

미세먼지와 생태¹⁾

신 동 원²⁾

수도권대기환경청장

데모크리토스와 아리스토텔레스

미세먼지란 크기를 기준으로 볼 때 10 μm 보다 작은 크기의 먼지를 말한다. 공기중에 떠다니는 먼지는 우선 맑은 공기정책의 대상이다. 크기로 볼 때 미세먼지보다 큰 것을 모두 포함한 총먼지(TSP, total suspended particle)가 있고, 미세먼지보다 작은 극미세먼지(PM-2.5, Particulate matter $\leq 2.5 \mu\text{m}$)가 있는데, 먼지저감정책의 대상은 대체로 큰 먼지부터 시작하여 점차로 더 미세한 먼지로 옮겨가는 경향을 보이고 있다. 그러나 먼지는 자연과 인간의 활동에서 것처럼 환경정책의 대상으로서만 존재하는 것이 아니다.

BC 5세기경 그리이스 철학자인 데모크리토스와 아리스토텔레스는 물질의 본질을 서로 다른 관점에서 바라본다. 데모크리토스는 물질이란 더 이상 쪼갤 수 없는 원자로 되어 있고, 이 원자들은 영원하고 눈에 보이지 않는다고 했다. 원자란 양적으로만 다를 뿐이고 질적인 차이는 없으며, 우리가 느끼는 차이란 다름 아닌 원자의 윤곽이나 결합 상태의 차이에 불과하다. 그리하여 데모크리토스는 우주의 기원조차도 원자들의 우연한 회전운동으로 말미암아 비슷한 원자들이 서로

결합함으로써 생겨났다고 주장했다. 이에 비하여 아리스토텔레스는 모든 물체는 계속 쪼갤 경우 아무 것도 남지 않은 '무' 또는 '질료'로 변한다고 하였다. 이 질료들은 데모크리토스와는 반대로 그 자체로 무의미하게 존재하는 것이 아니라 어떤 목적이나 계획에 따라 움직이는 것이라고 주장했다. 꽃은 열매를 맺기 위함이고 벽돌은 건축을 한다는 목적 밑에 이루어지듯이 사물의 본질적 존재원인은 그 안에 목적을 내포한다고 보았다. 그러므로 자연은 모두가 그 목적을 갖고 있으며 질료에서 형상으로 변화하는 과정도 이 목적의식에 따른 것으로 그는 보았다.

우리는 미세먼지를 데모크리토스의 원자관처럼 공중에 의미없이 떠다니는 물질로 보기 쉽고, 대기정책에 등장하는 미세먼지도 그 질을 따지지 아니하고 그 양에 따라 구분하는 것을 보아도 먼지에 관한 한 데모크리토스적인 '단순질량'관에 기초하고 있다. 그러나 우리가 쉽게 뭉뚱그려 먼지로 부르지만은 보다 질적으로 파악하여 보면 먼지는 목적없이 배회하는 공중쓰레기 같은 존재인 것만은 아니다. 우리는 먼지문제에 대하여 데모크리토스적인 관점보다는 아리스토텔레스적인 관점을 가질 필요가 있다. 다시 말하면 원인이 없이

1)The Particulate Matter and Ecology

2)SHIN, Dong-Won, Metropolitan Air Quality Management Office, Ministry of Environment, Gojandong, Danwongu, Gyeonggi-do 425-705, Korea; E-mail: dongwonhin@paran.com

발생한 미세먼지는 존재하지 아니하며, 따라서 먼지로 단순히 부르지는 그 종류는 세상에 있는 물체의 종류만큼 다양하다. 커피로부터 커피먼지가 나오고, 민들레로부터 민들레먼지가 생긴다. 그리고 그 먼지군들은 한자리에 머무르지 아니하고 생태계의 변화와 흐름속에서 어떠한 역할을 하고 우리의 생활과 자연에 어떠한 영향을 미치고 있는 것이다.

도시의 미세먼지

최소의 인구가 밀집되어 있는 대도시는 인구 증가와 함께 자동차의 증가 등으로 인하여 도시형 미세먼지를 발생시킨다. 당초 대기 오염을 일으키는 원인물질을 손꼽자면 아황산가스를 가장 먼저 들 수 있겠으나 저황유 공급확대 등 각종 저유황 정책으로 인하여 급격하게 감소하고 있는 추세이다. 그러나 오염 원인이 사실상 모든 물체라고 할 수 있는 미세먼지는 자동차의 급속한 증가 및 산업활동 등으로 그 저감방안 마련이 쉽지 않다.

이 미세먼지는 사람의 호흡기로 흡입되어 생체에 영향을 초래한다. 이들 미세먼지에는 발암물질이 공기 중보다 수백 배 이상 농축된 상태로 존재하기 때문에 같은 오염 상태에서 미세 먼지가 많을수록 인체에 주는 피해는 증가하게 된다. 최근에는 입경이 2.5 μm 이하인 PM-2.5가 폐포 깊숙이 침투하여 생체에 영향을 줄 수 있는 가능성이 높은 물질로 인정되고 있어 관심이 증대되고 있다. 크기가 미세한 먼지일수록 그 위험도가 커지게 됨에 따라 도시 인구 집중 현

상을 저지하고 대체연료 및 장치 개발, 도시 내의 녹지 공간 확보 등의 대책이 있다.

해외의 미세먼지기준

미세먼지에 대한 환경기준을 국가별로 비교해 보자. 표 1를 통해 각국의 PM-10 기준을 비교할 시 우리나라의 PM-10 기준이 가장 높게 측정되어 운영되고 있음을 알 수 있다. 미국, EU 등의 선진국에서는 크기가 작은 미세먼지 일수록 위험성이 커짐에 따라 PM-2.5에 대한 기준을 마련하여 운영하고 있다. 미국의 경우에는 2006년 PM-10의 장기기준(연평균 50 μg/m³)을 삭제하고 PM-2.5의 기준(연평균 15 μg/m³, 24시간평균 35 μg/m³)을 강화하였다. 또한 유럽은 PM-2.5 기준을 연평균 20 μg/m³로 정하였고, 유럽인이 대기 중의 PM-2.5로 인하여 평균수명이 단축되고 있으며, 2020년의 대기오염에 의한 보건 분야 비용만 1,890~6,090억 유로에 달하는 것으로 추정하고 있다.

외국의 경우에는 사망률과 미세먼지와의 상관성에 대한 장기적인 연구 투자로 상관되는 정도의 크기가 수치적으로 제시되어 있는 반면, 아직 우리나라에는 폐암 사망률 급증이 미세먼지와 상관성에 대한 기능성은 부인할 수는 없지만 상관성의 크기는 아직 밝혀지지 않은 상태이다.

국내의 미세먼지 현황

현재 우리나라는 미세먼지(PM-10)에 대하

표 1. 국가별 PM-10 환경기준(환경부)

| 항목 | 기준 | 한국 | 미국 | 영국 | 일본 | EU | WHO |
|-------------------------------|------|-----|----|----|-----|----|-----|
| PM-10 (μg/m ³) | 연평균 | 50 | 20 | 40 | | 20 | 20 |
| | 24시간 | 100 | 20 | 50 | 100 | 50 | 50 |
| | 1시간 | | | | 200 | | |

표 2. 전국 주요 도시별 연평균 미세먼지 오염도 (경기도대기오염정보센터, 단위: mg/m³)

| 시·도/연도 | '97 | '98 | '99 | '00 | '01 | '02 | '03 | '04 | '05 | '06 | '07 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 서울 | 68 | 59 | 66 | 65 | 71 | 76 | 69 | 61 | 58 | 60 | 61 |
| 인천 | 70 | 70 | 53 | 53 | 52 | 57 | 61 | 62 | 62 | 67 | 65 |
| 경기 | 74 | 59 | 58 | 55 | 68 | 72 | 67 | 66 | 66 | 68 | 67 |
| 광주 | 49 | 49 | 56 | 58 | 57 | 52 | 35 | 46 | 49 | 55 | 53 |
| 대전 | 69 | 69 | 55 | 51 | 48 | 53 | 43 | 49 | 48 | 49 | 49 |
| 부산 | 68 | 67 | 65 | 62 | 60 | 69 | 54 | 60 | 59 | 59 | 57 |
| 대구 | 72 | 72 | 66 | 63 | 67 | 71 | 59 | 58 | 56 | 54 | 51 |
| 울산 | 43 | 43 | 29 | 52 | 55 | 54 | 39 | 50 | 50 | 52 | 53 |

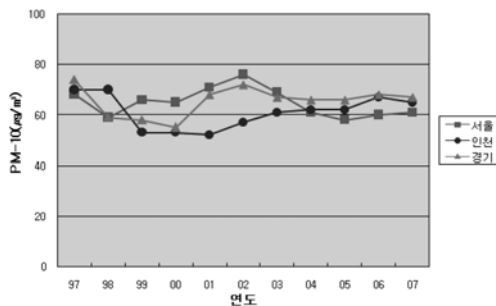


그림 1. 수도권 미세먼지(PM-10) 연도별 오염도 경향

여 연평균 50 µg/m³, 24시간평균 100 µg/m³로 기준을 정하여 운영하고 있다. 표 2와 그림 1을 토대로 연도별 주요 도시의 PM-10에 대한 오염도 경향을 살펴보면 현재 우리나라 연평균 기준인 50 µg/m³을 중심으로 살펴보았을 때 대전과 광주에서 비교적 수치가 낮게 측정됨을 알 수 있는 반면 인구 밀도가 높은 수도권은 기준수치를 넘는 경우가 대부분이며 다른 지역에 비해 수치가 높

은 것을 확인할 수 있다.

또한, 우리나라의 미세먼지에 대한 오염도는 계절을 기준으로 여름, 가을철에는 낮은 농도를 보이지만 봄과 겨울철에는 높은 농도를 나타낸다. 여름에는 비에 의한 대기 중 오염물질의 세정효과와 높은 습도 때문인 것으로 추정할 수 있으며 반면 봄에는 중국에서 날아오는 황사로 인하여 대기 중 미세먼지의 농도가 높아지고 겨울철에는 지표면의 냉각효과로 인해 대기가 정체하는 빈도가 높고 여름과 가을에 비해 혼합고가 낮아 오염물질의 확산이 어려우며, 난방연료 사용에 따른 영향으로 추정할 수 있다. 또한 하루를 기준으로 보면 사람의 인적이 드문 밤~새벽 시간에는 낮은 농도를 나타내지만 인구 및 자동차의 이동이 많은 출근시간과 퇴근시간 대에는 배출되는 미세먼지들이 누적되어 미세먼지의 농도가 증가한다. 따라서 출근 및

표 3. PM-10과 PM-2.5의 성분 비교 (환경부, 단위: %)

| 항목 | 지역 | 유기탄소 | SO ₄ ²⁻ | 금속산화물 | NO ₃ ⁻ | 원소탄소 |
|--------|----|------|-------------------------------|-------|------------------------------|------|
| PM-10 | 서울 | 19.4 | 17.2 | 14.9 | 14.6 | 6.4 |
| | 인천 | 16.1 | 16.9 | 15.0 | 12.5 | 6.5 |
| | 평균 | 17.8 | 17.1 | 15.0 | 13.6 | 6.5 |
| PM-2.5 | 서울 | 23.6 | 20.9 | 8.1 | 13.6 | 9.5 |
| | 인천 | 21.3 | 21.3 | 9.3 | 11.2 | 11.2 |
| | 평균 | 22.5 | 21.1 | 8.7 | 12.4 | 10.4 |

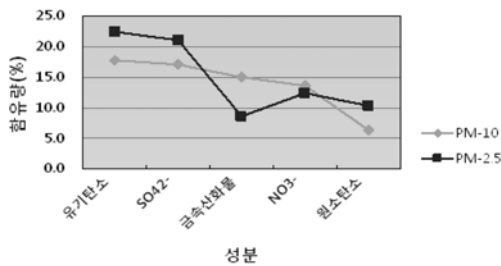


그림 2. 표-30에 따른 PM-10과 PM-2.5의 성분비교(환경부, 단위%)

최근시간대에 미세먼지에 노출될 확률이 높다고 할 수 있다.

PM-10과 PM-2.5의 함유되어 있는 성분을 비교해 보면 대부분의 성분에서 PM-10보다 PM-2.5에 높은 수치를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

미세먼지가 인체와 생태계에 미치는 영향

미세먼지의 발생원은 크게 자연적인 발생과 인위적인 발생으로 구분할 수 있다. 자연적인 발생원은 모래먼지, 화산재, 산불시 발생하는 먼지 등이며 인위적인 발생원은 연소과정과 도시구조물 등에 의해 발생되며, 화석연료 사용시 보일러나 자동차, 발전시설 등의 배출가스에 포함된 미세먼지와 공사장에서 발생하는 비산먼지 등이 있으며 직접 대기 중에 방출되기도 하고 가스상 방출된 기체의 상변화에 따라 대기 중에서 입자로 생성되기도 한다.

비교적 큰 크기의 먼지는 일반적으로 폐까지 도달하기 전 우리 몸 안에서 스스로 방어기전(기침이나 가래 등)에 의해 제거되지만 인위적 발생원에서 비롯된 미세먼지는 폐포까지 침투하여 각종 면역질환 및 암발생까지도 유발한다. 이 중에서도 PM-2.5가 PM-10보다 생태에 미치는 영향이 크다는 것을 예측할 수 있다. PM-2.5를 이용한 최근의 연구결과(Schwartz 등의 연구논문)를 보면 먼

지 중에서 PM-2.5는 조기사망과 밀접한 상관관계를 보이는 반면 직경이 2.5~10 μm 사이인 먼지는 사망건수 증가와 유의한 상관성을 보이지 않는다고 제시한다.

폐포는 공기 중 산소와 몸 속 이산화탄소가 교환되는 장소이다. 미세먼지가 폐 깊숙이 침투하여 폐포에 달라붙어 염증을 일으키면 폐기능이 저하되어 천식, 호흡곤란 등 각종 호흡기 질환의 직접적인 원인이 되고 몸의 면역 기능을 떨어뜨린다. 또한 폐포는 모세혈관에 싸여 있는데 미세먼지에 달라붙어 있는 독성물질이 모세혈관을 따라 들어가게 되면 우리 몸은 독성물질에 반응하여 백혈구 등 면역반응 물질을 내놓기 때문에 혈액의 점도가 증가하여 심장에 부담을 주게 되고 심혈관 질환자 및 고혈압, 관상동맥 등 질환자에게 치명적일 수 있게 된다. 또한 최근 문제가 되고 있는 아토피 피부염 환자에게도 악영향을 미친다.

미세먼지가 생태계에 미치는 영향은 인체에 미치는 영향보다 훨씬 광범위하고 복잡하다. 성장에 필요한 영양분을 스스로 합성하는 식물에 있어서 가장 중요한 과정은 광합성이다. 이러한 광합성은 식물의 잎 부분에서 이루어진다. 식물의 잎 표면에는 유기물 합성에 필요한 공기 중의 탄산가스를 들여오고 산소를 내보낼 수 있는 기공이 있으며 물과 양분을 이동하는 관다발이 잎맥으로 드러나 있다. 이러한 잎 표면에 먼지가 쌓이게 되면 호흡작용, 증산작용이 일어나는 기공의 막힘 현상이 발생할 뿐만 아니라 광합성 과정에 필수적인 빛이 차단됨으로써 필요한 영양분 합성을 방해하여 식물 성장이 원활하게 이루어질 수 없게 된다. 또한 식물의 잎에 서식하는 포식자들을 제거함으로써 병충해에 대한 저항력을 약화시켜 곡식 및 과일류의 수확량의 감소를 가져온다.

그러나 식물의 호흡작용과 증산작용을 통

하여 미세먼지를 흡수함으로써 미세먼지를 줄이고 온도를 낮추어 공기를 상쾌하게 하는 효과도 있다. 식물은 뿌리를 통해 공기중의 아세트알데히드, VOC 등의 오염물질을 빨아들여 영양분으로 사용한다. 그리고 식물의 앞 뒷쪽에 있는 미세한 섬모들에 미세먼지나 오염물질이 많이 걸릴 뿐만 아니라, 식물이 기공을 통해서 숨을 쉴 때 기공 속으로 미세먼지와 오염물질이 흡수 되는데 이런 과정을 통해 실내공기가 정화될 수 있는 것이다. 아울러 바다나 호수, 그리고 해양에 떨어지는 미세먼지도 수생생물의 영양분이 될 수 있다.

먼지와 자연의 교호작용

미세먼지는 데모크리토스가 말한 더 이상 분할 할 수 없는 동질의 부유물질이 아니다. 미세먼지는 단일한 화학식이 아니라 C, O, K, Ca, Si, Al, Mg, Na, Fe, S, Cl 등의 원소와 복합화합물인 SiO_2 , CaCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, NaCl , $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 등 수많은 원소와 화합물로 구성되어 대기 중에 있는 것이다. 그러기 때문에 인간의 활동과 미세먼지와 생태계는 끊임없는 화학적 반응을 통하여 서로 교호작용을 하며 생태계를 유지시켜 가고 있는 것이다. 이 구조속에서 인간은 한편으로는 하루 3~4 kg의 음식보다 훨씬 많은 20~50 kg의 공기를 마시며, 한편으로는 이 대기권에 연소활동, 산업활동, 주거생활을 하며 대기권에 수많은 미세먼지를 내보내며, 자연계는 그 생산활동을 통하여 공기중의 미세먼지를 정화시키고 있다. 예를 들어 새집 증후군의 주요 원인물질로 알려져 있는 포름알데히드의 경우를 보면 기공을 통해 흡수되어 포름산으로 전환되고, 포름산은 다시 이산화탄소로 전환되어 광합성 과정인 캘빈 사이클을 통해 당, 유기산, 아미산 등으로 전

환됨으로 무독화 된다. 결국 흡수된 포름알데히드의(HCHO)의 탄소(C)는 이산화탄소(CO_2)처럼 대사산물로 이용됨으로써 제거되는 것이다.

문제는 인간활동과 인간이 배출하는 오염원과 자연생태계는 지속가능한 생태계라는 공존의 기본틀을 지켜 나가야 하며, 그 틀 안에서 사람들은 안전하고 상쾌한 공기를 마시며 생활할 수 있어야 한다. 그러기 위하여 사회는 최소한 대기 오염도가 기준수치를 초과하지 않도록 지속적으로 새로운 정책을 만들고 기술을 개발해 나가야 하고 대기오염원의 특성상 영향을 주는 그 외 지역과 함께 모든 지역에서 광역적 관리가 필요하다. 일례로 현재 많은 선진국에서 안전한 대기관리를 위해 미세먼지 분야의 저감을 위해 PM-2.5 기준 마련과 강화 등의 운영을 하고 있는데 비해 현재 우리나라는 PM-10을 기준으로 대기관리가 이루어지고 있는 점, 또 PM-10의 경우조차도 서울의 경우 주요 선진국과 비교시 2~3배 높은 수치를 보이고 있는 점, 이로 인하여 호흡기 질환, 기관지염 증가 등 수도권지역에서만 연간 수조원의 사회적 비용이 소요되는 점 등을 고려할 때 보다 더 강화된 관리방안이 마련되어야 할 것이다.

아울러 대기중 미세먼지는 앞서 언급하였듯이 자연생태계와는 끊임없는 생태적 교호작용을 하고 있는 점을 감안하여 공학적인 대기오염방지기술, 도시계획차원의 오염원 종합관리와 함께 생태학적 대기오염 저감방안을 더욱 발전시켜 나가야 할 것이다. 이런 점에서 도시생태축의 건설, 도시호수공원설치, 도시꽃길조성, 나아가 옥상녹화(Green Roof) 등의 방법은 도시미관을 개선할 뿐만 아니라 대기오염물질을 저감할 뿐만 아니라, 도시인의 삶의 공간에 산소와 수분을 제공하고, 나아가 기후온난화물질인 이산화탄소

도 제가하는 것이다. 이런 점에서 맑은공기 정책을 추진하는 데 있어 지금까지의 전통적인 대기오염방지대책과 함께 생태적 대책을 병행하는 것이 매우 불가피한 일이라 아니할 수 없다. 그것이 서로 다른 subsystem들이 「행복하고 지속가능한 인간생태계 human ecology의 실현」이라는 목적을 이루기 위해 공동으로 협력하는 아리스토텔레스적 목적론에 부합한 행동일 것이다.

참고문헌

경기도대기오염정보센터, 2008. 대기오염평가보고서.

김용표, 2006. 서울의 미세먼지에 의한 대기오염.
환경부, 2001. 미세먼지 영향 및 저감방안 전문가 토론회 자료.

김신도, 2004. 우리나라 미세먼지 현황 및 문제점
김영철, 유럽연합 대기오염의 주제와 전략.

이종철, 이정주, 환경대기 중 기상인자와 미세먼지(PM-2.5)의 상관관계.

김예신, 미세먼지로 인한 대기오염의 심각성
국가환경정보센터, 미세먼지.