

국내P 환경동향보고

대기의 미세먼지가 기후변화에 미치는 영향



환경부

KEITI 한국환경산업기술원

대기의 미세먼지가 기후변화에 미치는 영향

국내 IP 오성남

서론

대기 미세먼지(Ambient Particulate Matter, PM)의 PM_{2.5}는 대기 중에 존재하는 입자상 물질 중 2.5 μm 이하의 크기를 갖는 초미세먼지의 총칭이다. 일반적으로 직경이 10 μm 이하인 PM₁₀과 구분하며 이들은 인간의 호흡기에 대한 침투성이 높고 유해한 화학성분을 포함하고 있어 사람과 생태계에 악영향을 미친다.

세계보건기구(World Health Organization, WHO)의 조사에 의하면 2012년에 미세먼지 등 대기오염물로 인하여 약 700만 명이 조기 사망하였으며 이들 중 80%이상이 태평양과 남아시아지역 국가로서 아시아 지역에서 초미세먼지, PM_{2.5}에 노출과 관련된 사망률이 가장 높게 나타났다.

또한 자연현상에 대한 미세먼지의 직접적 역할로는 입사하는 태양광을 반사하고 또 지구장파복사에너지를 흡수함으로써 지구대기의 복사에너지 균형에 영향을 주게 된다. 간접적으로는 구름응결핵으로서 구름의 형성과 발달 그리고 강수형성의 역할을 한다. 따라서 대기의 미세먼지 지구적 규모에서의 역할은 구름과 강수 형성 그리고 대기의 에너지 균형을 조절하는 기후의 변화에 중요한 요소가 된다.

인위적이거나 자연적으로 발생하는 미세먼지(Particulate Matter, PM)는 모두 원소탄소(Elemental Carbon, EC), 유기탄소(Organic Carbon, OC), 먼지, 황화합물, 질소화합물, 비산 회(fly ash) 등 다양한 성분들을 함유하고 있어, 대기오염 물질로도 분류하고 있다. 이들 성분 중 EC는 대부분 연소과정에서 인위적으로 배출된 것이며 대기 중에서 화학적 변화가 없고 태양 복사열을 흡수하는 특성을 지니고 있어 주목받고 있는 지구온난화 물질에 속한다. OC는 인위적 배출원(anthropogenic source)이나 생물기원 배출원(biogenic source)에서 대기 중으로 직접 배출된 1차 유기탄소(Primary Organic Carbon, POC)와 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOC)이 광화학반응을 거치면서 입자를

형성한 2차 유기탄소(Secondary Organic Carbon, SOC)로 구분하고 있다.

도시 미세먼지의 근원은 산업활동과 주거생활, 교통, 바이오매스 소각 등 인간 활동과 관련된 불특정 인위적 배출원과 흙먼지나 해염(sea salt)과 같은 자연적 배출원으로 분류된다. 이에 따라 전 지구적으로는 PM2.5와 PM10 미세먼지의 배출원별 배출량과 주변국가의 배출원에 관한 자료가 미세먼지의 국가 간 장거리 이동에 따른 대기오염의 원인별 특성을 밝히는 데 매우 중요한 요소가 된다.

본 조사에서는 전 지구의 다양한 지역을 대상으로 미세먼지를 배출원별로 할당(Source Apportionment, SA)하고, 다른 지역의 미세먼지에 기여도가 높은 배출원을 진단하며, 특히 도시지역을 중심으로 미세먼지 배출원을 조사한 결과를 살펴 보았다. 또한 이들 다양한 배출원으로 부터 발생되어 대기 중 미세입자로서 기후 변화와 인간의 건강에 대한 영향 그리고 장거리 이동에 대하여 살펴보았다.

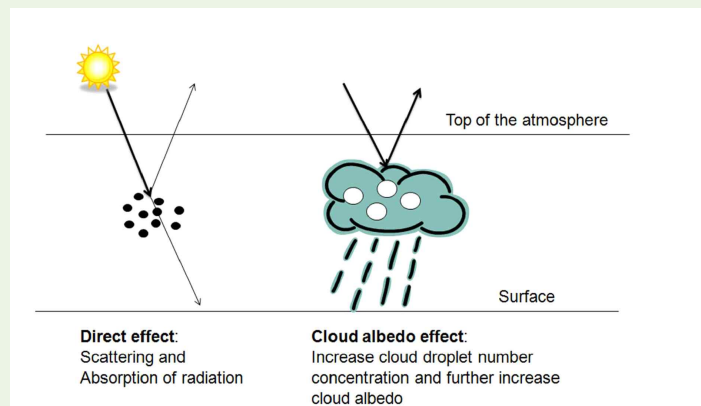


그림1. 대기 중 미세먼지의 태양복사와에 대한 직접적 역할과
구름응결핵으로서의 간접효과에 대한 이해

●● 미세먼지의 특성

기후변화의 요소로서 또 인간의 건강에 가장 영향이 높은 PM2.5는 그 배출원과 이들이 인체와 자연생태계에 미치는 원인과 대기 중 변화과정을 밝혀야 하므로 PM2.5의 화학적 조성과 물리화학적 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

미세먼지는 생성과정에 따라 오염원에서 직접 생성되는 1차 PM2.5와 오염물질

의 화학 및 광학적 반응에 의해 생성되는 2차 입자로 분류된다. 일별 과정에서 2차 PM2.5는 최소한 일출 2~3시간 후에 활성화되고 이후 점차 크기가 성장하여, 태양복사 에너지에 의한 SO₂ 등 화학적 성분과의 광화학 반응으로 입자가 형성된다. 이에 따른 농도는 오후 12시-14시 사이에 최대가 되고 광화학반응에 의하여 생성된 입자들은 반 휘발성 입자들로 간주되고 있다. 이때 생성된 핵생성 입자는 크기가 감지할 수 있는 크기보다도 작아서 확인이 어려우나 활성화 이후의 SO₄나 NO₃, NH₄ 등 기체의 농도 감소로 인하여 대부분의 핵생성 입자는 SO₂의 광화학 반응으로 생성된 황산염으로 추정되고 있다.

미세먼지의 평균 질량농도에 대한 세계보건기구의 권장 기준치는 PM2.5의 경우 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM10은 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 이에 대한 사례연구로서 최근 조사된 인도 남서부의 인구 약 550만의 Pune시를 대상으로 2013년 5월부터 10월 사이의 미세먼지 농도, 크기, 형태 및 화학성분을 분석한 결과를 살펴보았다. 인도의 경우 연평균 PM10에 대한 PM2.5의 비율(PM2.5/PM10)은 평균 0.64였다. 이러한 높은 미세먼지농도는 산업활동과 교통량, 건설공사 및 화석연료의 사용량이 증가하였기 때문이다. 계절적으로 PM10과 PM2.5의 농도는 5월과 6월 사이에 가장 높았다. PM2.5/PM10의 비율에 대한 인도에서의 유사한 조사는 터키, 중국, 미국 등에서도 실시되어 그 비율은 같거나 다소 낮게 나타났으며, 일반적으로 겨울철보다 여름철에 토양에서 배출되는 미세먼지가 많은 지역에서는 PM10 농도가 상대적으로 높게 나타났다.

먼저 미세먼지의 형상을 파악하기 위해서 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)을 사용하여 PM10과 PM2.5의 원형도(circularity)와 종횡비(aspect ratio)를 조사한 결과, 원형도는 0.72~0.75, 종횡비는 1.69~1.76으로 나타나 미세먼지의 형태는 그림2와 같이 완전한 구형도 아니고 완전한 막대모양도 아닌 것으로 밝혀졌다.

에너지분산 분광기(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)로 PM10과 PM2.5의 원소성분을 분석한 결과 Si가 가장 많이 함유되어 있고 그 다음이 P 원소였으며 PM10 이 PM2.5보다 Fe와 Ca를 2~3배 더 많이 함유하고 있었다. 미세먼지들이 함유하고 있는 원소성분에 따라 Al과 Si 원소를 주성분으로 하는

Al-silicate 광물성 먼지(mineral dust), C와 O 원소를 주 성분으로 하는 타르 성분의 구형입자(Tar ball particle), P와 S 원소 함유량이 높은 미세먼지로 구분할 수 있다.

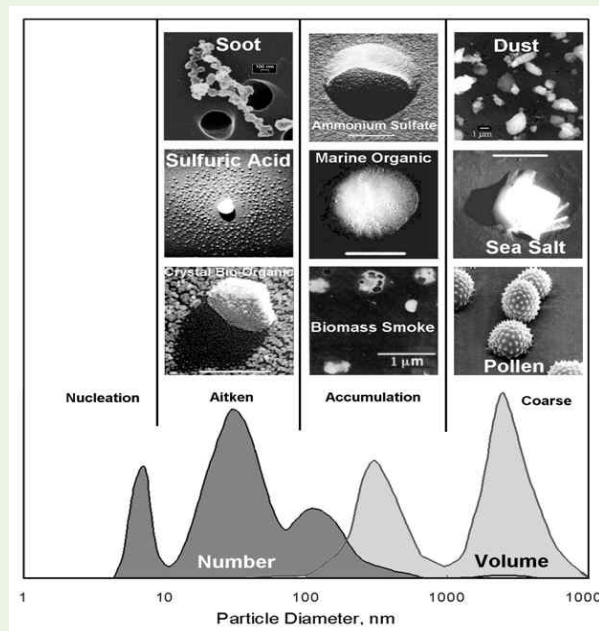


그림 2. 대기 중 미세먼지의 모양과 크기에 따른 농도분포

규산염(Al-silicate) 광물성 먼지는 대부분 토양에서 배출된 것으로 미세먼지 중 가장 많은 부분을 차지하며, 타르성분의 구형입자들은 가스가 입자로 변환되는 과정에 생성된 것으로 판단된다. P와 S 원소 함유량이 많은 미세먼지들이 PM2.5보다 PM10에서 많이 발견되었다. S 원소, OC, 광물성 성분이 많이 포함된 미세먼지들은 태양광을 산란시켜 지상의 기온을 낮추거나 구름응결핵(cloud condensation nuclei)으로 작용하여 강수를 형성한다(그림3). 반면에 EC 성분이 많은 미세먼지들은 태양광을 흡수하여 기온을 상승시킬 수 있다.

미세먼지에 의한 태양광의 흡수나 산란 정도를 판단하기 위해 유효탄소비율(Effective Carbon Ratio, ECR)을 $ECR = SOC / (POC + EC)$ 관계식으로 부터 산출한 결과 PM2.5의 경우에는 평균 ECR이 2.42, PM10의 경우에는 ECR의 평균값이 1.74로 나타났다. PM2.5 미세먼지에는 POC와 EC 성분보다 SOC 성분이 더 높아 이로 인하여 PM10의 경우, 기온 상승효과가 감소되고 태양광 산란효과가 증가한 것으로 판단된다.

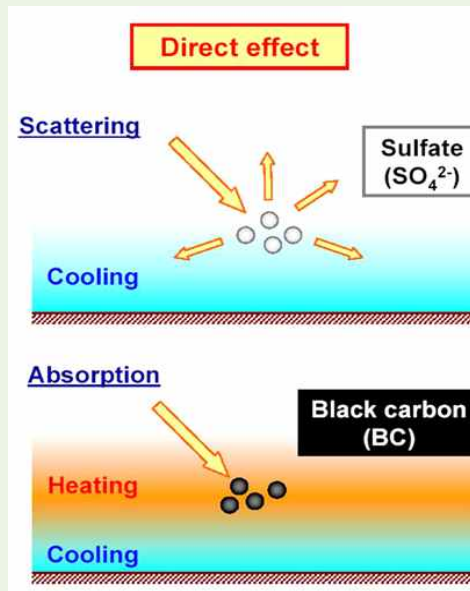


그림3. 미세먼지의 대기의 복사효과

황사와 같은 월경성 장거리 이동되는 조대미세먼지(PM10)는 기류의 역궤적분석(back trajectory analysis)으로 배출원을 추적하여 지역 오염원에서 배출된 것과 이웃 국가들로부터 장거리 이동된 것과 구별할 수 있다. 따라서 미세먼지의 탄소성분은 석탄연료의 연소에서 배출된 것보다 수송에서 배출된 것이 다소 더 많은 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 특히 일부 지역의 미세먼지 성분 중에는 Pb, Cu, Zn, Ba 등과 같은 유해한 금속들과 다양한 고리방향족 염화탄소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH) 등이 포함되어 나타났다.

❖ 미세먼지의 발생과 이동

1. 미세먼지의 배출원별 할당

PM2.5 발생은 매우 다양한 자연적인 배출원과 인위적인 배출원에 의해서 결정되며 이들은 화학적인 변화가 없이 대기 중으로 입자상의 형태로 배출되는 1차

생성과 기체상으로 배출된 전구물질이 대기 중에서 물리화학적인반응을 통해 새로이 형성되거나 농도가 증가되어 나타나는 2차 생성으로 이루어진다. PM2.5는 중력침강이 큰 역할을 하기에는 크기가 작고 확산효과도 미비하여 대기 중에서 체류하는 시간이 매우 길어서 한 번 배출된 이후에는 강우에 의한 침적이 일어나기 전에는 매우 장기간 대기 중에서 머물러 있을 수 있다. 이와 같은 이유로 장거리이동에 의한 오염효과가 다른 물질에 비해 크고 그 영향도 지대하다.

배출원 설정(SA) 연구에서 대기오염의 수용체 모델을 사용하기 위함과 배출원 사이에 적합한 그룹핑을 목적으로 분류된 미세먼지(PM)의 배출원은 교통, 산업, 가정용 연료사용, 재 부유된 토양먼지와 해염입자 그리고 인간 활동에 의한 불특정 오염원 등 주요 여섯 가지 범주로 구분되어 분석에 이용되었다. 그리고 유럽의 대기오염 배출원 설정 지침서를 이용하여 이들 여섯 가지 배출원 식별 카테고리를 화학적 성분과도 연결시켜 그 특성을 결정하였다.

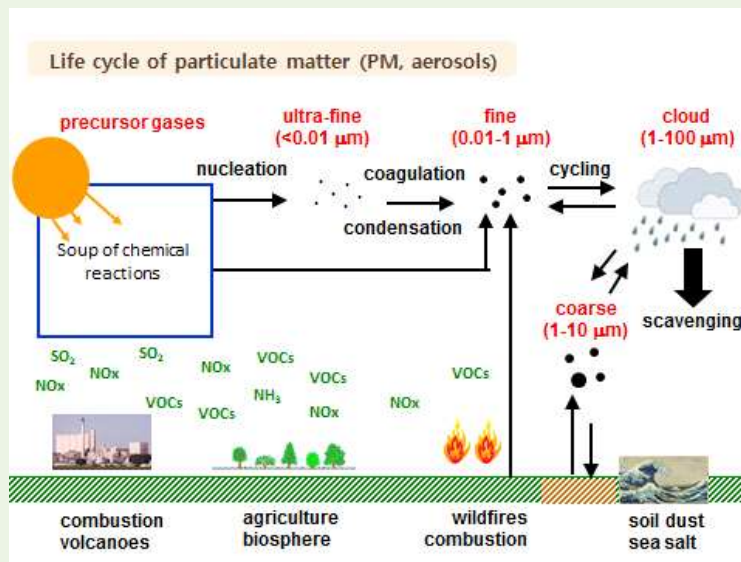


그림 4. 인위적 자연적 배출원과 대기 중 물리 화학적 변환 과정에 따른 입자상 물질의 거동 개념도(Monks, *et al.*, 2009).

2. 배출원에 따른 미세먼지의 농도

도시에서 거주하는 시민들의 활동에 의한 불특정 배출원은 주로 이차형성 입자(secondary particle)를 포함하고 있으며 이들은 대기 중에서 NO₂, NH₃, SO₂

및 휘발성 유기물질과 같은 기체상의 일차오염물들의 반응에 의해서 생성되어 무기 에어로졸 또는 유기 에어로졸 상태로 존재한다.

특히 산업활동이 증가하고 인류의 삶의 질이 높아 짐에 따라 가시적이고 총량 중심의 도시미세먼지에 대한 관심은 오늘날 초미세먼지로 발전하여 과거의 PM10 크기에서 PM2.5 그리고 PM1.0(직경 $1.0\mu\text{m}$ 이하) 극 초미세먼지로 세분화되어 인간건강에 미치는 영향에 가장 큰 비중을 두고 있다. 도시 미세먼지에 대한 미국환경청(EPA)의 분류기준에 따르면 핵화모드(Nucleimode) $0.0001\sim 0.1\mu\text{m}$, 적산모드(Accumulation mode) $0.1\sim 2.5\mu\text{m}$, 조대모드(Coarse particle mode) $2.5\sim 100\mu\text{m}$ 로 구분하고 있다. 이에 따라 미세먼지의 측정기기도 극초미세먼지의 감시기술로 진화 발전되어 가고 있다. 대부분 도시 대기의 미세먼지는 자동차 배기가스로부터 생성된 2차 미세먼지이다. 디젤엔진 배기가스와 주행 시 타이어나 브레이크의 마모 등에서 발생하는 1차 미세먼지와 산업체의 NOx 등 화학적 배출 가스로부터 발생된 2차 미세먼지이다.

도시대기의 미세먼지의 원인별 수준으로 볼 때 교통의 영향이 PM2.5에서 보다 PM10에서 높게 나타났다. 도시의 PM2.5 초미세먼지의 지구적 배출수준은 도시 교통으로부터 배출된 양이 25%, 발전소 등 산업시설로부터 배출된 초미세먼지가 15%, 일반가정의 취사 등으로부터 20%, 인간 활동으로 부터 배출된 불특정배출원에서 22% 그리고 토양 및 해염으로부터 배출된 입자가 18%이다.

PM2.5의 지역적 배출원 분류에서 인도에서 배출된 양이 전체의 37%를 나타내었고, 동남아시아지역이 36%, 남서유럽지역이 35%, 아시아 남부가 34%, 브라질이 33%, 기타 아메리카 지역이 30%를 나타내었다.

PM2.5의 인간 활동에 의한 배출된 양은 일본에서 34%, 남아시아에서 27%, 터키에서 30%, 브라질에서 19%, 유럽 중심지역에서 17%, 동남아시아에서 18%의 순으로 나타났다. 가정의 연료소비 등으로부터 배출되는 양은 아프리카지역에서 34%, 유럽 중심과 동유럽지역에서 32%의 배출 분포를 보였다. 여기에 아메리카 여타지역에서 25%, 북서유럽지역에서 22%, 남중국지역에서 21%, 동남아시아에서 19%, 그리고 인도지역에서 16%의 배출을 보였다. 인간 활동에 의한 불특정 배출원(Unspecified pollution sources of human origin)에 대한 국가별 배출 분포는 캐나다가 65%, 미국이 46%, 대한민국이 45%, 유럽과 터키가 각각

44%와 42%를 나타내었다. 자연발생 미세먼지는 토양과 해염입자이다. 국가별로는 중동지역이 52%, 일본이 42%, 호주지역 25%, 그리고 브라질과 아프리카가 각각 22%를 나타내었다.

PM10의 전지구적 그리고 지역적 농도에 따른 배출분포는 도시지역의 미세먼지의 25%가 교통체제로부터 배출된 양이고, 18%가 산업시설로부터, 15%는 가정용 연료사용, 20%가 불특정 인간활동, 22%가 토양먼지와 해염입자의 비산으로부터 배출된 양이다.

PM2.5의 지역적 배출농도에 따라 구분하면 아메리카 여타지역이 38%, 아프리카와 인도에서 34%, 미국의 경우 30%, 서유럽 지역이 28%, 북중국 지역이 25%의 배출을 나타내었다. 이들 미세먼지가 고농도를 형성하는 원인은 도로교통으로부터 비산되어 형성된 먼지의 양이다. 산업시설로부터 배출된 PM10 농도는 터키가 29%, 여타 아메리카지역이 26%, 서유럽이 22% 그리고 중국이 21-22%로 나타났다. 가정용 취사에서 사용된 연료소비 양은 유럽 중심과 동유럽 지역에서 45%, 북서유럽은 24%, 아프리카 21%, 북중국지역이 19%를 보였다. 유럽지역에서는 PM10의 자연발생이 미세먼지의 농도를 더 높여주고 있다.

인간 활동에 의한 불특정 배출원이 기여한 미세먼지의 발생에 대한 영향은 PM10이 PM2.5에서 보다 다소 낮았다. 그 이유는 PM2.5의 경우 가스 상 물질의 연소에서 2차 미세먼지 생성을 이루기 때문이다. PM10의 생성에 기여한 주요 국가는 미국이 44%, 대한민국이 43%, 터키가 39%, 남중국이 27%로 나타났다. PM10의 자연발생은 중동지역이 44%, 남서유럽이 39%, 북서유럽이 33%, 남중국이 27%, 아프리카 25%, 여타 아메리카 지역이 24%였다.

결과적으로 도시형 미세먼지에서 중국과 인도, 남아시아, 아프리카 지역은 PM2.5 도시형 미세먼지의 농도가 높게, 그리고 중동, 북부 중국, 인도, 아프리카에서는 도시형 PM10이 높게 나타났다. 그러나 PM2.5와 PM10 사이의 농도차이는 10% 미만으로 낮았다. 토양과 해염입자먼지는 PM10에서, 산업과 인간 활동에 의한 원인은 PM2.5에서 각각 높게 나타났다.

경제소득이 낮은 국가와 높은 국가의 차이에 따른 미세먼지 배출원의 역할은 순위로 볼 때 3.5-5 사이에 차이를 나타내고 있지만, 한국을 비롯하여 호주, 캐나다 등은 경제소득이 높은 국가임에도 불구하고 그 순위가 크게 상승하고 있다.

PM2.5 수준의 도시 미세먼지의 주된 배출원인 자동차는 경차(800cc 이하), 소형차(800-1,500cc), 중형차 이상(1,500cc~)로 구분하는 방법과 승합차의 경우 소형(15인 이하), 중형(15~25인 이하), 대형(25인 이상)으로 구분하며, 화물차의 경우 소형(적재량 1톤/총중량3톤 이하), 중형(적재량 1~5톤/총중량 3~10톤), 대형(적재량 5톤 이상, 총중량 10톤 이상)으로 구분하여 배출계수를 구한다. 그 외 비 도로 이동 배출원으로서 내연기관을 장착한 철도차량, 항공기, 농기계, 건설장비 운영 등으로 분류한다.

도시의 인구수를 대표하는 지역적 평균개념으로 배출원 종류를 구분할 때, 모든 배출원의 분류가 동일하게 평균값에 적용되지 않아 배출원 설정(SA)지역에서 측정시간에 대한 도시 인구수에 따라 가중치가 그 평균값에 주어진다.

1990-2014년 기간 동안 조사한 전지구 51개국 529개 지역을 대상으로 수용체 중심의 모델을 사용한 배출원별 미세먼지 할당 조사는 관측위치, 고도, PM분류, 측정방법 등이 포함되었고 이들 내용을 통계적으로 분석한 결과는 다음과 같다. 즉 미세먼지의 도시지역 배출원에 관한 것이 77%, 농촌지역에 관한 것이 14%, 외딴지역에 관한 것이 5%, 산업지역에 관한 것이 4%를 차지하였다.

국가별 피해지역 분포는 유럽 239개 도시지역, 미국 106개 도시지역, 중국 43개 도시지역으로 도시지역에 있는 배출원이 높은 비중을 차지하고 있으며 배출원별 분포는 인간 활동에 의한 불특정 배출원에 관한 데이터가 524개, 자연 배출원에 관한 데이터가 468개, 교통 배출원에 관한 데이터가 462개, 산업 배출원에 관한 데이터가 347, 가정에서 사용되는 연료 배출원에 관한 데이터가 238개 등으로 집계되었다. 그러나 본 조사에 활용된 자료는 미세먼지 측정에 참여하고 있는 선진국을 기준으로 한 결과이다.

대도시나 개발도상 국가와 같이 미세먼지의 농도가 높은 지역들을 대상으로 미세먼지가 인체건강과 도시의 기온상승에 미치는 영향들에 관한 연구는 많이 있으나, 미세먼지의 구성성분과 물리화학적 성질에 관한 연구는 많지 않다.

도시의 미세먼지에 대한 대표적 조사로서 인도 남서부의 인구 약 550만의 Pune시를 대상으로 2013년 5월부터 10월사이의 미세먼지 농도, 크기, 형태, 화학성분을 분석한 결과(2016년)를 보면 인도의 경우는 문화적인 생활관습과도 밀접한 상관성을 나타내었다. 2010년 인도의 140개 도시 중 126 곳이 PM2.5에

관한 국가 대기환경기준을 초과한 것으로 나타났다. 따라서 자동차 등 교통수단, 산업시설, 화력발전소, 토양 및 건설현장의 먼지, 바이오매스 연료, 폐기물 소각 등이 인도의 주요 미세먼지 배출원이 되고 있다. 인도의 고유한 장례절차에서 화장용 장작(funeral pyres)을 사용하는 행위도 미세먼지 배출원으로 작용하고 있으며 8월과 9월의 몬순(monsoon) 강우 기간에는 낮은 미세먼지 농도를 보여 기상조건도 미세먼지 농도에 큰 영향을 미치고 있음을 나타내었다. 2000년부터 2010년 사이에 Delhi를 비롯한 주요도시들의 미세먼지 농도가 크게 증가하였으며 대도시들과 인도-갠지스 분지(Indo-Gangetic basin) 지역의 대기오염이 가장 심각한 것으로 나타났다.

3. 배출원의 할당

PM_{2.5} 농도에 기여하는 다양한 배출원들의 기여도를 비교하여 비율로 추정하는 배출원 할당(source apportionment)은 미세먼지의 관리와 통제 그리고 관련 정책을 수립하는 데 매우 중요한 정보가 된다(Liang, C. S., *et al.*, 2016).

배출원을 할당하는 방법으로는 오염 피해지역의 관측지점에서 측정된 값들을 통계 처리한 결과로 배출원의 기여도를 추정하는 수용체 모델(receptor model), 오염 배출지점의 배출원 정보와 기상정보 등을 바탕으로 오염물의 이동확산 모델링 결과로부터 배출원의 기여도를 추정하는 배출원 모델(source model), 그리고 방사성 탄소, 이온, 또는 원소탄소를 추적자(tracer)로 사용하여 배출원의 기여도를 추정하는 추적자 방법, 오염발생 현장에서 측정 장비들을 사용하여 직접 측정한 값들을 수집, 분석하여 추정하는 방법 등이 있다.

이러한 배출원 할당방법들 중에서 현재 수용체 모델인 양의 행렬인자분석법(PMF: Positive Matrix Factorization)이 가장 널리 적용되고 있다. 추적자 법이나 AMS 분석으로 얻어낸 오염물에 관한 데이터들을 PMF에 적용하면 배출원 할당결과의 신뢰성을 높일 수 있기 때문에 앞으로 이러한 방법들의 적용이 확대될 것으로 예상된다.

일반적으로 하나의 배출원에서 가스와 입자상태의 오염물들이 혼합되어 배출되고 이들이 관측지점에 도달하기 전에 대기 중에서 화학적 변화과정을 거치기 때문에 배출원 할당결과로부터 배출원의 특성을 정량적으로 분석하기 어렵다.

PMF에 의한 여러 나라의 PM_{2.5} 배출원 할당결과에 의하면 SO_4^{2-} , NO_3^- 와 같은 2차 이온들, 자동차, 바이오매스의 연소 등이 PM_{2.5} 농도에 기여하는 비율이 높은 것으로 나타났으며 배출원별에 대한 국가별 기여도 또한 차이가 크다. 예를 들어, 서울의 2009년 6월부터 2010년 5월까지 PM_{2.5}의 배출원 할당 추적조사 결과에서는 2차 NO_3^- 이온이 25.4%, 자동차가 23%, 2차 SO_4^{2-} 이온이 19% 순으로 기여도가 높게 나타났다. 북경의 경우 2010년 PMF조사 결과에서는 2차 SO_4^{2-} 이온이 26.5%, 먼지가 23.1%, 자동차가 17.1%, 화석연료 연소가 16% 순으로 기여도가 높게 나타났다(Liang, C S., *et al.*, 2016).

도시와 농촌 등에서 이염기산($\text{C}_2 \sim \text{C}_{10}$)의 인위적 배출원의 대표적인 성분을 보면 휘발유자동차로 부터 메틸말레산(mM)>숙신산(C_4)>말레산(C_4) 화학성분의 농도 순으로 발생되며, 고기구이에서는 아디프산(C_6)>숙신산>수베르산(C_8) 순으로, 식물의 열분해과정에서는 $\text{C}_4 \sim \text{C}_9$, 생체소각에서는 동종지방족이염기산($\text{C}_2 \sim \text{C}_{10}$), 불포화이염기산, ω -옥소카르복실산과 α -디카르보닐을 각각 배출됨이 조사되었다(Kawamara, K. and Bikkina, S., 2016).

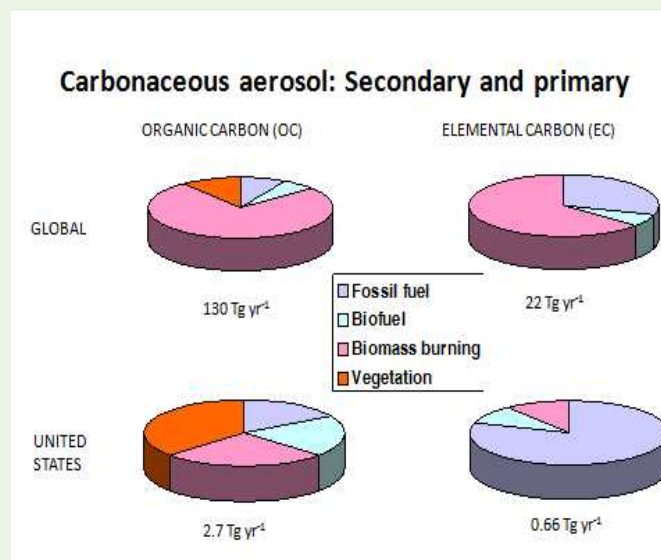


그림5. 일차 및 이차 탄소질에어로졸의 지역별 배출원 분포 사례

동북아지역은 중국의 산업화 등 인위적 영향에 따른 대기의 미세먼지의 발생이

증가하고, 한편 기후변화에 의한 아시아대륙 중심부의 건조한 기후현상은 황사의 발생을 더욱 강하고 빈번하게 한다. 이에 따라 편서풍대의 우리나라 지역은 봄철 잦은 대기 불안정으로 미세먼지에 의한 안개일수가 많아지면서 호흡기 질환 환자가 증가하는 추세이다.

●● 미세먼지의 건강에 대한 영향과 장거리 이동

인간의 호흡기관의 폐포의 크기보다 작은 PM2.5는 인체의 심혈관이나 호흡기 질환에 영향을 준다는 증거들이 많은 연구결과들을 통해 보고되고 있다. 2010년 세계질병담당 연구(Global Burden of Disease Study)에서 질병의 원인별 지표로 사용되는 장애보정 생존년수(disability adjusted life years)를 기준으로 할 때, 미세먼지로 인한 대기오염을 중국의 경우 4번째로 질병부담이 높은 위험요소로 평가되고 있다.

국가나 지역에 따라 미세먼지의 구성성분, 인구집단의 성별 및 연령, 소득수준 등에 따라 건강에 미치는 영향이 다를 수 있으므로, 관심지역을 대상으로 미세먼지 농도와 질병발생의 함수관계(concentration-response functions)를 밝혀내어 지역특성에 적합한 보건환경정책과 대기환경 기준을 설정하는 것이 바람직하기 때문이다.

1999년부터 2013년까지 중국, 홍콩, 대만 지역에서 일반인들을 대상으로 대기 중의 PM10과 PM2.5 미세먼지가 심혈관 질환이나 호흡기 질환을 일으켜 사망이나 병원진료를 초래한 사례들에 관한 역학조사 결과를 메타분석(meta analysis)하였다. 연구대상 지역의 PM10과 PM2.5의 일평균농도는 각각 $52 \sim 174 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $39 \sim 177 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되어 세계보건기구의 권장기준 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 각각 초과하였다.

분석에서 흡연자나 어린이와 같은 취약계층과 우발적인 발병사례들은 제외하였으며 연구대상지역, 기간, 인구집단, 오염물 특성, 발병질환 등이 유사한 경우에는 중복을 피하기 위하여 가장 최근의 연구사례만을 참고하였다. PM10과 PM2.5로 입자크기를 구분하고 장·단기간 노출되었을 경우로 구분하였다. 분석된 요소는 미세먼지 농도증가로 인한 사망률(mortality)과 병원진료 환자(morbidity)의 증가로 평균값의 95% 신뢰구간(confidence intervals)을 산출하였다.

2018년 중국의 미세먼지를 포함한 대기오염 상태를 현지 방문하여 조사한 결과는 다음과 같다.

베이징은 먼지오염이 상당히 심한 상태이고, 서울은 전반적으로 깨끗한 상태이다. 이산화황은 황이 포함된 유기물을 태우면서 나오는 것이 대부분이다. 과거에는 석탄이나 중질유(벙커C유)를 태우는 과정, 도시에서는 자동차의 경유 연소과정에서 주로 발생한다. 1980년 서울의 연평균 이산화황 농도는 94 ppb였고 이 값은 환경부의 기준으로 볼 때 서울 시민 대부분은 만성 천식에 걸렸어야 한다. 지금은 경유의 황 함량을 엄격(아주 낮게)하게 기준을 정하여 서울에서는 석탄이나 중질유 사용을 금지하였거나 제한하여 이산화황 농도가 낮다. 정부의 대기환경 정책 가운데 성공사례로 손꼽히는 것 가운데 하나이다. 그러나 정부가 최근에는 황산화물 배출 저감에 큰 관심을 갖고 있지 않는 것 같다. 최근 10년 동안 서울의 이산화황 연평균 농도는 5-6 ppb 정도로서 선진국 대도시에 비해 상당히 높은 수준으로, 더 낮아지지 않고 있다. 먼지, 특히 PM2.5 초미세먼지는 대기에서 1주일 체류기간 후 제거되지만, 이산화질소는 하루 이내, 이산화황은 1-2일만에 대기에서 제거되기 때문에 중국에서 우리나라로 이동하는 이산화황도 상당히 있을 가능성이 있다. 6월 12일 아침 백령도의 이산화황 농도는 1 ppb이었다. 그러나 서울의 농도 3 ppb에서 백령도 농도를 제외하고라도 최소 2 ppb 정도는 우리나라에서 배출된 것이다.

PM10과 PM2.5에 단기간 노출되었을 때 건강에 미치는 영향은 대기 중 PM10의 농도가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하면 심혈관 질환으로 인한 사망률이 0.36% 증가하고, 호흡기 질환으로 인한 사망률이 0.42% 증가한다. 또한 PM2.5의 농도가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하면 심혈관 질환으로 인한 사망률이 0.63% 증가하고, 호흡기 질환으로 인한 사망률이 0.75% 증가하여 PM2.5가 PM10보다 건강에 더 심각한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이모든 조사결과는 95% 신뢰구간에서 0.35%~0.91%범위 내외이다.

미세먼지의 구성성분 중 니켈(nickel), vanadium, 질소산화물(nitrate)과 같은 특정 화학물질의 농도 증가가 사망률 증가에 미치는 정도가 각각 서로 다르게 나타나, PM2.5에서 질소산화물 농도가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하면 질병으로 인한 총 사망률이 2.45%(95% 신뢰구간 1.10%~3.79%) 증가 하는 것으로 나타났다.

지금까지 미세먼지에 장기간 노출되었을 때 건강에 미치는 영향을 분석한 3개

의 코호트 연구(cohort study)는 모두 PM10을 대상으로 하여 왔다. 대상지역에 따라 연구결과가 다르게 나왔으나 중국의 Shenyang 지역에서 연평균 PM10의 농도가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하면 심혈관 질환으로 인한 사망률이 55%(95% 신뢰구간 51%~60%) 증가하고, 호흡기 질환으로 인한 사망률이 67%(95% 신뢰구간 60%~74%) 증가하는 것으로 나타났다(Feng Lu, et al., 2015).

●● 미세먼지 저감과 국제간 협력 그리고 기후변화 예측

지금까지 미세먼지에 관한 연구는 주로 대기 중 농도측정이나 건강에 미치는 영향에 초점이 맞추어져 왔으나, 이들의 화학성분 조성, 형태, 입자크기 분포, 이동경로, 기후학적 관련성 등 세분화하여 미세먼지가 환경, 기후 및 인체 등에 미치는 영향을 보다 구체화시키고 효율적인 저감대책을 수립을 위한 연구가 추세이다. 향후 국내에서도 계절에 따라, 온습도 변화 등 기후와 환경의 변화에 따라, 지역특성(산업단지, 도시, 농어촌)에 따라 미세먼지의 특성을 규명할 필요가 있다. 특히 실내외의 미세먼지 배출원(sources)을 식별하는 연구와 미세먼지 노출에 따른 건강 위해성과 기후변화에 관한 연구들이 많은 관심을 끌고 있다.

미세먼지에는 탄소성분, 금속성분, 무기이온, 미생물 등 다양한 성분이 포함되어 있고 배출된 상태로만 존재하는 것이 아니라 대기 중에서 광화학반응으로 미세먼지의 형태와 화학조성 등에 변화가 발생한다. 특히 대기의 복사에너지의 불균형을 초래하여 국지적으로 극한기상의 재해 기상현상을 초래한다.

동아시아 등 개발도상국에서 보다 많은 예측과 동시에 지역적 기후변화-대기질 모델과 대기오염물질의 건강영향분석이 필요하다. PM2.5관련사망률이 O_3 관련 사망률보다 높게 예측되었지만 PM2.5와 관련된 사망률에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았으므로 여름뿐 아니라 모든 계절에 대한 많은 연구가 필요하다.

미세먼지의 영향에서 동아시아지역은 2020년 대기오염관련 조기사망자를 기준 정책(REF)/정책성공(PSC)/정책실패경우(PFC) 등으로 구분하여 예측한 결과 각 451,000/ 649,000/1,035,000명으로 O_3 보다 PM2.5의 영향이 30세 이상에서 높게 예측되었다.

미세먼지의 건강에 미치는 영향에 관한 연구는 PM10보다 PM2.5에 대하여 빈약한 실정이고 최근에는 직경 100nm 미만의 극초미세입자(Ultrafine Particle,

UFP)에 대한 노출에 따른 건강 영향도 관심을 끌고 있다. 미세먼지 입자크기가 작을수록 건강에 더 큰 해를 끼칠 수 있기 때문에, 국내에서도 PM10, PM2.5, UFP로 세분화하여 대기 환경기준을 정보화하고 있다.

대기오염에 취약한 어린이나 노년층과 심혈관 질환이나 호흡기 질환이 있는 사람들을 대상으로 건강에 미치는 영향에 관한 연구를 추진하면서, 연구결과의 신뢰성을 높이기 위해서 대기오염 측정소에서 측정되는 광역 농도데이터보다는 개인 휴대용 측정기를 사용하여 획득한 농도데이터를 기초로 하여 미세먼지 농도와 질병발생의 함수관계를 찾아내는 연구가 바람직한 것으로 나타났다. 또한 미세먼지의 구성성분 중 니켈과 질소산화물이 다른 성분들보다 건강에 더 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단되며, 미세먼지에 장기간 노출은 단기간 노출에 비해 매우 심각한 결과를 초래하는 것으로 나타났다.

대기오염 장거리 이동에 의한 미세먼지의 영향은 피해지인 한반도에서 40% 이상으로 나타났다. 북경에서 측정한 2011-2013년 계절별 PM2.5의 배출량은 계절별로 봄 때 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철의 순서로 72.14, 74.15, 82.31, 116.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 순서로 겨울철에 가장 높은 질량농도를 보여 봄철이 가장 높게 나타난 2002-2004년 기간과 차이를 보였다. 먼지연무의 현상이 나타난 2013년 PM2.5의 일평균 농도는 240.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일 최고 평균 농도는 445.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 그러나 2002년에는 먼지 폭풍이 발생하였을 때 일평균 635.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며 당시 최고 농도는 1,393 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 관측되었다. 이는 국가기준치 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 20배가 넘는 값이다.

초미세먼지의 저감을 위한 동북아 국가들의 공동대응이 요구되는 시점에 와 있다. 인공강우 기상조절 기술을 이용하여 미세먼지의 농도를 줄이는 지구공학적인 제거 방법을 구상함은 미래 기술을 위해서도 필요하다.

2017년 초부터 미세먼지 문제해결과 신 성장 동력 창출을 위해 부처간(범부처 TF)·민관 간(미세먼지대응 기술협의회) 협업 생태계를 구축·운영하고 있다. 국내 환경 기술의 글로벌 진출과 미세먼지 해결을 위한 국제연구협력을 활성화한다. 동북아 국가간 미세먼지 문제해결을 위한 정부 간 협력을 확대(한중일 → 동북아 주요국)하고 민간 차원의 연구협력을 지원한다.

〈참고문헌〉

- Lina Madaniyazi, Yuming Guo, Weiwei Yu, Shilu , "Projecting future air pollution-related mortality under a changing climate: progress, uncertainties and research needs" *Environment International*, 75, 2015, pp.21 ~ 32
- Feng Lu, et al, "Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ pollution in the Chinese population", *Environmental Research*, 136, 2015, pp.196-204
- Atar Singh Pipal, P. Gursumeeran Satsangi, "Study of carbonaceous species, morphology and sources of fine(PM_{2.5}) and coarse(PM₁₀) particles along with their climatic nature in India", *Atmospheric Research*, 154, 2015, pp.103 ~ 115
- 오성남 외, 2005: 동북아대기오염 감시체계 구축 및 환경보전협력사업(VI), 14-40, 국립환경과학원.
- Feng Lu, et al, "Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ pollution in the Chinese population", *Environmental Research*, 136, 2015, pp.196-204.
- Chun-Sheng Liang, Feng-Kui Duan, Ke-Bin He, Yong-Liang Ma, "Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM_{2.5}", *Environment International*, 86, 2016, pp.150~170.
- Weijun Li, et al., "A review of single aerosol particle studies in the atmosphere of East Asia: morphology, mixing state, source, and heterogeneous reactions," *Journal of Cleaner Production*, 112, 2016, pp.1330~1349.
- Kimitaka Kawamura, Srinivas Bikkina, "A review of dicarboxylic acids and related compounds in atmospheric aerosols: Molecular distributions, sources and transformation" *Atmospheric Research*, 170, 2016, pp.140~160.
- Pallavi Pant, Sarath K. Guttikunda, Richard E. Peltier, "Exposure to particulate matter

in

India: A synthesis of findings and future directions", *Environmental Research*, 147, 2016, pp.480~496.



