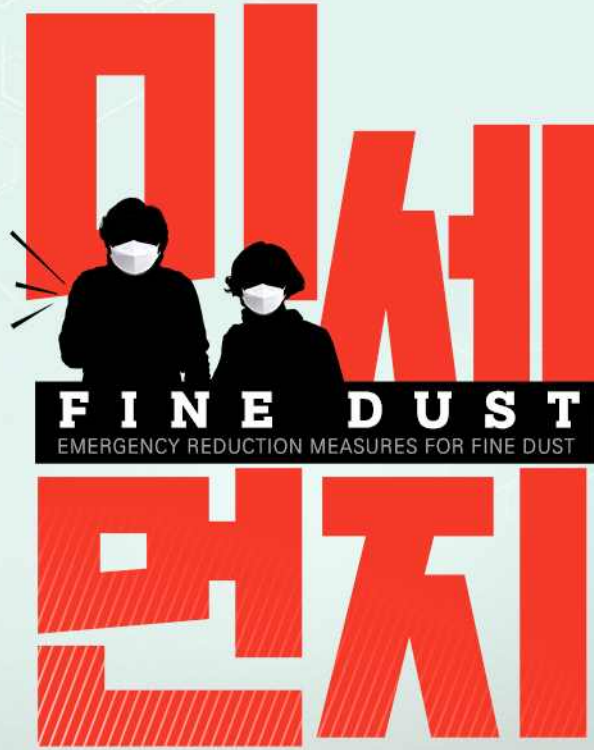


미세먼지



FINE DUST
EMERGENCY REDUCTION MEASURES FOR FINE DUST

먼지

03 미세먼지 기상·기후 현상과의 관련성

1. 대기 중 미세먼지의 농도 변화

미세먼지 저감을 함에 있어서 가장 중요하게 이야기하는 것은 미세먼지 및 대기오염 배출원에 대한 정확한 파악과 그 배출량의 정량화 과정에 있다. 대부분의 배출원은 고정배출원으로 이루어져 있기 때문에, 일부 이동배출원 또는 특정시기에 일어나는 배출이 존재한다고 하더라도 대체적으로 배출원에 의한 미세먼지 농도의 시간적 변화는 상대적으로 일정할 수 있다. 그러나 가을에서 겨울, 겨울에서 봄철에 걸쳐서 미세먼지 농도 변화를 살펴볼 경우, 시간적인 농도 변화가 매우 심하게 나타나는 경우가 있는데, 이와 같이 미세먼지 농도의 변화가 단기간에 급격히 변화가 나타나는 상황을 보면, 대기오염물질의 배출원의 변동에 의한 영향보다는 대기 현상에 의해서 그 시간적인 변화가 매우 강하게 의존하는 것을 알 수 있다. 특히 고농도로 변화하게 되는 대기 중의 미세먼지 농도의 변화는 대기오염물질의 배출과 수송 현상에 의한 변화 뿐 아니라 대기 수송 과정에서의 정체 현상이 같이 뒤섞여서 발생하는 경우가 매우 빈번하다. 배출 외에 대기 중에서의 수송 및 확산, 그리고 미세먼지의 침적 현상은 미세먼지 농도의 지역적인 변화를 일으키는 현상이며 이러한 현상은 지역 및 종관 규모의 기상 현상에 의해서 결정된다. 따라서 미세먼지의 농도 변화를 이해하기 위해서는 미세먼지의 배출 및 화학적인 반응 현상 뿐 아니라 역학적인 수송 과정에 영향을 주는 기상 현상의 파악 또한 매우 중요하다.

대기의 수송 및 침적에 영향을 주는 지역 및 종관 규모의 기상 현상은 또한 지구 규모의 기후 변화 효과에 의한 의존성을 가질 수 있다. 따라서 동아시아에서의 미세먼지 농도의 변화에 대해서 배출 및 2차 생성반응에 의한 형성 뿐 아니라 기상 및 기후 변화에 의한 농도 변화 현상에 대한 파악도 매우 중요하다.

1) 고농도 미세먼지 사례 발생 특성

서울 지역을 기준으로 하여 미세먼지 발생 특성을 장기적으로 볼 경우, PM10을 기준으로 하여 연평균농도는 2001년부터 꾸준히 감소하는 경향을 보이면서, 2012년 이후에 감소 추세가 주춤하는 것으로 나타났다 (이현주 등, 2018). 또한 고농도 사례일수 또한 계속적으로 감소 추세에 있다. 이는 고농도 사례일수 기준을 50, 75, 100 mm/m²로 할 경우에도 사례일수의 장기적 감소 추세는 나타나고 있다. 이러한 이유는 국내에서의 환경 정책과 산업 지역에 대한 지속적인 규제 방안의 강화를 통해 이루어진 배출량 감소로 인해 지역적인 1차 미세먼지 및 2차생성물질 배출이 감소하였기 때문에 나타난 효과로 볼 수 있다. 그러나 4일 이상 지속되는 고농도 사례는 장기적인 발생일수에 대해서 뚜렷한 경향성을 보이지 않는다. 이와 동시에 고농도 사례가 장기간 지속되는 사례에 대해서 볼 경우, 그 지속기간이 길어지는 경우에 대해서 고농도 미세먼지 시기의 평균 농도를 볼 경우, 전체적으로 농도의 증가가 더 심하게 나타나는 것을 알 수 있다. 일부 농촌 지역을 제외하고는 배출량의 시간적 변동이 단기간에 의해서 나타나는 현상이 아니라 장기간 지속적인 증감에 의해서 나타나기 때문에 주요 배출원에서의 배출량 변동에 의해서는 1주보다 짧은 단위의 고농도 미세먼지 증가 현상이 나타나지 않는다. 따라서 고농도 미세먼지 사례가 발생할 경우에는 일시적인 배출량 증가에 의한 현상보다는 대기 정체와 같은 외적 요인에 의한 영향이 함께 나타나는 것으로 보인다 (이현주 등, 2018). 이러한 장기간 지속되는 고농도 사례에 대해서 볼 경우에는 동아시아 지역의 종관적인 바람장과 기온의 연직 분포 패턴의 변화에 의해서 발생하게 된다. 특히 기온의 연직 분포는 대기의 안정도에 영향을 주게 되어 대기오염물질의 연직 확산에 영향을 주게 되어 동일한 양의 오염물질이 지표 부근에 분포한다 하더라도 지표 농도 변화에 유의미한 영향을 줄 수 있으며, 종

관적인 바람장의 변화는 풍속과 풍향에 영향을 주면서 월경성 오염물질의 유입량을 결정하거나 지역적인 배출원으로부터의 직접적인 유입 효과의 변동을 유발하게 된다. 오염물질의 유입 효과 뿐 아니라 바람장은 수평방향으로의 확산과 유출 효과에도 영향을 주기 때문에 대기의 안정도와 풍속, 풍향의 경향이 특정 조건으로 바뀌는 경우에 고농도 미세먼지 사례가 발생하기가 쉽다. 이러한 이유로 고농도 사례에 대한 대기장에 대한 특성을 단기적으로 기상학적인 현상과, 장기적으로는 기후변화적 특성과 함께 파악하는 것이 매우 중요하다.

2) 기상·기후와 연관된 미세먼지 농도 변화에 영향을 주는 요소

미세먼지의 발생은 주로 직접적인 입자가 배출원으로부터 나와 미세먼지 농도를 높이는 1차 발생과 가스상 대기오염물질이 상변화에 의해서 미세먼지로 변환하여 농도를 증가시키는 2차 발생원으로 나눌 수 있다. 1차 발생원의 경우에는 계절적인 기온과 대기 기상 상황의 변화에 의해서 인위적인 에너지 사용의 변화를 일으키면서 주요 고정배출원에서 배출하는 대기오염물질의 양을 변화시킬 수 있고, 기상학적인 변화가 지역적인 규모로 발생하게 되는 산불이나 삼림화재 등과 같은 자연적인 배출에 대한 빈도에 영향을 주게 되는 간접적인 요소가 된다.

그리고 미세먼지의 2차 생성에 대한 영향 요소를 볼 경우, 기상·기후의 변동에 따라서 지역적인 기온과 습도가 달라지게 되면서 상변화에 영향을 주는 화학반응의 반응속도에 영향을 줄 수 있다. 주로 기체상 물질의 화학반응의 경우에는 기온이 높을 경우, 반응 속도가 올라가면서 2차 생성물질을 늘릴 수 있으며, 습도가 높을 경우에는 2차 생성물질에 대해서는 고습도에 의한 미세먼지 성장을 강화시키게 되면서 전체적으로 미세먼지의 질량농도를 높일 수 있다. 이러한 요소들은 기상·기후에 의해서 직접적으로 미세먼지 농도 변화에 영향을 주는 것은 아니지만 간접적인 효과에 의해서 미세먼지 농도를 높일 수 있는 요소이다.

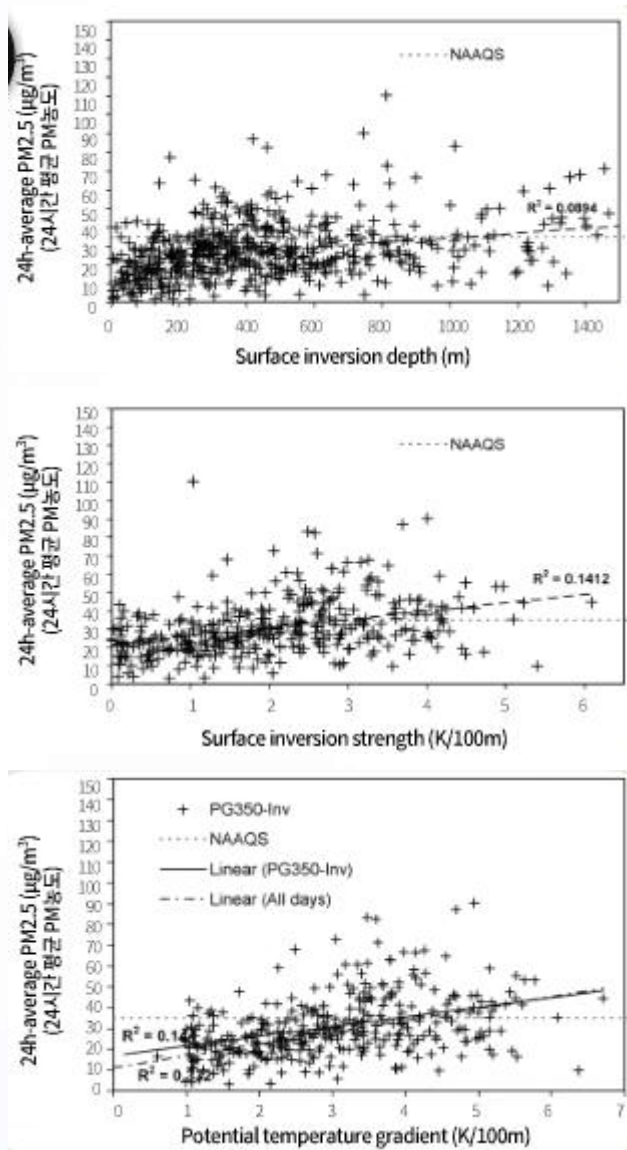
2. 미세먼지와 기상과의 관계

1) 대기 안정에 의한 미세먼지 농도 변화

대기 안정에 대해서는 일반적으로 연직적인 기온 분포의 변화를 일컫는다. 일반적으로 대기 중의 기온 분포는 고도가 높아짐에 따라 기온이 낮아진다. 그리고 이러한 기온의 연직 분포는 공기의 무게차에 의한 상하운동을 일으킬 수 있으며, 이는 오염물질에 대해서 볼 경우에 연직적인 수송과 확산으로 지표의 미세먼지 농도를 일부 낮추는데 기여하게 된다. 그런데 이러한 연직적인 기온 감소 현상이 지역적인 복사 효과나 종관적인 기상장의 영향에 의해서 연직적으로 상층이 기온이 높고 하층의 기온이 낮은 '기온역전' 현상이 나타나게 된다. 이를 역전층이라고 한다. 이러한 경우에는 공기의 상하이동이 매우 약하게 나타나게 되면서 연직적인 확산이 매우 어렵게 된다. 따라서 지역적으로 머물러 있는 미세먼지에 대해서 역전층이 존재할 경우에 대기오염물질이 지상 근처에 머무르게 되면서 그 농도가 지속적으로 높아질 수 있다. 이러한 농도의 증가 현상에 의해서 한반도와 같이 계속적으로 높은 미세먼지 농도를 보이는 지역에서의 농도 증가 현상 뿐 아니라 상대적으로 청정하다고 알려져 있는 지역에서도 미세먼지 농도가 일시적으로 국제기준치 (35 $\mu\text{m}/\text{m}^3$)를 넘어갈 수도 있게 할 수 있다 (예: Tran and Moelders, 2011).

또한 기온역전이 나타나는 역전층의 높이가 지역적인 배출원의 배출 높이와의 상대적인 높이에 따라서 지표의 미세먼지농도가 달라질 수 있다. 역전층의 높이가 매우 낮을 경우에 지표에 쌓이는 대기오염물질의 지표농도가 매우 높을 수 있지만, 배출원의 높이보다 역전층의 높이가 낮을 경우에는 신규 배출 오염물질에 대해서는 확산이 될 수 있다. 그러나 배출원의 높이보다

역전층의 높이가 높을 경우에는 미세먼지농도의 정체 현상으로 고농도가 지속될 뿐 아니라 지역적인 배출에 의한 오염물질의 축적이 더 심해져 농도의 증가가 매우 심하게 나타날 수 있다. 따라서 연직적인 확산이 빈번히 일어나는 층의 높이 변화의 변동성이 매우 강하게 일어나는 시기에 대해서는 낮시간동안 배출원으로부터 나온 오염물질이 밤시간에 축적되게 되면서 밤시간에 대기오염기체의 농도 증가와 함께 미세먼지의 농도가 동시에 증가하는 형태로 고농도 사례가 나타날 수 있다.



[24시간 평균한 PM2.5 농도 (세로) 와 역전층 높이(1번 이미지), 강도(2번 이미지), 온위와의 상관성(3번 이미지) (각각 가로축),

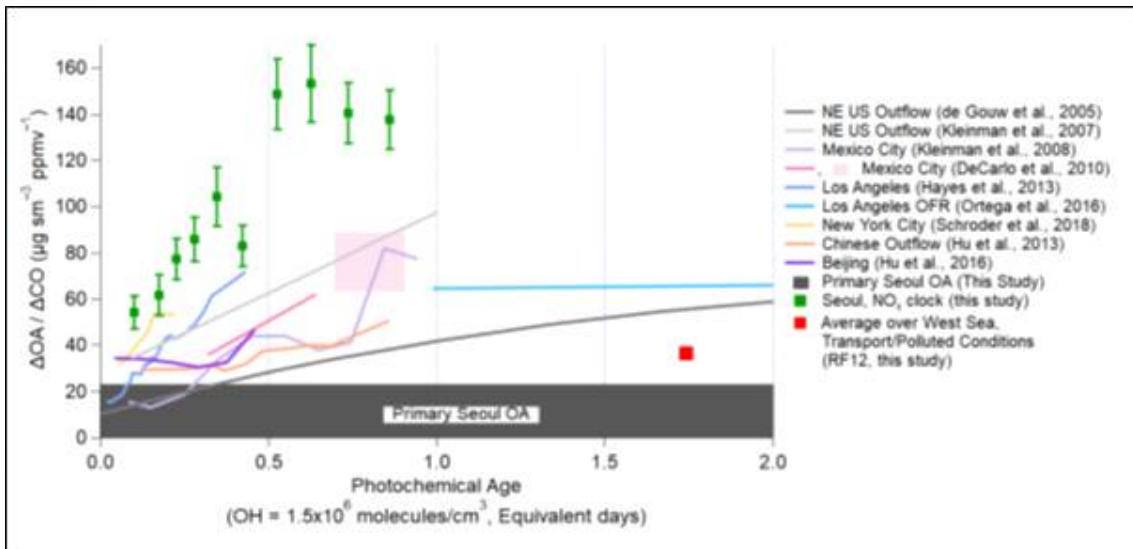
전체적으로 역전층의 강도와 온위의 연직 변동성에 따라서 미세먼지 농도는 유의미한 상관관계를 가지는 것을 알 수 있다 (Tran and Moelder, 2011).]

2) 습도 변화

여러 미세먼지의 성분 중에서 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 성분은 수용성 성분으로 PM2.5의 농도 변화와 습도의 상관관계에 직접적인 영향을 주는 화학 성분이다. 미세먼지 내에서 위의 화학

성분의 비중이 높을 경우에는 습도 변화에 대한 영향에 더 민감하게 나타날 수 있다. 특히 국외로부터 유입되는 경우에는 1차 생성에 의한 미세먼지 뿐 아니라 2차 유기탄소 에어로졸 생성에 영향을 주는 성분들이 국외로부터 다량으로 유입되는 경우가 빈번하다. 따라서 국외로부터의 유입이 있거나 지역적인 배출에서 발생하는 직접적인 영향이 적은 경우에는 2차 생성에 의한 미세먼지 농도 변화의 비중이 높을 수 밖에 없다. 예를 들어 서울 지역의 경우에는 2차 유기탄소 에어로졸에 대한 생성 민감도를 볼 경우, 미국 서부나 중국에 비해서도 생성 민감도가 매우 높게 나타나고 있다. 이러한 이유는 서울 지역 내에서 배출되는 1차 생성에 의한 유기탄소 배출 뿐 아니라 외부로부터 유입되는 수용성 성분의 유기물질도 함께 분포하고 있기 때문에 이러한 습도 변화에 의한 영향이 다른 지역에 비해서 더 크게 나타날 수 있는 것이다.

또한 습도 변화에 의한 미세먼지의 성장 영향은 지역적인 시정에 영향을 줄 수 있다. Chen et al. (2014) 및 여러 지역적인 미세먼지 연구 결과에 의하면 상대습도의 증가에 따라 미세먼지 농도가 비슷하다고 하더라도 국지적인 시정에 영향을 줄 수 있다. 반대로 이야기하자면 건조한 겨울철에 미세먼지 농도가 증가할 경우에 시정을 통해 미세먼지의 농도 변화를 파악하기 어려울 수 있는 이야기가 될 수 있다. 이러한 경우에는 예외적으로 시정에는 큰 영향을 주지 않게 된다.



[대도시 지역의 2차 유기 에어로졸의 생성 민감도, 유기 에어로졸의 생성 민감도는 지역적인 기온과 습도 등에 따라서 변화하게 된다. (Nault et al., 2018)]

3) 풍속

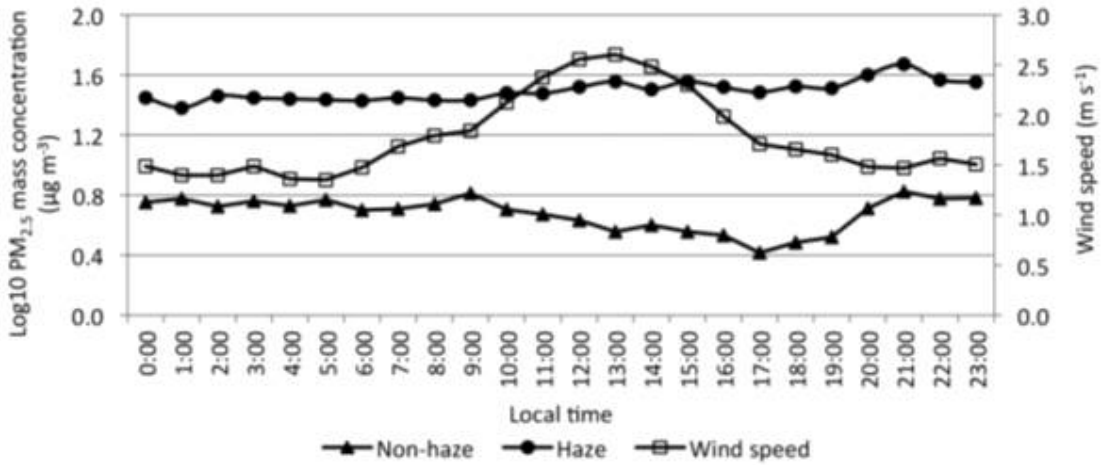


FIGURE 3. Diurnal variations of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations (in non-haze and haze episodes) and a general wind speed pattern at KTMS

[풍속 패턴의 일변화에 의한 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 일변화 특징, 연무의 유무에 따라 경향이 바뀌기는 하지만, 연무가 없는 시기는 풍속에 대한 영향이 상대적으로 크면서 풍속과 미세먼지 농도가 반비례하게 된다. 반면, 연무 사례에 대해서는 오히려 높은 풍속에 의해 외부로부터 고농도 미세먼지 유입으로 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 증가할 수 있다 (Tahir et al., 2013).]

지역적인 바람장의 변화는 배출원으로부터 수송량의 변화를 유발하여 시간적인 변동을 유발할 뿐 아니라 어느 한 지역에 들어오는 미세먼지의 농도에 대해서 다른 곳으로 수송하여 미세먼지 농도를 감소하게 할 수 있는 역할을 동시에 하게 된다. 그림에서는 장기간에 걸쳐서 관측으로 얻어낸 지표미세먼지 $\text{PM}_{2.5}$ 농도와 풍속의 상관관계를 한 지점에 대해서 보여주는 연구이다. 이 경우, 연무의 유무에 따라서 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 일변화에 대해서 다르게 나타날 수 있는데, 연무가 없는 경우에는 외부로부터의 미세먼지 유입이 무시가능한 상황이다. 이 때문에 풍속의 증가가 지역적으로 미세먼지의 수평적인 확산과 유출 효과를 일으키게 하여 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 풍속이 높은 시기에 유의미하게 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 연무가 있는 경우에는 상대적으로 관측 지점 주변의 미세먼지 농도가 전체적으로 높은 상태로 이러한 경우에는 풍속이 증가하게 되더라도 수평적인 확산효과와 함께 주변부로부터 유입되는 효과로 인해 미세먼지 농도가 감소하지 않고 일정하거나 약간 증가하는 추세를 가질 수 있다. 따라서 수평적인 풍속의 절대적인 강도가 미세먼지 농도를 변화시키는 요소가 될 수도 있지만, 더 중요한 것은 배출원의 위치와 풍향과의 상관성이 중요할 수 있다. 이는 지역적으로 미세먼지의 유입량에 대한 부분과 큰 상관성을 가질 수 있다. 그리고 유입량이 많다고 하더라도 유출량이 동시에 많다면 미세먼지의 농도가 지속적으로 증가하지 않고 비록 높은 농도이기는 하지만 특정 농도에서 그 증가경향이 멈추거나, 풍향의 변동으로 인해 바로 미세먼지 농도가 감소할 수 있다. 그러나 미세먼지의 유출량이 적을 경우에는 농도의 증가 경향이 지속적으로 일어나거나 고농도 미세먼지 시기가 장기간 지속적으로 이어질 수 있게 된다. 이러한 대기의 흐름으로 인한 미세먼지의 농도 변화는 특정 지역에서의 미세먼지의 유입량과 유출량의 상대적인 차이로 결정이 나게 되는데, 이를 결정하는 풍속의 수평적 변화가 더 중요할 수 있다.

일부 연구분석에 따르면 대기의 기상 변수(온도, 습도, 강수, 순환)가 초미세먼지 농도 변이의

50%까지 설명할 수 있으며, 이 중 바람장과의 연관성에 대해서 볼 경우, 정체된 대기는 순환되는 대기에 비해 평균적으로 초미세먼지 농도가 $2.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높다고 이야기한 연구 결과도 있다.

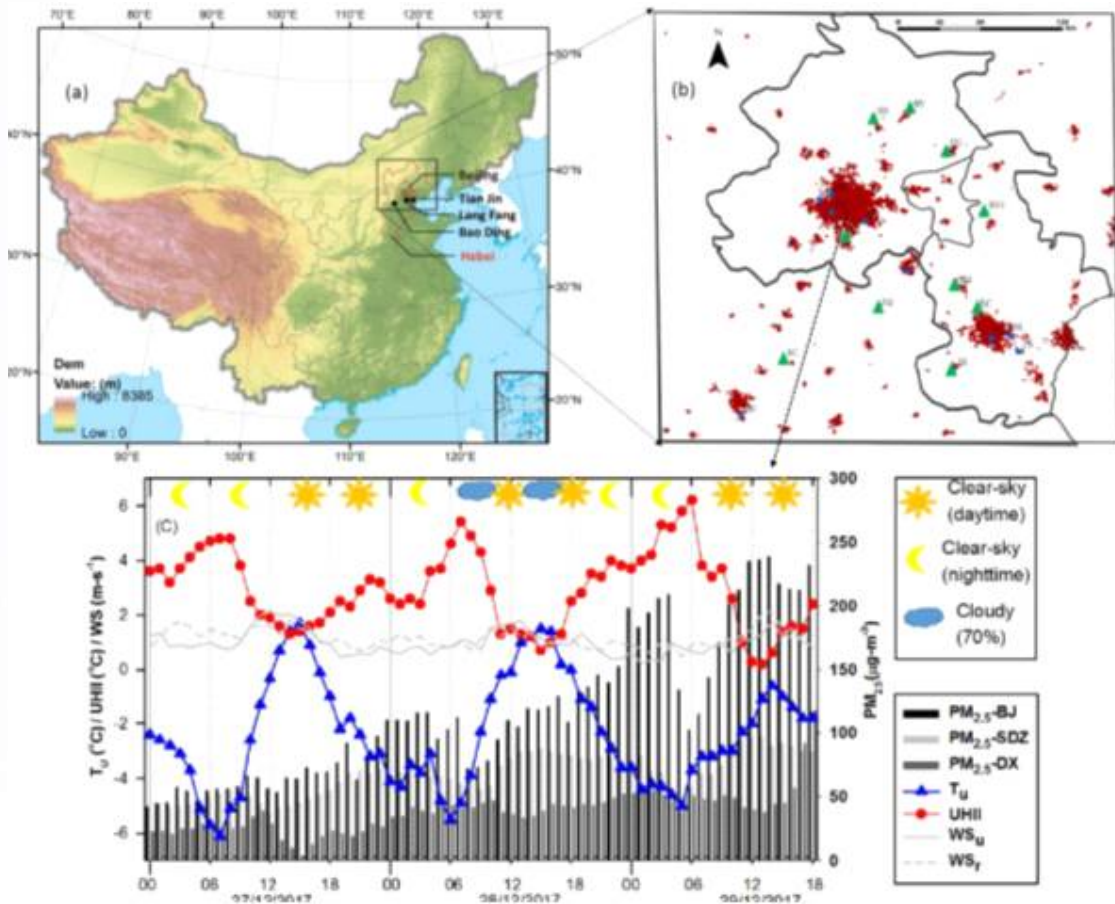


[2018년 1월 수도권 고농도 미세먼지와 대기환경조건에 대한 시계열 (출처: 연합뉴스)]

특히 풍속이 약할 경우에는 지역에서 발생하는 기체상 오염물질이 함께 정체되면서 2차 생성에 의한 PM2.5의 농도가 같이 증가할 수 있기 때문에 기본적으로는 풍속이 약할 경우에 미세먼지 농도가 더 쉽게 증가할 수 있는 조건이 쉽게 만들어질 수 있다. 그러나 반드시 절대적인 풍속의 감소가 미세먼지의 증가에 항상 기여하는 것이 아니라 외부로부터의 지속적인 미세먼지 생성물질의 유입이 있을 경우에 미세먼지 농도의 증가가 발생할 수 있을 것으로 보인다.

4) 열섬현상과 미세먼지 증가 경향

열섬현상은 미세먼지의 강한 지역적 배출원이 존재하는 도시 지역이나 공장 지역에서 많이 발생하는 도시 규모의 기상 현상이다. 특히 겨울철의 난방이나 연소 활동이 빈번히 일어나는 시기에서는 열섬현상이 더욱 더 강하게 나타날 수 있는데 이를 통해 도시 외곽부와의 공기 흐름이 약해지면서 PM2.5의 일시적인 증가 현상이 나타날 수가 있다. 또한 미세먼지는 복사학적으로 복사가열효과를 일으킬 수 있기 때문에 구름이 적은 시기에서는 열섬 현상을 강화시킬 수 있는 지역적인 영향을 줄 수 있다 (예: Yang et al., 2019)



[지역 기상상황에 의한 미세먼지 농도 변화 및 열섬현상 강도와와의 상관성/ 미세먼지 농도 변화가 증가할 경우 (막대그래프) 상대적으로 열섬현상강도지수 (UHI, 빨간 실선)가 높아지는 것을 알 수 있다. (Yang et al., 2019).]

3. 기후변화에 의한 미세먼지 현상 변화

기후변화는 지구 온난화라는 용어로 대표되면서 극지역 빙하를 녹이면서 발생하는 해수면 상승이나 기온 변화에 의한 지역 생태계의 변화에 영향을 주는 것으로 인식하고 있다. 그러나 기후 변화에 의해서 나타나는 대기 현상의 변화나 생태계의 변화는 미세먼지의 배출원과 수송, 침적 과정에 영향을 줄 수 있는 잠재적인 요소이기 때문에 그 상관성을 고려한 연구가 필요하다.

기상조건의 변화와 대기오염 농도 사이의 관계는 다양한 연구를 통해 직접적 혹은 간접적으로 많이 설명이 되고 있다. 특히 기상장에 대해서는 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 기후 변화와 대기오염 및 미세먼지 농도에 의한 상관관계에 대해서는 시공간적인 체계적인 분석이 여전히 이루어지고 있는 중이며, 특히 기후변화에 의한 한반도 주변의 기온 변화폭은 매우 크다고 알려져 있기 때문에 기후변화에 의한 대기오염물질 및 미세먼지 농도 변화에 대한 영향도 매우 클 것으로 보인다.

국립환경과학원 (2011)의 '기후변화에 의한 대기오염 및 건강영향 연구'의 연구보고서에 의하면 7대 대도시의 미세먼지농도에 대해서 기후변화에 따른 기온 상승 효과와의 상관 관계를 분

석한 결과 평균 기온 및 최저-최고 기온의 변화에 따라 미세먼지 농도의 상관성은 그다지 크지 않는 것으로 나타났다. 이를 통해서 얻을 수 있는 결론은 기후변화에 의한 기온의 상승과 이에 의한 기상학적 효과가 미세먼지 농도에 직접적인 영향을 주지는 않을 것으로 보인다. 그러나 간접적으로 상대습도의 증가에 의해서는 약한 상관성이 나타나게 되는데, 특히 부산과 울산 등 한반도 동남해안에서는 기온의 상승과 상대습도의 증가가 같이 이어지기 때문에 미세먼지 농도의 증가가 해안가를 중심으로 간접적인 영향에 의해 나타날 수 있을 것으로 보인다.

1) 지표 온도 상승에 의한 대기질 영향

기후변화는 지표면의 온도 상승과 함께 대기질에 영향을 줄 가능성이 있다는 연구가 최근들어 나오고 있다. 특히 기후변화가 일어나게 될 경우, 대기오염물질 중에서 오존(O3)과 미세먼지의 농도를 올릴 수 있는 경향이 강해질 수 있으며, 이러한 주요 오염물질 농도의 증가는 선진국의 주요 도시에서 이러한 현상이 나타날 수 있다고 한다. 기후변화가 대기 중 온도 상승으로 오존의 농도를 늘리는 것은 비교적 명확하게 알려져 있던 현상이지만, 미세먼지의 농도 증가에 영향을 준다는 부분은 물론 현재까지 다소 불확실성이 높은 것으로 보고되고 있다. 미세먼지 농도의 증가에 대해서는 직접적으로 지표 온도 상승에 의해서 영향을 줄 수 있는 부분도 있지만 대기의 연직 온도 분포 변화에 의한 혼합 강도의 변화하거나 자연적인 삼림화재의 발생 빈도 변화 등 간접적인 효과로 지표면의 미세먼지 농도를 변화시킬 수 있는 요인들이 많기 때문에 그 직접적인 연관성을 찾는 것이 아직까지는 한계점으로 보이고 있다.

반면 기후변화는 지구물리학 및 기상학적 변수에 영향을 주기 때문에 오히려 미세먼지 농도가 감소할 수 있다는 보고도 있다. 이는 전 지구적 범위에서 어떤 지역 미세먼지의 연평균 농도 증가가 다른 지역의 감소를 나타낼 수 있기 때문인 것으로 이는 배출량의 변화가 뚜렷하지 않을 경우, 배출원으로부터의 수송 과정이 변화함에 따라서 특정 지역에서는 배출원으로부터의 수송 효과가 감소해서 미세먼지 농도가 지역적으로 감소할 수 있음을 나타낸 것이다.

기상학적인 요소는 기후변화에 의해 변화할 수 있는 지역적인 규모에 있어서 기후변화의 종속인자로 작용하게 된다. 특히 겨울철 중국 동부 지역에서 발생하는 고농도 미세먼지 사례에 대해서는 대기정체에 의해서 고농도 미세먼지 현상이 장기간 지속되고 그 농도증가를 심화시키는 것으로 알려져 있는데 이러한 대기정체는 동아시아의 겨울철 계절풍의 변동성에 따라서 결정이 되는 것으로 알려져 있다. 이러한 겨울철 몬순은 유라시아 대륙의 중심부로부터 바다 방향으로 부는 북서계절풍이 주된 현상인데, 기후 변화에 의한 온난화 현상으로 북극해의 기온 상승이 동아시아의 기압 배치에 교란을 야기하고, 이 현상에 의해서 육지와 해양 사이의 기상장 변화가 북서계절풍의 약화를 야기하게 된다는 것이다. 북서계절풍의 약화는 동아시아 지표에서의 대기정체 현상을 보다 빈번하고 장기간 일어나게 하는 요인이 되면서 대기오염물질의 확산을 약화시키는 방향으로 영향을 일으킬 수 있다는 것이다.

이러한 이유로 인해 중국의 북동부 징진지(베이징, 허베이성, 텐진 주변) 지역에서 발생한 2013년 1월과 2015년 12월의 고농도 미세먼지의 장기 발생 사례에 대해서 이러한 상관성을 연구한 결과에 대해서 Li et al. (2018, GRL)에서는 대기 패턴의 변화에 의해서 고농도 미세먼지 사례에 미세먼지 농도를 더욱 더 증가시키는 형태로 야기했다고 보고 있으며, 모델 분석에 의해서 이러한 대기 패턴의 변화가 온실가스 배출 증가에 의해서 유도된다고 이야기하였다.

2) 미세먼지에 의한 기후 변화

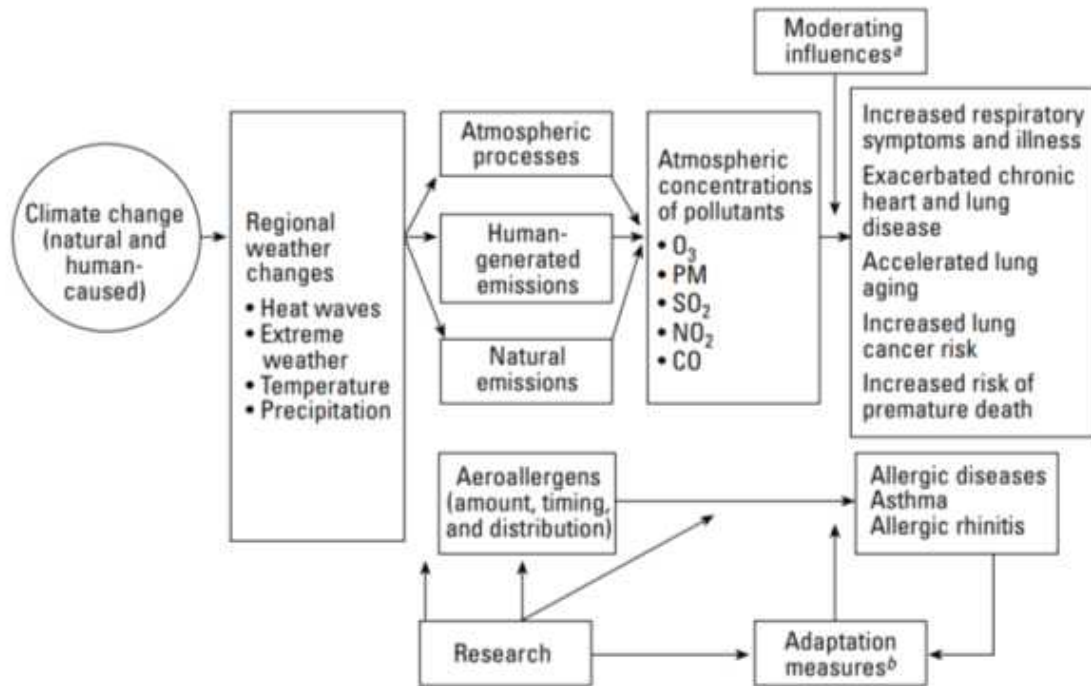


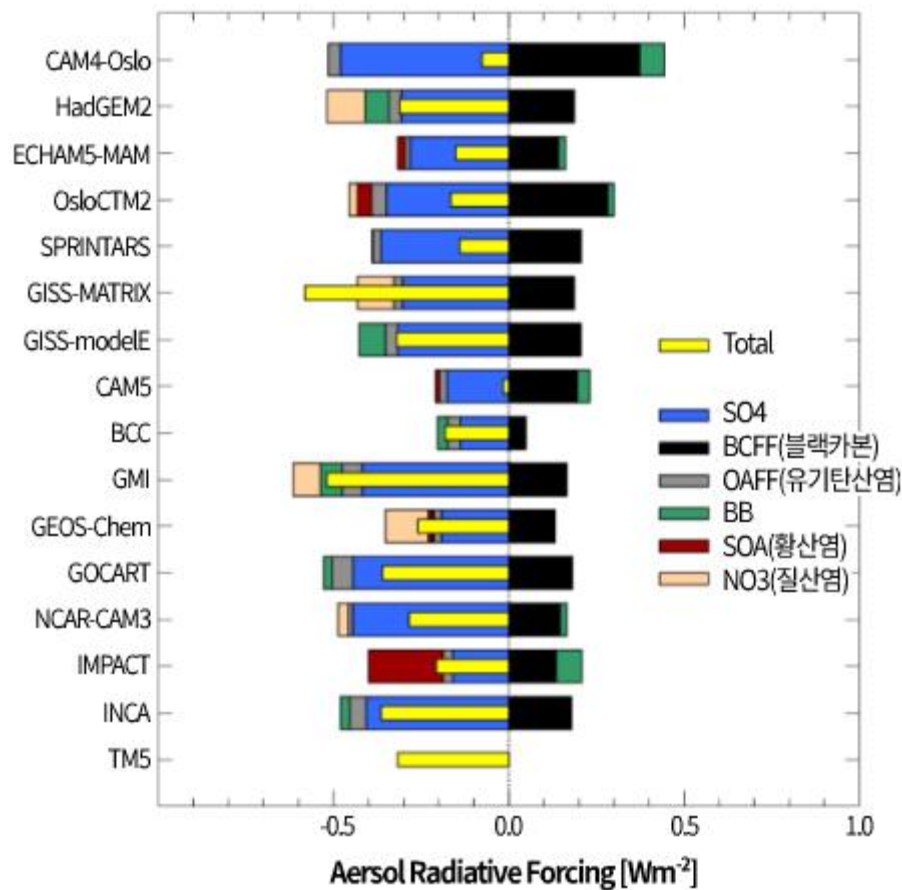
Figure 1. Potential air pollution-related health effects of climate change. ^aModerating influences include nonclimate factors that affect climate-related health outcomes, such as population growth and demographic change, standards of living, access to health care, improvements in health care, and public health infrastructure. ^bAdaptation measures include actions to reduce risks of adverse health outcomes, such as emission control programs, use of weather forecasts to predict air quality levels, development of air quality advisory systems, and public education.

[대기오염물질과 기후변화의 상관성 (Bernard et al., 2001)]

대기오염물질의 발생과 분포에 따른 기후변화의 상관성은 매우 복잡하게 얽히게 된다. 위의 그림을 보게 될 경우, 자연적/인위적으로 발생하게 되는 기후변화 효과는 국지적인 기상 변화를 유발하게 되며, 이러한 기상 변화는 기온과 강수의 변화와 함께 폭염 등과 같은 악기상을 유발하게 된다. 이러한 기상 현상의 변화에 의해서 발생하는 대기 조건의 변화와 배출량 변동은 국지적인 대기오염물질의 농도 변화를 유발하게 되는 형태의 상관성을 가지게 된다 (Bernard et al., 2001). 물론 그 외에도 국지적인 규모의 미세먼지와 기타 기체상 대기오염물질이 국지규모의 대기질 악화에 영향을 주는 것 뿐 아니라 기후 변화에 다시 영향을 주게 되어 대기오염물질과 기후변화는 서로 상호 영향을 미치는 관계인 것이 알려지게 되어, 환경영향 뿐 아니라 기후 영향 효과를 같이 보는 것이 매우 중요하다.

미세먼지는 흔히 알려진 것처럼 대기 중에 부유하고 있는 입자상 물질을 이야기한다. 이러한 대기 중의 입자상 부유물질은 화학성분에 따라서 태양 및 지구복사와의 상호작용이 다르게 일어나게 되면서 여러 가지 복사적 관점에서의 기후변화 효과를 일으키게 된다. 가장 대표적인 것으로는 대기 중의 미세먼지가 부유하면서 태양으로 도달하는 직접복사에 직접적으로 관여하여 대기 중에서 반사시켜 지표에 도달하는 복사량에 변화를 주거나 대기 중에서 일부 복사를 흡수하여 대기를 가열하는 직접적인 복사효과 (Direct Radiative Effect)를 유발하거나, 일부 흡습성을 가지는 입자는 구름의 응결핵으로 작용하여 구름의 생성과 소멸, 강수 과정에 영향을 주는 간접적인 복사효과 (Indirect Radiative Effect)를 유발하게 된다.

직접적인 복사효과의 경우에는 미세먼지의 종류와 크기에 따라서 동일한 양의 미세먼지라고 하더라도 그 효과가 매우 달라지게 된다. 이러한 이유로 미세먼지에 해당하는 에어로졸의 복사강제효과의 추정에 대해서 연구를 할 경우에 그 양에 대한 장기적인 변화를 종합적으로 유추하여 직접적인 복사효과를 추정하는 것뿐 아니라, 에어로졸의 화학적인 조성; 예를 들어 블랙카본이나 유기탄산염입자, 질산염, 황산염 입자와 함께 황사 입자와 해염입자 등; 에 따라 각각의 직접적인 복사효과를 유추하는 형태로 정량적인 기후 변화 효과를 유추하게 된다 (Myhre et al., 2013). 또한 이러한 미세먼지의 화학조성의 고려는 구름의 응결핵으로 작용하는 미세먼지의 추정을 보다 정확하게 유추할 수 있기 때문에 간접적인 복사효과를 보다 정확하게 유추할 수 있게 해준다.



[미세먼지 유형 변화에 의한 복사강제효과의 변동성 (Myhre et al., 2013)]

위의 그림은 에어로졸의 전구 분포 변화에 의한 직접 복사강제효과에 대한 추정 결과이다. 종합적인 에어로졸의 직접 복사강제효과는 태양광의 차단에 의해서 발생하는 냉각효과가 약하게 나타나는 것을 전체적으로 확인할 수 있으나, 각 성분별로 볼 경우에는 그 강도가 서로 다를 뿐 아니라 방향성도 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 태양광에 대한 흡수 효과가 강한 블랙카본이나 삼림화재에서 발생하는 에어로졸의 경우에는 대기 중에 존재하게 되면서 온난 효과를 일으키게 하지만, 인위적인 배출에 의해서 발생하는 유기 탄산염 입자나 질산염, 황산염 입자에 대해서는 복사강제효과가 냉각 효과를 일으키는 것을 확인할 수 있다. 따라서 미세먼지 농도가 동일하게 있다고 하더라도 그 구성비율에 따라서 실제 기후변화 효과에 일

킬 수 있는 복사강제효과는 서로 다르게 나타날 수 있다.

그러나 이러한 미세먼지에 의한 복사효과는 이산화탄소나 메탄과 같이 흔히 알려져 있는 온실 효과 기체와 같이 장기간 대기 중에 체류하는 물질이 아니라 대부분의 미세먼지 입자는 수일~수주에 걸쳐서만 대기 중에 존재하고 이보다 긴 경우에는 침적 등에 의해서 대기 중에 체류하지 않게 된다. 그리고 이러한 단기적인 체류 때문에 위와 같은 복사강제효과가 전구 규모에서 매우 균질하게 나타나는 것이 아니라 지역적인 규모로 매우 강하게 일어나게 되는 현상이 되면서 장기간에 걸쳐서 지속적인 기후 변화 효과로 일으키지 않게 된다. 따라서 미세먼지에 의한 복사효과는 전구 규모가 아니라 지역적인 규모로 일어나는 현상으로 분류되고 단기적인 효과만 한정지어 일으키기 때문에 단기체류 기후변화유발물질 (Short-Lived Climate Pollutants: SLCP)로 분류된다.