

미세 먼지
FINE DUST
EMERGENCY REDUCTION MEASURES FOR FINE DUST

01 미세먼지 정의

1. 미세먼지의 개념

미세먼지 크기를 표현하는 물리량

앞서 언급했듯이 미세먼지의 크기를 정량적으로 나타내는 대표 물리량 중 하나는 미세먼지(PM₁₀) 및 초미세먼지(PM_{2.5})를 들 수 있다. 미세먼지(PM₁₀)는 입자의 직경이 10 μm 이하인 모든 대기 미세먼지의 총 질량 농도를 의미하며 초미세먼지(PM_{2.5})는 그보다 작은 직경 2.5 μm 이하의 총 입자 질량 농도를 의미한다. 통상적인 머리카락의 굵기가 약 50-70 μm 이므로 눈에 보이지 않을 정도의 작은 크기의 입자들을 의미한다고 볼 수 있다.

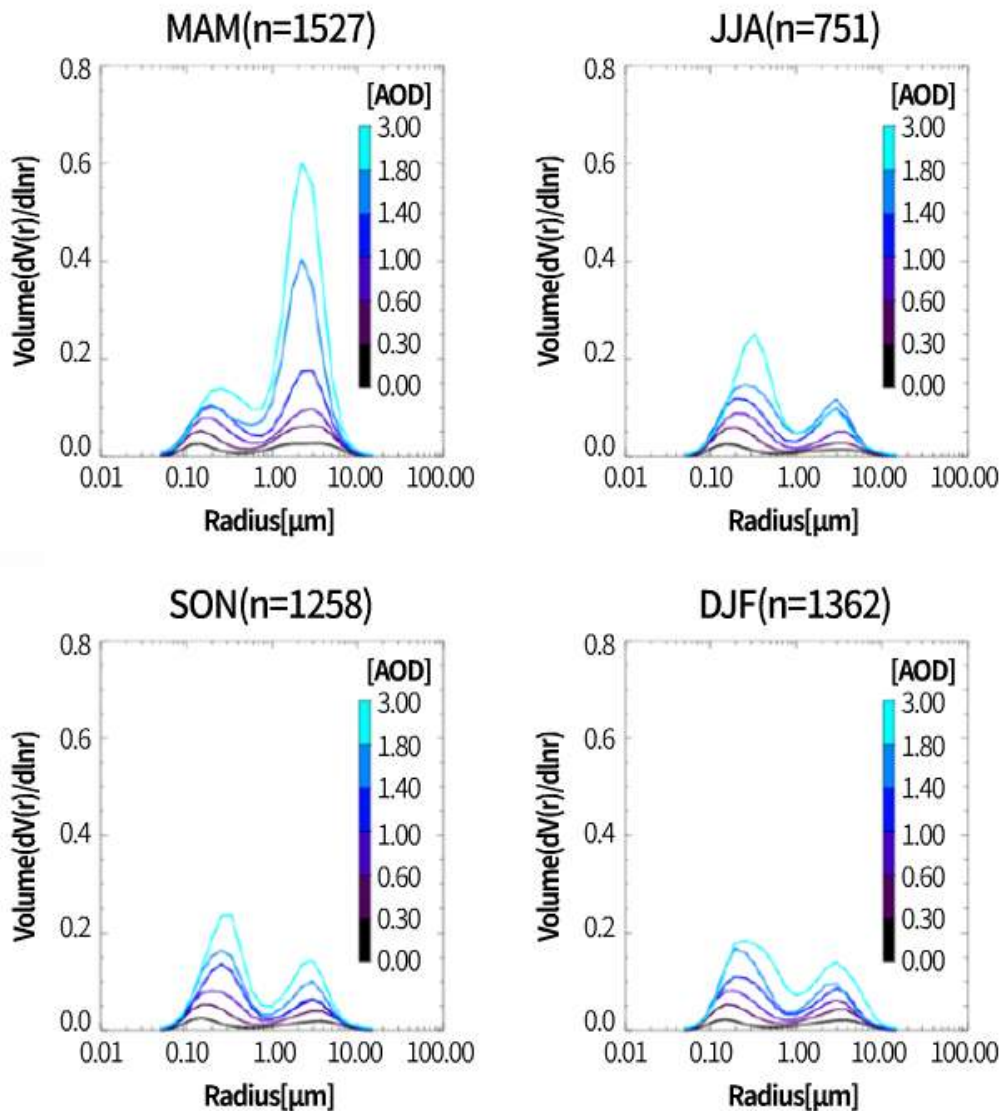
미세먼지(PM₁₀)과 초미세먼지(PM_{2.5})는 주로 지표에서 직접적인 공기의 채취에 의해 측정되는 값으로서 주로 대부분의 미세먼지 배출이 지표 근처에서 이루어짐을 생각하면 사람들이 주로 생활하는 지역에서의 대기 오염 정도를 나타내기 위해 합리적인 지표로 볼 수 있다.

대기 중 부유하는 미세먼지 양의 많고 적음을 나타내는 또 하나의 대표적인 물리량은 미세먼지 광학 깊이(aerosol optical depth, AOD)를 들 수 있는데, 이 값은 대기 미세먼지에 의해 빛이 얼마나 투과되지 못하는지를 무단위의 값으로 보여주며 값이 클수록 대기 중의 미세먼지에 의한 빛의 소산되는 정도가 크다는 것을 의미한다. 즉 대기가 미세먼지에 의해 얼마나 혼탁해 보이는지를 나타내는 지표로서 시정 정보와 상당히 직접적으로 연관되는 물리량이다. 그러나 부유 입자의 크기별 수농도 차이와 입자 성분별로 다른 흡수 친화도에 의해서 입자 크기가 수분에 의해서 성장하는 흡습 성장(hygroscopic growth) 등에 의해 동일 질량의 미세먼지가 대기 혼탁도에 미치는 영향이 달라질 수 있다. 따라서 AOD는 대기 중에 같은 질량만큼의 미세먼지가 존재한다고 하더라도 그 크기와 성분에 따라 다른 값을 가질 수 있다.

미세먼지의 특성

여기에서는 미세먼지의 특성을 나타낼 수 있는 두 가지 대표적인 지표들을 짚어보고자 한다.

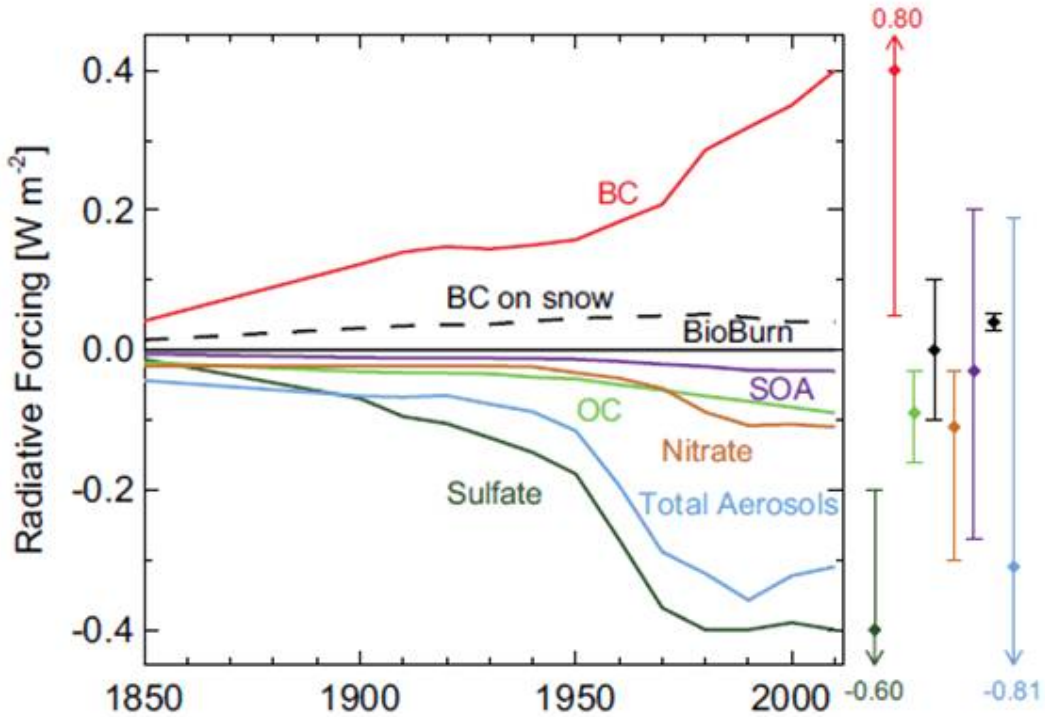
1) 입자크기 분포: 앞서 언급했듯이 미세먼지를 크기에 따라 구분할 경우 입자 크기가 작은 미세입자(fine mode aerosol)와 크기가 큰 조대입자(coarse mode aerosol)로 나눌 수 있다. 이 두 종류의 분류는 대기 미세먼지의 부피가 입자 반경, 또는 직경 구간별로 어떻게 나타나는지를 비교할 경우 분명하게 구분할 수 있다. 이를 미세먼지 부피 크기 분포(aerosol volume size distribution)이라고 한다. 한국의 여러 지상 원격탐사 관측소에서 측정한 미세먼지의 부피 크기 분포값을 AOD 크기 별로 평균하여 계절별로 비교한 그림이다. 이 그림을 통해 주로 미세입자는 반경 0.2-0.4 μm 영역에서, 조대입자는 입자 반경 2-3 μm 영역에서 가장 큰 총 부피를 나타내고 있음이 확인된다. 보통 한국에서는 미세입자 영역에서 부피의 크기가 높게 나타나지만 봄철에는 조대입자 영역에서 부피가 월등하게 증가하는 양상을 볼 수 있는데 이는 중국 북부 및 몽골 지역에서 넘어오는 황사 입자가 전체 부피 증가에 큰 영향을 미치기 때문이다.



[서울 지역 계절별 대기 미세먼지의 부피 크기 분포: 3, 4, 5월 (MAM), 6, 7, 8월 (JJA), 9, 10, 11월 (SON), 12, 1, 2월 (DJF)]

(출처: Kim et al. (2014), Improvement of aerosol optical depth retrieval over Hong Kong from a geostationary meteorological satellite using critical reflectance with background optical depth correction, Remote Sensing Environment, 142, 176-187)

복사 흡수성이 강한 BC의 경우, 복사에너지를 흡수하기 때문에 대기를 가열시키는 효과로 복사강제력이 양으로 가게 되며, 산란 효과가 강한 황산염에 대해서는 강한 대기 냉각 효과를 일으킬 수 있다고 알려져 있다. 미세먼지의 종류에 따라 광학 특성이 달라지며 이 때문에 기후 효과에 일으키는 효과도 매우 다르게 나타날 수 있다.



[미세먼지 유형별 복사강제력(radiative forcing)의 지구 평균값 장기간 변화 추이]

(출처: IPCC 4차 보고서, 2013)

그림 설명 : 양의 값은 대기가 온난해짐을, 음의 값은 냉각됨을 의미 (BC: black carbon 블랙 카본, OC: organic carbon 유기탄소, BioBurn: 생체연소, Sulfate: 황산염, Nitrate: 질산염, SOA: secondary organic aerosol 2차 생성 입자)

2) 복사 흡수성: 대기 중 미세먼지는 태양 복사 광선을 소산, 감소시키는 역할을 한다. 이 과정에서 태양복사를 흡수할 수도 있고 산란시킬 수도 있는데 이 차이는 입자 구성 성분에 따라 달라질 수 있다. 태양 복사를 강하게 흡수하는 대표적인 성분은 블랙 카본(black carbon)으로서 주로 화재 및 연소 과정에서 대량 배출되는 경향이 있다. 블랙 카본을 제외한 대부분의 미세먼지는 태양 복사를 산란시키는 경향이 강하며 특히 황산염(sulfate) 계열이 강한 산란 특성을 가지고 있다. 대기 미세먼지가 태양 복사를 강하게 흡수하는 경우에는 흡수한 에너지만큼 주위에 방출하여 대기를 가열시키는 결과를 야기할 수 있으며 복사 산란 특성을 크게 가지는 경우에는 태양 복사 에너지가 지구로 유입되는 정도 자체를 줄이기 때문에 대기가 냉각되는 결과로 이어질 수 있다. 이와 같이 미세먼지의 유형에 따른 태양 복사의 흡수, 산란의 특성에 의해 대기가 가열 또는 냉각되는 정도를 정량적으로 표현한 값을 복사강제력(radiative forcing)이라고 하며 지구 온난화로 대표되는 전 지구 기후 변화 문제를 진단하는 과정에서 매우 중요한 정보로 고려되고 있다.

2. 미세먼지의 성분 및 생성 과정

미세먼지의 특성은 단순하게 특정하기 어려운 부분이 많다. 입자의 크기 및 복사 흡수성의 차이가 기본적으로 존재하며 그에 따라 주변 환경에 반응하는 정도의 차이도 크게 나타남을 살

퍼볼 수 있다. 그렇기 때문에 미세먼지를 구성하는 주요 성분들과 관련한 배출원을 살펴보는 일이 그 무엇보다 중요하다. 특히 여러 연구 결과들은 미세먼지의 특징이 배출원뿐만 아니라 생성과정의 차이에 의해서도 나타날 수 있음을 보여주고 있다. 이번에는 미세먼지의 종류가 어떻게 다른지, 그에 따른 배출원의 차이 및 생성과정의 특징을 어떻게 설명할 수 있는지에 대해서 좀 더 자세하게 살펴보고자 한다.

미세먼지의 성분

1) 블랙카본(검정 탄소): 가장 태양 복사 흡수성을 강하게 가지는 성분으로서 말 그대로 가시광선을 강하게 흡수하는 흑색으로 나타나는 탄소 계열의 성분이다. 보통 연소 과정에서 발생하는 검댕(soot)이 블랙카본 전체의 주요 구성원이 된다. 흔히 연소 과정에서 발생이 되며 특히 야외에서 발생하는 산불(wildfire) 및 생체 연소 과정(biomass burning)이 주요 배출원이 된다. 물리적으로 대기 중에 존재하는 입자들은 복사 에너지를 흡수하면 그 에너지에 상응하는 크기만큼을 주위에 배출하는 것으로 알려져 있다 즉따라서 태양 복사 에너지를 흡수하는 만큼 주위 대기에 방출하기 때문에 블랙카본의 농도가 높은 지역에서는 대기가 국지적으로 가열될 수 있는 가능성이 있다. 실제로 중위도 지역에서 배출된 블랙카본 물질들이 대기의 순환을 따라 극지방으로 이동했을 경우 태양복사를 흡수하여 대기 하층을 가열, 극지 온도를 상승시키고 해빙의 녹는 속도를 가속화시킬 수 있는 여지가 있음이 많은 연구결과들을 통해 밝혀지고 있다.

2) 황산염: 한반도에서 관측되는 미세먼지를 구성하는 가장 대표적인 성분 중 하나이다. 황산염은 블랙카본과는 다르게 태양 복사를 주로 산란시키는 역할을 하기에 국지적인 대기 가열 대신 냉각에 기여하는 경우가 많다. 황산염은 인위적으로 배출될 뿐만 아니라 자연적으로도 많이 배출되는 물질이다. 인위적으로는 보통 인간활동에 의해 배출된 이산화황(SO₂)이 황산염으로 바뀌는 과정을 중요하게 살피게 된다. 이산화황은 황이 연소되어서 배출되는 기체상의 물질로서 화석 연료 내에 주로 황이 포함되어 있기에 공장 및 운송 수단에서 화석 연료를 연소하게 될 때 배출이 되는 물질이다. 다만 예전에 비해 최근에는 화석 연료, 특히 석유에서 황을 분리해내는 탈황 기술이 이미 충분히 발달하여 선진국에서 이산화황이 배출되는 양은 그다지 많지가 않다. 다만 탈황 시설이 충분히 갖추어지지 않은 개발 도상국에서의 산업 현장, 운송 수단에서는 여전히 많이 발생하고 있다. 그러므로 한국에서 관측되는 인위적 이산화황은 중국에서 발생된 물질이 수송되어 넘어오는 영향을 많이 받고 있다. 자연적으로는 해양에서 발생하는 dimethyl sulfide(DMS)이 황산염 생성에 큰 역할을 한다. DMS는 바다 속에 포함된 황물질이 해수 표면에서 파도가 치면서 만들어지는 거품(bubble)에 의해 대기로 유입이 되는데 이 물질이 산화되면서 methyl sulfonic acid(MSA)로 바뀌고 최종적으로 황산염이 된다. 한반도는 3면이 바다로 둘러싸여 있어서 자연적으로 배출되는 황산염도 다량 존재할 수 있는 환경을 가지고 있다.

3) 질산염: 질산염 역시 미세먼지를 주로 구성하는 성분으로서 황산염이 이산화황 기체에서 기원한다면 질산염은 대기 중의 질소산화물 기체로부터 생성되는 경향을 갖는다. 질소산화물은 대표적으로 일산화질소 및 이산화질소를 꼽을 수 있으며 대기 중 고온의 연소가 존재할 때 주로 발생된다. 지구 대기의 대략 78% 정도가 질소 분자(N₂), 21% 정도가 산소 분자(O₂)로 구성되어 있는데 고온의 열원이 존재할 경우 대기 중에 안정한 상태로 머물러 있는 질소 분자가 열분해하여 질소 원자 상태로 존재하게 되고 이 질소 원자가 산소 분자 또는 광화학 반응에서 생성된 산소 원자랑 반응하여 일산화질소, 이산화질소를 생성하기 때문이다. 일반적으로 이렇

게 고온의 열이 발생하는 곳이 차량의 엔진 및 화력 발전소이기에 질소산화물 배출도 이 두 곳에서 상당히 높게 나타난다. 기체상의 질소산화물은 반응성이 상당히 높아서 멀리 수송되지 못하지만 특이한 형태로 변화하는 경우 장거리 수송도 가능해진다. 예를 들어 Peroxyacetyl nitrate(PAN)이라는 물질은 저온 상태에서 NO₂를 계속해서 포함하고 있지만 온도가 높아지는 상황을 맞이하게 될 경우 열분해하여 NO₂만 따로 분리해내는 특징을 보인다. 즉, 배출원에서 생성되어 온도가 낮은 높은 고도로 올라가게 되면 상층 기류를 타고 장거리 수송되다가 하강 기류를 만나 다시 온도가 높은 환경을 마주하게 되면 NO₂를 분리함으로써 최종적으로는 오염원에서 발생한 질소 산화물을 멀리 떨어진 지역에 공급하는 효과를 나타낼 수도 있다. 끝으로 최근에서는 암모니아가 질소산화물의 고농도 사례와 관련이 있는 것으로 감안되고는 하는데 아직 암모니아 측정 기술이 상대적으로 부족하여 암모니아 관측에 좀 더 노력을 많이 투자하여야 질소산화물 및 질산염의 시공간적인 분포를 보다 더 자세하게 이해할 수 있을 것으로 기대된다. 기본적으로 대기중의 암모니아는 암모늄 이온으로 바뀌어 질소산화물 및 황산화물과 반응, 질산암모늄, 황산암모늄과 같은 성분의 미세입자가 된다.

4) 유기탄소(organic carbon) 및 탄화수소(hydrocarbon): 최근 미세먼지 성분 분석 과정에서 가장 중요하게 다루어지는 부분으로서 아직 그 생성 과정에 대한 이해가 불확실한 부분이 많다. 보통 유기탄소의 경우 휘발성(실제 대기 환경에서 입자성의 물질이 기체 형태로 바뀔 수 있음을 의미)을 가지는 경우가 많아서 휘발성(volatile) 유기탄소(VOC)라고 불리는 경우가 많으며 일부는 입자상과 기체상을 오가기 때문에 특별히 semi-volatile organic carbon(SVOC)이라고 부르기도 한다. 이 내용은 후에 2차 미세먼지 생성 부분에서 좀 더 언급할 것이다. 탄화수소는 산소의 결합은 없지만 탄소-수소와의 결합을 하면서 유기탄소와 유사한 특징을 갖는 물질을 총칭하곤 한다. 유기탄소/탄화수소는 인위적인 산업 공정에서 배출이 되는 경우가 많은데 소위 특징적인 냄새를 가지고 있고 고리모양의 구조를 가지고 있는 방향족 탄화수소가 대표적으로 산업 공정에서 용매로 쓰이는 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 자일린(xylene) 등이 주로 대기 중에서 관측되는 물질들이다. 또한 유기탄소/탄화수소 물질들은 자연에서 식물의 활동에 의해 배출되는 양도 상당한데 이러한 물질들은 90년대 들어서야 비로소 중요하게 고려되기 시작하여 아직까지도 그 발생, 생성, 반응 과정 및 대기 환경과의 상호 관계, 미세먼지 농도에 끼치는 영향들이 정확하게 밝혀지지 않은 부분들이 많다. 식생에서 배출되는 대표적인 유기탄소/탄화수소에는 아이소프린(Isoprene)이 있는데 아이소프린의 경우는 인위적인 활동에서도 배출이 되므로 그 배출원을 정확히 따져서 파악할 수 있는 연구가 좀 더 많이 이루어져야 할 필요가 있다.

4-1) 갈색탄소(brown carbon): 유기탄소 중에서 일부 물질을 별도로 갈색탄소라 부르며 그 특징을 별도로 살펴보곤 한다. 갈색탄소의 특징은 자외선 영역 (주로 자외선 A 영역에 해당하는 320 - 380 nm 파장 사이) 태양 복사만을 강하게 흡수한다는 점으로서 전반적으로 자외선, 가시광선 계열 태양 단파 복사를 강하게 흡수하는 블랙카본과 비교해서 갈색탄소라는 이름을 얻게 되었다. 블랙카본과는 달리 성분 중에 질소원자가 결합되어 있는 경우가 많다. 배출 과정을 비교하였을 때, 블랙카본이 고온 상태에서 건조한 물질들이 강력하게 연소되는 (flaming) 화재 현상에서 주로 발생하는 반면 갈색 탄소는 저온 상태에서 축축해진 물질들이 연소되거나 그을리는 과정(smoldering)에서 배출되는 것으로 알려져 있다.

5) 모래 먼지(dust): 앞에서 이야기한 성분들이 대부분 크기가 작은 미세입자를 구성하는 경향이 있다면 모래 먼지는 조대입자의 대표적인 구성성분이라고 볼 수 있다. 한반도에서는 황사 현상(Asian dust)으로 공기 중의 모래먼지를 접하게 되는 경우가 많은데 황사는 중국 북부

및 몽골 내륙의 사막 지역에서 상승기류를 타고 대기 중으로 유입, 상층에서의 빠른 이류 현상에 의해 한반도 및 서태평양 지역, 심지어 태평양을 가로질러 북아메리카 서부지역까지 수송되기도 한다. 세계적으로는 북아프리카 사하라 지역에서 발생하는 모래먼지가 지중해를 건너 남부 유럽으로 전파되거나 아프리카 서쪽 대서양을 건너 아메리카 지역까지 수송하는 현상들이 잘 알려져 있다. 모래먼지의 화학적 성분은 철, 아연, 마그네슘 등이 있는데 이러한 미네랄 성분들은 식생의 성장과 밀접한 영향을 가지는 것으로 황사현상은 미네랄이 부족한 지역에 모래먼지 수송을 통한 미네랄 공급 역할을 하는 긍정적인 기능을 가진다고 볼 수 있다. 광학적으로 모래먼지는 단파 복사는 상대적으로 흡수, 장파복사는 상대적으로 산란시키는 특성을 가진다.

6) 꽃가루(pollen): 단순히 꽃에서 발생하는 것만이 아닌 식물에서 발생하는 모든 가루형태의 입자를 의미한다. 떡갈나무, 참나무 같은 수종은 꽃가루를 상당히 많이 배출하여 그 발생이 심할 때는 지역의 차량에 하룻밤사이 가득 내려앉을 정도에 이르기도 한다. 꽃가루도 입자의 크기가 상당히 큰 편이라 조대입자 영역에 속하며 한반도에서는 크게 심각하지 않지만 해외에서는 중요하게 감시되는 대기 미세먼지 중 하나이다. 특히 사람에게 알러지를 유발하는 경우가 많아 보건학적인 측면에서 중요하게 다루어 지는 경우가 많다. 식물의 활동에 의해 발생되기 때문에 식물의 생장이 활발할수록 꽃가루 배출량은 늘어난다. 최근 온실기체 배출의 증가로 전 지구는 지구온난화 문제를 심각하게 겪고 있는데, 아무래도 지구 대기가 따뜻해질수록 식생의 활동성도 높아지므로 꽃가루가 배출되는 양도 증가할 가능성이 커진다. 실제 이산화탄소 농도의 증가와 꽃가루 발생량의 증가 추이가 상당히 연관되는 것으로 보인다는 견해도 제시되고 있다.

미세먼지의 생성 과정

1) 1차 생성과정 (primary aerosol formation): 말 그대로 미세먼지가 배출원에서 직접적으로 입자의 형태(액체 및 고체)로서 배출되는 과정을 의미한다. 사막에서 모래 먼지가 직접적으로 공기 중으로 유입이 되거나 연소과정에서 검정 탄소들이 만들어져서 발생하는 경우를 의미한다. 발생원에서 직접 배출되어 공기 중으로 유입되므로 감시 및 관측이 상대적으로 용이한 편이다.

2) 2차 생성과정 (secondary aerosol formation): 미세먼지라는 사회적 이슈를 쉽게 해결하지 못하는 큰 원인으로 작용하는 부분이다. 1차 생성과정과 달리, 오염원에서 배출된 '기체' 형태의 대기 오염 물질들이 대기 중에 존재하다가 적당한 환경을 만나 서로 반응 또는 상변환을 가지면서 입자의 형태로 바뀌는 과정을 일컫는다. 공기 중에서 기체상 물질은 고체, 액체 계열의 입자상 물질과 성질이 상당히 다르기 때문에 입자상 물질을 감시하는 기술로는 기체 성분들의 추적을 쉽게하지 못한다. 즉 별도의 감시 체계를 마련해야 하는데 대기 미세먼지가 될 수 있는 기체 성분이 상당히 다양하기 때문에 그 모든 물질을 현실적으로 모두 감시하는 일이 만만하지 않기에 여전히 제대로 추적해내지 못하는 부분들이 존재하며 심지어 아직까지 미세먼지 2차 생성과정에 영향을 주는 기체상 물질 중에 인지하지 못하고 있는 것도 많을 것으로 생각되고 있다. 다음과 같은 과정들을 미세먼지 2차 생성의 예시로 꼽을 수 있다.

- SVOC가 대기 중에서 입자화 되는 경우. 주로 온도와 습도가 SVOC의 상태에 영향을 주는 중요한 기상인자인 것으로 알려져 있다.

- 순수하게 대기 중의 기체들끼리 반응하고 뭉쳐져서 입자가 되는 경우. 새입자생성(New particle formation) 과정이라고 불리며 상당히 작은 크기의 입자가 이렇게 생성이 되면 그

입자들끼리 서로 충돌, 병합과정을 거쳐 성장하게 된다.

- 대기 중 물 입자와의 응축 현상: 물이 구름, 강수 입자가 아닌 아주 작은 입자로 존재하는 경우는 aerosol water라는 표현으로 별도 지칭하곤 한다. 이산화황, 질소산화물 기체들은 미리 대기 중에 존재하는 물입자에 결합하게 되면 최종적으로 황산염, 질산염 미세먼지로 바뀔 수 있기 때문에 물입자의 존재가 미세먼지의 2차 생성에 큰 영향을 끼칠 수 있음을 의미한다.

3. 미세먼지 측정 방법

1) 현장 측정 (in-situ measurement) 방법: 공기를 직접 샘플링하여 측정하는 방법으로서 크게 직접관측과 간접관측으로 나눌 수 있다.

- 직접 관측: 입자의 질량을 측정하는 중량 분석법이 대표적. 필터로 걸러낸 입자들의 무게를 측정하는 방식으로 가장 정량적으로 정확하게 접근할 수 있으나 필터링하는 시간이 요구되므로 시간적 해상도가 좋지 못하며 자동 측정이 쉽지 않은 측면이 있다.

- 간접 관측: 베타선 흡수법, 광산란법, 광투과법 등 광학적 관측 방법들이 존재한다. 베타선 관측법의 경우는 대기 중에 부유하는 입자를 특정 시간 동안 여과지에 채취한 후에 베타선 광원을 포집된 여과지에 찍어 베타선이 흡수, 소멸된 크기를 측정하여 입자 총량을 측정하는 방식이다. 광산란법은 흡입한 공기에 특정 파장의 빛을 쬐어 산란되는 정도를 측정하여 입자의 질량 농도를 환산해내는 방식으로 진행된다.

[연세대학교에 설치되어 있는 원격탐사장비인 AERONET sunphotometer]



[연세대학교에 설치되어 있는 원격탐사장비인 AERONET sunphotometer]

(자료: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/photo_db_v3/Yonsei_University.html, AERONET연세대 관측소 홈페이지)

2) 원격탐사 방법: 크게 지상관측과 위성관측으로 나눌 수 있다.

2-1) 지상 원격 탐사: 대표적으로 태양 복사를 직접 관측하여 복사 휘도를 여러 기하관측조건에서 측정하고 이걸 복사전달모델을 기반으로 하는 알고리즘의 입력값으로 넣어 광학적 특성을 산출해내는 방식으로 진행된다. 태양광도계(Sunphotometer or skyradiometer) 같은 (그림 1-3) 기기들을 이용해서 관측을 하며 전 세계적으로 대규모 관측 네트워크를 구성하여 관측 업무를 수행 중이다. 대표적으로 NASA가 운영하는 aerosol robotic network

(AERONET)이 있다.

2-2) 위성 원격 탐사: 위성에서 특정 파장의 센서를 탑재하여 AOD 관측을 수행한다. 저궤도 위성은 지표에서 대략 600~800 km 고도에서 하루에 수차례 지구 주위를 돌면서 관측을 수행하고 정지궤도 위성은 지표에서 약 36000 km 고도에서 지구의 자전 속도와 맞춰서 돌며 특정 지역을 연속적으로 관측한다. 그리하여 저궤도 위성은 특정 지역을 1일 1-2회 정도만 관측할 수 있는 대신 하루에 전 지구 범위에서 관측을 수행할 수 있는 반면 정지궤도 위성은 지구 전체 관측은 불가능하나 특정 지역을 낮시간 내내 관측해낼 수 있다는 장점이 있다. AOD를 측정하는 대표적인 극궤도 위성 탑재체로는 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS)가 있으며 정지궤도 위성의 경우 한국에서는 천리안 위성에 탑재되어 있는 Geostationary Ocean Color Imager(GOCI) 센서가 한반도 및 동아시아 지역의 AOD 자료를 제공하는 대표적인 예시가 된다.