



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년07월08일
(11) 등록번호 10-2274688
(24) 등록일자 2021년07월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01S 7/497 (2006.01) G01N 15/02 (2006.01)
G01S 17/86 (2020.01) G01S 17/89 (2020.01)
G01S 17/95 (2006.01) G01S 7/481 (2006.01)

(52) CPC특허분류

G01S 7/497 (2013.01)
G01N 15/0205 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2020-0173564

(22) 출원일자 2020년12월11일

심사청구일자 2020년12월11일

(56) 선행기술조사문헌

JP2002196075 A*
KR101751642 B1*
KR1020190081084 A*
KR1020200087010 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

삼우티시에스 주식회사

경상북도 칠곡군 왜관읍 2산업단지3길 71-19

한밭대학교 산학협력단

대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)

부경대학교 산학협력단

부산광역시 남구 용소로 45, 부경대학교내 (대연동)

(72) 발명자

최성철

대전광역시 유성구 죽동로 321 금성백조예미지
106동 305호

최창기

대구광역시 달서구 월배로5길 76 대구월배2차아아
파크 211동 1501호

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

특허법인도담

전체 청구항 수 : 총 4 항

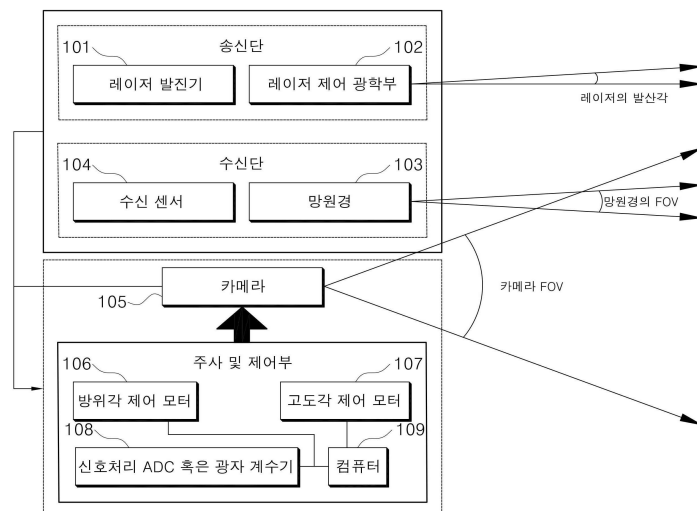
심사관 : 임일순

(54) 발명의 명칭 속도 및 방향 분해능이 향상된 미세먼지 소산계수 측정 주사 라이다 운용 방법

(57) 요약

본 발명은 대기 중의 미세먼지를 주사형 에어로졸 라이다로 측정함에 있어, 1) 사용되는 레이저의 펄스수를 최적화하여 측정 시간을 단축하고, 2) 레이저가 조사되지 않는 방향에서 모든 거리에 따른 소산계수 정보를 카메라의 도움으로 내삽의 결점을 보완하고, 3) 미세먼지가 많은 경우 혹은 굴뚝을 통과한 방향에서 원거리에서 미세먼지의 소산계수를 추출시 근거리 정보를 활용하는 방법을 적용하고, 4) 모든 방향과 거리에서 신호의 신뢰도를 높이기 위하여 라이다 신호의 세기를 내삽에 이용하는 방법을 적용한 속도 및 방향 분해능이 향상된 미세먼지 소산계수 측정 주사 라이다 운용 방법에 관한 것이다. 마지막으로 내삽에 있어 효율성과 정확도를 높이기 위하여 5) 굴뚝이나 주변의 오염원을 방출하는 지역과 그렇지 않는 지역을 구분하고 카메라를 활용하여 미리 설정된 조사 방향 및 스케줄을 통해 연속적으로 측정하는 방법을 포함한다.

대표도



(52) CPC특허분류

G01S 17/86 (2020.01)

G01S 17/89 (2013.01)

G01S 17/95 (2013.01)

G01S 7/481 (2013.01)

(72) 발명자

김덕현

대전광역시 유성구 배울1로 119 대덕테크노밸리12
단지아파트 1203동 1201호

노영민

부산광역시 남구 수영로 345 대연힐스테이트푸르지
오 103동 2204호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1615011538

과제번호 151375

부처명 국토교통부

과제관리(전문)기관명 국토교통과학기술진흥원

연구사업명 국가전략프로젝트

연구과제명 지역수요기반의 스마트시티 비즈니스 모델 개발

기 여 율 1/1

과제수행기관명 (재단)차세대융합기술연구원

연구기간 2020.01.01 ~ 2020.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

레이저발진기(101)와, 발진된 레이저의 파장을 각각 분리하여 확대하고 다시 결합하여 대기 중으로 조사하는 레이저 제어 광학부(102)와, 발진된 레이저가 대기 중에서 산란되어 되돌아오는 빛을 모으는 망원경(103) 및 빛을 수신하는 수신센서(104)를 포함하는 주사형 라이다 시스템의 운용방법으로서,

레이저발진기(101)를 통한 레이저의 조사 방향과, 망원경(103)의 광축 방향과, 카메라(105)의 중심 화소방향을 같은 방향으로 정렬하는 정렬단계(S 110);

라이다 시스템 위치를 중심으로 360도 회전하며 모든 방향의 파노라마 영상을 획득하는 영상획득단계(S 120);

상기 카메라(105)를 통해 얻은 파노라마 영상의 화소점을 선택하되, 상기 카메라(105)의 영상을 통해 소산계수의 취득 가능한 지역의 방향을 제외한 방향으로 라이다 측정지점을 지정하고, 지정된 측정지점에서의 레이저 주사 및 측정시간을 설정하는 설정단계(S 130);

지정된 측정지점으로 레이저를 주사하며 순차적으로 라이다 신호를 얻는 측정단계(S 140);

각 측정지점으로부터 얻은 라이다 신호를 통해 소산계수를 얻는 제1산출단계(S 150);

상기 제1산출단계에서 얻은 거리 및 각도별 소산계수와, 내삽법을 이용하여 측정하지 않는 지역과 방향에서의 소산계수를 얻는 제2산출단계(S 160);

상기 카메라를 통해 얻은 영상을 이용하여 내삽법이 적용된 지점의 소산계수를 보정하는 보정단계(S 170);로 이루어지는 것을 특징으로 하는 미세먼지 소산계수 측정 주사 라이다 운용 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 측정단계(S 140)는,

지정된 주사 방향에서 라이다 신호를 얻기 위하여 측정하고자 하는 최대 측정 거리에서 라이다 신호를 얻고 동시에 그 신호 크기를 판단하여 한 방향에서 최대 거리에서의 라이다 신호가 배경신호의 신호 요동 값보다 크면 더는 측정하지 않고 지정된 방향으로 레이저 조사방향을 바꾸는 것을 특징으로 하는 미세먼지 소산계수 측정 주사 라이다 운용 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 제2산출단계(S 160)는,

측정하지 않는 지역과 방향에서의 소산계수를 내삽법으로 산출함에 있어,

주변 다른 측정지점의 측정정보 및 측정된 라이다 신호의 세기를 이용하여 측정값의 신뢰도를 계산하고 이로부터 그 측정값의 가중치를 다르게 정하여 내삽이 이루어지도록 하는 것을 특징으로 하는 미세먼지 소산계수 측정 주사 라이다 운용 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 제1산출단계(S 150)는,

근거리의 신호를 분석하여 상대적으로 균일한 분포를 나타내는 한 지점을 찾아 근거리 소산계수를 산출하고, 상기 근거리 소산계수를 통해 원거리에서 얻어진 신호를 이용하여 산출된 소산계수를 결정하도록 구성되고,

상기 제2산출단계(S 160)는,

상기 측정단계에 따른 측정값과 라이다 신호의 크기를 기반으로 각 측정치에 가중치를 부여하고 이로부터 측정하지 않는 지역의 미세먼지 소산계수를 얻도록 구성되는 것을 특징으로 하는 미세먼지 소산계수 측정 주사 라이다 운용 방법.

청구항 5

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 주사 라이다 운용에 있어 미세먼지를 고분해능의 각도로 추출하는 기술로서, 자세하게는 대기 중의 미세먼지를 카메라에서 촬영된 영상과 유한한 분해능으로 얻은 거리별 소산계수를 융합함으로써 임의의 유한한 각도로 얻은 거리별 라이다의 소산계수의 정보를 고분해능의 카메라의 각도 분해능 수준으로 얻을 수 있는 속도 및 방향 분해능이 향상된 미세먼지 소산계수 측정 주사 라이다 운용 방법에 관한 것이다.

배경 기술

- [0002] 주사형 라이다는 주어진 위치에서 특정 방향으로 거리에 따른 미세먼지의 소산계수를 얻는 장치이다.
- [0003] 그러나 주어진 방향에서 하나의 프로파일을 얻는 미세먼지 라이다 시스템의 레이저의 한계로 일정 시간 레이저를 조사해야 하므로 주사(scanning)에 많은 시간이 소요된다. 이에 모든 방향으로 레이저를 조사할 수 없음에 따라 유한한 각도로만 레이저 조사가 이루어질 수밖에 없다.
- [0004] 즉 얻을 수 있는 정보가 각도에 대해 유한하므로 2차원 평면상에서 얻은 데이터를 내삽하는 방법을 취하며, 이 경우 측정되지 않은 부분의 정보는 주위 정보를 이용할 수밖에 없다.
- [0005] 라이다에서 미세먼지의 소산계수를 추출시 근거리신호는 SNR 값이 충분하여 그 신뢰도가 높아 문제가 없으나, 전체 공간의 미세먼지가 높아지거나 굴뚝을 지나는 경우 미세먼지 라이다 신호의 크기가 급격히 줄어들며, 원거리의 SNR 값이 급격히 줄어들어 정확도가 낮아지게 되며, 이는 라이다 신호를 역산하는 Klett 방법에서 원거리 정보가 소실되는 결과를 초래하여 근거리 정보까지 정확도가 낮아지는 결과를 초래한다.
- [0006] 이처럼 원거리의 SNR 값이 충분하지 않은 상태에서 그 오차를 줄이고 또한 근거리 정보를 충분히 활용할 수 있는 방법이 요구된다.
- [0007] 또한, 주사형 미세먼지 라이다 시스템은 레이저의 방향에서만 정보를 얻을 수 있으므로, 주어진 라이다의 위치를 중심으로 모든 공간에서 정보를 얻기 위해선 최대 주사 범위는 360도가 되어야 한다. 하지만, 하나의 방향에서 데이터를 얻기 위하여 최소 수십 초 내외의 레이저 신호 누적시간이 필요하며, 너무 정밀한 각도로 주사되면 한 주기에서 다른 정보가 얻어질 뿐 아니라, 제한된 시간에 360도로 주사가 불가능하므로, 유한한 각도 간격으로 주사가 이루어져야 한다.
- [0008] 그러므로 가능한 측정 시간을 줄이고 불필요한 측정 지역을 미리 감지하여 그 방향으로의 측정을 생략하는 방법을 취한다면 짧은 시간에 많은 각도로 측정 가능하여 각도의 공간 분해능과 속도 분해능을 높일 수 있다.
- [0009] 또한, 이렇게 얻어진 여러 방향의 신호로부터 측정되지 않은 구역에서의 미세먼지 정보를 얻기 위하여 주위 데이터를 내삽하는 과정이 필요하며, 측정된 공간의 거리 및 신뢰도 정보를 바탕으로 내삽이 이루어져야 한다. 즉 원거리 정보는 부정확한 정보가 포함되어 내삽 결과 신뢰도가 낮으므로 가중치를 조절하여야 한다.
- [0010] 이에 본 발명에서는 사진 정보를 이용함으로 신뢰도를 높여 모든 각도 및 방향에서의 미세먼지 정보를 활용할 수 있도록 한다.

[0011] 더불어 주위에서 얻은 미세먼지 라이다 정보를 동시에 활용함에 있어, 주어진 방향과 거리에서 내삽을 수행함에 있어 주위의 값과 동시에 거리뿐 아니라 그 값의 신뢰도를 고려하여야 한다. 즉 신호의 세기가 강하여 미세먼지의 정보를 정확히 얻은 위치의 값은 가중치를 높이고 그렇지 않은 값은 가중치를 낮추는 방법을 사용하는 것이 내삽된 값의 정확도와 신뢰도를 높일 수 있다.

[0012] 카메라의 영상 정보를 이용하는 방법에 있어, 영상 정보로부터 쉽게 미세먼지의 소산계수를 얻을 수 있는 방향을 미리 알 수 있다면, 한정된 자원으로 주사를 함에 있어 이러한 영상을 이용하여 미세먼지의 정보를 획득하기 좋은 방향에서는 미세먼지 라이다 신호를 얻지 않고 다른 방향에서 미세먼지 라이다 신호를 얻고 이로부터 미세먼지의 소산계수를 얻을 수 있다.

[0013] 이러한 점에서 최초 스캐닝 계획은 이러한 점을 고려하여 설정할 필요가 있다. 이렇게 보정 방법을 고려하여 미리 주사 방향을 정함으로 그렇지 않은 방법과 같은 시간에 같은 수의 정보를 얻게 되나, 카메라 영상의 보조적인 정보로부터 보다 정확하고, 더 많은 방향과 거리에서 한정된 시간에 더욱 많은 미세먼지의 정보를 얻을 수 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0014] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 제10-0338221호(2002.05.14)
(특허문헌 0002) 대한민국 등록특허 제10-2146287호(2020.08.13)

비특허문헌

[0015] (비특허문헌 0001) James D. Klett, "Stable analytical inversion solution for processing lidar returns", APPLIED OPTICS, Vol. 20, No.2, 211(1981)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0016] 본 발명은 상기와 같은 필요에 따라 창출된 것으로, 본 발명의 목적은 한정된 시간에 많은 방향으로의 거리 분해능이 있는 미세먼지의 정보를 획득함에 있어, 많은 방향으로 보다 정확하게 미세먼지의 소산계수 정보를 얻기 위한 방법으로 1) 측정하지 않는 방향을 정하고, 2) 측정을 수행함에 있어 최소의 에너지를 조사하여 데이터를 얻고, 3) 측정하지 않는 방향의 데이터는 카메라의 영상과 주위의 데이터를 활용하여 보다 효율적으로 추출하며, 4) 이러한 측정되지 않는 방향의 각 거리에서의 미세먼지의 추출은 자동화된 방법으로 이루어지는 속도 및 방향 분해능이 향상된 미세먼지 소산계수 측정 주사 라이다 운용 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0017] 상기와 같은 목적을 위해 본 발명은 레이저발진기(101)와, 발진된 레이저의 파장을 각각 분리하여 확대하고 다시 결합하여 대기 중으로 조사하는 레이저 제어 광학부(102)와, 발진된 레이저가 대기 중에서 산란되어 되돌아오는 빛을 모으는 망원경(103) 및 빛을 수신하는 수신센서(104)를 포함하는 주사형 라이다 시스템의 운용방법으로서, 레이저발진기(101)를 통한 레이저의 조사 방향과, 망원경(103)의 광축 방향과, 카메라(105)의 중심 화소 방향을 같은 방향으로 정렬하는 정렬단계; 라이다 시스템 위치를 중심으로 360도 회전하며 모든 방향의 파노라마 영상을 획득하는 영상획득단계; 라이다 측정지점을 지정하고, 지정된 측정지점에서의 레이저 주사 및 측정시간을 설정하는 설정단계; 지정된 측정지점으로 레이저를 주사하며 순차적으로 라이다 신호를 얻는 측정단계; 각 측정지점으로부터 얻은 라이다 신호를 통해 소산계수를 얻는 제1산출단계; 상기 제1산출단계에서 얻은 거리 및 각도별 소산계수와, 내삽법, 상기 카메라의 영상 중 선택된 방법을 이용하여 측정하지 않는 지역과 방향에서의 소산계수를 얻는 제2산출단계; 로 이루어지는 것을 특징으로 한다.

[0018] 이때 상기 측정단계는, 지정된 주사 방향에서 라이다 신호를 얻기 위하여 측정하고자 하는 최대 측정 거리에서 라이다 신호를 얻고 동시에 그 신호 크기를 판단하여 한 방향에서 최대 거리에서의 라이다 신호가 배경신호의

신호 요동 값보다 크면 더는 측정하지 않고 지정된 방향으로 레이저 조사방향을 바꾸는 것이 바람직하다.

[0019] 또한, 상기 제2산출단계는, 측정하지 않는 지역과 방향에서의 소산계수를 내삽법으로 산출함에 있어, 주변 다른 측정지점의 측정정보 및 측정된 라이다 신호의 세기를 이용하여 측정값의 신뢰도를 계산하고 이로부터 그 측정값의 가중치를 다르게 정하여 내삽이 이루어지도록 하고, 측정시 상기 카메라를 통해 얻은 영상을 이용하여 내삽법이 적용된 지점의 소산계수를 보정하는 보정단계; 를 더 포함하는 것이 바람직하다.

[0020] 또한, 상기 제1산출단계는, 근거리의 신호를 분석하여 상대적으로 균일한 분포를 나타내는 한 지점을 찾아 근거리 소산계수를 산출하고, 상기 근거리 소산계수를 통해 원거리에서 얻어진 신호를 이용하여 산출된 소산계수를 결정하도록 구성되고, 상기 제2산출단계는, 상기 측정단계에 따른 측정값과 라이다 신호의 크기를 기반으로 각 측정치에 가중치를 부여하고 이로부터 측정하지 않는 지역의 미세면지 소산계수를 얻도록 구성되는 것이 바람직하다.

[0021] 또한, 상기 설정단계는, 상기 카메라의 영상을 통해 소산계수의 취득 가능한 지역의 방향을 제외한 방향으로 라이다 측정지점을 지정하고, 상기 제2산출단계는,

[0022] 상기 라이다 측정지점 이외 지점의 소산계수를 내삽법으로 산출하도록 구성되는 것이 바람직하다.

발명의 효과

[0023] 본 발명은 대기 중의 미세먼지를 카메라에서 촬영된 영상과 유한한 분해능으로 얻은 거리별 소산계수를 융합함으로써, 임의의 유한한 각도로 얻은 거리별 라이다의 소산계수의 정보를 고분해능의 카메라의 각도 분해능 수준으로 얻을 수 있다.

[0024] 또한, 굴뚝의 연기나 기타 요인으로 그 정보의 불확실성이 높은 경우 그를 고려하여 내삽을 함으로써 정확하게 측정된 정보의 가중치를 높이는 방법을 통해 추정되는 미세먼지의 측정 정밀도를 높일 수 있다.

[0025] 또한, 라이다 시스템의 운용에 있어 미리 설정된 레이저의 펄스를 사용하는 경우 깨끗한 방향에 대하여 불필요하게 많은 시간이 소요되는 문제를 해결하여, 필요한 레이저의 펄스 수를 실시간으로 감시되는 신호로부터 정하여 불필요한 측정시간을 단축할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0026] 도 1은 본 발명에 따른 주사형 에어로졸 라이다의 구성도,

도 2는 본 발명에 따른 주사형 미세면지 라이다 시스템의 효율적 운영방법을 위한 차트,

도 3은 본 발명에 따라 하나의 라이다 신호로부터 원하는 모든 거리에서 라이다 신호를 분석하는 방법을 나타낸 차트,

도 4는 본 발명에 따라 측정되지 않은 지역의 값을 내삽하는 방법을 나타낸 개념도,

도 5는 본 발명을 통해 최종적으로 얻어지는 결과물인 2차원 미세면지 소산계수 추출 과정을 나타낸 차트,

도 6은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 순서도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0027] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명 속도 및 방향 분해능이 향상된 미세면지 소산계수 측정 주사 라이다 운용 방법을 구체적으로 설명한다.

[0028] 주사형 미세레이저발진기(101)와, 발진된 레이저의 파장을 각각 분리하여 확대하고 다시 결합하여 대기 중으로 조사하는 레이저 제어 광학부(102)와, 발진된 레이저가 대기 중에서 산란되어 되돌아오는 빛을 모으는 망원경(103) 및 빛을 수신하는 수신센서(104)를 포함하는 주사형 라이다 시스템은 미세면지의 3차원 분포를 모니터링하기 위하여 제안되고 활용되는 기술이다. 비 주사형 미세면지 라이다 장치를 사용하면 측정지역에서 하나의 방향으로 최대 거리까지 주어진 거리 분해능으로 각 지점의 미세면지 소산계수를 측정할 수 있으나, 주사형 미세면지 라이다를 사용하는 경우 주어진 위치에서 라이다의 방향을 고도각과 방위각을 제어하여 그 방향을 선택할 수 있으며 그 방위각과 고도각의 각 거리에서 미세면지의 소산계수를 얻을 수 있다.

[0029] 그러므로 주사형 미세면지 라이다 시스템은 주어진 시간에 얼마나 많은 방향및 거리에서 미세면지의 정보를 얻

을 수 있는지가 가장 중요한 사양이 된다.

- [0030] 제한된 시간에 많은 방향에서 미세먼지 라이다 신호를 얻기 위하여 사용되는 레이저 에너지를 높이거나, 수신 장치에 사용하는 망원경의 크기를 키우면 된다. 물론 이 경우에도 신호의 동적 영역(Dynamic range)의 한계로 여러 가지 비선형 효과가 발생하여, 망원경과 레이저의 크기를 제한적으로 사용할 수밖에 없어 가능한 적은 에너지의 레이저로 다량의 펄스 수의 레이저를 사용한다.
- [0031] 이에 제한된 시간에 가능한 많은 방향에서 또 그 방향으로 각 거리에서 미세먼지의 소산계수를 얻기 위해서 많은 아이디어가 고려될 수 있다.
- [0032] 유한한 방향에서 측정된 여러 개의 라이다 신호로부터 그 중간 방향에 있는 다양한 지점의 미세먼지 정보는 주위의 측정된 지점의 값을 내삽하는 방법으로 얻을 수 있다. 내삽은 근처의 가장 가까운 지점의 값 혹은 그보다 더 먼 지점의 값을 사용할 수 있으며 다양한 방법들이 제안되고 활용되고 있다. 그러나 이러한 내삽법을 통하여 얻은 미지의 특정 방향에서의 미세먼지 산출 값의 정확도 문제는 확인이 곤란하다.
- [0033] 값의 정확도를 높이기 위하여 산출된 값을 되먹임 방법에 의하여 정확도를 개선해야 하며, 신뢰도가 낮은 지역의 값이 내삽에 사용되면 전체적으로 신뢰할 수 없는 값이 도출되기도 한다.
- [0034] 이 경우 다른 방법(카메라의 영상)을 통하여 얻은 값과 비교 검증 및 보정하여 그 값의 신뢰도를 향상시켜야 한다.
- [0035] 이러한 소산계수 정보는 일반인이 느끼는 미세먼지의 양과 밀접한 관계가 있으며 다른 물리량으로 시계, 그리고 물리화학적인 미세먼지의 영향을 알 수 있으나, 이는 기존의 단위 부피당 존재하는 미세먼지의 질량으로는 알 수 없는 정보를 제공하여, 소산 계수나 크기 정보가 앞으로 기상, 기후, 환경 등에서 중요한 지수로 활용될 수 있다.
- [0036] 주사형 미세먼지 라이다는 방위 및 고도각으로 레이저를 조사하고 그 후방산란 신호를 얻어 조사된 라이다 방향으로 미세먼지의 소산계수를 얻게 된다. 라이다 방향을 정하기 위하여 장치는 레이저발진기(101)와 망원경(103)과 연결되어 레이저를 수신하는 수신센서(104)와 카메라(105) 그리고 두 축 회전장치인 고도각 제어 모터(106) 및 방위각 제어 모터(107)로 구성되며, 상기 수신센서(104)와 카메라(105)의 신호는 광자계수기 혹은 신호처리 ADC(108)를 통해 변환되어 컴퓨터(109)를 통해 소산계수의 산출이 이루어진다.
- [0037] 주사형 에어로졸 라이다를 이용하여 주어진 영상에서 임의의 직선을 따라 존재하는 무한한 점으로 구성된 특정 단면으로(방향에 해당)의 미세먼지 라이다 신호를 얻고자 하는 경우, 몇 가지 유한한 방향으로만(영상에서는 몇 가지 종류의 점) 라이다 신호를 얻고 그 유한한 방향에서 무한히 많은 방향으로의 미세먼지의 소산계수 정보를 얻은 방법이 필요하다.
- [0038] 본 발명은 주어진 기존의 주사형 미세먼지 라이다와 카메라(105)를 동시에 활용하는 것이 주요 특징 중 하나이다.
- [0039] 도 6은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 순서도로서, 언급된 주사형 라이다 시스템을 통해 다음과 같은 일련의 절차로 본 발명이 이루어짐을 나타내고 있다.
- [0040] 먼저, 정렬단계(S 110)로서, 레이저발진기(101)를 통한 레이저의 조사 방향과, 망원경(103)의 광축 방향과, 카메라(105)의 중심 화소방향을 같은 방향으로 정렬한다. 다음은 영상획득단계(S 120)로서 라이다 시스템 위치를 중심으로 360도 회전하며 모든 방향의 파노라마 영상을 획득하고, 설정단계(S 130)에서는 라이다 측정지점을 지정하고, 지정된 측정지점에서의 레이저 주사 및 측정시간을 설정하게 된다.
- [0041] 이후 측정단계(S 140)에서는 지정된 측정지점으로 레이저를 주사하며 순차적으로 라이다 신호를 얻게 되며, 각 측정지점으로부터 얻은 라이다 신호를 통해 소산계수를 얻는 제1산출단계(S 150) 및 상기 제1산출단계에서 얻은 거리 및 각도별 소산계수와, 내삽법, 상기 카메라의 영상 중 선택된 방법을 이용하여 측정하지 않는 지역과 방향에서의 소산계수를 얻는 제2산출단계(S 160)가 진행된다.
- [0042] 이후 측정시 상기 카메라를 통해 얻은 영상을 이용하여 내삽법이 적용된 지점의 소산계수를 보정하는 보정단계(S 170)를 수행할 수 있다.
- [0043] 이러한 일련의 단계에 대한 구체적인 내용을 이하에서 다룬다.
- [0044] 주사형 라이다는 설정된 고도각과 방위각으로 레이저를 주사할 수 있는 장치로, 주사 방향의 순서, 주사 방향의

개수, 한 방향에서 소요되는 측정 시간 등을 제어하면서 측정을 수행한다.

- [0045] 이때 주사 방향의 결정, 한 방향에서의 레이저의 조사 수 등은 라이다가 있는 위치를 중심으로 360도 회전한 모든 방향으로의 파노라마 영상을 획득하는 것으로 시작된다. 즉 자동 측정이 시작되기 전 미리 360도 방향에 대하여 영상을 얻고 원하는 측정지점을 정한 후, 각 측정 지점에서의 소요 시간, 즉 레이저 주사 및 측정시간을 입력하고 시작 버튼을 누르면 측정이 시작된다. 측정된 정보는 각 방향에서 거리에 따른 라이다 신호로서, 이 신호를 이용하여 각 방향에서의 미세먼지 소산계수를 얻는다.
- [0046] 측정된 각 방향에서부터 얻은 라이다 신호는 Klett 방법을 통해 원거리에서부터 점진적으로 얻어진다. 그러나 Klett 방법은 원거리에서의 정보가 필요하나, 수평방향으로 레이저를 조사하는 경우 원거리에서의 소산계수 값을 얻기는 불가능하다.
- [0047] 이에 원거리에서의 소산계수를 얻은 방법과 동시에 검증하는 방법이 요구된다. 본 발명에서는 1) Klett 방정식을 적용하기 위해서, 원거리에서의 소산계수를 정하는 법과 그렇게 정해진 원거리에서의 소산계수를 검증하고 되먹임을 통하여 개선하는 방법을 다룬다.
- [0048] 특히 미세먼지가 많은 공단지역이나, 전체적으로 미세먼지가 많은 날, 혹은 굴뚝을 통과한 방향으로의 라이다 신호 분석에서 이러한 방법이 유효하게 적용될 수 있다.
- [0049] 또한, 주사형 에어로졸 라이다의 또 다른 문제는 주사 방향이 유한함으로 이를 보정하는 것에서 발생한다. 즉 360도 방향으로 레이저를 순차적으로 다른 방향을 향해 조사하여 미세먼지 정보를 얻는 경우 그 각도 분해능에 한계가 존재할 수밖에 없다.
- [0050] 이는 레이저 강도의 한계, 너무 강한 레이저를 조사하는 경우 센서의 비선형효과 발생, 원거리 신호의 확보를 위한 장시간 측정 필요, 미세먼지의 국부성(locality), 미세먼지의 시간적 역동적 변화(dynamic changes) 등을 고려할 때 피할 수 없는 상황이다. 즉 원하는 모든 각도에서 충분한 각도 분해능을 얻기는 현실적으로 불가능하다.
- [0051] 이러한 이유로 실제 측정되는 주사 각도는 보통 10도 내외로 일정하게 두고 360도 혹은 원하는 지역을 주사하게 되는데, 측정하지 않는 영역에서의 정보는 측정된 다른 지역의 정보를 이용하여 내삽을 하게 된다.
- [0052] 그러나 굴뚝 근처에서는 에어로졸의 밀도 변화가 역동적이고 공간적으로 크게 다르기 때문에 단순한 내삽의 방법으로는 그 정보를 얻을 수 없으므로 특별한 방법으로 내삽을 해야 한다.
- [0053] 본 발명에서는 내삽 방법을 기존의 단순한 방법에서 벗어나 그 값을 보다 정확히 알 수 있도록 하며, 또한 검증하는 방법까지 적용한다. 또한, 이러한 목적을 달성함과 동시에 내삽을 효율적으로 수행하기 위하여 원하는 조사 영역을 미리 정하는 방법도 포함한다.
- [0054] 본 발명에서 주사형 라이다는 원하는 고도각과 방위각으로 레이저를 조사할 수 있도록 구성되며, 기본적으로 레이저 제어 광학부(102)를 구비한 레이저발진기(101), 카메라(105), 망원경(103) 및 이에 연결된 수신센서(104)와 두 축 모터, 즉 고도각 제어 모터(106) 및 방위각 제어 모터(107)로 구성된 주사계를 구비한다.
- [0055] 주사계는 광학계 전체를 주사하는 방법과 대구경 거울 두 개를 사용하여 거울만 고도각과 방위각으로 주시시키는 방법이 있는데, 두 방법 모두 주사 시스템과 광학계로 구성된다.
- [0056] 이와 같이 주사형 라이다는 두 가지 유형이 있으며, 본 발명은 두 가지의 주사형 미세먼지 라이다 시스템에 모두 적용 가능하다. 다만, 거울만 조사하는 경우는 카메라로 입사되는 영상이 라이다 시스템 밖에서 바라본 좌표계와 달리 왜곡되므로 이를 보정해야 한다.
- [0057] 도 1은 본 발명에 따른 주사형 에어로졸 라이다의 구성도로서, 라이다 장치는 레이저발진기(101)를 포함하여 그로부터 발진된 레이저의 파장을 각각 분리하여 확대하고 다시 결합하여 대기 중으로 조사하는 광학계, 즉 레이저 제어 광학부(102)를 포함하는 송신단과, 대기 중에서 산란되어 180도로 되돌아(후방산란) 오는 빛을 모으는 망원경(103)과 빛을 수신하기 위한 각종 수신센서(104)로 구성된 수신단으로 구성되며, 본 발명의 주사형 라이다 시스템은 이러한 기존의 라이다 장치에서 카메라(105)와 주사 및 제어부가 포함되는 형태를 갖는다.
- [0058] 레이저를 원하는 방향으로 정확하게 보내고 또한 그 방향을 가변시키기 위해서는 망원경(103)을 포함한 수신단과 동일한 방향을 향하도록 카메라(105)를 정밀 정렬하여야 한다. 즉 라이다 운영을 위하여 레이저발진기(101)를 통한 레이저의 조사 방향, 망원경(103)의 광축 방향, 그리고 카메라(105)의 중심 화소에서의 방향은 같은 방향으로 정렬 조립된다.

- [0059] 카메라(105)의 시야각(FOV)은 사용하는 렌즈에 따라 다르지만 수십 도에서 크게는 3.14 rad 정도에까지 이르며, 망원경(103)의 시야각은 라이다 시스템의 설계 특성상 1 mrad 이하가 되도록 설계한다. 레이저의 발산각 역시 망원경의 시야각의 약 1/2 정도가 되도록 설계한다.
- [0060] 그러므로 일반적으로 카메라의 풍경은 넓은 각도 영역을 지니며, 카메라(105)에서 얻은 영상의 중심은 망원경(103)의 광축이 됨과 동시에 레이저발진기(101)가 조사하는 방향이 된다.
- [0061] 도 2는 본 발명에 따른 주사형 미세먼지 라이다 시스템의 효율적 운영방법을 위한 차트이다.
- [0062] 먼저, 카메라(105)를 사용하여 측정하고자 하는 공간을 정하고 그 공간 전체를 포함하는 풍경을 촬영한다. 이렇게 촬영된 영상은 여러 개의 사진으로 구성되며 이러한 영상들을 이용하여 하나의 파노라마 영상으로 표현한다.
- [0063] 즉 하나의 파노라마 영상에는 측정하고자 하는 모든 지역이 포함되며, 도 2의 (a) 사진에 표현된 동그란 원의 중심과 같이 원하는 지역은 임의로 선택할 수도 있으며, 적절한 등 간격으로 자동으로 선택이 될 수 있다. 즉 측정하고자 하는 방향은 카메라(105)의 영상에서 얻은 파노라마 사진의 화소점을 선택하여 정할 수 있다.
- [0064] 일반적으로는 도시나 공단을 모니터링하는 경우 주위에 아파트나 산 혹은 굴뚝과 같은 장애물이 있기 때문에 자동으로 선택된 영상의 화소점($(\theta_i, \phi_i)(i=1:N_a)$)에서 그 방향을 이동하거나 제거할 수도 있다.
- [0065] 도 2의 (b)는 측정하고자 하는 방향을 예로 든 것이다.
- [0066] 원하는 방향에서 사용되는 레이저의 펄스 수는 과도하게 설정할 필요가 없기 때문에 원하는 거리에서의 라이다 신호가 충분히 크면 더는 측정이 불필요하다.
- [0067] 다만, 하나의 방향에서 최대 사용하는 레이저의 펄스수(N_t)는 미리 설정하여야 한다. 예를 들어 도면에서 $r_{\max} = 5km$ 값이라면 즉 5km까지 측정을 원한다면, 5km에서 얻은 라이다의 신호 크기가 특정 값(P_t) 이상이면 더는 측정이 불필요하다.
- [0068] 여기서 신호의 문턱치 값(P_t)은 다음과 같은 [수학식 1]로 정해 질 수 있다.

수학식 1

[0069]
$$P_t = SNR \times \sqrt{P_{back}}$$

- [0070] [수학식 1]에서 P_{back} 은 배경신호를 나타내고, SNR은 신호대 노이즈의 비를 의미하며 3 이상의 값을 취하는 것이 보통이다.
- [0071] 즉 한 방향에서 최대 거리에서의 라이다 신호가 배경신호의 신호 요동 값보다 크면 더는 측정하지 않고 다른 방향으로 이동한다. 이런 방법을 통해 최소한의 레이저만 이용하고도 한 방향에서 라이다 신호를 얻을 수 있게 되기 때문에 측정시간을 단축시켜 시간 분해능을 높일 수 있다.
- [0072] 하나의 방향에서 원하는 라이다 신호를 획득하면 다른 방향으로($k=k+1$) 주사 장치를 이동시켜서 같은 방법으로 재측정이 이루어진다.
- [0073] 원하는 모든 방향(N_a)에서 측정이 이루어지면($K > N_a$), 도 2 (c)와 같이 소산 계수를 모든 방향에서 Klett 방법이나 기타의 방법으로 얻게 된다. 도 2 (c)의 한 방향에대한 모든 거리에서의 소산계수 값의 도출방법은 도 3을 통해 구체적으로 기술한다.
- [0074] 도 2 (d)는 도 2 (c)에서 구한 거리, 각도별 소산계수와 내삽법, 그리고 카메라의 영상을 이용하여 측정하지 않는 지역과 방향에서 소산계수를 얻어 2차원 평면에서의 소산계수를 얻어 그림으로 표현한 것이다. 도면 2 내지 4는 그 구체적인 결과를 나타낸 것이다. 이렇게 내삽법과 카메라(105)를 이용하여 모든 지점과 방향에서 소산계수를 얻는 방법은 도 4를 통해 구체적으로 설명한다.
- [0075] 도 3은 본 발명에 따라 하나의 라이다 신호로부터 원하는 모든 거리에서 라이다 신호를 분석하는 방법을 나타낸 차트로서, 카메라의 영상과 주사형 라이다로 얻은 정보를 이용하여 전체 2차원 평면에서 라이다 미세먼지의 소산계수를 추출하는 과정을 나타낸 것이다.

[0076] 도 3은 도 2에서 소산계수($\alpha(r, \theta_i, \phi_i); r_{\min} < r < r_{\max}, i = 1, \dots, N_a$)를 구하고, 측정하지 않는 방향에서 예상되는 값을 내삽하는 과정($\alpha(r, \theta_{M_i}, \phi_{M_i}), \theta_i < \theta_{M_i} < \theta_{i+1}, \phi_i < \phi_{M_i} < \phi_{i+1}$)을 나타낸 것이다. 여기서 θ_{M_i}, ϕ_{M_i} 는 각각 주사형 미세면지 라이다 장치에 의하여 측정되지 않은 방향을 나타내고, a 는 소산계수를 의미한다.

[0077] 즉 소산계수 값은 주어진 방향에서 모든 거리 r 에서 내삽된다는 의미이다.

[0078] 도 3을 참고하면, 먼저 주어진 방향에서 얻은 라이다 신호에는 태양과 같은 배경신호가 포함되어 있기 때문에 그 신호 중에서 배경신호를 제거(preprocessing)하고 또한 거리에 따른 신호의 변화를 제거하는(normalization)하는 전처리 과정(3-1)을 거친다.

[0079] 이러한 전처리를 거친 라이다 신호에 거리 제곱을 곱하고 로그를 취하함으로 이론적으로 재구성된 라이다 신호가 다음의 [수학식 2]로 표현된다.

수학식 2

$$\log(P(r)r^2) = \log(C_1 \beta(r)) - 2 \int_0^r \alpha(r') dr'$$

[0080]

[0081] [수학식 2]에서 P 는 실제 얻어지는 라이다 신호이고 r 은 거리, $\beta(r)$ 은 거리에 따른 후방산란계수, 그리고 $\alpha(r)$ 은 원하는 거리에 따른 소산계수이다. [수학식 2]에서 거리에 따른 소산계수는 수학적으로 얻을 수 없는 값이기 때문에 적절한 가정이 필요하다.

[0082] 그러나 본 발명에서 얻고자 하는 것은 수평방향의 거리에 따른 소산계수이며, 만약에 측정된 방향에서 특정 지역에만 미세면지의 오염원(굴뚝)이 있고 기타 지역은 비교적 거리에 다른 소산계수의 변화가 적은 지역이 있다면 위의 [수학식 2]에서 근사적으로 소산계수를 구할 수 있다.

[0083] 즉 도 3의 3-2는 이러한 조건을 만족하는 거리영역을 구하는 과정을 표현한 것으로, [수학식 2]에서 소산계수와 후방산란계수는 기본적으로 거리 의존성이 있으나 도 3의 3-2와 같은 조건을 만족하는 지역이 존재한다면, [수학식 2]에서 그 특정지역 r_k 에서의 소산계수를 근사할 수 있다. 즉 [수학식 2]는 다음의 [수학식 3]과 같이 표현된다.

수학식 3

$$S(r) = \log(P(r)r^2) = C_2 - 2\alpha_c r, \text{ when } \alpha(r) = \alpha_c$$

[0084]

[0085] 그러므로 [수학식 3]에서 거리에 따른 신호의 기울기가 바로 그 지역에서 소산계수가 된다. 도 3의 3-2-1은 최초 라이다 신호($P(r)$)를 그린 것이고, 3-2-2는 배경신호를 제거하고 [수학식 2]를 적용한 것을 나타내고 있다. 3-2-3은 특정 거리 즉 2.5km 지점에서 거리에 따른 신호 특징을 그린 것으로 [수학식 3]과 같이 선형적으로 변한다는 것을 보여준다. 반면에 3-2-4는 SNR 값이 작아지고 거리에 따라서 소산계수가 달라져서 선형성을 인정하기가 어렵다는 것을 보여준다.

[0086] 본 발명의 실시예는 3-2-3과 같이 선형성이 확보된 영역을 찾아서 그 지점의 소산계수를 얻는 것이 라이다 신호를 분석하는데 중요한 시작점이 된다. 또한, 도면과 같이 이러한 과정으로 소산계수를 얻은 거리는 보통 측정하고자 하는 최대거리(r_m)보다 작은 거리에서 이루어진다.

[0087] 왜냐하면, 최대 거리에 가까운 거리에서는 그 지점에서의 $SNR(r_k)$ 값이 최대 거리에서의 그 값 SNR_c 보다 커서 [수학식 3]과 같이 선형적으로 변하는 지역이 넓고 신호가 깨끗하기 때문이다. 이렇게 근거리에서 구해진 소산계수를 도 3에서는 $\alpha(r_k)$ 로 표현하였다.

[0088] 라이다 신호를 분석하는 것은 수학적으로 1차 미분방정식을 푸는 문제로 귀결되고, 미지의 다른 거리에서의 소산계수의 값, 즉 1차 미분방정식의 해는 경계조건을 이용하여 구해질 수 있다.

[0089] 경계조건으로 근거리 신호를 사용할 수 있으나, Klett이 이론적으로 밝혔듯이 근거리 신호를 이용하는 경우 원거리에서의 소산계수 값은 경계값에 오차가 있거나 신호에 작은 오차만 발생하여도 점점 그 오차가 증폭되는 경향이 있으며, 이러한 이유 때문에 원거리 신호를 사용한다.

[0090] 도면 3의 3-3은 원거리에서 소산계수를 결정하는 방법을 나타낸다. 굴뚝이 없는 경우엔 원거리에서의 소산 계수를 ($\alpha(r_m)$)을 [수학식 2]를 통하여 근거리에서의 $\alpha(r_k)$ 를 구하는 방법과 같이 구할 수 있으며 이는 3-2-4에 나타내었다.

[0091] 굴뚝이 있다면, 신호가 너무 작아서 [수학식 3]으로 구할 수 있는 방법이 없기 때문에 굴뚝을 지난 후 원거리에서의 소산계수와 근거리에서의 소산계수가 같다고 가정한다.

[0092] 도 3의 3-4는 원거리에서의 소산계수($\alpha(r_m)$)를 이용하여 근거리의 다른 모든 지점에서의 소산계수를 구하는 방법을 간단히 나타낸 것이다. Klett 역산방정식은 [수학식 2]의 미분 방정식의 해를 나타낸 식으로 계산되는 소산계수($\alpha_c(r)$)는 아래 [수학식4]와 같이 표시된다.

수학식 4

$$\alpha_c(r) = \frac{\exp((S-S_m)/k)}{1/\alpha(r_m) + 2/k \int_r^{r_m} \exp((S-S_m)/k) dr'}$$

[0093]

[0094] [수학식 4]에서 k는 소산계수와 후방산란계수의 관계를 결정짓는 값에 해당하며, k=1이라 두어도 큰 오차가 없다. 도 3 내지 4는 [수학식 4]를 이용하여 최대거리(r_m)보다 작은 거리에서 소산계수를 구하는 과정을 나타낸 것이다.

[0095] 만약에 최대거리(r_m)에서 소산계수를 정확히 구하지 못하면, 전체적으로 소산계수의 프로파일이 낮아지거나 높아지는 경향을 지닌다. 그러므로 얻기 어려운 최대거리(r_m)에서 소산계수를 정확히 구할 방안을 찾는 것이 매우 중요하며, 그렇지 못할 경우 이를 회기 기법으로(iteration) 보정하는 방법이 제시되어야 한다.

[0096] 도 3의 3-5 과정은 3-4 과정을 통하여 근거리까지 구한 소산계수($\alpha_c(r)$) 값들 중에서 3-2에서 구한 비교적 정확한 값을 지닌 거리 r_k 에서의 소산계수 값($\alpha(r_k)$)은 단순히 거리 $\alpha_c(r_k)$ 의 대입으로 얻어지며, 이 값과 3-2에서 구한 값을 비교하는 과정을 나타낸 것이다.

[0097] 만약 이렇게 거리 대입에 의한 것($\alpha_c(r_k)$)과 기울기를 이용하여 구한 값($\alpha(r_k)$)의 차이가 주어진 오차(ϵ) 이하이면 전체거리에서의 소산계수는 3-4 즉 [수학식 4]로 구한 것으로 정해진다.

[0098] 만약에 그 오차가 주어진 오차(ϵ)보다 크다면 $\alpha(r_m)$ 을 다시 구하여 3-4의 과정을 되풀이한다.

[0099] 오차를 보정하여 다시 3-4의 과정을 거치는 과정은 3-6에 나타나 있다. 3-2 과정에서 선형적인 구간(r_k)을 찾아 $\alpha(r_k)$ 를 선형 피팅을 이용하여 구하는 과정에서 얻은 거리 r_k 와 최대 거리 r_m 의 차이에 의하여 새롭게 구하는 $\alpha(r_m)$ 방법이 두 가지 방법으로 나누어진다.

[0100] 먼저, 선형적인 구간이 최대거리($\triangle r$)보다 크다면, 3-6-2 방법을 취하고, 작다면 3-6-1 방법을 취한다. 3-6-1은 근거리 신호로부터 원거리 신호의 소산계수 정보($\alpha(r_m)$)를 구하는 전통적인 방법을 따른다.

[0101] 본 방법은 [수학식 4]에서 분모에 + 대신에 - 값을 넣고, 분모의 적분구간을 근거리에서 원거리로 적분하는 것을 나타내며, 구체적으로는 다른 많은 연구가에 의하여 논의되었다.

[0102] 3-6-1 방법은 알고 있는 지점의 소산계수로부터 미지의 거리에 있는 소산계수를 구함에 있어, 그 거리 차이가 크지 않으면, 실제 값과 이론적으로 얻은 값의 차이가 작다는 것에 착안한 것이다. 만약 그 거리 차이가 크다면 3-6-2의 방법으로 원거리에서의 새로운 소산계수를 구한다.

- [0103] 일반적으로 3-6-1 방법은 1회에 한하여 적용 가능하다. 일반적으로는 새롭게 $\alpha(r_m)$ 를 구하는 방법은 3-6-2 방법을 택하게 되는데, 이 과정은 3-6-2(원거리 소산계수 결정), 3-4(새롭게 전체 거리 소산계수 결정), 그리고 3-5(근거리에서 소산계수오차 크기 판단) 과정을 되먹임으로 지속되어 주어진 조건(3-5)가 만족 될 때까지 되먹임 된다.
- [0104] 이러한 되먹임 방법은 일반적으로 [수학식 4]의 특징 때문에 3-6-2 과정은 하나의 값으로 수렴되고 3-5의 과정도 만족하게 되어 최종 결과를 도면 3-7과 같이 얻을 수 있게 된다.
- [0105] 도 4는 본 발명에 따라 측정되지 않은 지역의 값을 내삽하는 방법을 나타낸 개념도로서, 도 2의 2-3에서 2-4로 정보를 얻는 과정 즉 내삽하는 과정을 구체적으로 나타낸 것이다.
- [0106] 도 4의 (a)는 1차원 공간에서 일반적인 내삽의 과정을 나타낸 것이며 (b)는 2차원 원형좌표계에의 내삽법을 보여주기 위하여 제시된 도면이다.
- [0107] 2차원 내삽에서는 1차원의 방법을 응용하여 바로 적용 가능한데, 먼저 1차원에서는 도 4 (a)의 r 점에서의 $\alpha(r)$ 값은 주위의 r_k 위치의 $\alpha(r_k)$ 과 r_{k+1} 위치의 $\alpha(r_{k+1})$ 값을 이용하여 [수학식 5]와 같이 구할 수 있다.

수학식 5

$$\alpha(r) = \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{r_{k+1} - r_k} (r - r_k) + \alpha_k$$

- [0108]
- [0109] 마찬가지로 2차원에서도 도 4 (b)에서 표기된 알고 있는 점 A, B, C, D점에서의 소산계수 $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C, \alpha_D$ 값을 이용하여 원하는 지점 P에서의 소산계수를 순차적으로 구할 수 있다. 즉 E점에서의 소산계수 값은 1차원에서처럼 A, B점에서의 알고 있는 소산계수 값을 이용, F점은 B와 D점에서의 알고 있는 소산계수 값을 이용, G 점은 C와 D점에서의 알고 있는 소산계수 값을 이용, H점은 A와 B점에서의 알고 있는 소산계수 값을 이용한다.
- [0110] 마지막으로 E, F, G, H에서의 계산된 값을 이용하여 P점에서의 소산계수를 얻을 수 있다.
- [0111] 이러한 방법으로 구한 전체 2차원에서의 값이 부드러운 곡선모양을 지니지 못하기 때문에 실제로 쌍삼차 내삽법(bicubic interpolation)을 사용할 수 있다.
- [0112] 쌍삼차 내삽법은 전체적으로 부드러운(smooth) 곡면을 만들 수 있어 1차원 일차선형방법보다 더 많이 사용된다.
- [0113] 쌍삼차 내삽법은 주어진 A, B, C, D로 구성된 내부의 2차원 점에서의 소산계수를 3차원 함수로 [수학식 6]과 같이 구하고 그 16개의 계수 a_{ij} ($i=0,1,2,3, j=0,1,2,3$)를 근사하고 그 계수를 구하여 전체 내부 모든 점에서 구하는 것이다.

수학식 6

$$\alpha(x,y) \approx C_\alpha(x,y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j$$

- [0114]
- [0115] 도 4 (b) 2의 ABCD내부 임의의 점(x,y)에서의 소산계수 $\alpha(x,y)$ 는 3차 함수($C_\alpha(x,y)$)로 근사가 가능하며, 그 계수는,
- [0116] 1) 각 4점 A, B, C, D에서의 주어진 값을 만족한다 - 4개의 조건 만족.
- [0117] 2) 각 4점 A, B, C, D에서의 X 방향으로의 미분 값은 측정된 주위의 값을 평균하여 구할 수 있고 그 값과 함수 $C_\alpha(x,y)$ 로부터 얻어지는 값은 같다 - 4개의 조건 만족.
- [0118] 3) 각 4점 A, B, C, D에서의 y 방향으로의 미분 값은 측정된 주위의 값을 평균하여 구할 수 있고 그 값과 함수 $C_\alpha(x,y)$ 로부터 얻어지는 값은 같다 - 4개의 조건 만족.

- [0119] 4) 각 4점 A, B, C, D에서의 xy 방향으로의 미분 값은 측정된 주위의 값을 평균하여 구할 수 있고 그 값과 함수 $C_\alpha(x, y)$ 로부터 얻어지는 값은 같다 - 4개의 조건 만족.
- [0120] 상기 1), 2), 3), 4)의 조건에서 총 16개의 방정식을 얻을 수 있기 때문에 a_{ij} 를 구할 수 있어 ABCD 지점 내부의 모든 지점에서의 소산계수를 단순히 $C_\alpha(x, y)$ 에 대입만하면 얻을 수 있다.
- [0121] 쌍삼차 내삽법은 한 번의 계산으로 그 내부 모든 점에서 소산계수 값을 얻을 수 있고, 또한 ABCD 뿐 아니라 주위의 다른 값도 위의 2), 3), 4) 과정에서 미분을 계산하는데 사용하기 때문에 전체적으로 매끄러운 곡면을 지닌다.
- [0122] 그러나 ABCD를 포함한 그 주위의 다양한 측정값은 서로 다른 정도의 신뢰도를 가지고 특정된 소산계수를 가지고 있다.
- [0123] 예를 들어 특정 방향의 라이다 신호는 굴뚝을 관통한 것이고 다른 하나는 일반적인 공기를 통과한 것이라면 굴뚝을 통과한 라이다 신호는 작은 신호를 보이고 있기 때문에 역산에서 얻은 소산계수도 그 신뢰도가 다를 수밖에 없다.
- [0124] 또 다른 방법으로는 거리기반 기초함수(radial Basis Function) 방법은 이러한 점을 보완한 것이다. 특정 위치에서의 소산계수는 우리가 얻을 수 있는 모든 위치의 소산계수를 활용하여 표현하는 것이 그것이다.
- [0125] 본 방법은 원하는 즉 알고 싶은 평면 공간을 생각하고 그 평면에는 임의의 N개의 위치($(x_i, y_i) \ i=1, \dots, N$)는 이미 알고 있는 그 값을 알고 있다고 가정하고 나머지 미지의 부분을 하나의 수학적 함수로 표현하자는 것이다. 그 함수를 $C_\alpha(x, y)$ 라 한다면 다음의 [수학식 7]로 표현이 가능하다.

수학식 7

$$C_\alpha(x, y) = \sum_{i=1}^N w_i \phi_i(x, y) \quad \text{단, } \phi_i(x, y) = \exp\left(-\frac{d(x, y; x_i, y_i)}{\sigma^2}\right) \text{ or } \phi_i(x, y) = \frac{1}{1 + (d(x, y; x_i, y_i)/\sigma)^{2k}}$$

- [0126]
- [0127] 여기서 N개의 가중치 값(w_i)은 측정된 N 지점에서 측정값($v_i \ i=1, \dots, N$)과 유도된 함수 $C_\alpha(x, y)$ 의 값이 같도록 ($C_\alpha(x_i, y_i)$) 조절한다. 그러므로 본 방법 또한 가중치 값은 유일하게 정해지며, 특정 지역에서 측정된 값에 더 가중치를 둘 수 없어 신뢰도가 높은 지점에 더 가중치를 두는 방법이 없다.
- [0128] 이에 거리기반 기초함수와 유사한 방법으로 셰파드(Shepards) 방법이 사용되기도 한다. 본 방법은 측정된 거리기반 기초함수와 유사한 방법이나, 가중치와 기함수의 역할이 바뀌었으나 수학적으로 유사한 이론이라 할 수 있다. 즉 원하는 지역의 값은 근거리에서 측정한 값에 더 많은 가중치를 두는 방법이다. 본 방법을 알기 쉽게 표현하면 [수학식 8]과 같다.

수학식 8

$$C_\alpha(x, y) = \sum_{i=1}^N v(x_i, y_i) w(x, y; x_i, y_i)$$

- [0129]
- [0130] [수학식 8]에서 $v(x_i, y_i)$ 는 측정이 수행된 지점을 나타내며 함수가 아니고 상수 값이다. 반면에 가중치는 함수로 표현된 것이다. 거리기반 기초함수와 다른 점은 기초함수는 가중치가 상수이며, 본 셰파드 방법은 함수로 표현된다. 그러므로 두 방법은 본질적으로 같은 방법이다.
- [0131] 지금까지 살펴본 것과 같이 지금까지 어떤 방법도 현실적으로 서로 다른 SNR 값을 지닌 라이다 신호로 다른 신뢰도를 소산계수를 보정하는 방법이 제시되지 않았다.
- [0132] 본 방법은 쌍삼차 내삽법의 차수를 이차함수로 바꾸어 우량조건문제(well posed problem)로 바꾼 다음 다시 가

가중치를 넣어 거리기반 기초함수 방법이나 세퍼드 방식처럼 가중치를 구하는 문제로 바꿀 수 있다.

- [0133] 이 경우 가중치는 신호의 SNR에 비례하게 그리고 거리에는 역관계가 있도록 한다. 또한, 모든 지점에서의 가중치를 독립적으로 주면 정해야 할 가중치의 수가 너무 많기 때문에 그 가중치는 신호의 SNR에 비례하도록 가중치를 둔다.
- [0134] 마찬가지로 거리에 따른 가중치는 이미 그 거리를 알 수 있기 때문에 가중치를 따로 결정할 수학적 과정이 필요가 없으며 다만 전체 가중치를 규격화(Normalization)하는 것만으로도 충분하다.
- [0135] 소개된 두 방법은 장단점이 있는데, 쌍삼차 내삽법은 한 번의 계산으로 여러 지점의 소산계수를 한꺼번에 얻을 수 있는 장점이 있는 반면, 각 측정값이 갖는 오차에 대한 정보를 넣을 수 없는 단점이 있고, 가중치를 이용하는 세퍼드 방법은 매번 계산을 하여야 하는 단점을 가지고 있다.
- [0136] 본 발명은 두 가지 장점을 모두 사용하는 것에 관한 것이고, 특히 측정값이 갖는 오차 정보를 가중치로 활용할 수 있고 한꺼번에 원하는 영역의 장소의 소산계수를 동시에 얻을 수 있기 때문에 속도 측면에서도 유리하다.
- [0137] 구체적으로, 본 발명에서 제안하는 방법은 도 4 (c)와 같이 4개의 지점에서 측정하여 얻은 소산계수와 주위의 소산계수를 이용하여 구한 소산계수의 변화를 이용하여 임의의 점(x,y)에서 소산계수를 추출하는 것이다.
- [0138] 4개의 지점뿐만 아니라 다양한 더 멀리 존재하는 측정값도 이용이 가능하며, 본 발명에서는 4개 점을 기준으로 상세히 설명한다. 단 측정하여 얻은 값의 정확도를 고려하여 내삽을 수행한다.
- [0139] 정확도는 각 측정된 지점은 소산계수와 함께 SNR 값도 이용한다는 의미이며, 측정값을 4개 이상 사용할 경우 원 거리에 있는 측정값은 그 값과 동시에 거리도 고려하여 가중치를 재산정 할 수 있다.

수학식 9

$$\alpha(x,y) \approx C_{\alpha}(x,y) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x^i y^j$$

- [0140]
- [0141] 원하는 점(x,y)에서의 소산계수 $C_{\alpha}(x,y)$ 는 도 4 (c)에서 4개의 점(A, B, C, D)으로 구성된 직사각형의 내부를 의미하며, [수학식 9]는 4개의 지점에서 그 값이 가능한 측정값과 같아야 한다.
- [0142] 또한, 4개의 각 지점에서 x 와 y의 두 방향으로의 미분 값을 정할 수 있으며 그 값도 측정한 값과 일치해야 한다. 그러므로 [수학식 9]에서 9개의 미지수 a_{ij} 를 얻기 위하여 9개의 상수 a_{ij} 를 구하는 것이 중요하다.
- [0143] 측정값의 모임을 벡터 $\bar{Y}$ 로 표기한다면 $\bar{Y}=(Y_1, \dots, Y_{12})$ 로 12가지가 된다.
- [0144] Y_{1-4} 는 네 지점에서 측정한 소산계수의 값이고(1그룹),
- [0145] Y_{5-8} 는 네 지점에서 x 방향의 소산계수의 기울기(2그룹),
- [0146] Y_{9-12} 는 네 지점에서 y 방향의 소산계수의 기울기(3그룹),
- [0147] 실험적으로 얻을 수 있는 값은($\bar{Y}$) 각 네 지점에서의 소산계수, 2방향으로의 기울기 변화 등 총 12가지 정보를 활용할 수 있다. 그 값들과 이론적으로 얻을 수 있는 16개의 값의 오차를 최소화하는 상수값 9개(a_{ij})를 구하는 것이 목적이다.
- [0148] 1) 유추되는 1그룹의 값은 [수학식 9]에서 각 지점에서의 좌표(x, y)=A, B, C, D를 넣으면 된다. 즉 $C_{\alpha}(A), C_{\alpha}(B), C_{\alpha}(C), C_{\alpha}(D)$ 로 정할 수 있다.
- [0149] 2) 유추되는 2그룹은 [수학식 9]를 x 방향으로 미분한 식 $C_{\alpha,x}(x,y) = \frac{\partial C_{\alpha}}{\partial x} = \sum_{i=0}^2 a_{ij}(i) x^{i-1} y^j$ 에 역시 좌표(x, y)=A, B, C, D를 넣은 것 4개,

[0150] 3) 유추되는 3그룹은 [수학식 9]를 y 방향으로 미분한 식 $C_{\alpha,y}(x,y) = \frac{\partial C_{\alpha}}{\partial y} = \sum_{i=0}^2 a_{ij}(j)x^i y^{j-1}$ 에 역시 좌표(x, y)=A, B, C, D를 넣은 것 4개,

[0151] 각각의 값을 하나의 식으로 표시하면,

[0152] $\vec{C} = (C_{\alpha}(A), C_{\alpha}(B), C_{\alpha}(C), C_{\alpha}(D), C_{\alpha,x}(A), C_{\alpha,x}(B), C_{\alpha,x}(C), C_{\alpha,x}(D), C_{\alpha,y}(A), C_{\alpha,y}(B), C_{\alpha,y}(C), C_{\alpha,y}(D))$ 은 측정된 12개의 $\vec{Y}$ 값과 오차를 최소화하도록 9개의 변수 a_{ij} 를 정할 수 있어야 한다.

[0153] 구하고자 하는 미지수 9개 a_{ij} 를 하나의 벡터 $\vec{X} = (a_{00}, a_{01}, a_{02}, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{20}, a_{21}, a_{22})^T$ 표시하면 오차 제곱은 다음의 [수학식 10]으로 표시되며,

수학식 10

[0154] $\epsilon^2 = | \vec{Y} - \vec{C} |^2 = | \vec{Y} - M\vec{X} |^2$

[0155] 각각의 측정값에 오차가 되도록 a_{ij} 를 정하는 문제이다. 여기서 M은 아래와 같다.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & y_A & y_A^2 & x_A & x_A y_A & x_A y_A^2 & x_A^2 & x_A^2 y_A & x_A^2 y_A^2 \\ 1 & y_B & y_B^2 & x_B & x_B y_B & x_B y_B^2 & x_B^2 & x_B^2 y_B & x_B^2 y_B^2 \\ 1 & y_C & y_C^2 & x_C & x_C y_C & x_C y_C^2 & x_C^2 & x_C^2 y_C & x_C^2 y_C^2 \\ 1 & y_D & y_D^2 & x_D & x_D y_D & x_D y_D^2 & x_D^2 & x_D^2 y_D & x_D^2 y_D^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 1 & y_A & y_A^2 & 2x_A & 2x_A y_A & 2x_A y_A^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & y_B & y_B^2 & 2x_B & 2x_B y_B & 2x_B y_B^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & y_C & y_C^2 & 2x_C & 2x_C y_C & 2x_C y_C^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & y_D & y_D^2 & 2x_D & 2x_D y_D & 2x_D y_D^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 1 & 2y_A & 0 & x_A & 2x_A y_A & 0 & x_A^2 & 2x_A^2 y_A \\ 0 & 1 & 2y_B & 0 & x_B & 2x_B y_B & 0 & x_B^2 & 2x_B^2 y_B \\ 0 & 1 & 2y_C & 0 & x_C & 2x_C y_C & 0 & x_C^2 & 2x_C^2 y_C \\ 0 & 1 & 2y_D & 0 & x_D & 2x_D y_D & 0 & x_D^2 & 2x_D^2 y_D \end{pmatrix}$$

[0156]

[0157] 본 발명에서 정의된 M은 4개의 측정값에 대하여 상세히 기술된 경우이나, 측정값이 많아지면 더 많은 A, B, C, D, E, F, ... 등의 지점에 대해서도 적용이 가능하다.

[0158] 최적의 미지수 9개는 오차가 최소가 되는 지점이며, 미지수 9개의 임의의 변동에 대하여 그 값이 최소값이란 의미이고, [수학식 10]은 이러한 점을 고려하여 $\vec{X} = (M^T M)^{-1} M^T \vec{Y}$ 를 얻을 수 있다.

[0159] [수학식 10]은 본 발명에서 고려하는 12개의 측정값 각각의 오차 합을 의미한다. [수학식 10]의 각 오차는 측정값과의 오차이며, 측정값 자체가 신뢰도가 낮아지면 그 특정값과의 오차도 가중치를 작게 두어야 한다. 각각의 오차에 대하여 다르게 가중치를 둘 수 있으며, 예를 들어 각 측정값이 상호 연관성이 없이 독립적인 측정값이라면, [수학식 10]은 다음과 같이 가중치를 고려하여 합한 식으로 표현 가능하다.

수학식 11

$$\epsilon^2 = | \vec{Y} - \vec{C} |^T W | \vec{Y} - \vec{C} |, W = \begin{pmatrix} W_1 & 0 & 0, \dots \\ 0 & W_2 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

[0160]

[0161] 가중치 매트릭스 W는 본 발명과 같은 경우엔 서로 독립적인 값으로 설정 가능하고 라이다 신호로부터 얻을 수

있다. 예를 들어 W_1 은 A 지점의 소산계수 측정값의 오차를 통하여 정량화가 가능하다. 예를 들어 라이다 신호가 굴뚝을 통과한 경우라면 신호의 크기가 급격히 줄어 그 지점의 소산계수는 신뢰도가 낮아진다.

[0162] 그러므로 [수학식 10]에서 그 지점에 해당하는 값은 가중치를 줄여야 한다. 마찬가지로 방법으로 다른 지점도 신호의 크기를 이용하여 각 지점의 가중치를 정할 수 있다. 본 발명의 예에서는 $W_{2,3,4}$ 는 각각 B, C, D지점의 측정 오차로 그 가중치를 정량화할 수 있다. 도 4 (c)에 나타난 것과 같이 K, E, H, I 등의 원거리에 있는 지점의 소산계수도 a_{ij} 추출에 이용한다면 그 가중치는 ABCD로 이루어진 계산 2차원 공간에서 거리가 멀리 존재하므로 사격형 ABCD의 중심에서 그 지점까지의 거리를 고려하여 가중치를 더 낮게 정해야 한다.

[0163] 즉 K, E, H, I 등의 원거리에 있는 지점은 값 자체의 오차와 거리를 동시에 고려한다. 그 다음 예로 W_5 는 A 지점의 x 축 방향으로의 미분값 오차에 의한 신뢰도로 평가 가능하며, 도 4 (c)의 예로 든다면 A 지점 주위의 B, E, F, K 등의 지점에서의 소산계수 값을 이용하여 A 지점의 변화율 즉 기울기를 얻을 수 있고, 그 신뢰도도 정량적으로 얻을 수 있다. 각 지점과 미지수 a_{ij} 역산에 사용되는 값의 가중치가 정의되면 최종적으로 원하는 미지수 $\vec{X}(a_{ij})$ 는 [수학식 12]와 같이 얻어진다.

수학식 12

[0164]
$$\vec{X} = (M^T W M)^{-1} (M^T W \vec{Y})$$

[0165] 도 5는 본 발명을 통해 최종적으로 얻어지는 결과물인 2차원 미세먼지 소산계수 추출 과정을 나타낸 차트로서, 5-1은 유한한 방향에서 소산계수를 각도에 따라 보여준 것으로, 도 3의 방법으로 얻은 것이다.

[0166] 유한한 공간 방향에서만 얻은 5-1의 값을 내삽의 방법으로 얻지 못한 다른 각도 방향의 거리에 따른 미세먼지의 소산계수를 통상의 방법으로 얻은 것이 5-3 과 같은 분포를 한다.

[0167] 그리고 본 발명에서 제공하는 가중치를 이용한 내삽법과 카메라의 영상 정보를 더하여 얻은 2차원 공간에서의 미세먼지 분포는 5-4와 같은 분포를 한다.

[0168] 도 3에서 소개한 역산 기법에서 알 수 있듯이 라이다가 위치한 근거리에 있는 굴뚝 때문에 강한 농도의 미세먼지가 분포되어 있는 것을 5-3과 5-4에서 알 수 있으며, 원거리에서는 이러한 굴뚝 효과 때문에 같은 방향의 원거리에서도 강한 배경 미세먼지의 농도가 높은 것으로 계산된다.

[0169] 이러한 결과는 전체적으로 미세먼지가 많은 날에도 계산된다. 굴뚝이나 기타 미세먼지가 많은 강한 미세먼지 분포를 지닌 지역을 레이저가 통과하면 그 신호 크기가 급격히 줄어들고 그런 이유 때문에 SNR 값이 작아지고, 전체적으로 계산된 값은 신뢰도가 떨어진다.

[0170] 즉 이러한 계산 결과는 도 4를 설명하면서 언급한 것과 같이 굴뚝은 지난 라이다 신호는 급격히 그 값이 줄어들고 그런 이유 때문에 신호의 SNR 값이 작아지고, 결국은 계산된 소산계수에서 믿을 수 없을 정도의 소산계수 값을 보이는 결과를 초래한다.

[0171] 도 5의 5-3에서 점선 5-3-1은 굴뚝에서 먼 거리에 있는 위치들을 나타낸다. 즉 도면에서 5-3-1의 위치를 따라 미세먼지의 상대적인 농도를 그리면 5-3-2와 같이 사인커브처럼 비현실적인 주기적인 신호 모양을 보인다.

[0172] 굴뚝과 먼 거리에서 5-3-2와 같이 이렇게 미세먼지 분포하는 것은 오직 계산상의 착오이며, 이를 보정하는 방법 중 하나가 도 4의 설명에서 기술된 것처럼 가중치를 이용한 내삽법이다.

[0173] 그러나 내삽법은 한 지점이나 부분적인 영역에서의 분포만 결정하기 때문에 한 방향 전체 값을 제어할 수 없다. 도 1에서 제시한 주사형 미세먼지 라이다의 경우엔 카메라가 장착되어 있는데, 카메라의 화소 정보를 이용하면 도 1과 같이 주사하여 얻은 하나의 주어진 각도에서 총 미세먼지 소산계수의 광학거리를 알 수 있다. 영상으로부터 그 화소 방향으로의 광학 깊이(optical depth, 소산계수와 거리의 곱)나 그 방향으로의 소산계수 평균을 구하는 과정은 기존 발명을 이용할 수 있다.

[0174] 즉 영상을 통하여 각 방향으로의 모든 거리에 있는 입자의 평균 소산계수는 도 5의 5-1에서 표현된 거리에 따른 소산계수의 평균값에 해당한다. 그리고 광학깊이를 거리를 따라 적분한 값이 그것이다. 그러므로 카메라의 정보

는 주어진 방향에서 소산계수의 총 적분 값을 제공한다고 할 수 있다.

[0175] 이러한 점으로 미루어 전체적으로 작은 미세먼지 분포를 보이는 5-3-3 방향의 미세먼지 프로파일과 큰 미세먼지 분포 프로파일을 보이는 5-3-4 방향으로의 총 적분 값은 카메라의 총 적분 값을 이용하여 보정이 가능하다.

[0176] 카메라를 이용한 미세먼지 소산계수의 평균값 추출 방법은 본 발명자의 기존의 발명(공개특허공보 제10-2020-0087010호, 임의의 풍경 사진 영상을 이용한 대기 중 미세 먼지의 소산 및 크기 정보 추출 시스템)을 이용할 수 있다.

[0177] 구체적으로는 카메라의 정보를 이용하여 주어진 미측정 방향의 전체 소산계수는 기 얻어 계산된 거리에 따른 미세먼지 소산계수 정보에 위치와 관계없이 일정 상수를 더하여 카메라 영상에서 얻은 광학 깊이와 같도록 보정하면 된다.

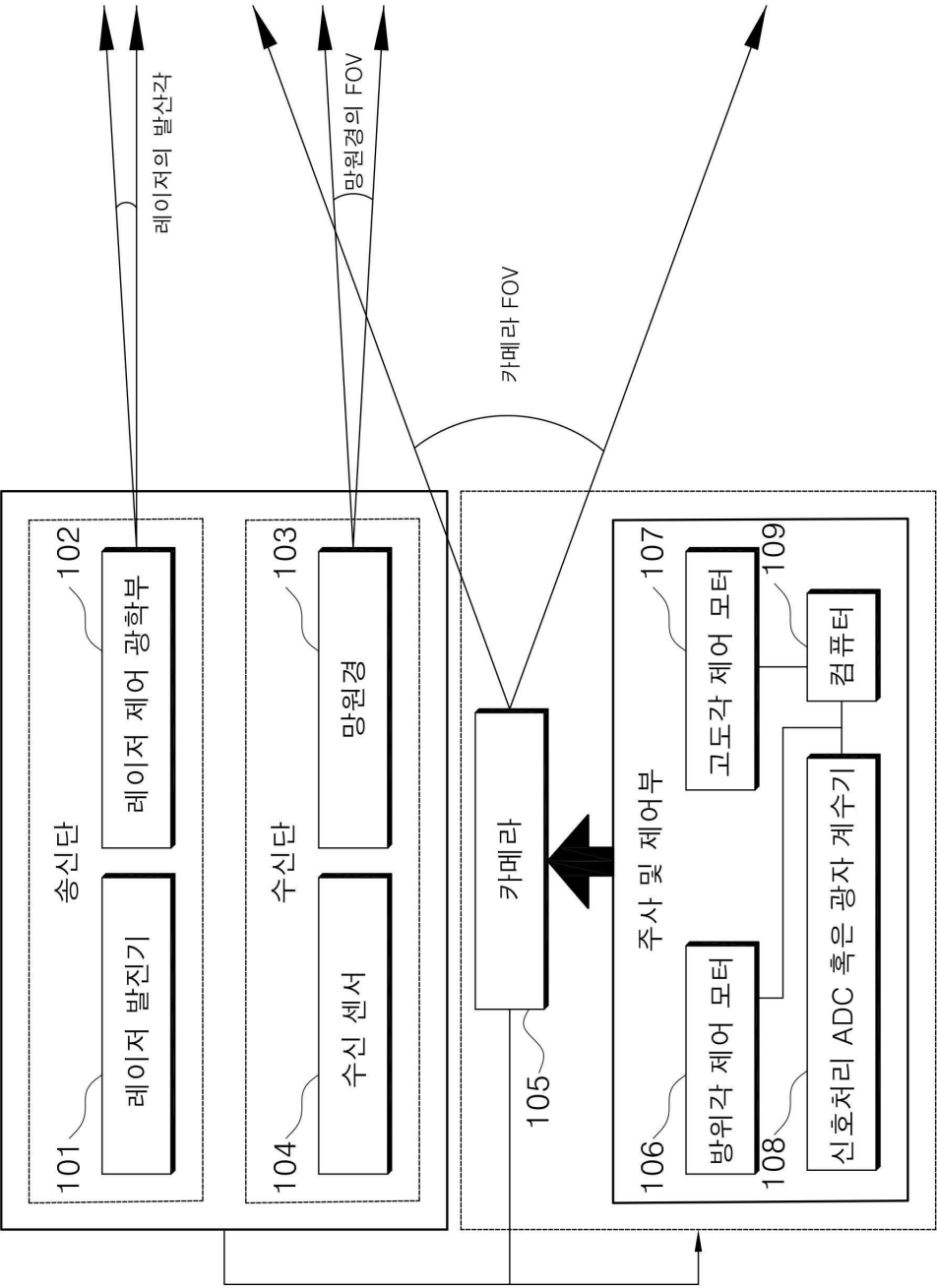
[0178] 본 발명의 권리는 위에서 설명된 실시예에 한정되지 않고 청구범위에 기재된 바에 의해 정의되며, 본 발명의 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 청구범위에 기재된 권리범위 내에서 다양한 변형과 개작을 할 수 있다는 것은 자명하다.

부호의 설명

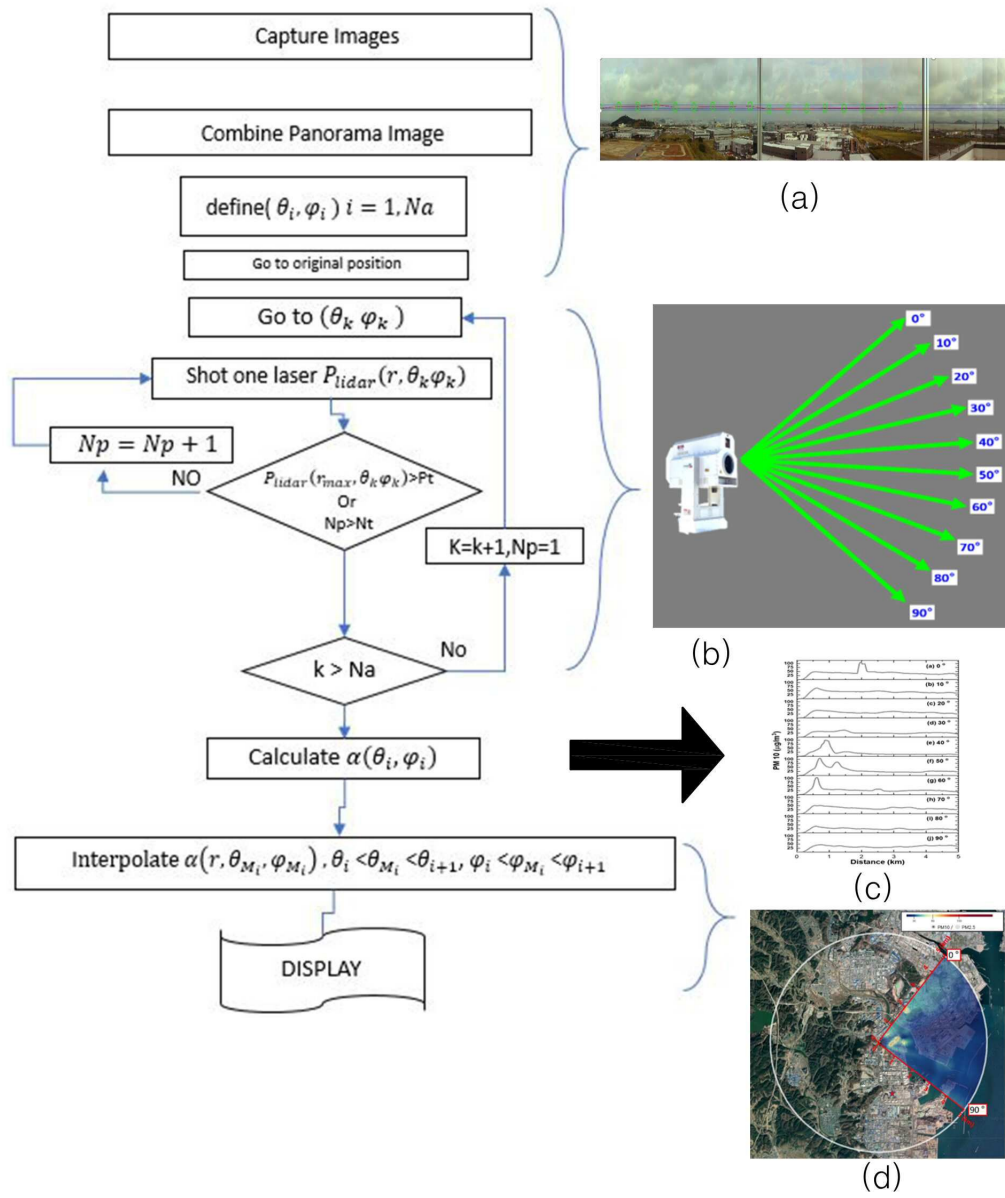
[0179]	101: 레이저발진기	102: 레이저 제어 광학부
	103: 망원경	104: 수신센서
	105: 카메라	106: 고도각 제어 모터
	107: 방위각 제어 모터	108: 광자계수기 혹은 ADC
	109: 컴퓨터	

도면

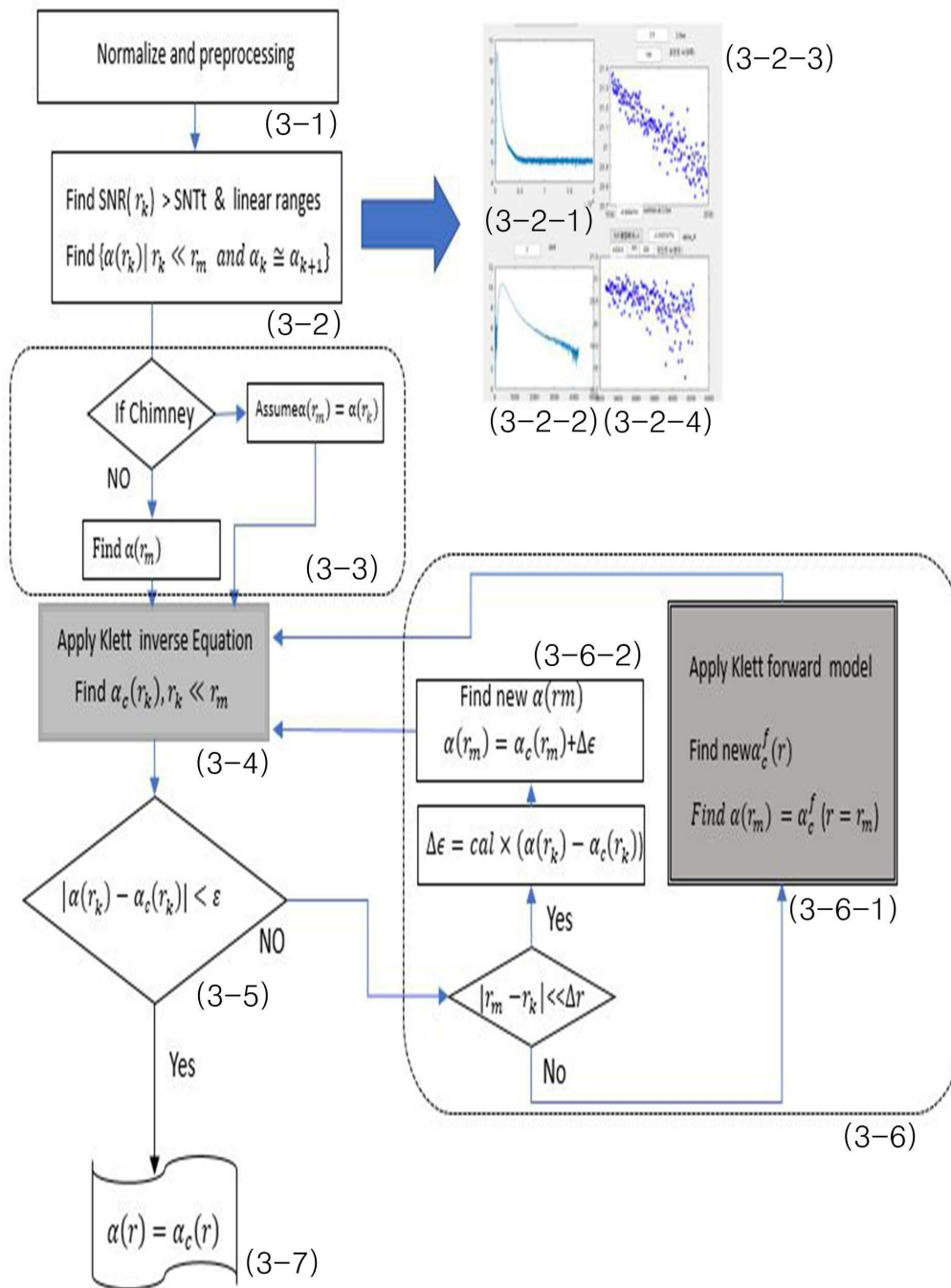
도면1



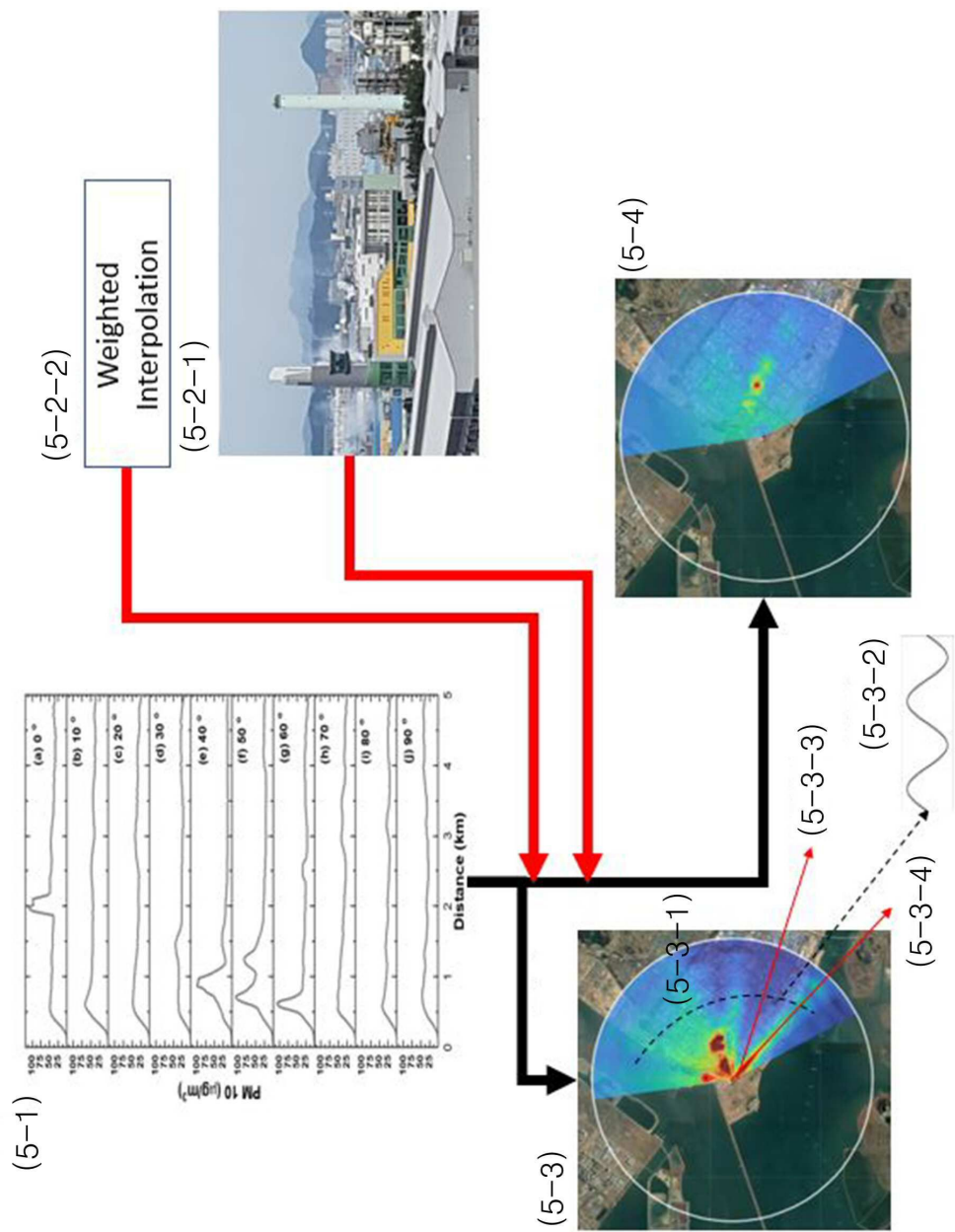
도면2



도면3



도면5



도면6

