

## 토양계에서 중금속의 이동과 확산

정 명 채

세명대학교 자원환경공학과

### 1. 서론

토양은 인간생활의 터전이자 식량자원의 생성장소이다. 일찍이 동양에서는 흙(土), 물(水), 불(火), 나무(木), 쇠(金)를 물질을 구성하는 5가지 기본단위로 인지하여 토양을 이용한 생활체제를 구축하였으며, 서양에서도 흙, 공기, 물, 불 등을 물질의 기본단위로 생각하여 상호 유기적인 관계를 유지하며 문명을 이어왔다. 그러나 근대 및 현대사회로 들어서면서 도시화와 산업화로 말미암아 토양생태계의 균형이 깨지고 있다. 그 결과, 지력이 떨어져 식량 작물 생산량이 감소되고 있으며, 연간 300~800억 톤의 토양이 유실되고 있다. 특히 20세기 들어서 토양의 자정능력속도 이상으로 가속화된 산업체계의 변화에 의해 토양오염의 진행속도가 매우 빠르게 진행되고 있지만, 아직도 그 심각성을 인식하지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 토양생성기간이 수천에서 수백만년이 필요하다는 사실을 인식하고 토양오염 문제를 해결하기 위한 지속적인 노력이 필요하다.

일반적으로 토양오염의 원인 중에서 주요한 점오염원으로는 휴/폐광산, 불량매립지, 유해화학공업단지 등이 있다. 국내에는 900여개의 금속광산, 380여개의 석탄광산 및 1,200여개의 비금속광산을 포함하여 총 2,500개소의 크고 작은 광산들이 있으며, 이들 중에서 약 80%가 휴광 또는 폐광된 광산으로서 적절한 환경복원시설이 설치되지 않아 주변 생태계가 위협받고 있다. 특히 폐금속광산에서는 과거 채광이나 선광·제련과정 등의 광산활동으로 인하여 배출된 광산폐기물들(폐석, 광미, 광석광물, 광산폐수 등)이 광산주변에 그대로 방치되어 있어 집중 강우나 강풍에 의해 하부로 분산되어 광산하부의 농경지와 수계의 환경오염을 계속적으로 일으키고 있다. 또한 전국에는 약 3,000여개의 불량매립지가 산재되어 있어 토양 및 지하수의 환경문제가 심각한 수준이다. 그리고 전국에 등록된 유해화학물질 오염유발시설이 무려 50,000여개로써 이들에 의한 유류오염, 발암성 독극물 및 일부 군부대의 토양환경오염은 심각한 수준이 아닐 수 없다.

자연환경에서 중금속은 미량으로 존재하지만 인간의 활동에 의해 발생시킨 다량의 중금속은 토양의 자정능력 이상이 되고 있다. Nriagu & Pacyna(1987)에 의하면 1983년을 기준으로 As, Cd, Cu, Pb, Zn 등의 유해성 미량원소의 토양오염 양이 각각 82,000, 22,000, 954,000, 769,000, 1,372,000 톤/년으로 조사되었으며 최근에는 이들의 오염 부하량이 증가하고 있는 실정이다. 그러므로 이 세미나에서는 토양학의 기초를 설명하고 이를 기초로 다양한 오염물질 중에서 중금속이 토양에서 이동과 분산되는 특성을 고찰하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1. 토양학 개론

##### 2.1.1. 토양의 정의

지면이라는 의미를 가진 라틴어의 'solum'에서 유래된 토양(soil)은 암석의 풍화산물로써 모암, 지형, 기후, 유기물, 시간 등의 형성요소들(soil forming factors)에 의해 그 성질이 결정된다. 그러므로 토양을 정의하는 방법은 구성물질, 부존 위치, 구성성분의 종류와 함량, 생태계에서의 역할에 따라 다소 차이가 있으며, 토양의 연구분야에 따라 그 정의가 다를 수 있다. 우선 토양학자들은 모암, 성질, 구성 및 기능에 중점을 두고 '암석의 풍화물인 작은 입자의 광물질을 주재료로 하여 지각의 지표면에 쌓이고 여기에 동식물에서 유래된 유기물이 섞여지고, 공기와 수분을 알맞게 함유하여 식물을 기계적으로 지지하며 양분을 저장하거나 공급해주는 자연체'로 토양을 정의하고 있으며(임선욱, 1996), 응용지질학자 및 토목공학자들은 '폭약을 사용하지 않고 제거할 수 있는 고화되지 않는 지구표면의 구성물질로서 입자 그 자체는 고체이지만 입자 상호간에 강하게 부착되어 있지 않고 쉽게 분리할 수 있으며, 외부로부터 힘을 받았을 때 입자 상호간에 변위가 쉽게 일어나는 것'으로 토양을 정의하고 있다(전효택 등, 1998).

### 2.1.2. 토양의 구성물질

무기물, 유기물, 수분, 공기 등의 4대 성분으로 구성된 토양은 고체상, 액체상 및 기체상이 공존하고 있다. 고체상은 암석의 물리화학적 및 생물학적 풍화에 의해 생성된 무기물과 각종 동식물에서 유래된 유기물 등이며, 액체상은 여러 종류의 물질과 이온이 함유되어 있는 수분이며, 산소와 이산화탄소 등의 기체가 혼재되어 있다. 그리고 이들 3상의 구성비율은 토양의 상태와 유형에 따라 변화하며, 육지토양의 경우에는 고체상 50%, 액체상 25%, 기체상 25% 등으로 구성되어 있다.

토양을 구성하는 물질의 많은 양은 암석의 풍화작용에 의해 형성된 무기물이다. 그러므로 토양의 구성성분은 암석의 풍화과정에 직접적으로 영향을 받게된다. 예를 들면 온대성기후에서 발생하는 암석의 풍화과정을 보면, 물리화학적 및 생물학적 풍화에 따라 다른 형태의 풍화산물이 만들어지며, 암석을 구성하는 광물은 그 종류에 따라 풍화에 대한 저항성이 다르며 그 풍화산물도 모암에 따라 변화한다. 일반적으로 풍화에 대한 저항도는 염기성마그마로부터 광물이 정출되는 과정을 정립한 Bowen의 반응계열(Bowen's reaction series)과 깊은 관련이 있으며, 석영, 백운모, 정장석, 흑운모, 각섬석, 휘석, 감람석, 백운석과 방해석, 석고 등의 순서로 풍화가 잘 일어난다.

### 2.1.3. 토양의 생성

러시아의 토양학자인 Dokuchaev박사는 토양의 생성에 영향을 주는 인자를 기후, 유기물, 모암, 지형 및 시간 등의 5가지로 요약하였다. 물론 Jenny(1941)가 주장한 바와 같이, 이들 생성요인 중에서 시간을 제외하고는 서로 독립적인 관계보다는 상호작용에 의해 토양이 형성되지만 토양의 생성에는 이들 5가지 요인이 가장 중요한 역할을 하며, 이를 요약하면 다음과 같다.

#### □ 기후(climate)

토양의 생성과정에서 가장 영향을 주는 것은 기후이다. 기후에 따라 토양의 근원인 모암의 풍화정도가 다르기 때문에 구성광물의 조직과 비율이 변하게 되며, 식물과 토양의 형성정도와 형태도

변한다. 예를 들면, 토양유기물에 의한 생화학적 변화는 온도와 밀접한 관계를 갖는데 기온이 10℃ 상승하면 생화학적 반응이 2배 빨라지게 된다. 그러므로 춥고 건조한 지역보다는 고온 다습한 지역에서 모암의 풍화속도와 생물학적 반응속도가 빠르기 때문에 토양형성이 쉽다. 그 결과, 기온과 강수량에 따라 전세계의 토양분포가 다양하며, 각 토양의 물리적, 화학적 성질에도 차이가 생긴다. 또한, 기후의 영향에 의해 토양의 심도별 분포형태에도 영향을 주어 고온 다습한 기후에서 발달된 토양은 상대적으로 심부까지 발달된 수직단면(soil profile) 형태를 이룬다. 결국 기후는 토양의 온도와 습도를 변화시켜 식물의 성장과 토양의 성질에 직접적인 영향을 준다.

## ② 유기물(organic matter)

생물은 토양내에 유기물을 첨가시키며 식물의 영양분을 순환시킨다. 그리고 토양에 질소 등의 영양분을 공급해 줄뿐만 아니라 토층을 상하로 섞어주어 식물의 성장과 토양의 발달에 중요한 역할을 한다. 그러므로 산림지역의 토양에 비해 유기물이 풍부한 초지에서 생성된 토양은 색깔이 검고 함수량도 높으며 양이온교환능력(cation exchange capacity)도 높아 양질의 토양이 된다. 또한 토양 내에 존재하는 미생물, 동물상 및 식물상은 토양의 질을 결정하는데 중요한 역할을 한다.

## ③ 모암(parent rock)

토양의 근원은 암석, 즉 모암이다. 모암이 사질인 토양에서는 투수율이 높은 사질토양이 형성되며, 석회석이 풍부한 지역에서는 염기성 토양이 형성된다. 특히 토양의 주요한 성분인 점토는 모암에 의해 좌우되므로, 모암을 알면 그 지역에서 형성된 점토의 성질도 유추할 수 있다. 또한, Ca, Mg, K 등을 다량 함유한 모암에서 발달된 토양에서는 활엽수림이 우세하며 이들 원소들이 소량 함유된 토양에서는 침엽수림이 우세하게 분포하기도 한다.

한편, 모암의 풍화 원인과 그 이동 형태에 따라 풍화지역에 잔류된 토양(residual soils)과 물·바람·빙하에 의해 이동된 토양(transported soils)으로 구분할 수 있다. 이동된 토양은 운반의 매개체에 따라 중력에 의해 이동된 토양(colluvial soils), 하천에 의해 이동된 토양(alluvial soils), 해수에 의해 이동·퇴적된 토양(marine soils), 호수에 퇴적된 토양(lacustrine), 빙하에 의해 이동·퇴적된 토양(glacial soils), 바람에 의해 이동된 토양(eolian soils) 등으로 분류하기도 한다.

## ④ 지형(topography)

지형은 화산활동, 단층, 절리, 융기, 침강과 같은 지구조 변화과정(tectonic process), 유수, 바람, 빙하, 산사태 등에 의한 침식/퇴적과정에 의해 형성된다. 그 결과 토양이 위치한 지형은 기후에 따른 토양의 생성속도를 조절하여 준다. 즉, 지면의 기울기에 의해 빗물이 지면을 씻어 내리는 속도와 물이 빠지는 속도가 결정되며, 경사면에서 태양 빛의 흡수 차이에 의해 토양의 온도가 다르며, 그 결과 풍화의 정도와 토양의 성질이 달라진다. 예로써 배수성이 낮은 평탄한 지형에서는 경사지역에 비해 토양의 생성 및 분화가 빠르며, 급경사지역에서는 토양 표층의 침식에 의해 토층의 깊이가

가 감소된다. 또한 태양에너지의 흡수 차이는 유기물의 함량에도 영향을 준다. 단적인 예로 북반구에 비해 남반구의 토양은 낮은 태양에너지 흡수에 의해 유기물의 함량이 낮고 유기물층이 얇은 특징을 보인다.

#### 5] 시간(time)

일반적으로 토양의 형성 과정은 단순한 시간적 측면보다는 토양형성단계에서 기후와 식생의 변화에 의해 결정되는 것이므로 환경에 따라 수천년에서 수백만년에 걸쳐 생성된다. 결국 토양의 형성속도는 위에서 기술한 형성요소들에 따라 다르며, 오랜 시간동안 물리적, 화학적 및 생물학적인 과정을 거치면서 성숙한 토양이 되며, 성숙기간에 새로운 물질이 퇴적되면서 토양생성이 둔화되기도 한다. 예를 들면, 모암의 풍화물질이 주변에 잔류된 지역에서는 토양층의 발달이 용이하지만 하상 또는 호상퇴적물 지역에서는 토양층의 발달이 미약할 수밖에 없다.

위에서는 토양을 형성하는 5대 요소에 대해 각각의 성질, 특성 및 역할을 기술하였지만 토양형성은 이들 각 요소들이 복합적으로 이루어진 결과이다. 그러므로 토양형성을 개별요소에서 파악할 것이 아니라 모든 요소들이 복합된 연속체로 보아야 한다.

### 2.1.4. 토양의 분류

토양을 조사하기 위해서는 주로 항공사진, 적외선사진, 자외선사진 및 X선사진 등을 통하여 기본적인 토양의 분포를 조사한다. 그리고 세부적으로 토성(soil texture), 색깔, 경사도, 토양심도, 침식의 정도, 자갈의 유무, 배수상태 등의 형태적 특성을 파악하고 정밀한 물리화학적 성질을 측정하여 분류하고 있으며, 우리 나라에서는 1975년에 개정한 미국 농무성(United States Department of Agriculture, USDA)의 분류 방법(soil taxonomy)을 채택하고 있으며, 다음과 같이 6단계로 분류된다(USDA, 1975).

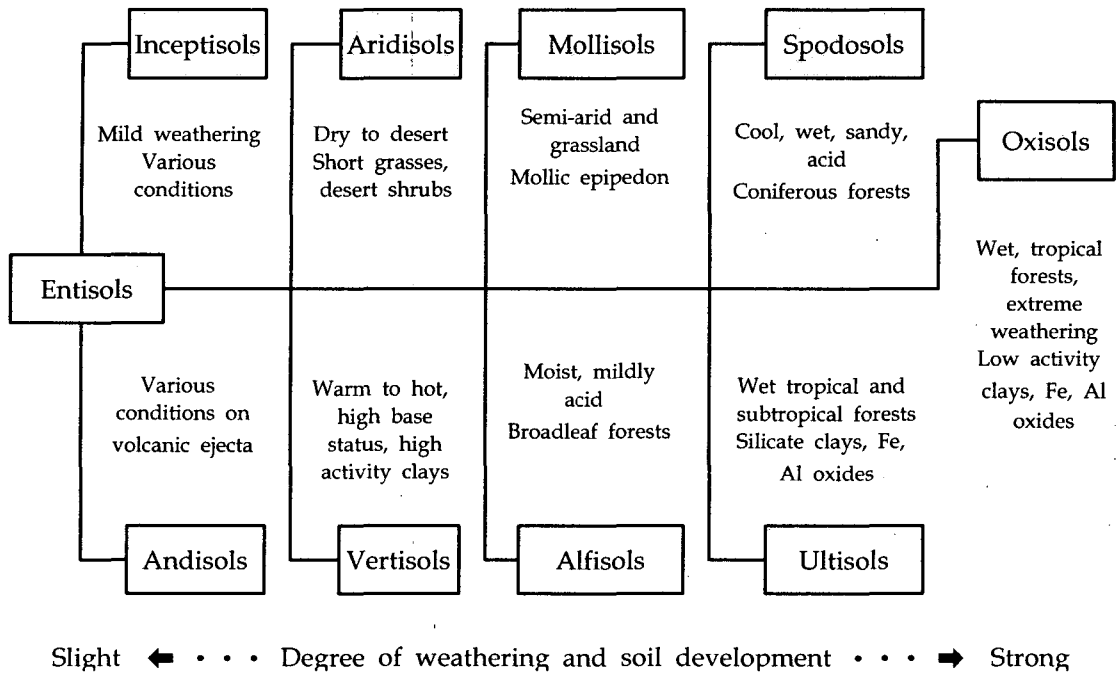
目(order), 亞目(suborder), 大群(great group), 亞群(subgroup), 族(family), 統(series)

토양의 생성과정과 기후에 따라 변화되는 토양층의 형성에 따라 분류되는 토양목(soil order)은 가장 넓은 범위의 분류단계로서 1975년 USDA에서 총 10개의 토양목을 설정하였으며, 이후 화산분출물이 60% 이상이고 가비중이 낮은 안디졸(Andisol)과 영구동결대의 빙하토인 겔리졸(Gelisols)을 새로운 토양목으로 구분하여, 현재는 총 12개의 토양목으로 구분하고 있다(USDA, 1998). 이들의 어원과 특징은 <표 1>에 정리되어 있다. 토양아목(soil suborder)은 토양의 함수율, 모암, 식생의 역할 등의 물리화학적인 특성에 의해 분류되며, 그 하부의 대군(great group)은 점토, 철분, 부식의 집적도, 토양의 온도, 염기포화도, 수분상태 등을 기준으로 분류된다. 아군(subgroup)은 대군들과의 상호 비교를 통해 세분화하며, 토양층위의 두께, 광물학적 조성, 토양반응, 투수성 등의 성질에 따라 족(family)으로 구분하며 특징적인 토양을 대표하여 토양통(soil series)으로 구분하고 있다.

<그림 1>에서는 풍화작용과 토양발달에 따라 형성되는 대표적인 토양목을 도시하였다. 그림에서는 초기의 엔티졸에서부터 기후, 풍화의 정도, 산화물의 함량 변화에 의해 성숙된 토양으로 발달되는 과정이 잘 나타나 있다.

<표 1> 미국 농무성(USDA)에 의해 분류된 12개 토양목의 종류, 어원 및 특징

| 토양목                   | 어원                  | 특징   |
|-----------------------|---------------------|--|
| 겔리졸<br>(Gelisols)     | 'gel'은<br>굳어짐       | 영구동결대의 빙하토로서 광물질과 소량의 유기물질로 구성되어 있으며, 알라스카지역의 토양이 대표적이다.   |
| 몰리졸<br>(Mollisols)    | 'mollis'는<br>연함     | 주로 초지나 활엽수 분포지역에서 발달하며, 유기물의 함량이 높아 검은 표층을 가진 것이 특징이다  |
| 버티졸<br>(Vertisols)    | 'verto'는<br>뒤집음     | 팽창형점토의 함량이 높으며(35% 이상), 우기와 건기의 구분이 명확하고 변화가 빠른 지역에서 형성된다. 건조기에는 토양이 갈라져 틈이 생긴다  |
| 스포도졸<br>(Spodosols)   | 'spodos'는<br>목회(木灰) | 유기물과 비정질의 Al, Fe 산화물로 형성된 집적층을 가지며 회색의 용탈층이 있다   |
| 아리디졸<br>(Aridisols)   | 'aridus'는<br>건조     | 건조지역에서 발달하는 토양으로서 유기물의 함량이 낮고 염기포화율이 높은 편이다  |
| 안디졸<br>(Andisols)     | 'andesite'에서 유래     | 임시로 정한 토양목으로 화산활동에 의해 형성되어 60%이상이 화산분출물로 구성되고 가비중이 0.9g/cm <sup>3</sup> 이하이다. 대부분 allophane과 알루미늄유기산복합체로 구성되어 있으며 양이온교환능력과 흡착력이 높다 |
| 알피졸<br>(Alfisols)     | 'alfi'는 Al,<br>Fe   | 회색 또는 갈색의 표토층으로 습윤한 기후에서 발달하며, 표층의 하부에는 양이온의 75%이상이 Ca, Mg, Na 등을 함유한 점토광물 집적층이 있다   |
| 울티졸<br>(Ultisols)     | 'ultimus'는<br>마지막   | 온난 및 열대지방의 습윤한 토양으로 하부는 산화철이 집적되어 있어 적색을 띠며 염기공급능력이 낮다(35% 이하)   |
| 엔티졸<br>(Entisols)     | 'ent'는<br>'recent'  | 토양층의 분화가 없거나 미약한 무기토양으로서 침식이 일어나는 경사지에서 최근에 형성된 토양이다   |
| 옥시졸<br>(Oxisols)      | 'oxide'는<br>산화물     | 열대기후에 의해 심하게 풍화된 토양으로서 카올리나이트, 석영 및 Al, Fe 산화물로 구성되어 있다  |
| 인셉티졸<br>(Inceptisols) | 'inceptum'은 시작      | 토층의 분화가 분명하지 않은 미숙토로서 유기물이 농집되기도 하며, 비교적 습윤지역이나 산림지역에서 발달된 토양이다.   |
| 히스토졸<br>(Histosols)   | 'histos'는<br>조직     | 연중 물에 포화된 소택지와 같은 습한 지형에서 형성되며, 유기물의 함량이 높다  |



<그림 1> 풍화작용과 토양발달에 따른 토양목의 변화(Brady and Weil, 1996).

### 2.1.5. 토양단면(soil profile)

모암의 풍화에 의해 생성된 토양은 물리적, 화학적 및 생물학적인 변화를 거쳐 성숙되면서 지표면에 평행한 층(soil horizon)을 형성하는데 그 수직적 분포를 토양단면(soil profile)이라고 한다. 일반적으로 토양단면의 형성과정은 다음 4가지로 요약할 수 있다.

- ① 변형작용(transformation) : 풍화, 유기물 분해와 같이 토양성분의 분해와 결합과정
- ② 이동작용(translocation) : 유기 및 무기물질이 물과 유기물에 의해 상하로 이동하는 과정
- ③ 첨가작용(addition) : 잎, 대기먼지, 지하수 등에 의해 성분이 첨가되는 작용
- ④ 제거작용(loss) : 지하수에 의해 토양성분이 빠져나가는 작용

그 결과, 토양의 구성물질, 물리화학적 특징, 유기물의 함량 및 조직이 변화되면서 토양단면이 형성되며, 통상 상부에서 하부로 가면서 그 특성에 따라 5개의 주요 토양층(master horizons)인 O층, A층, E층, B층, C층(이들 전체를 solum이라고 함)과 모암층(bedrock)인 D층 또는 R층으로 분류한다. 이러한 분류방법은 Brady와 Weil(1996)에 제시된 방법이며 FAO에서는 O층의 상부를 H층(수분으로 포화된 유기물층으로서 점토질이 60% 이상인 토양에서는 30%의 유기물이, 점토질이 그 이하인 경우 20% 정도의 유기물을 함유한 토양층)으로 분류하기도 한다(FitzPatrick, 1986). 특히 H, O, A, E, B층은 토양(수평)층(soil horizons)이라고 하지만 C와 R층은 토양형성요소에 의해 특성이 결정되지 않으므로 단순히 층위(layers)라고 지칭한다. FAO에 의한 토양단면 분류법은 FitzPatrick(1986)을 참조하기 바라며, 여기에서는 통상 이용되고 있는 토양단면 분류 방법인 O, A,

E, B, C, R층으로 구분하여 그 특성을 기술하고자 한다.

**O층** : 최상부의 O층(organic horizon)은 유기물이 집적되어 있으며, 생물조직의 원형을 분별할 수 있는 O1층과 생물조직이 분해되어 있는 O2층으로 세분하기도 한다. 또한 동식물의 유해들의 분해 정도에 따라 다음과 같이 세분하기도 한다.

Oi층 : 일부 동식물의 유해만 분해되어 있는 토양층 (fibric)

Oe층 : 동식물의 유해가 반정도 분해되어 있는 토양층 (hemic)

Oa층 : 대부분의 동식물 유해가 분해되어 있는 토양층 (sapric)

보통의 O층은 동식물의 유해가 쌓여서 형성되며, 초지의 경우는 O층의 형성이 불완전하며, 경작지에서는 주로 A층과 혼재되어 나타나기도 한다.

**A층** : 토양의 생성작용이 진행되면서 상부의 물질이 하부로 용탈되거나 이동되어 변화하는 토양단면 부분을 A층이라고 한다. 주로 무기질과 유기질이 혼합되어 있으며 유기물이 충분히 분해되어(humidified) 흑색을 띤다. A층의 미립자들이 하부로 이동되므로 주로 큰 입자의 성분으로 구성되어 있다. 우리가 보통 토양시료를 채취할 때 상부토양(topsoil)과 하부토양(subsoil)으로 구분하는 경우, 상부토양은 A층, 하부토양은 B층에 해당되는 경우가 많다.

**E층** : 전통적인 방법에서는 A층을 A1, A2, A3 등으로 분류하여 A1층은 유기 및 무기물이 혼재된 부분, A2층은 규산염점토와 Fe과 Al의 산화물이 용탈되는 부분, A3층은 하부의 B층과의 경계로 구분하기도 한다. 이 경우, E층은 A2 및 A3에 해당하는 토양층이라고 할 수 있다. 그러나 최근에는 무기성분이 하부로 빠져나가는(leaching) E층을 주요 토양층(master horizons)으로 분류하는 추세이다. 그러므로 E층의 특징은 점토 및 철과 알루미늄산화물이 용탈되고 사질 및 이질 크기의 석영과 같은 풍화에 강한 저항성 광물이 존재하는 토양층이다. 그 결과 A층에 비해 토양의 색깔이 밝다.

**B층** : 이 층은 A층 또는 E층에서 내려온 규산염점토, Fe, Al산화물 및 유기물이 집적되어 있는 토양층이며, 식물의 뿌리가 거의 없으며 기둥모양 또는 덩어리 모양의 토양이 형성된다. 특히 온대지역의 토양에서는 이들 무기 성분이 다량 축적되어 있으며, 건조 또는 반건조지역의 토양에서는 탄산칼슘과 황산칼슘 등의 염이 쌓이기도 한다.

**C층** : 산화된 토양으로서 다양한 색을 가진 C층은 토양생성작용과 직접적인 관련성은 없으며, 토양과 모암의 파편으로 구성되어 있다. 전술한 바와 같이 토양학자들에 따라 C층을 토양(수평)층(soil horizons)으로 인식하지 않고 단지 층위(layers)로 분류하기도 한다.

**D층 또는 R층** : C층 하부에 위치한 R층은 풍화의 흔적이 없는 단단한 암반으로 구성되어 있다. 토양단면의 구분은 'master horizons'을 기초로 구분하며, 세부적으로 그 특징을 설명하기 위하여 위에서 표시한 'Oi, Oe, Oa 등과 소문자로 표시한다. 통상 소문자는 a에서 z까지의 영문자가 사용되고 있으며 이들의 의미와 활용 예는 Brady와 Weil(1996) 또는 FitzPatrick(1986)을 참조하기 바란다. 영문 소문자 이외에도 위에 표시한 바와 같이 A1, A2, A3 등과 같은 숫자를 사용하기도 한다. 이는 동일 토양층에서 수직적인 분포를 표시

하는 것으로 상부에서 하부로 가면서 번호를 부여한다. 이러한 토양의 수직단면은 기후, 식생, 배수정도에 따라 다양하게 분포되고 있으며 각 토양단면의 일부가 빠져있는 경우도 있다. <그림 2>는 대표적인 지역에서 형성된 토양의 단면을 도시화한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 온난다습한 기후에서는 토양단면의 발달이 잘 이루어지지만 일부 건조지역, 반건조지역, 한랭기후지역 등에서는 이들 단면층의 일부가 잘 형성되지 않는 경우가 많다. 이러한 특성 때문에 토양학에서는 토양의 수직단면 형태로 'podzol profile'과 'ferralsol profile'로 구분하기도 한다. 즉, podzol형 단면은 온대성 기후에서 형성되는 토양층과 같이 O, A, E, B, C층의 경계가 뚜렷하고 광물질이 고르게 분포되어 있다. 반면 ferralsol형 단면은 주로 열대성 기후에서 형성되며 각층의 경계가 뚜렷하지 않고 유기물 및 광물질이 토양의 상층에 밀집되어 있다.

### 2.1.6 토양 생물과 역할

토양내에 서식하는 생물들은 유기물의 생성, 질소의 고정, 양분의 동화, 질산균과의 공생 및 산소공급 등과 같이 토양의 생성과 성장 및 식물의 성장에 필수적인 역할을 담당하고 있다. 물론 토양생물의 성장은 기후와 밀접한 관계를 갖지만 토양의 온도, 습도, pH변화, 토성, 산화환원전위, 탄소 및 질소의 함량 등에 따라 차이가 난다(Pepper et al., 1996).

토질의 개선과 정화에 큰 역할을 담당하고 있는 토양생물의 종류는 다양할 뿐만 아니라 그 분포 정도도 다르지만 보통은 토양동물상(soil fauna)과 토양식물상(soil flora)으로 구분할 수 있다. 토양동물상은 육안으로 관찰되는 종류와 현미경을 이용해서 관찰할 수 있는 미세한 종류가 있으며, 토양식물상은 미생물인 세균류(bacteria), 균류(fungi), 방사상균류(actinomycetes), 조류(algae) 등과 고등식물의 뿌리로 구분할 수 있다. 토양동물상은 몸의 길이에 따라 분류되기도 하며 대표적인 동물로는 지렁이, 개미, 지네, 거미 등이며, 이외에도 달팽이, 두더지, 들쥐 등도 있다. 특히 지렁이는 토질의 개량에 중요한 역할을 담당하며, 토양내의 광물질을 분해하거나 혼합하는 역할도 한다.

토양식물상 중에서 대표적인 미생물인 세균의 경우, 토양 1g 중에 10<sup>8</sup> ~ 10<sup>9</sup>개 정도 들어 있으며, 이외에도 방선균, 사상균 등의 균류와 단세포로 구성된 조류 그리고 이보다 고등생물인 원생동물 등이 있다. 토양에서 서식하는 미생물 중에서 세균은 유기물의 분해, 질소고정, S, Fe, Mn을 포함하는 무기원소들의 산화환원에 영향을 준다. 곰팡이와 유사한 외형과 세균과 같이 포자를 형성하는 방선균은 유기물을 영양으로 생육하며 분해가 어려운 리그닌, 케라틴 등의 부식물을 분해할 수 있다. 사상균은 산성에 강해 산성토양에서 유기물을 분해하며 특히 리그닌의 주요한 분해자이다. 단세포 또는 이들의 연결상인 조류는 엽록소를 가지고 광합성을 통해 영양분을 얻는 것과 광합성을 하지 않고 유기영양분을 얻는 두가지 종류가 있으며, 유기물의 생성, 질소고정, 양분의 동화, 질산균과의 공생 및 산소공급 등의 역할을 한다. 토양중의 원생동물은 아메바, 섬모충, 편모충 등이 주종을 이루고 있으며 토양미생물을 먹이로 성장하고 있다(최병순 등, 1997). 토양식물상 중에서 고등식물의 뿌리는 토양유기물 생성의 원료가 되며 에너지 저장장소로도 이용된다. 식물의 뿌리가 뻗어가면서 토양의 공극률을 높이고 암석을 파쇄하며 토양수의 흡수 등을 통하여 토양을 안정화시키며, 죽은 뿌리는 토양 내에 서식하는 생물의 먹이가 되어 영양분을 공급하고 토질을 개선해준다.



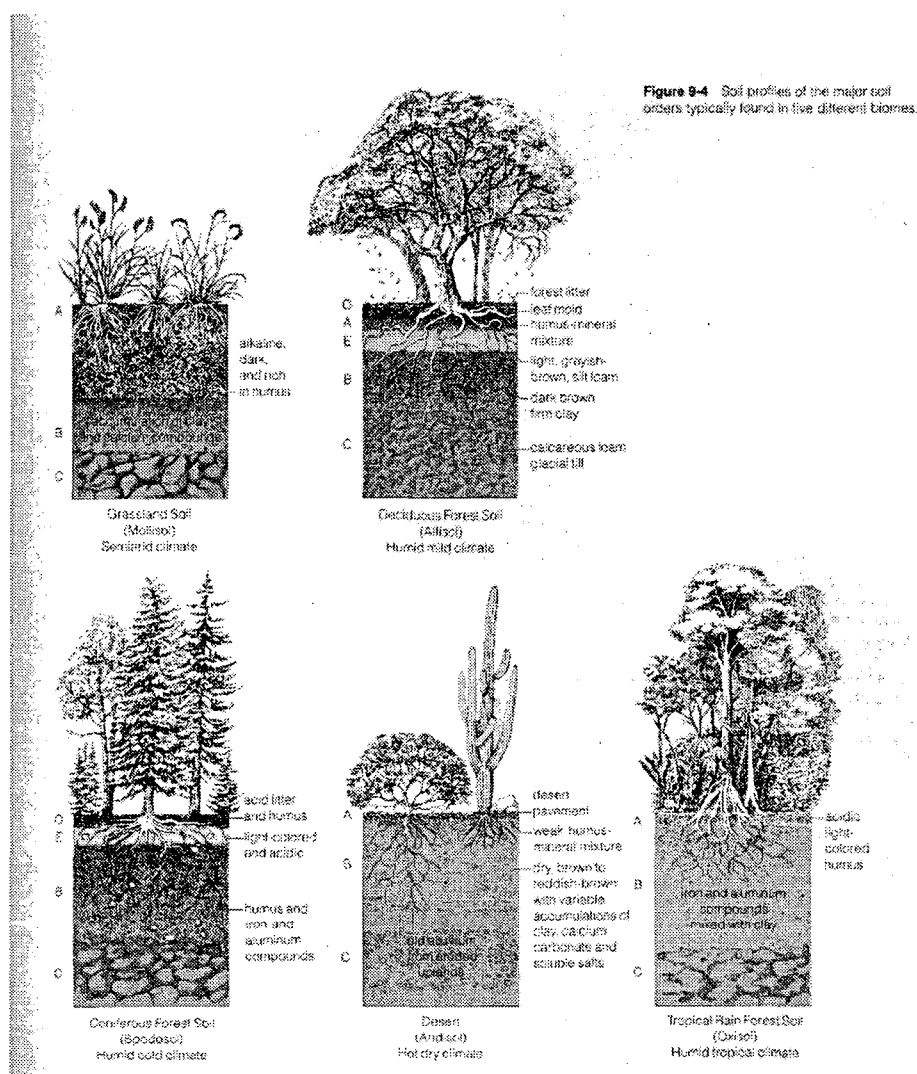


Figure 9-4 Soil profiles of the major soil orders typically found in five different biomes.

<그림 2> 지역적 특성에 따른 토양단면 (Miller, Jr., 1989)

결과적으로 토양과 그 속의 생물들은 상호 보완관계를 유지하면서 균형을 이루고 있다. 물론 미생물은 유기물의 분해작용, 질산화작용, 무기양분의 동화작용, 질소고정작용, 미생물간의 길항작용 등의 유익한 작용뿐만 아니라 식물에 병을 일으키는 유해 미생물, 질산염, 황산염 등을 환원시키는 미생물도 있으며, 고등식물과 양분획득을 위해 경쟁을 하기도 한다.

## 2.2 환경오염원과 오염물질

일반적으로 환경에 영향을 주는 오염원은 주된 영향권에 따라 대기, 수질, 토양, 지하수, 폐기물, 소음 및 진동 등으로 구분하고 있다. 이러한 분류를 기초로 각 오염에 대한 오염원, 오염물질, 발생기구 및 그 영향에 대해 <표 2>에 요약하였다.

<표 2> 오염원별 오염물질, 발생기구 및 영향

|    | 오염원         | 오염물질                  | 발생기구  | 영향                          |
|----|-------------|-----------------------|---|-----------------------------|
| 대기 | 암석 (방사능물질)  | U, Th, Rn             | 풍화  | 방사능 유입                      |
|    | 화석연료의 소각    | SOx, NOx, CO, CO2     | 연료의 불완전 연소                                  | 산성비, 광화학적 스모그, 산소결핍, 온실효과 등 |
|    | 공장, 산업활동    | 유독성 가스, 분진            | 연료의 소각, 보일러 등                               | 산성비, 호흡기 장애 등               |
|    | 자동차 배기가스    | Pb, SOx, NOx, CO, CO2 | antiknocking제, 연료연소                         | 납중독, 호흡기 질병 등               |
|    | 염화불화탄소(CFC) | 염소                    | Cl + O3 -> ClO + O2<br>ClO + O3 -> Cl + 2O2 | 오존층의 파괴, 자외선 노출, 피부병        |
| 수질 | 공장, 산업폐수    | BOD, 유기물, 무기물         | 냉각수, 산업용수                                   | 수계오염, 수온증가, 부영양화            |
|    | 생활하수        | 유기물, 무기물              | 세탁, 조리 등                                    | 하수오염, 하천오염                  |
|    | 광산폐수        | 중금속, 산성수              | 철의 산화, 황색침전<br>백색침전, 중금속의 용출                | 산성수의 유출<br>하천수의 중금속오염       |
|    | 농업폐수        | NH4-N, 유기인            | 축산폐수, 비료와 살충제                               | 하천오염, 부영양화                  |
|    | 유조선         | 유류                    | 좌초, 침몰                                      | 해양의 유류오염                    |
| 토양 | 지질학적 물질     | 방사능 물질, 흑색 세일         | 풍화  | 농경지오염, 수계오염                 |
|    | 광산, 제련활동    | 중금속, 분진               | 채광, 선광, 정광 등                                | 중금속 농축, 호흡기장애               |
|    | 산업활동        | 중금속, 분진               | 굴뚝, 수계유출                                    | 중금속 농축                      |
|    | 도시화         | 유기물, 무기물, 분진          | 도시활동  | 중금속 농축, 호흡기장애               |
|    | 유류업         | 휘발성유기물 (VOCs)         | 유류의 유출                                      | 휘발성물질의 흡수                   |
| 기타 | 핵발전소        | 방사능(고, 중, 저준위)        | 방사능 붕괴                                      | 수용성 방사능 유출                  |
|    | 폐기물         | 산업화, 도시화 복합적 오염       | 복합적인 오염물질                                   | 동식물, 인간의 건강과 관련             |

### 2.3 중금속이란?

중금속(heavy metals)이란 비중에 의해 정의되는 것으로서, 금속 중에서 비교적 비중이 큰 것을 지칭하는 용어이다. 그 기준에 대해서는 학자에 따라 다르지만 주로 비중이 5 이상(또는 5.5 이상)인 금속을 중금속으로 분류하고 있으며, 주기율표에서 전이금속의 대부분은 여기에 속한다. 대표적으로 환경오염물질과 관련된 중금속으로는 Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, U, Zn 등이 있으며, 환경오염물질에 포함되는 발암성 물질인 As와 Sb, Bi 등은 금속과 비금속의 성질을 가지고 있어 엄밀히 말하면 금속이 아니라 금속류(metalloids)에 속한다.

대부분의 중금속은 지각내의 함유량이 0.1%이내인 미량원소이며, 이들 중에는 구리, 아연, 니켈, 코발트 등은 생명체에 없어서는 안되는 필수원소로 알려져 있으며, 이외에 납, 수은 등은 아직 생명 유지 기능이 알려져 있지 않는 비필수원소로 분류되고 있다. 일반적으로 중금속 중에서도 환

경에 영향을 미치는 중금속류는 지각에 존재하는 양이 극히 적으면서도 우리의 일상 생활에 늘리 쓰이고 있는 금속들로서 수은, 구리, 아연, 카드뮴, 크롬 등은 독성도 강하고 자주 접할 수 있는 금속이기 때문에 주요 환경오염물질로 간주되지만, 티탄이나 갈리움, 텅스텐, 저어콘, 오스뮴 등은 유독성 금속임에도 불구하고 용해도가 매우 낮거나 자주 사용되지 않는 금속은 환경오염물질이라고 보기 어렵다.

## 2.4 토양에서 중금속의 생성기구

일반적으로 토양에 중금속이 생성되는 1) 모암의 풍화, 2) 탄산염, 황화물로의 침전이나 용해, 3) 식물 뿌리를 통한 흡수, 토양 유기물에 고착, 4) 점토, 토양 유기물과의 이온교환, 5) Fe, Mn, Al의 산화물이나 수산화물로의 침전, 6) 토양 유기물과의 화학반응, 7) 용해 가능한 형태로 이동(leaching) 등으로 분류할 수 있다.

### 2.4.1 모암의 풍화

모암에 함유된 중금속이 물리적, 화학적 및 생물학적 풍화를 겪으면서 토양이 되며, 이 과정에서 중금속이 발생된다. 중금속을 다량 함유한 지질물질의 대표적인 예로는 serpentine (high Ni), black shale (high Mo, Cd, Se, U, V), 인회석(Cd) 등이 있으며, 이외에도 초염기성암 또는 염기성암에는 다량의 Cr, Ni, Co 등의 고온성 원소들이 함유되어 있다.

### 2.4.2 침전과 용해

대부분의 중금속은 단일광물보다는 산화물로 또는 유기물과 결합되어 있으며, 이들은 pH에 따라 용해도가 변화한다. 일반적으로 중금속은 pH가 낮아지면서 용해도가 증가하는 경향을 보이며, pH 감소에 따라  $Cd > Zn \gg Cu > Pb$  순의 용해도가 변화한다. 하지만 산화형으로 구성된 일부 원소들(Mo, Se, As)은 음이온으로 존재하면서 pH가 높은 환경에서 상대적으로 이동도 또는 용해도가 증가한다. 또한 Eh의 영향도 있어, 환원환경에서 Mn, Fe 등의 용해도 증가하지만, 미량원소는 황화물, 탄산염, 산화물, 수산화물 등으로 침전되는 경향이 있다.

### 2.4.3 이온교환과 흡착

금속의 흡착정도를 pH를 변화와 관련하여 보면, 낮은 pH에서는 Fe, Al의 영향에 따라 용해성이 좋은 순서로 보면 Cd, Ni, Co, Zn, Cu, Pb, Hg 등으로 구분할 수 있다. 이러한 흡착은 1) 광물 표면에 흡착, 2) 광물 격자 내에 투입, 3) 광물표면-금속-ligand에 안전한 화합물 형성 등의 방법으로 이루어지며, 흡착에 영향을 주는 요소는 다음과 같다.

- 1) pH : pH가 증가함에 따라 흡착이 용이

- 2) 양이온 존재 : Al, Fe 존재 --> 흡착용이, Mg, Ca 존재 --> 흡착이 어려움
- 3) 이온경쟁 : 단일원소로 존재 --> 흡착용이, 이온복합체 --> 흡착이 어려움
- 4) 이온강도 (함량) : 적은 양일때 흡착이 용이
- 5) 유기작용기 존재 : alginic acid --> 흡착용이, EDTA --> 흡착이 어려움
- 6) 인산염이 존재 : 인산염이 많을 때 흡착이 용이

#### 2.4.4 유기물과의 결합

일반적인 유기물로서는 fulvic acid와 humic acid이 있으며 중금속의 친화력은 다음과 같다.

fulvic acid와의 친화력 :  $Fe^{3+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Mn^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+}$

humic acid와의 친화력 :  $Cu^{2+} > Pb^{2+} > Zn^{2+} = Ni^{2+} > Co^{2+} > Cd^{2+} > Mn^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+}$

#### 2.5 중금속의 이동에 영향을 주는 인자들

토양에 존재하는 금속의 이동은 금속자체의 용해도와 주변 환경에 따라 그 이동 및 분산되는 정도가 다르기 때문에 결국 토양의 성질에 의해 이동도가 좌우된다고 볼 수 있다. 이러한 토양의 광물학적 특성, 물리화학적 성질은 다음과 같다.

##### 2.5.1 토양의 광물조성

1) 토양의 무기물 : 토양을 구성하고 있는 물질의 대부분은 교질상으로 존재한다. 교질상은 고체, 액체 및 기체의 미세한 응집상태로 다른 물질내에 분산되어 있는 상태이다. 크기는 보통  $1\mu m$  이하이며 토양교질물의 경우는 대개  $2\mu m$  이하로써 주로 2성분계를 이룬다. 이러한 교질물은 주로 점토광물로 구성된 무기교질물, 부식물(humus)과 같은 유기교질물 및 이들의 복합체(clay-humus complex) 또는 중간 혼합물(intermixture)의 상태로 존재한다. 특히, 점토광물은 Al, Mg, Fe 등을 포함하는 복합규산염으로 구성되어 있으며, 규소와 산소는 사면체를, Al 또는 Mg 산화물은 팔면체를 형성하고 있다. 대부분의 온대지역에서는 이들 규산염 점토광물이 우세하며 열대와 아열대에서 Fe, Al 및 Mn 등의 산화물 또는 수산화물이 잘 나타난다.

2) 주요 점토광물 : 점토광물이란 일반적으로 세립질이고 경도가 낮으며 층상구조를 갖는 규산염광물들을 총칭하는 용어이다(김수진, 1996). 이들은 주로 단사 또는 삼사정계에 속하는 층상형 규산염광물(phyllsilicates)로서 그 형태에 따라 분류한다. 즉, silica sheet와 alumina sheet가 1:1로 구성된 것(kaolinite, pyrophyllite)과 2:1로 구성된 것으로 분류하며 그 특성에 따라 세부적으로 나누고 있으며, 경우에 따라 이를 세분하여 ① 1:1 격자형 광물(2층형), ② 2:1격자형광물(3층형), ③ 2:1 격자형-팽창격자형(2:2형 혼합격자형이라고도 함) 및 ④ 비팽창형격자형으로 구분하기도 한다. 토양에서 주로 발견되고 있는 점토광물들은 kaolinite, pyrophyllite, montmorillonite, vermiculite,

chlorite, illite, muscovite 등이 있으며, 이들의 존재와 그 양에 따라 토양의 특성도 변한다. 예를 들면, kaolinite는 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 주성분을 이루며, montmorillonite는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 상대적으로 높고, illite는 K<sub>2</sub>O의 함량이 높으며, vermiculite와 chlorite는 MgO의 함량이 상대적으로 높은 편이다. 그리고 CaO는 대부분 0~3%정도 함유되어 있다. 양이온교환능력은 vermiculite > montmorillonite > chlorite ≈ illite > kaolinite 등의 순서를 보이며, 비표면적도 양이온교환능력과 유사한 순서이다.

## 2.5.2 토양의 물리적 성질

1) 색깔(soil color) : 토양의 색깔은 생성환경에 따라 다양하며, 적색, 갈색, 황색뿐만 아니라 녹색을 띠기도 하며, 'Munsell Color Chart'를 이용하여 결정한다. 이 차트는 색의 3가지 성분인 색상(hue), 채도(chroma) 및 명도(value)를 세분화하여 토양의 색을 구분하고 있다. 이 차트의 각 면은 5R(적색)에서 5Y(황색)까지의 색상으로 구분되어 있으며, 각 면의 상단에서 하단으로 가면서 명도는 감소하고, 왼쪽에서 오른쪽으로 가면서 채도는 증가하도록 구성되어 있다. 토양의 색깔은 지역이나 심도에 따라 변화하며, 유기물이 많은 표층의 토양(A층)은 하부토양(B층)에 비해 검은색을 띤다. 또한 배수조건에 따라 토양의 색이 다를 수 있다. 즉, 배수가 잘되는 토양의 색깔은 높은 채도를 가지며, 회색계열 또는 채도가 낮은 토양은 비교적 배수가 잘되지 않는 토양이다. 그리고 토양의 색깔에 따라 수분의 함량도 예측할 수 있어 건조한 토양은 습윤한 토양에 비해 높은 명도를 보인다. 더불어 밝은 적색의 토양은 열대와 아열대에서 관찰되며, 암회색과 갈색토는 주로 온대기후에서 나타난다.

2) 토성(soil texture) : 토양은 다양한 종류의 물질들의 복합체이다. 그 속에는 무기물과 유기물이 혼재되어 있으며, 이들 입자들의 굵기에 따라 자갈(gravel), 모래(sand), 미사(silt) 및 점토(clay) 등으로 구분한다. 이러한 토양 입도의 구분은 미국 농무성(USDA) 기준, 국제표준(International) 기준 및 구소련(USSR) 기준에 따라 다소 차이가 있지만 주로 미국 농무성(USDA)에서 분류한 방법이 많이 이용되고 있다. 즉, 모래는 2.00-0.05mm, 미사는 0.05-0.002mm 그리고 0.002mm(2 $\mu$ m) 이하를 점토로 분류하고 있다.

일반적으로 사질토는 유기물의 함량이 적고, 배수가 잘되지만 비와 바람에 의해 유실되기 쉽다. 하지만 점토질 토양은 함수능력이 높고, 유기물의 함량이 높으며, 비바람에 의해 유실되는 양은 적지만 배수가 용이하지 않다. 그리고 미사질은 이들 둘의 중간적인 특성을 갖는다. 토양 입자들의 사질, 미사질 및 점토질의 상대적 비를 토성(soil texture)이라고 한다. 측정된 토양의 입도 분포는 사질, 미사질 및 점토질의 상대적 비율(%)을 삼각도표에 도시하여 토성을 결정하고 있다.

3) 비중 : 토양의 비중은 중요한 물리적 성질이다. 유기물을 다량 함유하고 있는 토양은 그 비중이 낮고 광물질을 다량 함유하고 있는 토양은 높은 비중을 가진다. 또한 모암에 따라 비중이 달라서 화산재로 구성된 경우에는 비교적 낮은 비중을 갖는다. 참고로 밀도는 단위부피당 질량으로 정의하여 [g/cm<sup>3</sup>], [kg/m<sup>3</sup>] 등의 단위를 사용하지만, 비중은 4℃에서 순수한 물의 밀도에 대한 물질의 상대적 밀도로 정의되므로 무단위계이지만 여기에서는 이해를 돕기 위하여 비중에 [g/cm<sup>3</sup>]의

단위를 사용하도록 한다. 비중은 건조 토양의 무게를 자연토양의 부피로 나누어 계산되는데, 부피는 공극량에 영향을 받기 때문에 공극을 포함한 토양의 비중을 가비중(apparent density) 또는 용적비중(bulk density)라고 한다. 일반적으로 경작 토양의 가비중은 1.3g/cm<sup>3</sup> 정도이며, 화산재에 의해 형성된 토양에서 낮고(0.55g/cm<sup>3</sup>), 강한 응집을 한 사질토양에서 높다(2.0g/cm<sup>3</sup>). 반면 공극을 제외한 상태에서 산출된 비중을 진비중(true density) 또는 입자비중(particle density)이라고 한다. 이 진비중은 구성광물에 따라 변하며, 유기물로 구성된 토양에서는 0.9g/cm<sup>3</sup> 정도를, 광물질로 구성된 경우에는 2.65g/cm<sup>3</sup> 정도를 갖는다. 토양의 공극은 토양의 주요한 성질이므로 보통의 경우는 가비중을 많이 사용하며 각각에 대한 계산식은 다음과 같다.

$$\text{가비중(g/cm}^3\text{)} = (\text{건조토양의 무게}) / (\text{자연토양의 부피})$$

$$\text{진비중(g/cm}^3\text{)} = (\text{건조토양의 무게}) / (\text{토양입자의 부피})$$

토양의 가비중은 입도에 따라 변하며, 미사질 또는 점토질로 구성된 토양보다는 사질토양의 가비중이 높다. 왜냐하면 미사질 또는 점토질 토양은 다량의 공극을 포함하고 있어 공극률이 높아 낮은 가비중을 보이며, 사질토의 경우는 낮은 유기물함량을 갖고 상호 응집력이 약해 상대적으로 공극률이 낮아 비교적 높은 비중을 보인다. 그러므로 미사질 및 점토질 토양의 가비중은 1.00 - 1.55g/cm<sup>3</sup> 정도이며, 사질토양은 1.20-1.75g/cm<sup>3</sup>의 가비중을 갖는다. 또한 응집이 잘된 사질토에서는 2.0g/cm<sup>3</sup> 이상의 가비중을 갖는 경우도 있다. 예를 들면 농경지에서는 지속적인 유기물의 공급, 식물의 잔해의 축적 및 객토를 통한 토양반전 등에 의해 가비중이 감소하지만 장기적인 농업활동에 의해 상부토양은 응집되어 가비중이 증가되기도 한다.

4) 공극량 : 토양의 공극은 주로 공기, 수분 및 용해물질 등을 함유하고 있어 식물은 뿌리를 통해 이들 물질을 흡수하여 성장한다. 이러한 토양의 공극량은 토양의 가비중과는 반비례 관계를 가지므로 사질토양이나 심부토양의 경우는 낮은 공극량(30-50%)을, 미사질 또는 점토질 토양은 비교적 높은 공극량(40-60%)을 갖는다. 물론 이러한 경향은 토양입자의 균질성과 직접적으로 관계되며, 고른 입도를 가진 토양이 다양한 입도를 가진 토양에 비해 공극량이 높다. 또한 고체가 차지하는 비율인 고상률도 공극량과 밀접한 관계를 가지며, 용적비중을 입자비중으로 나눈것의 백분율로 계산된다. 그리고 토양의 공극량은 용적비중(가비중)과 입자비중(진비중)으로부터 계산되며, 다음과 같다.

$$\text{공극량(\%)} = 100 \{ 1 - (\text{용적비중} / \text{입자비중}) \}$$

예를 들면 용적비중이 1.3g/cm<sup>3</sup>인 토양의 진비중이 2.6g/cm<sup>3</sup>이면 공극량은 50%가 된다. 한편, 공극량의 변화는 토양의 이용에도 중요하므로 공극의 크기에 따라 배수가 불량한 습윤토양에서 큰 공극이 공기로 채워져 있는 대공극(macro pores) 또는 통기공극(aeration pores)과 작은 공극에 주로 물로 채워져 있는 미세공극(micro pores) 또는 모세관공극(capillary pores)으로 구분하지만 그 경계가 뚜렷하지는 않다.

5) 수분함량 : 물은 생명체의 가장 중요한 성분중의 하나이며, 토양수는 식물의 성장에 필수적이다. 특히 다양한 화학적, 생물학적 작용을 촉진시키며 영양분을 공급하기도 한다. 토양에 함유된 수

분은 토양입자 사이를 충전하고 있는 토양 수증기, 화학적으로 결합되어 있는 결합수, 토양의 입자에 흡수되는 흡착수 및 모세관수 등의 형태로 존재한다. 이들 수분의 함량에 따라 토양의 배수조건이 변화하며, 토양의 색깔도 변한다. 일반적으로 토양수의 함유량에 따라 토양을 7가지로 분류하고 있으며 각각은 다음과 같다(FitzPatrick, 1986).

① Excessively drained (excessive aerobic)

너무 건조해서 식물이 성장할 수 없으며, 토양의 색과 조직의 뚜렷한 경계가 나타난다.

② Well drained (aerobic)

식물이 성장할 수 있도록 건조와 습기가 공존하며, 주로 밝은색을 띤다.

③ Imperfectly drained (weakly anaerobic)

짧은 환원환경을 가지며 대부분 습윤한 토양이며, 배수가 양호한 토양에 비해 어두운 색상을 띤다.

④ Poorly drained (strongly anaerobic)

장기간의 환원성환경에 의해 토양의 색깔이 회색, 연두색(olive color) 또는 푸른색을 띤다.

⑤ Very poorly drained (continuously anaerobic)

연중 물로 포화되며, 청색, 연두색, 회색을 띠고, 식물뿌리주변에 파이프형의 철산화물이 관찰된다.

⑥ Flooded soils

연중 물에 잠겨 있는 토양이며, 환원에 의해 검은색을 띤다.

⑦ Improved drainage

배수가 발생되기는 하지만 형태적으로는 관찰이 되지 않으며, 천천히 변한다.

이러한 토양의 수분함량은 기후, 식생, 지형에 따라 변하며, 채취한 토양을 105℃에서 건조하여 감소된 질량으로 결정한다.

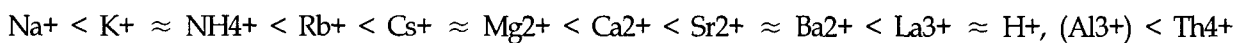
### 2.5.3 토양의 화학적 성질

1) 수소전위 (pH) : 토양의 pH는 포화염도(base saturation)와 더불어 토양의 가장 중요한 화학적 성질로서, 일반적으로 3~9정도의 넓은 범위를 가지며 일부 토양은 극산성 또는 극염기성을 띠기도 한다. 산성토양은 주로 황철석 또는 황을 포함하는 소택지나 습지에서 관찰되며, 염기성 토양은 주로 탄산염(sodium carbonates)이 존재하는 토양에서 관찰된다(FitzPatrick, 1986). 최근에는 산성광산배수(acid mine drainage)에 영향을 받은 토양에서도 매우 낮은 pH를 갖는 토양이 관찰되기도 한다. 토양의 pH는 주로 유기물과 양이온의 형태와 양에 의해 조절되며, 다량의 유기물은 유기산을 형성하여 토양의 산도를 높인다. 물론 다량의 염기를 함유한 경우는 유기산에 의해 산성토양을 중성으로 중화하기도 한다. 예를 들면 이탄(peat)질 토양의 pH는 3~4정도의 산성을 띠지만 이

들의 형성당시에 탄산칼슘과 같은 다량의 염기들이 용해된 물에 의해 중성의 pH를 갖기도 한다. 또한 수소와 알루미늄이온도 토양의 산도에 영향을 준다. 1차 광물에서 수화되어 빠져 나온 알루미늄이온( $Al^{3+}$ )은 토양수에 존재하는 수산화이온( $OH^-$ ) 3개와 결합하여 수산화알루미늄( $Al(OH)_3$ )으로 침전되면, 남아있던 수소이온( $H^+$ )의 농도가 증가되어 토양의 pH를 낮추게 된다. 그리고 강우의 영향으로 토양에 있는 양이온이 침전 또는 제거되면서 자유로운 수소이온이 증가되어 pH가 낮아지기도 한다.

2) 산화환원전위 (Eh) : 산화는 산소와 결합하거나, 수소나 전자를 내어주는 경우이며, 환원은 그 반대 현상이다. 이러한 산화환원반응은 상호작용에 의해 형성되어 일정 물질이 산화되면 반응식에서 다른 물질은 환원이 일어나며 대부분 가역반응이다. 산화환원반응은 수소분자가 이온화하여 두 개의 수소이온으로 변하는 표준수소전극반응의 산화환원전위를 기준( $Eh = 0V$ )으로 상대적인 크기로 나타내며, Eh값이 양(+)이면 산화환경을, 음(-)이면 환원환경을 지시한다. 토양의 Eh값은 토양의 pH, 무기물, 유기물, 배수조건, 온도 및 식물의 종류에 따라 변화하며, 보통은  $-0.35V$ 에서  $+0.80V$  범위에 있으며, 물 속에 잠겨 있는 토양의 Eh는 대개  $-0.18V$  정도이다(임선욱, 1996). 다량의 분해성 유기물이 있는 환경에서는 유기물에 의해 Eh가 변하며, 무기물이 유기물로부터 전자를 얻어 환원되면서 Eh도 변할 수 있다. 또한 통기성과 배수조건이 불량한 토양은 산화능력이 떨어져 Eh가 낮아지고 금속황화물과 젖산과 같은 저급지방산이 형성되기도 한다.

3) 양이온교환능력(CEC) : 토양에서의 양이온교환의 원리는 동적평형이다. 토양의 교질물에 흡착되어 있는 양이온은 정지되어 있는 것이 아니라 열운동에 의해 일정한 거리에 떨어져 있지만 음전하의 영향으로 일정한 가까운 범위에 머무르고 있다. 흡착(Stem층)과 확산(Gouy층)이 일어나는 이 범위를 확산이중층(diffuse double layer)이라고 하는데, 이 층에 있던 양이온들은 열운동에 의해 외부로 분산되거나 외부의 양이온이 이 층의 내부로 유입되면서 교환반응이 일어나면서 동적평형 상태를 유지한다. 토양에서 발생하는 양이온들의 흡착력은 원소에 따라, 음전하의 발생 위치에 따라 차이가 있으며, 일반적으로 원자가가 크고 원자량이 큰 양이온의 교환과 침투력이 크다. 양이온에 대한 상대적인 교환 침투력은 다음과 같다(임선욱, 1996).

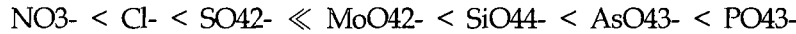


물론, 이 교환능력의 순서가 항상 성립되는 것은 아니지만 대부분의 토양에서 양이온의 흡착에 적용될 수 있으며, 이를 'Lyotropic series' 또는 'Hofmeister's cation sequence'라고 한다. 토양에서의 양이온교환능력은 금속의 흡착에 영향을 주는 요소로서 점토의 함량, 유기물의 함량, pH값, 산화물(Fe, Mn, Al 등)의 함량에 의해 변화한다. 즉, 다량의 점토질과 유기물을 함유한 토양은 높은 양이온교환능력을 가진다. 특히 점토의 종류에 따라 교환능력이 다르며, 이는 결정격자의 형태에 따른 비표면적의 크기, 음전하의 양과 밀도의 영향 때문이다. 특히 몬모릴로나이트와 버미큘라이트와 같은 팽창형 격자를 갖는 점토광물의 CEC는  $100 \text{ meq}/100\text{g}$  또는 그 이상이 되지만, 1:1형의 카올리나이트는  $10 \text{ meq}/100\text{g}$  전후의 CEC값을 갖는다. 그러므로 다량의 카올리나이트와 깎사이트를 함유하는 열대지방의 토양은 비교적 낮은 CEC값을 갖는다.

4) 음이온의 흡착 : 토양내에는 다양한 종류의 음이온들이 존재한다.  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $HSO_4^-$  등은 흡착제 표면의 양이온에 의해 비교적 느슨하게 결합되어 있으며,  $PO_4^{3-}$ ,  $MoO_4^{2-}$ ,  $AsO_4^{3-}$ ,  $SiO_4^{4-}$  등



은 배위결합으로 흡착되어 비교적 강하게 결합되어 있다. 이와 같은 음이온의 흡착력은 양이온과는 달리 그 정도를 비교할 수는 없다. 다시 말해, 음이온의 농도가 높으면 침전이 형성되는 등의 2차적인 반응이 일어나기 때문에 흡착능력을 정할 수는 없지만, 흡착등온곡선(adsorption isotherm curve)을 이용한 상대적 흡착능력은 다음과 같이 정할 수 있다.

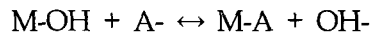


토양에서 음이온의 흡착능력은 외부용액의 음이온 농도가 증가하면서 흡착량도 상승하지만 상대적으로는 점차 감소하기 때문에 이들에 대한 관계를 수식으로 정립한 Freundlich와 Langmuir에 의한 흡착등온식이 적용된다. 대표적인 흡착등온식은 다음과 같다.

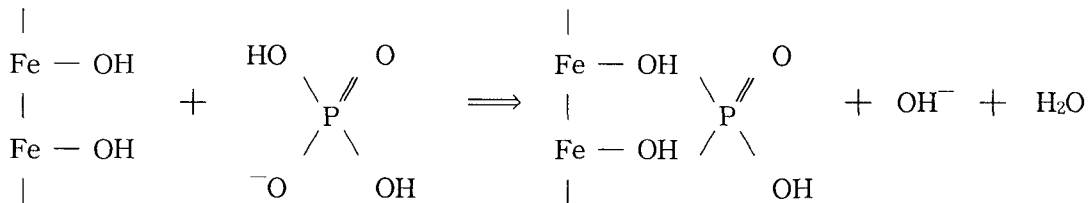
Freundlich adsorption isotherm equation :  $x/m = k c^{1/n}$  (기체는 c대신에 분압, p를 이용)

Langmuir adsorption isotherm equation :  $x/m = kbc / (1 + kc)$

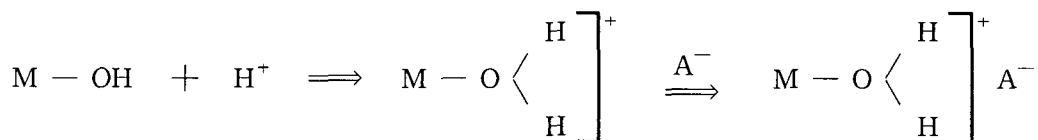
여기서  $x/m$ 은 평형농도가 c일 때 흡착체의 단위당량당 흡착되는 음이온의 양, b는 최대흡착량, k와 n은 정수이다. 그러므로 Langmuir 식은 Freundlich 식과는 달리 최대흡착량(b)을 계산할 수 있다. 이러한 흡착등온식은 원래 고체의 표면에서 가스가 단분자층으로 흡착되는 것에 대하여 사용되었지만, 현재는 토양의 흡착기구 연구에도 적용되고 있다. 토양에서 음이온의 흡착원리는 OH기와 배위자교환(ligand exchange)을 하거나 양성자화작용기(protonated group)에 흡착되는 것이다. 배위자교환에 의한 반응을 간단히 표현하면 다음과 같다.



여기서 M은 양이온을, A는 음이온을 나타낸다. 인산의 흡착을 예로 들면 다음과 같다.



양성자화 작용기에 의한 흡착은 낮은 pH에서 일어나며, 금속원자와 결합한 OH기가 H<sup>+</sup>를 받아 들며 양전하를 갖게되면 정전기적 인력이 발생하여 음이온의 흡착이 일어나는 것이다.



이러한 두가지 흡착방식은 pH에 의존하며, 수소이온의 농도가 높아지면 흡착이 용이하고 Fe, Al의 수산화물이나 점토광물이 많은 산성토양에서는 음이온의 교환능력이 높다. 점토광물 중에서 음이온을 가장 잘 흡착하는 것은 표면적이 크고 영구음전하가 매우 작은 allophane이며, kaolinite는 동일조건에서 illite와 smectite에 비해 많은 음이온을 흡착한다. 이외에도 유기교질물에 의해서

음이온이 흡착되기도 한다.

5) 원소의 함량 : 토양에 함유되어 있는 다양한 원소들은 식물의 생장에 직접적인 영향을 준다. 식물의 성장에 필수적인 원소들은 C, H, O, N, S, P, K, Ca, Mg, Fe, B, Mn, Cu, Zn, Mo, Cl 등이며 이외에도 Si, Co, Na, I, Se 등도 식물에 따라 주요한 성분이 되기도 한다. 이러한 원소들은 토양에 다량 존재하고 있어 이들로부터 필요한 영양소들을 공급받는다. 토양내의 원소들은 구성성분의 함량에 따라 주성분원소(>1%), 부성분원소(0.1-1%) 및 미량원소(<0.1%)로 구분할 수 있으며, 식물에 필수적인 원소들은 주로 주성분으로 함유되어 있다.

6) 산화물의 함량 : 토양내에는 Si, Ti, Al, Fe, Mn 등의 산화물 또는 수화물이 존재하며, 이들 산화물은 토양중의 미량원소 흡착과 직접·간접적으로 관련된다. 알루미늄수산화물은 다양한 종류의 미량원소를 흡착할 수 있지만, 토양의 원소흡착에는 주로 Fe와 Mn의 산화물이 주요한 역할을 한다. 토양 중에는 다양한 Fe산화물 또는 수산화물이 있지만 침철석(goethite, FeOOH)이 주종을 이루고 있다. 그리고 토양에서 주로 확인되는 Mn산화물 또는 수산화물은 lithiophorite ((Al,Li)MnO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>), birnessite((Na,Ca)Mn<sub>7</sub>O<sub>14</sub>·3H<sub>2</sub>O), vernadite(MnO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O) 등이지만 대부분은 비정질로 존재하기 때문에 광물결정을 찾기는 쉽지 않다. 물론 이들 산화물 또는 수화물에 의한 음이온의 흡착은 토양의 pH에 의존하며 높은 pH환경에서는 흡착능력이 떨어진다.

## 2.6 중금속의 이동도에 대한 일반적인 사항

대부분의 중금속은 토양의 상부에 존재하고 있으며, 이들은 오랜 시간이 지남에 따라 토양의 하부로 이동된다. 이러한 경향은 relative topsoil enrichment (RTE) 라는 것으로 측정할 수 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$RTE = [\text{metals in topsoil (0-15cm)}] / [\text{metals in subsurface soil (30-45cm)}]$$

일반적으로 RTE를 적용하여 조사하면, 비오염토양은 RTE값이 1.2~2.0 정도이지만 오염토양은 4~20 정도로 나타나 토양오염도를 판단하는 근거로 활용될 수 있다. 또한, 산성비 또는 토양의 산성화에 따른 변화를 보면, 산도가 증가하면서 Al, Mn, Zn > Cd, Co, Cu, Ni > Pb, V 등의 순서로 물질이 주변으로 이동되는 경향이 있으며, 토양에 존재하고 있는 금속형태의 화학적 형태를 규명할 수 있는 단계별(연속)추출법, EDTA, DTPA 등을 이용하여 그 이동정도 또는 용해도 등을 조사할 수 있다. 여기에서 단계별추출법은 1) soluble, exchangeable fraction, 2) carbonates bound, 3) organic bound, 4) Fe, Mn oxides bound 및 5) residuals로 구분하여 추출된 자료를 활용하고 이다.

## 2.7 중금속의 토양-물-동식물-인간과의 상호관계

중금속에 의한 동식물 및 인간의 상호관계를 규명하기 위해서 일반적으로 고려되고 있는 사항으로 1) 유독성 금속의 특성 : 화학형태, 식물흡수가능정도, 노출경로, 시간

2) 생성기구, 효과 : 가역반응 유무, 다른 원소와의 상호반응, 순간적 지속적 영향

3) 독성의 발생 : 재생작용, 호흡, 광합성, 유전자, 균락의 증감 등을 활용하고 있다.

이러한 것을 기준으로 유독성중금속이 인체 및 동식물에 미치는 영향은 다음과 같이 구분한다.

- 1) Lethal concentration (LC) : 개체의 죽음 : 24-hour LC50
- 2) Effective concentration (EC) : 개체가 죽지는 않았지만 치명상 입음 : 48-hour EC50  
예) 호흡곤란, 행동의 변화(동물), 성장감퇴, 재생능력감소, 잎의 변화, 색변화(식물)
- 3) Phytotoxicity threshold (PT) : 잎의 성장감퇴 정도 : PT50 (50% 감소)
- 4) Incipient lethal level : 단기적인 독성이 멈추는 함량 (주로 일정기간 50%가 재생)
- 5) Safety concentration : 한두세대 이상의 장기간 유독성이 나타나지 않는 최대함량
- 6) Maximum allowance toxicant concentration : 최대허용함량

식물의 경우 중금속은 동물과 인간과는 달리

- 1) excluders : 유독성원소를 제한적으로 흡수하여 자기방어를 함.
- 2) index plant : 토양의 금속함량에 비례하여 흡수.
- 3) accumulator : 다른 식물에 비해 많은 양의 금속을 흡수하는 3가지로 구분되고 있으며, 이들에 대한 연구는 그 동안 매우많은 진척을 보여왔다.

인간에게 있어서 중금속은 어쩌면 매우 두려운 존재이기도 하지만 필연적으로 요구하고 있는 물질들도 있다. 일단, 중금속이 우리 몸 속에 들어오면 바로 배출되지 않고 세포를 구성하고, 세포 내에서 수많은 화학 반응의 촉매 역할(효소)을 하고 있으며, 병원균에 대한 항체를 만드는 단백질에 쌓이게 된다. 하지만 단백질의 구조상 중금속은 단백질에 잘 붙게 되어 있는데 이 경우, 중금속은 단백질의 고유한 구조를 깨뜨려 단백질의 기능을 없애버린다.

예로써 피 속에서 산소를 운반하는 헤모글로빈은 글로빈이라는 단백질에 철이 붙어서 만들어진 것인데, 폐에서 헤모글로빈이 산소를 매달고 운반하여 우리 몸의 모든 부분에 산소를 공급한다. 만약 헤모글로빈에 수은이 붙으면 더 이상 산소를 운반하지 못하게 되고, 뼈 속의 콜라겐에 수은이 붙으면, 그 기능을 상실하여 뼈가 약해지고 잘 부러지게 된다. 이런 중금속의 작용은 몸 속에 아주 조금 들어 있을 때에는 병으로 나타나지 않지만, 허용기준치 이하일지라도 장기간 노출되는 경우에는 몸 속에서 배출되지 않고 쌓이게 되므로 매우 위험하게 된다.

세계보건기구(WHO)에서도 이러한 중금속의 위험성을 인지하고 유해한 중금속에 대해서는 PTWI (Provisional Tolerable Weekly Intake)값을 설정하여 관리하고 있다. 이들 중에서 대표적인 기준은 다음의 <표 3>에 요약되어 있다.

<표 3> 세계보건기구에서 권장하는 일부 유해성 물질의 인체 흡수 환경기준

| 원소 | 흡수 관련 기준                                      |
|----|---|
| As | 15 µg/kg(무기성 비소)                              |
| Cd | 7 µg/kg                                       |
| Cu | 60kg 몸무게 기준으로 1일 최대 30mg                      |
| Pb | 60kg 몸무게 기준으로 1일 최대 430 µg (=3,000 µg/week)   |
| Zn | 1일 최대허용량은 몸무게 기준 1mg/kg<br>1일 성인 권장량은 15-20mg |

### 3. 결론

이 세미나에서는 토양학의 기초를 설명하고 이를 기초로 다양한 오염물질 중에서 중금속이 토양에서 이동과 분산되는 특성을 고찰하였다. 토양계에서의 오염물질 특히, 중금속은 그 토양의 물리화학적 및 생물학적 특성에 의해 이동도 및 확산이 변화되며, 원소에 따라 그 이동의 정도도 달라진다. 일반적인 토양오염원으로 판단되는 휴/폐광산, 불량매립지, 유해화학공업단지 등에서 배출되는 중금속류는 비, 바람 및 수계의 형태에 따라 이동, 분산되는 경향을 보이고 있다. 특히 국내의 900여개의 금속광산, 380여개의 석탄광산 및 1,200여개의 비금속광산, 약 3,000여개의 불량매립지, 50,000여개의 유해화학물질 오염유발시설 및 일부 군부대의 토양환경오염은 심각한 수준이 아닐 수 없다.

결국, 자연환경에서 중금속은 미량으로 존재하지만 인간의 활동에 의해 발생시킨 다량의 중금속은 토양의 자정능력 이상이 되고 있으므로 이들에 대한 적절한 처리가 요구되며, 국가에서 우선적으로 토양오염도의 평가와 복원을 위해 '토양환경 복원 및 정화기술개발을 위한 대책사업'의 수행이 절실히 요구된다.

<참고문헌>

- 김수진, 1996, 『광물과학』, 도서출판 우성, 서울, p. 593.
- 임선욱, 1996, 『최신 토양학통론』, 문운당, 서울, p. 383.
- 전효택, 문희수, 김규한, 정명채, 1998, 『환경지질학』, 서울대학교출판부, 서울, p. 529.
- 최병순, 김진한, 이동훈, 1997, 『토양오염개론』, 동화기술, 서울, p. 287.
- Brady, N. C. and Weil, R. R., 1996, The Nature and Properties of Soils, 11th edi. Prentice Hall, New Jersey, p. 740.
- FitzPatrick, E. A., 1986, Soils : their formation, classification and distribution, Longman Science & Technical, London, p. 353.
- Jenny, H., 1941, Factors of Soil Formation, McGraw-Hill, New York, p. 281.
- Miller Jr., G. T., 1989, Resource Conservation and Management, Wardworth Publishing Co., California, p. 546.
- Nriagu, J. O. and Pacyna, J. M. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. Nature, 333, 134-139.
- Pepper, I. L., Gerba, C. P. and Brusseau, M. L., 1996, Pollution Science, Academic Press, California, p. 397.
- USDA, 1975, Soil Taxonomy, Agricultural Handbook No. 436, USDA, Washington D.C., p. 754.
- USDA, 1998, Keys to Soil Taxonomy, 8th edi., USDA, Washington D.C., p. 869.

이에 대한 자세한 내용은 'http://venus.semyung.ac.kr/~jmc65'에서 얻을 수 있습니다.