제3차시

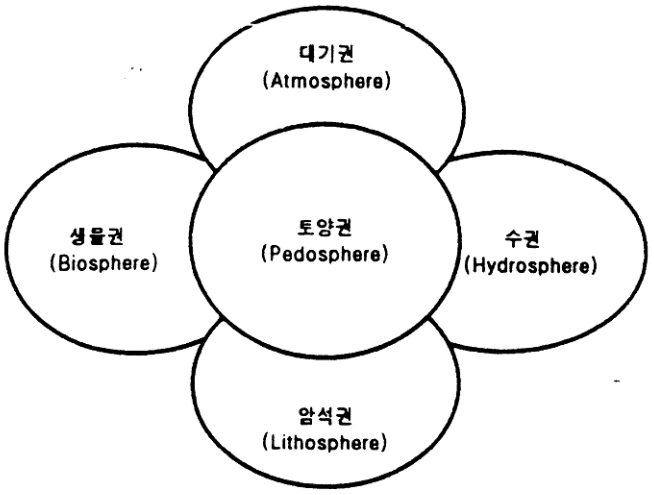
토양생태계

1. 토양계

○ 생물의 생활터전인, 지구의 가장외각 표면인 토양을 총괄하여, 토양권이라 함

- 토양권의 하부는 암석층인 암석권으로 구성되어 있음

※ 공기로 둘러싸인 기권(또는 대기권), 물로 둘러싸인 부분인 수권, 생물권의 5개 구성요소를 총칭하여 자연계라 함 <그림 1>



<그림 1> 토양권과 자연계 다른권의 구성

○ 지구상의 모든 생명체(동물·식물·미생물 등)를 중심으로 이를 둘러싸고 있는 환경이 생태권(ecosphere)임

- 지상의 모든 생물군집과 모든 자원을 포함한 무기적 환경은 서로 밀접한 관계를 갖고 하나의 계(system)를 이루고 있으며, 이것을 생태계(ecosystem)라 함. 특히, 토양을 생활의 근원지로 하고 있는 고등식물의 근계·토양미생물·동물 등은 이를 둘러

싸고 있는 토양환경과 밀접한 상호작용에 의해 연결되어 있어 전체로 볼 때 하나의 계를 이루고 있음. 이것이 토양생태계(soil ecosystem)임.

※ 환경과학에서 중요한 개념인 생태계(ecosystem)란 생태학 용어의 창시자인 Tanksley는『생물이 그 환경과 함께 구성하고 있는 물리적 시스템』으로 「지구 표면의 기본적 단위」이고, 이 시스템 중에는 「모든 종류의 상호변화가 생물 사이만이 아니라 생물과 비생물의 사이에도 존재한다」고 논의한 바 있음

※ 육상생태계의 생물은 생산자(광합성 녹색식물), 소비자(동물), 분해자(토양동물, 토양미생물)로 구분하고, 이들은 무생물(대기, 물, 토양) 환경과의 상호작용으로 에너지나 물질을 교환하며, 생물상호 간의 먹이사슬을 통하여 서로 의존하고 있음. 이들 상호작용의 결과로 이 시스템의 평형이 유지되는 극상(climax)이 형성. 토양은 이 시스템 중에서 무생물 환경의 한 구성인자로서 식물에 물과 양분을 공급하고, 또 생물유체의 분해자의 서식·활동 무대를 제공함. 이와 같은 시스템은 토양과 그것을 감싸는 환경(대기, 물, 동식물)과의 사이에도 존재하는데, Volobuev(1963)는 이 시스템을 토양의 생태계라고 부름. 米田(1978)에 의하면 Richard(1973)나 高井(1976)은 토양 중의 생물과 무기적인 토양환경으로 구성되어는 계, 즉 생태계의 하위시스템으로서의 계를 토양생태계라고 부르고 있음. 정리하자면 토양과 그것을 싸고 있는 환경(대기, 물, 동식물)과의 사이에 존재하는 자연 시스템은 생태계와 동격으로 별개의 계이고, 어원은 분명하지 않으나 이 계를 토양계(페도시스템)라고 부를 수 있음.

2. 토양의 질

○ 토양을 적절하게 관리하기 위해서는 무엇보다도 먼저 '토양의 질 (Soil Quality)'에 대한 명확한 정의가 필요

- 한때는 토양의 비옥도(soil fertility)를 토양관리의 지표로 삼기도 하였었지만, 이제는 토양이 가지는 식량생산기능은 물론이고, 환경정화기능이나 사회경제적 기능까지를 포함하는 지표로 토양을 관리해야 함

※ 미국토양학회(The Soil Science Society of America, 1995)는 '토양의 질'을 '자연계

나 인공적인 생태계 안에서 식물과 동물의 생산성을 유지하게 하며, 수질을 유지 또는 개선하고, 인간의 건강과 거주를 지지하는 역할을 하는 토양의 용량'이라 정의. 즉, 토양의 질이란 '생물학적인 생산량, 환경의 질, 식물과 동물의 건강'이라는 세 가지의 주요 인자들이 균형적으로 기능하고 평형을 유지하도록 하는 토양의 능력임

3. 토양 물질의 순환

3.1. 토양광물

○ 암석의 풍화산물인 토양은 여러 가지 광물의 혼합물이고, 이들 광물은 각기 다른 화학 조성을 이루고 있음

- 광물은 생성과정에 따라 1차 광물(primary minerals), 2차 광물(secondary minerals)로 대별됨. 1차 광물이란 암석에서 분리된 광물이 이후 그다지 큰 물리 화학적 변화를 받지 않은 광물임 대표적인 것은 6대 조암 광물(조암광물)인 석영(quartz), 장석(feldspar), 운모(mica), 각섬석(hornblende), 휘석(aguite or pyroxine), 감람석(olivine) 등이다. 2차광물이란 1차광물이 다시 풍화되어 토양이 발달되는 과정 중에 재합성된 광물들임. 이에 속하는 광물들은 점토광물(clay minerals)의 대부분임

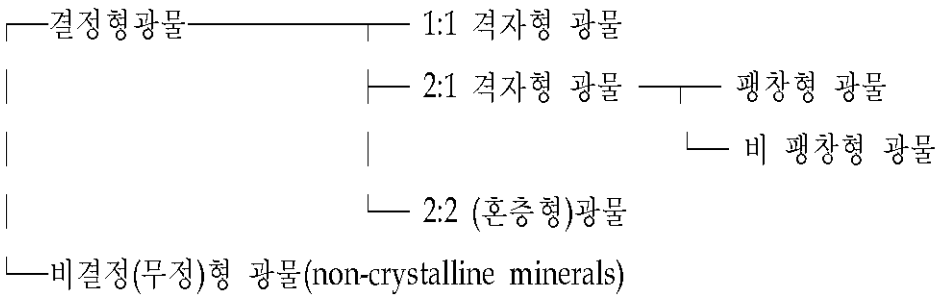
3.2. 점토광물

○ 토양입자들 중 입경이 0.002㎜이하인 소립자들을 점토(clay)라 하며, 이를 구성하는 광물을 점토광물(clay minerals)임

- 이들은 활성표면적이 매우 커서 점토함량이 결국 토양의 화학적 성질 및 이에 관련한 특성들을 지배하는 기본이고 토양의 흡착・유출・고정・토양반응・통기성・통수성 등 물리화학적 성질을 결정하는 가장 큰 요인임

○ 점토광물(clay minerals)의 종류는 광학현미경적 방법(위상차법・한외현미경법)・X선

회절법(X-ray diffraction method)·시차열분석법(differential thermal analysis; DTA)·적외선분광법·전자현미경사진법·화학분석법등을 이용하여 분류



<그림 2> 점토광물의 분류

3.3. 양이온 치환용량

○ 토양입자의 확산이중층 내부의 양이온과 유리양이온이 서로 위치를 바꾸는 현상을 양이온치환 또는 염기치환이라 하며, 그 크기를 양이온치환용량(cation exchange capacity: CEC) 또는 염기치환용량(base exchange capacity: BEC)이라 함

- 양이온치환용량은 일정량의 토양 또는 교질물이 가지고 있는 치환성양이온의 총량을 의미하며, 토양이나 교질물 1kg이 보유하는 치환성양이온의 총량을 cmol(centimole)로 표기

※ 과거에는, 100g이 보유하는 치환성양이온의 총량을 mg당량(milli-equivalent)로 표시. 즉, 다른 표현으로는 양이온치환용량은 토양이나 교질물 100g 이 보유하고 있는 음전하의 수와 같음

- 주요토양교질물의 이름과 양이온치환용량은 <표 1> 참조

<표 1> 주요 토양교질물의 양이온치환용량(cmol+/kg)

토 양 교 질 물	CEC	토 양 교 질 물	CEC
kaolinite	3~15	montmorillonite	80~150
halloysite($2H_2O$)	5~10	vermiculite	100~150
halloysite($4H_2O$)	40~50	chlorite	10~40
illite	10~40	allophane	30~200
		부식	>200

○ 양이온 치환용량의 대소는 토양화학적 측면에서 다음과 같은 의의를 갖음

- 첫째, 작물의 생육에 필요한 유효영양성분인 K^+ · NH_4^+ · Ca^{+2} · Mg^{+2}등의 보유량은 양이온치환용량이 크면 클수록 많으므로 이와 같은 면에서 생각해볼 때 비옥한 토양일수록 양이온치환용량이 크다고 할 수 있음
- 둘째, 비료로 공급하는 황산암모늄 · 염화암모늄 · 염화칼리 및 황산칼리 중의 NH_4^+ 또는 K^+가 일단 교질물이나 토양미세입자에 흡착되었다가 서서히 작물에 공급되어야 하는데, 양이온치환용량이 작은 토양에서는 흡착이 잘 안되므로 작물에 흡수되지 못한 비료성분은 유실 또는 용탈되기 쉬움. 즉, 양이온치환용량이 클수록 비료로 시용하는 영양성분의 작물에 이용되는 율이 증대됨
- 셋째, 작물의 생육에 여러 가지 면에서 영향을 끼치는 토양반응의 변동에 저항하는 힘인 토양완충능은 염기치환용량이 크면 클수록 커지므로, 염기치환용량이 큰 토양에서 생육하는 식물은 비교적 안정하다고 할 수 있음

3.4. 토양의 완충능

○ 산 또는 알칼리의 첨가에 의한 pH의 변화를 억제하는 작용을 완충작용(buffer action)이라 하고, 토양의 이와 같은 성질을 완충능(buffer capacity)이라 함

- 화학적으로 완충작용은 약산, 약염기와 그 염의 존재 하에서 일어남. 토양 중에는 이와 같은 물질로서 탄산, 중탄산, 인산, 규반산염류, 부식산 등이 있는데, 특히 중요한 것은 활성의 약산기인 토양무기 및 유기교질 복합체임

○ 토양의 완충작용은 여러 가지 뜻을 지니고 있지만, 천연적으로 토양의 pH를 안정화시키는 작용과 토양의 pH를 변화시키는 데 필요한 중화제의 양을 결정하는 데 그 중요성이 있음

- 작물과 미생물의 생육은 강산성과 강알칼리성반응에 의해 저해되므로 이들 생물에 대하여 토양의 완충능은 매우 이로운 것이며, 특히 토양 중에는 질산화작용 또는 비료로 시용되는 황산염이나 염화물에 의해 질소·황산·염산 등의 강산이 생성되는 일이 있는데, 이와 같은 경우에 토양에 알맞은 정도의 Ca^{2+}로 포화되어 있으면 갑작스런 pH의 저하를 막을 수 있음
- 알칼리성에서의 토양의 완충능은 산성인 경우만큼 강력하지 않다. 이에 $CaSO_4$를 가하면 다음과 같은 반응이 일어나서 pH를 8.5이하로 억제시킬 수 있음

$$NaCO_3 + CaSO_4 \leftrightarrows NaSO_4 + CaCO_3$$

3.5. 토양에서의 물질이동

○ 토양 중 물질은 내부 혹은 외부의 힘에 의해 이동하고, 그 결과 토양성분과 반응

- 이 반응에는 화학적·물리적·생물학적 작용이 있고 이들의 작용은 일반적으로 오염물질과 토양과의 상호반응에 의해 일어남

○ 물질과 토양사이에 일어나는 상호반응의 기작을 이해하기 위해서는 물질이나 토양의 성분을 파악하여, 용질사이에서 일어나는 상호작용 및 간극수(interstitial water 또는 pore water)와 토양입자 사이에서 일어나는 과정을 정확히 인식할 필요가 있음

- 그러나 오염물질과 토양계에서 고려해야하는 무기물이나 유기물은 단순한 구조인 것에서 복잡한 것까지 매우 다양하기 때문에 각각의 과정을 구별하여 고찰한다는 것은 쉽지 않음

가. 물질의 동태와 이동: 물리적 작용

○ 토양 중의 물질의 동태, 이동, 확산, 반응 등에 영향을 미치는 물리적인 특성은 다음과 같이 요약

- ① 토양수분 ② 표면적 ③ 토성 ④ 점토광물의 종류와 양 ⑤ 토양 입단화 ⑥ 수리전도도 ⑦ 토양의 구조

○ 토양중의 물질은 물과 함께 이동하기 때문에 물의 이동은 물질의 이동, 동태에 매우 중요

- 토양 중에 물이 일정량 이상이 되면 물의 일부는 아래쪽으로 이동. 토양수의 하강 정도는 물의 점성계수, 토양의 성질, 지하수 등에 따라 매우 달라짐. 이러한 토양의 투수정도는 토양오염 및 지하수 오염에 중요한 원인이 됨. 투수성이 양호한 토양은 여과 능력은 있으나 지하수에서 물질이 쉽게 이동하며, 토양에 잔류하는 양은 크지 않음

○ 토양 공극의 형태 및 크기는 그 안을 흐르는 물의 속도를 지배하며, 공극의 형태와 크기는 간접적으로 물질의 이동에 관여함.

- 용질이 액상과 토양입자 경계면 사이에서 물질이 토양입자의 전하에 끌려 그 표면과 결합하는 것은 물리적 흡착
- 토양입자에 물질이 물리적으로 흡착함으로써 토양에 축적되고 지하수로 침투되는 것은 늦어짐. 이렇게 토양은 물질이 지하수로 이동하는 것을 방지 또는 완충 역할을 함

나. 물질의 동태와 이동: 화학적 작용

○ 토양의 화학적 특성은 주로 유기물의 함량과 양이온 치환능력, 그리고 토양의 산화/환원전위, pH, 수분함량 등에 따라 결정

- 토양 중의 물질의 동태・이동・확산・반응 등에 영향을 미치는 화학적인 특성은 토양용액 중 물질의 종류와 농도, 토양용액과 고체 입자의 상호작용에 의해 크게 영향

을 받음

- 물질의 이동은 물질의 특성에 의해 결정되며, 증기압·헨리상수·용해도·흡착계수·화학적 조성 등이 중요한 요소로 작용

○ 용해도는 물질이 지하수나 토양의 수분에 녹아 들어가는 양을 결정함

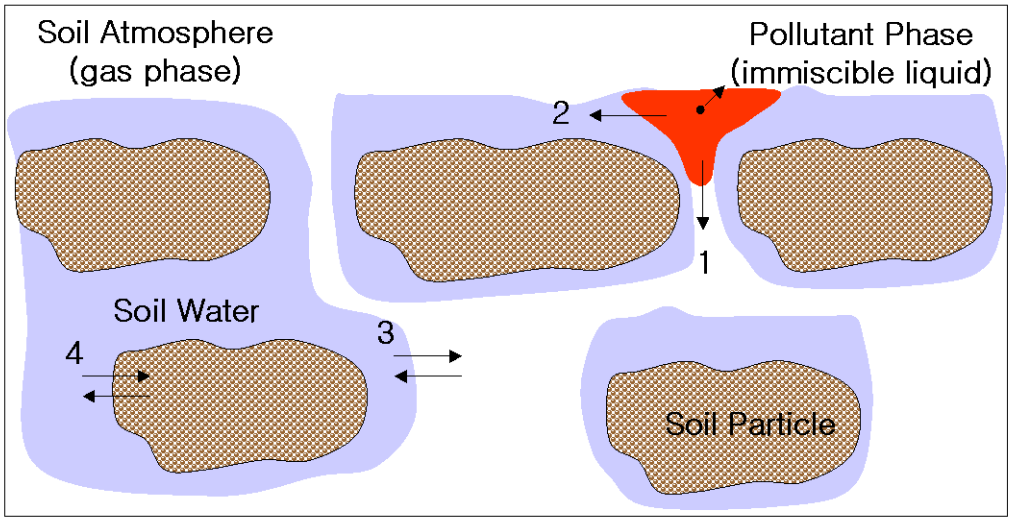
- 특히 석유화학제품을 비롯한 유기화합물들은 매우 넓은 영역에 걸쳐 다양한 용해도를 가지고 있고 오염물질인 탄화수소의 조성은 매우 복잡한데, 조성이 복잡할수록 탄화수소들은 순수한 상태와는 다른 용해특성을 보임
- 토양용액 중의 물질이 토양입자나 유기물에 흡착하는 성질은 오염물질의 이동현상에 있어 매우 중요한 부분임
- 토양 중 물질은 내부 혹은 외부의 힘에 의해 이동하고, 그 결과 토양성분과 반응함. 오염물질과 토양계사이의 이동을 예를 통해 쉽게 설명하면 <그림 9>으로 나타낼 수 있음.

① 증발 (Evaporation) : 순수한 오염물질과 토양공기(기상) 사이에서 분배 및 이동

② 용해 (Solubilization) : 순수한 오염물질과 물(액상)사이의 분배 및 이동

③ 휘발 (Volatilization) : 물(액상)과 토양공기(기상) 사이의 이동

④ 수착 (Sorption) : 오염물질이 물(액상)과 토양입자 경계면(고상) 사이에서 분배



<그림 3> 물질과 토양계사이의 이동 (Pepper 등, 1996)

○ 수착에 관계하는 각종 현상 중 화학반응은 물질과 토양과의 상호반응에 중요한 영향을 미침

- 단순히 물리흡착, 화학흡착, 침전형성 과정을 명료하게 구별하는 것은 아주 어렵지만, 여기서 "흡착"이란 고체와 액체의 경계면에서의 물질의 이동 과정임. 즉 오염물질과 토양과의 상호반응은 용액 중 오염물질이 정전기적 인력에 의해 토양입자의 표면과 결합할 때에 화학반응이 일어남
- 유기물은 금속과 킬레이트를 형성하도록 배위자 혹은 작용기를 갖고 있기 때문에, 토양성분의 유기물 부분은 중금속의 양이온에 강한 친화성을 나타냄.

  ※ 이와 같은 작용기로서는 카복실기, 페놀기, 알코올기, 카보닐기가 있음. pH가 높아지면, 착물체의 안정도도 높아지는 경향이 있는데, 이는 작용기의 이온화가 커진다는 것으로 설명할 수 있음.

○ 침전은 용해의 반대 개념으로, 수용액으로부터 고상 표면으로 용질이 이동하고 새로운 물질로서 축적되는 것임

- 침전은 토양입자의 표면이나 간극수중에서 일어남. 흡착과 침전은 둘 다 수용액으로부터 용질을 제거하는 과정으로, 흡착의 경우에는 고체-액체 경계에 있어서 물질의 정량적인 축척이 일어나며, 침전의 경우에는 새로운 고상이 형성됨

다. 물질의 동태와 이동: 생물학적 작용

○ 물질의 동태와 관련된 생물학적 작용은 미생물에 따라 제어됨

- 따라서 토양 미생물 활성에 영향을 미치는 토양온도·수분함량·유기물의 존재 등이 오염물질의 동태와 관련
- 유기화학물질이 미생물에 의해 분해될 때에는 에너지원으로서 유기탄소가 이용
- 미생물은 동물이나 식물에 축적된 오염물질을 분해하는 능력을 가지고 있어 결과적으로 오염물질을 제거하는 역할을 하기도 함

참고문헌

김정규 등. 2003.10 농업환경오염복원기술개발. 농림기술관리센터.

양재의, 이규승. 2001. 농업환경. 한국환경농학회.

한국지하수토양환경학회. 2001. 토양환경공학. 향문사.

Pepper, I. L, Gerba, C. P., Brusseau, M. L. 1996. Pollution science. Academic Press. pp3-276.