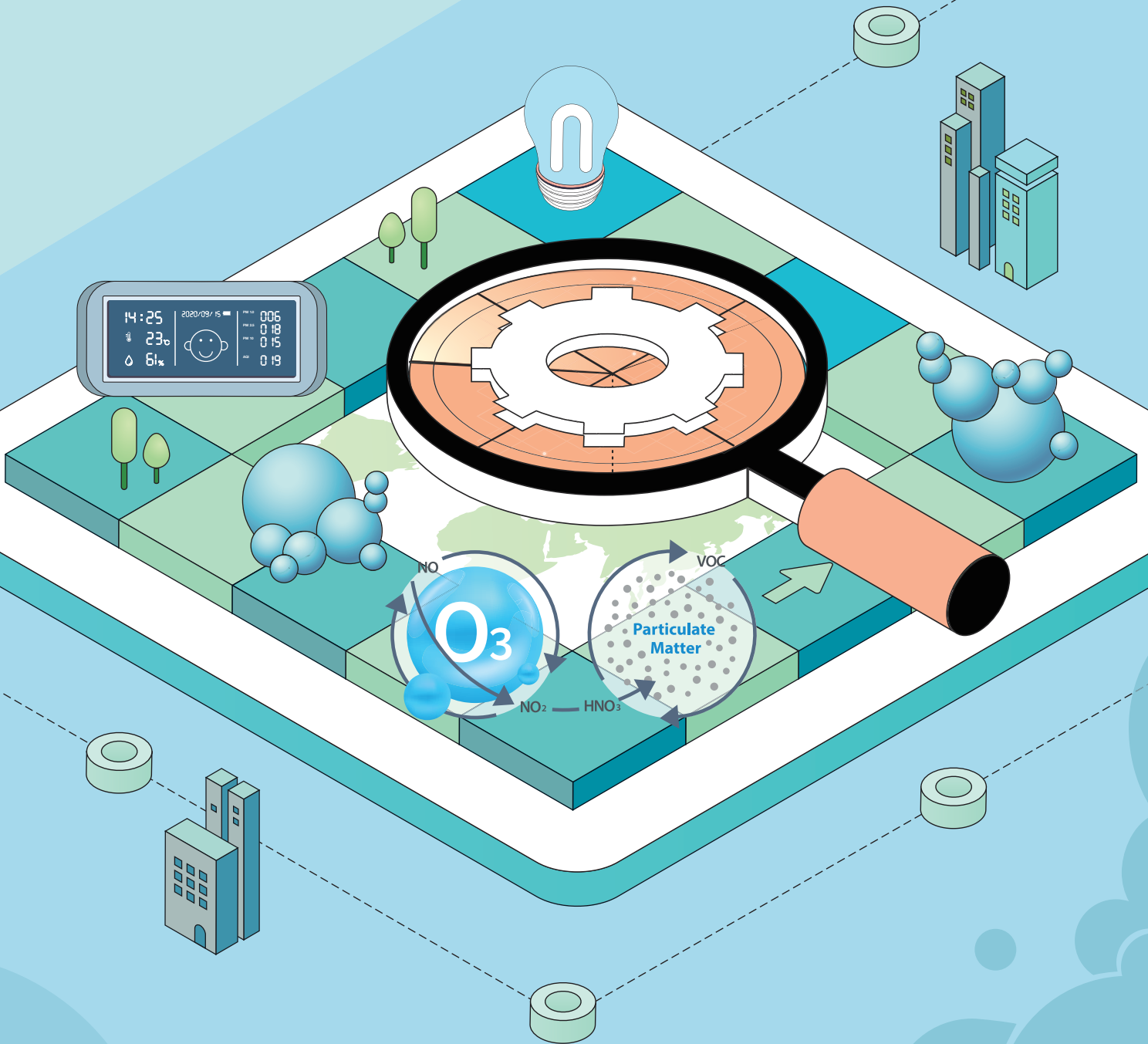


미세먼지 TIP

Technical Information of Particulate matter



미세먼지 TIP

Technical Information of Particulate matter

동북아 - 지역 연계 초미세먼지 대응 기술개발 사업단

(우)02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

한국과학기술연구원 L3451

Email: pmcenter@kist.re.kr

<https://pmcenter.kist.re.kr>

1. 미세먼지의 크기
2. 초미세먼지와 가시거리
3. 헤파필터의 미세먼지 제거원리
4. 대기 혼합고와 미세먼지 농도
5. 오존의 두 얼굴
6. 가시거리 : 안개와 초미세먼지
7. 광화학 스모그
8. 미세먼지 성분
9. 미세먼지와 코로나19
10. 일기도로 보는 한반도 주변 미세먼지의 이동
11. 미세먼지와 발암물질
12. 미세먼지 간이측정기
13. 통합대기환경지수
14. 세계보건기구(WHO)의 글로벌 대기질 가이드라인
15. 검댕과 건강 그리고 기후변화
16. 미세먼지와 구름 그리고 비

미세먼지의 크기

미세먼지(여기서는 편의상 개별 미세먼지를 일컬음)는 매우 작지만 형태를 갖추고 있으며, 거의 대부분 불규칙한 모양을 나타내고 있다. 공과 같이 동그란 물체의 크기는 누구나 지름으로 말하는데 주저하지 않는다. 그러나 직육면체 등 구와 다른 모양의 물체에 대해 가로, 세로 등의 표현은 가능하지만, 누구나 인정하는 크기를 말하는 것은 매우 어렵다. 이것은 3차원의 물체를 1차원적 크기로 표현하는 과정에서 불가피하게 발생하는 문제이다. 따라서 미세먼지의 크기를 말하기 위해서는 약속이 필요하다. 보통 우리가 말하는 미세먼지의 크기에는 이러한 암묵적 동의가 숨어있다.

일반적으로 공기 중에는 매우 많은 미세먼지가 있고, 이들 미세먼지는 다양한 특성을 나타낸다. 이 중에서 미세먼지의 크기를 측정하는데 광학적, 전기적, 공기역학적 특성이 많이 이용되고 있다. 보통 미세먼지는 10 μm , 초미세먼지는 2.5 μm 보다 작은 입자 상태의 물질을 말하는데, 이때 크기는 공기역학적 직경을 의미한다.

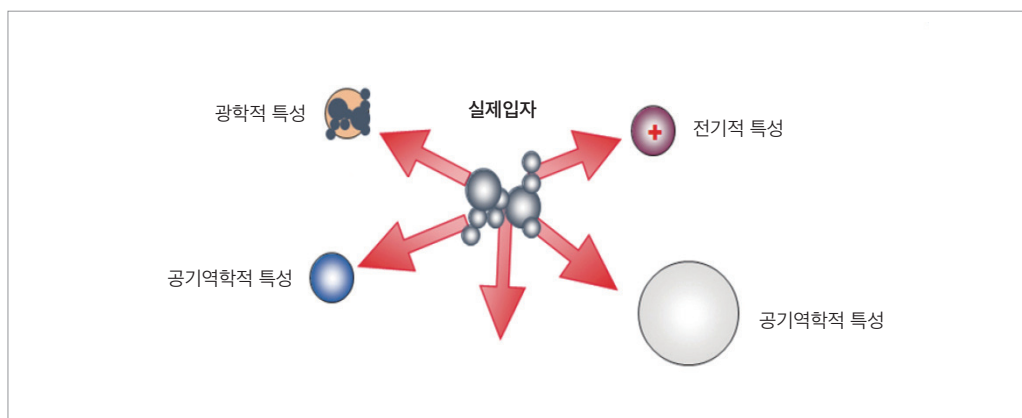
미세먼지는 빛을 산란시키거나 흡수하는 특성이 있어 미세먼지가 많은 날 우리의 시야를 가린다. 이러한 광학적 특성을 이용하여 미세먼지를 쉽게 측정할 수 있다. 일반인이 많이 접하는 간이측정기는 대부분 광산란 방식을 이용하여 미세먼지의 크기와 무게농도를 나타내고 있다. 이때 크기는 미세먼지가 빛을 산란시키는 정도를 구형의 표준입자와 비교하여 나타내므로 상대적인 값(광학적 등가입경)이다. 미세먼지의 크기가 작아지면 산란되는 양이 적어 측정할 수 없으므로, 보통 0.3 μm 보다 큰 미세먼지를 측정하여 미세먼지의 무게농도를 추정하여 나타낸다. 또한, 미세먼지의 성분에 따라 굴절계수가 달라지므로 유사한 형상이라도 상당히 다른 크기로 인식하여 나타날 수 있다. 따라서 미세먼지의 특성에 따라 새로운 크기를 약속하고, 이를 사용하여 미세먼지의 크기분포나 무게농도를 환산하여 나타내고 있다는 사실을 알아 둘 필요가 있다.

미세먼지의 크기



출처
 미세먼지 파수꾼 2강 교재

미세먼지의 특성



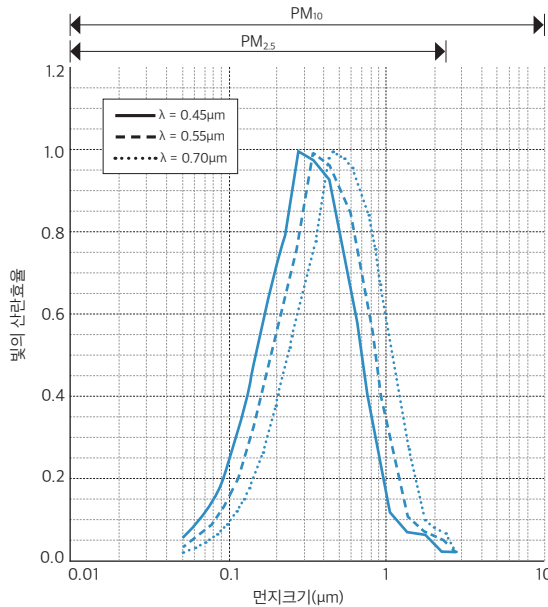
출처
 미세먼지 파수꾼 2강 교재

초미세먼지와 가시거리

봄철 황사가 불어오면 보통 하늘이 뿌옇게 흐린데, 가끔 하늘이 푸르러 황사가 오지 않은 것으로 착각하는 날이 있다. 또한, 황사가 불어오지 않더라도 스모그가 끼여 뿌연 하늘을 보며 답답한 마음이 드는 날도 있다. 이것은 먼지의 크기에 따라 빛을 산란시키는 정도가 다르기 때문이다. 먼지의 성분(굴절률)과 빛의 파장에 따라 차이가 있지만, 일반적으로 0.1~2 μm 범위의 대기 먼지가 빛을 잘 산란시키고, 이보다 크거나 작으면 빛의 산란효율이 매우 낮아 시야를 흐리게 하는 가시거리에 영향을 미치지 못한다.

황사는 대부분 2.5 μm 보다 큰 먼지이므로, 황사가 불어오면 미세먼지(PM₁₀, <10 μm) 농도는 높아지지만 초미세먼지(PM_{2.5}, <2.5 μm) 농도가 평소와 비슷하게 낮은 수준을 유지하는 날이 있다. 예를 들면, 2016년 4월 23일 황사가 발생하여 서울의 일평균 PM₁₀ 농도가 222 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높았고, PM_{2.5} 농도도 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 평소보다 높아 가시거리가 8km로 짧았다. 반면에 2017년 5월 6일 황사가 발생하여 PM₁₀ 농도가 173 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높아졌지만, PM_{2.5} 농도는 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 평소와 비슷하여 가시거리가 14.2km로 양호하였다. 한편, 황사가 불어오지 않고 스모그가 생긴 2018년 3월 25일의 경우 PM_{2.5} 농도가 103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 평소보다 매우 높았고, 이로 인해 PM₁₀ 농도도 123 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높았다. 그리하여 가시거리가 3.2km로 매우 짧았다. 따라서 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 우리의 시야를 흐리게 만드는 현상과 직접적으로 관련되어 있다는 사실을 알아둘 필요가 있다.

먼지 크기에 따른 빛의 산란효율



출처
Liu et al., Journal of Aerosol
Science (2000)

초미세먼지(PM_{2.5}) 농도와 가시거리

관측일	2016년 4월 23일	2017년 5월 6일	2018년 3월 25일
PM ₁₀ 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	222	173	123
PM _{2.5} 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	39	15	103
가시거리 (km)	8	14.2	3.2
비 고	황사	황사	스모그

출처
에어코리아 관측자료,
기상청 관측자료

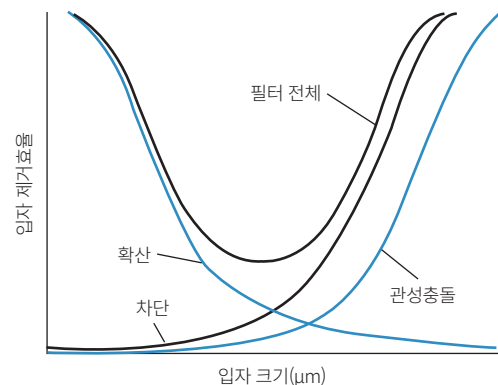
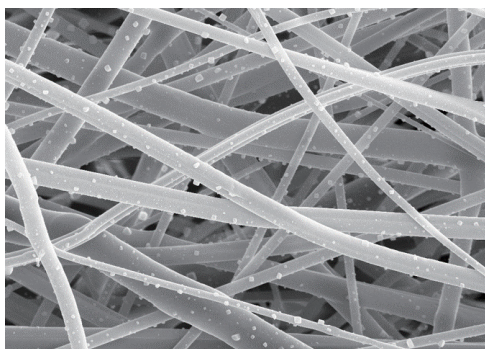
헤파필터의 미세먼지 제거원리

모래처럼 눈에 보이는 큰 알갱이를 거를 때 체를 사용한다. 체는 촘촘한 망으로 이루어져 망의 구멍보다 작은 것은 통과시키고, 이보다 큰 불순물을 걸러내기 위하여 사용한다. 물속의 불순물을 제거하는데 멤브레인 필터가 사용되는데, 이것도 아주 작은 구멍(pore)을 이용하고 구멍의 크기에 따라 거를 수 있는 불순물의 크기가 정해진다. 우리가 날마다 마시는 공기 중 미세먼지도 이러한 원리로 제거한다고 생각하는 사람들이 많은데, 공기청정기는 정수기와 다른 원리를 적용하여 보다 쉽게 공기 중 미세먼지를 제거하고 있다.

헤파필터(high efficiency particulate air filter, HEPA filter)는 원자폭탄 개발과정에서 공기 중 방사성물질이 외부로 유출되지 않도록 배출공기 처리용으로 개발되었다. 이후 병원 수술실, 반도체 클린룸 등 매우 제한된 용도로 사용되었으나, 공기오염에 대한 일반인의 관심이 높아짐에 따라 근래에 공기청정기에도 헤파필터가 장착되기 시작하였다. 헤파필터용 여재(media)는 10cm/s 정도의 낮은 풍속에서 0.3 μ m 입자에 대하여 99.97% 이상의 집진효율을 나타내는 것을 말한다. 여재는 머리카락보다 작은 굵기의 섬유들을 불규칙적으로 배열시켜 공기를 쉽게 통과시키면서 공기 중 입자를 효과적으로 제거할 수 있도록 만든 것이다. 헤파필터는 많은 공기를 통과시키기 위하여 합성섬유(유리섬유 등)로 만든 종이처럼 얇은 여재를 절곡시켜 사각형, 원통형 등 다양한 형태로 만들어 사용되고 있다.

공기 중 부유하는 입자는 기류를 따라 이동하는데, 섬유 주위를 지날 때 큰 입자는 급격히 변하는 기류를 따라가지 못하고 이탈하면서 섬유에 충돌하여 제거된다(관성충돌). 아주 작은 입자는 기류를 따라 가면서 브라운 운동에 의해 불규칙하게 이동하다가 섬유에 부착된다(브라운 확산). 섬유 가까운 곳을 지나는 입자는 섬유에 부딪혀 제거된다(차단). 이처럼 공기 중 입자는 크기에 따라 다른 원리에 의해 제거되고, 전체적으로 작은 입자와 큰 입자는 잘 제거되고 중간 크기의 입자가 가장 제거하기 어렵다. 이러한 이유로 헤파필터의 성능은 필터를 가장 통과하기 쉬운 크기인 0.3 μ m 입자를 시험입자로 사용한다. 그러므로 헤파필터는 모든 크기에 대하여 99.97% 이상의 집진효율을 나타낸다고 이해할 필요가 있다. 공기의 여재 통과 풍속이 빨라지는 경우 성능이 낮아지므로, 이러한 성능은 헤파필터의 사용조건이 적합한 경우에만 해당된다는 것도 주의하여야 한다.

필터 여재에 부착된 소금(NaCl) 입자



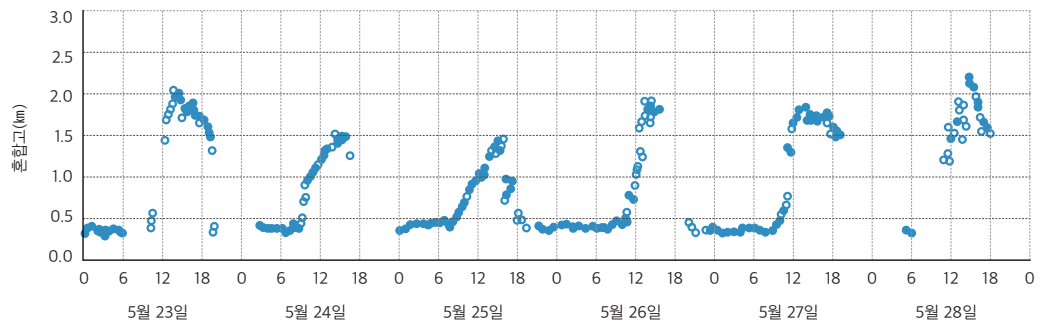
대기 혼합고와 미세먼지 농도

풍선의 원래 크기는 작지만 입으로 공기를 불어넣으면 부풀어 올라 커지고, 풍선의 주둥이를 열면 공기가 빠져 나가 부피가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 우리 눈에 보이지 않지만 이러한 풍선과 같이 지표면 근처의 대기는 햇볕에 의해 기온이 달라지므로 하루에도 팽창과 수축을 반복하고 있다. 풍선의 모양을 유지하는 겉면과 같이 지표면에서 대기가 잘 섞이는 높이를 혼합고라고 부른다. 혼합고는 지표면을 기준으로 낮을 때는 수백 m, 높을 때는 약 2,000m까지 상승하는 것으로 알려져 있다.

미세먼지 농도는 일정한 부피(보통 1m³)에 포함된 미세먼지의 무게(μg)로 나타낸다. 즉, 우리나라 연평균 미세먼지 농도 기준인 50μg/m³은 공기 1m³에 10μm 보다 작은 크기의 먼지가 50μg 포함되어 있다는 의미이다. 1μg은 1g의 백만분의 일에 해당되므로, 50μg은 0.00005g으로 아주 적은 양이다. 성인이 하루 동안 마시는 공기의 양이 약 16m³이므로, 0.0008g의 미세먼지가 호흡을 통해 체내로 들어오고 있고 1년이면 0.292g이 된다. 현재 디젤 승용차의 입자개수에 대한 배출허용기준이 1km 주행 시 6,000억개 이하인 것을 감안하면, 공기 중 미세먼지의 양은 적더라도 개수는 엄청나게 많다는 것을 알 수 있다.

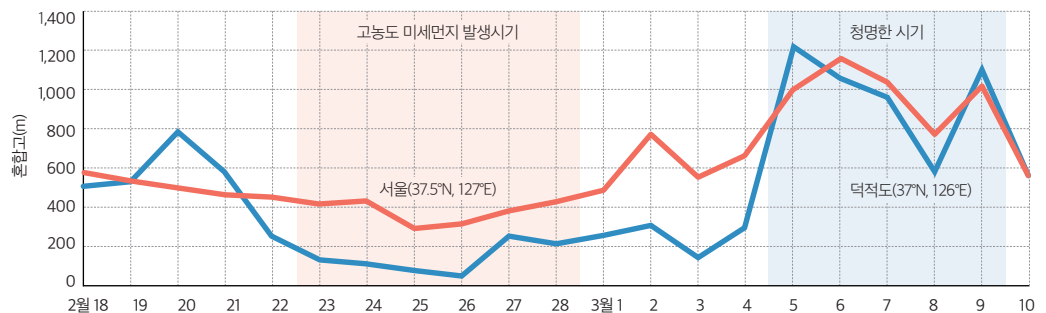
혼합고보다 낮은 공간에서는 주로 지표면에서 배출된 미세먼지(대기오염물질)가 잘 섞이는데, 혼합고의 높이가 달라지면 지표면 공기의 부피가 변하여 미세먼지의 농도도 달라진다. 즉, 지표면에서 오염물질의 배출량이 동일하더라도 혼합고가 높아지면 미세먼지 농도가 낮아지고(희석효과), 반대로 혼합고가 낮아지면 미세먼지 농도가 높아진다(농축효과). 하루를 보면 상대적으로 낮에 혼합고가 높고 밤에 낮으며, 일년을 보면 여름에 혼합고가 높고 겨울에 낮다. 날씨가 추워지는 난방기에 혼합고가 낮아지고, 대기가 정체되면 혼합고가 낮아진다. 겨울과 봄에 고농도 미세먼지가 자주 발생하는 것은 이러한 혼합고(기상요인)와 관련이 있다.

2015년 5월 서울에서 혼합고의 일변화 사례



출처
Park, 2018, Aerosol and
Air Quality Research, 18,
2157-2172

2014년 2~3월 서울과 덕적도에서 청명한 시기와 고농도 미세먼지 발생시기의 대기 혼합고 비교



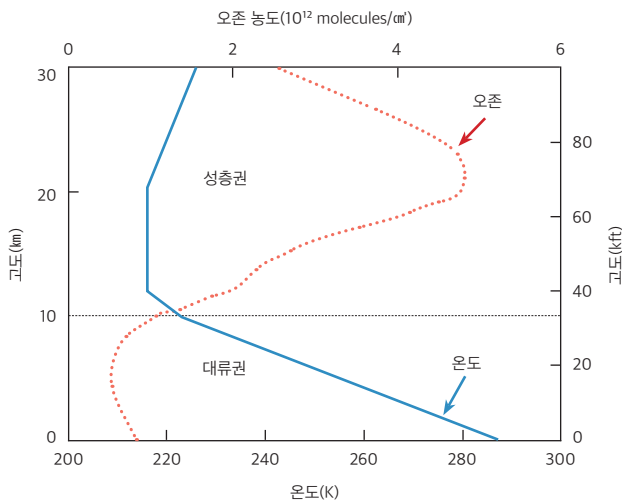
출처
Seo et al., 2017, Atmospheric
Chemistry and Physics, 17,
9311-9332

오존의 두 얼굴

1970년대 냉매로 많이 사용하던 염화불화탄소(CFCs)가 남극 상공의 오존층을 파괴한다는 사실이 알려지면서 국제적으로 오존층 보호를 위한 빈협약이 맺어지고 오존층 파괴물질에 관한 몬트리올 의정서가 채택되었다. 이에 따라 우리나라도 '오존층 보호를 위한 특정물질의 제조규제 등에 관한 법률'이 1991년 제정되어 시행되고 있다. 지표에서 10km 이상 높은 고도의 성층권(Stratosphere)에서 오존은 지구 생물체에 유해한 자외선을 흡수하여 지표에 도달하지 못하게 차단하는 이로인 역할을 한다. 만약 오존층이 현재보다 더 얇아지면 자외선이 지금보다 많이 지표로 도달하여 식생의 고사, 생태계 파괴, 농작물 수확 감소, 유전적 변이 증가, 백내장·피부암 발생 등의 현상이 두드러지게 증가할 것이다.

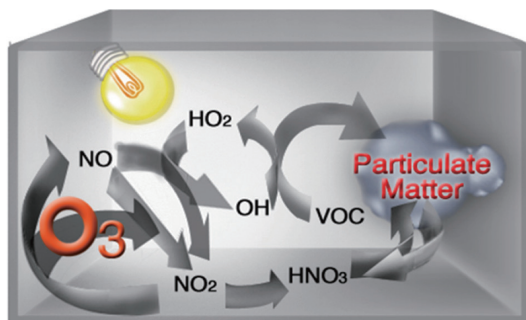
한편, 지표에서 오존은 직접 배출되지 않고 자동차에서 배출되는 질소산화물(NOx)과 휘발성 유기화합물(VOCs)이 햇빛과 반응하여 생성되며, 이러한 광화학 반응에 의해 오존뿐만 아니라 초미세먼지도 생성된다. 오존은 강력한 산화력에 의해 플라스틱, 금속 등의 부식·탈색을 유발하고 반점, 표백 등으로 식물의 성장을 저해한다. 사람의 눈과 폐 등을 자극하고 호흡기 질환자의 증세를 악화시킨다. 그러므로 정부에서는 국민들의 건강을 보호하기 위해 오존을 대기오염물질로 규정하여 관리하고 있다. 특히, 햇빛이 강한 기간인 4월 15일부터 10월 15일까지 오존 농도를 예보하고 있으며, 오존 농도가 120 ppb를 초과하면 오존 주의보를 발령하고 있다.

고도에 따른 온도와 오존 농도의 변화



출처
World Atlas of Atmospheric
Pollution, 2008

지표에서 광화학 반응에 의한 오존과 초미세먼지의 생성 모식도



가시거리 : 안개와 초미세먼지

학술적으로 공기 중에 부유하고 있는 액체 또는 고체 상태의 입자를 에어로졸(aerosol)이라 부른다. 매연(smoke)은 불완전연소에 의해 생기는 가시적 에어로졸인데, 이러한 입자는 고체 또는 액체일 수 있다. 미스트(mist)와 안개(fog)는 응축이나 분무에 의해 생기는 액체 상태의 에어로졸이다. 스모그(smog)는 일정 지역에서 발생하는 가시적 대기오염 현상으로 매연과 안개의 합성어이다. 이것은 가시거리가 기상현상과 대기오염에 따라 달라진다는 것을 의미한다. 특히, 가시거리(visibility)에 영향을 미치는 대기 에어로졸을 연무(haze)라고 부른다.

기상학에서 가시거리(시정)는 대기가 혼탁한 정도를 눈에 보이는 곳까지의 거리로 나타낸 것이고, 가시거리에 영향을 미치는 주된 인자는 안개이다. 안개는 기상조건이 변하여 수증기를 포함한 대기의 온도가 낮아져 이슬점 온도에 도달할 때 수증기가 작은 물 입자로 바뀌어 공기 중에 떠 있는 상태를 말한다. 가시거리가 짧아지면 우리의 시야를 흐리게 만들어 항공기, 선박 등이 결항되거나 차량이 정체되는 등 일상생활에 불편을 초래한다. 이에 따라 기상청에서는 기온, 풍속 등과 함께 가시거리(시정)를 관측하고 있으며, 기상청 날씨누리(www.weather.go.kr)에서 관측자료를 1시간 간격으로 공개하고 있다.

초미세먼지(PM_{2.5}) 오염도는 공기 중에 부유하는 2.5 마이크로미터보다 작은 입자의 질량농도로 나타내므로, 초미세먼지는 에어로졸 중에서 고체 상태의 입자를 의미한다. 입자는 크기와 성분에 따라 빛을 산란시키는 정도가 다르고, 초미세먼지에 해당되는 크기의 입자가 빛을 잘 산란시켜 가시거리에 영향을 미친다. 즉, 초미세먼지 농도가 높아지면 가시거리가 짧아진다. 보다 상세한 사항은 미세먼지 TIP 2에 설명되어 있다. 초미세먼지는 대표적인 대기오염물질이므로 환경부 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 관측자료를 1시간 간격으로 공개하고 있다. 가시거리는 기상현상인 안개와 대기현상인 고농도 초미세먼지 오염에 의해 영향을 받으므로, 시야가 뿌옇게 되면 초미세먼지 농도를 확인하여 대기오염 상태를 파악할 필요가 있다.

안개와 연무의 차이

구분	수평시정	상대습도	색상(밝은 배경)
안개(fog)	1km 미만 ¹⁾	90~100% ²⁾	우유빛 혹은 회색
연무(haze)	1~10km ¹⁾	70% 이하 ²⁾	황색 혹은 적갈색 ²⁾

출처
1) 시사상식사전, 2) 기상청

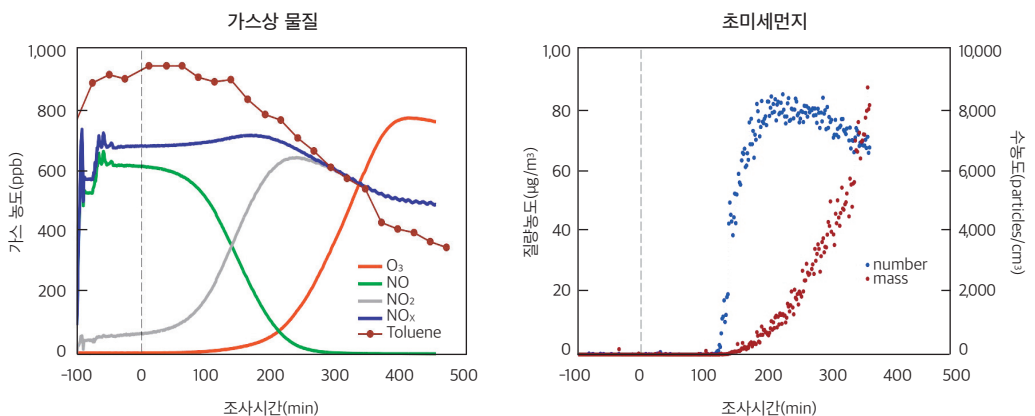
광화학 스모그

스모그는 대기 중 초미세먼지가 많아져 빛을 산란시켜 우리의 시야를 흐리게 만들어 일상생활을 불편하게 만들고, 건강에 나쁜 영향을 미치는 대표적인 대기오염 현상이다. 산업화 과정에서 석탄을 사용하는 사업장의 굴뚝에서 매연과 이산화황(SO₂)이 다량으로 배출되고, 겨울철 아침에 기온이 낮아 안개가 끼고 역전층이 생기면, 이산화황이 황산염 입자로 바뀌고 매연에 수분이 결합하여 스모그 현상이 빈번하게 발생되었다. 이처럼 스모그(smog)는 매연(smoke)과 안개(fog)가 함께 작용하여 생기므로, 이 둘의 합성어이다. 이러한 1차 산업에 의해 생긴 대표적인 스모그 현상이 1952년 영국 런던에서 발생되어 흔히 런던 스모그라고 부른다.

이와 달리 미국 LA 지역에서 여름철 낮에 스모그 현상이 빈번하게 발생되었다. 이것은 석유를 사용하는 자동차 등에서 배출된 질소산화물(NO_x)과 유기용제를 사용하는 사업장 등에서 배출된 휘발성 유기화합물(VOCs)이 강한 햇빛으로 서로 반응하여 오존(O₃)과 초미세먼지 등이 생성되기 때문이다. 이러한 광화학 반응에 의해서도 스모그 현상이 발생되므로, 런던 스모그와 구분하여 광화학 스모그(photochemical smog) 또는 LA 스모그라고 부른다.

광화학 반응이 발생되면 오존이 생성되고, 이어서 아주 작은 초미세먼지도 생성된다. 이러한 현상이 약하면 오존 농도만 증가하지만, 강하면 초미세먼지도 많이 생겨 시야를 흐리게 하는 스모그 현상이 발생된다. 햇빛이 강한 여름철에 발생하는 고농도 초미세먼지 현상은 이러한 광화학 스모그와 관련되어 있어 국지적 영향이 크다. 광화학 스모그를 일으키는 초미세먼지와 오존은 배출원에서 직접 발생되지 않고 2차 생성에 의해 발생되므로, 런던 스모그에 비해 관리하기가 더 어렵다.

질소산화물과 톨루엔의 광화학 반응에 의한 오존 및 초미세먼지의 생성과정



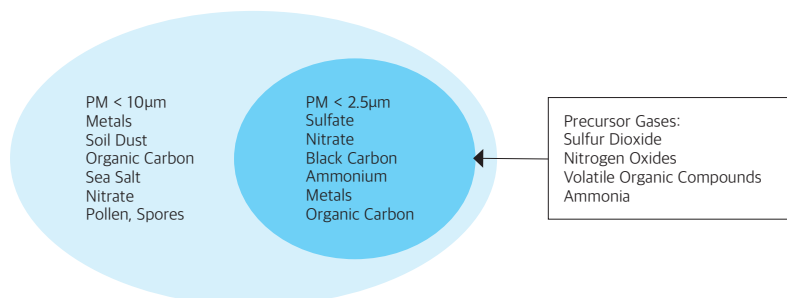
출처
한국과학기술연구원
이승복 박사팀

미세먼지 성분

먼지는 형상이 있어 크기에 따라 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}) 등으로 구분하고 있다. 이산화황(SO₂), 이산화질소(NO₂), 일산화탄소(CO), 오존(O₃) 등의 대기오염물질과 달리 미세먼지는 다양한 성분으로 구성된 혼합물이다. 초미세먼지는 대부분 황산염(sulfate), 질산염(nitrate), 검댕(black carbon), 암모늄(ammonium), 금속(metals), 유기탄소(organic carbon) 등으로 구성되어 있다. 미세먼지 중 초미세먼지보다 큰 먼지(PM_{10-2.5})에는 금속, 토양먼지(soil dust), 유기탄소, 해염(sea salt), 질산염, 꽃가루(pollen), 포자(spores) 등이 많이 포함되어 있다. 대기 중 반응에 의해 생성되는 초미세먼지(secondary PM_{2.5})에 의해 고농도 현상이 발생되고 있는데, 이러한 원인물질(precursor)로는 SO₂, NO₂ 휘발성 유기화합물(VOCs), 암모니아(NH₃)가 있다. 초미세먼지 중 황산염, 질산염, 암모늄, 유기탄소가 이차 생성과 관련된 성분이다.

대기환경 연구자들은 배출원을 파악하기 위해 미세먼지 성분을 분석하지만, 일반인은 건강에 나쁜 영향을 미칠 수 있는 유해성분이 미세먼지에 얼마나 포함되어 있는지에 관심이 많다. 현재 우리나라 일평균 초미세먼지의 대기환경기준은 35µg/m³이다. 공기 1m³ 중에 초미세먼지가 35µg보다 적게 포함되어 있어야 기준을 만족한다. 음식점에서 보통 고기 1인분이 200g이므로, 공기 중 초미세먼지 양은 고기 1인분에 비해 천만분의 2 정도로 매우 적다. 그러나 세계보건기구에서는 미세먼지(초미세먼지 포함)를 1군 발암물질로 지정하였으므로, 고기에 비해 미세먼지의 독성이 매우 강하다고 할 수 있다. 미세먼지 성분 중 황산염, 질산염, 암모늄의 양은 이온성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)을 분석하여 알 수 있으며, 보통 50% 이상을 차지하고 있다. 금속이나 토양먼지의 양도 금속성분(Fe, Zn, As, Ni, Pb, V, Mn, Ti, Cd, Cu, Se, Cr, Ba 등)의 분석을 통해 알 수 있는데, 보통 1m³ 당 수십 ng 가량 포함되어 있다. ng은 µg의 천분의 1이므로 미세먼지 중에 금속성분은 이온성분보다 매우 적게 함유되어 있다. 대표적 독성물질인 다환방향족탄화수소(PAHs)는 자동차에서 배출되므로 도로변 지역에서 농도가 높는데, 수 ng 수준으로 역시 미량이다. 미세먼지가 호흡이나 피부를 통해 인체에 노출되면 건강에 나쁜 영향을 미칠 수 있고, 이러한 영향은 미세먼지의 성분(독성)별 농도(양)에 따라 달라진다.

미세먼지의 대표적 성분



미세먼지와 코로나19

미세먼지는 단일물질이 아닌 복합물질로 구성되어 있다. 이러한 미세먼지는 크게 물리적(크기, 모양, 물성 등), 화학적(이온, 탄소, 중금속, 토양 성분 등), 생물학적(박테리아, 곰팡이, 바이러스, 꽃가루 등) 특성을 이용하여 구분할 수 있다. 우리가 보통 박테리아, 곰팡이, 바이러스를 미생물로 부르는데, 이들도 모양이 있어 미세먼지의 속성을 갖는다. 곰팡이는 수 마이크로미터 크기이고, 이들의 포자는 더욱 작다. 박테리아는 약 1 마이크로미터이며, 바이러스는 0.1 마이크로미터 정도라고 알려져 있다. 물리적인 크기로 보면, 이들 미생물은 모두 미세먼지에 해당된다. 그러므로 현재 많은 사람들이 호흡 시 물리적으로 코로나 바이러스를 차단하기 위해 보건용 마스크를 착용한다.

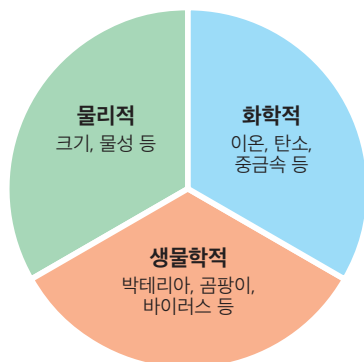
미세먼지는 생명력이 없는 죽은 상태이지만, 미생물은 살아있다는 점에서 일반 미세먼지와 다르다(생물학적 특성). 그리하여 학술적으로 미세먼지(aerosol)와 구분하여 공기 중에 부유하는 미생물을 바이오 미세먼지(bioaerosol)라고 부른다. 바이오 미세먼지는 미세먼지의 특성과 생물학적 특성이 있으므로, 코로나19에 대응하기 위해서는 이 두 가지 특성을 잘 이해하는 것이 중요하다. 공기청정기의 주된 목적은 실내 미세먼지를 제거하는 것이고, 실내 미세먼지 중 극히 일부는 미생물이다. 이러한 미생물의 생명력을 억제하기 위해 표면을 항균처리하거나 항균물질이 사용된 항균필터를 사용하기도 한다.

미세먼지는 약방의 감초처럼 우리 생활, 산업 전반에 걸쳐 분포하므로, 미세먼지의 특성에 대해서는 학문적으로 많이 알려져 있고 국내 전문가도 많다. 미생물에 대한 일반 지식은 대학에서 많이 가르치나, 공기 중 부유하는 바이오 미세먼지의 특성에 대하여 우리가 알고 있는 지식은 많지 않다. 21세기에 들어 호흡기 바이러스 감염과 관련하여 2002년 중증급성호흡기증후군(SARS), 2009년 신종인플루엔자, 2015년 중동호흡기증후군(MERS)에 이어 2019년 코로나바이러스감염증-19로 사회적 혼란을 겪고 있다.

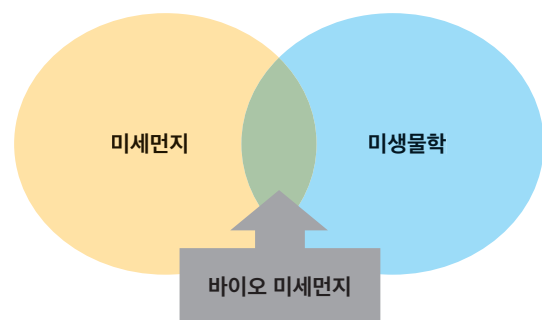
감염전파는 보통 접촉, 비말, 공기를 통해 이루어지는 것으로 알려져 있다. 비말전파는 감염된 환자가 기침, 재채기, 말을 하는 동안 환자의 호흡기 분비물에 감염균이 포함된 큰 먼지(비말, 보통 5 마이크로미터 이상)가 섞여 나와 다른 사람에게 전파되는 것을 말한다. 비말보다 작은 크기의 먼지에 바이러스가 포함되어 있으면 오랫동안 부유하여 공기를 따라 이동하면서 다른 사람에게 감염을 일으킬 수 있는데, 이것을 공기전파라고 부른다. 공기전파의 경우 교차감염이 발생되지 않도록 환기(공기 흐름)를 잘 관리하는 것이 중요하다. 바이오 미세먼지를 잘 다루기 위해서는 미세먼지에 대한 많은 지식이 상식 수준으로 일반화되고, 더불어 잘 모르는 생물학적 특성을 밝혀내어 지식을 쌓아가는 것이 중요한 시기이다.

출처
 배귀남, 환경미디어, 376호

미세먼지의 3가지 특성



바이오 미세먼지의 특성



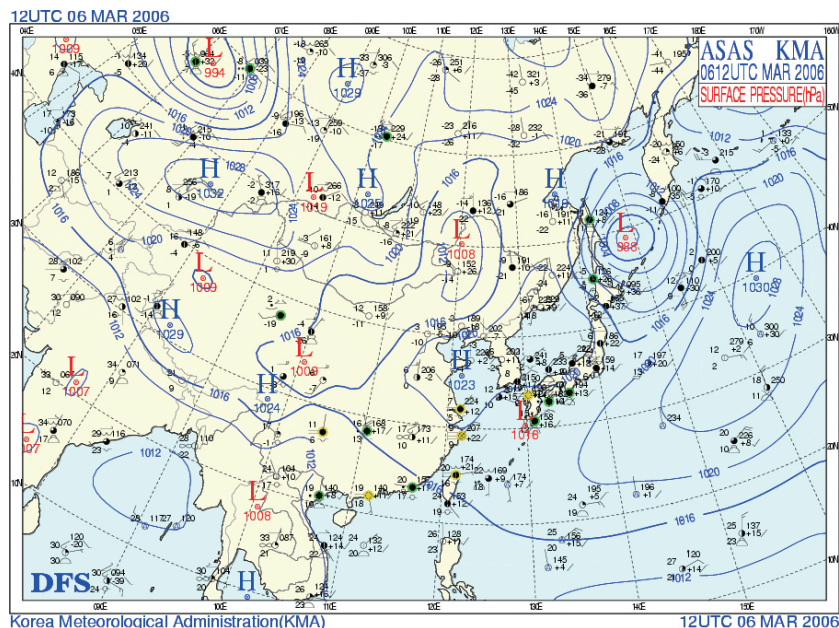
일기도로 보는 한반도 주변 미세먼지의 이동

한반도 주변 기압계의 패턴은 대기의 안정도와 대기오염물질(미세먼지)의 이동에 큰 영향을 미친다. 이동성 고기압계와 저기압계는 편서풍 파동대(wave)가 동서 방향의 사행 운동(meandering motion)을 할 때, 파동대의 능(ridge)과 골(trough)이 위치하는 곳으로, 약 40~50km/h 속력으로 이동하고 대기경계층에서 풍속은 5~6 m/s로 약하다. 이때, 기압계의 배치와 이동이 이루어지고, 지역적인 풍속과 풍향을 결정하며, 특히 고농도 미세먼지의 발생에도 영향을 미친다.

대기오염물질의 농도는 ① 오염물질의 배출량, ② 물리화학적 반응, ③ 대기 운송, ④ 대기 안정도, ⑤ 강수나 중력에 의한 습-건성 침착(제거) 등에 의해 좌우된다. 한반도 주변이 고기압의 영향권에 있을 때, 대기(경계층)에서는 하강 기류가 강하고 안정(stable)되어 있다. 이런 고기압계가 한반도를 지배하면, 공기가 정체(stagnant)된다. 이때 오염물질이 배출되면 환기(ventilation)가 잘 되지 않고 오염물질이 축적되어 농도가 높아진다. 특히, 산동반도 주변에 고기압이 있고 만주지역에 저기압이 위치하는 기압 패턴이면, 이동성 고기압계의 시계 방향 풍향과 저기압계의 반시계 방향 풍향이 합쳐지는 지역에서는 풍속이 빨라지고 오염물질의 운송 통로(duct) 역할을 하게 된다. 즉, 풍상 측의 오염물질 농도가 높으면, 풍하 측으로 오염물질의 유입이 증가된다. 풍하 지역에서는 자체 배출된 오염물질과 외부에서 유입된 오염물질이 합쳐져 고농도 미세먼지가 발생되기 좋은 조건이 된다.

일기도의 기압 패턴은 날씨에 대한 정보뿐만 아니라 미세먼지의 이동과 분포를 예측할 때도 유용하다. 한반도 주변의 종관(synoptic) 기상 상황은 기상청 홈페이지(<https://www.weather.go.kr/w/index.do>)에서 일기도 등으로 쉽게 확인할 수 있는데, 분석 일기도의 경우 00UTC(9KST)와 12UTC(21KST)에서 수직으로 8개 층(지상, 925, 850, 700, 500, 300, 200, 100hPa)에 대한 기상 자료를 제공하고 있다.

봄철 이동성 고기압이 산동반도에 위치해 있는 경우의 지상 일기도(2006년 3월 6일 12UTC)



미세먼지와 발암물질

먼지는 크기에 따라 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}) 등으로 구분되고(미세먼지 TIP 1 참조), 황산염, 검댕, 금속, 유기탄소 등 다양한 화학성분으로 이루어져 있다(미세먼지 TIP 8 참조). 화학성분에 따라 독성이 다르고, 각종 암이나 질환을 일으키는 원인 중 하나로 알려져 있다. 현재 한국인 사망원인의 1위가 암이므로, 사람들은 암과 관련된 이슈에 매우 민감하다. 세계보건기구(WHO)의 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)에서는 발암물질을 독성의 차이가 아닌 암 유발의 확실성(과학적 근거)에 따라 4개 그룹으로 구분하고 있다. 즉, 사람에게 암을 일으키는 분명하고 충분한 역학적 자료가 있는 경우에는 1군(Group 1), 발암성이 있다고 추정되는 물질을 2A군(Group 2A), 발암 가능성이 있는 물질을 2B군(Group 2B), 발암물질로 분류가 어려운 그룹을 3군(Group 3)으로 규정하고 있다. 비소, 카드뮴, 다이옥신, 석면, 벤젠, 폼알데하이드, 라돈, 간접흡연 등이 1군 발암물질로 널리 알려져 있다.

WHO는 1988년 디젤엔진 매연을 2A군 발암물질로 규정하였고, 2012년 12월에는 디젤 배기가스에 많이 노출된 1만 2천여명의 광부들에 대한 장기간 건강영향 조사결과를 기반으로 디젤엔진 배기가스를 1군 발암물질로 변경하였다. 이것은 디젤 배기가스의 독성이 달라진 것이 아니라 믿음만한 과학적 근거를 확보하였기 때문이다. 또한, 2013년 10월에는 대기오염과 미세먼지를 농도와 특성에 관계없이 1군 발암물질로 규정하였다. 현재 디젤 배기가스, 간접흡연, 미세먼지는 1군 발암물질로 구분되어 있는데, 이것은 이들 오염물질이 암을 발생시킬 수 있다는 과학적 근거가 분명하다는 것을 의미한다. 아직 이들 오염물질의 독성(암을 발생시킬 수 있는 위험성) 차이에 대한 과학적 근거는 명확하게 알려져 있지 않다. 그러므로 간접흡연과 미세먼지 간 양의 차이로 위험성을 비교하는 것은 적절하지 않다.

국제암연구소의 발암물질 구분 및 예시(IARC, 2021.3. 기준)

구분	사람에 대한 발암성	물리·화학적 인자(Agent)
1군	암 유발 그룹 Carcinogenic to humans	121종 : 비소, 폼알데하이드, 석면, 담배, 벤젠, 콜타르 등
2군	A 암 유발 후보 그룹 Probably carcinogenic to humans	89종 : 자외선, 디젤엔진매연, 무기 납 화합물 등
	B 암 유발 가능 그룹 Possibly carcinogenic to humans	318종 : 커피, 디젤연료, 스테린, 가솔린엔진가스, 납, 극저주파 자기장 등
3군	발암물질로 분류가 곤란한 그룹 Unclassifiable as to carcinogenicity in humans	499종 : 석탄재, 인크, 극저주파 전기장 등

미세먼지 간이측정기

미세먼지는 매우 작고 모양이 다양하여 여러 가지 원리를 이용하여 측정되고 있다(미세먼지 TIP 1 참조). 정부에서는 에어코리아를 통해 전국적으로 분포한 도시대기측정소에서 고가의 정밀한 미세먼지 측정기로 흡인되는 공기 중 미세먼지가 필터에 쌓이면, 이를 통과하는 베타선의 양이 달라지는 원리를 이용하여 미세먼지 농도를 1시간 간격으로 산출하여 국민들에게 제공하고 있다. 도시대기측정소는 지역의 평균 대기질 농도를 파악하여 환경 기준의 달성 여부를 판정하기 위하여 설치되어 있으므로, 서울의 경우 구별 1개 정도로 분포하고 있다. 그런데 미세먼지 농도는 시간에 따라 변하고 공간적으로도 균일하지 않다. 이에 따라 미세먼지에 관심이 많은 사람 중에서 일부는 아주 저가의 휴대용 미세먼지 센서를 구입하여 거실이나 발코니 등 생활공간에서 미세먼지 농도를 측정한 후 에어코리아에서 제공하는 미세먼지 농도와 비교하여 차이가 크게 나타나면, 정부에서 제공하는 미세먼지 정보를 불신하는 사회적 문제가 대두되었다.

다양한 공간에서 신속하게 측정하여 제공할 수 있는 미세먼지 정보에 대한 국민적 수요를 고려하여 정부에서는 도시 대기측정소에서 사용하는 고가의 미세먼지 측정기에 비해 정확도는 떨어지지만, 어느 정도 신뢰도가 있는 미세먼지 간이측정기를 객관적으로 인증하는 제도를 마련하여 시행하고 있다. 즉, 환경부에서는 그동안 성능에 대한 검증 없이 유통 중이던 간이측정기 시장에 대한 신뢰도를 높이고, 측정기의 성능 향상을 유도하기 위해 2019년 8월 '미세먼지의 저감 및 관리에 관한 특별법' 제정 시 간이측정기 성능인증제의 시행에 대한 법적 근거를 마련했으며, 등급에 따라 참고용, 제한적 활용, 교육용으로 활용할 수 있도록 2019년 8월 15일부터 '간이측정기 성능인증제'를 시행하고 있다. 미세먼지 간이측정기의 성능인증기관으로 시·도 보건환경연구원과 대기환경 분야 업무를 수행하는 공공기관이 지정받을 수 있고, 성능인증은 실내·외 시험(챔버시험과 현장시험)을 통해 반복 재현성, 상대 정밀도, 자료 획득률, 정확도, 결정계수 등 5개 항목을 평가하여 최종적으로 비교평가 결과에 따라 1~3등급, 등급외 등 총 4단계의 등급으로 결정된다.

미세먼지 간이측정기는 공기 중의 입자에 빛을 쏘아 발생하는 산란광을 측정하여 미세먼지 농도로 환산하여 실시간으로 나타내고, 일부 측정기는 휴대할 수 있어 간편하게 사용할 수 있는 장점이 있다. 간이측정기는 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 측정 모드, 미세먼지의 상태 표시등, 표시 아이콘(좋음, 나쁨, 보통, 매우 나쁨) 등의 기능을 갖추고 있다. 그런데 광산란 방식의 간이측정기는 초미세먼지 중 일부인 0.3 μ m 보다 작은 입자를 측정할 수 없고, 순간적으로 반응하므로 측정값의 변동이 매우 크며, 습도 등 기상 조건에 취약하여 신뢰도가 상대적으로 낮다. 이러한 미세먼지 간이측정기는 '대기환경보전법'에 따라 국가와 지자체에서 설치·운영하는 측정기와는 달리 '환경분야 시험·검사 등에 관한 법률'에 따른 형식승인을 받지 않은 측정기라는 것을 알아둘 필요가 있다.

미세먼지 간이측정기 성능인증제

등급	적용영역	권장 사용자
1등급	참고용	기존 국가측정망 미설치 지역에서 주변 농도를 확인하는데 참고자료로 사용
2등급	제한적 활용	지역 내 배출원 주변 영향인지 등 농도의 단계적 확인을 위한 용도
3등급	교육용	농도의 경향성은 유지하는 수준으로 정보가 부족한 일반 시민들의 교육용
등급외	그 외	결과를 숫자로 표시하기 어려운 수준으로 학생들의 실습용 교재에 적합

통합대기환경지수

정부에서는 국민의 건강을 보호하기 위하여 대기오염물질을 대상으로 대기환경기준을 설정하여 대기질을 관리하고 있다. 현재 에어코리아에서는 도시대기측정소에서 관측하고 있는 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}), 오존(O₃), 아황산가스(SO₂), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂)의 1시간 평균 농도를 수치로 제공하고 있다. 이들 대기오염물질에 대하여 단기 노출(급성 건강 영향)과 장기 노출(만성 건강 영향)을 고려한 평균치가 국가 기준으로 설정되어 있다. 즉, 단기 노출을 고려하여 24시간 평균치로 PM₁₀ 농도는 100µg/m³ 이하, PM_{2.5} 농도는 35µg/m³ 이하가 국가 기준이다. 장기 노출을 고려한 국가 기준은 연간 평균치로 PM₁₀ 농도는 50µg/m³ 이하, PM_{2.5} 농도는 15µg/m³ 이하로 더욱 낮다. 각 오염물질의 농도를 국가 기준과 비교하면 현재 대기질 수준을 파악하는 것이 어렵다.

이에 따라 대기오염도의 측정치를 국민이 쉽게 알 수 있으면서 대기오염으로부터 피해를 예방하기 위한 행동 지침을 국민에게 제시하기 위하여 대기오염도에 따른 인체 영향 및 체감 오염도를 고려하여 통합대기환경지수(CAI, comprehensive air-quality index)를 개발하여 사용하고 있다. 즉, 6개 대기오염물질별 통합대기환경지수 점수를 산정하고, 가장 높은 점수를 통합 지수값으로 사용한다. 통합대기환경지수는 0에서 500까지의 지수를 4단계로 나누어 점수가 커질수록 대기상태가 좋지 않음을 나타낸다. 지수구간을 4등급(좋음, 보통, 나쁨, 매우나쁨)으로 구분하여 색깔, 픽토그램으로 알기 쉽게 표현하고, 지수구간별 인체 영향도 간략하게 설명하고 있다. 에어코리아에서는 통합대기환경지수와 등급, 주 오염물질에 대한 정보도 제공하고 있다. 이러한 통합대기환경지수는 나라마다 다르게 구분하여 사용되고 있다. 즉, 중국, 미국, 일본, 싱가포르의 6등급으로 구분하고, 캐나다는 4등급으로 구분한다. 홍콩은 5등급의 AQHI (Air Quality Health Index), 영국은 4등급의 COMEAP (Committee on Medical Effects of Air Pollutants)를 사용하고 있다. 보통 웹사이트(예, <http://aqicn.org>)에서 접하는 중국의 대기오염 정보는 각 오염물질의 농도가 아니라 대기환경지수로 나타내고 있으므로 주의할 필요가 있다.

통합대기환경지수의 등급 구분 및 건강 영향

지수 구분	좋음	보통	나쁨	매우나쁨	
점수	0~50	51~100	101~250	251~350	351~500
건강 영향	대기오염 관련 질환자군에서도 영향이 유발되지 않을 수준	환자군에게 만성 노출 시 경미한 영향이 유발될 수 있는 수준	환자군 및 민감군에게 유해한 영향이 유발될 수 있는 수준으로 일반인도 건강상 불편감을 경험할 수 있는 수준	환자군 및 민감군에게 급성 노출 시 심각한 영향을 유발하고, 일반인도 약한 영향을 받을 수 있는 수준	환자군 및 민감군에게 응급조치가 발생되거나 일반인도 유해한 영향을 받을 수 있는 수준
상징색	파랑	초록	노랑	빨강	
픽토그램					

세계보건기구(WHO)의 글로벌 대기질 가이드라인

대기오염에 의한 건강피해의 심각성이 알려지면서 세계보건기구(WHO, World Health Organization)에서는 1987년 처음으로 대기질 가이드라인을 발표하였고, 2000년과 2005년에 개정하였다. 이는 현재 전 세계에서 대기환경기준을 설정하는 근거로 사용되고 있다. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})에 대한 가이드라인은 2005년부터 제시하였다. 미세먼지의 장기 노출로부터 사람의 건강을 보호하기 위한 연평균 농도와 미세먼지 농도의 변동이 심한 지역에서 단기 노출로 인한 피해를 줄이기 위한 24시간 평균 농도를 가이드라인으로 설정하여 제시하고 있다. 또한, 국가마다 사회, 경제, 기술 역량 등 여건이 다른 것을 고려하여 가이드라인과 함께 단계별 잠정목표를 제시하고, 국가에서 설정한 목표를 달성할 경우 단계를 높여 궁극적으로 가이드라인에 도달하는 것을 권장하고 있다.

그동안 건강 영향에 대해 많은 연구결과가 발표되어 이들을 심층적으로 검토하여 3차 가이드라인을 평가하여 잠정목표 및 가이드라인 수준을 다시 설정하여 네 번째 개정판(WHO global air quality guidelines)을 2021년 9월에 발표하였다. 즉, 가이드라인 수준을 PM₁₀ 연평균 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 연평균 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하고, 4단계의 잠정목표를 함께 발표하였다. 2018년 우리나라는 3차 WHO 가이드라인의 잠정목표 2 (현재 잠정목표 3)를 기반으로 대기환경기준을 설정하여 현재까지 적용하고 있다. 즉, PM₁₀의 경우 연평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}의 경우 연평균 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대기환경기준이 설정되어 있다. 이에 환경부에서는 한국대기환경학회에 연구용역을 의뢰하여 대기환경기준을 개정하기 위한 작업을 진행 중이다.

WHO 대기질 가이드라인과 우리나라 대기환경기준의 비교

목표	WHO (2021)		한국 (2018)	
	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
권고기준	연평균 5 24시간 평균 15	연평균 15 24시간 평균 45		
잠정목표 4 (IT-4)	연평균 10 24시간 평균 25	연평균 20 24시간 평균 50		
잠정목표 3 (IT-3)	연평균 15 24시간 평균 37.5	연평균 30 24시간 평균 75	연평균 15 24시간 평균 35	
잠정목표 2 (IT-2)	연평균 25 24시간 평균 50	연평균 50 24시간 평균 100		연평균 50 24시간 평균 100
잠정목표 1 (IT-1)	연평균 35 24시간 평균 75	연평균 70 24시간 평균 150		

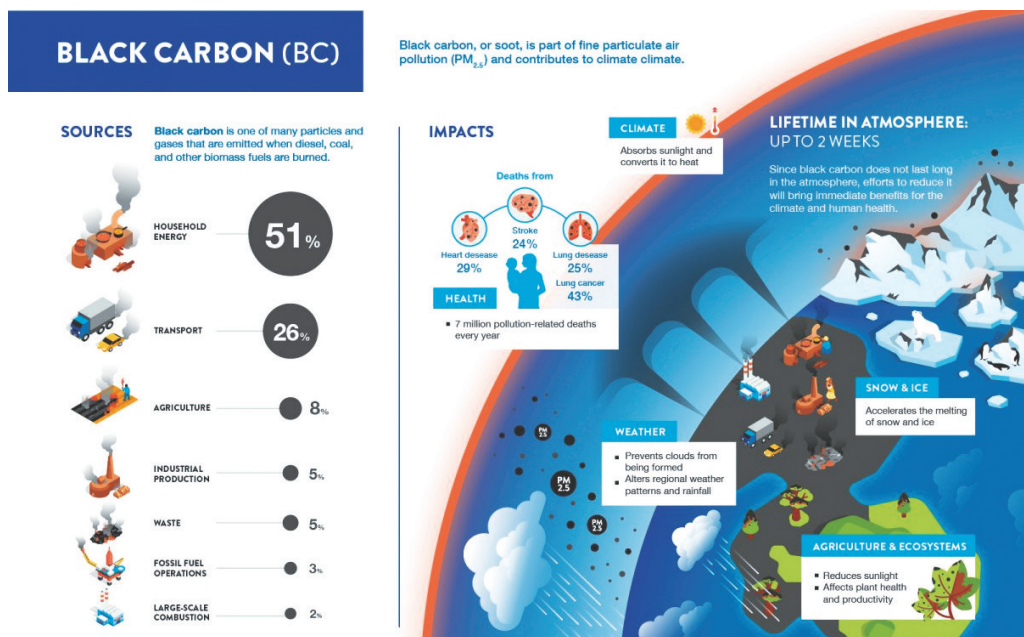
검댕과 건강 그리고 기후변화

검댕(BC, black carbon)은 석탄, 석유 등 화석연료 혹은 식물, 나무 등 바이오매스와 같은 유기물질이 불완전 연소 혹은 열 분해될 때 만들어지는 입자상 물질이다. 경유 자동차에서 배출되는 디젤 입자에도 검댕이 많이 포함되어 있다. 세계보건기구(WHO, World Health Organization)의 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)에서 2012년 6월 디젤엔진 배기가스를 사람에게 암을 유발할 수 있는 1군 발암물질로 지정하였다.

2021년 WHO는 6개 대기오염물질(PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, SO₂, CO)에 대하여 수정된 글로벌 대기질 가이드라인을 발표하였다. 추가로 3가지 입자상 물질(BC, ultrafine particles, sand and dust storms)에 대해서는 데이터가 충분하지 않아 가이드라인을 제시하지 않았지만, 건강을 보호하는데 도움이 되는 우수실행방안(good practice statement)을 제안하였다. 검댕에 대한 우수실행방안은 ① 검댕의 체계적인 측정, ② 배출량 조사, 노출평가, 배출원 기여도 산정의 실시, ③ 관할 지역에서 검댕 배출량을 줄일 수 있는 수단을 적용하고, 대기 중 검댕 농도의 기준 또는 목표를 제정하는 것이다.

한편, 미세먼지는 햇빛을 반사해 지구 표면에 도달하는 햇빛의 양을 변화시키고, 대기 중에 부유하면서 수증기와 결합하여 구름을 생성하여 구름에 의해 반사되는 햇빛의 양을 간접적으로 변화시키기도 한다. 즉, 태양 에너지의 양을 감소시킴으로써 미세먼지는 기후에 냉각 효과를 유발한다. 미세먼지 중 검댕은 빛을 잘 흡수하는 특성이 있어 기후에 온실 효과를 유발한다. 검댕이 지구온난화에 미치는 영향은 대표적 온실가스인 이산화탄소(CO₂)의 55% 정도로 알려져 있다. 이러한 검댕이 빙하에 쌓이면, 열이 축적되어 빙하가 더 빨리 녹도록 유도하여 지구의 물 순환을 변화시킬 수 있다. 대기 중 검댕의 수명은 2주 정도로 이산화탄소와 같은 다른 온난화 물질보다 매우 짧으므로, 지구 전체보다 동북아시아와 같은 지역의 기후변화에 더 큰 영향을 미친다.

검댕의 배출원과 건강 및 기후 영향



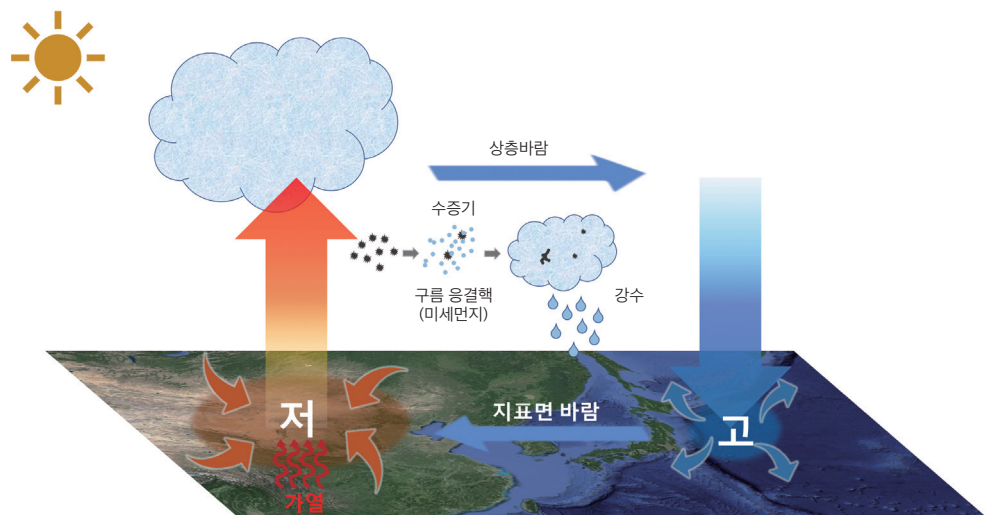
미세먼지와 구름 그리고 비

미세먼지는 공기 중에 떠 있는 매우 작은 물체이므로 기상 영향 크게 받는다. 어느 시에 쓰여 있듯이 미세먼지도 나그네처럼 바람 따라 구름 따라 흘러가는 속성이 있다. 태양 빛이 지구에 도달하면 지표면이 가열되어 기온이 높아져 공기가 상승하고, 이로 인해 지표면의 기압이 낮아져 이 지역은 상대적으로 저기압 상태가 된다. 상승한 공기는 상층 바람을 타고 이동하며, 태양 빛을 덜 받는 지역에서 공기가 하강한다. 이로 인해 그 지역 지표면의 기압이 상승하여 상대적으로 고기압 상태가 된다. 이에 따라 지표면에서는 고기압 지역에서 저기압 지역으로 바람이 분다.

미세먼지는 다양한 화학성분으로 구성되어 있어 인체로 유입 시 건강에 나쁜 영향을 미칠 뿐만 아니라 날씨에도 영향을 미친다. 공기가 상승하면 기온이 낮아지는데, 대기 중 수증기는 기온이 이슬점 아래로 낮아지면, 서로 달라붙어 물방울을 만든다(응결). 구름은 대기 중에 떠다니는 작은 물방울 혹은 얼음 알갱이들이 모인 것이다. 대기 중 미세먼지는 구름을 만드는 씨앗(구름 응결핵, CNN, cloud condensation nuclei)의 역할을 하여 미세먼지가 많아지면 구름이 더 많이 생겨 비가 더 많이 내릴 수 있게 된다. 이러한 원리를 이용하는 것이 인공강우이다. 인공강우는 구름 응결핵이 되는 물질을 하늘 높이 살포하여 인위적으로 구름의 형성을 촉진하여 비를 만드는 것이다. 보통 구름 응결핵은 대기 중에 떠다니는 입자(에어로졸, aerosol)이며, 자연적으로 생성된 해염(바닷물에서 수분이 증발하여 염분이나 미량금속 성분만 남은 미세한 입자), 화산재, 황사 등이 대표적인 예이다.

빗방울의 굵기는 1mm 정도로 비가 내리면 빗방울을 눈으로 볼 수 있다. 자세히 보면 빗방울의 간격은 꽤 넓다. 미세먼지는 눈으로 보이지 않을 만큼 작고, 대기 중 미세먼지의 개수는 매우 많다. 미세먼지는 빗방울과 충돌하여야 제거될 수 있는데, 이슬비 정도의 적은 비로는 충돌할 확률이 매우 낮다. 하늘에서 빗방울이 떨어지면서 미세먼지와 충돌하려면 강수량이 많아야 한다는 것을 알 수 있다. 그런데 고농도 미세먼지는 주로 비가 적게 내리는 겨울철이나 봄철에 발생한다. 강수에 의해 고농도 미세먼지가 해소되길 기대하는 것은 현실적이지 않다는 것을 알 수 있다.

바람의 생성과 이동



미세먼지 TIP

Technical Information of Particulate matter