

1. 미세먼지의 발생 및 인체 유해성

한국에너지기술연구원, 정 순 관

올해 환경 이슈 중 가장 큰 화두로 떠오르고 있는 문제 중 하나는 ‘미세먼지’일 것으로 판단된다. 잦은 미세먼지 발생에 따른 미세먼지 주의보 발령횟수도 서울기준으로 2012년 0회에서 2015년 8일로 증가하였으며 미세먼지 기사건수도 2012년 950건에서 2016년 상반기 6,993건으로 국민적 관심이 크게 증가하였다(범부처 미세먼지 연구기획위원회, “과학기술기반 미세먼지 대응 전략” 공청회 자료, 2016.09.07.) 미세먼지로 인한 국민 생활 불편 및 인체 유해성을 줄이기 위하여 정부에서는 ‘미세먼지 대책’을 국가전략프로젝트로 선정(제2차 과학기술전략회의, 2016.08.10.)하였으며 이를 통해 미세먼지발생·유입, 측정·예보, 집진·저감, 보호·대응에 관한 R&D를 수행하고 2023년 기준 2016년 대비 50%의 초미세먼지 배출을 저감하는 솔루션을 제공할 예정이다.

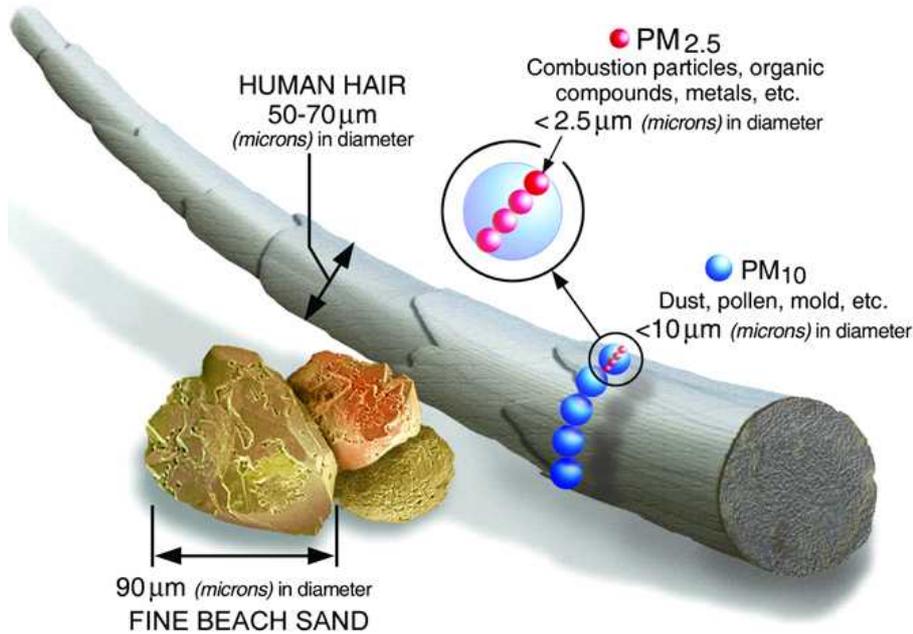
미세먼지로 인한 가시거리 제한, 인체의 유해성 등 여러 가지 문제를 야기함에 따라 많은 사람들에게 관심이 되고 있으나 발생원, 유해성, 예측, 저감기술 등 세부적인 사항에 대한 일목요연한 정보가 부족한 사항이다. 따라서 본고에서는 미세먼지에 대한 전반적인 사항을 서술하여 미세먼지에 대한 과학적 이해와 화학공학도가 필요로 하는 기술에 대해 논하겠다.



[그림 1] 미세먼지에 덮인 서울 광경 (전자신문, 2015.03.17.).

1-1. 미세먼지란 무엇인가?

먼지와 미세먼지의 개념을 환경부에서는 다음과 같이 정의하고 있다. 먼지란 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상 물질을 말하며, 석탄·석유 등의 화석연료를 태울 때나 공장·자동차 등의 배출가스에서 많이 발생한다. 먼지는 입자의 크기에 따라 50 μm 이하인 총먼지(TSP, Total Suspended Particles)와 입자크기가 매우 작은 미세먼지(PM, Particulate Matter)로 구분한다. 미세먼지는 다시 지름이 10 μm 보다 작은 미세먼지(PM10)와 지름이 2.5 μm 보다 작은 미세먼지(PM2.5 - 초미세먼지)로 나뉜다. 아래 그림과 같이 사람의 머리카락 지름(50~70 μm)보다 PM10은 약 1/5~1/7, PM2.5는 1/20~1/30에 불과할 정도로 매우 작다. (환경부, “미세먼지, 도대체 뭘까?”, 2016.04)



[그림 2] 미세먼지와 머리카락 지름 비교 (EPA, www.epa.gov).

1-2. 미세먼지 발생원 및 배출량

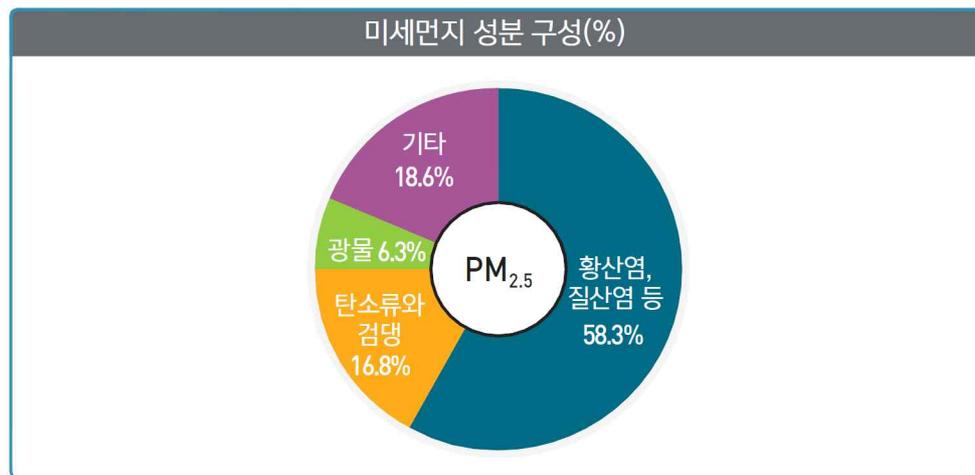
미세먼지는 석유·석탄 등 화석연료를 연소시키는 과정에서 발생하는 탄소류와 검댕, 지표면의 흙먼지 등에서 생기는 광물들과 같이 발생원으로부터 직접 배출되는 1차 미세먼지와 전구물질인 가스상 물질에 기인하여 형성되는 2차 미세먼지로 나눌 수 있다 (추후 발생 메커니즘 분석에서 자세히 서술하겠음). 즉 2차 미세먼지는 대기 중 산소, 수증기 등의 물질과 가스상 오염물질인 질소산화물, 황산화물, 암모니아, VOCs 등과 의 반응에 의하여 형성된다. 미세먼지의 주요 발생원은 생성 메커니즘에 따라 다음과

같이 정리할 수 있다.

<표 1> 미세먼지 주요 발생원

구분		생성 메커니즘
인위적요인	고정발생원	난방, 산업, 발전 등
	이동발생원	자동차 매연 및 타이어마모, 건설기계 매연
	기타	공사장 비산먼지, 노천소각 등
자연적요인		안개, 화재, 황사, 화산폭발, 토양풍식 등
기타요인		2차 반응에 의한 황산염, 질산염 생성

PM2.5를 기준으로 할 때 미세먼지의 구성 성분은 다음과 같이 1차 미세먼지보다 2차 미세먼지가 차지하는 비율이 더 높은 것으로 보고되고 있다, 우리가 일반적으로 생각하는 연소에 의한 검댕이류와 광물의 분쇄 등에 의한 것보다 황산염, 질산염 등에 의한 2차 생성물이 절반이상을 차지하고 있기 때문에 미세먼지 저감을 위해서는 황산화물, 질소산화물의 배출을 억제하는 것 역시 중요함을 알 수 있다.



[그림 3] 미세먼지 성분 구성.

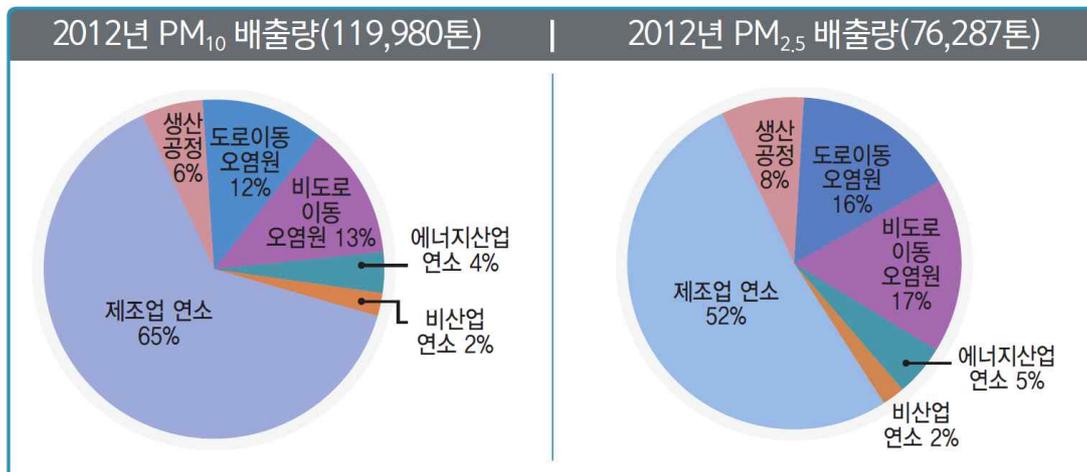
PM10 미세먼지 배출량은 1999년 63,251톤에서 2013년 121,563톤으로 약 2배 정도 증가하였으며 2011년부터 측정을 시작한 PM2.5의 경우 연도별 큰 차이가 없는 상태로 2013년 기준 76,802톤을 배출하였다.

<표 2> 미세먼지 발생량 [단위:톤]

	NOx	SOx	TSP	PM10	PM2.5	VOC
1999	1,072,323	484,716	84,835	63,251		665,043
2000	1,122,844	490,761	82,101	61,719		706,915
2001	1,219,020	487,734	88,075	67,368		734,814
2002	1,242,265	474,084	84,365	65,100		741,647
2003	1,362,141	469,145	85,941	66,357		758,455
2004	1,377,526	446,804	80,084	62,491		797,240
2005	1,306,724	408,462	88,909	67,343		756,421
2006	1,274,969	446,488	88,260	64,795		794,158
2007	1,187,923	402,525	144,510	98,143		874,699
2008	1,045,104	417,980	171,603	110,797		857,856
2009	1,014,318	387,727	155,497	103,735		851,162
2010	1,061,210	401,741	177,601	116,808		866,358
2011	1,040,214	433,959	201,810	131,176	81,793	873,108
2012	1,075,207	417,645	182,744	119,980	76,287	911,322
2013	1,090,614	404,660	185,986	121,563	76,802	913,573

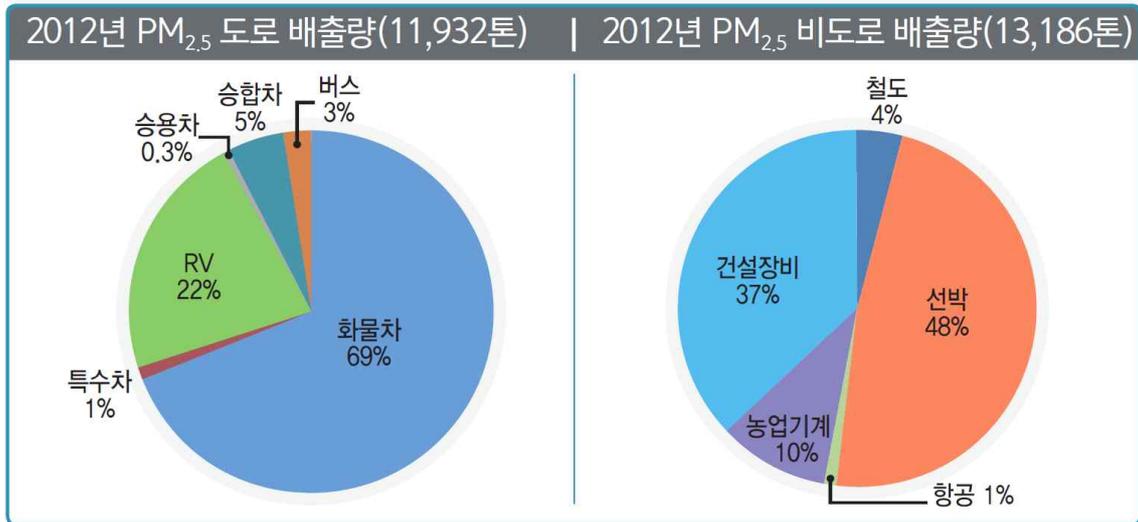
*비산먼지, 생물성연소, 식생 제외 (국립환경과학원, www.nier.go.kr)

2012년에 배출된 미세먼지의 배출원을 세분화하면 다음 그림과 같다. 제조업 연소에 의한 PM10, PM2.5의 배출이 가장 많은 것으로 나타났으며 그 다음으로 자동차를 비롯한 이동오염원에서의 배출이 많았다.



[그림 4] 배출원별 미세먼지 배출량(환경부, “미세먼지, 도대체 뭘까?”, 2016.04).

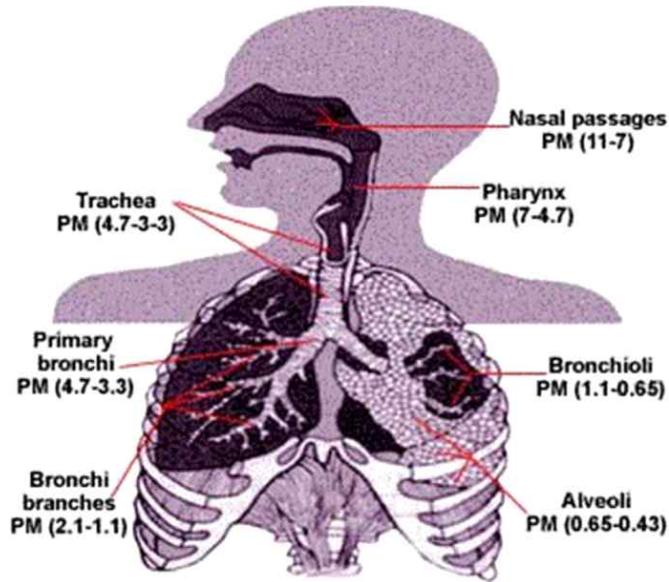
이동오염원에서 배출되는 미세먼지의 대부분은 PM2.5로 그 비중이 92%에 이르는 것으로 나타났다. 도로이동오염원의 경우 화물차와 RV차량에서 미세먼지 대부분이 배출되며 비도로이동오염원의 경우 선박과 건설장비 등에서 미세먼지가 많이 배출되는 것으로 조사되었다. 통계에 포함되지 않은 비산먼지는 2012년 PM10 115,121톤, PM2.5 18,168톤으로 조사되었다.



[그림 5] 이동원별 미세먼지 배출량(환경부, “미세먼지, 도대체 뭘까?”, 2016.04).

1-3. 미세먼지의 인체유해성

미세먼지에 노출되는 환경은 날씨, 계절, 지형, 발생원 등 지역적 특성과 개인의 호흡 특성에 의해 달라지나 미세먼지의 크기가 인체에 미치는 유해성은 직접적인 상관관계가 있다. 일반적으로 작은 입자는 호흡기 계통으로의 침투가 더 용이하다. 비강내의 섬모는 매우 유용한 먼지 제거 기능을 가지고 있어 PM10 이상의 대부분 먼지를 제거할 수 있다. 큰 입자는 빠르게 침강하기 때문에 기도 혹은 기관지에 머물게 되고 재채기 등에 의해 밖으로 배출할 수 있다. 인체에 큰 해를 주는 먼지는 PM10 이하인 것으로 밝혀지고 있다. 10 μ m 이하 먼지는 기도로부터 허파꽂리까지 침투할 수 있다. 세분화하여 살펴보면 약 5~10 μ m 크기의 먼지는 기관기에 침착된다. 1~5 μ m 먼지는 세기관지와 허파꽂리에 침착되고 심하면 폐까지 침투할 수 있다. 결국 이러한 먼지는 혈액내로 들어가서 심각한 인체에 해를 끼칠 수 있다. 1 μ m보다 작은 입자는 기체와 비슷한 거동을 하기 때문에 허파꽂리로 침투하고 더 진행된다면 세포조직까지 전이할 수도 있다.



[그림 6] 먼지 크기에 따른 인체내 침적.

(K.H. Kim et. al, “A review on the human health impact of airborne particulate matter”, Environmental International, 74(2015), 136-143)

미세먼지가 우리 몸속으로 들어오면 면역을 담당하는 세포가 먼지를 제거하는 작용을 하며 부작용으로 염증을 수반한다. 기도, 폐, 심혈관, 뇌 등에서 이러한 염증이 발생하면 천식, 호흡기, 심혈관계 질환을 유발할 수 있다. 세계보건기구(WHO)에서는 2014년 한 해에 미세먼지로 인해 기대수명보다 일찍 사망하는 사람이 700만 명에 이른다고 보고하였으며 국제암연구소(IARC)에서는 2013년 10월 미세먼지를 암과 직접적인 상관관계에 있는 발암물질 1군으로 분류하였다.

국제암연구소(IARC)에 따른 발암물질 분류		
구분	주요 내용	예시
1군(Group 1)	인간에서 발암성이 있는 것으로 확인된 물질	석면, 벤젠, 미세먼지
2A군(Group 2A)	인간에서 발암성이 있을 가능성이 높은 물질	DDT, 무기납화합물
2B군(Group 2B)	인간에서 발암성이 있을 가능성이 있는 물질	가솔린, 코발트
3군(Group 3)	발암성이 불확실하여 인간에서 발암성이 있는지 분류하는 것이 가능하지 않은 물질	페놀, 톨루엔
4군(Group 4)	인간에서 발암성이 없을 가능성이 높은 물질	카프로락담

기관지에 미세먼지가 쌓이면 가래가 생기고 기침이 잦아지며 기관지 점막이 건조해지면서 세균이 쉽게 침투할 수 있어, 만성 폐질환이 있는 사람은 폐렴과 같은 감염성 질환의 발병률이 증가하게 된다. 환경부에서 질병관리본부 자료를 정리한 결과에 따르면, 미세먼지(PM10) 농도가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때마다 만성 폐쇄성 폐질환(COPD: Chronic Obstructive Pulmonary Disease)으로 인한 입원율은 2.7%, 사망률은 1.1% 증가한다고 보고하였다. 특히, 미세먼지(PM2.5) 농도가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때마다 폐암 발생률이 9% 증가 하는 것으로 나타났다. 따라서 호흡기 질환자는 우선 미세먼지에 장시간 노출되지 않도록 주의하는 것이 가장 중요하다. 만성 폐쇄성 폐질환 환자는 미세먼지 농도가 '나쁨' 이상인 날 부득이하게 외출할 때에는 치료약물(속효성 기관지 확장제)을 준비 하는 것이 필요하다고 제안하였다. 미세먼지는 크기가 매우 작아 폐포를 통해 혈관에 침투해 염증을 일으킬 수 있는데, 이 과정에서 혈관에 손상을 주어 협심증, 뇌졸중으로 이어질 수 있다. 특히 심혈관 질환을 앓고 있는 노인은 미세먼지가 쌓이면 산소 교환이 원활하지 못해 병이 악화될 수 있다. 또한 미세먼지(PM2.5)에 장기간 노출될 경우 심근경색과 같은 허혈성심질환의 사망률은 30~80% 증가하는 것으로 나타났다. 미세먼지는 기도에 염증을 일으켜 천식을 유발하거나 악화시킬 수 있다. 미세먼지에 장기간 노출될 경우 폐 기능을 떨어뜨리고 천식 조절에 부정적 영향을 미치며, 심한 경우에는 천식 발작으로 이어지기도 한다(환경부, “미세먼지, 도대체 뭘까?”, 2016.04).