

미세 먼지
FINE DUST
EMERGENCY REDUCTION MEASURES FOR FINE DUST

02 한반도 지역 미세먼지 현황

1. 한반도 미세먼지 농도의 시공간적 분포 특성

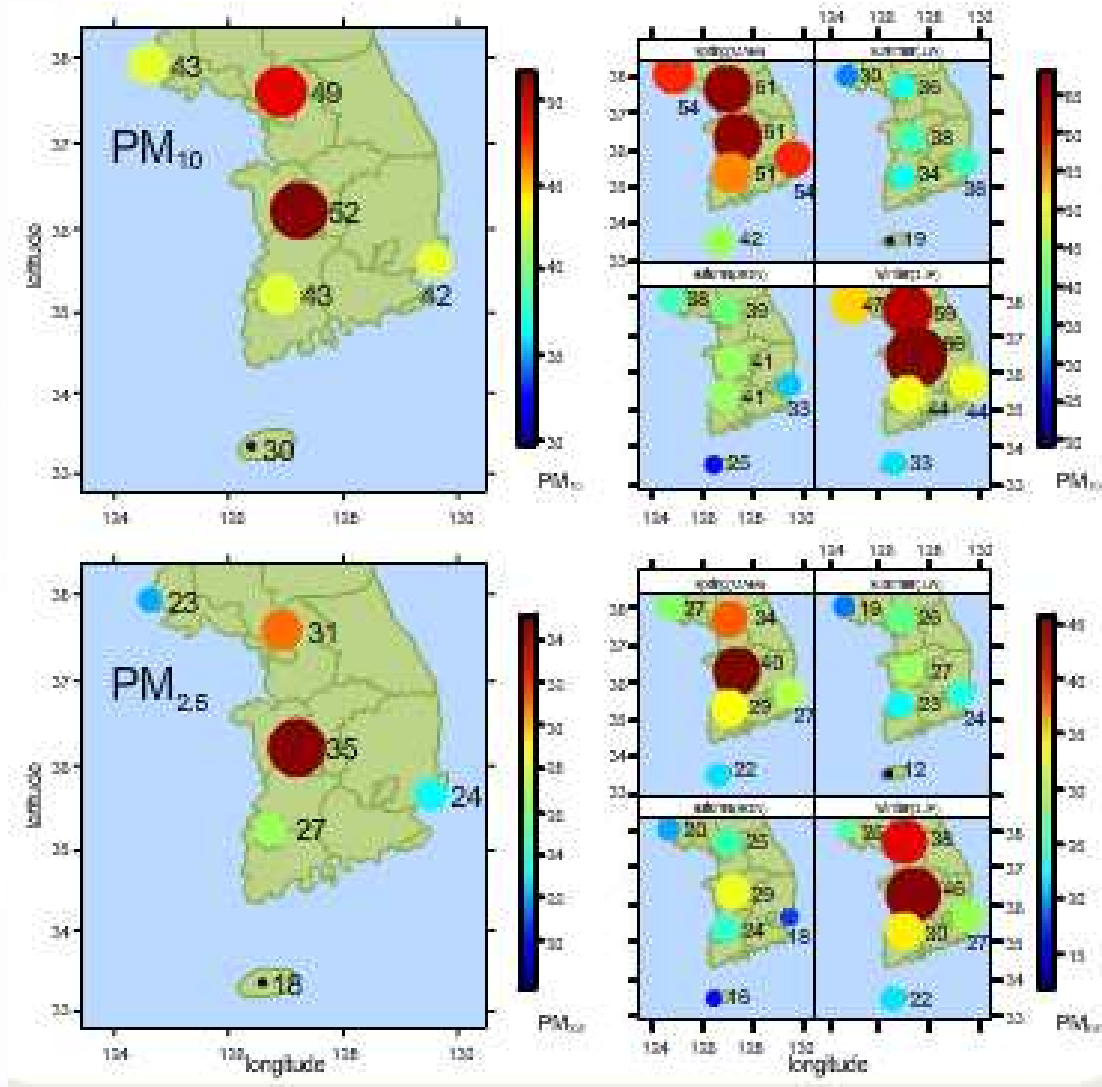
한반도 지역에서 관측된 미세먼지(PM10)자료의 분석 결과들을 참조해보면 대략 평균적으로 약 40-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 값을 가진다. 봄에는 이 보다 약 10-15 % 정도 평균치가 높아지는데 중국북부및몽골지역사막에서불어오는황사에의한영향이크게나타나기때문이다. 주로 고비 사막 및 타클라마칸 사막이 한반도 황사의 주 배출원으로서 작용한다. 겨울철의 증가는 난방 목적으로 인한 화석 연료 사용이 주 원인으로 보인다. 반면 여름, 가을은 반대로 10-15 % 정도의 감소 현상을 보이는데 이는 여름철 주요 대기 미세먼지(에어로졸)이 아주 작은 미세영역 입자로 구성되어 질량 농도 변화에 기여하는 부분이 작은데다 여름에는 장마에 의해 씻겨 내려가는 효과, 가을에는 태풍에 의해 확산되는 효과로 인해 감소 추이를 보이는 걸로 여겨진다. 초미세먼지(PM2.5)의 경우, 한반도 전체는 약 25-35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 평균값을 보이며 계절별 특징은 미세먼지(PM10)와 마찬가지로 겨울, 봄에 높게, 여름과 가을에 상대적으로 낮게 나타나는 특징을 보여준다.

하지만 일반적으로 국민들이 생활하면서 느끼는 미세먼지의 오염도는 조금 다르다. 특히 늦봄에서 초여름 장마 이전 시기에 대기가 상당히 혼탁해지는 느낌을 받을 정도의 고농도 미세먼지 오염사례를 종종 접하곤 한다. 이는 미세먼지 광학 깊이(aerosol optical depth, AOD) 관측값으로 설명되곤 하는데 미세먼지(PM10)의 연중 최고치가 3월 또는 4월에 나타나는 것과는 달리 AOD의 최고치는 6월에 나타나는 특징이 존재한다. 이는 1주차때 배웠던 것처럼 대기 중의 미세영역 입자가 습윤한 대기 환경에서 흡습 성장하여 자라기 때문인 것으로 해석되며 또한 대기의 정체가 일반적으로 장마 직전에 가장 심하게 발생하는 것 역시 대기 혼탁도에 큰 영향을 주는 것으로 보인다. 이를 AOD의 6월 피크라고 하며 한반도 대기 오염의 주요 특징 중 하나로 꼽을 수 있다.

미세먼지는 국민 보건과 관련이 있으므로 가장 표준적으로 활용되는 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)의 관측치에 대해 기준을 설정하여 대기질을 감시, 관리해오고 있다. 현재 환경부에서 제시하고 있는 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)의 환경 기준치는 연평균일 경우 미세먼지(PM10)가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 초미세먼지(PM2.5)가 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 24시간 평균 기준으로는 미세먼지(PM10)이 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 초미세먼지(PM2.5)가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 정해져 있다. 2015년 환경연보는 한반도 관측소가 이들 미세먼지 농도 기준치를 얼마나 만족하고 있는지를 조사하여 발표하였는데 연평균 기준으로는 약 65 %의 관측소만이 이 기준치를 만족하고 있었다.

한반도에서 미세먼지의 농도는 균일하게 나타나지 않는다. 일단 기본적으로 제주도 지역은 바다로 둘러 쌓여 있는데다 특별한 산업 현장에서의 오염물 배출이 없기 때문에 낮은 농도를 나타내고 있다. 하지만 같은 섬이라도 백령도의 경우는 제주도보다 훨씬 높게 나타나며 심지어 대도시 중 하나인 부산에서의 수치와 비슷하게 나타나고 있다. 이는 자체적인 오염 배출이 아닌 장거리 수송되어 넘어오는 대기 오염물의 영향을 크게 받기 때문인데, 한반도는 편서풍대에 위치해 있어 서쪽에서 넘어오는 대기 오염물의 영향을 매우 크게 받는 편이다. 특히 산동반도 지역 및 중국 수도 북경을 포함하는 징진지 지역의 대기 오염물 배출이 한반도 미세먼지에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 이러한 장거리 수송의 영향으로 인해 한반도 미세먼지 농도는 중국에서 가까운 서쪽 지역이 동쪽 지역보다 전체적으로 높게 나타나는 비대칭적 현상을 보여준다. 같은 서쪽임에도 서울 및 수도권 지역은 여러 인위적 활동에 의해 자체적으로 배출하는 오염원의 영향까지 더해져 미세먼지의 농도가 더 높게 나타난다. 특이한 지역은 충청남도, 전라북도 지역의 미세먼지 농도가 수도권보다도 높게 나타난다는 점이다. 이는 한반도 자체 오염원의 특징으로 설명되는데 태안 지역의 화력발전소, 서산 지역의 대산공단 등

이 대기 오염물을 많이 배출하는 지역으로 손꼽히고 있다. 전남 익산 지역도 큰 도시가 아님에도 불구하고, 수도권을 상회하는 미세먼지 농도가 관측되고 있는데 아직 정확한 원인을 이해하고 있지 못한 상황으로 향후 많은 추가 연구가 요구된다.



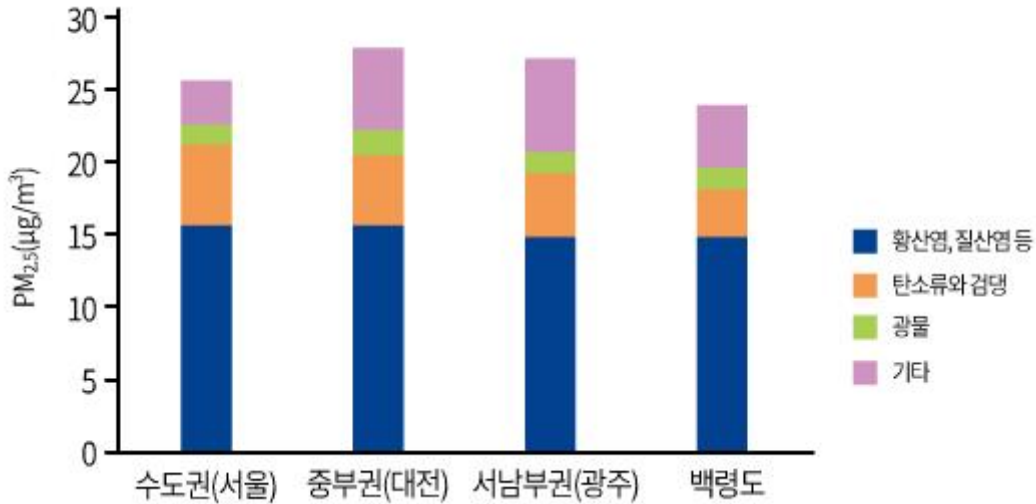
[환경부 집중 관측소에서 측정된 미세먼지(PM10) 및 초미세먼지(PM2.5)의 연평균 및 계절 평균분포]

(출처: 국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과, 한반도 권역별 기류유입 특성 및 오염물질별 국내외 기여도 분석(I), 2016)

인체 건강에 영향을 많이 주는 초미세먼지(PM2.5)의 경우에는 그 성분 구성의 현황 역시 구체적으로 이해되어야 할 필요가 존재한다. 그림 2-2는 관측을 통해 확인된 주요 지역별 초미세먼지(PM2.5)의 성분 구성을 보여주고 있는데 한반도 전체적으로 초미세먼지(PM2.5)의 절반 이상은 질산염(nitrate), 황산염(sulfate)과 같은 무기 이온염으로 주로 구성이 되어 있으며 그 뒤를 블랙카본을 중심으로 하는 탄소성 물질, 검댕이, 그 다음으로는 미네랄 광물 성분이 많

이 포함되어 있는 것으로 나타난다. 이 비율은 지역적으로 크게 차이를 보이지 않지만 백령도 같은 경우는 지역 자체적으로 오염물의 발생이 높지 않아 탄소성 물질 및 검댕 물질이 전체 농도에 크게 기여하지 않는 특징을 보인다.

[국내 초미세먼지(PM2.5)의 주요 성분 비율]



[국내 초미세먼지(PM2.5)의 주요 성분 비율]

(출처: 환경부 2016, <http://www.me.go.kr/issue/finedust/ebook.pdf> 및 한국과학기술한림원, 한반도 초미세먼지 현황과 대책)

미세먼지 질량 농도는 하루 중에서도 그 값이 변화하며 주간 변동성 역시 가지고 있다. 하루 중에서 미세먼지 농도가 가장 높게 나타나는 시점은 약 10시 - 11시로서 오전 시간대에 직장인들의 출근 및 사업장의 활동이 시작되는 효과들이 누적되면서 생기는 현상으로 볼 수 있다. 이렇게 높아진 농도는 그러나 오후로 접어들면서 급격하게 낮아지기 시작하는데, 보통 이 과정은 대기 경계층의 높이 변화로 많이 설명하고 있다. 대기 경계층이란 대류권 내에서도 지표와 마주하는 부분, 지표에서 약 1-1.5 km 정도 고도를 가지는 연직방향 대기 권역으로서 실질적으로 인간의 생활 영역이 되는 지역이기에 기상현상 뿐만 아니라 대기 환경 문제와 관련해서도 중요하게 다루어진다.

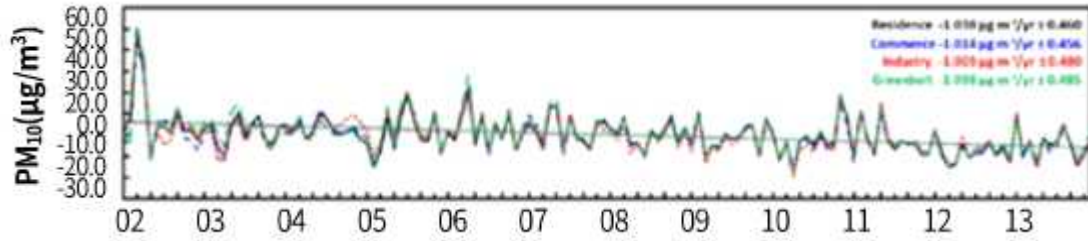
낮시간의 강한 태양복사에 의해 지표가 가열이 되면 더워진 공기들이 수직방향으로 상승하게 되면서 대기 하층의 오염된 공기가 상층의 상대적으로 덜 오염된 공기와 섞이는 현상이 좀 더 잘 발달하면서 미세먼지 농도가 희석되는 경향이 생긴다. 반면에 밤이 되면 대기의 냉각이 심해지면서 대기 경계층의 높이가 낮아져 훨씬 더 미세먼지가 지표 부근에 위치할 수 있게 된다. 물론 야간에는 대기오염 물질 배출량 자체가 작기 때문에 전체적인 미세먼지 농도는 낮게 나타난다. 즉 대기 가열로 인한 연직 확산으로 인해 미세먼지 농도는 오후 2~4시까지 급감하다가 이후 퇴근 시간 차량에 의한 배출의 영향으로 소폭 상승, 누적되면서 밤 10~11시 부근까지 증가한다. 이후에는 인위적인 활동의 소멸로 인해 다시 미세먼지 농도가 감소하게 된다. 주간 변동성은 인위적인 활동이 대기 미세먼지 농도에 어떤 영향을 줄 수 있는지 잘 보여주는 특징으로서 일반적으로 월요일에서 금요일까지를 평일, 토요일, 일요일을 주말 휴일 기간으로 정해서 비교하였을 때 나타나는 차이를 의미한다. 예상할 수 있듯이 평일에는 미세먼지 농도

가 높고 주말에는 감소하는 경향을 보이는데, 1주일 중에서 평균적으로 가장 농도가 낮게 나타나는 날은 토요일인 것으로 나타나고 주중에서도 월요일과 목요일에는 농도의 소폭 증가가 나타나는 경향이 있다. 최근 주중에 도시 지역에서 일하고 주말에는 비도시 지역으로 이동하여 휴식을 취하는 생활의 주간 변동성이 이전보다 늘어난 상황이라 금요일과 일요일에는 이동 인원의 증가, 즉 교통량이 늘어남에 따른 미세먼지 농도의 증가도 생각해볼 필요가 있을 것으로 보인다.

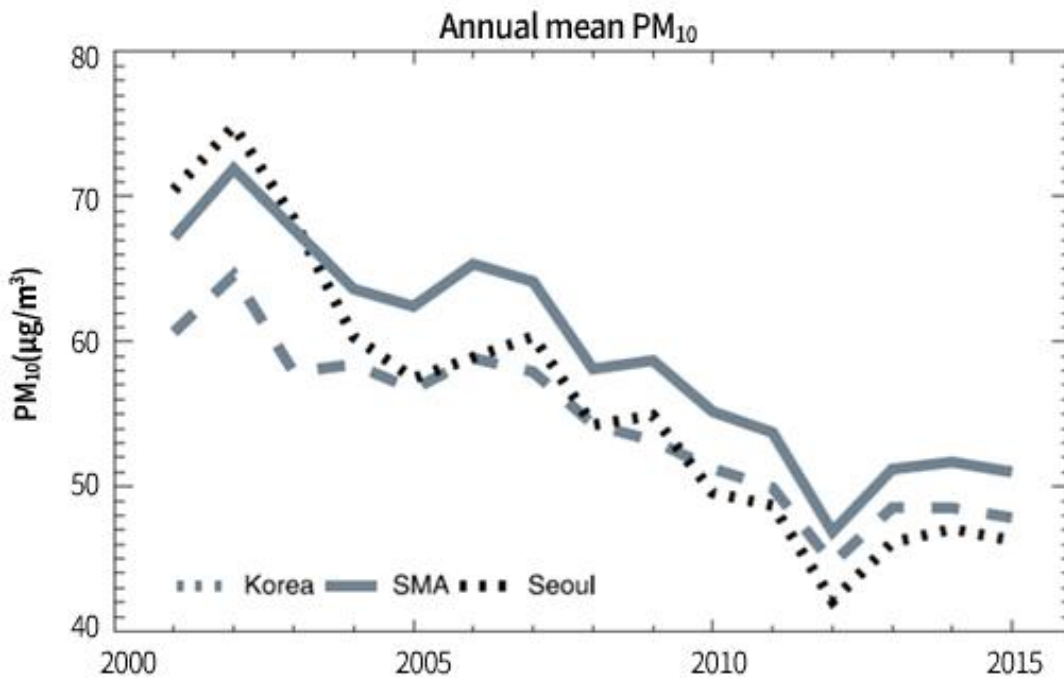
2. 한반도 미세먼지 및 전구물질 농도의 장기 변동성 특징

미세먼지 질량농도를 나타내는 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)중에서 초미세먼지(PM2.5)는 작은 입자의 관측 기술의 어려움으로 인해 2015년에서야 환경부에서 공식 측정 자료를 제공하기 시작한 반면 미세먼지(PM10)자료는 2002년 부터 제공이 되어 현재까지 15년 이상의 장기 관측 자료가 누적되어 있어 가장 기본적으로 한반도 미세먼지의 장기 변동성을 살펴보는 자료로 활용되어오고 있다. 한국인 연구자들에 의해 분석된 한반도 및 수도권 지역의 미세먼지(PM10)장기 추세를 나타낸 결과들이다. 일반 국민들이 갖고 있는 느낌과는 다르게 미세먼지(PM10)의 농도는 현재 장기적으로 감소추세를 보이고 있다.

a)



b)



[한반도 미세먼지(PM10)의 장기 변동성: a) 2002-2013년 기간동안 한반도 전체 미세먼지(PM10)의 아노말리(기후학적 평균에 대한 증감 정도) 지표 특성에 따라 평균하여 살펴본 연구 결과 b) 서울 및 수도권 지역의 미세먼지(PM10)크기 변화를 한반도 전체 평균과 비교하여 살펴본 결과]

(출처: a) Yoo et al., Atmospheric chemistry and physics, 2015, doi:10.5194/acp-15-10857-2015, b) Kim et al., Scientific reports, 2017, doi:10.1038/s41598-017-05092-8))

미세먼지(PM10)의 감소추세는 그림에서 보듯이 한반도 전체, 수도권, 서울 지역 모두 일관되게 2000년대 초반 이후로 꾸준히 이어져오고 있음을 잘 보여주고 있다. 특이한 부분은 2012년에 최소값을 찍은 이후 최근에는 소폭 증가하는 모습을 보여주고 있다는 점이다. 특히 2013년 1월에 중국발 스모그 문제가 사회적으로 큰 관심을 받으면서 이 시기 이후로 미세먼지가 본격적으로 사회의 중요한 문제 중 하나로 대두되기 시작하였다. 가장 큰 이유는 기상장, 특히 바람의 특성 변화에 의한 것으로 설명이 가능한데, 즉 풍속이 약해지고 그에 따라 대기 정체가 심해지면서 발생한 미세먼지가 쉽게 외부로 빠져나가거나 확산되지 못하고 대기 중에 오래 존재할 수 있게 되었다는 설명이다. 이는 미세먼지 농도 추세가 오염물질의 배출

및 대기 중의 화학반응에 의해 생성/소멸되는 것 못지않게 기상현상의 영향을 굉장히 크게 받는다는 사실을 의미한다.

AOD의 장기 추세는 주로 위성 자료를 통해 분석된다. 위성 자료가 시간적 변동성 정보를 제공해 줄 뿐만 아니라 장기 추세의 지역별 비교까지도 가능하게 해주기 때문이다. AOD 감시를 오랜 기간 성공적으로 수행하고 있는 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성 센서 관측값을 이용해서 살펴볼 경우 한반도 전체적으로 AOD의 증감은 크게 유의미하게 관측되지 않고 있다. 즉 AOD가 미세먼지(PM10)처럼 감소 추세를 분명하게 보이지는 않더라도 더 크게 증가하는 경향까지 보여주지는 않는다는 점에서 한반도 상공이 미세먼지로 인해 오염된 정도가 더 심해지는 방향으로 가고 있다고 보기는 어려울 것으로 생각된다.

미세먼지의 농도는 계절별 황사의 발생과 인위적인 발생에 의한 미세먼지 농도로 결정이 된다. 계절별로는 봄철 미세먼지의 농도가 줄어드는 추세가 분명하게 보이는데 이는 황사 발생 빈도의 변화와도 관련이 있다. 최근 연구 결과 한반도에서 황사 현상을 발견하는 횟수가 대폭 줄어든 사실이 확인되고 있다. 정확한 원인은 추가적인 연구가 좀 더 진행되어야 알 수 있겠지만 현재까지의 연구 결과 황사 발원지에서의 생성되는 정도가 줄어든다고 보단 발생한 황사 먼지가 한반도로 수송되어 넘어오는 정도가 약화되어서 발생하는 현상으로 짐작되고 있다. 이 역시 입자의 발생 못지 않게 주변 대기의 특성, 기상 상황이 대기 미세먼지 농도 및 혼탁도에 상당히 큰 영향을 줄 수 있다는 점을 시사한다.

한반도 미세먼지를 성분 중 가장 비중을 차지하는 것은 황산염과 질산염 입자이다. 관측 자료를 통해 이들의 장기 변동성을 살펴보았을 경우 황산염 농도는 1990년대 중반부터 큰 변화가 나타나고 있지 않고 있다. 한반도에서 황산화물의 인위적 배출이 그리 크지 않음을 감안할 때 이는 중국에서 월등하게 많이 배출되고 있는 황산화물이 장거리 수송되어 영향을 주요하게 생각할 필요가 있음을 의미한다. 질산염의 농도 추이는 아주 명확하지는 않으나 1990년대 후반에서 2000년대 사이에 증가한 부분이 존재하는 것으로 보인다. 특히 최근 한반도 주위를 항공기 및 선박을 이용하여 관측해보면 기존의 예상보다 질산염의 농도가 상당히 높게 나타나는 것이 관측되고 있어 그 원인을 자세하게 살펴봐야 할 필요성이 대두되고 있다. 블랙카본의 경우는 2000년도 이후 꾸준히 감소하는 추세를 보이는 것으로 나타나는데 이는 연료 전환, 수도권 대기환경 개선 대책에 따른 경유 버스를 천연가스 버스로 바꾸고, 경유자동차에 여러 제어장치를 부착하였기 때문으로 보인다. 유기탄소의 농도 역시 2000년대 중반부터 감소하고 있는 것이 확인되고 있다.

3. 전구물질의 특성 및 분포 현황

전구물질(precursor)은 미세먼지 농도에 영향을 주는 기체상 물질들을 통칭하여 일컫는 말이다. 현재 한반도 미세먼지 문제가 쉽게 대처되지 못하는 이유 중 하나로 한반도의 미세먼지 중에서 2차 미세먼지의 생성에 대한 기여가 매우 크며, 2차 미세먼지 생성 과정에 기여하는 전구 물질의 시공간적 분포 특징 및 현재 배출 상황을 정확하게 이해하지 못하는 부분이 꼽히고 있다. 현재까지 밝혀진 내용들을 바탕으로 각 전구물질들이 미세먼지 농도에 어떻게 영향을 줄 수 있는지를 살펴볼 필요가 있다.

1) 황산화물: 일반적으로 이산화황(SO₂)으로 대표되는 황산화물은 황산염 입자의 2차 생성에 큰 원인으로 작용하는 물질이다. 인위적 배출원은 화석 연료의 연소 과정으로서 석탄 및 석유

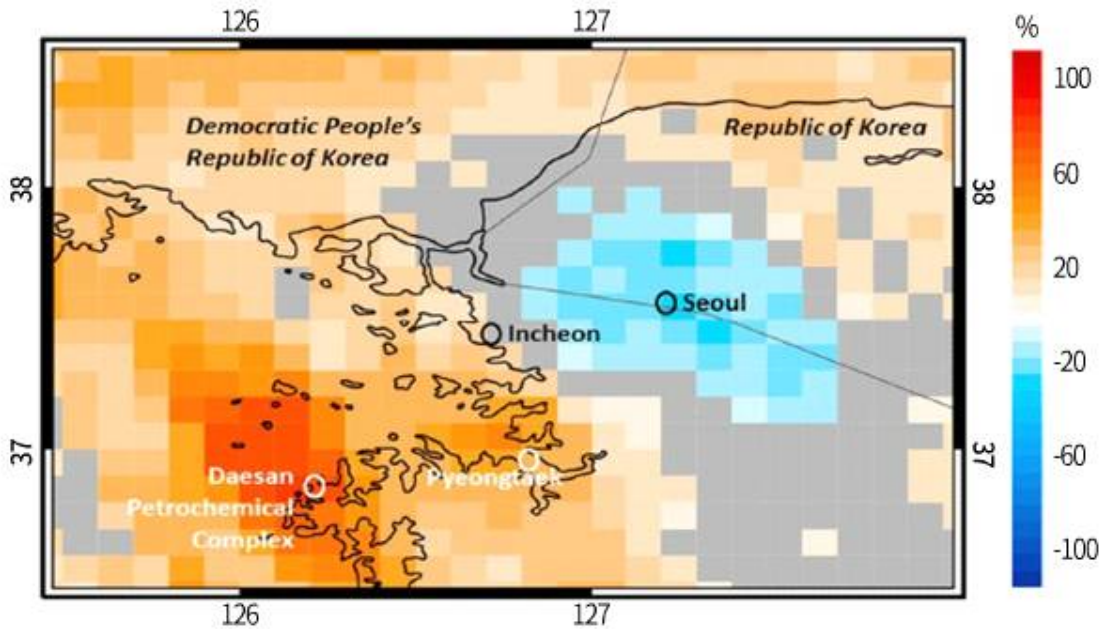
가 함유하고 있는 황물질이 연소 과정에서 산소와 결합(산화)하여 황산화물로 바뀌게 되면 이것이 대기 중에서 추가 산화반응을 가지면서 결국 황산염 입자 생성에 기여하게 된다. 대한민국은 일찍부터 탈황기술을 발전, 적용시켜 황산화물 배출량이 그다지 크지 않다. 이로 인해 이산화황 농도는 장기적으로 1980년대에 높은 농도를 보이다가 1990년대부터 가파르게 감소해서 2000년대 이후에는 80년대 농도의 약 1/10 수준까지 떨어졌다.

그런데 그러나 황산염의 농도 변화는 크지 않은데, 즉 한반도 자체적으로 황산화물의 배출이 크지 않음에도 황산염 농도가 높게 나타나고 있는 것은 다른 배출원의 기여도가 존재하고 있음을 의미한다. 중국의 경우도 산업 발달에 따라 탈황 시설 등을 갖추어가고 있으나 아직 그 정도가 한국에 비할 바가 아니며 인구 및 산업 규모를 고려할 때 여전히 우리나라에 비해 월등하게 황산화물을 많이 배출하고 있는 것을 알 수 있다. 이 황산화물이 서해를 넘어 수송되어 넘어오는 효과가 존재하는 것으로 보여진다. 다만 제주도의 경우는 지역의 황산염 농도가 중국의 황산화물 배출량과 비슷한 경향을 보이는 것이 잘 나타나지만 서울에서의 황산염 농도가 중국의 배출량 변화와 아주 잘 연결되지는 않기 때문에 여전히 도시에서는 자체적인 황산화물의 배출이 무시하기 어려울 정도로 존재하는 것으로 생각된다.

이산화황의 경우도 미세먼지와 마찬가지로 주중에 높고 주말에 낮은 특징을 보이며 하루 중에는 오전에서 정오 시간대에 가장 높은 특징을 보인다. 다만 오후 시간대의 감소 특징이 다른 대기 오염물질에 비해 낮게 나타나는 특성이 존재하는데 결론적으로 이산화황은 오후 시간대 보다는 일출 직전 새벽 5-6시에 가장 농도가 낮게 나타나는 특성을 보인다. 1년 전체로 보면 장마 이후 여름부터 가을까지는 황산화물의 농도가 낮게 나타나는 반면 겨울에 농도가 높아지는 현상을 볼 수 있는데 이것은 겨울철 난방용 화석 연료의 연소가 활발해지기 때문인 것으로 풀이된다.

2) 질소산화물: 일산화질소 및 이산화질소로 주로 표현되는 질소산화물(NOx)은 고온의 열원이 존재하는 인위적 활동, 즉 차량 및 발전소에서 많이 발생하는 물질이다. 이 질소산화물은 주로 대기 중에서 가수 분해 반응(hydrolysis)에 의해 질산염의 생성에 기여한다. 질소산화물은 또한 지표오존농도와도 밀접한 관련성을 가지고 있기 때문에 대기질 관리 과정에서 중요하게 다루어지는 물질이다. 문제는 한반도에서 질소 산화물의 농도가 크게 감소하는 모습이 보이지 않는다는 점이다. 여전히 절대적인 배출량은 중국이 높지만 중국에서의 질소산화물 농도가 최근 5년 사이에 작지 않은 감소세로 돌아서고 일본이 꾸준하게 질소산화물의 농도를 줄여오고 있는 반면 한반도의 경우 지역별 차이가 존재하지만 전체 평균은 크게 감소하는 느낌을 주지 못하고 있다.

[한반도 상공에서 위성으로 관측한 대류권 이산화질소 장기 변동 추세. 수도권 지역의 이산화질소가 크게 감소하는 반면 충청남도에서는 크게 증가하는 양상이 나타나고 있다.]



[한반도 상공에서 위성으로 관측한 대류권 이산화질소 장기 변동 추세. 수도권 지역의 이산화질소가 크게 감소하는 반면 충청남도에서는 크게 증가하는 양상이 나타나고 있다.]
 (출처: Duncan et al., Journal of Geophysical Research, 2016, doi: 10.1002/2015JD024121)

대류권 질소산화물의 농도는 위성에서 제법 높은 정확도로 관측해낼 수 있는 편이고 이 관측이 전세계 범위에서 최근까지 거의 20년 정도 이루어졌기 때문에 신뢰성 있는 분석이 가능한 편이다. 이 연구 결과에서 한반도의 질소산화물 농도의 감소추세가 크게 발견되지 않는 부분은 심각하게 받아들여야 하는 부분이다. 이에 대해 2016년 미국 NASA의 연구진이 중요한 연구결과를 하나 발표하였는데 그림 2-4가 그것이다. 그림 2-4는 위성으로 관측한 대류권 질소산화물의 장기 변동 추이가 한반도 상에서 어떻게 나타나는지를 보여주고 있는데 서울 지역과 충남 지역의 추세가 완전히 반대로 나타나고 있다. 서울 및 수도권 지역이 작지 않은 질소산화물의 감소 추세를 보여주는 반면 충남지역에서는 상당히 높은 증가추세를 보여주고 있는데, 특히 서산에 위치한 대산공단 상공에서 높은 질소산화물 증가 추세를 보여주고 있다.

질소산화물도 다른 오염물질과 같이 주중에 높은 수치를 보이며 주말에 낮은 값을 보인다. 그런데 일변화 역시 미세먼지 질량 농도의 변화와 유사한 모습을 보여주지만 질소산화물은 저녁 시간대의 고농도 피크가 오전 시간과 맞먹을 정도이거나 심지어 좀 더 높은 수준을 보여주고 있다. 이는 질소산화물의 주요 배출원이 차량이기 때문에 오전 출근 시간 뿐만 아니라 저녁 퇴근 시간의 차량 배기가스 영향을 크게 받기 때문이며, 일몰 이후에는 대기 경계층 높이가 낮아지면서 퇴근시간 배출된 배기가스가 지표에 좀 더 농축될 수 있기 때문에 보이는 특징으로 이해가 된다. 월별 변동성은 황산화물과 유사하게 7, 8월에 가장 낮게 나타나고 겨울에 높게 나타나는데 겨울철 난방 목적의 화석 연료 연소가 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 보여진다.

3) 암모니아: 최근 한반도 인근에서 높은 수치를 보이고 있는 질산염의 농도 특성을 이해하기 위해 암모니아 배출 및 대기 중 농도를 중요하게 살펴야 한다는 목소리가 크게 나타나고 있다. 암모니아는 주요 농축산업 활동에서 배출되는 물질로서 대기 중의 황산화물 및 질소산화물과 반응하여 황산암모늄 ((NH₄)₂SO₄), 질산암모늄(NH₄NO₃)입자를 2차적으로 생성시키는 역할을 한다. 이들은 모두 크기가 작기 때문에 초미세먼지(PM_{2.5})증가에 큰 기여도를 가지고 있으며 전반적으로 습윤한 지역에서 높은 흡습성장의 특성을 보이기 때문에 시정장애의 악화에도 큰 영향을 끼친다. 아직까지 한반도에서의 암모니아 관측 정보는 턱없이 부족하지만 일부 관측 결과들이 암모니아 농도가 한반도 전 지역에서 크게 낮지 않으며 암모니아 농도에 따라 질산염 농도 변화의 특징이 다르게 관측된다는 연구 결과가 있어 앞으로 중요하게 분석될 필요가 있을 것으로 보인다.