제1장 환경문제의 등장

1.1 환경의 개념

환경(Environment)이란 용어는 매우 포괄적인 뜻을 지니고 있다. 일반적으로 환경은 생물체가 생명을 유지하는 동안 영향을 미치는 모든 요인을 총칭한다. 따라서 넓게 생각하면 우주 만물을 형성하고 있는 모든 요소이며, 좁게 생각하면 우리가 살고 있는 생활 주변이 환경이다.

환경에 대한 구성체계나 정의는 각 나라마다 또는 학자에 따라 약간씩 차이가 있다. 우리나라의 환경정책 기본법 제3조에서는 환경을 자연환경과 생활환경으로 구분하고 있다. 자연환경은 생물환경(지하, 지표, 해양 및 지상의 모든 생물)과 무생물환경(이들을 둘러싸고 있는 비 생물적인 것)을 포함한 자연을 총칭하며, 생활환경은 대기, 물, 폐기물, 소음, 진동, 악취 등 우리의 일상생활과 관련되는 환경을 의미하는 것으로 규정하고 있다.

유엔환경계획기구(United Nations Environment Program, UNEP)에서는 환경구성요소들을 다음의 표 1.1과 같이 자연환경과 인간환경으로 구분하고 있다.

표 1.1 유엔환경계획기구의 환경구성요소

환경	자연환경 (Natural Environment)	대기(Atmosphere) 대양(Oceans) 물(Water) 암석권(Lithosphere) 육상생태계(Terestrial biota)
	인간환경 (Man and the Environment)	인구(Population) 주거(Human settlement) 건강(Human health) 생물계(Bioproductive system) 산업(Industry) 에너지(Energy) 운송(Transport) 관광(Tourism) 환경교육 및 홍보(Environmental education and public awareness) 평화와 안전(Peace, security and the environment)

1.2 환경문제의 발생요인

(1) 인구의 증가

전 지구적 환경위기는 18세기 산업혁명 이래 인간이 대규모로 지구의 자연자원을 이용하면서 시작되었다. 인간이 물질적으로 풍요하고 편안하게 살기 위해 에너지와 물질을 대규모로 소비하면서 이들의 자연적 흐름이 파괴되어 우리가 살고 있는 지구는 물, 공기, 토양 모두에 소위 오염물질이라는 독성물질이 배출되어 인간이 마시고, 숨쉬고, 식량을 생산하기에 편안하지 않는 환경이 조성되고 있는 것이다. 이러한 환경오염문제는 20세기 중반 산업화를 먼저 주도한 영국, 미국, 독일 등 선진국에서부터 발생되기 시작하여 현재는 세계 곳곳에서 환경오염문제로 인한 사고가 빈번히 발생하고 있다.

유엔에서는 지난 1987년 7월 11일에 세계인구가 50억 명을 돌파한 것을 계기로 매년 7월 11일을 "세계인구의 날(World Population Day)"로 선포하였다. 세계인구는 오는 2000년에는 62억, 그리고 2050년에는 100억에 이를 것으로 전망된다. 따라서 우리는 단위지역에 인구가 너무 많아서 가용자원으로는 유지될 수 없을 정도의 인구밀집 지역에 살고 있는 셈이다. 전 인류의 4분의 1은 풍요로운 생활을 영위하고 있으나, 나머지 4분의 3은 부적당한 음용수와 깨끗하지 못한 환경에서 살고 있다. 또한 세계 인구의 3분의 1이 영양실조와 기아에 시달리고 있으며 전쟁의 위협 속에서 지내고 있다. 현대사회를 인구(population), 빈곤(poverty), 오염(pollution)의 3P 시대로 부르기도 한다.

(2) 경제성장과 자원소비

현대사회는 고도의 산업사회이다. 경제가 성장되어 한 사람이 소비하는 자원의 양이 늘어나면서 사용 후 버리는 쓰레기의 양이 엄청나게 증가하였다. 인간이 사용하는 제품의 생산에 필요한 자원은 무한하며 모두 재생가능한 것은 아니다. 우리에게 에너지를 제공하는 석탄, 석유, 천연가스 등은 최소 수백만 년에서 수억 년 전에 만들어진 것이다. 지질작용에 의해 이들 자원이 새로 만들어지려면 최소한 앞으로 수백만 년 이상이 걸릴 것이므로 이들은 재생불가능 자원이다.

석탄은 상업용 에너지의 30%를 차지하는데 연소시 이산화탄소 및 황과 분진을 가장 많이 배출하기 때문에 지구온난화 및 산성비 등의 환경문제에 가장 많이 영향을 미치고 있는 에너지원이다. 석유 자원은 세계 상업용 에너지의 40%를 공급해 주고 있다. 석유는 자동차, 난방 그리고 화학비료, 플라스틱, 스티로폼 등의 석유화학 제품 제조에 사용된다. 천연가스는 20%를 차지하고 있다. 이들 화석연료는 전 인류가 지금과 같은 추세로 사용한다고 가정할 때, 석탄이 200~230년, 석유가 20~30년, 천연가스는 40년 정도 사용하면 고갈될 것이다.

화석에너지는 핵발전(원자로의 안전성 및 방사성 폐기물의 처리에 아직 문제가 있지만)이라든가 태양열의 이용 등으로 대체할 수 있는 가능성이 있지만, 기타 지하에 매장되어 있는

광물자원은 재생불가능하며 한계가 있다. 개도국들은 불어나는 인구와 가난을 탈피하기 위하여 경제성장을 맹렬히 추구하고 있으며, 선진국들 역시 그들의 높은 생활 수준을 유지, 또는 더욱 향상시키기 위하여 한치의 양보도 없이 경제성장을 추구하고 있다. 이러한 과정에서 자원고갈 및 자원의 소비로 인한 환경오염은 더욱 더 가중되고 있다.
자원의 소비량이 커지면 폐기물 발생량도 증가한다. 폐기물이란 우리가 흔히 사용하는 말로 쓰레기이다. 쓰레기의 총량은 인구증가에 비례하여 커진다. 생활에 편리성으로 인하여 전 세계적으로 1회용품의 사용량이 크게 늘어났다. 이러한 1회용품은 재생이 어렵고, 1회용품에 사용한 합성수지는 매립하여도 자연분해가 되는데 수백 년이 걸리며, 소각 처리시에는 유독가스가 발생하며, 매립시에도 환경오염을 유발한다.
산업혁명 이전의 환경문제는 주로 나무의 사용에 의한 숲의 파괴였으나 이는 국지적이고 비가역적인 것이었다. 즉 자연적 복구가 가능하였다. 예를 들어 지구의 어느 한 지역에서 숲이 크게 파괴되었다 해도 그 밖에 지역에선 여전히 울창한 숲이 존재했으며 이는 지구 인구가 적었기 때문에 인간이 모여 사는 지역 외에는 큰 영향을 미치지 못하였기 때문이다. 그러나 산업혁명 이후 현대의 고도성장 시대의 환경문제는 대부분 규모가 크며 비가역적 특징을 가지고 있기 때문에 지구의 자정작용에 의한 자연적 복구가 불가능하다.

(3) 과학기술의 발전

제2차 세계대전 이후 급속도로 발전한 과학기술은 산업현장에 접목되어 대량생산과 대량소비체제를 가능하게 해주었다. 그 결과 빠른 속도의 자원고갈 및 대량소비로 인한 폐기물 발생량을 유발시켰다. 의학 분야의 발전은 의료기술과 치료약의 개발로 유아사망률의 감소와 평균수명을 크게 연장시킴으로써 인구증가의 원인을 제공하였다. 또한 현대과학으로 합성된 새로운 물질은 약품, 농약, 비료, 건축자재, 페인트, 플라스틱, 기타 여러 가지 생활용품 등 다양하며 그 양이 엄청나다. 이들 제품은 생산과정에서 오염물질이 발생할 수 있으며 사용 후 쉽게 분해되지 않는 것이 많다. 합성플라스틱이나 DDT 같은 물질들은 분해가 어려워 자연계에서 오래 머무르며 환경에 축적되어 생태계를 파괴시키거나 인간에게 해를 입히기도 한다. 과학과 기술 그 자체는 원래 중립적이다. 그러나 아이러니컬하게도 과학과 기술은 사용 목적에 따라 환경문제를 일으키는 원인도 되고 환경문제를 해결하는 수단도 된다. 21세기는 과학기술에 의해 환경문제가 극복되기를 기대해 본다.

(4) 환경친화적 가치관의 부재

인간은 누구나 편리와 신속, 물질적으로 풍요로운 삶을 원한다. 우리는 가난에 찌들린 삶보다는 돈을 많이 벌어 대형 텔레비전, 대형냉장고, 대형 아파트, 엔진 배기량이 큰 고급 승용차, 그리고 휴가철이나 주말에 편히 취할 수 있는 고급 별장 등을 모두 갖추고 여유있게 생활하는 사람을 보면 인생에 성공했다고 생각하며 부러워했다. 또한 세계의 각국의 정부는 경제발전을 통하여 그 나라 국민들이 잘 살도록 하기 위하여 모든 노력을 경주하고 있다. 만일 경제성장률이 떨어지면 당장 그 정권은 인기가 떨어진다. 즉, 환경을 도외시한 대량생

산과 대량소비에 의한 성장위주의 가치관이 우리의 의식구조에 각인돼 있었다. 20세기 중엽에 들어서야 비로소 환경을 도외시한 물질문명과 인간의 편리성 만을 추구한 결과가 인간에게 커다란 위험이 될 수 있다는 사실을 깊게 인식하게 되었다. 환경론자들은 성장위주의 가치관과 이에 따른 대량소비의 생활방식이 지구의 환경문제를 일으키는 가장 핵심적인 요인이었다고 주장한다.

1973년 슈마허(E. Schmacher)는 그의 명저 「작은 것이 아름답다」에서 성장위주의 경제발전이 인류에게 평화를 가져오지 않을 것이라고 주장한 바 있다. 유구한 인류역사 속에서 인간이 계속 살아온 우리 지구는 선조들로부터 물려받은 것이 아니라 우리의 미래세대인 후손에게 빌려서 사용하고 있는 것이다. 자기 자식이 부모가 만들어 놓은 환경오염 때문에 죽을 지경이 된다면 이를 바라는 부모는 아마도 없을 것이다.

1992년 6월 브라질의 리우데자이네로에서는 세계 150여 개국의 대표가 모여 환경적으로 건전하고 지속가능한 개발(Environmentally Sound Sustainable Development, ESSD)을 달성하기 위한 리우선언과 21세기 환경보전 실천강령인 '의제 21(Agenda 21)'을 채택하였다. 여기서 지속가능한 개발이란 무엇을 의미할까? 환경을 희생하면서 까지 경제성장을 계속 추구하는 사회는 지속가능하지 않다. 곡물을 생산하는 토양의 지력이 떨어지는 사회는 지속가능하지 않다. 조림하는 속도보다 삼림을 더 빨리 파괴(벌목)하는 사회는 지속가능하지 않다. 하나뿐인 지구를 지속가능한 인류사회로 만들기 위해서는 첫째, 자원고갈이 예상되는 21세기 중반에는 석탄, 석유 천연가스 등의 화석연료 대신 이산화탄소를 방출하지 않는 청정 대체에너지가 개발 보급되어야 한다. 둘째, 인구는 지구가 지속적이고 편안하게 부양할 수 있는 규모(80억명 이하)에서 안정되어야 한다. 셋째, 국가 간의 소득 격차가 줄어들어 모든 나라가 잘 살 수 있도록 복지의 균등화가 이루어져야 한다. 넷째, 환경오염을 극복하고 에너지를 효율적으로 사용하는 환경친화적 과학기술이 개발되어야 한다.

1.3 환경오염의 특징

인류의 생존을 위협하고 있는 환경오염 문제는 광역성, 장기성, 탄력성과 비가역성, 상호관련성의 특징을 지니며, 환경오염의 피해인이 대부분 불특정다수라는 특징이 있다.

(1) 광역성

오염물질이 수계에 유입되면 물의 흐름 및 순환에 따라, 대기에 유입되면 기류를 타고 공기중에 퍼지게 된다. 오염물질은 물과 대기를 통하여 오염원 발생지역으로부터 수백 또는 수천 km 이상 떨어진 곳까지 이동이 가능하다. 중국에서 발생한 황사현상은 기류를 타고 우리나라에까지 영향을 미치며, 미국 서부공업단지에서 배출되는 대기오염물질의 이동으로 인해 캐나다의 산림이 파괴되고 호수가 산성화되기도 하였다. 수질오염도 일단 배출되면 넓은 지역으로 확산된다. 과거에 사용했던 대표적 농약인 DDT는 토양에 일단 잔류하였다가 빗물

에 씻겨 하천과 강을 타고 바다로 내려가 해류를 통하여 섞이므로 바다 전체를 오염시키게 된다. 그 결과 북극해에서 물고기를 잡아먹고 사는 물개와 농사를 전혀 짓지 않는 에스키모인의 몸에서도 DDT 성분이 검출되었다. 노르웨이에 침전된 황은 대부분 이웃 공업국가들에서 배출된 대기오염물질이 유입되어 발생한 것으로 조사된 바 있다. 이런 점에서 환경문제는 좁게는 어느 지역의 문제로 넓게는 인접국가간의 환경문제로 영향을 미치고 있다. 나아가 이산화탄소 배출에 의한 지구온난화 현상과 프레온 가스의 배출에 의한 오존층의 파괴는 지구촌 전체에 영향을 미치고 있어 모든 나라가 동참하여 노력을 하지 않으면 치유가 불가능하다.

(2) 장기성

환경오염물질은 대기나 수계 또는 토양에 유입되면 비록 희석이 되어 인체에 해롭지 않은 수준의 농도라도 시간이 지나면서 장기간 축적되면 나중에 인체에 해롭게 된다. 또한 오염물질의 생물농축 현상으로 먹이사슬 단계에 따라 고농도로 축적되어 해를 끼치기도 한다. 따라서 오염물질이 배출되어 원인행위가 일어난 시점에서 몇 십년 후에 그 피해가 나타나는 경우가 많다. 이 경우 환경오염의 회복에도 아주 긴 시간이 필요하다.

일본에서 발생한 공해병으로 카드뮴 중독에 의해 발생한 이따이이따이병(Itai Itai Disease)이 있다. 이 경우 카드뮴 방출의 원인이 되는 제련공장은 1920년에 세워졌는데 카드뮴 중독에 의한 골연화증 환자는 1955년에 발생하였다.

미나마따병(Minamata Disease)의 경우는 1956년 미나마타만 주위의 몇몇 마을에서 처음 발견되었다. 원인을 알 수 없는 신경증상으로 고통받고 있다는 첫 환자 발생보고 이후, 미나마타병이 메틸수은 화합물에 의한 중추신경계 중독병이며, 이것은 미나마타시에 있는 치소(Chisso)주식회사에서 버려진 산업폐수에서 배출된 수은이 미나마타만을 오염시키고 먹이사슬을 통하여 물고기나 다른 해양생물에 축적되므로 인하여 오염된 많은 양의 수산물을 주민들이 섭취하여 발병한 것이라고 1968년 일본정부는 공식견해를 발표하였다. 질병의 원인을 알 수 없어 원인 규명을 하는데도 12년이나 걸렸다.

산업혁명의 진원지인 영국의 경우 템즈강은 이미 1850경에 산업폐수에 오염되어 물고기가 살지않는 죽은 강이 되었다. 영국정부는 이 강을 살리기 위해 폐수방류를 규제하고 동시에 400여 개의 하수처리장을 만들는 등 대대적인 템즈강 살리기 노력을 하였는데, 템즈강이 회복되어 물고기가 다시 나타난 것은 그로부터 125년이 지난 1975년의 일이었다. 이처럼 환경오염은 한번 발생하여 문제를 일으키면 회복되는 기간도 길다.

원자력 발전의 부산물로 나오는 플루토늄은 반감기가 2만 4천년이나 된다. 따라서 환경에 일단 방출되면 우리의 후손 대대로 물려가며 피해를 입게된다. 제2차 세계대전 당시 일본의 항복을 받아내기 위해 일본영토에 투하한 원자폭탄으로 인해 발생한 방사능 오염 때문에 현재까지도 병을 앓고 있는 환자들, 1986년 4월 구 소련의 체르노빌 원자력발전소의 방사성 물질 유출사고에 의한 피해가 이를 증명해 준다. 환경오염의 장기성을 가장 극명하게 보여주는 예가 바로 방사성 폐기물에 의한 오염이다.

(3) 탄력성과 비가역성

자연은 오염을 치유하고 원상복구 할 수 있는 능력을 가지고 있다. 대기나 물 그리고 토양에 오염물질이 유입되더라도 시간이 지나면 서서히 정화되어 버린다. 대기에 유입된 오염물질은 희석되어 장차 비나 눈에 의하여 토양 및 수계로 흘러 들어오며, 토양 및 수권에서는 희석된 오염물질이 분해자인 환경미생물들의 작용에 의해 서서히 분해되어 사라진다. 이와 같이 자연은 스스로 오염물질을 정화시키는 자정능력을 가지고 있다. 그러나 유입되는 오염물질의 양이 많아져서 자정능력 범위를 벗어나면 오염물질은 정화되지 못하고 축적되게 된다. 자연이 오염을 일으키지 않고 받아들일 수 있는 오염물질의 최대허용량을 환경용량이라고 부른다. 즉, 환경오염은 달리 말하면 오염물질의 과부하 또는 자정능력의 용량초과 현상에 의해 발생한다고 볼 수 있다.

용수철은 어느 정도의 힘으로 잡아당길 때는 놓으면 다시 원상태로 복원되지만 그 이상 무리한 힘으로 잡아당기면 늘어나서 복원되지 않는다. 지구의 자정능력은 일종의 용수철과도 같다. 환경용량 초과 이전까지는 자정작용에 의해 쉽게 원상태로 회복된다. 그러나 환경용량을 초과하여 많은 오염물질이 유입되면 과부하가 걸려 충분한 자정작용이 불가능해진다. 이와 같이 생태계의 부 기능이 강화되고 정 기능이 약화되어 환경악화가 가속화되는 현상을 환경의 탄력성과 비가역성이라 한다.

예를 들어, 하천이나 호수에 유기물 또는 질소와 인 등의 영양염류가 적당히 존재하면 희석, 침전, 미생물에 의한 분해에 의해 자연적으로 정화되지만, 과잉 공급되면 식물성 플랑크톤이나 조류의 이상번식(부영양화 현상)을 초래하여 수질을 악화시키고 이들의 사멸에 의한 부패는 호수 속의 용존산소를 대량으로 소모하여 결국 어패류의 집단폐사로 이어지는 현상을 초래한다.

(4) 상호관련성

환경문제는 인구증가로 인한 식량증산, 대량생산과 대량소비, 환경 비친화적인 성장위주의 가치관 등과 과학기술의 발달이 서로 상호관련되어서 상승작용을 일으킴으로써 환경오염을 증폭시키고 있다. 인구의 증가는 식량 생산량을 늘리도록 요구하였으며, 공업화에 의한 대량생산과 소비는 자원의 고갈 및 환경오염을 유발하고, 과학기술의 발전은 인구증가를 유발시키고, 식량증산을 위한 비료와 농약을 대량 사용하게 만들었고, 인간의 이기심은 환경오염을 유발하는 가장 근원적인 원인이 되었다.

(5) 불특정 다수의 피해

1991년 낙동강 하류지역에 일시적으로 페놀의 농도가 증가하는 사건이 발생하였다. 이로 인해, 인근 대구시의 수돗물은 염소 소독에 의한 2차오염물인 염화페놀로 인하여 심한 악취가 발생하는 사건이 일어났다. 페놀이 소독제인 염소와 반응하여 염화페놀을 형성하면 악취가 백배 이상 증가한다. 이 경우는 오염의 원인행위자(가해자)가 구미공단에 위치한 한 전

자회사로 전자회로기판의 제조공정에 사용하는 페놀 30톤을 유출시켜 발생했음이 수사결과 밝혀졌지만, 피해자는 수돗물을 사용하는 선량한 불특정다수의 대구 시민이다.
충남 서산의 대산공단은 여러 회사의 공장이 들어서 있는데, 인근 어민이 양식장의 피해를 호소할 경우, 한 회사에서 책임을 인정하고 보상해 줄 것을 기대하기는 힘들다. 이 경우 원인행위자를 분명히 밝히기가 매우 힘든 경우이다. 결국, 법정 투쟁까지 벌이게 된다.
화석연료 사용으로 인한 대류권의 이산화탄소 농도 증가에 기인하는 지구 온난화 현상, 프레온가스의 방출에 의한 성층권 오존층 파괴, 산성비 문제 등은 가해자와 피해자가 모두 불특정다수의 지구인이다. 이산화탄소는 담배를 피울 때도, 자동차를 탈 때도, 주택의 냉.난방 시에도 발생한다. 전 지구인이 가해자이며 피해자인 셈이다. 이처럼 환경오염의 가해자와 피해자를 명확히 밝혀 처벌과 보상을 하기 어려울 때가 많다.
특히, 도시에서 대기오염에 의한 호흡기 질환자가 발생하거나, 상수원 보호구역에 공장폐수를 무단 방류하였을 경우 피해자는 모두 불특정다수의 국민이다. 각국은 자국의 수질 및 대기를 보호하기 위해 오염물질 배출허용 기준치를 정하여 공장 등 오염물질 배출업체들이 배출허용기준을 초과하면 조업중단, 벌금부과 등의 행.재정적 규제를 가하고 있다. 그러나 이처럼 가해자가 얼굴도 모르는 불특정 다수인에게 피해를 입히기 때문에 죄의식과 책임의식이 약하다.

(6) 형평성 시비의 문제

환경오염의 피해는 부유한 계층보다는 가난한 계층이, 선진국보다는 후진국이 더 많은 피해를 입게 된다. 상수원이 오염되어 수돗물 마시기가 불안하다면 부유한 계층의 사람들은 정수기를 이용하거나 생수를 배달해 먹을 것이다. 살고있는 지역의 대기오염이 심하여 실내공기가 탁해진다면 값비싼 공기정화기를 설치하거나, 그래도 마음이 불안하면 깨끗한 환경의 고급 주택가로 이사가면 그만이다. 그러나 가난한 계층은 경제적으로 형편이 좋지 못하기 때문에 이러지도 저러지도 못하고 불안한 마음으로 산다. 대기 및 수질환경이 매우 나쁜 공단주변에 사는 사람들도 깨끗하고 쾌적한 환경의 고급 주택가로 이사가고 싶지만 그곳에 머물러 사는 까닭은 집 값이 싸고 생활비가 적게 들기 때문일 것이다.
선진국에서는 공해산업의 경우 주민들 반대가 워낙 심해 공장을 유지할 수 없기 때문에 후진국으로 공장을 이전하여 필요한 제품을 생산한다. 후진국은 공장건설로 경제발전을 이루어 국민소득을 올릴 수 있다는 유혹으로 인해 공해산업이라도 유치하기를 희망하고 있다. 그 단적인 예로 1970년대 우리 나라도 선진국에서 공해산업을 유치했던 경험이 있다. 공단주변에 사는 주민들의 거듭된 피해 호소에도 불구하고 국가에서는 경제가 더 중요하다는 명분을 내세운다. 따라서 환경오염의 피해는 산업화 과정에서 이미 경험한 선진국보다 후진국에서 더 많이 나타나고 있다.
선진국은 세계 모든 나라가 환경문제 해결에 동참해 줄 것을 호소하고 있지만, 후진국이나 개도국은 지구온난화, 오존층 감소, 산성비, 삼림파괴 등의 지구환경문제가 대부분 선진국 때문에 일어난 것이라고 주장한다. 예를 들어 오존층 파괴의 주범으로 지목되어 국제적으로

생산 금지시키기로 한 프레온가스만 하여도 선진국은 대체물질을 개발해서 사용하고 있지만, 개도국이나 후진국은 아직 대체물질을 개발하지 못하고 있다. 지구환경 보호에 동참하려면 또다시 선진국으로부터 수입해서 사용해야 한다. 따라서 불만이 많다. 환경비용 분담의 형평성을 고려할 때 선진국이 더 많은 비용을 부담해야 한다는 것이 개도국 및 후진국의 입장이다.
깨끗한 수돗물을 공급하기 위하여 상수원 보호구역을 설정하고 오염행위를 법적으로 규제한다. 수돗물을 공급받는 주민들은 혜택을 받지만 상수원 보호구역내에 사는 주민들은 축사, 음식점, 공장 등을 지을 수 없기 때문에 그들의 생계에 지장을 받는다고 호소한다. 즉, 세금은 같이 내는데 그들만 불공평하게 규제를 받고 있다고 생각한다.
또한, 환경오염 배출업체 주변에 사는 주민들은 회사는 이익만 보고 주민들만 유독 피해를 입고 있다고 하소연한다. 이는 환경보전을 위한 비용 부담자와 수혜자가 달라서 생기는 형평성 시비이다. 지방자치 실시 이후, 이러한 형평성 시비의 문제는 환경행정의 가장 큰 골칫거리로 등장하고 있으며 가해자나 피해자나 모두 만족할 수 있도록 해결해 주기가 매우 어려운 실정이다.

제2장 생태계의 이해

2.1 생태계의 정의

생물과 그들이 살아가는 주변환경과의 관계는 분리해서 생각할 수 없을 만큼 아주 밀접하다. 생물체가 살고있는 곳을 그들의 서식처(habitat)라 한다. 모든 생물은 서식처에서 그들 나름의 생태적 지위(ecological niche)를 가지고 있다. 특정 서식지에 살고있는 같은 종류의 생물 집합체를 개체군(populations)이라 한다. 각각의 개체군들은 그들끼리 서로 상호관계를 유지하면서 생활하고 있다. 개체군은 안정적으로 유지되기도 하지만 개체수가 지수 함수적으로 폭발적 증가를 일으키기도 한다. 이 경우 자원고갈, 폐기물 누적, 포식(predation) 등을 초래하면 개체군 붕괴를 일으키게 된다. 같은 서식지에 살고있는 개체군들의 집합체는 군집이라 하며, 어느 한 군집 내에는 특정한 동.식물들이 함께 공존한다.
환경문제의 해결에 공헌하는 중요한 학문중의 하나가 생태학(ecology)인데, 생태학이라는 단어는 집을 의미하는 그리스어 ‘oikos'와 학문을 의미하는 ’logy'가 결합한 ‘주거의 학문’에서 유래되어 오늘날 ‘살아있는 생물과 주위 환경과의 상호관계를 연구하는 학문’으로 발전되었다.
생태계(ecosystem)는 군집 내에 존재하는 생물들이 그들 상호간 및 서식지 환경과의 상호관계를 통해 유지되는 하나의 시스템으로 볼 수 있다. 즉, 생물이 물과 공기 그리고 토양을

근거로 영양분을 섭취하고 물리.화학적 주변환경에 적응하며 살아가는 '생물군계'이다. 그러므로, 생물적 구성요소와 무생물적 구성요소를 가지고 있는 3차원 특정 공간은 하나의 생태계인 셈이다.
인간이 살고있는 지구에는 자연적으로 균형을 이루면서 유지되고 있는 수많은 생태계가 있다. 각각의 생태계는 서로 다른 크기, 생물상 그리고 물리.화학적 특징을 지닌다. 예를 들어, 사막, 초원, 강, 호수, 해양, 대륙붕 등은 서식환경의 차이로 인하여 각각의 독특한 생태계를 형성하고 있다.

2.2 생태계의 구성

한 생태계에 존재하는 생물들은 토양, 대기, 물, 무기 및 유기화합물(영양염류), 온도, 태양 등과 같은 주변의 물리.화학적 환경요소들과 상호작용을 한다. 모든 생물은 그들의 서식지에 형성된 물리.화학적 환경요인들에 적응해야만 한다. 그렇지 못한 생물들은 그 서식지에서 사라지고 만다. 이 환경요소 중 어느 하나라도 변화가 일어나면 생태계 전체가 영향을 받을 것이다. 예를 들어, 사막 생태계는 물이 많고 적음에 따라 그 주변에 서식하는 식물의 종류와 서식지 면적이 결정된다. 해양이나 육상환경 내에서는 질소나 인과 같은 영양염류의 공급정도에 따라 식물의 성장속도가 달라진다. 생물에게 필수적인 물질의 공급중단이나 환경요인의 변화는 결국 생태계의 변화 또는 붕괴를 초래할 수 있다. 이는 어떠한 환경요소도 한 생태계에 대한 제한요인으로 작용될 수 있음을 의미한다. 한 생태계 내에 존재하는 생물들을 그들의 기능적 측면에서 분류하면 생산자, 소비자(1차 소비자와 2차 소비자), 분해자로 나눌 수 있다.

(1) 생산자

생산자(producers)는 주변 서식환경의 무기화합물로부터 그들의 조직인 유기화합물을 광합성작용에 의해 만드는 생물이다. 즉, 스스로 식량을 만들 수 있는 생물이다. 식물(plant) 및 조류(algae)가 생산자에 속한다. 식물은 잎 속의 엽록체에서 빛에너지를 모아 대기중 이산화탄소 그리고 뿌리로 흡수된 토양의 무기영양염류와 물을 이용해 그들의 생체를 만든다. 이 생화학적 과정을 통해 식물은 산소분자, 열에너지 및 물(수증기 형태로)을 대기 중으로 배출하고 포도당과 다른 형태의 탄수화물을 형성하여 생체에 저장한다. 조류란 광합성을 하는 미생물의 다양한 종류를 말하는데 단세포 조류인 식물성플랑크톤, 다세포 조류인 해초 등이 있다. 조류는 광합성을 하는 색소에 따라 녹조류, 갈조류, 적조류 등으로 분류하기도 한다. 이들 독립영양생물은 물 속에 녹아있는 이산화탄소(HCO_3^- 등의 탄산염 형태로 이용)와 무기영양염류를 광합성에 이용한다. 광합성 반응은 빛에너지를 필요로 하므로 햇빛이 미치지 못하는 호수나 바다의 깊은 곳, 또는 빛이 없는 밤에는 광합성작용이 일어나지 않는다.

(2) 소비자

소비자(consumers)는 스스로 무기화합물을 유기화합물로 바꿀 수 없기 때문에, 생산자를 직접 간접으로 먹고사는 종속영양생물로 육상 및 수생 생물들이 이에 속한다. 생산자인 식물이나 조류를 직접 먹는 생물은 1차 소비자라 한다 풀을 먹고사는 소, 말이나 토끼 등의 초식동물과 식물성플랑크톤을 섭취하는 동물성플랑크톤은 1차 소비자이다. 2차 소비자는 1차 소비자를 먹고사는 육식동물로 표범, 상어, 악어 등은 전형적인 2차 소비자이다. 만일 2차 소비자가 없다면 1차 소비자의 수가 무한정 늘어나 생태계가 균형을 잃고 파괴될 것이다. 생산자인 식물과 1차 소비자인 동물을 함께 먹고사는 동물은 잡식동물이라 하며 인간은 대표적인 잡식동물에 속한다.

(3) 분해자

분해자(decomposers)는 종속영양생물로서 살아있는 생물이 아닌 죽은 유기체만을 분해하는 생물이다. 따라서 분해자도 특별한 종류의 소비자로 볼 수 있다. 지구상의 모든 생물은 태어나서 살다가 결국 죽게된다. 인간을 포함한 모든 동식물이 죽으면 썩게 되는데 이것은 균류나 박테리아 같은 분해자 때문이다. 분해자는 죽은 유기물을 무기물로 분해하면서 영양분과 에너지를 얻는다. 이런 분해작용을 통해서 유기물은 무기물로 순환되며 무기물은 다시 생산자인 식물의 성장에 이용된다. 만일 분해자가 없다면 죽은 유기물이 썩어서 무기물로 순환될 수 없기 때문에 지구는 동식물의 사체 및 쓰레기로 온통 뒤덮일 것이다. 따라서 분해자는 도시의 환경미화원 같이 생태계를 깨끗하게 청소해주는 역할을 한다. 이러한 분해자도 다른 생물의 먹이가 된다. 물이나 토양에 살고있는 원생동물, 진드기, 곤충들은 분해자를 먹이로 한다. 생태계에서 생산자, 소비자, 분해자들이 서로 먹고 먹히는 관계는 매우 복잡하게 얽혀 있다. 이들에 의해 물질은 무기물에서 유기물로 유기물에서 다시 무기물로 순환된다.

2.3 에너지 흐름과 생태계

(1) 태양에너지

지구에 존재하는 대부분의 해양생물은 수심 200미터 이내에 분포하고 있으며 육상생물은 해발 6천 미터 아래에 분포하고 있다. 지구의 생태권은 지구를 둘러싸고 아주 얇은 막에 존재한다. 이 막은 마치 사과의 껍질과도 같이 두께가 얇다. 지상에서의 생물지화학 순환(biogeochemical cycles) 및 사실상 다른 모든 현상들은 태양에너지에 의해 유래된 것이다. 태양은 5780K의 실제 표면온도를 갖는 흑체 복사체로서 작용한다. 태양이 방출하는 에너지량은 거대하지만, 지구가 받는 양은 22억 분의 1에 불과하다. 그러나 이 정도의 에너지를 지구에서 인위적으로 발생시키려면 1초 동안에 약 4천억 톤의 석탄을 태워야 할 엄청난 양이다.

(2) 에너지 법칙

에너지(energy)는 일할 수 있는 능력으로 정의된다. 우리는 보통 피곤할 때 아무런 에너지도 갖고 있지 않다고 말하기도 한다. 그리고 재생 불가능한 에너지원에 대한 대체물을 찾을 필요성을 느끼기도 한다. 물질과 달리 에너지는 그 효과에 의해 알게되고 인식하게 되며 볼 수도 만질 수도 무게를 측정할 수도 없다. 에너지는 운동에너지와 위치에너지로 나눌 수 있는데 운동에너지는 열역학법칙으로 설명할 수 있다.

열역학 제1법칙은 에너지는 창조되거나 소멸될 수 없으며, 다만 한 형태에서 다른 형태로 전환된다는 것이다. 그리고 열역학 제2법칙은 자발적 과정에서 우주(닫힌 시스템)의 엔트로피는 증가한다는 것이다. 제2법칙은 에너지가 한 형태에서 다른 형태로 전환될 때, 일부는 쓸모 없는 열로 바뀌어 흩어진다는 것을 의미한다. 이 두 법칙에 따라 한 시스템이 유지되려면 지속적인 에너지의 공급이 필수적이다.

(3) 먹이사슬과 에너지 흐름

생태계에서 먹고 먹히는 관계를 먹이사슬이라 하며, 이 먹이 사슬을 따라 에너지가 이동한다. 태양에서 지구에 도달하는 빛에너지에 의해 녹색식물은 광합성작용으로 이산화탄소, 물 그리고 무기영양염류를 유기물질로 전환하여 그들의 조직을 형성한다. 전환된 에너지는 먹이사슬을 따라 식물로 그리고 동물로 계속하여 전환 이동된다. 마침내, 동식물이 죽으면 이들에 저장되었던 에너지는 분해자에 의해 섭취되어 역시 다른 형태의 에너지로 전환되어 이동된다.

이러한 일련의 과정에서 에너지는 먹이 사슬을 따라 전환되어 이동하는데, 먹이사슬의 상위단계로 올라가면서 각 단계마다 약 10% 정도만 전환 이동되고 나머지는 이용할 수 없는 열 등으로 계속 사라진다. 이러한 열 손실을 대체할 에너지가 계속 공급되어야만 하므로 생태계에서 에너지의 흐름은 일방통행이다. 먹이사슬 단계에서 열로 사라진 에너지는 종국에는 적외선(열) 상태로 우주에 되돌아가게 되기 때문이다.

먹이사슬에는 물에 용해되어 있는 용존 유기물을 흡수하는 미생물을 출발점으로 하여 포식자-피식자의 관계로 이어지는 용존 유기물-미생물 먹이사슬, 육상의 녹색식물에서 시작하여 초식동물, 육식동물로 이어지는 초식 먹이사슬, 그리고 동식물이 죽은 사체나 낙엽과 같은 유기 쇄설물을 에너지원으로 이용하는 생물에서 시작하여 그들의 포식자 단계로 이어지는 쇄설물 먹이사슬로 구분하기도 한다.

그러나 실제로 생태계에서는 먹이사슬들끼리 아주 복잡하게 얽혀있다. 예를 들어 생산자인 풀을 소비자인 소가 먹고, 소를 또 다른 소비자인 사람이 잡아먹으면 풀-소-사람으로 경로를 나타낼 수 있는 먹이사슬이 된다. 그런데 사람은 곡식과 채소를 먹으며, 생선도 먹으므로 먹이사슬을 그리려면 단순하게 한가지로만 그릴 수 없다. 또 사람이 죽으면 사체를 분해하는 미생물 등에 의해 사체는 분해하게 된다. 이와같이 서로 먹고 먹히는 관계는 복잡하게 얽혀 먹이그물을 형성하고 있다.

제3장 물질의 순환

물질의 순환은 지구에 생명체가 없어도 일어날 수 있다. 이러한 지화학 순환(geochemical cycles)은 대양, 침적물, 대기와 같은 각각의 저장소가 서로 연결되어 그 통로를 통해 물질이 이동하는 것을 말한다. 생태계에서 생물체와 무생물적 환경 사이를 계속적으로 이동하는 물질의 순환은 생물, 지질, 화학적으로 이루어지므로 생물지화학 순환(biogeochemical cycles)이라고 한다.

지구상의 원소와 이들의 화합물은 유기물과 무기물의 형태로 순환되며 생물이 지구상에 존재하는데 꼭 필요한 작용을 한다. 여기서 원소(element)란 화학적 방법으로 더 이상 간단한 순물질로 분리할 수 없는 물질이며, 화합물은 둘 이상의 원소들이 화학적으로 결합하여 만들어진 물질을 말한다. 현재까지 109종의 원소가 알려져 있다. 그 중 83개가 지구상의 자연에서 발견된 것이고 나머지는 과학자들에 의해 만들어진 것이다. 이 중에서 17가지 원소는 대부분의 식물이 성장하는데 필수적이며, 탄소(C), 질소(N), 산소(O), 인(P), 황(S), 그리고 수소(H)의 6가지 원소는 식물, 동물, 미생물을 구성하는 물질의 95%를 차지한다. 이 원소들이 없으면 생명체는 존재할 수 없다.

유기물은 생물지화학 순환에 참여하는 중요한 물질인데 생태계를 통한 물질의 순환, 특히 식물과 동물의 영양소 순환에 관여한다. 탄소순환의 일부분에서 대기탄소(이산화탄소)가 생물량으로 고정되고, 질소순환의 일부에서 대기질소가 유기물에 고정된다. 이과정의 역을 광물질화(mineralization)라 하는데, 이것은 생물학적으로 결합된 원소가 무기물 상태로 변환되는 것을 말한다.

생물지화학 순환은 궁극적으로 태양에너지에 의해 추진되며 생태계 내에서 생명에 필수적인 물질을 끝없이 이동시키는 콘베이어 벨트와 같이 작용한다고 볼 수 있다.

3.1 탄소의 순환

대기 중에서 탄소는 기체인 이산화탄소(CO_2)의 형태로 존재한다. 이는 전체 탄소의 양에 비해 비교적 적은 양이지만 매우 중요한 역할을 한다. 물에 용해되어 있는 탄소는 탄산수소이온(HCO_3^-) 등으로 이온화되어 존재하거나 또는 용존 이산화탄소[CO_2(aq)]로 존재한다. 대기중의 이산화탄소는 일정량이 물에 녹아 들어가서 가역적 평형을 이루고 있다. 매우 많은 양의 탄소는 광물질, 특히 탄산칼슘($CaCO_3$), 탄산마그네슘($MgCO_3$)의 형태로 지구에 존재한다.

광합성은 이산화탄소를 고정하여 {CH_2O}로 표기되는 생물학적 탄소, 즉 모든 생명체의 분자를 구성하는 성분을 만든다. 식물의 광합성으로 대기에 존재하던 이산화탄소가 생물학적 탄소로 전환되는 화학식을 간단하게 나타내면 다음과 같다.

$$nCO_2 + nH_2O \rightarrow \{CH_2O\}n + nO_2$$

탄소는 많은 양이 탄화수소성 케로젠(혈암유에 포함된 유기물질),석탄, 갈탄, 석유, 천연가스로 고정되어 있다. 이들은 인간이 에너지를 얻기 위해 사용하는 귀중한 화석연료이다. 이러한 탄소화합물은 연료로 사용할 때 황산화물, 질소산화물 등의 독성 화학적인 영향 때문에 매우 중요하다.

탄소순환의 중요한 측면 중 하나는 태양에너지가 탄소순환에 의해 생물학적 시스템으로 이동되어, 궁극적으로는 화석연료의 형태로 저장되었다가 인간에 의해 이동되어 에너지를 얻기 위한 수단으로 사용된 후 다시 대기로 재 방출된다는 점이다.

미생물은 탄소순환에 깊이 관여하면서 생화학 반응을 중재한다. 물 속에서 탄소를 고정하는 광합성 조류는 물 속에 존재하는 이산화탄소를 소모하여, 물의 pH를 높이고 탄산칼슘, 탄산마그네슘의 침전을 형성하도록 한다. 미생물에 의해 고정된 유기탄소는 생물지화학 순환 과정에 의해 케로젠, 석탄, 갈탄, 석유, 천연가스로 변환된다.

탄소의 저장고는 대기와 물이다. 탄소는 육지와 바다의 생산자, 소비자, 분해자를 거쳐 다시 대기중의 이산화탄소 형태로 되돌아간다. 이 과정에서 환경학적인 문제는 인간이 화석연료를 사용할 때 화석연료에 함께 포함되어 있는 황, 질소 등이 황산화물, 질소산화물 등으로 대기에 함께 방출되어 인간에게 유해한 환경을 미치며, 연소시 발생하는 이산화탄소는 온실가스의 주범으로서 지구온도 상승에 큰 영향을 준다는 점이다.

3.2 질소의 순환

대기는 질소(N_2)의 무한한 저장소로 공기의 78%(부피비)를 차지한다. 질소는 탄소, 산소에 비해 훨씬 작은 양의 생체를 구성하지만, 단백질, 아미노산, DNA와 같은 생물조직을 만드는데 필수 구성성분이다. 식물과 동물은 대기에 존재하는 기체 질소분자를 직접 이용하지는 못한다. 식물의 광합성에 필요한 질소는 토양이나 바다에 서식하는 박테리아에 의해 암모니아(NH_3)나 질산염(NO_3^-)의 형태로 전환되어야만 가능하다.

질소고정(nitrogen fixation)은 대기의 질소가 생물에 이용될 수 있는 질소화합물의 형태로 변환되는 작용을 말한다. 질소를 고정할 수 있는 미생물로는 콩과식물의 뿌리혹에 기생하는 뿌리혹박테리아(Rhizobium), 자유생활형인 아조토박터(Azotobacter), 클로스트리듐(Clostridium), 그리고 남조류(blue green algae)로서 아나베나(Anabaena), 노스톡(Nostoc) 등이 있다. 이러한 박테리아에 의한 질소고정을 화학식으로 나타내면 다음과 같다.

$$2N_2 + 6H_2O \rightarrow 4NH_3 + 3O_2$$

이와 같이 만들어진 암모니아(NH_3)는 물에 녹아 암모늄 이온(NH_4^+)이 되어 식물조직을 구성하는데 사용되거나, 또한 박테리아에 의한 질산화(nitrification)을 통해 아질산염(NO_2^-)으

로 전환되고 다시 질산염(NO_3^-)으로 바뀌어 식물들의 성장에 이용된다.

$$4NH_3 + 6O_2 \rightarrow 4NO_2^- + 4H^+ + 4H_2O$$
$$4NO_2^- + 2O_2 \rightarrow 4NO_3^-$$

식물은 뿌리를 통해 토양 속의 기체 질소를 고정하여 성장에 필요한 영양원으로 이용하며, 식물성 플랑크톤은 해수에 용해된 질소를 이용하여 성장한다. 소비자인 동물은 식물을 섭취, 또는 다른 동물을 포식하여 필요한 질소를 얻는다. 동식물이 죽으면 분해자인 박테리아나 균류가 사체(유기물)을 분해한다. 질소순환은 생물학적 물질이 포함된 반응에 좌우된다. N_2 → NH_3 → NO_2^- → NO_3^- → 아미노산 → 단백질 순서로 진행되는 일련의 모든 반응과 N_2로의 역반응(탈질산화)이 미생물에 의해 진행될 수 있다.
미생물에 의해 진행되는 탈질산화(denitrification) 과정은 질산염을 기체상 질소분자와 아산화질소(N_2O)로 전환하여 대기 중으로 방출하는 과정이다. 질산염으로부터 질소분자의 재생성 반응은 토양 및 대양 속의 호기성, 혐기성 조건에서 일어난다. 혐기성 조건하에서 유기체는 호흡에너지의 근원으로서 산소분자 대신 질산염을 사용할 수 있다. 이 경우 탈질산화 작용에 의해 질소분자(N_2)가 형성되는 과정을 화학식으로 표시하면 다음과 같다.

$$5CH_2O + 4NO_3^- + 4H^+ \rightarrow 2N_2 + 5CO_2 + 7H_2O$$

질산염의 환원이 항상 질소분자를 형성하는 것은 아니다. 상당한 양의 아산화질소가 생성될 수도 있다. 대류권에서 기체상태의 아산화질소는 비교적 비활성이기 때문에 느리게 제거된다. 따라서 아산화질소는 대기 중에서 두 번째로 풍부한 질소화합물(0.3ppm)이며, 매년 0.3% 정도가 증가하고 있다.
미생물에 의하지 않고 자연적으로는 질소분자에서 암모니아가 생성되지 않는다. 고에너지가 가해져 3중 결합을 하고 있는 질소분자를 깨야한다. 옛날부터 '천둥, 번개가 잦은 해에 풍년이 든다"고 전해오고 있다. 이를 과학적으로 살펴보면, 깨지기 어려운 질소분자가 고에너지의 번개방전에 의해 공기중의 질소가 질소화합물로 변하고, 또한 빗물에 녹아 식물에 흡수되기 때문이다.
번개 이외에 산업용 용광로나 자동차 엔진 등에 의한 고온은 N_2와 O_2를 결합시켜 질소산화물 형태로 대기 중에 방출한다. 이 경우 사용하는 화석연료는 용광로 속이나 자동차 엔진 속에서 연소되면서 기체온도를 크게 상승시키기 때문에 연료자체의 질소분자와 산소분자가 결합될 수 있다. 이 과정에서 생성된 질소산화물(NO_x)은 황산화물(SO_x)과 더불어 산성비 및 광화학 스모그(photochemical smog)의 출현을 야기 시킨다. 이렇게 대기에 방출된 질소산화물은 질산염으로 바뀌면서 대기 중에서 차츰 사라진다. 이 여분의 질산염은 주로 미생물에 의해 생산되고 있는 질산염에 추가된다.
프리츠 하버(Fritz Haber)와 카를 보슈(Carl Bosch)는 1910년대에 대기중의 N_2로부터 인공

적으로 질소를 고정시켜 암모니아를 생산해내는 방법을 개발함으로써, 대규모 질소비료 산업의 성장을 이끌어냈다.
인류에 의한 합성 질소비료의 생산량(8천만톤/년)은 미생물에 의한 질소고정화량의 추정치(1억4천만톤/년)에 육박한다. 지구의 인구증가와 식량생산 증가가 어느 정도 균형을 유지할 수 있는 것도 주로 질소비료의 사용증가 덕택이다.

3.3 황의 순환

대부분의 황이 농축되어 있을 것으로 예측되는 지구의 맨틀 내부와 핵에 대한 인간의 지식은 아직 불확실하다. 지표면에서 황의 순환량은 산업혁명 이후 화석연료, 광물, 비료 등의 사용증가로 꾸준히 증가되어 왔다. 황의 순환에 대한 많은 연구에도 불구하고 황의 이동에 대한 상당부분은 아직도 불확실하다.
화석연료와 황화광석의 사용과 추출에 대한 정보는 인간활동으로 대기 중에 방출된 황의 양이 얼마나 될 것인지를 추정하는 좋은 자료가 될 것이다. 전지구적인 황의 생물지화학 순환은 황화디메틸[$(CH_3)_2S$]과 황화카보닐(OCS), 이산화황(SO_2), 황산염(SO_4^{2-}), 황화철(FeS_2), 석고($CaSO_4$), 유기퇴적물 등 여러 형태의 황화합물과 관계가 있다.
해수(주로 표면수)에 서식하는 식물성플랑크톤은 주로 황화디메틸을 만들어낸다. 황화디메틸은 생성되자마자 대기 중으로 배출된다. 그리고 수일 이내에 빠르게 산화되어 이산화황을 형성한 뒤 최종적으로 황산염으로 전환되어 에어로졸 상태로 응축된다. 대기중의 황산염 에어로졸 입자들은 수증기를 응축시켜 구름과 비를 만드는 핵으로 작용한다. 이런 작용을 통해 대류권에 형성된 구름은 태양복사에너지를 반사하는 역할도 하며, 빗물의 산성화를 유발시킨다. 황화수소(H_2S)의 생성은 육지와 바닷물이 드나드는 늪지에서 더 중요하다. 황화수소 역시 빠르게 산화되어 이산화황을 형성함으로써 황화디메틸처럼 황산염으로 전환되어 에어로졸 상태로 응축된다.
또한 해수에 녹아있는 유기황화합물에 의해서는 황화카보닐(OCS)이 생성된다. 황화카보닐은 대류권에서는 반응하지 않고 성층권으로 유입된다. 성층권에서 산화되고 황산염으로 전환되어 에어로졸층을 형성한다. 성층권의 황산염 에어로졸층은 태양복사에너지를 반사하여 지구온도상승을 억제, 지구온도를 조절하는 역할을 한다.
한가지 예로, 필리핀의 피나투보 화산 폭발(1991년 발생)로 인해 성층권 황산염 에어로졸 유입의 증가를 초래하여 지구온도의 일시적 하강현상이 관측된바 있었다. 대기 중으로 배출된 황화합물이 비나 눈을 통해 육지나 바다로 되돌아 왔을 때 황의 순환은 원점으로 돌아와 다시 시작된다.
황화수소(H_2S)는 습지 및 바다 속의 혐기성 침전물과 깊게 관련되어 있다. 바다 속에서는 질산염에 비해 황산염이 훨씬 더 높은 농도로 존재하기 때문에 황화수소의 형성은 혐기성 해양 침전물의 특징이다. 황화수소는 대기 중에 기체로 방출되어 이산화황으로 산화되어 황

화디메틸과 마찬가지 역할을 하거나, 침전층 또는 물 속에서 금속이온과 결합하여 불용성 황화물을 형성할 수 있다.
철은 비교적 많은 양으로 존재하기 때문에 황화수소와 반응해 황화철(FeS 및 FeS_2) 등을 형성하기 쉽다. 이와 같이 형성된 금속 황화물은 혈암이나 석탄처럼 유기물질이 풍부한 해양성 퇴적물과 함께 결합되어 있다가 오랜 시기가 지나면 퇴적층의 융기, 풍화 및 광산활동 등에 의해 공기 중에 노출될 수 있으며 산소 및 물과 반응하면 황산이 생성된다. 산은 광물에 포함된 독성금속의 용출을 포함하므로 특히 광산 주변 지역에 중요한 오염문제를 발생시킨다.
오늘날, 전지구적인 황의 순환은 우리 인간들의 화석연료 사용으로 크게 위협받고 있다. 이산화황은 앞서 논의한 바와 같이 자연적인 근원과 인간의 화석연료 사용을 통해 대기 속으로 유입된다. 그런데 인간활동에 의한 인위적 배출량은 자연적으로 유입되는 양의 3~4배로 추정되고 있다. 황의 인위적인 과다배출은 비의 산성화를 촉진하여 토양을 산성화시키는 심각한 환경문제를 일으키고 있다.

3.4 인의 순환

인은 생물의 DNA와 RNA를 구성하는 핵심물질이며, 뼈와 치아, 유기물조직을 만드는데 필요하다. 자연적으로 발생된 인화합물은 낮은 용해도와 낮은 휘발성을 가지고 있기 때문에 기체상태로는 존재하지 않고, 주로 부유된 상태의 고체입자로써 강물 속에서 바다로 운반되며, 대기 속에서는 단지 먼지로서 존재할 수 있다.
인의 저장소는 지질시대에 조성된 암석이나 퇴적물이다. 암석의 인은 침식되면서 빗물에 씻겨 육지나 하천, 바다로 흘러들어가 그곳에 서식하는 식물에 이용된다. 동물에게는 먹이사슬을 통해 전달되고 동물의 배설작용 및 동식물의 사체가 분해되면서 주변 토양이나 하천, 바다로 이동한다.
인은 질소처럼 대기 중에 저장돼 있는 것이 아니고 서서히 일어나는 암석의 침식작용에 의해서만 공급된다. 하천이나 바다로 유입된 인화합물은 저층으로 침전되어 퇴적물 속에 묻히게 된다. 인은 기체형 순환이 아니고 침전형 순환이다. 장구한 세월을 거친 후 지각운동에 의해 퇴적물이 대륙의 표층으로 노출되면 그 속에 포함된 인은 다시 침식작용을 거쳐 재순환될 것이다.
영양분으로서의 인산염 이용도는 이들의 낮은 용해도로 인해 제약을 받는다. 전형적인 무기인계 화합물로는 인회석[$Ca_{10}(PO_4)_6(F,OH)_2$], 인산칼슘[$Ca_3(PO_4)_2$], 인산알루미늄($AlPO_4$), 인산철($FePO_4$) 등이 있다. 비료로 첨가된 인산염은 대부분 무기인산염 화합물로 되어 빠르게 고정된다. 따라서 용해상태의 인산염은 비료 미립자 주변에 고정되어 머무르게된다. 그러므로 호수와 강물 속에 녹아있는 인산염의 농도는 낮으며, 해양으로 운반된 대부분의 인산염은 입자상태나 부유침전물로 존재한다.
그렇지만, 생활하수의 인산염 농도는 높은데 이는 과량의 비료 때문이 아니라 세제에 사용

된 용해상태의 폴리인산염에 기인한다. 삼인산염($P_3O_{10}^{5-}$)과 같은 폴리인산염은 넓은 범위의 조건하에서 큰 용해도를 가진다. 폴리인산염은 주로 세제에 첨가되어 칼슘, 마그네슘 이온과 결합하여 착물을 형성한다. 유기세제의 경우는 더 효과적으로 작용한다. 따라서 물의 온도나 pH가 올라감에 따라 불용성 탄산염이 형성되는 것을 막아주어 결국 인산염이 높은 농도로 존재하게 된다.

현재 세제로 인해 발생하는 대부분의 환경문제는 계면활성제로 인한 것이 아니라, 세제에 첨가되는 빌더(builders)에 기인한다. 빌더는 경도이온에 결합하여 세제용액을 알카리성으로 만들고 세제의 계면활성 능력을 크게 향상시키는 역할을 한다.

시판하고 있는 일부 세제는 아직도 칼슘, 마그네슘을 착물화하고 빌더의 기능을 위해 폴리인산염이 포함되어 있다. 세제에 포함되어 있는 인산염은 비록 문제점이 많이 해결되었음에도 불구하고 아직도 환경오염물질로 가장 관심의 대상이 되는 물질이다.

2차 하수처리과정에서는 생활하수에 녹아있는 인산염의 20~30% 만이 제거된다. 그러나 응집제(철 및 알루미늄 화합물)와 함께 첨가된 석회로 인해 3차 처리과정 동안에는 인산칼슘 등의 불용성 금속 인산염의 침전이 일어나 인산염의 90%가 제거될 수 있다.

물 속에 녹아있는 나머지 인산염이 호수나 댐에 유입되면, 조류의 성장을 촉진시킨다. 질소와 인만을 고려할 때 조류는 생체 분자를 만들기 위해 하나의 인 원자당 12~20개의 질소 원자를 필요로 하므로 생물학적 제한원소(biolimiting element)인 질소와 인의 비율이 적절하다면, 특히 인이 호수에 조금만 녹아있어도 질소를 고정하는 남조식물이 번성, 부패하면서 용존 산소가 소모되어 물이 탁해지게 된다. 이러한 현상을 부영양화(eutrophication)라 한다.

3.5 산소의 순환

대기를 구성하고 있는 기체의 21%는 산소(O_2)로 이루어져 있다. 산소는 생태계의 생물과 무생물 환경에 있어서 가장 중요하다. 산소는 지각, 대기, 수권 및 생물권 내에서 모두 높은 농도로 존재하는 중요한 원소다.

산소분자의 반응성이 매우 크기 때문에 산소의 순환은 탄소의 순환을 비롯한 대부분의 물질 순환과 아주 밀접한 관계를 갖는다. 살아있는 유기체들은 에너지를 생산하기 위한 수단으로 호흡(respiration)을 이용한다. 이 호흡과정에서 대기 중 산소를 소모한다. 죽은 유기체의 호기성 미생물에 의한 분해도 호흡반응과 유사하다. 이들은 모두 광합성의 역과정이다.

$$(CH_2O)_n + nO_2 \rightarrow nCO_2 + nH_2O$$

식물은 밤에 호흡작용으로 대기중의 산소를 소모하고 이산화탄소를 방출한다. 낮에는 광합성작용으로 방출된 이산화탄소를 소모하고 산소를 내놓는다. 육상 식물들은 하루를 주기로 하여 생화학적으로 산소를 순환한다. 이 순환은 산소의 단기순환으로 거의 균형을 이루고

있다.
해양에서는 주로 수심 200미터 이내에서 생산자인 조류(식물성 플랑크톤 등)의 광합성 작용으로 물 속의 이산화탄소(주로 탄산수소이온의 형태)를 소모하고 산소를 생성한다. 이렇게 생성된 산소는 해양생물들의 호흡과 분해로 소비된다. 그러나 해양에서 소비되는 산소량은 해양에서 생산되는 산소량에 비해 적다. 이는 염수로 채워진 해양의 특성이기도 하다. 해양에서 많은 부유성 유기물들은 분해(호기성분해시 산소소모함)되지 않고 바다 속으로 침전되어 퇴적물로 해저에 쌓이게 된다. 따라서 해양에서 소모되지 않고 남는 생성된 여분의 산소는 대기로 방출된다. 대기 중에서 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료의 연소와 인간을 포함한 동물의 호흡작용은 산소를 소모하고 이산화탄소를 배출한다.
또한 지각 표면에 있는 환원성 광물의 산화성 풍화작용, 화산에서 분출하는 환원성 기체도 산소와 반응하여 산화된다. 따라서 해양으로부터 유래되어 대기에 들어온 여분의 산소는 대기에서 소비된다. 그러므로 산소의 중기순환은 거의 균형적으로 일어난다. 산소의 중기순환이 일어나는 동안 해양에 퇴적하는 유기물의 양에 따라 대기중의 산소농도는 늘거나 줄게될 수 있다.
만일 해양에서 대기로 방출된 여분의 산소가 소비되지 못한다면, 해양의 생산자에 의해 대기중 이산화탄소는 소비되어 수만년 내에 없어질 것이다. 그러므로 육상식물은 이산화탄소가 없어 광합성을 못하므로 죽게 될 것이다.
해양에서 분해되지 못하는 많은 부유성 유기물들(강에서 바다로 흘러들어온 유기물 포함)은 바다 속으로 침전되어 퇴적물로 해저에 쌓인다. 이 퇴적물은 장구한 시간이 흐른 뒤 지각변동에 의하여 융기될 수 있다. 이것은 장기순환에 해당한다. 오늘날 인류가 화석연료를 사용하는 것과 같은 원리이다.
고생대 말기에 많은 양의 관속식물, 유기물이 해안을 따라 형성된 저지와 늪지 등에 매장되었다. 이것들이 오늘날 석탄기와 페름기(고생대 말기)의 퇴적층에서 발견되는 석탄을 형성하였다. 오늘날 과학자들의 연구결과는 대량의 관속식물, 유기물이 매장된 고생대 말기에 대기 중의 산소농도가 증가했던 것으로 보고 있다. 또한 백악기와 신생대 초기에 형성되었던 석탄층도 대기중의 산소량을 증가시키는 중요한 역할을 한 것으로 보고 있다. 이들 화석연료는 오늘날 인류에 의해 사용되면서 대기에 과량의 이산화탄소를 배출함으로써 지구온난화 문제를 야기하고 있다.
화산활동 및 유기물의 부패시 생성된 황화수소는 대기의 산소와 반응하여 이산화황으로 전환된다. 화석연료(석탄, 석유, 천연가스 등)를 태우거나 광물을 제련할 때 이들에 들어있는 황은 이산화황으로 전환된다. 대기 중에서 이산화황은 산화되어 황산염(SO_4^{2-})으로 전환되고, 유사하게 생성된 질소산화물은 질산염(NO_3^-)으로 전환되어 결국 산성비를 만들게 되고 지표면으로 되돌아온다. 또한 인간이 에너지를 얻기 위해 사용하는 화석연료의 연소량이 너무 많다. 따라서 이때 발생하는 과잉의 이산화탄소는 지구 기온상승을 유발하는 온실효과(greenhouse effect)의 주범이다.

제4장 인구환경

4.1 인구폭발

지구상에서 최초의 인류 탄생 이후, 인구가 60억 명(1999년 10월)으로 늘어나기까지에는 약 200만년이라는 세월이 흘렀다. 초기의 인간(Homo sapiens)이 지구상에 출현한 것은 약 40만년 전이다. 그 당시 지구는 인간이 살아가기 위해 필요한 자원을 충분히 갖고 있었다. 초기 인류는 열매를 채취하거나 사냥을 함으로서 식량을 구할 수 있었다. 현대인간인 크로마뇽인이 등장한 것은 약 3만년에서 5만년 전이다. 현대인간은 사냥 기술을 효과적으로 발전시켰고, 주변환경을 초기 인간보다 잘 이용할 수 있게 되었다. 따라서 인간의 수가 증가하게 되었으며 인류는 드디어 전세계로 흩어져 살게 되었다.
지금으로부터 약 1만년 전 신석기시대에 인류는 처음으로 정착 생활을 시작하게 된다. 그 당시의 지구상 인구는 1천만 명 정도로 추산된다. 이때부터 인류는 한 지역에 정착하여 천연자원을 이용하고 조절하는 방법을 습득하기 시작하였다. 농경생활의 시작은 인구 증가의 첫 번째 계기가 된다. 정착지에 많은 사람들이 모여 살게 되자 인간은 그들에게 필요한 간단한 물품, 공예품을 제조 생산하는 단순 생산 기술을 발전시키게 된다. 그리하여 이집트, 마야, 잉카, 로마, 그리스 역사에서 알 수 있듯이 여러 인류 문명을 탄생시켰다. 이들 문명은 발전, 진화, 쇠퇴의 길을 걸었다.
고대 문명이 쇠퇴한 원인으로 기후변화 또는 정치 및 사회의 변화를 들고 있지만, 어쩌면 문명 발생 지역의 산림파괴 등 인간 활동에 의한 천연자원의 고갈 때문인지도 모른다. 이들 문명의 발상지역의 자연환경은 인간활동에 의해서 점차 훼손되었을 것이다. 인류 문명의 영향을 받는 지역에서는 인구의 집중화 현상에 의해 국부적으로 자연 생태계가 변화하였을 것이다. 예를 들어, 여러 문명의 발상지인 지중해 지역은 초기의 삼림이 더 이상 존재하지 않는다. 지중해 생태계가 크게 변형되었기 때문에 수천년 전에 어떤 식생이 이 지역에 분포했었는지 알 수 없다.
산업혁명 이전까지 인간 활동에 의한 환경 변화는 대다수가 국부적이었고 느리게 진행되었다. 그리고 전염병, 기근, 전쟁이 빈번하게 발생하고, 의학이 발전되지 않아 사망률이 매우 높았다. 그러므로 매우 느리게 인구가 증가하였다. 산업혁명이 시작되기 이전인 1650년의 세계 인구는 5억으로 추산된다. 이 시기 까지는 환경변화가 있었다 할지라도 크게 문제시되지 않았다.
산업혁명 이후 19세기에 들어와 유럽과 북미에서는 에너지 집약적인 기계가 개발되면서 생활에 필요한 물건들이 대량으로 생산되기 시작했다. 이 시기부터 세계인구는 폭발적으로 증

가하기 시작한다. 출생률 변하지 않는데 사망률은 급격히 감소하기 때문이다. 과학기술의 발전은 농경지 증가와 수확량의 증가를 가져와 식량생산을 크게 늘렸다. 도로와 교통기관의 발달로 한 지방에 기근이 들어도 식량과 다른 생필품들을 다른 지방에서 신속히 운반하여 올 수 있었다. 의학의 발전은 질병을 퇴치하여 유아사망률을 크게 감소시키고 인간의 평균 수명을 연장하였다. 따라서 출생률은 변하지 않고 사망률이 급격히 떨어지자 인구의 폭발적인 증가가 일어났다.

세계인구는 1650년의 5억에서 200년이 지난 1850년에는 10억으로 2배가 되었다. 그로부터 80년 후인 1930년에는 20억, 다시 45년 후인 1975년에는 40억으로 인구가 2배씩 불어났다. 유엔에서는 지난 1987년 7월 11일에 세계인구가 50억명을 돌파한 것을 계기로 매년 7월 11일을 "세계인구의 날(World Population Day)□로 선포하였다. 세계인구는 오는 2000년에는 62억, 2050년 경에는 100억에 육박할 것으로 예상된다(표 4.1).

표 4.1 세계인구의 변동추이

년 도	인구(억명)	년 도	인구(억명)
0	3.0	1997	58.9
100	3.1	2000	61.6
1500	5.0	2010	70.3
1800	9.8	2020	78.9
1900	16.5	2030	86.7
1950	25.2	2040	93.2
1987	50.2	2050	98.3

4.2 인구통계

현재 지구상에는 매년 1억 4천만명의 인구가 태어나고, 5천 2백만명이 사망하고 있어, 1초에 4.5명이 출생하고, 1.7명이 사망하는 셈이다. 세계의 평균 조출생률은 인구 1000명당 23.7명이고, 조사망률은 인구 1000명당 8.8명이다. 인구 1000명당 연간 사망자수를 조사망률이라 하고, 연간 출생자수를 조출생률이라 한다. 따라서 연평균 인구증가율은 1.49%이다. 연평균 인구증가율은 아프리카(2.66%), 남미(1.67%), 아시아(1.55%)는 세계평균(1.49%)을 상회하고 있으며, 북미(0.90%) 및 유럽(0.08%)은 낮게 나타났다. 특히, 유럽은 2000년 이후 인구가 감소할 것으로 전망된다.

인구증가는 지역별로 큰 차이를 보이고 있다. 제2차 세계대전 이후 가족계획이 가능하게 되자 선진국에서는 출생률이 저하되기 시작하였다. 일부 유럽국가에서는 인구가 줄고 있다. 프랑스에서는 장기간에 걸친 출생률의 저하와 인구의 고령화로 노동인구가 감소하여 현재 출산을 장려하고 있는 실정이다. 그러나 개도국에서는 2차 대전 이후 출생률은 변하지 않았

는데, 식량증산과 의약품의 보급으로 사망률은 낮아져 아프리카, 남미, 아시아의 개도국에서는 인구가 큰 폭으로 계속 증가하고 있다. 이러한 지역별 인구분포는 향후에도 동일한 패턴을 유지한 채, 아프리카는 다소 상승하는 반면, 유럽 및 북미는 감소할 것으로 예상된다.

세계의 여성은 가임기간 동안 평균 3명의 자녀를 낳고 있으며 선진국 여성은 1.7명의 자녀를 출산하는 반면, 개도국 여성은 3.3명을 출산한다. 유럽 및 동아시아 여성들은 각각 1.6명, 1.9명의 자녀를 출산하여, 대체수준에도 못 미치고 있는 반면, 아프리카 지역 여성들은 아직도 5명 이상의 자녀를 출산하고 있다.

세계인구의 증가를 시간대 별로 나누어 보면, 매월 경기도 인구만큼씩(740만명), 매일 목포시 인구만큼씩(24만명) 증가하는 셈이다. 매분마다 유럽인구가 1명 늘어나는 동안, 남미에서는 16명, 아프리카에서는 39명, 아시아에서는 107명의 인구가 증가하고 있다. 세계의 연평균 인구증가율은 2000~2010년은 1.33%, 2010~2020년은 1.15%로 점차 낮아질 것으로 추정되고 있다.

한편, 우리나라의 평균 조출생률과 조사망률은 각각 15.9와 5.4로 연평균 인구증가율은 1.05%이다. 1995~2000년 사이 한국의 연평균 인구증가율은 0.94%로 북미(0.90%)와 비슷한 수준이다. 우리나라 인구는 앞으로 1년간 마산시 인구규모 정도인 44만 명이 늘어날 것으로 보인다. 이는 매월 36,547명, 매일 1,202명, 매시간마다 50명 정도의 인구가 증가하는 셈이다. 이후 증가세는 점차 둔화되어 2000~2010년에는 연평균 33만명, 2010~2020년에는 연평균 17만 명씩 증가될 것으로 추정되며, 2028년부터는 인구가 감소할 것으로 예상된다.

세계인구의 평균수명은 65.8세로, 남자는 63.7세, 여자는 67.8세이다. 선진국 평균수명은 개도국보다 11.1세 높으며, 북미지역 인구는 아프리카에 비해 무려 22.7년이나 오래 살고 있다.

(1) 인구밀도

1995년 기준 지구상에는 1㎢당 평균 42명이 살고 있는데, 개도국은 1㎢당 약 55명이 거주하고 있어 선진국(22명/㎢)보다 개도국은 2.5배나 사람이 조밀하게 살고 있다. 이를 지역적으로 살펴보면, 아시아가 1㎢당 109명, 유럽은 32명, 남미는 23명, 북미는 14명, 오세아니아는 3명이다. 오는 2050년에는 지구상에 1㎢당 평균 72명이 살며, 개도국은 1㎢당 약 104명으로 선진국(23명/㎢)보다 4.5배나 사람이 조밀하게 살 것으로 전망된다. 지역적으로는 아프리카가 1㎢당 71명으로 1995년에 비해서 3배로 가장 크게 증가하고 그 다음이 남미, 아시아 순으로 인구밀도가 증가할 것으로 예상되며, 유럽은 오히려 감소할 것으로 전망된다. 한국은 방글라데시(836명/㎢), 대만(590명/㎢)에 이어 전세계에서 3번째로 인구가 조밀한 국가이다(표 4.2).

표 4.2 세계의 인구밀도(단위 : 명/㎢)

지 역	1995	2000	2020	2050
○ 세 계	42	45	58	72
- 선 진 국	22	22	23	23
- 개 도 국	55	60	80	104
- 아프리카	24	27	44	71
- 아 시 아	109	118	149	181
- 유 럽	32	32	31	29
- 남 미	23	26	33	41
- 북 미	14	14	17	18
- 오세아니아	3	4	5	5

(2) 인구구조

세계인구 중 65세 이상 인구의 비율은 1995년 6.5%에서 2010년 7.3%, 2020년에는 8.8%로 늘어날 전망이다. 선진국의 65세 이상 인구비율은 1995년 13.5%로 이미 고령사회에 진입한 반면, 개도국은 4.7% 수준에 머물러 있다. 평균연령은 1995년 25.3세에서 2010년에는 28.1세, 2020년에는 30.2세가 될 것으로 예상된다. 선진국의 평균연령은 35.7세로 개도국의 23.1세보다 12.6세나 많다.

4.3 우리나라의 인구문제

(1) 대도시의 인구집중 및 고령화 현상

통계청 「인구주택 총조사 보고서」에 의하면 1995년 기준 전체인구의 22.9%가 서울에 살고 있으며, 서울을 포함한 6대도시 인구는 47.8%를 차지하고 있다. 만약 울산시를 포함하면 대도시 인구가 전체 인구의 절반에 해당된다. 서울.인천.경기를 포함한 수도권 인구는 전체 인구의 45.3%를 차지한다(표 4.3).

인구의 고령화 현상도 심화되어 65세 이상 노인 인구의 비율이 1997년 6.3%에서 2000년에는 7.1% 그리고 2021년경에는 14%를 넘어서 고령사회(Aged Society)에 진입하게 될 것으로 보인다. 우리나라의 노인인구 비율이 7%→14%가 되는데 걸리는 기간이 20년 정도에 불과하여, 스웨덴, 프랑스, 미국, 영국, 일본 등 선진국에 비해 훨씬 빠른 속도로 고령화가 진행될 것으로 전망된다. 65세 이상 노인인구의 급증에 따라 1997년 생산가능 인구 100명이 노인인구 9명을 부양하던 것이 2000년에는 10명, 2020년에는 19명으로 크게 증가할 것

으로 예상된다. 이에 따라 15세미만 유소년 인구의 감소에도 불구하고 총부양비는 2000년경부터 증가하여 2020년에는 43.7%로 전망된다. 신규 노동인구 층인 15~29세 인구는 1997년 12,546천명에서 점차 감소하여, 2000년에는 11,506천명, 2020년에는 10,217천명으로 크게 줄어들 것으로 전망된다.

표 4.3 대도시 및 수도권 인구분포 추이 (단위 : 천명)

	1980		1985		1990		1995	
	인 구	%	인 구	%	인 구	%	인 구	%
전 국	37,436	100.0	40,448	100.0	43,411	100.0	44,609	100.0
6대도시	15,593	41.7	18,343	45.3	20,647	47.6	21,333	47.8
서울	8,364	22.3	9,639	23.8	10,613	24.4	10,231	22.9
부산	3,160	8.4	3,515	8.7	3,798	8.7	3,814	8.5
대구	1,605	4.3	2,030	5.0	2,229	5.1	2,449	5.5
인천	1,084	2.9	1,387	3.4	1,818	4.2	2,308	5.2
광주	725	1.9	906	2.2	1,139	2.6	1,258	2.8
대전	652	1.7	866	2.1	1,050	2.4	1,272	2.9
(울산)	(418)	(1.1)	(551)	(1.4)	(682)	(1.6)	(967)	(2.2)
수도권[1]	13,298	35.5	15,820	39.1	18,587	42.8	20,189	45.3

(2) 성비의 불균형

여자 100명당 남자수인 성비는 자연상태에서는 100.7로 균형을 이루고 있다. 그러나 뿌리깊은 남아선호사상과 비도덕적인 낙태수술로 인하여 자연적인 성비의 균형이 크게 깨지고 있다. 1980년대 후반 이후 지속된 출생성비 불균형으로 인해 결혼적령기 남녀의 성비 불균형이 오는 2010년을 전후해 가장 극심하게 나타날 것으로 보인다. 1986~1995년 기간동안 출생한 여자가 결혼 적령기인 20~29세에 이르는 2010년을 전후해서는 결혼적령기의 여자가 매우 적게 되어 남자 100명당 15명 정도는 배우자가 부족할 것으로 보인다(표 4.4). 이와 같은 결혼적령기의 성비 불균형은 신랑후보들이 많이 남게되어 큰 사회문제가 야기될 것으로 예상된다. 따라서 경제 사회적인 변화와 더불어 초혼연령, 독신율 등 혼인패턴을 크게 변화시킬 것으로 예상된다.

(3) 지구의 인구수용능력

현재와 같은 인구의 폭발적 증가는 식량부족과 공간부족을 초래하게 될 것이고 한정된 공간에 살면서 거대한 에너지 소모와 엄청난 양의 배설물을 내어놓기 때문에 환경오염이 계속

표 4.4 결혼 적령기 인구 성비(여자 100명당 남자수)

연 도	남자(25~34세)	여자(20~29세)	성 비
1990	4,346,198	4,209,007	103.3
1995	4,414,733	4,222,579	104.6
1997	4,429,106	4,151,205	106.7
1998	4,434,017	4,097,833	108.2
1999	4,429,844	4,038,871	109.7
2000	4,412,482	3,986,544	110.7
2005	4,166,730	3,679,616	113.2
2010	3,860,746	3,282,476	117.6
2015	3,502,342	3,076,195	113.9
2020	3,405,696	3,235,680	105.3

자료 : 통계청, 「장래인구추계」, 1996

가중될 것이 분명하므로 환경저항으로 인하여 지속될 수 없으리라는 것은 분명해 보인다.
생물 개체군의 성장곡선을 살펴보자. 생물개체군의 성장은 J형과 S형이 있다. 아주 적은 수의 개체들이 같은 종의 생물들이 전혀 살지 않는 지역으로 도입되면 자원이 풍부할 때 J형 성장곡선이 나타난다. 개체군이 자원을 다 소모하거나 환경저항이 나타날 때까지 개체수는 지수함수적으로 증가한다. 예를 들어, 곤충 중 집파리는 한번에 평균 100개의 많은 알을 낳으며 이중 60개는 암컷이 된다. 1년에 보통 7세대를 거치게 되므로 그 개체군의 성장은 폭발적으로 증가하며 J형의 성장곡선을 나타낸다. 그러나, 일반적으로 자연생태계에서 생물 개체군의 성장은 환경의 영향을 받는다. 그들의 먹이나 생활공간의 부족, 개체간의 경쟁, 개체군 주변환경의 변화 등의 요인에 의하여 계속 성장할 수 없게 된다. 개체군의 성장을 억제하는 요인들을 총체적으로 환경저항이라 한다.
S형 성장모델은 개체수의 과잉으로 생기는 제한 요인들이 개체군의 밀도가 증가함에 따라 더욱 더 성장률을 감소시키는 방향으로 작용하는 경우이다. 제한요인의 작용이 개체군의 수 밀도에 선형적으로 비례하면 보통 부양능력이라고 하는 상한 수준에 근접하는 안정상태로 되어 S자 모양의 성장곡선을 나타내게 된다. 자연에서 개체군은 생태계의 원리에 따라 먹고 먹히는 먹이사슬관계가 성립하며 개체수가 증가하면 환경저항도 함께 증가하기 때문에 대개 S형을 따르게 된다. 인구는 S형 성장곡선에 따라 증가하게 된다.
지구가 수용할 수 있는 인구 즉, 지구의 인구 수용능력에 대해서는 학자마다 의견이 일치하지는 않는다. 수용 가능한 인구를 30억 명에서 부터 400억 명으로 추정하고 있다. 이는 지구의 식량생산이 어느 정도까지 가능할 것인가와 식생활의 수준의 기준치를 어떻게 설정할

것인가에 따라 차이가 있기 때문이다. 세계의 개발 가능한 경작면적을 40억 헥타(ha)로 추정하고 100% 곡물만을 생산하여 먹는다면 이론적으로 400억까지 수용이 가능할 것이다. 그러나 세계인구가 미국인 수준의 식생활을 즐기고 살려면 30억이 적절한 수준일 것이다. 수준 높은 식생활은 지구인구 모두가 갈망하는 바이다. 따라서 지구가 수용할 수 있는 적정인구는 이미 초과하였다고 보아도 과언이 아니다. 전세계 인류가 영양분이 많고 질 좋은 음식을 섭취하며 쾌적한 환경에서 행복하게 살기 위해서는 인구를 억제하는 일이 가장 우선적으로 필요한 일이다.

(4) 도시화

증가된 인구가 한 곳으로 모여 거대 도시를 형성하는 현상을 인구의 도시 집중화라 한다. 대도시에서의 생활은 여러 가지로 편리한 점이 많다. 백화점, 영화관, 음식점, 서점, 학교 등 여러 가지 일상생활의 편익시설이 도시에 모여있다. 또한 정보의 교환도 빠르다. 경제가 발전하면서 농촌인구가 도시로 이동하는 현상은 공통된 추세이다. 농촌에서 농사를 짓기보다는 도회지에서 직장생활을 하며 살아가기를 대부분 원한다. 자녀를 훌륭하게 가르치고 문화생활을 즐기며 편리하고 행복하게 살기를 원하는 것은 인간의 본성과도 연결되어 있는 자연스러운 현상이라고 볼 수 있다.

세계적으로 100만 이상이 사는 거대도시는 인구 2600만의 도쿄를 비롯하여 10개 이상이다. 서울도 인구 1000만명 이상의 거대도시이다. 대도시의 생활은 위에 열거한 여러 가지 장점도 있지만 최근에는 많은 부작용이 나타나고 있다. 소음공해와 대기오염은 도시생활에서 피할 수 없다. 높은 인구밀도와 차량과밀에서 오는 교통혼잡, 대자연과 접할 수 있는 휴식공간의 부족, 범죄의 만연, 치열한 경쟁관계에서 오는 각종 스트레스, 좌절된 인간관계에서 오는 소외감, 고독감 등은 도시생활에서 느낄 수 있는 공통점이다.

캘훈(Calhoun)은 인구가 과밀되면 어떤 현상이 벌어질까 예측해보기 위하여 쥐를 대상으로 실험하여 보았다. 300평 면적의 사방이 막힌 공간에 먹이를 충분히 주고 쥐를 길러보았다. 그 결과 쥐는 최대 5천 마리까지 불어날 수 있었는데 그 후 새끼들의 사망률이 급격히 증가하여 쥐의 수는 150마리로 일정치를 유지하였다. 쥐의 개체수가 급격히 증가하여 쥐 밀도가 높아지자 비정상적인 거동을 보였다. 어미쥐는 집을 짓지 않고 새끼는 자주 유산되었다. 수컷이나 암컷이나 다 동성애적인 행동이 나타났다. 강한 수컷쥐는 약한 암컷쥐를 잡아먹기도 하는 살벌한 사건이 나타나는 등 쥐 사회에 대혼란이 일어났다.

오늘날의 대도시에서도 이와 같은 동물사회와 유사한 사건이 일어남을 부인할 수 없을 것이다. 최근 서구에서는 탈 도시화 현상이 나타나고 있다. 직장은 도시에 있지만 집은 교외에 두어 자연과 더불어 살고자하는 생각 때문일 것이다. 도시는 인공생태계이기 때문에 자연생태계와 근본적으로 다르다. 도시는 생명의 근본 모태인 토양이 아스팔트와 콘크리트로 단절된 불안정한 생태계이다.

제5장 식량자원과 환경

5.1 식량 자원

(1) 경작지와 곡물생산

지구표면의 약 1/3에 해당하는 130억 헥타(hectare, ha. 1ha.=1만 평방미터)가 육지이다. 어류를 제외한 대부분의 식량과 원자재는 육지에서 얻고 있다. 육지의 전체면적 중에서 삼림은 31%, 초지는 25%, 경작지는 11%를 차지하고, 기타 황무지, 사막, 도시가 33%의 면적을 차지한다. 따라서 곡물 생산에 이용되는 면적은 11%에 불과하다.

인류가 최초로 농업을 시작한 때부터 1950년까지는 경작지 면적의 확대와 인구증가가 어느 정도 균형을 이루어 왔으나 1950년 이후부터는 불균형이 시작되어 인구증가율에 비례한 경작지 증가율은 둔화되었다. 그래도 종자개량, 비료와 농약의 투입, 영농의 기계화로 인해 1984년까지는 곡물생산량이 전 세계적으로 크게 증가(1950년에 비하여 2.6배)되었다. 그러나 그 후 곡물생산량 증가속도(1989년에는 1984년에 비해 겨우 1% 증가)는 크게 둔화되어 인구증가를 고려하면 오히려 7% 정도 감소하였다. 이러한 감소 추세는 현재도 계속되고 있다.

인구 증가율에 비해 곡물생산량이 둔화되면서 식량 수급이 충분하지 못하게 되었다. 따라서 1990년대 후반부터 아프리카 등의 저개발 국가는 기아에 허덕이는 상황에 이르게 되었다. 1999년 현재 지구상에는 세계인구의 3분의 1에 해당하는 20억 정도의 인구가 기아와 영양실조로 시달리고 있는 것으로 나타났다. 기아와 영양실조는 단지 인간의 신체적 성장뿐 아니라 정신발달도 저해하며 질병에 대한 저항을 악화시키고 유아사망률도 높이고 있다.

FAO에 의하면 전세계적으로 500만명의 유아가 영양실조에 의한 질병에 시달리고 있다고 한다. 북한도 식량이 부족하여 많은 국민이 굶주리고 있으며 한국을 비롯한 여러 나라에서 식량을 원조하고 있다. 농업 전문가들은 이와 같은 전세계적 식량부족 현상이 앞으로도 계속 확산될 것으로 보고 있다.

선진국 가정에서는 전체 가계 수입의 20% 미만이 식비로 지출되며 식생활의 질도 아주 우수하다. 그러나 빈곤한 나라들은 전체 수입의 70% 이상을 식비로 지출하지만 식생활의 질이 나쁘다. 미국, 캐나다, 호주 등의 부유한 나라들은 소수의 사람이 기계화된 영농 방식으로 식량을 대량 생산한다. 이들 국가는 자신들이 사용하고 남는 잉여식량 대부분을 수출하고 있으며 가난한 나라에 무상으로 일부를 제공하기도 한다.

인구밀도가 높으며 가난한 나라는 자국에서 생산되는 식량이 부족하다. 따라서 부족분을 수입에 의존하나 경제사정이 열악하여 수입할 돈이 부족하므로 이들 국가의 많은 사람들은 배고픔을 견디지 못하고 있다. 실제로 지구 전체 인구의 5분의 3은 빈곤층이며 5분의 1은 극

빈층에 속한다.
밝은 미래사회를 위하여 오늘날 인류가 해결해야 할 가장 절실한 과제는 어떻게 하면 지구의 전 인구가 풍족하게 먹고 살 수 있게 할 수 있겠느냐는 것이다. 그런데 곡물생산이 가능한 지구촌 면적이 한정되어 있고, 아직까지 인구증가에 비례하여 단위면적당 식량생산을 증가시킬 수 있는 획기적인 방법도 없기 때문에 인구증가를 억제하는 방법 외에 다른 해결책은 당분간 없을 것 같다.

(2) 식량증산

인간이 가장 많이 필요로 하는 식량은 쌀, 밀, 옥수수 등의 곡물이다. 세계적인 동향을 살펴보면, 아시아는 제2차 세계대전 전까지는 식량의 수출국이었으나 현재는 식량이 부족하여 수입하고 있다. 그리고 러시아를 비롯한 동구도 식량의 자급자족이 가능했으나 현재는 식량 수입국으로 바뀌고 있다. 캐나다, 미국, 오세아니아 등은 주요 식량생산국이다. 극동아시아와 라틴아메리카는 필요한 식량의 대부분을 수입에 의존하고 있다.
늘어나는 지구인구를 먹여 살리려면 앞으로 20년 내에 약 50% 정도의 식량증산이 필요하다고 한다. 식량을 증산하는 방법은 경작지를 확장하거나 또는 단위면적당 생산량을 늘리는 것이다.
첫째, 식량증산을 위해 경작지를 확장하는 방법이다. 경작지를 확장하기 위해서는 새로운 토지를 개발하여야 한다. 그런데 현재의 상태에서 경작지로 쓸 수 있는 토지는 대부분 개발이 되어 이미 경작지로 쓰이고 있다. 특히 남부아시아, 동부아시아, 동부 및 북부아프리카, 남미의 일부지역은 남아있는 가용경작지가 거의 없다고 한다.
사막은 앞으로 경작지로 개발될 가능성이 큰 곳이다. 그러나 사막은 기온, 강수량, 지형 등의 자연적 요인이 농산물생산에 저해요인이 되므로 이를 극복할 수 있는 기술의 개발이 필요하다. 최근 관개에 의해 경작지화되고 있는 사막의 대표적인 곳은 나일강과 콜로라도강 유역이다. 스텝은 강수량보다 수분증발량이 많아 건조대로 남아있는 지역이다. 이곳은 미래의 개발가능지역이며 저위도에서는 목축, 중위도에서는 상품작물, 고위도 일부에서는 밀, 콩 등의 재배가 가능할 것으로 보인다. 이와같이 식량증산을 위한 경작지의 신규개발은 지구라는 한정된 면적(지표면)에서의 개발가능지역에서만 가능하기 때문에 한계가 있다.
둘째, 식량증산을 위해 단위면적당 생산량을 늘리는 방법이다. 단위면적당 생산량을 높이는 방법으로는 종자개량, 과학영농 등을 들 수 있다. 과학기술의 발달은 식량 생산량의 획기적 증가를 가져왔다. 이른바 다수확 품종의 종자가 개발되고, 아울러 화학비료와 농약이 대량 생산되면서 단위면적당 곡물 생산량은 크게 증가하였다. 이른바 녹색혁명(green revolution)이라고 부르는 종자개량이다. 밀과 옥수수의 다수확품종 개발은 1941년 멕시코에서 시작되었다. 다수확종자를 화학비료와 농약을 사용하여 육종한 결과 옥수수는 2배, 밀은 3배가 증산되었다. 이러한 성공에 고무되어 아시아에서는 1962년 필리핀에 국제 벼연구소가 설립되었다. 이 연구소에서는 록펠러 재단 등의 지원하에 다수확 품종의 벼를 개발하였다. 1975년부터 우리나라에 보급되었던 다수확 품종인 통일벼(일반벼에 비해 30~50%의 수확량 증가)

는 여기서 개발된 볍씨를 우리나라 토양에 맞게 개량한 것이며 쌀의 자급에 큰 기여를 하였다.
최근에는 유전공학의 발달로 농작물의 줄기를 마음대로 늘리거나 줄이고 냉해, 한해에 잘 견디는 종자를 만들어내었고 줄기에서는 토마토가 뿌리에서는 감자가 열리는 기적의 식물을 만들어 내기도 하였다.
단위면적당 수확량을 늘리기 위한 또 다른 방법으로 다모작영농과 기계화가 있다. 다모작영농에는 많은 노동력과 비료, 농약 그리고 기술이 필요하다. 특히 열대, 아열대 지역에서 이러한 영농이 실효를 거두고 있다. 기계화영농은 선진국에서 많은 실효를 거두고 있으나 후진국에서는 농가가 영세하고 농지규모가 적어 기계화가 늦어지고 있다.
생태학적인 면에서 살펴보면 개량종자(신품종)는 아직 여러가지 문제점을 안고 있다. 세계인구의 절반 이상이 주식으로 사용하는 쌀의 경우를 예로 들어보자. 야생벼는 잎과 줄기 등 자기보호를 위해 남겨두는 부분이 커 수확비율이 1 대 4 이다. 그러나 육종된 벼는 수확비율이 4 대 1 정도이다. 수확비율이란 경작식물의 먹을 수 있는 부분에 대한 먹을 수 없는 부분의 비율이다. 따라서 육종된 벼는 쌀알에 비해 잎과 줄기가 차지하는 비율이 적으므로 스스로 거친 환경에서 살아가는 힘이 약하다. 그러므로 신품종인 육종된 벼는 야생벼에 비해 훨씬 많은 양의 비료와 농약을 사용해서 재배해야 한다.
토양에 뿌려지는 엄청난 양의 화학비료와 농약은 점점 토양을 황폐화시키고 지력을 떨어뜨려 이제는 토양의 식량 생산력을 감소시키는 방향으로 작용하고 있다. 막대한 양의 화학비료 사용은 영양염을 토양에 과다하게 노출시켜 그들이 강이나 호수 및 댐으로 흘러들어가 부영양화의 현상을 초래함으로써 수질오염을 가중시키고 있다.
농약의 사용에 의한 환경오염은 우리에게 심각한 충격을 더해주고 있다. 그동안 사용되어왔던 대부분의 농약이 내분비계 장애물질로 알려진 환경호르몬으로 최근밝혀졌기 때문이다. 이들 농약은 토양에서 그리고 강이나 호수, 바다로 흘러들어가 가축 및 어류 등에 축적되어 먹이사슬을 따라 결국은 인체로 유입된다.

(3) 우리나라의 식량사정

우리나라는 1962년 실시된 경제개발 5개년 계획으로 고도성장을 이룩했으나 농업부문의 성장은 미미하다. 또한 GNP 중 농업부문의 비중이 점차 낮아지고 있는데 1960년에 약 40%에 달하던 것이 1990년에는 10% 이하로 떨어지고 있다. 그리고 도시화 및 공업화로 농경지가 비농업분야의 토지로 바뀌고 있어 농경지가 계속 감소하는 추세이다.
그런데 소득수준의 향상에 따라 식품소비구조는 고급화되고 또 다양화되었다. 예를 들면, 1970년 당시의 곡물소비는 219.4kg이었으나, 1990년 곡물소비량은 120.8kg으로 감소하였고 채소류는 59.5kg에서 두배 이상 증가하였으며 육류도 8.3kg에서 세배 이상, 우유는 1.8kg에서 20배 이상 증가하였다. 식품소비의 양적 증가와 병행해서 질적인 면에서도 크게 개선되었는데, 1일 1인당 열량섭취량은 1965년의 2,165kcal에서 1950년 2,600kcal로 증가하였고 열량섭취 중 동물성식품이 차지하는 비중이 크게 늘어났다.

그 동안 곡물의 자급률은 곡물생산증대에도 불구하고 인구증가가 계속되어 떨어졌다. 1965년의 자급률은 약 94%였으나, 1990년대에는 40%대로 떨어졌다. 특히 밀, 옥수수, 콩 등은 거의 대부분을 수입에 의존하고 있다. 곡물 수입을 위해 1981년에는 22억 달러가 지불되었으나, 1990년대에는 100억 달러를 상회하고 있다. 2000년 이후에도 인구가 계속적으로 증가한다면 곡물 수입은 더욱 늘어날 것이다.

식량자급을 위해서는 첫째, 해안간척, 산 및 황무지를 개간하여 경작지를 늘리고 현재 감소하고 있는 농지를 보호해야 한다. 둘째, 종자개량, 과학영농 등으로 단위면적당 생산량을 증가시켜야 한다. 셋째, 미생물, 곤충, 단세포식물에서 직접, 간접으로 부족한 단백질을 보충할 수 있는 연구가 필요하다. 또 유전공학을 발전시켜 소, 돼지 등 가축을 더 크게 키울 수 있는 연구가 계속되어야 한다. 그러나 이러한 연구는 환경을 오염시키지 않고 생태계의 균형을 파괴시키지 않는 범위 내에서만 이루어져야 할 것이다.

5.2 비료와 농약

(1) 화학비료의 사용

과거 수세기 동안 전통적으로 전세계 농민들은 질이 좋은 농작물을 지속적으로 생산하기 위해 자연적인 유기 비료를 사용하여 왔다. 퇴비나 가축의 배설물을 농경지에 뿌려 토양을 비옥하게 만들었다. 그러나 유기 비료들이 어떤 화학반응에 의해 식물의 성장을 촉진하는지는 알지 못했다.

1840년 독일의 화학자 리비히(Justus von Liebig)는 농작물을 경작하고 난 토양에서 작물에 의해 흡수되어 사라진 영양염들을 화학적으로 보충하여 줄 수 있음을 밝혔다. 이러한 발견이 있은 후 인공적으로 화학비료를 만들 수 있는 기술이 개발되어 식물 성장에 필수적인 질소, 인, 칼륨 등이 비료로 생산되어 공급되었다. 오늘날 생산되는 비료성분 중 인과 칼륨은 암석에서 얻고 있으며, 질소는 화학적으로 합성하여 얻는다. 인공 암모니아는 하버-보쉬(Harber-Bosch)공정에 의해 대기중의 질소와 천연가스 속의 수소를 반응시켜 제조한다.

$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$$

이 공정에 의해 만들어진 암모니아는 물에 녹여 농경지에 뿌려진다. 화학비료는 농작물의 종류에 따라 여러가지 비율로 혼합해 대량 생산되어 상품으로 팔리고 있다.

(2) 농약의 사용과 독성

비료와 더불어 농산물의 수확량을 늘리기 위해 살충제, 살균제, 제초제 등의 농약을 대량으로 사용하게 되었다. 따라서 농산물에 농약이 잔류되어 심각한 문제를 일으키고 있다. 우리나라 환경부에서 환경호르몬인 내분비계 장애물질로 분류한 67종 중에서도 농약이 41종이

나 된다. 농약은 그 독성과 잔류성으로 인해 환경을 크게 오염시키는 물질이다. 농약은 화학구조에 따라 대략 유기염소계, 유기인산계, 그리고 카바메이트계 농약으로 분류할 수 있다.

<유기염소계 농약>

DDT, BHC, 알드린(aldrin), 다이엘드린(dieldrin), 엔드린(endrin), 헵타클로르(heptachlor), 클로르단(chlordane) 등의 살충제와 2,4-D 등의 제초제는 유기염소계 농약이다. 농민은 농약을 경작지에 살포하는 과정에서 농약에 직접 노출될 수 있다. 이들 농약에 직접 노출되면 뇌에 작용하여 두통, 현기증, 메스꺼움, 구토, 근육경련, 의식장애를 유발한다. 토양에 살포된 농약은 토양에 잔류하여 식물에 흡수됨으로서, 또는 하천, 해양에 유입되어 생물농축된 어패류를 통하여 인체로 유입되어 건강장애를 일으킬 수 있다. 다이알드린, 클로르단, 헵타클로르는 동물실험에서 간암을 유발시켰다. 또한 DDT의 분해산물인 DDE는 발암성물질이다.

이들 농약은 현재 대부분 사용금지 되었으나, 과거에 만들어진 분해산물들이 곳곳에 아직도 잔류하고 있다. 식품에 농축된 유기염소계 농약은 체내의 지질이 많은 조직에 축적되어 지혈증, 지방간, 신경장해, 이상반사 등을 일으킨다. BHC는 DDT에 비해 살충효과가 훨씬 빠르게 나타나는 강력한 살충제이다. 겨울이나 봄에 땅 속에 있는 벌레를 없애거나, 농작물의 해충에 사용되며 싼 가격 때문에 아직도 일부 국가에서 사용되고 있다. 인체에서는 신경계에 작용하여 호흡곤란, 흥분 등을 유발한다.

우리나라에서는 DDT와 BHC를 1972년, 1974년에 각각 사용 금지시켰으나 중국 등 동아시아에서는 아직도 사용되고 있는 경우가 있으므로 이들 국가에서 수입되는 농산물에 대해서는 철저한 검사가 필요하다.

<유기인산계 농약>

파라치온(parathion), 말라치온(malathion), 다이아지논(diazinon) 등은 대표적인 유기인산계 농약이다. 이들 농약은 독성이 크고, 신경을 과잉자극시킴으로써 구토, 구역질, 오한, 근육경련을 일으키게 하고, 사망에 이르게 할 때도 있다. 유기인계는 신경전달물질인 아세틸콜린(acetylcholine)을 분해하는 효소인 아세틸콜린 에스테라아제의 활성을 억제한다. 파라치온은 살충력이 우수하나 포유동물에 대한 독성이 크기때문에 사용이 금지되었다. 말라치온은 포유동물에 대한 독성이 비교적 낮고, 곤충에 선택적으로 살충효과를 나타내므로 최근에 많이 사용되고 있다. 유기인계농약은 가수분해가 잘되므로 유기염소계 농약과 달리 심각한 환경오염을 일으키지 않고 먹이사슬을 통해 들어오는 경우도 거의 없어 널리 사용되고 있다.

<카바메이트계 농약>

카바릴(carbaryl)과 카보퓨란(carbofuran) 등이 유기질소화합물인 카바메이트계 농약(carbamates pesticides)이다. 잔디나 정원에서 널리 사용되는 카바릴 살충제는 포유동물에

게는 독성이 적다. 수용성이 큰 카보퓨란은 식물의 뿌리나 잎으로 흡수되었다가 잎을 먹고 사는 곤충을 죽게 한다. 이들 카바메이트계 농약은 그 분해물이 운동마비, 다발성 신경염, 신장장해, 간장해 등을 일으키고 발암성이 있다고 알려져 있다. 유기인계와 마찬가지로 카바메이트계의 작용도 콜린에스테라아제를 저해한다.

5.3 식품과 환경

(1) 조리과정에서 발생되는 독성물질

식품에는 원래 존재하지 않았더라도 조리하는 과정에서 유독물질이 새로 생성되어 인체에 해로운 효과를 나타낼 수 있다.

<열처리>

식품을 굽는 과정에서 생성될 수 있는 물질 중 가장 문제시되는 것은 다환방향족탄화수소들(polycyclic aromatic hydrocarbons)이다. 특히, 육류나 생선 등의 단백질이 풍부한 식품을 숯불로 구울 때 다양한 종류의 다환방향족탄화수소들이 생성된다. 벤조피렌(benzopyrene)은 그 중의 한가지로 발암물질이다. 벤조피렌은 불에 굽거나 훈제할 때 보통 1ppb를 훨씬 초과하는 양이 생성된다. 이를 쥐에게 투여하면 간이나 폐에 암을 유발한다. 또한 높은 온도에서 과도하게 구워져 타게되면 오쏘메틸아릴아민(*ortho*-methylarylamine)이 생성되는데, 이 물질은 유방암과 결장암을 일으킬 수 있다.

유지는 가열되면 보통의 지방산보다 분자량이 큰 중합체들을 생성한다. 이러한 중합체들은 성장저해와 관련이 있다. 옥수수기름을 가열하여 쥐에 투여한 결과, 쥐의 성장률이 옥수수기름을 가열한 시간과 반비례하는 것으로 나타났다. 가열 산화된 유지 중에서 가장 독성을 나타내는 것은 산화과정에서 생긴 과산화물의 산화분해생성물들이다. 이 화합물들이 함유된 유지는 동물실험에서 뚜렷한 독성 효과를 나타냈다.

또한, 식품을 오래 보존하고 맛을 내기 위해서 햄이나 소시지 등을 만들 때 훈제처리를 하는 경우가 많다. 다환방향족탄화수소가 훈제처리 공정에서 발생하기 때문에 훈제한 양고기의 표면에서 종종 벤조피렌이 검출되고 있다. 아이슬랜드 지방사람들이 위암 발생률이 높은 이유는 훈제한 양고기나 생선을 주식으로 하기 때문인 것으로 알려져 있다.

<발효>

젓갈을 만드는 과정에서는 나이트로사민류(nitrosamines)가 생성될 수 있다. 발암물질인 나이트로사민은 산성조건에서 2차아민(secondary amine)과 아질산의 반응으로부터 생성된다. 어패류에는 아민이 다량 존재하는데 그 중에서 가장 많이 존재하는 것은 다이메틸아민으로 어류의 알에는 100~300ppm이 함유되어 있다. 동물실험에 의한 연구 결과 100여 가지의 나이트로사민 중에서 약 80% 정도가 암을 유발할 수 있는 것으로 나타났다. 나이트로사민을 섭취하면 보통 간암을 일으키게되며, 소화기계통의 장기에도 암을 유발할 수 있다.

(2) 보존 및 유통과정에서의 오염

<곰팡이독>

땅콩, 쌀, 옥수수 등의 작물에 서식하였던 곰팡이가 작물을 수확하여 보존할 때 온도 및 습도가 적절하면 곰팡이독을 생성한다. 아스퍼질러스 속에 속하는 곰팡이들은 아플라톡신(aflatoxin)이라는 독소를 만든다. 아플라톡신은 여러 종류의 동물 및 사람에게 급성 독성을 나타내고, 발암성도 있는 것으로 알려졌다. 아플라톡신은 간에 특히 독성을 발휘하는 간암 유발물질이다. 쥐에게 0.1ppm의 아플라톡신을 80주 먹였을 때 간암발생이 50%이상 증가하였다. 아플라톡신의 허용한도는 미국이 20ppb이고, 한국은 10ppb 이다. 가정에서 직접 제조한 간장, 된장 등의 전통 장류식품에서 검출된 바 있어 주의를 요한다.

<병원균오염>

병원성 미생물에 오염된 식품을 섭취하면 식중독이나 세균감염, 바이러스감염 등을 일으킬 수 있다.

영국에서 만연되었던 광우병은 1986년 최초로 보고되었고 1996년까지 빈번히 발생되었다. 광우병은 소에 감염되는 병이지만 사람이 이병에 감염되면 크로츠펠트 아콥병이라는 무서운 병을 일으킬 가능성이 있다는 발표 후 전세계에 광우병의 공포가 확산되었다. 1996년에 영국정부는 광우병 공포로 약 130만 마리의 소를 모두 태워버린 적이 있다. 이 병에 걸린 소로부터 생산된 우유는 유해하지 않은 것으로 보고되었으나 일단 동물이 광우병에 걸리면 즉시 도축하고 그 우유도 폐기하도록 조치되고 있다.

1996년 일본에서는 소위 O-157 대장균에 의한 집단식중독으로 1만2천 명의 환자가 발생하고 12명이 사망하는 사건이 발생했다. O-157 대장균은 살균되지 않은 우유나 덜 익혀진 소고기 등을 통해 사람에게 유입되며, 일반 대장균과는 달리 강력한 독소를 생성한다. 감염이 진행되면 탈수증상, 혈변, 부종, 경련 등을 일으키며 혈액을 따라 독소가 온 몸에 퍼지고 적혈구의 기능을 마비시켜 심한 경우에는 사망한다. 그러나 O-157 대장균은 열에 매우 약하여 64°C 이상에서 10초 동안 가열하면 모두 사멸된다. 우리나라에서는 O-157대장균에 의한 환자가 발생된 사실은 없으나, 식품의약품안전청에서 수입 소고기 등에서 O-157 대장균이 검출된 적은 있다.

제6장 광물/에너지자원과 환경

자원이란 어떤 목적에 이용할 수 있는 물자나 인재로서 인간에게 유용하게 이용될 수 있어야만 그 존재가치가 있다. 따라서 인간의 기호변화, 과학기술의 발달, 경제수준의 향상으로 가치가 있는 유용자원의 종류는 변하고 있다. 지금부터 100년 전에는 석유가 쓸모없는 자원이었다. 그러나 석유는 현재 인류 에너지자원의 중심이 되고 있다. 1930년대에 우라늄은 캐나다의 광산에서 가장 쓸모 없는 쓰레기로 취급되었으나 현재는 원자력발전의 원료로 중요하게 사용되고 있다.

석기시대 초까지는 인간이 얻을 수 있는 주 에너지자원은 태양이었다. 즉, 광합성을 통해 만들어진 식물을 직접 먹거나 이들을 먹이로 사는 어패류나 조류, 동물을 섭취함으로서 간접적인 방법으로 삶에 필요한 에너지를 얻었다. 원시산업이 발달하면서 인간은 육체적인 힘보다 더 큰 에너지를 필요로 하게 되어 목재연료, 풍력, 수력 그리고 화석연료인 석탄, 석유, 천연가스를 사용하게 되었고, 이제는 우라늄까지 에너지원으로 사용하기에 이르렀다.

화석연료인 석탄이 에너지원으로 광범위하게 사용되기 시작한 것은 약 300년 전이며, 석유와 천연가스는 그 후에 사용되었다. 이들 화석연료를 사용하면서 철, 알루미늄, 구리, 금, 은, 납, 주석 등 광물자원을 대규모로 제련할 수 있게 되었다. 또한 19세기말부터는 전기의 발명으로 에너지사용의 질을 한차원 높이게 되었다.

현대사회가 요구하는 필수품인 식품, 의복, 가전제품, 건물, 자동차는 에너지를 사용함으로서 생산, 공급되며 조명, 난방, 가전제품 사용, 교통수단은 에너지를 사용해야 작동이 된다. 좀 더 부유한 미래사회가 요구하는 필수품과 사치품을 얻기 위해서는 더 많은 에너지가 필요할 것이다. 이와 같이 인간은 지구상(지각)에 존재하는 에너지자원(화석연료)과 광물자원을 효과적으로 사용함으로서 현대사회로 발전하게 되었다.

자원은 사용하면 수십년 이내에 재생이 가능한 재생자원(순환자원)과 재생되는데 최소 수백만년 이상이 소요되는 비재생자원(비순환자원)으로 구분할 수 있다. 곡물, 가축, 물고기, 산림 등의 생물자원은 재생자원이다. 그러나 화석연료인 석유, 석탄, 천연가스 등의 에너지자원과 철, 알루미늄, 구리 등의 광물자원은 무생물자원으로 비재생자원이다. 따라서 에너지 및 광물자원은 한번 사용하면 재생이 불가능하므로 궁극적으로는 고갈된다. 향후 자원고갈의 진행정도에 비례하여 인류는 화석연료를 대신할 새로운 에너지원의 개발과 광물자원의 재활용 및 대체물질의 개발에 인적, 물적 비용을 투자하게 될 것이다.

6.1 광물자원과 환경

(1) 광물자원

지구의 내부는 양파의 속 같이 조성과 성질이 다른 여러 개의 층으로 이루어져 있다. 지각

(crust)은 지구의 표면에 위치하고 있으며 두께는 평균 35km 정도이다. 그 아래로 2,900km까지를 우리는 맨틀(mantle)이라고 한다. 지하 2,900km부터 지구중심부까지를 핵(core)이라고 하는데, 핵은 외핵과 내핵으로 구분된다. 외핵은 2,280km까지를 말하며 액체로 되어 있고, 내핵은 지하 2,280km부터 지구중심까지로 그 반지름은 1,190km이다.

인류가 사용하는 광물자원은 지각에서 채굴된다. 지각은 대부분 광물질(mineral)을 포함하는 암석으로 이루어져 있다. 광물질의 종류는 약 2천여 종으로 알려져 있으나, 지각은 25개 정도의 암석형성 광물질로 구성되어 있다. 지각층에는 석영(SiO_2) 또는 장석($KAlSi_3O_8$)과 같은 규산염 광물이 가장 많다. 따라서 지각에 포함된 원소는 질량비로 산소가 47.3%, 규소가 29.1%나 된다. 이 두 원소를 합하면 지각에 포함된 전체원소의 4분의 3에 해당한다.

산소와 규소를 제외하고 지각에 들어있는 함량이 1.0% 이상인 원소는 알루미늄(8.1%), 철(4.7%), 칼슘(3.3%), 나트륨(2.5%), 칼륨(2.5%), 마그네슘(1.7%), 망간(1.0%)이며 이들을 주성분원소라고 부른다. 그리고 함량이 1.0~0.1% 사이인 원소를 부성분원소라고 하는데 부성분원소로는 티탄(0.4%), 망간(0.1%)이 있다.

함량이 0.1% 이하 즉, 100ppm 이하인 원소는 미량원소라고 한다. 미량금속원소에는 크롬(100ppm), 아연(80ppm), 니켈(75ppm), 구리(50ppm), 코발트(25ppm), 납(10ppm), 몰리브덴(1.5ppm), 텅스텐(1ppm) 등이 포함된다. 지구화학 탐사에서는 이들 미량금속원소의 분포가 주요 관심의 대상이 되고 있다. 미량원소 중에서 비금속으로는 인(0.09%), 불소(0.06%), 황(0.03%), 탄소(0.02%) 등이 포함된다. 이밖에 우라늄은 2.5ppm, 중금속인 카드뮴은 0.1ppm, 수은은 0.02ppm 들어있다. 귀금속인 금과 은은 각각 0.003ppm과 0.05ppm 들어있다.

광물자원은 미량원소라도 지각 중에 존재하는 총량을 추산하면 어마어마한 양이다. 예를 들어 귀금속으로 사용되는 금은 지각 중에 질량비로 0.003ppm(1ppm : 백만분의 1)이 들어있어 미량 존재하는 원소이지만 그 총량을 추산하면 4백억 톤 이상이다. 그러나 자원으로서의 가치가 있는 양은 제한되어 있다. 자원으로서 경제적 가치가 있는 것은 현재의 과학기술 수준으로 채굴이 가능한 정도의 광맥에서 경제성이 있는 정도의 품위를 가진 금광석이며, 이들만 가치가 있어 채굴될 뿐이다.

현재 대부분의 광물자원은 풍부한 것 같지만, 세계적인 수요와 공급을 고려할 때 몇 종류는 공급이 달리고 있다. 철, 알루미늄, 마그네슘, 크롬, 티탄, 망간은 풍부한 편이지만, 구리, 주석, 납, 니켈, 안티몬, 몰리브덴 등은 부족한 금속이다.

(2) 매장량

광물자원의 대규모 소비는 산업혁명과 더불어 시작되었다. 철은 전세계적으로 가장 많이 쓰이는 금속으로 각종 기계류와 콘크리트 건물의 내부, 자동차 등에 사용된다. 철 다음으로 중요한 금속인 알루미늄은 가볍고 녹이 슬지 않아 항공기 제작에서부터 음료수 용기에 이르기까지 여러 용도로 사용된다. 그 밖에 구리는 전선에 이용되며, 아연은 금속의 부식방지를 위한 코팅, 납은 밧데리에 사용되는 등 다양하다.

철은 1709년 다비(A. Darby)가 용광로를 개발한 이후, 제철의 연료로 목탄 대신에 석탄이 쓰이기 시작한 1789년부터 본격적으로 상품화되기 시작했다. 철의 수요는 생활의 향상, 과학기술의 발달 등으로 계속 늘어나 철 소비량은 이제 그 나라의 경제발전을 평가하는 수단이 되기도 한다. 국민 1인당 철 소비량이 가장 많은 나라는 미국, 스웨덴, 독일, 일본 등이다. 철광석 매장량은 러시아, 인도, 브라질, 베네수엘라, 칠레, 페루, 서부아프리카, 오스트레일리아, 캐나다 등이 풍부한데 러시아를 제외한 미국, 일본, 독일, 한국 등 세계적인 철광석 제련국가는 매장량이 많은 이들 나라로부터 철광석을 수입하고 있다.

철은 지각에 약 4.7% 존재하는 풍부한 자원이다. 철을 생산하는데 필요한 철광석은 가격이 저렴하지만 부피가 크고 무거워 다른 광석보다 운반비가 많이 든다. 그렇기 때문에 비록 양질의 철광석을 가진 광산이라 할지라도 교통이 불편한 곳에 매장되어 있는 경우에는 개발이 되지 않았다. 그러나 현재는 경제발전에 따라 철의 수요가 많아져 교통이 불편한 곳에서도 채굴을 하고 있다. 따라서 단위당 생산비가 계속 오르고 있다. 현재까지 조사된 바에 의하면 철광석의 평균 가채년수는 240년이며 소비량의 증가를 감안한 실제 가채년수는 93년이다.

알루미늄은 지각에 약 8.1% 존재하는 풍부한 자원이다. 현재까지는 고품질의 알루미늄 광산만 채굴되고 있으나 최근 소비가 계속 늘어 앞으로는 저품질의 것도 개발될 것이다. 알루미늄은 오스트레일리아와 같은 선진국에서 전체의 절반을 생산하고 나머지는 아프리카, 카리브 연안에서 생산된다. 알루미늄은 평균 가채년수가 100년이고 소비를 감안한 실제 가채년수는 31년에 불과하다.

망간은 지각에 풍부히 존재하는 자원(1.0%)이며, 합금광물의 하나로 제철공업에 없어서는 안될 중요한 금속이다. 철 1톤을 생산하는데 약 7kg의 망간이 필요하다. 망간은 지리적 분포가 균등하지 않아 생산국과 소비국이 일치하지 않는다. 망간을 많이 생산하고 있는 나라는 구 소련지역으로 전체의 절반 정도를 생산하며 나머지는 아프리카(남아프리카, 모로코, 가나 등)와 인도 및 태평양연안에 위치한 아시아지역에서 생산된다. 망간은 평균 가채년수가 97년이며 소비의 증가를 감안한 실제 가채년수는 46년이다.

크롬은 제강공업에 쓰이는 합금광물이다. 지각에 존재하는 양은 적지만 세계적인 수요를 감안할 때 풍부한 금속이다. 크롬광석의 80% 정도가 남아프리카, 소련, 터키, 로렌시아, 필리핀 등지에서 생산된다. 망간의 평균 가채년수는 420년, 수요를 감안한 가채년수는 95년에 달한다.

희귀한 광물자원 중 가장 대표적인 것이 금과 은이다. 금은 가채년수가 9년에 불과하고 생산이 수요를 따르지 못하여 가격이 계속 상승하고 있다. 남아프리카공화국에서 전체의 3분의 2에 해당하는 양을 생산한다. 은은 가채년수가 13년에 불과하며 금과 마찬가지로 공급량은 줄고있으나 수요는 계속 늘어 가격이 꾸준히 상승하고 있다. 은은 도금, 사진필름 제조 등에 많이 쓰인다. 금과 은은 귀금속으로 산업용 이외에도 보석으로 많이 쓰인다.

한국은 1945년 이전에는 텅스텐, 흑연, 철 등의 원광석을 수출했으나 현재는 기술개발과 고도의 경제성장으로 인하여 많은 자원을 해외로부터 수입하고 있다. 특히 철광석은 100% 수

입에 의존하고 있다. 우리나라에 부존되어 있는 광물자원으로는 석탄, 동광, 납, 텅스텐, 흑연, 고령토, 석회석 등이 있다. 그 중에서 석회석만 가채년수가 300년 이상이고 고령토, 텅스텐, 동광 등은 겨우 50년을 넘고 있다. 그러나 석탄, 흑연, 아연, 등은 가채년수가 각각 50년 이하이다.

(3) 환경문제

광물자원의 개발과 관련된 환경문제는 광산개발, 선광작업, 제련과 관련되어 일어난다. 이 과정에서 발생하는 환경오염은 폐석의 발생에 의한 수질오염과 제련시 발생하는 대기오염으로 나눌 수 있다. 첫째로 수질오염과 관련된 문제이다. 광물자원은 광산에서 채굴되어 선광하고 제련해야 쓸 수 있는 물질이 된다. 이 과정에서 엄청난 양의 폐기물 즉, 폐석이 발생하는 것이 가장 큰 문제이다. 지하에서 채굴되는 광석의 평균품위를 살펴보기로 하자. 고품위광석은 철, 알루미늄, 망간, 크롬, 산화칼륨, 인산염 등이다. 이들 광석은 평균품위가 9%에서 40% 사이로 세계에서 채굴되는 광석 총량의 3분의 1만을 차지한다. 그런데 이들 광석을 제외한 구리, 금, 납, 니켈, 주석, 텅스텐 등은 평균품위가 모두 2.5% 이하로 저품위광석에서 얻어지고 있으며, 채굴되는 광석 총량의 3분의 2나 차지하고 있다. 예로서, 1991년에 세계에서 구리금속 9백만 톤을 생산하는데 채취된 구리원광석은 10억 톤이었다. 이 경우 폐석의 발생량은 9억 9천만 톤이나 되었다. 채취된 구리 원광석의 평균품위가 0.9%이기 때문이다. 금의 경우 6억 2천만 톤의 원광석에서 2천톤의 순수한 금이 얻어졌으므로 모두가 폐석인 셈이다. 현재, 전세계적으로 채굴되는 광석은 30억 톤을 훨씬 넘는다. 그 중에서 90% 정도는 폐석으로 남는다. 수십억 톤에 해당하는 어마어마한 양의 폐석은 공해를 유발하고 자연생태계를 파괴한다.

폐석은 많은 양의 중금속과 황을 포함하고 있다. 특히 구리, 금, 수은, 니켈 등의 광석은 황을 많이 포함하고 있다. 폐석더미 주변에서 흘러나오는 광산폐수는 황으로 인하여 산성을 나타내며, 광석에서 용출된 많은 양의 중금속 이온을 포함하고 있다. 따라서 강이나 호수, 토양, 지하수가 이것으로 오염된다. 현재로서 모든 폐석을 처리하여 오염물질이 유출되지 않도록 한다는 것은 매우 어려운 문제이다. 앞으로는 자원고갈에 따라 저품위광석을 사용하게 될 것이 예상되므로 폐석에 의한 환경오염은 더욱 심각한 과제로 등장할 것이다.

둘째로, 제련소에서 발생하는 대기오염이다. 광석에 포함되어 있는 황과 용광로를 가열하기 위해 사용하는 화석연료에 포함되어 있는 황은 제련과정에서 이산화황 기체가 변하여 방출된다. 해마다 전세계적으로 비철금속들의 제련에 의해 약 600만 톤의 이산화황 기체가 대기 중에 방출되는데 이 양은 전체 방출량의 8%에 해당된다. 이산화황 기체는 산성비의 원인물질이다.

예로서, 미국 테네시주의 코퍼힐 구리제련소에서 방출된 이산화황으로 발생한 재해면적은 7천 헥타에 달하며, 캐나다의 트레일에 있는 한 제련소는 반경 19 km 이내에 있는 침엽수를 모두 죽게 했고, 영국에서는 금속제련에 의한 사라진 농경지가 40만 헥타에 달한다고 한다. 현재, 대기로 배출되는 이산화황을 제거하는 기술은 개발되어 있어 일부 선진국에서는 이산

화황 기체의 배출을 최소한으로 억제하고 있지만 대부분의 국가에서는 기술적 문제와 더불어 생산단가의 상승요인으로 작용하기 때문에 기피하고 있어 문제가 되고 있다.

(4) 광물자원의 미래

미래사회에 필요한 광물자원의 공급전망은 여러 가지 요인에 의해 좌우된다. 인구증가율, 소비량, 신규 매장량의 발견, 저품위 광석의 추출기술개발, 금속의 대체기술개발, 시장 동향에 따라 달라질 것이다. 시장경제에서 가격의 상승은 새로운 광물자원의 탐사와 대체물질의 개발, 개발기술의 혁신을 유도하게 될 것이다. 예를 들면 전기 및 통신분야에 사용하는 구리는 광섬유의 개발로 수요가 줄게 되었고, 알루미늄은 사용 후 폐알루미늄을 재생해 사용함으로서 원광석 사용의 수요가 줄게 되었다.

6.2 에너지자원과 환경

(1) 에너지자원

우리에게 에너지를 제공하는 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료는 전세계 상업용 에너지 소비량의 90% 정도를 차지한다. 나머지 10%는 원자력과 수력에서 얻는다. 세계시장에서 거래되지 않는 생연료(나무, 볏짚 등)는 저개발국가에서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 이들 생연료로부터 얻어지는 에너지량은 적지만 추정하기 어렵다. 현재 인류는 사용하는 에너지의 대부분을 화석연료에서 얻고 있지만 화석연료는 한번 사용하면 재생되지 않는다. 왜냐하면 이들 화석연료는 죽은 동식물의 잔여물이 퇴적암 내에서 수백만 년에서 수억 년이 지나면서 만들어지기 때문이다. 원자력발전에 사용하는 우라늄 연료도 재생되지 않는다. 이러한 연료는 앞으로 얼마안가 고갈될 것이다.

그러나 늘어나는 세계인구와 생활수준의 향상으로 전세계 에너지 소비량은 향후 계속해서 증가하게 될 것이다. 1999년에 미국 에너지정보국 (Energy Information Administration, EIA)에서 발표한 세계 에너지수요 장기전망에 따르면, 2020년의 세계 에너지 수요는 1996년 대비 약 65%(연평균 약 2.1%의 증가)가 증가될 것으로 전망하고 있다. 세계 에너지소비량은 1996년의 94억6천만 톤(TOE)에서 2020년에는 약 154억 톤(TOE)으로 늘어날 것이 예상되기 때문이다.

미국은 전세계 에너지의 1/3을 소비하고 있다. 그러나 세계인구의 2/3가 되는 개도국은 단지 전세계 에너지의 15%만을 소비하고 있을 뿐이다. 이러한 에너지 사용에 대한 불균형의 문제는 심각하다.

(2) 화석연료

석탄은 가장 풍부한 화석연료로 세계 곳곳에 분포되어 있다. 석탄은 탄소, 산소, 수소로 구성되어 있는 검은색의 가연성 퇴적암이다. 석탄은 생성과정에 따라 무연탄, 역청탄, 갈탄으

로 나눈다. 석탄은 연소시 이산화탄소, 이산화황, 분진을 대기 중에 많이 배출하고, 사용 후의 폐기물이 많아 석유나 천연가스에 비해서는 저급연료이다. 중부 유럽 국가들은 석탄을 많이 사용했기 때문에 환경오염으로 국민건강에 심각한 피해를 주었다. 그러나 가격이 저렴하고 부존량이 풍부하다는 점에서 계속 인기를 끌고 있다. 미국, 일본 및 선진 유럽국가들은 에너지 효율이 더 좋은 청정 석탄연료를 개발하기 위해 노력하고 있으나, 아직 이산화탄소의 배출을 억제할 수 있는 경제성 있는 방법은 개발되지 않고 있다.

세계의 석탄 매장량은 97%가 북반구에 집중되어 있다. 가장 큰 석탄층은 석탄기와 페름기에 만들어진 것인데, 이러한 탄층은 주로 미국과 유럽에 분포한다. 백악기에 형성된 석탄층은 러시아와 중국에서 발견된다. 전체 소비에너지의 60% 이상을 석탄에 의존하고 있는 나라는 폴란드, 영국, 독일, 남아프리카공화국, 인도 등이다. 석탄의 가채년수는 230년으로 추정되고 있으며 소비를 감안한 가채년수는 200년으로 평가되고 있다.

석유는 보통 지하의 공극이 많고 투수성이 좋은 퇴적암층 내에서 발견되는데 석유층의 하부에는 물이 있고 상부에는 천연가스가 있으며 그 위에 덮개암이 있어서 달아나지 못하도록 되어있다. 신생대와 중생대 암층에 지금까지 발견된 석유의 60% 정도가 함유되어 있다. 석유는 19세기 중반에 미국에서 최초의 유전이 개발됨으로서 얻어지기 시작하였다. 석유는 연료로서 그리고 공업원료로서 가치가 매우 크다. 석유는 수송과 보관이 용이하다. 또한 석탄보다 고급연료로 높은 열량과 완전연소의 특성으로 인해 수요가 아주 크다. 석유연료는 특히 세계 상업용에너지 수요의 40%를 차지하고 있다.

지하에서 채굴된 석유(원유)는 정유공장의 증류탑에서 석유가스, 가솔린, 경유(등유, 디젤유, 난방용오일, 제트연료 등) 및 중유(윤활유, 아스팔트오일) 등으로 분류된다. 부탄과 프로판이 주성분인 석유가스는 많은 양을 수송할 수 있도록 액체화된 액화석유가스(LPG)의 형태로 공급된다. 분류된 석유제품은 자동차, 항공기 등의 수송분야와 건물의 난방, 가정 및 산업용 연료로 사용되고 있다. 또한 화학비료, 플라스틱과 스티로폼의 생산 등 각종 화학공업의 기초원료로 쓰이는 물질도 상당부분을 석유에서 얻고 있다.

석유는 서남아시아에 많이 매장되어 있다, 특히 확인된 세계 매장량의 3분의 2가 중동지역이다. 그리고 나머지는 구 소련, 동유럽, 중국, 남미 및 기타지역에 분포하고 있다. 석유는 생산지와 소비지가 멀리 떨어져 있어 국제 간의 이동이 활발하다. 특히 중동지역에서 서부유럽, 미국, 일본으로의 이동이 가장 활발하다. 세계 석유 생산량의 절반 이상은 선진국들이 소비하고 있다. 가장 많이 석유를 소비하는 나라는 미국으로 미국인의 1인당 평균 석유소비량은 세계인의 1인당 평균 석유소비량의 8배가 넘는다.

선진국들은 석유자원을 확보하기 위해 신규 유전 개발에 막대한 노력을 기울이고 있다. 서구 유럽국들은 북해의 자원개발에 힘쓰고 있다. 노르웨이는 에코피스크(Ekofisk), 네덜란드는 그로니겐(Gronigen), 영국은 포르티스(Forties)유전에서 현재 석유를 생산하고 있다. 호주는 바스해협(Bass Strait)에서 유전개발에 성공하였으며, 캐나다는 북극지방의 유전개발에 힘쓰고 있다. 이와 같은 유전개발로 중동의 산유국에 주로 의존하던 석유 소비국들은 불안정한 공급에서 어느 정도 탈피할 수 있었고 운송비도 절감할 수 있었다. 중동지역은 오늘날

에도 석유로 인한 문제와 기타 요인이 함께 작용하여 분쟁이 계속됨으로서 세계의 화약고로 알려져 있다. 각종 자료(UN 등)에 의하면 중동은 세계 석유소비량의 약 30%를, 미국은 약 20%를 생산하고 있다. 석유의 매장량은 석탄보다 확인하기가 어려우나 가채년수가 30년 정도이며, 소비가 증가할 경우는 20년이면 고갈될 것으로 보인다.

천연가스는 석유가 부존되어 있는 퇴적암층에서 석유와 같이 발견되었는데 과거에는 유전에서 태워버렸다. 현재 천연가스는 유전 또는 가스전에서 얻는다. 메탄이 주성분인 천연가스는 연소시 석탄의 2분의 1에 해당하는 이산화탄소를 방출하며, 황 성분이 거의 없어 대기오염물질인 이산화황도 배출되지 않기 때문에 깨끗한 연료이다. 천연가스는 현재 생산, 소비량이 가장 빠르게 증가하고 있으며 세계 상업용 에너지의 20% 가량을 점유하고 있다. 천연가스의 주성분인 메탄은 대기압에서는 영하 162℃ 이하에서 액화된다. 따라서 액화기술이 발달하기 이전에는 대량운송이 어려워 단거리 이동을 하였으나, 액화기술의 개발로 1960년대에 이르러서는 영하 126℃ 이하로 고압 냉각시킨 액화천연가스(liquefied natural gas, LNG)의 형태로 운반이 가능해졌다. 또한, 운반후 저장고에서 파이프라인(pipe line)으로 장거리 공급을 할 수 있어 사용지역이 점점 넓어지고 있다. 천연가스의 가채년수는 약 40년으로 추정되고 있다.

오일셰일(oil shale)과 오일샌드(oil sand)는 개발비용이 많이 드는 단점이 있으나 장차 석유대체자원으로 개발이 될 것이다. 오일셰일은 원유성분이 함유된 셰일(혈암)을 말한다. 오일셰일을 900℃까지 가열시키면 점성이 떨어져서 석유성분을 추출해낼 수 있다. 오일셰일의 세계매장량은 약 3조배럴로 추정되어 석유자원에 버금간다. 주요 부존국가는 미국과 브라질로 세계매장량의 65%가 미국의 록키산맥 주변지역과 콜로라도주, 유타주 등에 분포되어 있으며 17%가 브라질에 매장되어 있다. 미국 유타주에 매장되어 있는 오일셰일은 원유성분 중량비가 10.9%로 평균 1톤의 오일셰일에서 28.4갤론의 원유를 추출할 수 있다. 한국은 전남 해남군의 남해안 지역에 오일셰일이 분포되어 있으나 경제성은 약한 것으로 평가되고 있다.

오일샌드는 타르(tar)상을 지닌 중질의 원유가 다량 함유된 모래 또는 사암으로 석유성분의 추출이 가능하다. 오일샌드의 세계매장량은 약 2.1조 배럴로 추정되며 캐나다 및 베네수엘라에 주로 매장되어 있다. 오일 셰일과 오일샌드의 채광은 기술적으로 큰 어려움은 없으나 현재상태로는 경제성이 없어 자원고갈로 원유가의 상승이 예상되는 21세기에 활용될 것으로 기대된다.

한국은 유연탄, 석유, 천연가스 등의 부존량이 없다. 다만, 무연탄은 매장량이 13억 9백만t에 달하며 가채년수가 약 108년에 달한다. 부존자원이 없는 우리나라는 늘어나는 에너지수요를 충족하기 위해 해외의 자원국으로부터 대부분의 에너지를 수입하고 있다. 상업용 에너지의 해외의존도는 1962년(9.4%)에는 10% 미만이었으나, 1991년(91.2%)부터는 90% 이상으로 거의 전량을 해외에서 수입하고 있다. 이와 같은 이유는 그동안 공업화로 인한 경제발전과 생활수준의 향상으로 에너지수요가 엄청나게 증가하였기 때문이다. 우리나라에서 사용하고 있는 에너지는 석유가 61%로 가장 많고, 석탄이 20%, 원자력이 11%이며, 나머지 8%

는 천연가스, 수력 등이다. 전량을 해외에 의존하고 있는 석유는 1965년에는 11만배럴을 수입했으나 1975년에는 10배로 증가해 117만배럴을 수입하였으며, 1990년부터는 자동차의 증가, 소득의 증가로 연간수입량이 200만배럴을 넘어섰다.

(3) 화석연료 사용의 문제점

화석연료 중에서 석탄과 석유는 천연가스에 비해 황과 질소성분 등 많은 불순물을 포함하고 있다. 이들은 연소시 황산화물과 질소산화물을 배출한다. 그 중에서 대표적인 이산화황은 대기오염의 주범물질이며, 산성비의 가장 큰 원인물질이다.

석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료는 주성분이 탄소로 이들을 태우면 공기중의 산소와 결합하여 이산화탄소가 발생한다. 1989년도에 소비된 70억 톤의 화석연료에서 58억 톤의 탄소가 이산화탄소의 형태로 대기 중에 배출되었다고 한다. 이외에도 생연료(나무) 등의 사용으로 20억 톤의 탄소가 이산화탄소의 형태로 추가 배출되었다고 한다. 1980년대에 이들 화석연료와 생연료의 사용으로 배출된 이산화탄소가 지구온난화에 미친 영향은 지구온난화의 전체 원인 중 50% 정도인 것으로 추산되었다. 지구온난화를 억제하기 위해 국제환경회의에서는 화석연료의 사용을 줄이는 방안을 모색하고 있다. 1990년 네덜란드는 최초로 탄소세를 신설하여 화석연료의 값을 인상함으로써 화석연료의 소비를 줄이므로 탄소방출량을 적게 배출하는 정책을 펴고 있다. 그러나 유럽을 제외한 대부분의 국가는 호의적이지 못하다. 이 문제를 근본적으로 해결하려면 화석연료를 대신할 수 있는 무공해에너지 자원을 개발해야 가능할 것으로 전망된다.

(4) 핵연료

핵연료로는 보통 우라늄을 사용하는데 우라늄광석은 광물자원에 해당된다. 원자력발전은 원자폭탄과 마찬가지로 우라늄을 핵연료로 사용한다. 원자력발전은 핵분열반응을 아주 서서히 진행되도록 조절하여 얻어지는 열로 전기를 생산하는 발전방식을 말한다. 최초의 원자력발전소는 1956년 영국에서 가동되었다. 1kg의 우라늄연료는 석탄 3백만 kg에 해당하는 에너지를 발생시킨다. 따라서 원자력발전은 저렴한 가격에 깨끗한 에너지를 무한히 얻을 수 있을 것으로 기대되어 화석연료의 고갈을 영구히 해결해 줄 것으로 생각되었다. 그리하여 화석연료를 수입에 의존하는 국가에서는 원자력발전을 적극적으로 추진하였다. 프랑스, 벨기에, 일본, 한국 등이 대표적인 나라이다. 그 결과 이들 국가는 전기생산량의 약 50% 또는 그 이상을 원자력발전이 차지하게 되었다.

원자력발전의 안전성에 대한 심각한 의문이 제기된 것은 1979년 미국의 쓰리마일 원자력발전소의 방사능 누출사고이다. 특히, 1986년 구 소련의 체르노빌 원자력발전소에서는 두개의 원자로가 폭발하는 대사고가 일어났다. 이 사고로 31명이 사망했으며, 2~4만 명이 방사능 오염으로 향후 60년 이내에 사망할 것으로 추정되었다. 그리고 방사능에 오염된 체르노빌은 인간이 거주할 수 없어, 이곳 주민 13만 5천명은 다른 지역으로 이주하여 살게 되었다. 이들 사고 이후 원자력발전은 엄격한 안전장치에도 불구하고 방사능노출의 위험성으로 인한

불안감 때문에 내리막길을 걷고 있다. 미국의 경우는 스리마일 원전사고 이후 새로 착공한 원자력발전소가 거의 없다. 멀쩡한 원전도 폐쇄하거나 천연가스발전소 등으로 대체하였다. 원전건설에 대한 주민들의 반발도 매우 크다. 예를 들어, 미국 롱아일랜드 전기회사는 20년간 53억 달러를 들여 건설한 쇼햄 원자력발전소를 주민들의 격렬한 반발로 1989년 뉴욕주 당국에 단 1달러에 매각처분하기도 하였다.
원자력발전에서 가장 문제가 되는 것은 방사능 누출사고와 사용후 핵폐기물이다. 사용후 핵폐기물에는 많은 방사능물질이 남아있다. 그러나 이들을 100% 안전하게 처리할 방법이 아직까지는 없다. 핵폐기물인 플루토늄의 반감기는 2만 4천년이며, 25만년이 지나야 무해한 물질로 변한다. 그렇기 때문에 아무도 그들이 사는 지역에 핵폐기물 저장소가 생기는 것을 원치 않는다. 따라서 현재는 대부분 원자력발전소 부근의 지하에 방사능 차단벽을 만들어 저장하고 있는 실정이다.

6.3 미래의 에너지자원

미래의 에너지자원은 화석연료나 우라늄연료를 대체할 수 있는 환경오염으로부터 무관한 깨끗한 에너지라야 하다. 1970년대 석유파동을 겪으면서 세계 각국은 에너지자원의 안정적 공급의 중요성을 새롭게 인식하였고 1980년대부터는 화석연료의 사용에 따른 지구환경오염 문제가 크게 대두되었다.
화석연료(핵연료 포함)의 사용으로 인한 환경오염 문제는 앞으로 더욱 심각해질 것이며, 또한 화석연료는 앞으로 얼마안가 고갈될 것이다. 따라서 이 두 가지 문제를 동시에 해결하기 위해서는 무공해이며 재생가능하거나, 무공해이며 무한자원인 에너지를 개발해야 한다.

(1) 태양에너지

태양에너지는 무한한 에너지이다. 태양의 표면온도는 5780K이다. 우리 지구는 자외선, 가시광선, 적외선 등의 태양에너지에 노출되어 있다. 태양이 지구표면에 주는 총에너지량은 연간 6.55×10^{26} kcal로 전세계 년간 에너지소비량의 수십억 배에 해당한다. 그러나 단위시간당 최대 1 kw/m^2 정도의 에너지를 공급하므로써 에너지 밀도는 낮다. 따라서 태양에너지를 이용하기 위해서는 낮은 에너지밀도를 고밀도화 하는 과정이 필요하다. 태양에너지의 이용은 크게 태양열 이용과 태양광 이용으로 나눌 수 있다.
태양열 이용은 온수 및 건물의 냉난방에 이용되는 태양열 난방시스템과 태양열로 얻어지는 증기로 터빈을 돌려 전력을 생산하는 태양열 발전시스템이 있다. 태양에너지를 열로 바꾸는 방법은 집열판 도는 집열기를 이용하는 방법이다. 태양열 난방시스템은 집열판, 축열조, 순환기 등의 설비를 설치하여 온수를 공급하거나 건물의 난방에 활용하는 시스템이다. 태양열 발전시스템은 오목거울을 사용하여 그 초점에 태양열을 모아 얻어지는 고열로 증기를 발생시켜 화력발전과 유사하게 가스터빈을 이용하여 전기를 얻는 것을 말한다. U자형 오목거울을 사용한 집광시설의 경우 약 400℃까지 집열관의 온도를 올릴 수 있다. 세계에서 가장

큰 태양열 발전시스템은 미국 캘리포니아주에 있으며 최대출력은 35만 4천 킬로와트(kw) 규모이다.

태양광 이용은 태양에서 나오는 빛에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 것으로 태양전지와 태양광 발전시스템이 있다. 반도체를 이용한 태양전지의 원리는 반도체가 햇빛을 받으면 음전하를 n형 반도체에 양전하를 p형 반도체에 모이게 하여 n형과 p형 사이에 전압차를 유발시켜 전류를 흐르게 하는 것이다. 태양전지에 사용하는 반도체로는 단결정, 다결정, 비정질 실리콘 등이 사용된다. 에너지 변환 효율은 단결정 실리콘(22.8%)이 가장 높고, 그 다음이 다결정 실리콘(15~17%)이고, 비정질 실리콘(7~12%)이 가장 낮다. 최근에 개발된 두께(1㎛)가 매우 얇은 비정질 실리콘은 전력소모량이 적은 계산기, 시계 등의 소형 전자제품에 많이 사용된다. 태양전지 셀(cell)를 서로 연결하여 배열하거나 모듈(module)화하여 전기에너지 생산량을 증대시킨 것이 태양광 발전시스템이다. 등대나 가로등에 사용되고 있는 자가발전용 소형 태양광 발전설비가 그 예이다. 우리나라에서는 제주도 남단 마라도와 전남 하와도에 태양광 발전시설이 설치되어 있다. 전기를 얻기 위한 태양광 발전시스템은 아직 생산단가가 높아 보급되지 않고 있는 실정이다. 선진 각국은 고변환효율과 경제성있는 태양광 발전시스템을 개발하기 위해 많은 노력을 하고 있어 2010년경이면 실용화가 가능할 것으로 예상하고 있다.

(2) 수력에너지

수력에너지의 이용은 민물의 이용과 바닷물의 이용으로 나눌 수 있다. 민물의 이용은 보통의 수력발전을 의미한다. 바닷물의 이용은 조수 간만의 차를 이용한 조력발전과 파도의 힘을 이용한 파력발전 및 해수면과 해양 깊은 곳의 온도차를 이용한 수온차발전 등이 가능하다.

수력발전은 하천의 유량과 낙차를 이용해서 전기를 생산하는 발전방식이다. 노르웨이는 전기생산의 거의 전부를 캐나다는 반 이상을 수력발전으로부터 얻고 있다. 그러나 무공해 에너지인 수력발전은 단지 전세계 에너지소비량의 약 2% 내외만을 차지한다. 선진국은 수력발전을 하기에 적합한 장소에 대부분 수력발전소가 건설되어 있다. 그러나 수력발전을 하기에 적합한 잠재적 후보지를 많이 가지고 있는 중국, 브라질, 인도네시아 등의 개도국은 앞으로 수력발전의 이용이 확대될 것으로 전망된다. 수력발전의 이용을 극대화하기 위해 선진국에서는 낙차가 작은 하천을 이용한 소수력발전과 양수에 의한 수력발전의 개발이 진행되고 있다.

조력발전은 하루에 두 번씩 일어나는 밀물과 썰물시의 낙차를 이용해 전기를 생산하는 발전을 말한다. 만의 입구에 댐을 막아 터빈을 양방향으로 설치하면 조수의 유입과 유출시 터빈을 돌릴 수 있게되어 전기를 생산할 수 있다. 조력발전에 의해 전기를 얻기 위해서는 보통 조수의 간만차가 12m 이상 되어야 하는 것으로 알려져 있다. 따라서 조력발전이 가능한 후보지는 세계적으로 한정되어 있으며, 현재 조력발전소가 가동되고 있는 국가는 프랑스, 캐나다, 러시아의 3개국이다. 세계에서 가장 큰 상업용 조력발전소는 1968년 프랑스의 란스

(La Rance)에 세워졌으며, 24만 kw의 발전용량은 갖추고 있다. 한국은 서해안 태안반도의 가로림만을 조력발전의 후보지로 거론하고 있으나 아직 조사단계이다.
파력발전은 바람에 의해 해수의 표면에서 생기는 파도의 힘을 이용해 터빈을 회전시켜 전기를 생산하는 방법이다. 파력발전이 가능한 지역으로는 위도 40~60°에 위치한 바람이 지속적으로 불어오는 해안선 인접지역이다. 파도에너지는 파도의 높이 및 이동속도와 관련이 있다. 따라서 해수편의 상하운동과 전후운동을 이용해 터빈을 회전시킴으로써 전기를 생산하는 방식인데 아직은 개념정립 단계 수준이다.
수온차발전은 적도가 대상지역으로 해수표면의 높은 수온(약 25℃)과 해수면 500m 이하 깊이의 낮은 수온(약 5℃)의 차이를 이용해 터빈을 회전시킴으로서 전기를 생산하는 방식이다. 끓는점이 낮고 증기압이 높은 암모니아 같은 용매를 사용하여 낮은 수온에서 냉각되어 액화되고 높은 수온에서 에너지를 얻어 기화될 수 있도록 조절한다면 기화시 부피팽창에 의한 힘으로 터빈을 돌려 전기를 생산하는 것이 가능하게 될 것이다. 이러한 수온차발전은 아직 개념정립 단계이다.

(3) 풍력에너지

풍력발전은 바람의 힘을 이용하여 발전기를 돌려 에너지를 얻는 방식이다. 풍력에너지는 태양에너지와 같이 에너지밀도가 작으며, 풍속과 풍향이 일정치 않아 이용에 한계를 가지고 있다. 이러한 풍력에너지 이용의 단점을 극복하기 위해서는 바람개비를 크게 많이 만들어 이용해야 한다. 풍력발전을 하기에 가장 적합한 지역들은 미국의 서부평원, 북유럽, 북아프리카, 남미의 남부지역 및 열대지역의 무역풍이 부는 지역 등이다. 풍력발전을 가장 많이 활용하는 국가는 미국과 네덜란드로 소규모의 전기생산 및 양수에 이용하고 있다. 미국 캘리포니아주의 풍력발전은 전세계 풍력발전의 75%를 차지하며, 네덜란드는 2000년까지 전기생산의 12%를 풍력으로 공급할 계획을 갖고 있다. 한국은 풍력발전 시범지역으로 제주도를 선정하였으며, 현재 경제성과 기술적인 문제를 연구하고 있다.

(4) 지열에너지

지열에너지의 이용은 건물의 난방 및 농업에 지열수를 이용하기 위한 지열수공급 시스템과 지열발전이 있다. 지열수공급 시스템은 지하의 뜨거운 암반층에 구멍을 뚫어 물을 주입시켜서 더워지도록 한 후 더워진 물(20~90℃)을 양수하여 건물의 난방, 시설농업 등에 이용하는 방법이다. 지열수를 직접 이용할 때는 요 스웨덴의 런드(Lund)시는 전체난방의 80% 정도를 지열수공급 시스템으로 해결하고 있다. 지열발전은 지하 몇 km 이내에 있는 아주 뜨거운 열원에 의해 물을 가열시킴으로 얻어지는 수증기(100~300℃)로 터빈을 회전시켜 전기를 생산하는 것을 말한다. 지열발전을 하고 있는 나라는 이탈리아, 엘살바도르, 미국, 뉴질랜드, 일본 등으로 각각 수십만 kw 용량의 지열발전을 하고 있다. 특히, 엘살바도르는 전력의 40% 내외를 지열발전에 의존하고 있다. 현재 가동되고 있는 지열발전소는 화산성지열로 지하의 천부열수원에서 고온으로 덥혀진 수증기를 이용하는 방식이기 때문에 발전단가가

저렴하다. 지하에 고온암체(300~500℃)의 열원이 존재하고 있으나 불투수층으로 열수가 없는 경우에 물을 주입하여 인공열수원을 만들어 열수를 취득하는 기술도 현재 연구가 진행되고 있다. 우리나라의 경우도 농어촌의 난방 및 시설원예에 지열수를 이용할 수 있도록 농어촌진흥공사에서 개발계획을 세워놓고 있다.

(5) 수소에너지

수소는 미래의 중요한 에너지원으로 자주 거론된다. 지금까지 수소의 가장 중요한 용도는 우주비행에 연료로 사용된 것이다. 수소분자와 산소분자를 반응시키면 많은 열(286kJ/mol)을 발생시킨다. 이 반응의 생성물은 단지 물뿐이므로 무공해 에너지이다.

$$H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(g)$$

수소는 밀도 및 액화온도가 매우 낮다. 그러므로 자동차를 움직이려면 엄청난 부피의 수소를 싣고 다녀야 한다. 수소를 압축된 기체로 운반하려면 벽이 두껍고 강한 대형용기가 필요하므로 자동차는 훨씬 더 커져야하고, 그러면 차량의 증가된 무게로 인하여 더 많은 수소연료가 필요하게 된다.

액체수소가 더 효과적일 수 있다. 수소의 액화온도는 -253℃로 엄청나게 낮다. 수소를 액화시켜 자동차에 싣고 다니려면 -253℃ 이하의 온도로 유지시켜 주어야 한다. 그러므로 이 방법도 거의 불가능한 일이다. 따라서 수소를 대중교통 수단의 연료로 사용하려면 간편하게 수소를 저장할 수 있는 고도의 기술이 개발되어야 할 것이다.

미국과 유럽 등 선진국에서는 많은 양의 수소를 가역적으로 저장할 수 있는 소재를 개발하기 위해 많은 노력하고 있다. 수소를 흡수하는 특수소재(예를 들어, 수소화물이나 합금 등)가 채워져 있는 탱크에 수소를 펌프질해 넣은 다음, 소재에 전기를 흘려주면 수소가 방출되고 방출된 수소를 이용해 엔진을 작동시키는 방법이 있을 수 있다. 또한 도시에서 사용할 수 있는 규모로 다량의 수소를 저장할 수 있다면 동력을 공급할 목적으로도 사용이 가능할 것이다. 심야에 생산된 전기를 저장하여 수요가 많은 낮에 내놓을 수 있는 방법이 필요하다. 이때 사용하는 수소는 화석연료에 있는 탄화수소로부터 생산할 수도 있지만, 물을 전기 분해해서도 생산할 수 있다. 전기분해를 통한 수소의 생산비용은 현재 천연가스의 5배 정도이다. 어느 경우에도 저장기술의 개발이 우선적으로 필요하다.

제7장 대기환경과 오염

7.1 대기권의 구조와 성질

우리 인간은 대기권이라 불리는 공기의 밑바닥인 지표면에 살고 있다. 지표로부터 수 킬로미터까지의 건조한 공기는 부피비로 78.08%의 질소, 20.95%의 산소, 0.934%의 아르곤, 0.035%의 이산화탄소 및 기타 여러 가지의 미량기체로 구성되어 있다. 이러한 공기의 밀도는 고도가 증가함에 따라 감소하여 지표로부터 30km 이내에 99%가 존재한다. 대기는 이불과 같은 역할로 외계의 유해한 환경으로부터 지구를 보호해주어 지구에 있는 생물들이 살아갈 수 있는 환경을 제공해 준다.

외계에서 지구로 들어오는 우주선과 태양에서 나오는 많은 전자기파를 흡수하고 근자외선, 가시광선, 근적외선 영역의 300~2500nm 및 라디오파 영역의 0.01~40m 에 해당하는 파장대 만을 통과시키고 있다. 특히 생물들에게 유해한 300nm 이하의 전자기파를 흡수하여 유해한 영향을 미치는 자외선으로부터 생물들을 보호해 주고 있다. 이러한 대기권은 지구로 유입되는 태양에너지가 흡수되는 정도에 따라서 생기는 급격한 온도변화에 따라 대류권, 성층권 중간권 및 열권 등 4개의 구역으로 다시 나누어진다.

대류권은 지상에서부터 최소 8km(극지방)부터 최대 17Km(적도)까지의 고도를 말한다. 대류권은 고도가 높아지면 지표면 복사열이 작아져서 온도가 감소하는 특징을 가지고 있다. 대류권에서는 고도가 높을수록 온도가 내려가 대류권 상층 경계면의 최저온도는 -56℃이다. 또한 대류권의 높이는 대기의 온도, 지표의 조성, 시간에 따라 수 킬로미터까지 변할 수 있다. 대류권은 공기의 순환에 의해 항상 혼합되고 있기 때문에 균일한 조성을 갖고 있다. 다만, 수증기의 양은 구름의 형성, 강우, 지표면에서 증발되는 물의 변화 때문에 매우 큰 폭(1~5%)으로 변한다.

성층권은 대류권 상부에 위치하며 그 고도는 대류권 상층 경계면(8km~17km)부터 50km까지의 높이에 해당된다. 대류권의 공기와는 달리 성층권의 공기는 수직 혼합이 일어나지 않는 안정한 상태이다. 성층권의 온도는 고도가 증가함에 따라 증가하여 성층권 상층 경계면에서는 -2℃ 정도에 이르기까지 증가한다. 이러한 온도상승 현상은 성층권에 있는 오존이 자외선 복사에너지를 흡수하기 때문에 일어난다. 성층권 중간부분에서 오존은 최대농도(약 10ppmv 정도 : 대류권 오존농도의 1천 배에 해당함)로 존재한다.

성층권 오존은 태양으로부터 방출된 자외선과 산소분자의 반응으로 생성된다. 성층권의 하층에서 산소분자는 계속해서 자외선에 의해 오존으로 변환되며, 생성된 오존은 또한 자외선에 의해 시작되는 일련의 반응을 거쳐 다시 산소원자로 복귀되어 오존의 전체농도는 평형을 이루게 된다. 이 과정에서 오존분자들은 태양으로부터 유입되는 유해한 자외선을 거의 흡수(99%)함으로서 지구 표면에 도달하지 못하도록 한다. 그 결과 인간이 태양광선에 의한 화

상, 피부와 눈의 암, 백내장 및 면역체계 손상 등의 피해를 받지 않도록 해주어 지구에 살 수 있는 환경을 제공해 준다.
중간권은 지상 50km로부터 85km까지의 높이로 성층권 위에 존재한다. 중간권은 고도가 높아질수록 온도가 낮아져 고도 85km부근의 중간권 상층 경계면의 온도는 -92℃이다. 열권은 지상 85km부터 약 500km까지로 중간권의 위에 존재한다. 열권에서는 200nm 이하의 파장을 가진 높은 에너지의 복사선이 가스 화학종에 의해 흡수되기 때문에 온도가 최고 1,200℃까지 올라간다. 그 이상의 높이에는 온도의 범위로 정의하기 어려운 외기권이 존재한다.

7.2 대기오염의 발생원인

(1) 화석연료의 사용

대기오염은 하나 또는 그 이상의 화학물질이 인간이나 다른 생물에게 해를 입힐 정도의 농도로 대기 중에 지속되는 상태를 말한다. 이미 존재하고 있던 어떤 물질의 농도나 지속 시간이 어느 한계 이상으로 초과되는 경우도 있고, 자연 환경에 존재하지 않던 새로운 물질이 생기는 경우도 있다.
화산 폭발과 산불 등은 자연적 요인에 의해 발생하는 대기오염원으로 분진, 황산화물, 질소산화물, 탄소산화물 등의 오염물질을 배출한다. 특히 강력한 화산활동은 오염물질이 성층권까지 진입하여 햇빛을 차단하므로 심각한 기후 변화를 일으키게 된다. 한 예로 1981년, 미국 쎄인트 헬레나 화산의 폭발은 그 이듬해 전 세계적으로 기온을 현저하게 떨어뜨리게 했다.
화석연료는 인간활동에 에너지원으로 사용되고 있다. 석탄이나 석유, 천연가스는 생물체가 변하여 만들어진 화석 연료이기 때문에 황이나 질소를 포함하고 있고, 연소 시 산화하여 황산화물(SO_x)이나 질소산화물(NO_x)을 형성한다. 문명의 발달과 더불어 자동차, 기차, 비행기, 선박 등과 같은 교통기관이 더욱 많이 이용되고 있는데 이들의 내연 기관에는 휘발유나 디젤 연료를 사용하고 있다.
휘발유는 녹킹 방지용으로 납이 첨가되기도 하므로 납이 대기 중으로 방출되며, 디젤은 연소 시 검댕이나 그을음을 발생시켜 대기를 더럽힌다. 이들은 모두 석유를 원료로 하므로 연소시 황산화물, 질소산화물 등이 발생한다. 이외에도 발전소, 제련소, 쓰레기 소각시설 등에서 방출되는 오염물질도 주로 화석연료의 연소에 의해 발생한다. 또한 무해한 것으로 알려졌던 물질이 심각한 오염작용을 하는 경우도 있는데, 오존층을 파괴하는 프레온 가스(냉장고나 에어콘의 냉매로 사용됨)가 그 좋은 예이다.
이들 오염물질들은 대부분 인간 활동에 의해 직접 생겨나며 1차오염물질이라고 부른다. 1차오염물질이 햇빛이나 수분 또는 다른 1차오염물질들과 반응하여 만들어진 오염물질은 2차오염물질이라 한다. 광화학스모그(photochemical smog)는 1차오염물질과 태양광의 영양하에서 생성된 2차오염물질이 함께 혼합되어 있는 대기오염 상태를 말한다.

(2) 대류권의 기온역전

대류권은 고도가 높아질수록 온도와 압력이 감소하는 특징을 가지고 있다. 낮 동안 지표면 부근의 공기가 태양에너지에 의해 데워지면 가열된 공기는 일반적으로 팽창하고 상승하게 된다. 이때 주변 고기압 지역의 밀도가 높고 차가운 공기는 더운 공기가 상승할 때 생긴 저기압 지역으로 하강하여 가열된 공기가 빠져나간 자리를 채워주게 된다. 대류권에서는 이와 같이 공기의 연속적인 혼합이 일어나게 된다. 따라서 지표면의 어느 지역에 대기오염물질이 배출되었더라도 연속적인 공기의 혼합이 일어나면서 오염물질은 희석 분산되어 위험한 수준이 되지 않게 된다. 지형과 기후 조건에 따라서 밀도가 높고 차가운 공기층이 밀도가 낮고 따뜻한 공기층 밑에 갇힐 수가 있는데 이러한 현상을 기온역전(temperature inversion)이라 한다. 오염물질이 많이 배출된 지역에 기온역전이 일어나면 대기가 안정되어 오염물질은 확산이 되지 않고 보통 수시간에서 수일 정도 정체하게 된다.

기온역전은 여러 경우에 일어난다. 지표면은 공기에 비해 쉽게 데워지고 쉽게 식는 성질을 가지고 있기 때문에 낮에는 지표면의 온도가 공기보다 높지만 밤이 되면 지표면이 먼저 차가워져 기온역전이 일어난다. 이러한 상태는 새벽까지 계속되는데 오전에 햇빛을 받아 지표면이 다시 데워지면 역전현상이 사라지고 정상으로 회복된다. 그러나 태양 빛이 약할 때는 이러한 상태가 지속되어 오염물의 확산을 방해한다. 계곡이나 분지는 지형상 습하고 무거운 공기가 자주 생기고 순환이 잘 안되므로 오염사건이 생기기 쉽다. 런던형 스모그 및 로스엔젤레스형 스모그는 모두 오염물질이 대류에 의해 희석되지 않고 기온역전에 의해 장시간 동안 지표 근처에 머물러 있어서 발생되었다. 스모그는 연기와 안개가 혼합된 형태를 말한다.

영국에서는 1952년 12월 5일부터 9일까지 5일간 런던과 주변 지역에 심한 스모그가 발생하였다. 고기압이 정체하여 안정된 대기가 형성되었고 바람이 불지 않았으며 짙은 안개가 발생하였다. 공장 및 가정에서 사용하는 석탄 연소에 의한 매연과 안개가 합해져서 당시 가시거리는 20m에 불과하였다. 그리고 이산화황의 농도는 1.3ppm이었다. 짙은 스모그로 인해 많은 사람들이 호흡 곤란을 겪었고 많은 심장 및 폐 질환자가 발생하여 사망자 수가 증가하였다. 이로 인하여 불과 4일만에 4천여 주민이 사망하였고, 1953년 2월까지 8천여 주민이 호흡기 질환으로 사망하였다. 이 사건은 평소에도 심한 대기오염을 보이고 있던 런던에 오염물질의 확산을 방해하는 기상상태가 겹치면서 발생한 사건으로 영국 뿐 아니라 전세계적으로 대기오염에 대한 경각심을 일으켜 이에 대한 대책을 서두르게 하는 계기가 되었다. 이후, 이런 유형의 스모그 사건을 “런던형 스모그”라고 부르게 되었다.

도시 스모그의 또 다른 유형으로는 “광화학 스모그”가 있다. 이런 유형은 자동차의 증가로 인하여 자동차의 배기가스가 대기오염의 주된 원인이 된 경우이다. 광화학 스모그는 오존 등의 광화학 물질이 대기중의 가스와 반응을 일으켜 생기는 것으로 따뜻하고 건조하며 햇빛은 많고 바람은 없는 산으로 둘러싸인 도시가 광화학 스모그가 발생하기 좋은 조건이다. 1천4백만 명의 인구와 2천만 대 이상의 자동차, 그리고 일천여 개의 공장이 있는 로스엔젤레스는 광화학스모그 발생으로 유명한 도시이다. 로스엔젤레스형 스모그를 광화학 스모그라고

한다.
한편, 인구가 밀집되어 있고 건물들이 많이 들어선 도심지는 일반적으로 농촌이나 교외지역보다 기온이 약간 높게 나타난다. 이러한 기온 현상은 열섬(heat island)효과라고 하는데 차량과 공장에서 배출된 매연이나 분진이 도심에서 빠져나가지 못하고 갇혀 마치 모자를 쓴 형상을 하게 되므로 '먼지지붕 효과'라고도 한다. 열섬현상이 나타나는 주요원인은 도시의 건물 및 아스팔트, 차량 등에서 뿜어져 나오는 열은 많은데, 빌딩 숲으로 이루어진 도시구조가 공기의 원활한 흐름을 방해하고 대기로 방출된 분진이 지표에 도달하는 태양에너지를 감소시켜 공기의 수직상승을 방해하므로 나타난다.

7.3 대기오염물질의 종류와 영향

(1) 분진

아주 작은 액체상태 또는 고체상태의 떠다니는 부유물질을 입자상 오염물질이라 말하며 이를 분진이라 부른다. 입자상태의 부유물질은 먼지, 연기, 안개, 스모그 등과 같은 상태로 존재한다. 입자상태의 오염물질은 고체의 기계적 분쇄과정, 화석연료의 불완전 연소 및 기타 화학적과정을 통하여 생성된다. 일반적으로 2.5μm 미만을 미세입자로, 2.5μm 이상을 거대입자로 나눈다. 환경오염에 지대한 영향을 미치는 것은 미세입자이다. 미세입자들은 작고 가볍기 때문에 대기중에 수일 또는 수 주일간 떠다니기도 한다. 이들은 인간이나 동물이 호흡할 때 폐 깊숙히 침투되기 때문에 매연이나 공장, 광산, 건설 현장에서 발생하는 미세입자들은 규(석면)폐증, 진폐증, 폐암 등을 유발시킬 수 있다. 이들 입자가 세균이나 중금속을 포함하고 있을 때는 오염 효과가 증폭되어 심각한 문제를 야기하게 된다.

(2) 황산화물

황산화물은 주로 이산화황(SO_2)과 삼산화황(SO_3) 두 가지 화합물을 말하는 것으로 자극성이 강하고 유독하다. 황산화물은 석유나 석탄 같은 황을 함유하고 있는 연료가 연소할 때 공기중의 산소와 결합되어 발생한다. 이산화황(SO_2)은 쏘는 듯한 독한 냄새를 가진 무색의 기체이며, 낮은 농도에서도 호흡 장애를 일으키는 유독한 기체이다. 6-12ppm 정도는 코나 기관지에 통증을 일으키고, 400-500ppm이 되면 생명을 위협하는 치사농도가 된다. 사람이 이산화황(SO_2) 기체를 흡입하면 코나 목, 눈, 호흡기 점막에 손상을 입혀 세균 감염이 생기기 쉽게 되어 천식, 폐기종, 기관지염, 폐렴 등의 호흡기 질환에 잘 걸리게 된다. 이산화황 기체가 식물의 기공을 통하여 흡수되면 식물의 엽록소를 파괴하여 광합성 작용을 저해한다. 세포가 파괴되면 잎이 얇아지고 누렇게 변하거나 흰색의 표백현상을 일으켜 반점이나 줄무늬 모양이 생기고, 심해지면 잎이 떨어지고 말라죽는다. 식물 피해의 대부분은 이산화황(SO_2)에 의한 것이다. 자주개자리는 이산화황에 매우 약하여 SO_2 지표식물로 이용된다. 공기 중에서 이산화황은 산소와 결합하여 삼산화황(SO_3)을 만들게 된다.

$$2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3$$

이렇게 만들어진 삼산화황은 대기중 미세 물방울에 용해되어 황산 안개를 만들어 산성비(acid rain)의 원인이 된다.

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

산성비는 호수의 물고기를 죽게 하고 호수 생태계를 파괴한다. 그 외에도 산성비는 대리석, 석회석 같은 건축 자재를 부식시켜 건물 수명을 단축시켜 인간의 생활에 직접, 간접으로 심각한 피해를 주고 있다.

(3) 질소산화물

질소산화물은 연소과정에서 화석연료에 포함되어 있는 질소성분 때문에 생기기도 하지만, 대부분은 고온에서 연소할 때 연소공기중의 질소가 산화하여 발생한다고 알려져 있다. 여러 가지 질소산화물 중에서 문제가 되는 것은 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO_2)이다. 배기가스의 연소 과정에서 배출되는 질소산화물은 대부분 일산화질소이다. 일산화질소는 무색, 무미, 무취이다. 일산화질소는 공기 중에서 산소와 반응하여 독성이 더욱 큰 이산화질소(NO_2)로 변한다. 이 반응은 광화학적 스모그가 일어나는 조건에서 잘 일어난다.

$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$$

이산화질소는 자극성 냄새가 있는 적갈색의 유독한 기체이다. 이산화질소는 대기중의 수증기와 결합하면 질산(HNO_3)이 되어 산성비의 원인이 된다. 이산화질소로 인한 급성 피해는 눈에 대한 직접적인 자극이 없는 것을 제외하고는 이산화황과 유사한 호흡기 질환 즉 기관지염, 폐기종, 폐렴 등을 일으킨다. 20ppm의 농도에 잠시만 노출되어도 치명적이고, 자각증상이 늦게 나타나기 때문에 회복이 어렵다. 식물에서는 생장 억제가 일어나고 잎의 모양이 변하게 된다.

(4) 일산화탄소

일산화탄소(CO)는 연소과정에서 연료의 불완전 연소로 인하여 생긴다. 이 기체는 무색, 무미, 무취이며 독성이 매우 강하다. 대기중 농도는 0.51ppm으로 낮지만 낮은 농도로도 인체에 큰 장애를 일으키게 된다. 인체나 동물에는 혈액중의 헤모글로빈과 결합하여 카르복시헤모글로빈을 형성하기 때문에 산소결핍증을 유발한다. 혈액중 헤모글로빈의 5% 정도가 일산화탄소와 결합하면 행동 장애가 일어난다고 한다. 만성적으로는 청각 장애와 시각 장애를 일으키고, 급성중독은 뇌와 신경 조직에 가장 큰 피해를 준다. 과거 연탄가스 중독사고는 일산화탄소에 의한 중독으로 일어났다.

(5) 탄화수소

탄화수소(hydrocarbons)는 연료의 불완전 연소로 인해 발생하며, 탄소와 수소로 구성된 유기화합물이다. 자연적 발생원은 식물이 방출하는 것으로 삼림에서 다량 발생한다. 특히 소나무가 방출하는 테르펜(terpenes) 화합물은 건강에 이로워 소나무가 많은 곳에서 삼림욕을 하기도 한다. 박테리아에 의한 혐기성 발효 작용에 의해 주로 생기는 메탄(CH_4)은 가장 간단한 화합물이며 천연가스의 주성분이다.

인간활동에 의해서는 대부분 자동차 배기가스와 무연탄에서 발생한다. 자동차 배기가스에서 나오는 방향족이나 다환족 화합물들은 인간이나 동식물에 피해를 입힌다. 이들중에서 벤젠(benzene)이나 벤조피렌(benzopyrene) 등은 발암물질로 알려져 있다. 탄화수소는 대기중에서 햇빛을 받아 광화학 반응을 일으키므로서 광화학 스모그를 만든다.

(6) 대류권의 오존(옥시단트)

산소원자 3개로 이루어져 있는 오존(Ozone; O_3)은 광화학 산화물의 한 종류이다. 오존은 자동차 배기가스가 방출하는 질소산화물의 광화학 반응에 의하여 주로 발생한다. 오존은 그 자체의 독성보다도 광화학적 산화작용이 일어나는 대기오염의 지표로 간주되고 있다. 일반적으로 지구 표면의 평균 오존농도는 0.02ppm인데, 스모그 형성 시에는 0.5ppm을 초과하기도 하며, 지역적으로 큰 차이가 있고 우리나라의 대도시에서도 점차 크게 상승하고 있는 추세이다. 대기중의 오존농도가 높아지면 눈을 손상시키고 기침과 두통이 생기고 심한 경우 폐수종이 되기도 한다. 우리나라에서도 1996년부터 오존경보제를 실시하고 있다. 오존경보제는 대기중 오존의 농도가 일정기준 이상 높게 나타났을 때 경보를 발령함으로서 해당지역 주민들의 건강과 생활환경상의 피해를 최소화하기 위하여 실시하는 제도이다. 경보는 주의보(0.12ppm이상), 경보(0.3ppm이상), 중대경보(0.5ppm이상) 등 3단계로 발령하며 오존오염도가 기준 아래로 낮아질 때는 이를 해제한다.

(7) 우리나라의 대기환경기준

인간은 하루에 약 2만2천 번의 호흡을 한다. 단 10분만 공기가 없는 환경에 놓여 있어도 질식사한다. 따라서 우리가 숨쉬고 생활하는 공기는 매우 중요하다. 대기환경기준은 우리가 숨쉬고 생활하는 우리나라 어디에서나 기준을 초과하지 않아야 한다는 선언적인 중요성을 가지며, 기준을 초과하는 곳에서는 대기오염을 줄이기 위한 대책이 필요하다는 것을 알려준다고 말할 수 있다. 우리나라의 환경정책기본법에서는 표 7.1과 같이 6종의 대기오염물질에 대해서 환경기준을 설정하고 있다. 이를 달성하기 위해서는 오염배출시설물들에 대하여 배출허용최고농도를 정하여 규제하게 되는데 이를 배출허용기준이라고 한다. 따라서 공장에서 법으로 정한 배출허용기준을 초과하게 되면 조업중단, 벌금부과 등의 행정적 규제조치를 받게 된다.

표 7.1 우리나라의 대기환경기준

항 목		기 준
아황산가스 (SO_2)		연간 평균값 0.03 ppm 이하 24시간 평균값 0.14 ppm 이하 1시간 평균값 0.25 ppm 이하
일산화탄소 (CO)		8시간 평균값 9 ppm 이하 1시간 평균값 25 ppm 이하
이산화질소 (NO_2)		연간 평균값 0.05 ppm 이하 24시간 평균값 0.08 ppm 이하 1시간 평균값 0.15 ppm 이하
먼지	총먼지 (TSP)	연간 평균값 150㎍/㎥ 이하 24시간 평균값 300㎍/㎥ 이하
	미세먼지 (PM-10)	연간 평균값 80㎍/㎥ 이하 24시간 평균값 150㎍/㎥ 이하
오존 (O_3)		8시간 평균값 0.06 ppm 이하 1시간 평균값 0.1 ppm 이하
납 (Pb)		3개월 평균값 1.5㎍/㎥ 이하

※ 1. 1시간 및 24시간 평균값은 연간 3회 이상 그 기준을 초과하여서는 아니된다.
2. 미세먼지는 입자의 크기가 10㎛ 이하인 먼지를 말한다.

7.4 지구 대기환경의 문제

(1) 성층권 오존층의 파괴

우리는 종종 신문이나 텔레비젼을 통하여 성층권의 오존층 파괴로 인한 피해가 심각하다는 뉴스를 자주 접하게 된다. 그러면 이러한 오존층파괴란 무엇을 의미하는 것이며, 우리 인간에게는 어떠한 피해를 주는 것인지 살펴보기로 하자. 오존층은 지상 15~50km 사이의 고도, 즉 성층권에 형성되어 있으며 태양으로부터 지구로 들어오는 유해한 자외선을 거의 모두 흡수하는 역할을 하고 있다.

그런데 우리가 사용하는 냉장고, 에어콘, 스프레이 등에 냉매로 사용하는 염화불화탄소라는 물질이 대기중에 방출되면, 대류권의 상층부에서 수십년 동안 머무르다 성층권으로 올라가서 결국은 오존층을 파괴하는 역할을 하게 된다. 이렇게 오존층이 파괴되면 태양으로부터 유해 자외선이 거침없이 지구로 유입되어 인간을 비롯한 지구의 생명체가 살아가기에 유해한 환경이 조성된다.

성층권은 고도가 높아짐에 따라 온도가 상승하기 때문에 공기의 수직 혼합이 일어나지 않는 곳이다. 성층권의 오존은 하루에 350,000톤씩 매일 광화학 반응에 의해 자연적으로 생성되고 분해되어 일정한 농도를 이루고 있다. 성층권의 오존층 내에 있는 전체 기체 중에서 오존이 차지하는 비율은 매우 작다. 오존 농도가 최대인 지역은 성층권 중간부분의 고도 25~35km 범위로 약 10ppmv(1ppmv는 부피비로 100만분의 1을 나타냄) 정도에 달한다. 만일, 대기중의 모든 오존을 이용하여 표준상태(0℃, 1기압)의 순수한 오존으로만 구성된 층을 만들면 겨우 3mm 정도의 얇은 층을 만들 수 있는 양이다.

성층권의 오존은 220~320nm 범위의 파장을 갖는 자외선을 흡수하는 능력이 매우 뛰어나다. 그러므로 280nm~320nm인 UV-B선을 매우 효과적으로 거른다. 파장이 280nm 이하인 UV-C선은 대류권을 통과하지 못한다. 만약 UV-B가 오존에 의해 흡수되지 않는다면 지구상에 있는 모든 생명체에 심각한 피해를 입힐 것이다. 지표면에 도달하는 자외선 중에서는 단지 가장 덜 해로운 형태인 UV-A만 도달한다. 성층권 오존과 깨끗한 대기권의 어떤 성분도 파장이 320nm~400nm인 UV-A선은 흡수하지 못하기 때문이다.

성층권과 중간권 사이 경계 부근인 약 50km 고도를 가장 높은 온도가 되게 한다. 왜냐하면, 오존이 자외선을 매우 잘 흡수하기 때문에 대부분의 자외선이 오존에 의해 흡수된 태양광선은 열로 전환되어성층권의 상부에서 이미 흡수되어 열로 변하므로 중간부분의 오존농도가 가장 높더라도 도달하는 자외선의 양이 적어져 열로 변하는 양도 적어진다. 그러므로 오존이 많은 성층권의 중간부분보다 상부의 온도가 높다.

성층권 오존 농도가 감소하면 지표면에 도달하는 UV-B 광선이 증가한다. 만일, 성층권 상부의 오존이 1% 감소하면 지표면에 도달하는 UV-B의 세기는 2% 증가한다. UV-B 광선의 증가는 인간과 생물들에게 유해한 결과를 초래한다. 대부분의 생물학적 효과는 DNA 분자가 UV-B를 흡수할 수 있기 때문에 일어난다. DNA가 UV-B선을 흡수하면 DNA의 기능을 변화시키는 광화학 반응이 일어나 세포분열시 유전정보를 온전하게 전달할 수 없게 된다. 이로 인해 통제가 불가능한 세포분열이 일어나 피부암을 초래한다. 대부분의 모든 피부암은 UV-B의 과다노출에 따른 것으로 볼 수 있다. 다행히도 UV-B선에 의해서 발생하는 피부암은 치명적인 악성흑생종이 아니라 비늘모양의 세포암으로 온몸으로 잘 전이되지 않는 치료될 수 있는 형태이다. 세계의 여러지역에서 발생되었던 피부암 증가는 아마도 지난 몇 십년간 사람들이 옥외의 태양광선에서 많은 시간을 보냈기 때문일 것이다.

UV-B의 증가는 백내장 발생 가능성을 증가시킨다. UV-B가 10% 증가하면 50대들의 백내장 환자수가 6% 증가할 것으로 예상된다. 또한 증가된 UV-B의 노출로 인간의 면역체계가 저하되어 전염병의 발생이 증가하게 된다.

UV-B의 증가량은 광합성의 효율을 떨어뜨려서 식물들은 잎,씨,과일의 양이 적게 생산될 것으로 예상된다. 또한 바다의 먹이 사슬의 기본을 이루는 식물성 플랑크톤이 현저하게 줄어들어 해양 먹이사슬에 악영향을 미친다. 최근의 개구리들과 다른 양서류의 세계적인 감소는 증가된 UV와 연관된다고 볼 수 있다. 실제로 남아메리카의 개구리 멸종은 오존층 파괴 때문이라고 조사되었다.

미국 환경경보호청(EPA)에서는 앞으로 오존층이 현재보다 5%만 엷어져도 50년 이후에는 미국의 피부암 환자가 현재의 50만 명보다 20배도 더 되는 1,200만 명에 달하고, 인체의 면역체계를 손상시켜 궁극적으로는 중대한 질병이 발생할 것으로 추정하고 있다. 호주와 뉴질랜드에서는 매일 저녁 7시 뉴스에서 다음날의 기상과 자외선의 강도를 예보하고, 11시부터 오후 3시까지는 햇빛을 피하도록 권장하고 있다. 이것은 눈과 귀로 감지되지 않는 자외선이 우리의 일상생활에 대단한 영향을 끼치고 있다는 사실을 입증하고 있다.

오존층 파괴 문제가 지구의 관심사가 되기 시작한 것은 1985년 9월과 10월 사이에 남극지방에 캐나다 크기 만한 오존층 구멍이 뚫렸다고 하면서부터이다. 미국의 항공우주국(NASA)에서는 지구의 남부뿐만 아니라 북부에서도 예상보다 빠르게 오존층 파괴가 진행되고 있음을 밝히고 있다. 미국, 캐나다, 러시아 등 북위 50도 주변 지역에서도 자외선의 위협을 느끼고 있다. 햇볕을 유난히 좋아하는 유럽인들도 이제는 마음놓고 공원이나 해변가에서 일광욕을 즐기기 어렵다는 것이다. 과학자들은 햇볕에 그을린 구리빛 피부가 건강의 상징이 아니라 위험의 표시라고까지 경고한다. 독일의 시사지 슈피겔(Der Spiegel)은 현재의 속도로 오존층이 파괴되면 그것은 지구 종말의 과정을 의미한다고 쓰고 있다. 독일 등에서는 피부보호용 크림이나 립스틱의 수요가 증가하고, 색안경과 넓은 창이 있는 모자, 긴소매 티셔츠의 판매가 과거보다 대폭 늘어났다고 한다.

오존을 소멸시키는 주범은 프레온가스라고 알려진 염화불화탄소(CFCs)이다. 이런 휘발성 물질은 최근 20년 동안 많이 사용되었고 매우 많은 양이 방출되었다. 염화불화탄소는 주로 냉장고의 냉매로 사용되고 있다. 다른 용도로서는 세척제, 에어로졸 분무의 추진제 및 플라스틱의 발포제 등으로 현대 생활에 다양하게 사용되어 왔다. CFCs는 매우 비활성인 안정한 화합물이어서 무독성이며 대기중에서도 수년간은 변하지 않고 존재할 수 있어 성층권으로 유입된다. 성층권 내에서 CFCs는 강한 자외선에 의해 광해리되어 분해되므로서 염소원자를 발생시키는데, 이때 생성된 염소원자 한 개가 촉매로 작용하여 수천개의 오존분자를 파괴한다. 소화기에 사용되는 물질인 할론가스도 오존층 파괴물질로 밝혀졌다. 또한 성층권을 운행하는 제트기나 핵폭발도 오존층을 파괴할 수 있다.

오존층파괴의 가장 대표적인 예는 최근에 나타나기 시작한 것으로 일명 “남극 오존홀”이라고 불리는 것이 있다. 이 현상은 남극 상공에 성층권 오존이 50% 정도까지 심하게 고갈되는 남극의 늦겨울과 이른봄에 걸쳐서 나타난다. 세계의 여러나라들은 오존층을 파괴시키는 CFCs의 사용을 절제하거나 중지하고, 오존층을 파괴시키지 않는 대체물질의 개발을 서두르고 있다. 선진국들은 이미 이러한 대체물질을 개발하였거나 개발하고 있다. 우리 나라도 오존층 보호를 위한 ‘빈 협약’과 오존층 파괴 물질을 규제하는 협약을 체결한 ‘몬트리올 의정

서'에 1992년 5월 가입하였다. 이에 따라 이러한 대체물질 개발을 위하여 학계, 기업, 연구소 등에서 많은 노력을 기울이고 있다.
현재 세계적으로 가장 지대한 관심사항은 개발된 대체물질은 정말로 오존을 파괴하지 않는가? 하는 것이다. 개발된 대체물질로는 수소할로알케인(hydrohaloalkanes) 계열인 수소염화불화탄소, 수소불화탄소 등이 있다. 이들 물질은 대류권 내에서 분해되어 성층권에 도달하기 전에 제거된다. 그러나 여전히 문제점으로 남아있는 것은 이들 불소를 함유한 수소할로알케인 등이 또 다른 특이한 방법을 통하여 오존을 파괴시킬 수도 있다는 점이다.

(2) 온실기체와 지구의 온난화 현상

지표면은 태양광선으로부터 에너지를 흡수하여 대기에 지표복사에 의한 에너지를 내보낸다. 이때 대기는 지표면에서 내보내는 복사에너지를 흡수하여 그 일부를 다시 지표로 방출한다. 즉, 대기는 지표면에서 방출하는 복사에너지가 직접 우주공간으로 빠져나가지 못하게 하며 이러한 에너지 순환과정이 반복되면서 대기는 지표면을 보온하는 역할을 하므로 나타나는 현상을 온실효과(greenhouse effect)라고 한다.
온실효과는 맑고 추운 날 차를 밖에 놓으면 차의 실내가 매우 차가워질 것이라고 예상되지만 실제는 가시광선을 방출하는 태양광선이 자동차의 유리창을 통해 들어와 의자와 차 내부로 흡수되고, 차 내부에서 에너지가 복사되어 실내가 더 따뜻해지는 것과 유사하다.
이와같이 대기중의 열을 흡수하여 저장함으로서 온실효과를 일으키는 기체는 수증기와 이산화탄소 뿐만아니라 메탄, 염화불화탄소 등 여러 가지가 있다. 수증기는 온실효과에 대한 기여도가 가장 크지만 대기중의 수증기 농도는 1~5%로 매우 높기 때문에 인간활동에 의해서 변하는 것이 아니고 물의 순환을 통해서 자체적으로 조절되어 평형을 이루고 있기 때문에 문제가 되지 않는다. 그러나 화석연료나 열대림의 화재에 의해 대량으로 방출되는 이산화탄소, 가축 이용의 증대와 농업의 확대로 산출되는 메탄, 냉매제, 살충제, 세척제로 사용하는 염화불화탄소, 질소산화물 등은 인간활동에 의해 최근 크게 증가하고 있으므로 이들 기체의 과다배출을 많은 학자들은 염려하고 있다. 이들 기체는 열을 잘 흡수하는 온실기체이다.
이산화탄소는 온실기체 중 대표적인 기체로 온실기체들에 의한 총 온난화 효과의 약 절반정도를 차지하고 있다. 분자 한 개당 열 흡수 능력을 비교해보면, 메탄은 이산화탄소보다 20~30배 정도 더 효과적으로 열(적외선)을 흡수한다. 이렇게 효과적으로 지구의 복사열을 흡수하여 온난화에 기여하는 대기중 미량기체들로서는 염화불화탄소와 산화이질소가 있다.
극지방의 얼음 속에 있는 기체를 분석해본 결과 산업혁명 초기의 대기내 이산화탄소와 메탄의 농도는 각각 260ppm과 0.7ppm에 불과하였으나, 현재는 각각 350ppm과 1.7ppm 정도로 증가하였다. 이들 기체농도의 증가는 대부분은 지난 100년 동안에 가속적으로 증가된 것이다. 이러한 추세라면 이산화탄소의 농도는 계속 증가하여 2050년에는 산업혁명 이전(1850) 수준의 2배 정도가 될 것으로 예상된다.
기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)가 산출한 바에 의하면 1990년과 2100년 사이에 지

구평균 기온은 1.0~3.5℃ 증가할 것이라고 한다. IPCC 과학자들은 단지 앞으로 수 십년 동안에 지구의 평균기온이 1℃ 이상 상승하면 지구 생태계와 인간의 경제 및 사회 시스템의 구조와 기능에 심각한 지장을 초래하게 될 것이라고 경고한다.

지구의 온난화로 인해 발생하는 기후변화로는 우선 해수면 상승을 들 수 있다. 왜냐하면 기온이 상승하여 물이 가열되면 그 부피가 팽창하기 때문이다. 해수면은 1900년에서 1990년 사이에 9~18cm 정도 상승하였다. 1990년부터 2100년 사이에는 15~95cm 정도 상승할 것이라고 예상하고 있다. 이렇게 되면 세계 경제기반의 3분의 1이상이 집중되어 있는 해안지역과 농작물이 자라는 저지대의 많은 부분이 바닷물에 잠길 것이다.

지구온도가 평균 1℃ 상승하면 기후대가 북반구의 경우 북쪽으로 100~150km 정도 이동되고, 고도는 150m 정도 올라갈 것으로 예상한다. 그렇게 되면 주요 농산물의 세계생산량이 10~70% 정도 감소할 것이며 농경지의 10~50%가 황폐화될 것이라고 한다.

지구 기온이 3℃ 정도 상승하게 되면 강수량의 10% 정도 감소한다. 이것은 40~70%의 지표수 감소효과를 가져오고 농업 및 생활용수에 큰 영향을 미치고, 토양의 산성화와 토양 유실을 심화시킨다. 어떤 지역에서는 물의 공급을 감소시켜 수세기 동안 생태계, 농경지, 도시에 물을 공급하던 강이나 호수의 물이 줄어들거나 말라버려 사람들이 물을 구하기 위해 다른 지역으로 이주해야 될지도 모른다. 그리고 더위와 관련되어 사망하는 노약자나 어린이들의 수가 증가할 것이며, 천식이나 기관지염과 같은 호흡기질환자들이 증가할 것이라고 한다. 그리고 뇌염, 열병 등 열대성 질병들이 온대에까지 퍼지게 될지도 모른다. 삼림 또한 그 구성과 위치를 바꾸어 온대와 아한대의 산림들은 서서히 극지방이나 더 높은 고도로 이동할 것이다. 그리고 건조현상은 자연적인 산불을 더 많이 유발시킬 것이다.

한가지 흥미로운 것은 산성비의 원인이 되고 있는 이산화황은 온실기체의 영향을 줄이는 역할을 한다. 그 이유는 이산화황은 대기중에서 최종적으로 황산으로 변하는데 이때 빛을 반사하는 박무를 형성하기 때문이다. 중앙 유럽과 미국 동부 지역에서는 여름철에 황산염 에어로졸이 온난화 현상을 감소시키는 역할을 효과적으로 하고 있다.

지구온난화를 지연시킬 수 있는 방법은 없는가? 어떤 사람들은 핵발전소에 의한 전력생산을 늘릴 것을 주장하기도 한다. 핵연료가 방출하는 이산화탄소의 양은 석탄이 방출하는 이산화탄소의 양의 6분의 1에 불과하다. 그러나 핵발전소는 방사능 물질의 누출에 의한 사고의 위험성 때문에 좋은 방법이 아니다. 천연가스는 석탄이 연소될 때 방출되는 이산화탄소 양의 절반을 방출한다. 따라서 석탄이나 석유 대신 천연가스를 사용하는 것은 지구온난화를 지연시킬 수 있는 방법 중의 한가지이다. 천연가스는 대기오염물질도 적게 방출한다.

1992년 부라질의 리우 데 자이네로에서 개최된 지구정상회담 이후, 1997년 12월에 세계 161개국 대표자들이 일본 교도에 모여서 온실기체 방출량 감축에 대한 내용을 협의한 바 있다. 협약의 최종적인 내용은 38개 선진국에게 2008년과 2012년 사이에 온실기체 방출량을 1990년 대비 평균 5.2% 감축하도록 요구하였다. 이것은 지구온난화를 지연시키기 위한 하나의 자그마한 진전이다.

현시점에서 지구온난화를 지연시킬 수 있는 방법은 우선 석탄이나 석유의 사용량을 줄이고

대신 천연가스의 사용량을 늘리면서 하루빨리 재생 가능한 에너지, 이산화탄소의 방출이 없는 새로운 에너지를 개발하는 일일 것이다. 그리고 이들 대체에너지를 개발하는 동안은 에너지를 절약하는 일, 산업체와 가정에서 사용하는 열기관의 연소효율을 높이는 일, 그리고 화석연료의 사용을 자제하는 일 등이 지구온난화를 억제하는 길이 될 것이다.

(3) 산성비

순수한 물의 pH는 7인데 반하여 오염이 되지 않은 순수한 상태의 빗물은 대기중에 0.035% 존재하는 이산화탄소가 용해되어 pH 5.6인 상태가 된다. 따라서 산성비는 pH가 5.6 이하인 상태를 말한다. 이 용어는 비 이외에도 안개, 이슬, 눈이나 진눈개비, 우박을 포함한 모든 수용성 산성 강하물을 의미한다. 비는 대기에 떠있는 가스와 먼지, 분진 등을 씻어 낸다. 황산화물, 질소산화물이 대기 중에 배출되어 있으면 이들은 최종적으로 수증기와 반응하여 황산, 질산을 만들게 되어 빗물의 pH는 5.6 이하로 낮아진다.

황산화물과 질소산화물 등 산성비의 원인물질은 화산폭발과 산불, 박테리아의 분해작용 등에 의해 자연적으로 발생되며, 인간활동에 의한 화석 연료의 연소작용으로 발생한다. 석탄의 대량연소로 대기중에 배출된 이산화황이 비에 용해되어 산성비가 내리게 된다는 것을 처음으로 발견한 사람은 영국의 화학자인 스미스(Robert A. Smith)였다. 스미스는 1872년에 "공기와 비"라는 책을 출간하였는데 여기서 처음으로 산성비(acid rain)라는 용어를 사용하였다.

최초로 산성비가 문제가 된 곳은 북유럽 여러 나라들이었다. 1988년에 보고된 스웨덴의 한 조사에 의하면, 8만5천 개의 호수 중 2만5천 개가 pH 5.5 이하의 산성호수이며, 그 중에서 4천5백 개는 물고기가 전혀 살고 있지 않다는 죽음의 호수로 변하였다고 하였다. 스웨덴 서해안 지방은 영국과 독일 등의 공업지대에서 바람을 타고 날아온 대기오염물질이 강하되는 지역이다. 바람에 의해 대기오염물질은 1,000km까지도 이동된다. 산성비는 공업화가 빠른 선진국에서 먼저 나타났지만 점차 지구 전체로 확산되고 있다.

산을 만들어내는 대부분의 화학물질은 발전소, 공업단지, 제련소와 자동차 등 화석연료의 사용으로 발생되는데 노르웨이, 스웨덴, 네덜란드, 핀란드, 스위스, 오스트리아에서의 산성비 원인물질들은 대부분 영국과 독일 등의 서부유럽 및 동부유럽의 선진국들로부터 이동되어온 것이다.

미국이나 북유럽의 조사를 보면 호수의 pH는 1970년 이후 5 이하로 산성화되고 있으며 이러한 호수에는 물고기가 없었다. 1970년대부터 pH 4.3의 강산성비가 내린 스칸디나비아 반도의 호수 65만 개에는 현재 물고기가 없고 독일은 87년 이후 산림의 52%가 성장을 중단하였다. 알프스지역도 예외는 아니어서 산성비와 오존오염의 영향으로 산림의 절반 이상이 파괴되고 있다. 중국의 아황산가스 오염도는 우리보다 훨씬 높은 수치를 보이고 있는데 주변 국가의 오염은 대기 이동에 의하여 우리 국토를 산성화시킬 수 있다. pH 4.0이면 물에서는 물고기가 서식할 수 없고 토양에서는 산성토양에 강한 수종을 제외한 일반수목은 서서히 말라죽게 된다.

산성비가 내리면 제일먼저 토양이 산성화된다. 토양이 산성화되면 토양 내의 영양분이 용출되어 고갈되거나 산성을 완충시키는 물질이 고갈된다. 산성비는 토양의 점토광물에 들어있는 알루미늄 등 금속이온을 용출시킬 수 있다. 용해상태의 알루미늄은 대부분의 식물에게 독성을 발휘한다. 토양의 계속된 산성화는 필수원소들의 농도는 감소시키고 독성원소들의 농도는 증가시키는 결과를 초래한다. 이 이온들이 호수로 유입될 경우는 점액생성을 자극함으로서 물고기의 아가미를 막아 질식시키기 때문에 많은 종류의 물고기들이 죽을 수 있다. 토양의 영양분을 보충하는데는 수십년에서 수백년이 걸릴 수 있다.
산성비는 각종 콘크리트 건축물이나 대리석, 금속제품, 철근의 구조물을 부식시키기도 하고, 육지의 생태계와 토양 미생물에 피해를 입히기도 하면서, 수중 생태계에 유입되어 플랑크톤, 녹색식물, 수생식물, 어류 등에 치명적인 타격을 주기도 한다.

(4) 핵겨울

핵겨울이란 대규모의 핵폭발이 있을 때 일어날 수 있는 비극적인 대기의 영향을 의미하는 것으로 대량의 먼지와 연기가 태양 빛을 차단하여 지구의 기온이 갑자기 내려가 기상적 재앙을 가져오는 한랭현상을 일컫는다. 핵전쟁이 일어나 대규모 핵 폭탄이 폭발하면 막대한 열이 발생되고 이 열은 위력적인 상승기류를 만들어 거대한 양의 검댕 같은 연소생성물을 성층권으로 유입시키게 될 것이다. 그로 인해 수개월에 걸쳐 지구가 암흑에 빠지게 되고 몇 년 동안 기온이 매우 낮아져 여름에도 영하의 날씨가 계속되어 인간이 살기 어려운 환경이 조성될 것이다.

제8장 수질환경과 오염

8.1 물과 수자원 현황

(1) 물의 분포와 이용

물은 인간생활에 있어서 다양한 용도로 사용되고 있다. 음용수, 가정에서의 생활용수, 농업용수 그리고 공업용수로 쓰는 등 인간의 거의 모든 활동에 물이 쓰이고 있다. 인간이 섭취하는 물의 양은 기온 등 환경조건에 따라 다르지만, 어른의 경우 하루 1~1.5 리터이고 음식물에 함유되어 섭취되는 수분까지 포함하면 보통 2~3 리터 가량이다. 인간생활에서 물의 중요성은 문명의 발생이 하천 및 수자원이 풍부한 지역을 중심으로 발달되었던 것을 보더라도 알 수 있을 것이다. 문명의 발달로 인한 농업시설의 증가와 인구의 도시집중 현상으로 물의 사용량은 계속 증가되고 있다. 이제 한 나라의 문화를 평가하는데 물 사용량을 척도로 삼기도 할 정도이다. 이러한 물의 사전적 정의는 도처에 존재하는 무색 무취의 액체로서, 생물의 생존에 없어서는 안될 물질이라고 되어 있다.

지표의 70%는 물로 덮여 있다. 지구에 존재하는 물의 97.2%는 해양에 존재하며, 육지에는 대기중 수증기 상태를 포함하여 2.8% 정도가 존재한다. 육지에 존재하는 물 중에서 빙하와 만년설을 제외한 나머지 24%의 물이 민물(담수)이며, 민물은 지구에 존재하는 물 총량의 0.7%에 해당하는 양이다. 민물의 97.5%는 지하수이고, 0.8%는 토양에 존재하는 수분이며, 나머지 1.7% 정도가 지표수로서 강이나 호수에 존재하는 물이다. 도시의 가정용수로 사용하기 위해 파이프를 통해 공급되는 대부분의 물은 강이나 호수의 지표수를 깨끗하게 처리한 물이다. 그리고 상점에서 판매하고 있는 물은 대부분 지하수를 처리하여 상품화한 것이다.

지하수는 지상에 내린 비가 땅속으로 스며들어 형성된다. 물이 지하로 내려가다가 쉽게 통과할 수 있는 토양이나 암석층을 만나면 그 속에 포함된 여러 원소를 녹여낸다. 암층에서는 수백년을 머무르고 수백km를 이동하기도 한다. 지하수의 대부분은 지하 750m 정도까지만 존재한다. 이 깊이 이하에서는 물이 거의 발견되지 않으나, 예외적으로 러시아의 콜라 반도(Kola Peninsula)에서는 지하 11km에서 물이 발견된 경우도 있다. 지하수의 일부는 다시 지표로 나오는데, 용천수로 솟아 나오기도 하며, 물을 함유한 암층까지 구멍을 뚫어 펌프로 물을 끌어올리기도 한다. 지하수가 지구의 전체 수권에서 차지하는 양은 매우 적지만 인간은 많은 양의 물을 지하수로부터 충당한다. 그러므로 지하수는 빠르게 소모되는 천연자원이며 또한 인간에 의해 만들어진 쓰레기로 쉽게 오염되고 있다.

(2) 물 부족 현상

인간이나 생물의 생활에 이용되는 지구상의 모든 물을 수자원이라고 하는데 우리 인간이 주로 사용하는 물은 하천이나 호수 등의 지표수 및 지하수로서 담수인 민물이다. 수자원으로

는 생활용수 이외에 농업용수, 공업용수 및 언제 필요할지 모르므로 항상 유지하여야 할 유지용수가 있다. 지구상에서 인간이 사용할 수 있는 물 공급량은 한해 9천km^3이며 이 중 인간이 실제로 쓰는 양은 4천3백km^3 정도이다. 따라서 절대량만으로 생각하면 아직 물은 충분하다고 볼 수 있다.

그러나 문제는 수자원의 지역적 편재와 인구증가에 따른 물 사용량의 급증이다. 유엔의 통계에 따르면 현재 지구전체의 물 소비량은 지난 50년대에 비해 5배 가량 늘어났다고 한다. 그리고 자국민의 절반 이상에게 안정적으로 물을 공급할 수 있는 나라는 미국 서유럽 등 일부 국가뿐이며, 여러 나라의 많은 인구가 "물 절대부족지역"에서 사는 것으로 분류되고 있다. 1인당 하루평균 300리터 이상을 쓰는 미국 국민은 엄청난 양의 물을 소비하지만, 케냐의 시골 주민들은 최소 필요량인 80리터에서 크게 모자라는 5리터 정도의 물을 쓰고 있다고 한다.

1999년 스위스의 제네바에서 유네스코(UNESCO)와 세계기상기구(WMO)의 주관으로 열린 "물 위기극복 회의"에서는 물 부족 현상이 이미 25개국에서 일어나고 있으며, 2025년에는 35개국으로 늘어나 많은 사람들이 물 부족으로 고통을 겪을 것이라고 경고하였다. 수자원 확보를 위한 물 전쟁은 이미 중동 지역의 나라들 사이에 시작되었고, 여러 나라들이 갈등을 겪고 있다. 석유와 달리 물은 대체할 수 있는 물질이 전혀 없으므로, 물 파동은 엄청난 재앙을 불러올 것이다. 현재 사용 가능한 청정수는 전체 수자원의 0.007%로 한정되어 있다. 그러나 인구증가 및 경제개발에 따른 물 소비량의 급격한 증가와 산림파괴에 의한 수원 고갈 및 인간활동에 의한 청정수의 오염으로 물 부족 현상은 심화되고 있다. 다가올 물 위기의 극복은 개인 차원에서 뿐 아니라, 세계적인 공조체제를 통해서 수자원 보호에 힘써야 가능할 것이다.

(3) 물의 순환

물은 지구 내에서 바다로부터 대기와 육지, 다시 바다로 번갈아 이동하는데 이를 물의 순환이라고 한다. 태양열에 의해 바다와 육지가 데워지면 물의 일부가 증발하여 수증기로 변하게 된다. 수증기는 대기권으로 들어가 공기와 함께 순환된다. 대기권에서는 따뜻한 공기는 위로 올라가고 차가운 공기는 아래로 내려가므로 수증기는 더운공기와 함께 위로 올라간다. 고도가 높아지면 공기는 차가워지므로 수증기 역시 차가워져 대기중의 작은 입자를 중심으로 응축되어 비나 눈 때로는 우박 등의 형태로 지표로 되돌아온다. 우리가 빗방울이라고 부르는 물방울은 약 800만개의 미소 물입자가 모여서 만들어진다. 지상에 내린 비는 눈, 우박이 녹은 물과 더불어 호수나 강으로 이동하고 땅속으로 스며들기도 한다. 일부는 지표에서 그리고 산림, 호수 등을 거치면서 증발되고 식물로부터 증산되기도 한다. 강으로 이동한 물은 결과적으로 바다에 되돌아온다. 육지로부터 강을 통하여 바다로 되돌아온 물의 양은 바닷물이 증발되어 육지로 이동한 물의 양과 거의 비슷한 양으로 균형을 유지하고 있다. 만일 그렇지 않다면 바닷물의 양은 계속하여 감소하거나 또는 증가해야만 한다. 이와 같이 물은 해양, 대기, 육지를 통해 액체, 기체(수증기) 또는 고체(눈, 얼음)의 형태로 계속하여 바뀌는

끝없는 순환작용을 하고 있다.
물의 순환과정에 있어서 시간적, 지역적 불균형은 인간생활에 엄청난 영향을 주고 있다. 지구의 어느 한 지역을 살펴보면 증발만 계속되는 가뭄현상이 일어나는 곳도 있으며 폭우로 인하여 막대한 인명과 재산의 피해가 발생하는 지역도 있다. 이는 물 분배의 시간적 지역적 불균형으로 인해 발생되는 현상이다.

(4) 물의 특성

물의 특이한 성질 중에서 첫째는 물의 밀도가 4°C에서 가장 크다는 점이다. 따라서 추운 겨울에 영하의 날씨가 계속되면 물이 얼게되는데 이때 고체인 얼음의 밀도가 액체인 물의 밀도보다 작아 호수와 강은 표면부터 얼게 된다. 대기의 온도가 더욱 떨어지면 표면의 얼음 두께는 더 두꺼워지므로 얼음은 대기의 낮은 온도가 수중으로 전달되지 않도록 절연체의 역할을 하게된다. 이에 따라 얼음층 아래의 수온은 어느 온도 이하로 더 낮아지지 않으므로, 추운 겨울에도 어류는 생존할 수 있게 된다. 그러므로 수중에서 물고기는 살 수 있게 된다.
둘째, 물은 열 저장 능력이 매우 크다는 점이다. 예를 들어 물 1g의 온도를 1°C 올리는데 필요한 열량은 아연의 경우에 비하면 33배나 더 필요하다. 그러므로 다른 물질에 비해 열용량이 커서 쉽게 뜨거워지거나 냉각되지 않는다. 바닷물 표면의 온도는 극지방에서도 영하 2°C 이하로 떨어지는 경우가 드물며 열대지방에서도 27°C를 넘는 경우가 거의 없다. 대기중에 기체상태로 존재하는 수증기는 공기의 온도를 조절해 주는 역할을 한다. 밤과 낮의 기온 차이를 극심하지 않도록 조절해 주고 있는 것이다. 이러한 물의 열 저장 능력은 지구 표면에서 인간이 활동을 하며 살아갈 수 있는 적절한 온도 환경을 제공해 주는 역할을 한다.
셋째, 물은 극성용매라는 점이다. 물분자는 산소원자 하나에 수소원자 둘이 결합되어 있는데, 결합각(∠H-O-H)은 104도이며 수소원자는 전자를 주어 부분 양전하를 띠며 산소원자는 전자를 받아 부분 음전하를 띠게 된다. 그러므로 이 이중극의 특성에 의해 지각을 이루고 있는 여러 가지 무기질들을 녹여낼 수 있으며 모든 생화학 반응을 담당할 수 있게 된다. 생명체는 거의 물로 만들어져 있으며 생명체 내에서 일어나는 생화학 반응은 하나도 예외없이 모두가 물 속에서 일어난다. 그래서 물을 '만유용매'라고도 부른다.

8.2 수질오염

(1) 수질오염의 개요

지표수, 지하수 및 해수의 수자원에 부유물질, 유독물질, 부패성 물질 등이 유입되어 수질이 물리.화학적 또는 생물학적으로 변화하여 각종 용수로 사용할 수 없거나 수서생물에 악영향을 주는 현상을 수질오염(water pollution)이라고 한다.
하천이나 호수에 독성물질이 유입되어 어류가 집단으로 죽거나, 영양물질이 다량 유입되어 조류(algae)의 과다증식으로 수질이 악화되면 이 물을 이용함으로써 받는 피해 때문에 시민들은 물론 공장에서나 농민들로부터 수질개선의 요구가 일어나기 마련이며 그러한 경우에는

필연적으로 폐수처리시설의 설치, 보완 등을 하여 피해의 최소화를 기하여야 하며 한편으로는 피해자에 대한 피해보상 등을 해주어야 하는 일이 생기게 된다.
오염현상을 바라보는 시각에 있어서 개발도상국의 경우는 "물이 약간 오염되더라도 경제발전을 위해서는 어쩔 수 없는 일이 아닌가"라는 시각을 가지고 있는 반면, 선진국에서는 "국민건강 차원에서 도저히 용서할 수 없다."라는 시각을 갖고 있으므로 각 나라가 처한 가치환경에 따라 환경오염에 대처하는 시각이 차이가 난다.

(2) 수질오염 유발인자

가정하수, 동물의 분뇨 등은 미생물에 의해 분해될 때 산소를 소모한다. 이들은 산소요구물질이라고 한다. 수질이 산소요구물질에 의하여 오염되면 호기성 생물을 위협하는 환경을 초래하게 된다.
질산염과 인산염 등의 무기영양소가 과다한 물은 광합성에 의해 산소요구물질인 유기물 생산을 촉진하게 된다. 유류, 세제 등의 유기화학물질은 수중생물의 활동을 저해한다.
수용성 무기화합물인 산, 염기 및 독성 중금속의 농도가 높은 물이 음용수로서 사용되면 인간의 신진대사 활동을 저해하게 된다. 질병유발인자인 세균, 바이러스, 원생동물, 기생충 등에 오염된 물이 음용수로서 사용되었을 때는 질병을 일으키게 된다.
방사능 물질은 인간과 생물들에 돌연변이를 유발한다. 또한 부유물질(부유성 토양입자 등)은 광 투과성을 방해하여 광합성 및 광합성에 의한 산소생산을 억제한다.
화력 및 원자력발전소 등의 발열시스템의 냉각수로 사용하는 물이 흡수한 열도 수질악화의 원인이 된다. 이를 열 오염(thermal pollution)이라고 하는데 수계의 온도가 높아짐으로서 용존산소의 농도가 감소하게 되고 이로 인하여 수생생물의 생태계가 변화하게 만든다.

(3) 호수의 부영양화

부영양화(eutrophication) 현상은 수중 생태계로 유입되는 영양소의 증가로 인해 조류와 수생식물이 번성해져 유기물의 총량이 증가하게 되는 것을 말한다. 영양물질의 유입이 거의 없는 호수는 플랑크톤이 적고 투명도가 높다. 이와 같은 상태를 빈영양상태라고 하며 그러한 호수를 빈영양호라고 한다.
하천으로부터 영양분이 호수로 유입되면 식물성 플랑크톤의 증식이 활발해지고 , 그것을 먹이로 하는 동물성 플랑크톤과 어류의 수가 점점 증가한다. 체류시간이 긴 호수나 정체수역에 질소, 인, 탄소 등이 많이 포함된 유기성 공장폐수, 인산비료나 질소비료가 포함된 농업폐수, 질산염이나 인산염이 들어있는 생활하수로 인한 인위적인 영양물질이 많이 유입되면 각종 조류(algae)가 잘 번식하게 된다. 조류가 많아지면 먹이사슬에 따라 물고기가 많아져서 호수의 생태계에 좋을 것 같지만 실제로는 생태계에 악 영향을 미친다. 조류는 수명이 매우 짧아 번식 후 바로 죽게되며, 이러한 조류의 사체는 용존산소를 소모하며 분해되어 질소, 인 등 또 다른 조류의 번식을 초래할 수 있는 영양소를 생성한다.
조류가 과다 번식하게 되면 물의 투명도는 급격히 떨어지고 용존산소가 감소하므로 송어,

연어 등 수질이 깨끗하며, 산소가 풍부한 물을 필요로 하는 물고기는 부영양화의 진행과 함께 사라지게되며, 대신 붕어, 잉어 메기와 같이 오염된 물에서도 살 수 있는 저급어종이 늘어난다. 이러한 순환이 계속되면 호수의 수질은 점점 더 나빠지게 되어 영양장애 상태가 되어 물에서 심한 악취가 나며 용존산소는 고갈되어 물고기가 더 이상 살 수 없게 된다.
물의 사용과 호수 관광의 관점에서 볼 때, 빈영양호는 부영양화된 호수보다 사용가치가 훨씬 더 높다. 왜냐하면 부영양화가 많이 진행될수록 호수의 물을 상수원으로 사용하면 상수처리비용이 상승하며, 수영, 놀이, 낚시 등 호수관광의 차원에서도 부적합하게 된다.

(4) 중금속과 생물농축

중금속은 밀도가 일반금속에 비해 상당히 크다. 중금속 중에서 금(Au), 은(Ag) 등은 독성이 없다. 중금속 중에서 수은(Hg), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 그리고 비소(As)는 특히 독성이 강하며, 이들은 양이온 형태로 존재할 때, 짧은 탄소고리와 결합되어 있을 때가 유독하여 위험하다. 이들 중금속은 각종 화학물질을 생산하는 공장에서 많이 사용되며 공장폐수에 섞여 배출된다. 만일 공장폐수가 처리되지 않고 그대로 방류되면 하천을 따라 호수 및 바다가 중금속에 오염될 수 있다.
환경에는 미량으로 존재하는 독성물질도 일단 수계로 들어가면 먹이연쇄를 따라서 독성물질이 고농도로 생체에 축적될 수 있다. 이를 생물농축(biological accumulation)이라 한다. 중금속에 오염된 수계에서 사는 많은 수중생물들은 중금속을 생물농축한다. 예를 들어, 굴과 쌍각류 조개는 수은과 카드뮴을 그들이 사는 물속의 농도보다 그들의 생체에 십만배 이상 축적한다. 따라서 이들 어패류나 물고기를 다량 섭취하게 되면 중금속 중독증을 일으키게 된다.
대부분의 중금속은 효소인 단백질과 분자와 강하게 결합하려는 경향이 있다. 단백질과 결합한 금속은 잘 배설되지 않는다. 그러므로 소량의 중금속이라도 계속해서 흡수하게 되면 인체 내에 축적되어 건강장해를 일으키게 된다. 중금속은 중추신경계에 관련된 효소와 강하게 결합하므로서 신경마비, 혼수, 정신이상 등을 초래하는 경우가 많다.
미나마타병은 메틸수은이 다량 농축된 어패류를 섭취하므로서 발생하였다. 메틸수은 중독의 초기에는 두통, 현기증 등이 나타나다가 심하면 수족이 떨리고, 감각장애로 보행이 어려우며 사망하기까지 한다.
이따이이따이병은 카드뮴 중독에 의해 일어났으며 이 병에 걸린 사람은 퇴행성 뼈질환에 걸렸다. 이병은 관절에 심각한 고통을 유발한다. 카드뮴은 인체에 흡수되면 혈액에 의해 운반되다가 간과 신장에 축적된다. 카드뮴의 체내 잔류기간은 16~33년이나 된다.
이외에도 휘발유에 첨가된 납, 살충제와 고엽제에 첨가된 비소 등의 독성 금속은 대기 중에 방출되었다가 수계로 들어가 수질오염을 일으킬 수 있다.

8.3 수질오염원의 종류

(1) 점오염원

수질 오염원은 방지와 관리의 편리를 목적으로 점 오염원과 비점 오염원으로 구분한다. 점 오염원(point source)은 특정위치에서 하수관이나 도랑을 통하여 오염물질이 포함된 폐수가 배출되는 오염원을 말한다. 아파트단지, 공장, 발전소, 폐광, 석유탱크, 폐수처리장, 축산농가 등에서 발생하는 생활하수, 산업폐수, 축산폐수 등은 점 오염원에 속한다. 이들 점 오염원은 처리가 용이하고 심각성 또한 쉽게 알아볼 수 있어 지금까지 대부분의 수질오염 방지 노력은 이들 점 오염원의 관리에 집중되어 왔다. 즉, 자체 정화시설의 설치와 설치된 정화시설의 적정 관리를 유도함으로써 오염원의 통제와 관리가 가능하다고 보여진다.

<생활하수>

생활하수는 시골보다 인구가 집중되어 있는 도시에서 많이 발생한다. 도시에서 발생하는 생활하수는 주방의 음식찌꺼기 및 식기류 세척 및 세탁폐수 그리고 수세식 화장실의 희석분뇨 등이다. 생활하수의 발생량은 인구증가와 국민생활수준의 향상으로 증가하고 있다. 그러나 최근 각종 합성세제의 사용량이 증가하면서 생활하수의 질은 악화되어가고 있다. 도시에서 발생하는 생활하수는 집중처리방식에 의해 처리되는데 세제류의 과다사용은 집중처리 작업에 지장을 주고 있다. 고급 지방산소다인 비누는 미생물에 의해 분해가 잘되지만 합성세제는 세척력은 뛰어나지만 비누에 비해 미생물에 의해 분해되기 어려운 난점이 있다. 분뇨의 경우 재래식 화장실의 발생분뇨는 수거되어 분뇨처리시설에서 최종 처리하게 되며, 수세식 화장실이 설치된 주택이나 아파트에서 발생하는 분뇨는 정화조 또는 오수정화시설에서 1차 처리된 다음 하수관망을 통하여 하수종말처리장에서 최종 처리된다. 아파트 등 대규모 주택단지의 경우는 오수 및 분뇨를 자체 정화시설인 “오수처리시설”에서 처리하는 방식을 하고 있다.

<산업폐수>

산업폐수의 오염도는 생활하수와는 비교가 안될 정도로 높아서 수질오염에 대한 가장 큰 문제는 산업폐수에 있다해도 과언이 아닐 것이다. 산업의 다양화, 대규모화 등으로 인하여 수은, 납, 아연 등 각종 중금속을 비롯하여 하수보다 영향이 큰 고농도 유기성 물질, 고도의 처리를 요하는 난분해성 화학물질 등이 배출되기 때문이다. 이들 오염물질은 대부분 기존의 하천 및 호수 등에서 자정작용에 의하여 정화되지 않는다.

도금, 피혁, 섬유, 제지, 화학공장 등에서 나오는 산업폐수는 중금속 등 유해 화학물질을 많이 함유하고 있어 현재 문제가 되고 있는 주요 산업폐수 발생원이다. 따라서 이들 공장은 산업폐수 처리시설을 잘 갖추어야 하고 관리를 엄격하게 하여야 한다. 그러나 해마다 수많은 업체들이 폐수 배출기준을 어겨서 적발되고 있는 실정이어서 문제가 되고 있다. 소위 물파동으로 기억이 되는 1989년의 수돗물 중금속 검출 사건, 1990년 트리할로메탄

(trihalomethane; THM)사건, 1991년의 낙동강 페놀 사건은 우리가 실제로 체험한 산업폐수가 원인이 되었던 사건들이다.
하천, 호수 및 대륙붕이 중금속을 함유한 산업폐수로 오염되면 이들 오염지역에 사는 물고기들은 생물농축 현상으로 인하여 중금속이 체내에 축적된다. 인간이 이들 물고기를 먹이로 섭취하면 역시 인간에게도 중금속이 축적되어 무서운 환경질환 또는 공해병을 유발하게 된다. 미나마타병은 수은이 생물농축된 어패류를 먹은 결과 발생되었으며, 이타이이타이병은 일본 도야마 현에서 처음으로 알려진 병으로 식수의 카드뮴 오염에 의해 발생되었다.

<축산 폐수>

축산폐수는 유기물질의 함량이 매우 높다. 소득수준의 향상으로 육류 소비량이 증가하면서 소, 돼지, 닭, 등 가축 사육두수가 증가하고 그 사육규모가 커지면서 가축분뇨와 그로 인한 폐수가 대량으로 발생하고 있다. 그러나 상당수의 축산농가에서는 발생하는 폐수를 적정 처리하지 않고 하천에 그대로 방류하는 경우가 발생되고 있으며, 또한 이들 축산 시설물이 대부분 상수원 근처에 위치함으로써 문제는 더 심각해지고 있다. 정부에서는 1997년 3월 오수분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률을 개정하여 간이 축산폐수 정화조의 설치대상 지역을 상수원 보호구역 등 특정지역에서 전국으로 확대 실시하도록 하였다. 상수원의 수질보전을 위하여는 상수원 주변지역에서는 가축의 신규사육을 제한하여야 한다. 축산폐수를 축산폐수 공공처리시설에서 위탁처리하는 축산농가는 축산폐수 저장시설을 설치하도록 하여 축산폐수가 토양 및 하천으로 흘러 들어가는 것을 방지하여야 한다.

(2) 비점오염원

비점 오염원(nonpoint source)은 오염물질이 특정한 한 지점으로부터 배출되지 않고 여기저기 산재해 있는 넓은 지역에서 배출되는 경우로서 오염원의 확인이 어렵고 규제가 용이하지 아니한 특징이 있다. 따라서 이를 면 오염원(area source)이라고도 하며 수질을 오염시키는 넓은지역이나 일정지역의 대기가 비점 오염원이 될 수 있다. 그러므로 비점 오염원으로 인한 수질오염은 심각하다. 비점 오염원에 의한 수질오염은 비가 올 때나 눈이 녹아 물이 흐를 때 발생하게 된다. 이들 비점 오염원으로는 경작지, 목장, 도시지역, 공사장, 주차장 도로 등의 지역을 자나 온 빗물의 지표 유출수 또는 땅으로 스며드는 물에 포함된 농약, 화학비료, 합성세제, 기름 등의 오염물질로 인한 오염발생의 경우이다.
농약은 토양에 살포된 것이 장기간에 걸쳐 서서히 수역에 유입되어 수질을 오염시킨다. 특히 농약은 자연환경에서 분해되지 않고 잔류하는 것이 대부분이어서 중금속과 마찬가지로 생체 내에 축적이 일어나 만성적인 중독현상을 나타내므로 그 위험도는 심각하다. 현재 환경호르몬으로 알려진 DDT나 BHC 등의 유기염소계 농약은 사용 금지된 지가 이미 오래이나 아직 토양이나 하천에 잔류하고 있는 것으로 보고되고 있다. PCB는 농약은 아니지만 농약성분과 유사한 잔류성과 독성을 가진 화합물로서 전기 절연재료, 열 매체, 도장원료 등으로 쓰이는데 이들 폐기물로 인하여 PCB가 토양이나 하천에 나타나고 있어 PCB의 처분이

문제로 대두되고 있다.
화학비료의 사용으로 곡물생산은 엄청나게 증가되었지만, 그 결과 비료의 살포로 인한 하천, 호수, 특히 농.어촌 지역의 수질오염은 무시할 수 없는 양이 되었다. 비료는 독성에 대한 영향보다는 질소(N), 인(P)이 주성분이기 때문에 이들은 하천, 호수 등에 서식하는 녹조류의 영양물질로 작용하여 부영양화의 발생의 원인으로 작용되고 있다.
합성세제는 1930년대 비누원료인 동식물성 유지류가 부족하여 이에 대한 대체품으로 개발되었다. 합성세제의 가장 핵심적인 첨가물인 계면활성제는 물의 습윤성을 더욱 증진시키고 더욱 좋은 세척제로 작용하도록 한다. 1960년대 초기까지 가장 널리 사용되었던 계면활성제는 ABS(알킬벤젠설포네이트)였으며 ABS는 가지달린 사슬구조 때문에 생분해가 매우 느렸다. 그러나 현재는 비교적 생분해가 잘되는 LAS(선형알킬벤젠설포네이트)로 전환되어 사용되고 있다.
현재 세제로 인해 발생하는 대부분의 환경문제는 계면활성제로 인한 것이 아니라, 세제에 세척력을 증가시키기 위해 첨가하는 빌더(builder)로 사용하는 인산염에 기인한다. 최근에는 인산염 대신 제올라이트(zeolite)로 대체되어 가는 추세이다. 그러나 아직도 빌더로서 인산염을 많이 사용하고 있다. 인산염은 환경오염물질로 가장 관심의 대상이 되는 물질로 부영양화의 원인물질이다. 세제의 성능에 대한 계속적인 욕구는 또한 효소의 사용을 증가시켰다. 효소는 어느 정도까지는 인산염을 대신할 수 있다. 현재 지방 분해효소와 셀룰로오스 분해효소는 세제 효소업계에서 가장 급속히 성장하는 분야이다.
합성세제는 세척력이 우수하고, 사용이 편리하여 날로 사용량이 늘어나고 있다. 우리나라의 경우 1인당 연간 사용량이 6.5kg을 넘었고, 최근 환경부의 자료에 의하면 생활하수 오염의 상당량이 합성세제에서 기인되고 있는 것으로 알려지고 있다. 합성세제로 인한 오염문제는 남성 대머리 발생, 주부습진 등 아직 확실히 단정하기 어려운 논란거리들이 있다.

8.4 수질오염의 지표

수질을 관리하기 위해서는 오염물질의 정확한 측정이 필요하다. 여기서는 수질오염의 정도를 측정하는 많은 항목 중 수질오염의 대표적인 지표 몇 가지만을 설명하고자 한다. 일반적으로 오염 현황을 측정하는 항목은 다음과 같다.

(1) 탁도

천연의 탁도(turbidity)와 똑같지는 않지만 탁도 측정의 표준액으로는 카올린(kaolin)을 사용하며 카올린이 1mg/L 존재하는 것을 탁도 1도로 정의한다. 탁도는 정수방법의 선정 및 약품처리시설의 조정을 위한 기본적 항목이다.

(2) 부유고형물

부유고형물(suspended Solids; SS)은 탁도의 원인으로서 입자크기가 1μm 이상이고 불용성이면 현탁고형물이고 1μm ~ 10^{-3}μm이면 콜로이드성 고형물이고 10^{-3}μm보다 작으면 용존성 고형물이다. 이들은 심미적으로 불쾌감을 유발시키고 빛의 투과성을 낮추며 침전되어 2차적인 오염을 유발시킨다. 또한 어패류의 호흡을 방해한다. 부유고형물의 측정은 일정량의 검수를 여과하여 남은 물질을 증발 건조하여 산출한다. 따라서 오염된 물을 평가하는데 부유고형물의 측정은 대단히 중요하다. 이들 부유고형물은 여과에 의해서 대부분 제거된다.

(3) 색도

부유물질에 의해 생겨나는 색을 겉보기색(apparent color)이라 하고, 식물이나 유기추출물 콜로이드로 인한 색은 참색(true color)이라 한다. 물 분석에 있어서 겉보기색과 참색의 구별은 중요하다. 참색을 측정하기 위해서는 부유물질을 반드시 제거하여야 한다. 일반적으로 염색공장, 펄프 및 제지공장 등에서는 색 폐수가 많이 발생한다.

(4) pH

pH를 측정하는 데는 pH 미터를 사용한다. pH는 다음의 식으로 정의되는 값이다. 보통의 자연수는 pH 5.6 ~ 8.6의 범위에 있다.

$$pH = -\log[H^+]$$

(5) DO

물 속에 녹아있는 산소량을 DO(Dissolved Oxygen) 즉, 용존산소라고 한다. 오염되지 않은 물일수록 용존산소의 농도는 높고 BOD는 낮다. 용존산소는 대기중의 산소가 수중으로 용해되어 들어가거나 수중식물의 광합성에 의해 공급된다. 보통 수온이 낮을수록 용존산소의 포화도는 높아진다. 산소는 유속이 빠르거나 낙차가 큰 강, 폭포 등 수 표면이 확장될 수 있는 곳에서는 공기와 접하는 면이 넓어서 물에 잘 용해하게 된다. 유기물이 물에 유입되어 미생물에 의해 분해될 때 용존산소는 소비되고 용존산소량이 감소하여 산소결핍상태가 되어 수중 생태계를 파괴하는 원인이 된다.

(6) BOD

BOD(biochemical oxygen demand; 생화학적 산소요구량)는 수중의 유기물이 호기성 미생물에 의해 분해될 때 소모되는 산소량을 말한다. 용존산소는 유기물의 분해가 일어날 때 빨리 감소한다. 유기물질이 수중에 유입되면 호기성 미생물의 증식이 빨라지고 그 결과 산소 소모량이 증가하기 때문이다. 그러므로 BOD 수치가 높으면 수중에 호기성 미생물에 의해 분해 가능한 유기오염물이 많이 있다는 것을 의미한다.

물의 BOD를 측정할 때에는 채수하여 용존산소량을 측정한 다음 20℃의 어두운 곳에서 5일

간 방치한 후 감소되는 용존산소량을 측정함으로서 구한다. 어두운 곳에서 방치하는 이유는 빛에 의해 조류가 수중의 이산화탄소를 이용하여 광합성을 하면 산소를 생성할 수 있기 때문이다. BOD 측정시 5일간 방치했으면 BOD_5이고 20일간 방치해 측정한 경우는 BOD_{20}으로 표기한다.

BOD가 과도하게 높은 수역에서는 유기성 물질을 에너지원으로서 섭취하는 수중 미생물이 증가되고 이들 미생물의 산소소비에 의하여 수역의 용존산소는 감소된다. 산소소비의 속도가 공기 중에서 산소가 녹아 들어오는 속도보다 빠를 경우, 결국 혐기적인 수역이 되어 혐기성 미생물에 의한 산물인 황산염, 질산염 등의 환원으로 H_2S, NH_3나 메탄가스 등이 발생되어 악취가 난다.

(7) COD

COD(chemical oxygen demand; 화학적 산소 요구량)는 물 속의 유기물을 화학적 산화제인 과망간산칼륨($KMnO_4$)이나 중크롬산칼륨($K_2Cr_2O_7$)을 이용하여 산화 분해시킬 때 소모된 산소량이다. 그러므로 COD 수치는 물 속에 들어있는 총 산화성물질의 양을 나타내는 것이다. 예를 들어 제지공장에서 유출되는 셀룰로오스(cellulose)는 화학적으로는 쉽게 산화되지만(COD 높음), 미생물에 의해서는 분해가 어렵다(BOD 낮음). 한편, 연쇄상유기산은 박테리아가 분해하기 쉬운 물질이지만(BOD 높음), 화학적으로는 안정한 물질(COD 낮음)이다. 또한 미생물에 유독한 물질을 함유하는 물은 BOD 값을 구할 수가 없지만, COD의 경우는 관계없이 구할 수 있다.

COD 측정시 산화제로 사용하는 과망간산칼륨($KMnO_4$)은 유기물의 60% 정도를 분해하고, 중크롬산칼륨($K_2Cr_2O_7$)은 약 80%를 분해한다. COD는 주로 해양, 호수 등의 수질오염 지표가 된다. 물 속에 무기성 오염물질이나 비분해성 유기물질이 많이 포함되어 있어 수질이 악화되면 COD 값이 크게 나타난다.

(8) 대장균군

대장균군(coliform bacteria)은 보통 사람의 장 내에 기생하는 세균의 일종으로 유당을 분해하여 가스를 발생하는 모든 호기성 및 통기.혐기성 균을 총칭한다. 이 균의 검출은 사람과 가축으로 인한 분뇨 오염을 나타내며, 이는 또한 병원성 세균오염의 지표로서 사용된다. 대장균 자체는 비 병원성균이지만 소화기계 전염성 병원균보다 저항성이 크므로, 살균 후의 대장균 유무는 다른 병원균이 살균되었는지의 여부를 확인하는 지표가 된다. 즉, 대장균군에 오염된 물은 소화기계 병원균 등의 존재를 의심할 수 있는 것이다.

대장균은 일반적으로 온혈동물의 내장에 기생하며 분뇨에 의해 오염된다. 이상적으로는 음용수에는 어떠한 미생물도 있어서는 안된다. 또한 분뇨에 오염되었다는 증거가 되는 미생물도 없어야 한다. 대장균 실험방법은 여러 가지가 있으며 일반적으로 대장균 박테리아 수치는 최확수(MPN)로 나타낸다.

우리나라는 대장균군의 일정한 수를 수질환경에서 기준으로 제안하고 있는데 반하여 미국,

유럽 공동체, 프랑스 등에서는 분원성 대장균과 기타 병원균으로 분류하여 규제하고 있다.

(9) 총질소

총질소(total nitrogen; T-N)는 질산성 질소(NO_3^--N), 아질산성 질소(NO_2^--N)와 암모니아성 질소(NH_3-N)의 합을 말한다. 질소화합물의 유입원은 주로 분뇨, 생활하수, 축산폐수, 공장폐수 등이다.

호소 등에서 총질소를 측정하는 것은 부영양화에 미치는 영양염류의 양과 관련되어 있기 때문이다. 호소 내 질소는 인과 함께 식물 플랑크톤 생장에 중요한 영양염류로 작용한다. 담수에서는 인이 일차적인 제한 영양염류로 작용하는 것으로 알려져 있다. 인이 과다하게 유입되는 호소에서는 상대적인 질소 요구량이 증가된다. 이 경우 N/P 원자 구성비를 16 이하로 유지하게 하면 식물성 플랑크톤의 성장에 질소가 제한 영양염으로 작용하게 된다.

(10) 총인

총인(total phosphorus; T-P)은 인산염(PO_4^{3-})과 무기인의 총량을 의미한다. 인산염은 독성이 없어 직접적인 건강 피해는 주지 않으나 수질에 간접적인 영향을 준다. 인산염은 수중생물의 제한적 영양소가 된다. 인산염의 공급량이 증가하게 되면 수중 식물플랑크톤이 급격히 성장하게 되어 심각한 결과를 초래한다.

도시하수나 폐수에서는 세제류의 빌더로서 인산염이 많이 배출된다. 질소와 인이 풍부한 곳에서는 조류가 잘 생장해 수화현상(algal bloom)이 일어나며, 이것은 수질오염을 일으키는 원인이 된다. 여름철 조류의 생장조건에 필요한 무기인의 한계수준은 약 0.005mg/L 정도인 것으로 알려져 있다.

(11) 우리나라의 수질환경기준

우리가 먹고 마시는 물을 하천이나 호수 또는 지하수로부터 공급된다. 수질은 BOD를 기준으로 단순하게 등급화 할 수 있고, 물에서 사는 지표생물에 의해서도 대략적인 수질을 판단할 수 있다.

열목어, 산천어, 버들개, 금강모치 등이 사는 1급수(1ppm이하)는 아주 깨끗하여 그냥 마실 수도 있는 물이다. 2급수(3ppm이하)의 물에는 은어, 피라미, 쏘가리, 다슬기 등이 살고 있으며, 일반적인 정수처리를 한 후에 사용할 수 있는 물이다. 3급수(6ppm)이하)는 고도의 정수처리과정을 거쳐야 쓸 수 있는 물로서 저급어종인 붕어, 잉어, 메기, 뱀장어, 미꾸라지 등이 산다.

환경정책기본법에서는 수질을 수질환경기준과 수질규제기준으로 구분하고 있다. 수질환경기준은 수질오염으로부터 사람의 건강을 보호하는데 필요한 기준을 말한다. 수질을 보호하기 위한 모든 제도와 행정조치가 수질환경기준의 유지달성을 위하여 추진된다.

표 8.1 하천의 수질환경기준

구분	등급	이용목적별 적용대상	기준				
			수소이온 농도 (pH)	생물화학적 산소요구량 (BOD) (mg/ℓ)	부유 물질량 (SS) (mg/ℓ)	용존 산소량 (DO) (mg/ℓ)	대장균 군수 (MPN/ 100mℓ)
생활환경	Ⅰ	상수원수 1급 자연환경보전	6.5~8.5	1 이하	25 이하	7.5 이상	50 이하
	Ⅱ	상수원수 2급 수산용수 1급 수영용수	6.5~8.5	3 이하	25 이하	5 이상	1,000 이하
	Ⅲ	상수원수 3급 수산용수 2급 공업용수 1급	6.5~8.5	6 이하	25 이하	5 이상	5,000 이하
	Ⅳ	공업용수 2급 농업용수	6.0~8.5	8 이하	100 이하	2 이상	-
	Ⅴ	공업용수 3급 생활환경보전	6.0~8.5	10 이하	쓰레기등이 떠 있지 않을 것	2 이상	-
사람건강보호	전수역	카드뮴(Cd) : 0.01㎎/ℓ이하, 비소(As) : 0.05㎎/ℓ이하 시안(CN) : 검출되어서는 안됨, 수은(Hg) : 검출되어서는 안됨. 유기인 : 검출되어서는 안됨. 납(Pb) : 0.1㎎/ℓ이하 6가 크롬(Cr^{6+}) : 0.05㎎/ℓ이하, 폴리클로리네이티드 비페닐(PCB) : 검출되어서는 안됨. 음이온 계면활성제(ABS) : 0.5mg/ℓ이하					

비고:

1. 수산용수 1급 : 빈부수성수역의 수산생물용
2. 수산용수 2급 : 중부수성수역의 수산생물용
3. 자연환경보전 : 자연경관 등의 환경보전
4. 상수원수 1급 : 여과 등에 의한 간이 정수처리 후 사용
5. 상수원수 2급 : 침전여과 등에 의한 일반적 정수처리 후 사용
6. 상수원수 3급 : 전처리 등을 거친 고도의 정수처리 후 사용
7. 공업용수 1급 : 침전 등에 의한 통상의 정수처리 후 사용
8. 공업용수 2급 : 약품처리 등 고도의 정수처리 후 사용
9. 공업용수 3급 : 특수한 정수처리 후 사용
10. 생활환경보전 : 국민의 일상생활에 불쾌감을 주지 아니할 정도

표 8.2 호소의 수질환경기준

구분	등급	이용목적별 적용대상	기준						
			수소이온 농도 (pH)	화학적 산소요구량 (COD) (mg/ℓ)	부유 물질량 (SS) (mg/ℓ)	용존 산소량 (DO) (mg/ℓ)	대장균 군수(MPN/ 100ml)	총인 T-P (mg/ℓ)	총질소 T-N (mg/ℓ)
생활환경	Ⅰ	상수원수 1급 자연환경보전	6.5~8.5	1 이하	1 이하	7.5 이상	50 이하	0.010 이하	0.200 이하
	Ⅱ	상수원수 2급 수산용수 1급 수영용수	6.5~8.5	3 이하	5 이하	5 이상	1,000 이하	0.030 이하	0.400 이하
	Ⅲ	상수원수 3급 수산용수 2급 공업용수 1급	6.5~8.5	6 이하	15 이하	5 이상	5,000 이하	0.050 이하	0.600 이하
	Ⅳ	공업용수 2급 농업용수	6.0~8.5	8 이하	15 이하	2 이상	-	0.100 이하	1.0 이하
	Ⅴ	공업용수 3급 생활환경보전	6.0~8.5	10 이하	쓰레기 등이 떠 있지 않을 것	2 이상	-	0.150 이하	1.5 이하
사람건강보호	전수역	카드뮴(Cd) : 0.01㎎/ℓ이하. 비소(As): 0.05㎎/ℓ이하. 시안(CN): 검출되어서는 안됨. 수은(Hg): 검출되어서는 안됨. 유기인: 검출되어서는 안됨. 폴리클로리네이티드 비페닐(PCB): 검출되어서는 안됨. 납(Pb): 0.1㎎/ℓ이하, 6가 크롬(Cr^{6+}): 0.05㎎/ℓ이하. 음이온 계면활성제(ABS) : 0.5㎎/ℓ이하						

비 고 : 1. 총인, 총질소의 경우 총인에 대한 총질소의 농도비율이 7미만일 경우에는 총인의 기준은 적용하지 않으며, 그 비율이 16 이상일 경우에는 총질소의 기준을 적용하지 않는다.

2. 수산용수 1급 : 빈부수성수역의 수산생물용
3. 수산용수 2급 : 중부수성수역의 수산생물용
4. 자연환경보전 : 자연경관 등의 환경보전
5. 상수원수 1급 : 여과 등에 의한 간이 정수처리 후 사용
6. 상수원수 2급 : 침전여과 등에 의한 일반적 정수처리 후 사용
7. 상수원수 3급 : 전처리 등을 거친 고도의 정수처리 후 사용

8. 공업용수 1급 : 침전 등에 의한 통상의 정수처리 후 사용
9. 공업용수 2급 : 약품처리 등 고도의 정수처리 후 사용
10. 공업용수 3급 : 특수한 정수처리 후 사용
11. 생활환경보전 : 국민의 일상생활에 불쾌감을 주지 아니할 정도

수질환경기준은 수역별, 항목별, 등급별로 세분되어 있다. 수역별로는 하천, 호수, 해역으로 구분된다. 호수의 수질환경기준은 하천의 수질환경기준과 비교하여 볼 때 BOD 대신 COD 항목을 포함하고 있으며, 총인(T-P)과 총질소(T-N) 항목이 추가로 규정되어 있다. 항목별로는 생활환경기준 인 pH, BOD, COD, 부유물질, 용존산소, 대장균군수의 6개 항목과 사람의 건강보호기준 9개 항목(카드뮴, 비소, 시안, 수은, 유기인, 납, 크롬, PCB, ABS)으로 구분되어 있다. 표 8.1과 8.2는 우리나라 하천과 호수의 수질환경기준을 보여주고 있다.
수질규제기준은 수질환경기준을 달성하기 위한 규제수단의 하나로 배출허용기준과 방류수 수질기준으로 나누어진다. 배출허용기준은 개별적인 폐수 배출업소에 적용되는 기준으로 각 공장에서 수질오염물질을 배출할 때 지켜야하는 최대배출허용치 또는 농도를 말한다. 법으로 정한 배출허용기준을 위반한 경우는 개선명령, 조업정지, 시설이전명령, 벌금부과 등 행정적 경제적 제재조치를 받도록 규정하고 있다. 방류수 수질기준은 하수처리장, 폐수 및 분뇨종말처리장처럼 여러곳에서 발생하는 오염물질을 모아 한곳에서 처리하는 종말처리시설에 적용되는 기준이다. 방류수 수질기준은 배출허용기준보다 일반적으로 더 엄격하다.

8.5 수질오염의 방지

(1) 점오염원 방지

생활하수나 축산폐수, 산업폐수 등 점오염원은 비점오염원에 비해 관리가 용이하다. 점오염원에 의한 하.폐수는 처리시설을 제대로 갖추어 관리를 잘하면 수질오염을 방지할 수 있다. 도시의 가정이나 건물, 산업체 등에서 발생하는 하수나 폐수는 대부분 하수관로에 차집되어 수처리장으로 이동된다. 수처리장에 도착한 하수나 폐수는 보통 다음의 3단계 수처리 과정을 거쳐 수계로 방류하게 된다.
첫 번째 수처리 단계는 폐수 중에 들어있는 불용성 고형물을 체로 걸러낸 후 부유입자를 침전시켜 제거하는 과정이다. 이 침전과정을 촉진하기 위해 화학물질을 침전제로 첨가하기도 한다.
두 번째 수처리 단계(2차 폐수처리)는 BOD를 제거하는 것이 주목적으로 보통 1차 처리된 폐수에 남아있는 용존 유기물을 호기성 박테리아를 이용하여 분해시키는 생물학적 처리과정이다. 2차 처리의 방법으로는 살수여상법, 회전생물반응조법, 활성슬러지법 등이 있다. 살수여상법은 호기성박테리아나 원생동물 등으로 덮혀진 구멍이 많은 자갈이나 다공성매체 위에 폐수를 분무하여 폐수가 자갈 또는 매체 층을 통과해 내려가는 동안 폐수에 포함되어 있는

유기물이 호기성박테리아 등에 의해 분해되게 하는 방법이다.
회전생물반응조법은 큰 플라스틱 디스크들이 촘촘히 설치되어 회전축을 반쯤은 물에 잠기도록 하여 연속적으로 회전시키는 방법이다. 디스크는 일반적으로 고밀도의 폴리에틸렌이나 폴리스타이렌으로 제작된다. 디스크 표면에는 많은 미생물들이 부착되어 얇은 층을 형성하여 폐수에 포함된 유기물을 분해한다. 디스크가 회전하여 공기 중에 노출되는 동안 디스크에 부착되어 있는 호기성미생물과 폐수는 산소를 흡수한다. 살수여상법과 회전생물반응조법은 부착성 성장 또는 고정생물막 공정으로 산기관을 통하여 물 속으로 공기나 산소를 불어넣어 줄 필요가 없기 때문에 에너지 소비량이 적다는 장점이 있다. 살수여상법은 과거 오랫동안 폐수처리 공법으로 사용되어 왔으며, 지금도 폐수처리시설에 많이 사용하고 있다.
활성슬러지법은 모든 폐수처리 공정 중에서 가장 다양하게 사용되고 있으며, 매우 효과적인 공정이라고 할 수 있다. 활성슬러지법은 폐수가 들어있는 큰 포기탱크에 호기성 박테리아를 다량 포함하고 있는 슬러지를 넣어주고 산기관을 통해 공기를 주입하면서 수 시간 동안 혼합하여 주면 미생물들에 의해 유기물이 분해되는 방식이다. 이 때 포기탱크의 미생물은 폐수에 포함되어 있는 유기물을 미생물생체와 이산화탄소로 전환하며, 유기질소를 암모니아 또는 질산염으로, 유기인을 인산염으로 바꾸어준다. 이 과정을 거친 폐수가 침전조로 이동하면 폐수 속의 부유물질과 미생물이 함께 침전되어 활성슬러지가 된다. 침전된 활성슬러지의 일부는 포기탱크로 다시 반송되어 유입되는 폐수와 접촉하게 된다. 슬러지를 반송하는 이유는 반송슬러지에 포함된 고농도의 배고픈 미생물들이 유입폐수의 유기물질을 빠르게 분해할 수 있도록 만들어주기 위함이다. 반송슬러지를 제외한 나머지 활성슬러지는 탈수하여 소각하거나 매립한다. 활성슬러지를 무산소 조건하에서 혐기성박테리아에 의해 소화시키는 방법도 있다. 만약 슬러지를 비료로 사용하려면 중금속이 포함되지 않은 것이라야 한다.
2차 폐수처리과정을 거치더라도 유출수 중에는 미량의 분해 가능한 유기물과 부유입자, 어느 정도의 질산염과 인산염, 그리고 대부분의 유해금속과 난분해성 유기물질들은 여전히 남아있다. 반감기가 긴 방사성 물질이나 살충제도 제거되지 못하고 남는다.
3차 폐수처리(고도폐수처리라고도 함)는 2차 폐수처리공정을 거친 유출수에 남아있는 특정한 물질을 제거하기 위해 행해지는 물리.화학적 처리방법이다. 3차 처리는 처리하고자하는 대상물질에 따라 그 처리방법을 달리한다. 2차 또는 3차 처리과정을 마친 유출수는 탈색 및 살균 처리하여 병원성 박테리아와 바이러스를 죽인 후 방류하게 된다.
점 오염원의 관리를 위해 우리나라에 보급되어 있는 처리시설을 분류하면 하수처리장, 오수처리장, 각종 산업폐수처리장, 폐수종말처리장, 분뇨처리장, 축산폐수 공동처리장 등이 있다.

(2) 비점오염원 방지

수질오염의 대표적인 비점 오염원은 농경지이다. 우리나라는 1960년 이후 비점 오염원에 대한 국가적 대책이 부족했다. 비점 오염원에 의한 수질오염을 방지하려면 농경지, 공사장, 도시지역의 토지이용 조절을 통해서 영양소 유실과 토양침식을 감소시키는 노력이 포함되어야 한다.

농부들이 비료를 적게 사용하거나 적정량의 비료만 사용한다면 비료의 지표유출과 지하침투는 상당부분 줄어들 것이다. 또한 기존의 작물을 콩과 같은 질소고정 식물과 윤작함으로서 자연적인 질소고정을 통해 질소공급을 유도하는 것도 비료를 절약하는 방법이다. 골프장이나 공원 등에 사용하는 비료 및 농약 사용량도 유기적 방법을 사용하면 오염을 많이 줄일 수 있을 것이다.

축산농가 등 가축사육장은 특히 문제이다. 하천으로부터 되도록 멀리 떨어진 곳에 가축사육장을 시설하여 가축의 분뇨가 하천으로 흘러 들어가는 것을 줄이는 것도 좋은 방법이다. 또 한가지 방법은 오염지역과 수자원의 사이에 삼림을 조성하여 오염물이 바로 수자원으로 흘러들어 수자원이 오염되는 것을 완충할 수 있는 식생 완충대를 설치 또는 조성하는 것도 좋은 방법이다.

점오염원보다 방지하기가 더 어려운 비점오염원의 효율적인 방지에 관한 체계적인 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

제9장 실내 공기오염과 건강

인간은 누구나 깨끗한 환경에서 질병없이 건강하고 행복하게 살기를 원한다. 현대사회에서 대부분의 사람은 실외보다 실내에서 더 많은 시간을 보낸다. 따라서 실내공기 오염물에 대한 노출은 중요한 환경문제이다. 그러므로 실내환경문제는 건강과 관련하여 생활환경의 질적향상이라는 측면에서 중요하게 다루어져야 한다.

실내공간이란 일반 가정이나 사무실뿐만 아니라 실내 작업장, 공공건물, 백화점, 지하상가, 병원, 학교, 지하철, 버스, 자동차 등을 말한다. 도시인의 경우 보통 하루 24시간의 80%인 19시간 이상을 실내에서 보내는 것으로 조사되었다. 그러므로 실내공간이 오염되면 인체에 미치는 영향이 실외 대기오염보다 더 크게 나타날 수 있다.

세계보건기구(WHO)는 헌장 전문에서 “건강이란 단순히 질병이 없고 허약하지 않을 뿐만 아니라 신체적, 정신적, 사회적으로 안녕한 상태를 말한다.”라고 정의하였다. 이는 인간을 단지 육체 또는 육체와 정신의 관점에서 보지 않고 생활하는 존재로 보아 건강을 정의한 것이다. 미국의 환경보호청(EPA)은 실내공기오염은 우리가 처한 환경오염문제중의 하나라고 밝혔다.

1970년대 오일 쇼크 이후 선진국에서 공공건물 또는 일반주택의 건축설계시 에너지를 보존하기 위해 사용된 새로운 건축자재에서 오염물질이 방출되거나 또는 경제수준의 향상으로 사용이 증가된 여러 가지 생활용품으로부터 뜻밖의 오염물질이 방출되어 실내공간에서 생활하는 거주자가 빌딩증후군(Sick Building Syndrome) 또는 빌딩 관련 질병(Building related Disease)이라 하여 두통, 어지러움증, 후두염 등의 증상을 호소하게 되면서 사회적인 관심사로 부각되었다.

미국의 산업안전보건협회(OSHA)는 미국에서 건물오염의 원인으로 발생되는 빌딩증후군에 의한 작업손실이 매년 1억 5천만 달러라고 평가한바 있다. 그렇게 되자 1980년대 부터는 미국, 일본을 비롯한 선진국에서 실내공기질(Indoor Air Quality)을 새로운 환경문제로 인식

하고 활발히 연구하기 시작했다..
실내공기의 오염은 실내공간 자체에서 건축자재, 각종생활용품, 실내 거주자의 활동 등으로 오염물질이 발생되거나 또는 실외 대기중의 오염물질이 실내로 유입되어 일어난다. 그리고 오염의 정도는 건축물의 특성, 실내 거주자의 특성, 환기형태, 생활양식, 위치 및 계절에 의해 변화될 수 있다. 최근에는 전자파에 의한 건강위해 문제도 관심사로 등장하였다.
실내공기를 오염시키는 주요물질은 포름알데하이드, 일산화탄소와 이산화질소, 석면, 라돈, 담배연기에 포함된 여러 가지 화학물질 등이다.

9.1 포름알데하이드

대기 중의 포름알데하이드(HCHO) 농도는 매우 낮다. 대기에서는 보통 메탄과 다른 휘발성 유기물질이 산화하여 발생한다. 도시지역의 실내공간에서는 포름알데하이드의 농도가 대기보다 10배 이상 높을 때가 많다. 즉, 0.1 ppm 정도에서 어떤 때는 1ppm을 초과하는 경우도 있다. 실내공간에서는 흡연 또는 우레아폼(UFFI), 합판 및 집보드 등과 같은 포름알데하이드 수지를 지니는 합성물질 때문이다. 이들 제품은 공장에서 생산되면서부터 시작하여 수년 동안 포름알데하이드를 방출하며, 방출속도는 처음보다 시간이 지날수록 서서히 감소한다. 합판이나 집보드를 사용한 새 조립식 간이주택은 오래된 전통가옥보다 실내공간으로 훨씬 더 많은 양의 포름알데하이드 기체를 방출한다. 보통 단단한 고분자물질이라고 하는 여러가지 많은 수지들은 포름알데하이드와 다른 유기물질들의 결합에 의해 만들어진다. 포름알데하이드는 카펫트와 직물의 염색에도 사용되며, 여러 종류의 종이제품을 만들 때도 종이가 젖었을 때의 강도를 증진시키기 위하여 사용된다.
포름알데하이드는 자극적인 독특한 냄새가 나며, 약 0.1 ppm 정도가 공기 중에 있으면 사람이 냄새를 느낄 수 있다. 보통 카펫트나 합성섬유를 판매하는 상점에 가보면 이 냄새를 느낄 수 있다. 포름알데하이드의 농도가 0.1 ppm 보다 높으면 눈이 자극되고(특히, 콘택트 렌즈를 착용할 경우는 심함) 코와 목과 피부가 자극된다. 실내공기중의 포름알데하이드는 어린이들의 호흡기 감염과 알레르기 및 천식을 빨리 진행시키는 원인이 될 수 있다. 흡연으로 발생하는 포름알데하이드는 눈을 자극하는 원인이 될 수 있다. 포름알데하이드의 농도가 높으면 호흡하기가 곤란하다.
1987년 미국환경청은 포름알데하이드를 "인간에 대한 발암가능물질"로 분류하였다. 포름알데하이드는 동물실험 결과 암을 유발하는 발암물질로 나타났다. 사람의 경우 실내공기 오염의 수준에서 포름알데하이드에 노출되었을 경우에 암 유발인자로 작용할 지의 여부에 대해서는 과학적 일치점이 이루어지지 않아 아직 명백한 결론을 내리지 못하고 있다.

9.2 일산화탄소

일산화탄소(Carbon monoxide, CO)는 무색, 무취의 기체이다. 일산화탄소의 발생원인은 석

탄, 석유, 또는 천연가스와 같은 화석연료나 생연료인 나무의 불완전한 연소에 의해 발생한다. 실내에서 석유나 가스난로와 같은 연소장치를 잘못 작동시키면 실내공간으로 일산화탄소가 다량 배출될 수 있다. 과거 난방에 연탄을 사용하던 시절에는 소위 연탄가스 중독이라고 하는 일산화탄소 중독증 환자가 많았다. 취침 중에 연탄의 불완전 연소에 의해 발생한 일산화탄소가 갈라진 온돌 틈새로 스며들어와 사망하는 경우도 종종 있었다. 아직도 개도국에서는 사람들이 자고 있는 환기가 잘 안되는 방에서 석탄을 난방용으로 사용할 때 일산화탄소의 독성은 심각하다.

실내와 실외의 평균 일산화탄소 농도 차이는 일반적으로 수 ppm 정도이다. 그러나 지하주차장은 자동차에 의해 방출된 일산화탄소 때문에 10-20ppm 을 초과하기도 한다.

일산화탄소에 의한 주요 위험은 흡입될 때 혈액내의 헤모글로빈(hemoglobin)과 강력하게 결합하여 헤모글로빈이 산소를 세포로 전달하는 능력을 손상시키기 때문에 나타난다. 다시 말해서 산소가 결합할 자리에 산소보다 약 220배나 더 강하게 일산화탄소가 결합되므로 헤모글로빈이 산소를 공급할 수 없게 된다. 비흡연가들은 일산화탄소와 결합하는 헤모글로빈(carboxyl hemoglobin)이 약 1%인데 반해, 흡연가들은 이 값의 두 배 이상이다. 이것은 담배의 불완전한 연소로부터 발생한 일산화탄소의 흡입 때문이다. 연구결과에 따르면 단지 몇 퍼센트만의 헤모글로빈이 만성적으로 일산화탄소와 결합하더라도 심장병에 의한 사망률이 증가할 수 있다. 높은 수준의 일산화탄소에 노출되면 두통, 피로, 무의식 현상이 나타나며, 장기간 노출되면 결국에는 죽음에 이르게 된다.

9.3 이산화질소

이산화질소(Nitrogen dioxide, NO_2)는 일산화탄소와 더불어 화석연료의 사용에 의해 방출되는 기체이다. 이산화질소의 실내농도는 가스렌지나 석유난로를 사용하는 가정이나 사무실에서 빈번히 실외의 농도를 초과한다. 이들 가정용품의 불꽃 온도가 높으므로 실내공기중의 질소와 산소가 반응하여 일산화질소(NO)가 생성되고, 일산화질소는 다시 이산화질소로 산화된다. 외국의 경우, 요리를 위해 가스를 사용하거나 석유 스토브를 가지고 있는 가정에서 실내 이산화질소의 평균농도가 24 ppb로, 전혀 사용하고 있지 않는 가정에서의 9 ppb 수준보다 훨씬 높다는 연구결과가 있었다. 요리시 가스렌지 근처는 이산화질소의 농도가 300 ppb를 초과할 수도 있다.

이산화질소가 건강에 미치는 영향은 호흡기관에서 발생할 것으로 기대된다. 가스용 가정제품에 의해 방출된 낮은 농도의 NO_2에 노출되었을 때 어린이들의 호흡기 질병에 미치는 영향에 대한 많은 통계상의 연구가 있었다. 최근의 한 연구에서 하버드 대학 연구자들은 가정에서 NO_2 농도가 15ppb만큼 증가하면 7세에서 11세 사이의 어린이 호흡기 장해가 대략 40% 정도 증가한다는 것을 발견했다. 이산화질소는 실내공간에서 인체에 악영향을 미칠 수 있는 농도로 만날 수 있는 몇몇 실내오염 물질 중의 하나이다.

9.4 담배연기

담배를 피우는 것은 폐암을 유발시키는 가장 주된 원인이라는 것과 심장질병의 주요한 원인 중 하나라는 사실은 잘 알려져 있다. 담배는 니코티아아 토바컴(Nicotiana tobacum)의 학명을 가진 식물의 일반명이며, 품종에 따라 니코틴 함량은 2.0%에서 4.5% 정도에 이른다. 건조된 입담배는 니코틴 이외에 수천 종류 이상의 화합물들로 구성되어 있다. 입담배의 주성분인 니코틴 및 알칼로이드 성분들이 탐닉을 유도하는 마약의 특성을 보유하고 있기 때문에 일단 흡연을 시작하면 쉽게 끊을 수 없게 된다. 흡연용 담배제품은 맛과 연소율을 향상시키기 위하여 감초, 코코아(또는 초코렛) 외에 글리세린 등 수종의 유기화합물을 첨가하여 제조한다.

비흡연가들은 공기에 의해 희석되기 때문에 흡연가들보다 비록 낮은 농도이지만 가끔씩 담배연기에 노출된다. 담배연기가 환경학적으로 이에 노출된 사람들에게 해로운지 아닌지를 확인하는 것은 많은 연구의 주제가 되고 있다. 담배를 한 모금 빨아들일 때 연소되는 부분의 온도는 보통 850~900℃ 정도이며, 최고 1200℃까지도 올라갈 수 있다. 이러한 높은 열로 인해 흡연시 잎담배와 첨가제들이 열분해 및 산화반응 등 고온의 여러 화학반응을 일으켜 약 4천여 종류의 새로운 화학물질을 생성한다. 담배는 흡입하지 않아 그냥 타고 있을 때가 흡입할 때보다 낮은 온도에서 연소되므로 독성생성물의 농도는 담배를 빨아들이지 않을 때가 더 높다. 물론 담배를 빨아들이지 않을 때의 담배연기는 흡입전에 공기에 의해 희석되기 때문에 비흡연가의 허파에 도달하는 농도는 흡연가의 허파에 도달하는 농도보다는 훨씬 낮다.

담배연기는 기체상 물질과 미립자로 구성되어 있다. 필터를 통과하는 기체상 물질에는 유독한 일산화탄소, 이산화질소, 시안화수소, 포름알데하이드와 다핵방향족 탄화수소, 그밖에 다른 휘발성 유기탄소화합물 및 폴로늄과 같은 방사성 원소들이 포함되어 있다. 필터에 응축되는 0.1~10㎛의 입자 크기를 가진 미립자는 수분(10%), 니코틴(10%), 타르(80%)로 구성되는데, 대부분을 차지하는 타르는 니코틴과 덜 휘발적인 탄화수소들을 포함하고 있으며 이들의 상당량이 흡입될 수 있다. 많은 사람들이 환경적 담배연기에 노출되어 눈과 기도의 자극을 경험한다. 담배연기에 포함되어 있는 성분중에서 포름알데하이드, 시안화수소, 아세톤, 톨루엔과 암모니아가 대부분의 냄새와 자극의 원인이 된다.

담배연기에의 노출은 천식이나 협심증(운동하면 가슴에 통증을 느끼는)으로부터 고통받는 사람들의 증상을 더욱 악화시킨다. 최근 일부 연구들은 급성 호흡기 관련 질병의 비율과 실내 $PM_{2.5}$(담배연기를 포함한 모든 발생원에서 나오는 흡입가능 입상물질의 총량) 사이의 관계를 성립시켰다. 흡연자가 내뿜는 연기뿐만 아니라 타고 있는 담배에서 나오는 연기의 흡입을 포함하는 간접흡연이 미국에서 약 30만 명의 유아들에게 해마다 기관지염, 폐렴과 다른 전염병을 발생시키는 원인이 된다고 일부 과학자들은 믿고 있다.

미국환경청은 1993년 담배연기를 알려진 인류 발암물질로 분류했다. 그리고 미국에서 년간 약 3천명의 폐암사망자와, 연간 4만 명의 심장질병에 의한 사망자 발생의 원인이 된다고 분

석했다. 최근 영국에서의 연구는 담배연기에 의한 암과 심장질환을 통해 매년 14만 명의 유럽인이 죽는다고 평가했다.
실내공기 중에 담배연기가 노출되면, 비흡연가의 건강에 끼칠 영향 때문에 많은 나라에서는 공공건물 내에서 흡연하는 것을 통제하거나 공공건물 내에 별도의 흡연장소 갖추기 시작했다.

9.5 석면

석면(asbestos)은 섬유성 규산염 광물 중에서 특히 꾸불꾸불한 형태의 집단을 총칭하는 것으로 주로 섬유의 특성을 가지는 6가지의 자연발생 규소광물들을 말한다. 가장 흔히 사용되는 온석면은 $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$의 분자식을 가지며, 곱슬곱슬한 흰색 고체이다. 온석면은 캐나다의 퀘백주에서 채굴되고, 열에 대한 저항성, 강도, 상대적으로 저렴한 가격 때문에 북미 등 세계 여러 나라에서 상당량 사용되어 왔다. 석면은 일반적으로 단열재와 공공건물의 방염스프레이 및 자동차 브레이크 라이닝이나 패드, 슬레이트. 지붕공사와 파이프에 사용되는 시멘트 강도 증대용 첨가제로써 또는 소방의류의 섬유로써 사용되었다.
석면에 대한 최초의 관심사는 대부분 청석면과 관계가 있다. 인간에게 암의 원인으로 이들 물질과 관련된 증거는 지난 30년 동안에 걸친 연구결과로 이미 잘 확립되어 있다. 청석면은 가늘고 직선형이며 비교적 짧은 섬유형태를 지닌 물질로 폐의 통로를 더 쉽게 통과하므로 흰색의 온석면보다 더 유력한 발암물질이다. 청석면은 남부 아프리카와 오스트레일리아에서 채굴된다.
석면 광산에서 일하는 노동자들과 그렇지 않은 노동자들을 비교 연구한 결과 석면은 인류에 대한 발암물질이라는 것이 알려졌기 때문에 현재 석면의 사용은 급격히 줄어들었다. 미국 환경보호청(U.S. EPA)은 1996년부터 대부분의 석면을 사용하지 못하게 하는 규제조치를 공포한 바 있다. 석면에 장기간 노출되면 석면폐(asbestosis) 및 폐, 복부, 심장의 불치의 암인 메조텔리오마(mesothelioma)라는 증피종과 기타 기관지 암을 유발시키기는 원인이 될 수 있다. 석면섬유에 노출되어 있는 실내공간에서 흡연가가 담배를 피울 경우는 공기로 운반되는 석면섬유와 담배로 인한 흡연의 상승효과 때문에 폐암 유발효과가 매우 높다.
온석면의 더 이상 사용을 완전히 금지시켜야 하는지 그리고 건물에 설치되어 있는 석면을 모두 제거해야 하는지에 대해서는 많은 논쟁이 있다. 많은 전문가들은 이들 석면섬유들이 공기로 운반되는 위험이 있을 정도로 상당한 파손상황에 있지 않다면, 석면섬유는 제위치에 그대로 있어야 한다고 느낀다. 왜냐하면 특별한 주의가 취해지지 않는 한 석면절연체의 제거는 건물내 공기중 석면의 농도를 크게 증가시킬 수 있기 때문이다. 어떤 과학자는 건물에 설치되어 있는 석면을 제거하는 것은 마치 잠자고 있는 사나운 불테리어 개(불독과 테리어의 교배종 개)의 귀속을 막대기로 쿡쿡 찔러서 개를 깨우는 것과 같기 때문에 석면을 제거하지 말고 그대로 두어야 된다고 말한다. 일부 환경론자들은 건물절연체가 언제 손상될지 결코 예측할 수 없기 때문에 시한폭탄과 같아서 가능한 빨리 제거해야 한다고 생각하고 있

다. 선진국에서는 석면의 사용을 엄격하게 규제하고 있으며, 아주 조심스럽게 건물에서 석면을 제거하는 작업이 진행되고 있다.

9.6 라돈

라돈(radon)은 다른 물질과는 반응성이 매우 낮은 비활성 기체이지만 짧은 시간에 방사성 붕괴를 일으켜 납으로 변형되는 기체이다. 라돈의 밀도는 공기의 약 8배이며, 영하 62℃ 이상에서는 기체로 존재한다. 이러한 라돈 기체는 색깔도 없고 냄새도 없으며 라듐(radium)원자의 방사성 붕괴에 의해 생성된다. 질량 222인 라돈(^{222}Rn)의 어미핵종은 1602년의 반감기를 가진 라듐(^{226}Ra)으로 우라늄(^{238}U) 계열의 긴 수명을 가진 다른 물질들과 함께 암석, 침전층, 그리고 토양 속에 널리 분포되어 있다. 암석과 토양 속에 들어있는 라듐의 분포도에 따라 대기로 방출되는 라돈의 양이 지역적으로 달라지게 된다. 건물이 퇴적층 위에 세워졌을 경우 건물 주변에 기체 불투과성 막이 없다면 라돈기체는 건물내부로 스며들어가게 된다.

질량 222인 라돈은 3.82일의 반감기를 가지고 있으므로 99% 이상이 한달 이내에 붕괴될 것이다. 곧바로 생성되는 라돈의 딸 핵종들은 안정하지 못하여 아주 짧은 시간동안 알파(α) 입자를 방출하며 붕괴되어 반감기가 22.3년인 질량 210의 납(^{210}Pb)으로 변형된다. 자연계에는 각기 다른 경로에 의해 생성된 2종류의 라돈(^{220}Rn, ^{219}Rn) 동위원소가 더 존재하는데 이들도 역시 마찬가지로 짧은 시간에 붕괴하여 납 동위원소로 변형된다. 따라서 건물 내부로 스며든 라돈 기체는 실내공간에 머무는 동안 납으로 변형되어 고체표면에 흡착되므로 대기중으로 달아나지 못하게 된다.

라돈 기체가 실내공간에 유입되면 라돈은 바로 붕괴되어 생성되는 딸핵종들과 함께 호흡을 통해 인체의 폐조직으로 계속 흡입된다. 방사능 미립자인 고체로 변한 딸핵종들은 폐조직에 갖히는 반면, 기체상태의 라돈은 호흡을 통해 밖으로 나가게 된다. 계속되는 호흡에 의해 이 과정은 반복되므로 고체로 변한 딸핵종들은 대부분 폐조직에 축적되고 납으로 변한다. 그러므로 라돈에 의한 실내공기 오염은 결국 중금속인 납의 인체 내의 축적을 유발시키게 된다. 영국에서는 매년 2천5백명 정도가 라돈에 노출되어 폐암으로 사망하는 것으로 추정되고 있다.

미국을 비롯한 영국 등에서는 1970년대 이후부터 건물 내부의 라돈 농도를 조사해왔다. 애초에 예상했던 것보다 가옥 내의 라돈 농도는 높은 것으로 조사되었다. 미국과 영국은 건물 내부의 연평균 라돈 농도를 200Bq/m^3(1990년 기준)로 규제하고 있다. 조사한 바에 의하면 영국의 경우 7~10만 가구와 스코틀랜드의 2천 가구 정도가 200Bq/m^{3}의 이상의 수치가 나타난 것으로 추정된다. 규제농도 200Bq/m^{3}의 수치는 비흡연가가 이 수준의 공기를 계속 호흡할 경우 라돈 및 라돈의 딸핵종에 의해서 폐암으로 사망할 수 있는 위험성이 1% 정도라는 것을 의미한다. 우리나라는 아직 규제 항목에 포함되어 있지 않을 뿐만 아니라 조사된 바도 없다.

실내공기가 라돈에 노출될 위험성은 과거보다 현재가 더 크다. 왜냐하면 최근에 건설한 대형 건물이나 주택들은 단열이 더 잘되도록 외부와 잘 차단되어 있으며 더 습하기 때문이다. 이러한 사실들은 최근에 와서야 밝혀지고 있다. 건물 밖에서는 토양으로부터 방출된 라돈이 바람에 의해 대기중으로 빠르게 확산 희석되어 버린다. 그러나 건물 내부는 난방으로 외부보다 약간 압력이 낮을 경우가 대부분이므로 주변 땅에서 발생한 라돈이 쉽게 실내공간으로 유입된다. 또한 라돈은 공기보다 훨씬 무거우므로 주로 낮은 곳을 선호한다. 건물의 지하층이나 지하상가 등은 특히 문제이다. 공기의 흐름이 미약한 경우 집안에서는 지하에 있는 방이 지상 1층에 있는 방보다 대략 50% 정도 라돈농도가 더 높다. 따라서 실내공기를 외부의 신선한 공기로 자주 교체시키지 않으면 바닥을 통해 집안으로 유입된 라돈이 빠져나가지 않고 집안 내부에 쌓이게 될 것이다. 특히 라돈의 딸핵종인 질량 210의 납(^{210}Pb) 미립자는 방사능을 방출하면서 먼지와 함께 공기중에 떠다니다 주택의 가재도구나 밀폐된 사무실의 집기 등에 내려앉아 쌓이게 된다. 따라서 실내에서 인체가 방사능에 노출되는 양은 증가하게 되고 호흡을 통하여 몸속에 납을 축적하게 된다. 실내에 유입되는 라돈의 양을 줄이는 방법으로 건물의 지하층에 라돈이 통과하지 못하는 고강도의 폴리텐(polythene) 등의 판을 깔든가, 집 아래 지하에 구덩이를 파고 다공성물질 등을 채워 공기보다 무거운 라돈이 실내로 스며들기 이전에 이 구덩이로 먼저 유입되게 하여 집밖으로 강제 배출시킴으로써 줄일 수 있다.