데, 두 개의 봉우리로 이루어져 있으므로 총 6개의 값을 통해 완전하게 입자의 정보를 완전하게 알 수 있다.
- [0034] 6개의 물리량 중에서 분포 폭에 해당하는 두 값은(σ_c , σ_f : f는 초미세먼지(fine particle), c는 조대입자(Coarse particle)) 시정 거리나, PM2.5나 PM10의 값에 거의 영향을 주지 못하며, 조대 입자의 중심크기(r_c)도 가시광선의 대부분의 파장 영역에서 소산계수에 영향을 미치지 못한다. 왜냐하면 입자가 크면 단위부피당 면적이 적어지나 동시에 큰 입자에서는 부피 소산 효율이 낮아지기 때문인데, 그 이유는 후술하도록 한다.
- [0035] 이처럼 미세먼지의 크기 정보는 6가지의 정보로 완전하게 기술되기 때문에 6가지 변수를 모두 측정하는 것이 원칙이나, 기존 연구를 통하여 잘 알려진 바와 같이 각 값은 유한한 범위에 항상 존재하고 또 특정 정보는 불필요하기 때문에 (오차를 유발하는) 복잡한 비선형적 수학적 연산과정 없이 중요한 변수만을 더 추출하여 제공하는 것도 의미 있는 일이다.
- [0036] 실제로 6개의 모든 변수를 추출하는 것은 역산(Inversion)과정에서 많은 오차를 유발할 수 있다. 그러므로 실제 국민 건강과 기후/기상 등 환경에 중요한 변수만을 추출하는 것은 매우 중요한 일이다.
- [0037] 그러므로 전체 6개의 값(V_c , V_f , r_c , r_f , σ_c , σ_f) 중에서 시정에 중요한 변수로 작용하는 것은 조대 입자의 총량(V_c), 초미세입자의 총량(V_f), 초미세먼지의 크기(r_f)만 시정에 영향을 주는 요소가 되며, 조대입자는 양이 우월하게 많은 경우에만 미세하게 영향을 준다.
- [0038] 시정거리의 정의는 550nm 파장에서 소산계수의 역수에 3을 곱한 값으로 결정한다. 그러므로 시정 값은 소산계수의 함수이고, 소산계수는 그 값에 기여한 요소만으로 결정되며, 역으로 시정 값을 알면 즉 소산계수에 기여하는 조대 입자의 총량(V_c), 초미세입자의 총량(V_f), 초미세먼지의 크기(r_f), 조대입자의 미세먼지의 크기(r_c)는 소산계수를 얻음으로써 역산(Inversion)이 가능하다.
- [0039] 4개의 미지수(V_c , V_f , r_f , r_c)를 구하기 위하여 최소 4개의 파장에서 소산계수를 얻거나, 두 개의 파장에서 소산계수를 얻고 나머지 하나의 정보는 기존 측정망으로 얻어지는 PM10과 PM2,5 값을 이용하면 원하는 값(V_c , V_f , r_f , r_c)을 얻을 수 있다.
- [0040] 즉 본 발명은 4개 이상의 파장에서 얻은 소산계수 혹은 2개의 파장과 PM10 및 PM2.5정보를 이용하여 초미세먼지와 조대입자의 크기 및 총량을 얻는 것이 핵심이며, 이러한 입자 정보를 추출하는 방법은 지금까지 방법에 비하여 간단하고, 직감적이며, 많은 파장에서의 산란 신호 정보가 필요하지 않다. 더 중요한 것은 실제 건강/환경/기후/기상에서 필요한 초미세먼지의 정보를 더 정확하게 제공할 수 있다는 것이다.
- [0042] 이처럼 4개 이상의 소산계수를 이용하거나, 2개 및 미세먼지의 총량(PM10/PM2.5) 데이터를 이용하여 실제 대기

환경에서 중요한 변수 4개를 얻기 위하여 본 발명에서는 다음의 문제들을 해결하게 된다.

- [0043] 첫 번째 4개의 소산계수 값으로 미세먼지의 크기 분포를 결정하는 6개의 미지수를 얻을 수 없으므로 4개의 소산계수 값에 영향을 주는 주요 변수만 구할 수 있다. 소산계수에 영향을 주는 핵심 변수가 어떤 것인지 알 수 있어야 한다.
- [0044] 두 번째 일반적인 대기 상태에서 6개의 미지 변수가 어떤 범위에서 변화하는가를 알아야 하며, 6개의 미지수가 그 범위 안에 있다고 가정하고 미지수를 변화시키면서 소산계수가 어떻게 변하는지를 알 수 있어야 하며, 소산계수를 심하게 변화시키는 미지수를 주요 핵심 미지수로 정할 수 있어야 한다.
- [0045] 세 번째 두 개의 파장에서 소산계수와 PM10과 PM2.5를 이용하여 미세먼지의 분포를 알고자 하는 경우에도 같은 방법으로 두 개의 소산계수와 PM2.5와 PM10에 영향을 줄 수 있는 미지수가 몇 개인지 그리고 어떤 미지수가 두 개의 소산계수와 PM2.5와 PM10에 영향을 주지 않는지를 찾을 수 있어야 한다. 이로부터 영향을 주는 변수를 역으로 찾을 수 있다.
- [0046] 네 번째, 앞의 세 번째 조건을 만족하는 미지수는 우리가 찾고자 하는 주요(초미세먼지의 총량, 조대 입자의 총량, 초미세먼지의 크기, 조대 입자의 크기) 미지수여야 하며, 그렇지 않을 경우 불필요한 정보이므로 다른 측정값 예를 들어 다른 파장에서의 소산계수 혹은 PM10 혹은 PM2.5가 아닌 다른 PMxx 값 같은 것이 이용될 수 있다.
- [0047] 다섯 번째 4개의 미지수가 정해지고 4가지 이상의 측정값이 정해져야 한다. 예를 들어 4개의 소산계수 혹은 2개의 소산계수와 PM10과 PM2.5의 측정값으로 연립 방정식을 구성할 수 있어야 한다. 만약 방정식은 4개 이상이고 미지수는 4개라면, 더 좋은 해를 구할 수 있다.
- [0048] 여섯 번째 그 방정식의 해는 유일하게 하나로 존재하여야 하며, 나머지 미지수는 4개를 제외한 다른 두 미지수는 실제 환경이나 보건, 기상, 기후 등에 중요한 변수에 영향을 주지 않기 때문에 그 미지수는 찾을 필요가 없으며, 이를 구할 필요 없이 제외를 할 수 있다. 6개의 미지수 중에서 4개의 미지수만 중요한 영향을 준다면 4개의 미지수만 결정하면 된다. 즉 4개의 미지수가 유일하게 정의되지 않으면, 측정된 4개 이상의 측정값은 다른 것에서 얻을 수 있는 것을 의미하므로 다른 물리량을 측정값으로 해야 한다. 예를 들어 2 대 파장이 너무 가까이 있거나, 입자의 분포가 두 파장에서 항상 같은 소산계수를 나타내거나, 어느 파장의 소산계수가 미세먼지의 특성에 상관없이 항상 다른 파장의 소산계수 값의 실수 배라면 다른 두 파장에서 얻은 정보는 같은 것이 되기 때문에 다른 파장을 선택해야 한다.
- [0050] 초미세먼지의 총량, 초미세먼지의 크기, 조대입자의 크기, 조대입자의 총량을 각각 얻기 위하여 위에서 언급한 문제를 순서대로 살펴보면 다음과 같다.
- [0051] 가) 4개의 측정값에 영향을 주는, 미지의 핵심 변수가 어떤 것인지 알 수 있어야 한다. 각 6개의 미지 변수의 가변 범위에서 그 변수의 상대적인 변수 변량에 따라 측정변량이 상대적으로 얼마인가를 계산할 수 있어야 한다. 예를 들어 초미세먼지가 10% 변하면 소산계수가 몇 프로 변하는지 알 수 있으며, 이 값이 클수록 영향력이 크다고 판단할 수 있다.
- [0052] 나) 6개의 미지수가 실제 어떤 범위를 가지고 있는지를 다른 연구 결과를 통하여 찾고, 그 미지수가 소산계수와 PM10과 PM2.5에 어떤 영향을 주는지 이론적으로 계산한다. 예를 들어 초미세먼지의 크기는 PM10이나 PM2.5에 영향을 주지 않는다. 즉 초미세먼지의 크기가 PM10이나 PM2.5에 영향을 주지 않는다는 것을 이론적으로 밝힐 수 있어야 한다.
- [0053] 다) 어떤 파장에서 얻은 측정값(소산계수)이 위의 4가지 미지수 값을 얻는데 가장 유리한가? 그리고 그 파장에서의 측정값(소산계수)이 PM10 혹은 PM2.5와는 독립적인(수학적으로) 다른 측정값인가? 그리고 4개의 미지수(초미세먼지의 총량, 조대 입자의 총량, 초미세먼지의 크기, 조대 입자의 크기)가 어떤 파장에서의 측정값(소산계수)과 얼마나 상관관계가 있는가를 알아야 한다.
- [0054] 라) 4개의 미지수가 정해지면, 4가지 이상의 측정값이 정해져야 한다. 예를 들어 원하는 미지수가 4개가 되면 그에 따라 방정식의 수도 4개 이상이 되어야 한다. 본 발명은 PM10과 PM2.5을 측정치로 활용할 예정이다. 그러므로 미지수가 2개이면 최소 2개의 파장에서 소산계수를 얻어야 한다. 그리고 이러한 소산계수와 PM10, PM2.5로 얻은 방정식은 선형방정식이 아니어도 상관없다.
- [0055] 마) 그러나 그 방정식의 해는 유일하게 하나로 존재하여야 하며 또한 측정치의 작은 오차에 민감하지 않아야 한다. 즉 너무 비슷한 파장에서 소산계수를 얻으면 비록 다른 파장에서 얻은 소산계수라 할지라도 같은 비슷한 측정치를 사용한 꼴이 되어 해는 수학적으로 유일하지만 작은 오차에도 그 해는 크게 다른 값으로 추정될 수

있다. 예를 들어 두 파장이 너무 가까이 있거나, 입자의 분포가 두 파장에서 항상 같은 소산계수를 나타내거나, 어느 특정 파장의 소산계수가 미세면지의 특성에 상관없이 항상 특정 다른 파장의 소산계수 값의 실수 배라면 두 파장은 사용이 불가능하다. 즉 다른 파장을 선택해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 원하는 미지수에 대한 측정값의 변위나 의존도를 고려한다.

[0057] 본 발명에서는 먼저 소산계수산출부(110)를 통해 측정대기에 대하여 각기 다른 파장의 빛을 통해 얻은 복수의 소산계수를 산출하는 단계(S 110)이 진행된다.

[0058] 소산계수의 정의를 구체적으로 살펴보면, 개념적으로 소산계수는 빛이 진행하면서 얼마나 원래 진행방향에서 벗어나는지를 나타낸다. 즉 대기 중으로 진행하는 빛이 작은 미세면지를 만나서 산란이 발생하는데, 그 산란의 정도가 심한 정도를 소산계수로 나타내며, 빛이 진행하는 공간에 있는 입자의 수와도 관계되며, 총 질량과도 관계되지만 물리적으로는 빛이 진행하는 면에 존재하는 총 입자의 면적에 관계된다. 물론 입자가 많을수록, 질량이 클수록 단위 부피에 존재하는 미세면지의 총 소산은 많아 지기 때문에 소산계수가 크다고 할 수 있다. 실제 빛이 산란되어 제거되는 양은 이러한 소산계수와 거리에도 관계되는데 R만큼 진행한 빛의 세기는 다음의 [수학식 1]로 표시된다.

[0059] [수학식 1]

$$I(R) = I_0 e^{-\alpha R}$$

[0060]

[0061] 거리 0인 지점에서 I_0 인 빛의 세기가 거리 R에서 $I(R)$ 이 되는데 거리에 따라 지수함수적으로 감소하고 그 지수는 차원이 없으므로, α 의 단위는 거리 R의 역수이며, 이는 단위부피에 존재하는 입자의 총면적($\text{cm}^2 \text{m}^{-3}$)과 같은 뜻의 의미를 갖는다.

[0062] 그러나 빛의 파장대비 그 크기가 작은 입자는 산란 효율이 줄어들고 큰 입자는 마치 그림자가 입자의 크기와 같은 크기로 생기듯이 일정한 값(크기)을 지닌다.

[0063] 도 1은 산란효율과 면적 분포로 표현되는 소산 계수를 나타낸 그래프로서, 소산(산란) 효율은 파장대비 입자의 크기($x = \frac{2\pi r}{\lambda}$, r = 입자의 반지름, λ = 빛의 파장)에 따라서도 달라진다. 그 효율을 $Q(x)$ 라 한다면 그 모양은 도 1과 같다.

[0064] 그러므로 크기가 x 인 입자의 단위부피당 수밀도가 $N(r)$ 이라면 이 크기의 입자에 의한 빛의 소산은 [수학식 2] 처럼 표현이 가능하다.

[0065] [수학식 2]

$$\alpha(r, \lambda) = Q\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right) \pi r^2 N(r)$$

[0066]

[0067] 크기에 따라 다양한 크기의 입자가 다양한 수밀도로 존재한다면 모든 것을 더한 것과 같으므로 [수학식 3]과 같이 표현 가능하다.

[0068] [수학식 3]

$$\alpha(\lambda) = \int_0^\infty Q(x) \pi r^2 N(r) dr$$

[0069]

[0070] 대기 중에 존재하는 입자의 크기 분포는 로그 스케일에서 가우시안 분포하고, 두 개의 봉우리를 지니며, 일반적으로 수밀도 분포는 $N(r)$, 입자의 크기에 따른 면적은 $S(r) = \pi r^2 N(r)$ 로, 부피 분포는 $V(r) = 4\pi r^3 / 3 N(r)$ 로 각각 표현된다.

[0071] 각 표현 중에서 일반적으로 부피분포를 기준으로 전문가들은 생각을 하는데, 부피분포가 두 개의 봉우리를 가진 바이모달(Bimodal) 분포 특성을 지니면, 면적이거나 수 밀도 분포도 위의 정의에 의하면 로그 크기분포에 역시 가우시안 분포를 한다. 왜냐하면, r 은 $e^{\log(r)}$ 을 의미하고, $r^2 = e^{2\log(r)}$ 을 각각 의미하기 때문이다. 그러므로 입자의 부피 분포도 [수학식 4]와 같이 쓸 수 있고, 마찬가지로 [수학식 3]도 부피 분포를 이용하여 표현이 가능

하며, 소산 효율에 해당하는 효율 $Q(x)$ 는 $Q_v(x) = 3^{Q(r)}/4r$ 로 정의되는 부피산란효율로 바꾸어 나타낼 수 있다.

[0072] 크기분포는 초미세먼지와 조대입자로 구성된 두 개의 가우시안 함수이므로 [수학식 4]와 같이 표현되고, 그리고 [수학식 3]을 입자 수 밀도 크기분포 대신에 부피 크기분포로 다시 쓰면 [수학식 5]와 같이 된다.

[0073] [수학식 4]

$$V(r) = V_f(r) + V_c(r) = \sum_{k=f,c} \frac{V_k}{\sqrt{2\pi} \log(\sigma_k)} e^{-\frac{(\log(r) - \log(r_k))^2}{2(\log(\sigma_k))^2}}$$

$$= \frac{V_f}{\sqrt{2\pi} \log(\sigma_f)} e^{-\frac{(\log(r) - \log(r_f))^2}{2(\log(\sigma_f))^2}} + \frac{V_c}{\sqrt{2\pi} \log(\sigma_c)} e^{-\frac{(\log(r) - \log(r_c))^2}{2(\log(\sigma_c))^2}}$$

[0074] 도 2는 부피 산란효율과 부피 분포로 표현되는 소산 계수를 나타낸 그래프로서, [수학식 4] $V(r)$ 를 이용하여 [수학식 3]을 나타낸 것이다. 도 3은 대기 입자의 부피, 면적 및 수 분포의 바이모달 분포 특성을 나타낸 그래프로서, 수 분포 $N(r)$, 면적 분포 $S(r)$, 그리고 부피 분포 $V(r)$ 을 나타낸 것이다. 그래프에서 두 개의 봉우리를 관찰할 수 있으며, 두 봉우리 각각은 초미세먼지와 조대입자를 나타낸다.

[0076] 도 3에서 면적 분포는 부피 분포와 다른 모양을 지닌다는 것을 알 수 있으나, 역시 두 개의 봉우리로 구성되며, 봉우리의 최고점이 약간 작은 쪽으로 (왼쪽)으로 이동한 것으로 보이며, 작은 것의 면적이 훨씬 큰 것으로 나타난다.

[0077] 도 3에서 내부 그림은 수 농도를 나타낸 것으로 역시 면적 분포보다 더 작은 쪽으로 봉우리가 이동했으며, 부피나 면적보다 훨씬 많은 수의 미세먼지가 작은 입자 쪽으로 몰려있다는 것을 알 수 있다. 도 1 내지 3은 같은 분포를 면적으로 볼 것인가? 부피로 볼 것인가? 그 개수로 볼 것인가? 에 따라 그 분포 모양이 달라진다는 것을 보여준다.

[0078] 본 발명에서 함수추출부(120)는 측정대기 중에 존재하는 입자를 크기에 따라 정의한 조대입자와 초미세먼지의 총량과 크기를 소산계수에 대한 미지수로 적용하여 복수의 방정식을 도출하는 단계(S 120)를 수행한다.

[0079] 이때 상기 측정대기의 PM10 및 PM2.5정보는, PM10과 PM10 및 PM2.5의 관계비를 활용할 수 있으며, 실질적으로 앞서 언급한 바와 같이 본 발명은 4개 이상의 과장에서 소산계수를 측정하여 미세먼지의 상세정보(초미세먼지 총량, 초미세먼지의 중심 크기, 조대입자의 총량, 조대 입자)를 얻거나, 두 개 이상의 소산계수를 측정하고 동시에 및 PM10과 PM2.5의 정보를 활용하여 미세먼지의 상세정보(초미세먼지 총량, 초미세먼지의 중심 크기, 조대입자의 총량, 조대 입자)를 얻을 수 있다.

[0080] 이에 따라, 상기 정보부가부(130)는 상기 소산계수산출부(110)의 산출 소산계수가 4개 미만인 경우 4개 이상이 되도록 하는 추가적인 복수의 소산계수 또는 측정대기의 PM10 및 PM2.5정보 또는 미세먼지 상세 측정데이터 중 선택되는 추가정보를 수집하는 단계(S 130)를 수행한다.

[0081] 또한, 상기 결과산출부(160)에서는 산출된 소산계수를 포함하는 추가정보를 통해 상기 복수의 방정식의 해를 산출함으로써 초미세먼지 및 조대입자 총량 및 크기값을 계산하는 단계(S 140)을 수행하게 된다.

[0082] 이러한 미세먼지의 분포를 구성하는 대기에서 PM10과 PM2.5는 각각 다음과 같이 [수학식 5]로 정의된다.

[0083] [수학식 5]

$$PM10(2.5) = \int_0^{2.5-10(2.5-2.5)} \frac{4}{3} \rho N(r) \pi r^3 dr = \int_0^{2.5-10(2.5-2.5)} \rho V(r) dr$$

[0084] 즉 PM10과 PM 2.5는 크기는 작은 것에서 부피 분포를 적분한 것과 관계가 있으며, 초미세먼지는 PM10과 PM2.5에 모두 포함되어 덧셈(적분)이 이루어지고 있으나, 조대입자는 PM2.5에 일부분 그리고 PM10에 거의 모두 다 포함된다고 생각할 수 있다.

[0086] 구체적으로 이러한 경향을 알아보기 위하여 일반 대기 상태에서 대기의 분포를 결정하는 6개의 미지수의 범위를 살펴보면 [표 1]과 같다. 이는 세계의 과학자들에 의해 측정된 미세먼지 상세측정 데이터로서 후술되는 바와

같이 미지수의 초기값으로 활용될 수 있다.

[0087] 물론 고밀도 미세먼지가 발생하거나, 황사가 발생하거나, 높은 습도 상태로 오랫동안 대기가 정체한다면 본 영역에서 벗어나서 다른 분포를 할 수 있다.

표 1

[0088]

Aerosol Parameter	Urban Industrial	Biomass Burning	Desert Dust and Oceanic
$r_{m1}(\mu m)$	0.14 ~ 0.18	0.13 ~ 0.16	0.12 ~ 0.16
$r_{m2}(\mu m)$	2.70 ~ 3.20	3.20 ~ 3.70	1.90 ~ 2.70
$\ln \sigma_1$	0.38 ~ 0.46	0.40 ~ 0.47	0.40 ~ 0.53
$\ln \sigma_2$	0.60 ~ 0.80	0.70 ~ 0.80	0.60 ~ 0.70
V_1/V_2	0.80 ~ 2.00	1.30 ~ 2.50	0.10 ~ 0.50
m_r	1.40 ~ 1.47	1.47 ~ 1.52	1.36 ~ 1.56
m_i	0.003 ~ 0.015	0.01 ~ 0.02	0.0015 ~ 0.003

[0089] 도면에서 알 수 있듯이 초미세먼지의 크기는 모든 종류의 미세먼지를 고려하더라도 0.12~0.18 μm , 조대입자의 최대 분포를 하는 중심 크기는 1.9~3.7 μm 그리고 각각의 입자의 최대 부피 비도 알려졌다. 즉 자연상태의 미세먼지는 그 범위가 제한적이며, 우리가 얻을 수 있는 값이 제한적이란 의미이다.

[0090] 이러한 제한적인 분포에서 PM10과 PM2.5의 범위는 제한이 없지만 그 비(ratio)는 제한적인 값을 지닌다. 실제 국내에서 15년간 측정된 PM10과 PM2.5의 경우도 매우 제한적인 범위에 있다.

[0091] 도 4는 지난 15년간 대한민국에서 측정된 PM10과 PM2.5 측정그래프, 도 5는 지난 15년간 대한민국에서 측정된 PM10과 PM2.5의 관계비 그래프로써, 국내에서 15년간 측정된 미세먼지의 PM10 및 PM2.5(도 4)와 그 관계비 ($R_{F/C}=PM10/(PM10-PM2.5)$)(도 5)를 보여준다.

[0092] 도면에서 알 수 있듯이 PM10과 PM2.5 는 지속적으로 감소하고 있지만 관계비($R_{F/C}$) 는 지속적으로 증가하고 있다. 그러므로 PM10과 PM2.5 및 그 관계비($R_{F/C}$)는 [수학식 6]과 같이 표현이 가능하다.

[0093] [수학식 6]

[0094]

[0095] [수학식 6]에서 $F(r_c, \sigma_c)$ 는 조대입자 중에서 PM10에 포함되지 않은 큰 입자를 의미하며, $E(r_c, \sigma_c)$ 는 조대입자 중에서 직경이 2.5 ~10 μm 사이의 입자가 조대입자에서 차지하는 비율을 나타낸다. 각각의 비율(F, E)은 조대입자의 중심크기와 분포를 결정하는 $\log(\sigma_c)$ 와 r_c 의 함수이다. [수학식 6]의 첫 번째 식에서 PM10은 근사적으로 총량을 의미하고 있으나, 반지름이 5 μm 보다 큰 입자도 다수 존재하기 때문에 PM10이 총량을 의미하는 것은 아니다. 그러므로 PM10과 PM2.5를 해석함에 있어 주의를 요한다.

[0096] [수학식 6]의 두 번째 식은 조대입자가 PM2.5에 기여하는 정도를 나타내는 것을 나타낸 식으로 $E(r_c, \sigma_c)$, $F(r_c, \sigma_c)$ 는 기여율을 나타내는 것으로 비율을 나타내므로 1보다 작은 값이다.

[0097] PM2.5를 초미세먼지의 분포를 계산하는 잣대로(측정치 값으로) 사용할 수 있으나, 이 값은 실제로 PM10과 유사한 거동을 한다. 즉 PM10이 증가하면 일반적으로 PM2.5도 증가하는 경향을 보인다. 그러므로 특별히 초미세먼지의 양만을 증가/감소하는 경우를 알고 싶다면 전체 미세먼지에서 초미세먼지 총량을 뺀 값 PM10-PM2.5 즉 조대

입자의 그것과 그리고 초미세먼지의 기여가 상대적으로 큰 PM2.5의 비 값으로 판단하는 것이 좋다. 즉 위에서 정의한 관계비를 이용하는 것이 좋다.

[0098] [수학식 7]은 관계비를 $E(r_c, \sigma_c)$, $F(r_c, \sigma_c)$ 값과 초미세먼지 및 조대입자의 총량으로 다시 표시한 것이다.

[0099] [수학식 7]

$$R_{F/C} = \frac{PM2.5}{PM10 - PM2.5} = \frac{V_f + (1 - E(r_c, \sigma_c) - F(r_c, \sigma_c))V_c}{V_f + (1 - F(r_c, \sigma_c))V_c - [V_f - (1 - F(r_c, \sigma_c) - E(r_c, \sigma_c))V_c]}$$

$$= \frac{\frac{V_f}{V_c} + (1 - E(r_c, \sigma_c) - F(r_c, \sigma_c))}{E(r_c, \sigma_c)}$$

[0100]

[0101] 즉 관계비는 실측을 통하여 도 5와 같이 얻을 수 있는 양으로 수학식에서 좌변은 측정값이고 우변은 4개의 미지수 $(r_c, \sigma_c, V_c, V_f)$ 로 이루어져 있다. 도 4 및 도 5를 통하여 얻을 수 있는 정보는 제한적이다. 즉 어떤 입자가 많 아지고 감소했는지 알 수 없다.

[0103] 도 6은 조대입자와 초미세입자의 크기, 분포 폭 그리고 총량에 따른 PM10, PM2.5의 상대적 비율을 나타낸 그래 프로, [수학식 7]과 같이 정의되는 관계비가 6가지 요소에서 어떻게 변하는지를 도 4 및 도 5의 대기분포에서 계산한 것이다. 도면에서 알 수 있듯이 관계비는 V_f, V_c, r_c 의 3 미지수에 대하여 민감한 함수특성을 보이나, σ_c 에 대해서는 실제 가능한 대기 상태에서 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그러므로 [수학식 7]은 실제로 3개의 미지수로 이루어진 [수학식 8]과 같이 표현할 수 있다.

[0104] [수학식 8]

$$R_{F/C} = \frac{\frac{V_f}{V_c} + 1 - E(r_c) - F(r_c)}{E(r_c)}$$

[0105]

[0106] 그러므로 PM10과 PM2.5는 조대입자의 크기와 조대입자 및 초미세입자의 총량에 대한 함수이며, PM10과 PM2.5만 측정하는 경우 3가지(조대입자크기, 초미세먼지 및 조대입자 총량) 정보를 얻을 수 없다. 그러므로 다른 새로운 측정값이 필요하다. [수학식 3]과 같이 정의된 소산계수는 소산효율과 입자의 수밀도와 면적으로 표현한 것인데, 이를 다른 형식으로 표시하면 즉 부피분포 함수($V(r)$)로 표시하면 [수학식 9]와 같다.

[0107] [수학식 9]

$$\alpha(\lambda) = \int_0^\infty Q_v(x = 2\pi r/\lambda) V(r) dr$$

$$= \int_0^\infty Q(x) \left[\frac{V_f}{\sqrt{2\pi \log(\sigma_f)}} e^{-\frac{(\log(r) - \log(r_f))^2}{2(\log(\sigma_f))^2}} + \frac{V_c}{\sqrt{2\pi \log(\sigma_c)}} e^{-\frac{(\log(r) - \log(r_c))^2}{2(\log(\sigma_c))^2}} \right] d\log(r)$$

$$= V_f \int_0^\infty Q(x) \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi \log(\sigma_f)}} e^{-\frac{(\log(r) - \log(r_f))^2}{2(\log(\sigma_f))^2}} \right] d\log(r) + V_c \int_0^\infty Q(x) \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi \log(\sigma_c)}} e^{-\frac{(\log(r) - \log(r_c))^2}{2(\log(\sigma_c))^2}} \right] d\log(r)$$

[0108]

[0109] [수학식 9]에서 부피소산 효율($Q_v(x)$)와 부피분포 함수의 곱의 적분 값의 특성에 대하여 살펴보면, 도 7은 소산 계수를 구하는 개념을 나타낸 그래프로서, [수학식 9]는 도 7과같이 두 함수의 곱에 대한 적분이며, 가우시안 함수의 위치에 따라 매우 다른 특징의 값들을 갖는 복잡한 양이다.

[0110] 그러나, [표 1]과 같은 범위에서 입자들이 분포하며, 이러한 입자 분포 특성에서 각 변수의 가변 범위에서 입 자의 분포 특성 6개에서 그 소산계수의 변화 특성을 얻었다.

[0111] 도 8은 조대입자와 초미세입자의 크기, 분포 폭 그리고 총량에 따른 PM10, PM2.5 그리고 소산계수의 변화를 나타 낸 그래프로서, 작은 입자는 입자의 크기가 커질수록 빠른 속도로 소산계수가 증가하며, 큰 입자는 반대로 감소 하고, 큰 입자와 작은 입자의 폭은 소산계수에 영향을 거의 미치지 못하며 총량은 바로 비례관계에 있다는 것을 알 수 있다.

[0112] 가우시안 모양에서 입자 분포 폭의 변화가 소산계수에 영향을 주지 않는 것은 도 7에서도 바로 알 수 있다. 즉

중심 크기에서 입자의 분포 폭이 넓어지거나 좁아지면 입자 크기가 커진 곳은 부피소산효율이 증가하고 작아진 곳은 부피소산효율이 감소하기 때문에 그 효과는 전체적으로 미미한 효과만 생기기 때문이다.

[0113] 초미세먼지와 조대입자가 서로 다른 양상을 보이고 있으나, 만약 실제 대기 환경에서 초미세먼지와 조대입자의 분포 폭이 동시에 증가했다면 조대입자는 감소효과 초미세먼지는 증가효과로 소산에 영향을 미친다.

[0114] 그러므로 초미세먼지나 조대 입자의 분포 폭의 변화는 소산계수에 영향을 줄 수 없다. 이러한 이유로 [수학식 9]의 적분 부분은 다음과 같이 [수학식 10]으로 변수의 수가 줄어든 모양으로 나타난다.

[0115] [수학식 10]

$$\alpha(\lambda_1) = C_1(r_f)V_f + D_1(r_c)V_c$$

[0116]
$$\alpha(\lambda_2) = C_2(r_f)V_f + D_2(r_c)V_c$$

[0117] 식에서 C_1, C_2, D_1, D_2 는 아래와 같은 것을 나타낸다.

$$C_1(r_f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \log(\sigma_f)}} \int_0^\infty Q(x_1) \left[e^{-\frac{(\log(r) - \log(r_f))^2}{2(\log(\sigma_f))^2}} \right] d\log(r)$$

$$C_2(r_f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \log(\sigma_f)}} \int_0^\infty Q(x_2) \left[e^{-\frac{(\log(r) - \log(r_f))^2}{2(\log(\sigma_f))^2}} \right] d\log(r)$$

$$D_1(r_f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \log(\sigma_c)}} \int_0^\infty Q(x_1) \left[e^{-\frac{(\log(r) - \log(r_c))^2}{2(\log(\sigma_c))^2}} \right] d\log(r)$$

$$D_2(r_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \log(\sigma_c)}} \int_0^\infty Q(x_2) \left[e^{-\frac{(\log(r) - \log(r_c))^2}{2(\log(\sigma_c))^2}} \right] d\log(r)$$

[0118]

[0119] 만약에 다른 파장에서 4개 이상의 여럿의 소산계수를 얻는다면 [수학식 10]은 [수학식 11]과 같이 방정식으로 쓸 수 있으며, 식에서 x_1, x_2 는 다른 파장을 의미하며 $x_1 = 2\pi r / \lambda_1, x_2 = 2\pi r / \lambda_2$ 를 나타낸다. C_1, D_1 은 각각 파장 1에서 단위부피의 초미세입자와 조대입자의 소산계수에의 기여도를 나타낸다. 식에서 C_1, D_1 가 각각 $\sigma_{c,f}$ 의 함수가 아니라는 것은 중요한 사실이며, 각 모드 입자의 중심크기에만 관계된다.

[0120] 그러므로 주어진 파장에서 입자의 중심크기가 정해지면 C, D 값이 정해지고, 최종적으로는 소산계수는 초세미세 입자와 조대입자의 총량(V_c, V_f) 값을 정해진 C, D 값에 곱하여 합침으로써 결정할 수 있다. 여러 파장에서 소산 계수를 얻을 경우 [수학식 11]과 같이 다양한 방정식이 얻어진다.

[0121] [수학식 11]

$$\alpha(\lambda_1) = C_1(r_f)V_f + D_1(r_c)V_c$$

$$\alpha(\lambda_2) = C_2(r_f)V_f + D_2(r_c)V_c$$

$$\alpha(\lambda_3) = C_3(r_f)V_f + D_3(r_c)V_c$$

$$\alpha(\lambda_4) = C_4(r_f)V_f + D_2(r_c)V_c$$

$$\alpha(\lambda_5) = C_5(r_f)V_f + D_5(r_c)V_c$$

.

.

[0122]
$$\alpha(\lambda_m) = C_m(r_f)V_f + D_m(r_c)V_c$$

[0123] [수학식 11]에서 좌변은 측정값을 나타내고, 우변은 구하고자 하는 값으로 구성된 방정식이다.

[0124] 즉 미지수 V_f, r_f, V_c, r_c 4개에 대하여 다양한 측정치 $\vec{Y}=(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m)^T$ 로부터 4개의 미지수 $\vec{x} = (V_f, V_c, r_f, r_c)^T$ 를 얻으려는 [수학식 12]처럼 간단한 수학적 문제로 귀결된다. 즉 [수학식 12]의 해를 구하는 문제로 귀결된다.

[0125] [수학식 12]

[0126]
$$\begin{pmatrix} \alpha(\lambda_1) \\ \alpha(\lambda_2) \\ \vdots \\ \alpha(\lambda_m) \end{pmatrix} = \vec{Y} = \vec{F}(\vec{X}) = \begin{pmatrix} F_1(\vec{x}) \\ F_2(\vec{x}) \\ \vdots \\ F_m(\vec{x}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1(r_f)V_f + D_1(r_c)V_c \\ C_2(r_f)V_f + D_2(r_c)V_c \\ \vdots \\ C_m(r_f)V_f + D_m(r_c)V_c \end{pmatrix}$$

[0127] 만약 PM10과 소산계수 3개를 측정한다면 $\vec{Y}=(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, PM10)^T$ 값으로부터 역시 미지의 $\vec{x} = (V_f, V_c, r_f, r_c)^T$ 를 역으로 산출하는 문제로 귀결된다. 마찬가지로 측정 값이 소산계수가 아니라 PM10이 역으로 산출하는 문제로 귀결된다. 마찬가지로 측정 값이 소산계수가 아니라 PM10이나 PM2.5로 구성된 측정 값이라면 [수학식 12] 대신에 다음과 같이 쓸 수 있다.

[0128] [수학식 13]

[0129]
$$\begin{pmatrix} \alpha(\lambda_1) \\ \alpha(\lambda_2) \\ PM2.5 \\ PM10 \end{pmatrix} = \vec{Y} = \vec{F}(\vec{X}) = \begin{pmatrix} F_1(\vec{x}) \\ F_2(\vec{x}) \\ \vdots \\ F_{m-1}(\vec{x}) \\ F_m(\vec{x}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1(r_f)V_f + D_1(r_c)V_c \\ C_2(r_f)V_f + D_2(r_c)V_c \\ \vdots \\ \rho[V_f + (1 - E(r_c)) - F(r_c)]V_c \\ \rho[V_f + (1 - F(r_c))V_c] \end{pmatrix}$$

[0130] 그리고 만약 PM2.5를 사용하지 않고 PM10과 PM2.5의 관계비($R_{f/c}$)를 사용한다면 [수학식 14]와 같이 쓸 수 있다.

[0131] [수학식 14]

$$\begin{pmatrix} \alpha(\lambda_1) \\ \alpha(\lambda_2) \\ \vdots \\ R_{F/C} \\ PM10 \end{pmatrix} = \vec{Y} = \vec{F}(\vec{X}) = \begin{pmatrix} F_1(\vec{X}) \\ F_2(\vec{X}) \\ \vdots \\ F_{m-1}(\vec{X}) \\ F_m(\vec{X}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1(r_f)V_f + D_1(r_c)V_c \\ C_2(r_f)V_f + D_2(r_c)V_c \\ \vdots \\ \frac{V_f}{V_c} + 1 - E(r_c) - F(r_c) \\ E(r_c) \\ \rho[V_f + (1 - F(r_c))V_c] \end{pmatrix}$$

[0132]

[0133] [수학식 12], [수학식 13], [수학식 14]는 같은 수의 미지수를 표현한 다른 연립 방정식이다. 이런 방정식은 [수학식 15]와 같이 표현된 오차(측정값의 각 성분과 주어진 미지수로 이론적으로 구한 여러 측정값에 대응되는 값의 차이를 제곱한 것)를 최소화시키도록 미지수를 되먹임 방법으로 조정하는 방법으로 구해진다.

[0134] 본 발명에서 커널산출부(140)는 상기 복수의 방정식에서 각 미지수가 소산계수를 포함하는 추가정보에 대한 기여도를 산출하는 단계(S 150)를 수행하고, 상기 보정부(150)는 미세먼지 상세측정 데이터를 초기값으로 하여 소산계수 및 추가정보에 따른 미지수의 해를 산출하며 수렴되는 값을 산출하는 단계(S 160)를 수행한다.

[0135] [수학식 15]

[0136]
$$\chi^2 = (\vec{Y} - \vec{F}(\vec{X}))^T \cdot (\vec{Y} - \vec{F}(\vec{X}))$$

[0137] 이런 방정식을 연립 비선형 방정식이라고 하며, 수학적으로 그 해를 푸는 과정은 [수학식 15]와 같이 측정값과 임의의 미지수($\vec{X} = (V_f, V_c, r_f, r_c)^T$)를 해로 가정하고 하여 얻은 예측값 사이의 오차가(실제는 오차의 제곱) 최소가 되도록 미지수를 조정하면 된다. 수학적으로는 수학식 15에서 최소값을 만족하는 미지수(\vec{X})를 구하는 것인데, 일반적으로 [수학식 15]를 모든 미지수(\vec{X})의 성분에 대하여 미분한 값이 0이 되는 지점이 최소 조건을 만족한다. 아래 수학식은 이러한 조건을 만족하는 미지수를 찾는 과정을 나타낸 것이다.

[0138] [수학식 16]

[0139]
$$\Delta \vec{X} = \vec{X}_{t+1} - \vec{X}_t = (K_t^T K_t)^{-1} (K_t^T (\vec{Y} - \vec{F}(\vec{X}_t)))$$

[0140] 여기서 K는 커널이라고 부르며, 각 \vec{X} 의 각 성분이 최종 결과물 \vec{F} 의 각 성분에 얼마나 기여를 하는가에 대한 정보(기울기)를 나타내는 양으로 행렬로 표현하면 $(K_c)_{nm} = \partial F_n / \partial X_m$ 으로 표현되는 양이다. [수학식 16]이 0으로 접근하도록 미지수를 점진적으로 바꾸는 것이 해를 찾는 것이다.

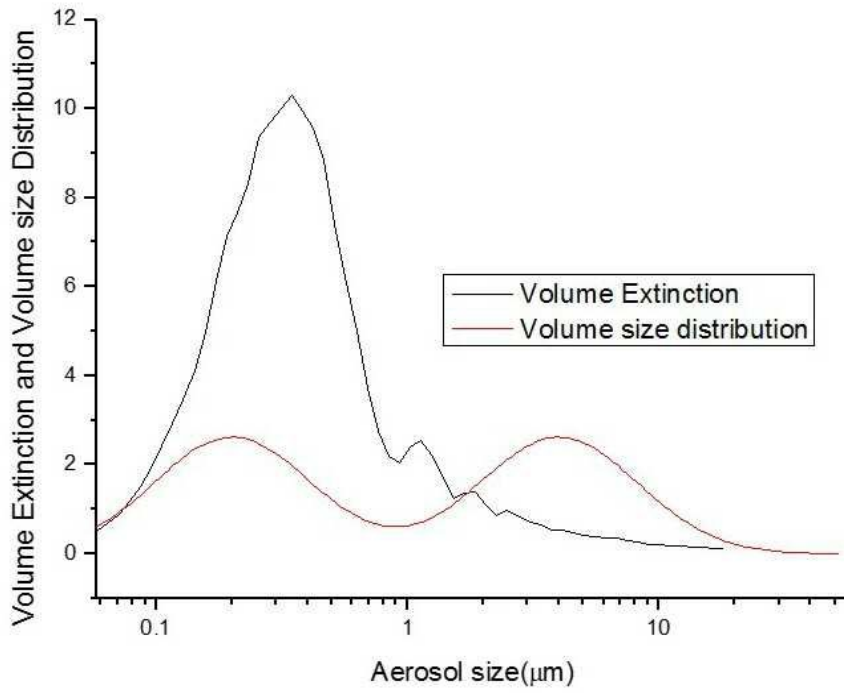
[0141] 즉 수학적으로 방정식의 진짜 해(solution) 근처의 임의의 값(\vec{X}_t)에서는 오차 $(\vec{Y} - \vec{F}(\vec{X}_t))$ 가 선형적으로 변할 것을 예상할 수 있으며, 그 선형 방정식의 해는 [수학식 16]과 같이 나타난다는 뜻이다. 그러나 전체 미지수 영역에서 최소값은 유일하게 하나 존재할 수 있지만, 임의의 미지값(\vec{X}) 근처에는 국소적 최소값이 존재할 수 있다.

[0142] 그러므로 초기 미지수(\vec{X}_1)를 적절한 값으로 조정하는 것이 전 미지수 공간 영역에서 최소값을 구하는데 중요하며 이 초기치 값을 이용하여 점진적으로 최소값 영역에 접근하다. 초기 입력 값에 대하여 조정되어 더해지는 양이 $\Delta \vec{X} = (\Delta V_f, \Delta V_c, \Delta r_f, \Delta r_c)^T$ 이 값이다.

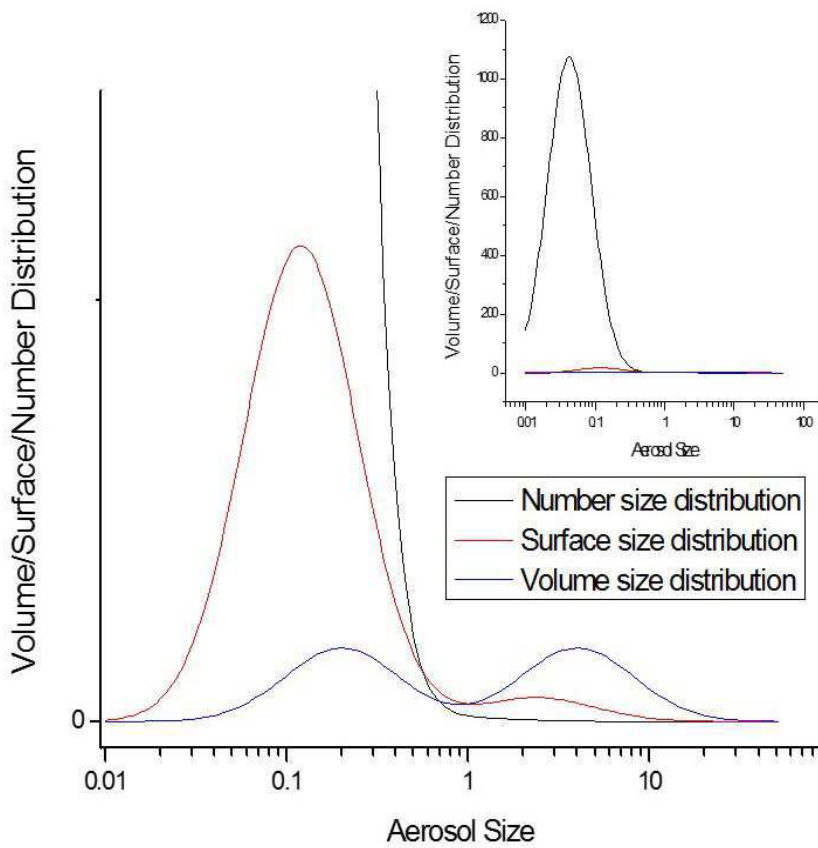
[0143] 일반적으로 초기값은 [표 1]에서 보여주는 여러 값의 평균을 취한다. 특별히 바닷가 근처에서의 미세먼지 크기를 얻고자 하거나, 황사가 있는 경우, 혹은 공단 지역에서 측정하고자 하는 경우엔 그 특성에 알맞은 [표 1]의 값을 이용한다.

[0144] 도 11은 초미세먼지 조대입자의 총량과 중심크기를 구하는 순서도로서, 구체적으로 이러한 계산과정을 설명하였다. 도 11에서 알 수 있듯이 먼저 어떤 측정값을 이용할 것인가가 정해지면(\vec{Y}), 그 측정값에 해당하는 이론적

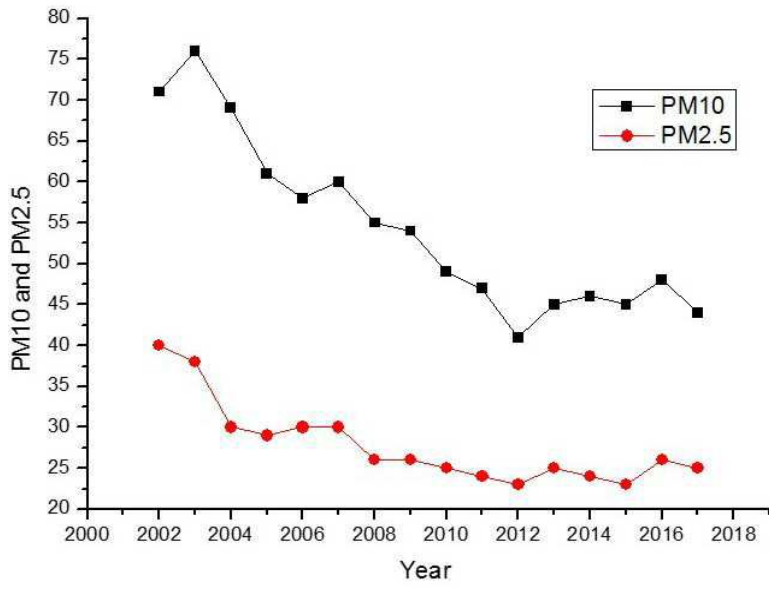
도면2



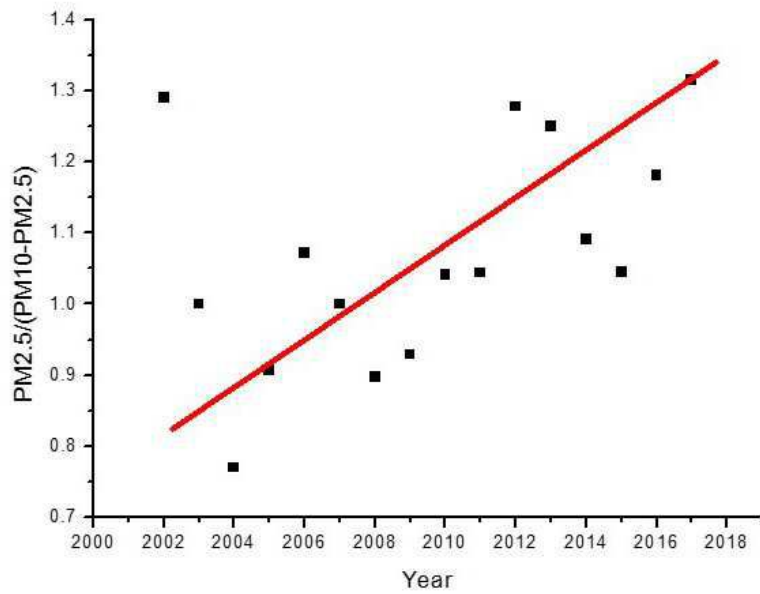
도면3



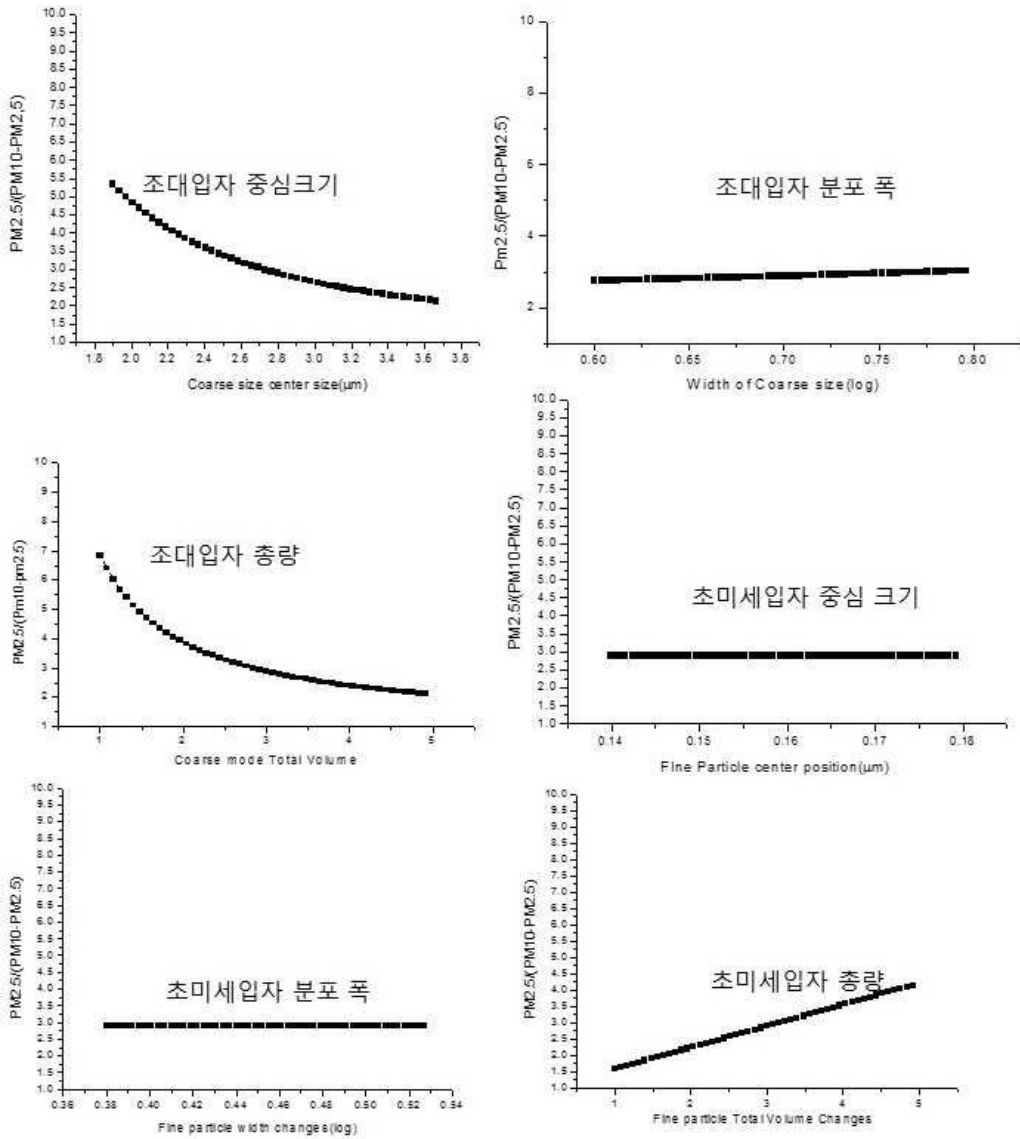
도면4



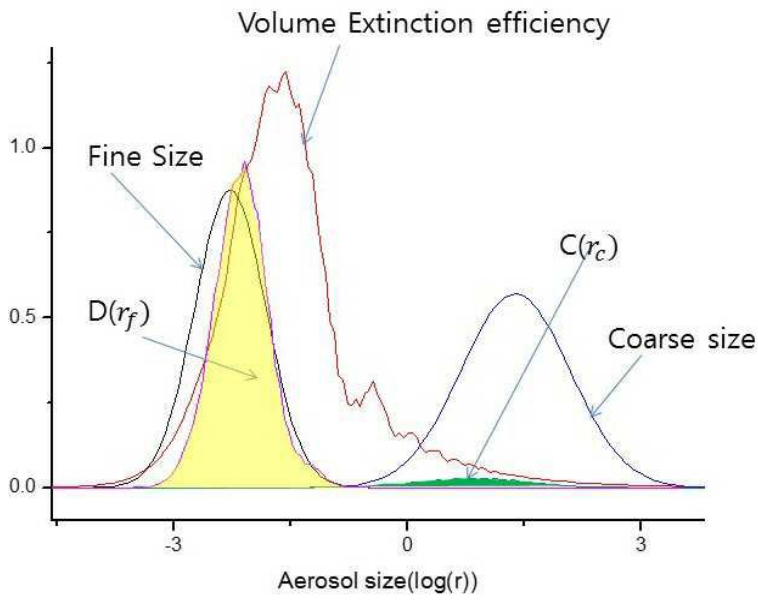
도면5



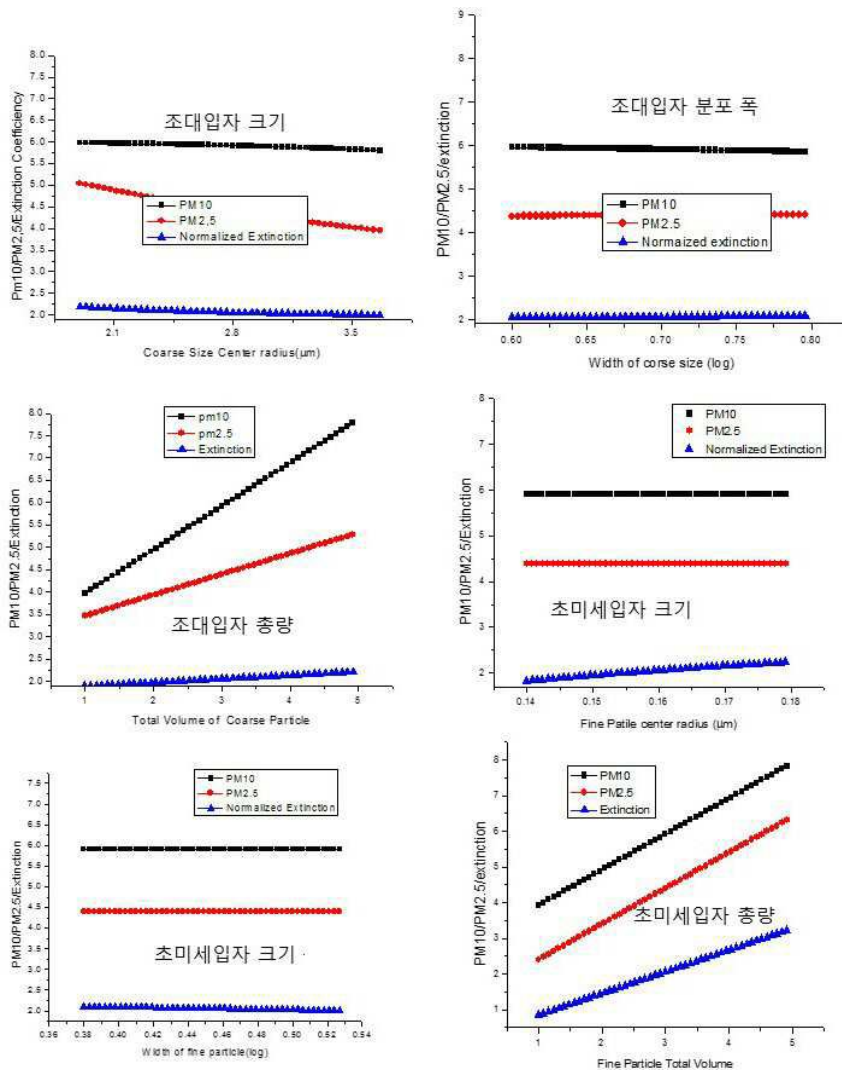
도면6



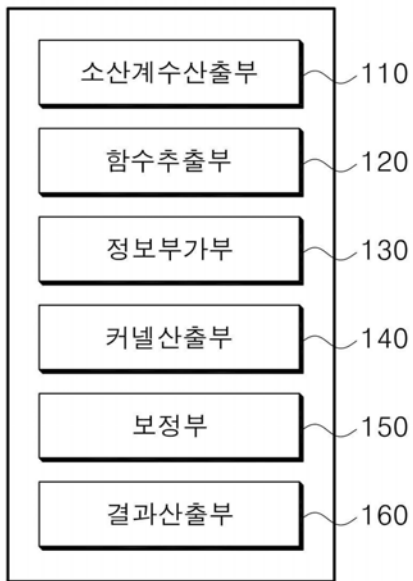
도면7



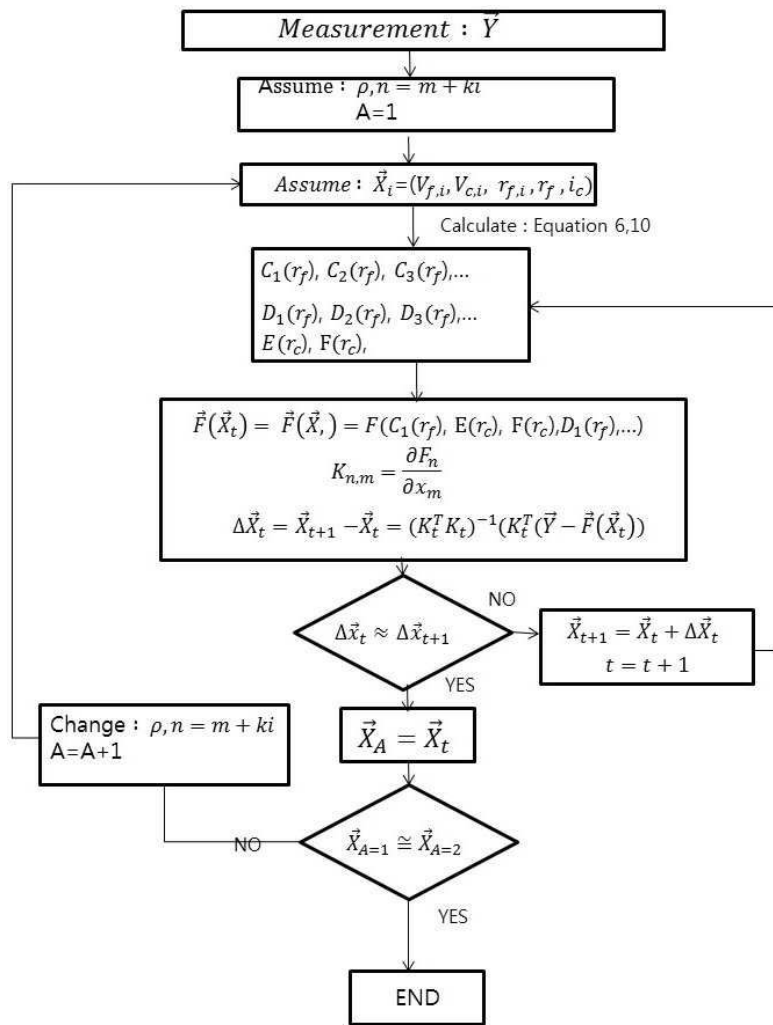
도면8



도면9



도면10



도면11

