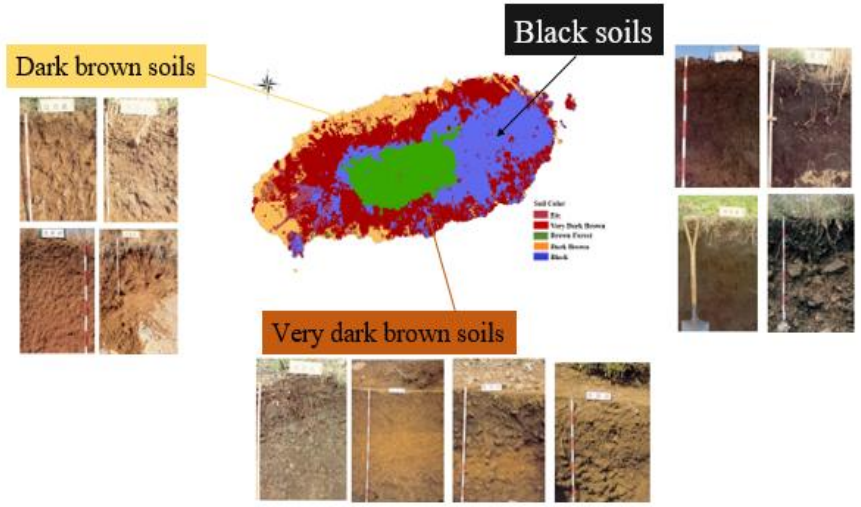
2026년 8월 26일

# 제주도 토양의 발달과 농업적 이용




과제명: 기후변화 등 환경변화 대응 식량작물 양분관리기술 개발
[주관: 경상국립대 (이용복), 공동: 제주대(박원표)]

제주대학교 생명자원과학대학
식물자원환경전공
박 원 표 (oneticket@jejunu.ac.kr)

# 발표 내용

01 제주 토양의 다양성과 분포

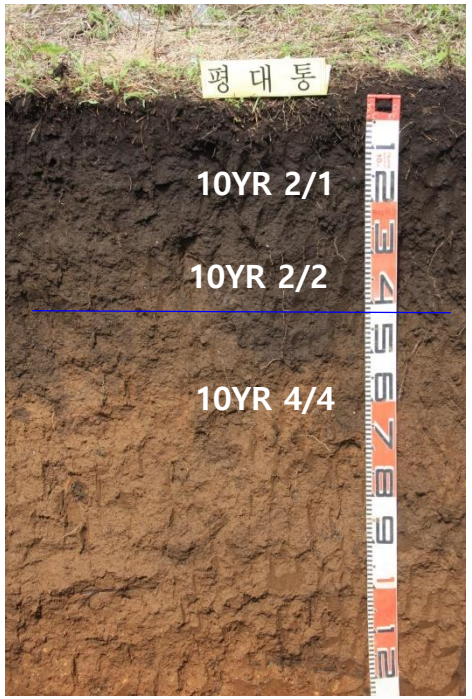
02 제주 화산회토양의 생성과 발달

03 토양특성에 따른 농업적 이용과 관리

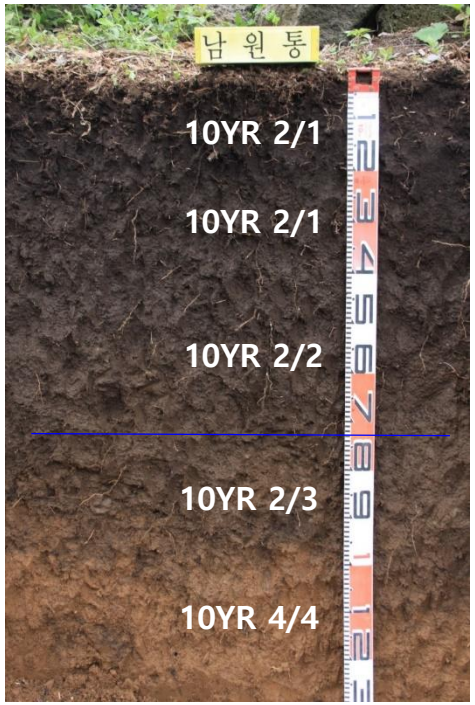
# 제주 토양 단면

- **제주도 토양통 판별**
  - 흑색토인 경우 50cm를 기준으로 토색 확인
  - 비화산회토 구분시 명도/채도가 3/3이하, 이상(4/4)인지 확인

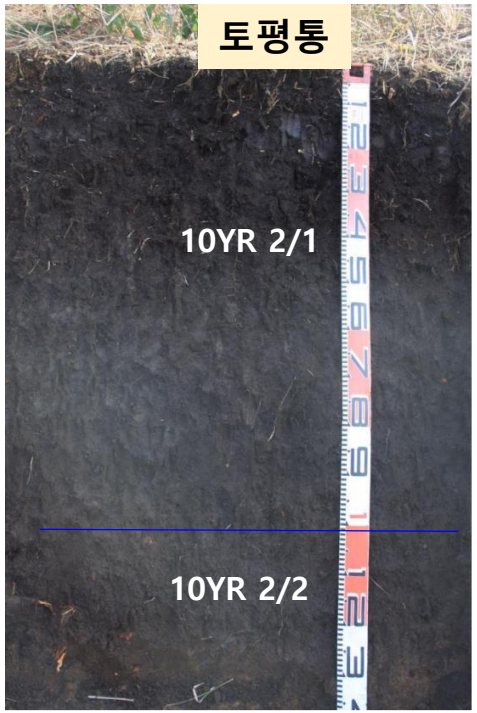
## ● 토색에 의한 구별: 흑색



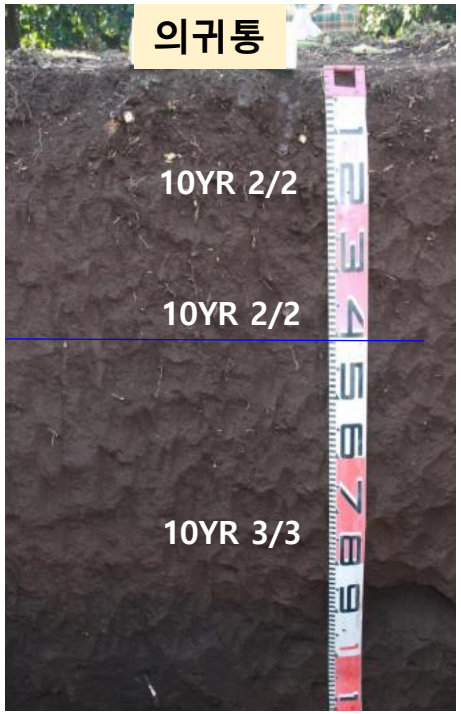

흑색 깊이 40~50 cm 이내,
자갈없음.



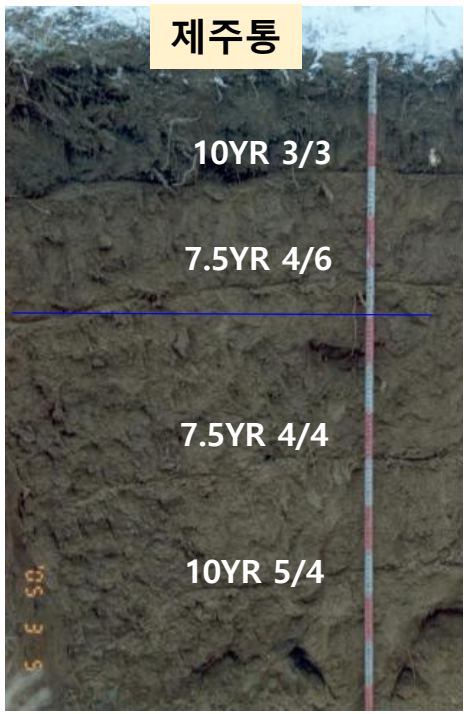

흑색 깊이 50cm 이상,
70cm 전후 에서 갈색토,
자갈없음.




흑색 깊이 1 m 까지,
자갈없음




농암갈색 50 cm 내외 ,
자갈없음

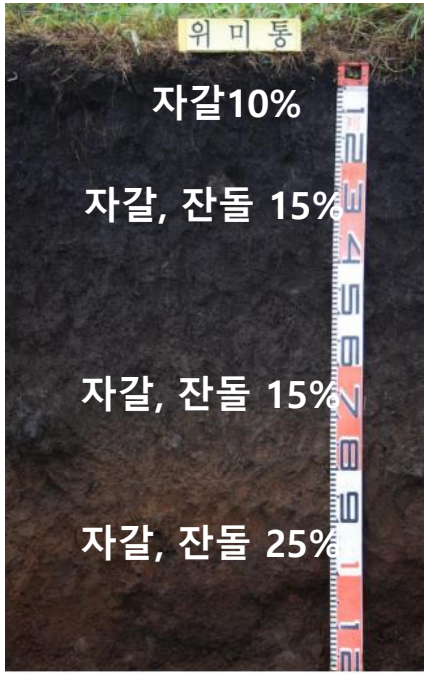



암갈색 50 cm 내외,
자갈없음 (Ultisols)

# 제주 토양 단면

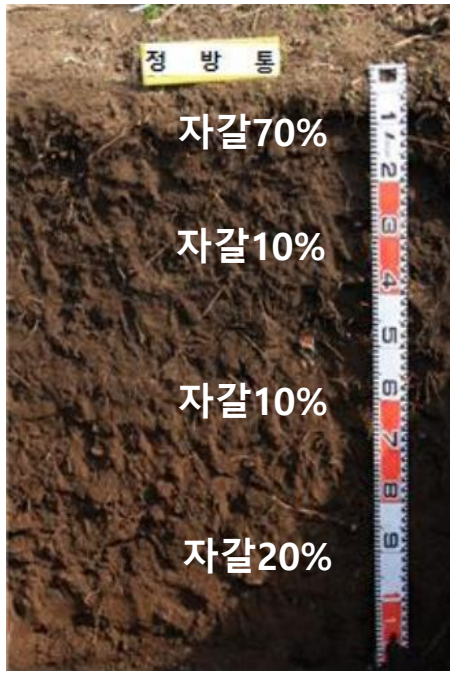
- **제주도 토양통 판별**
  - 흑색토인 경우 50cm를 기준으로 토색 확인
  - 비화산회토 구분시 명도/채도가 3/3이하, 이상(4/4)인지 확인

- **자갈, 돌에 따라 구별(흑색 깊이로 구분 안함.)**



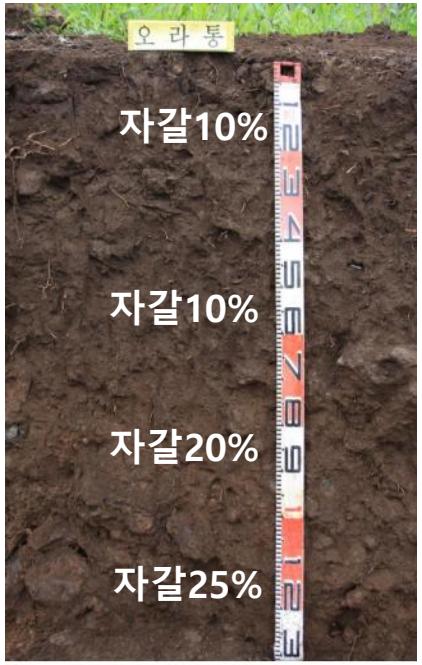

흑색, 자갈 있음.

10YR 2/1




위미와 오라 사이에 덜 검은 토양

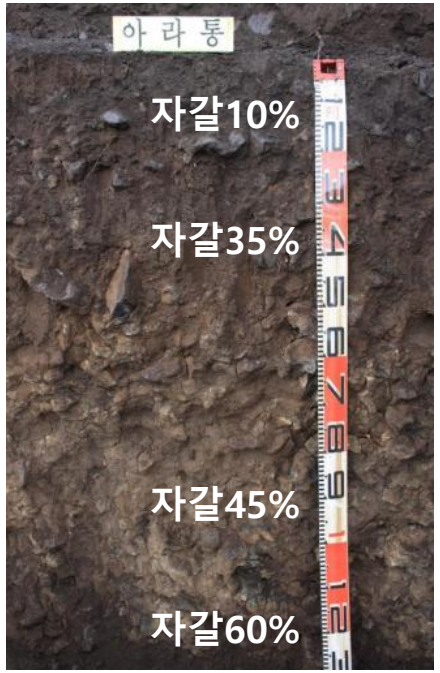
10YR 2/2




농암갈색, 자갈 있음.

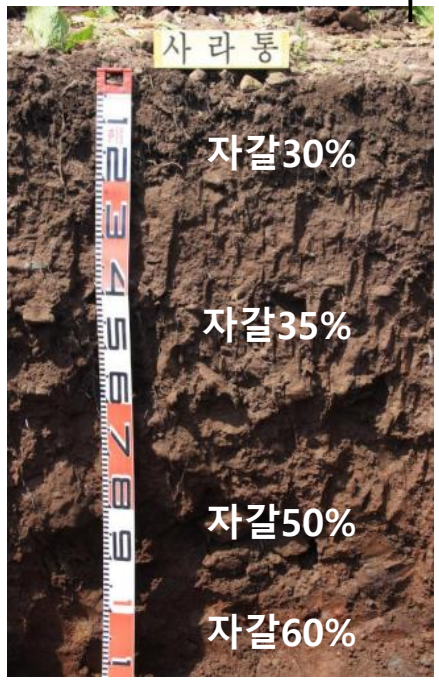
10YR 3/3

Inceptisols




농암갈색, 자갈 많음

10YR 2/2




암갈색, 자갈 많음

10YR 3/3

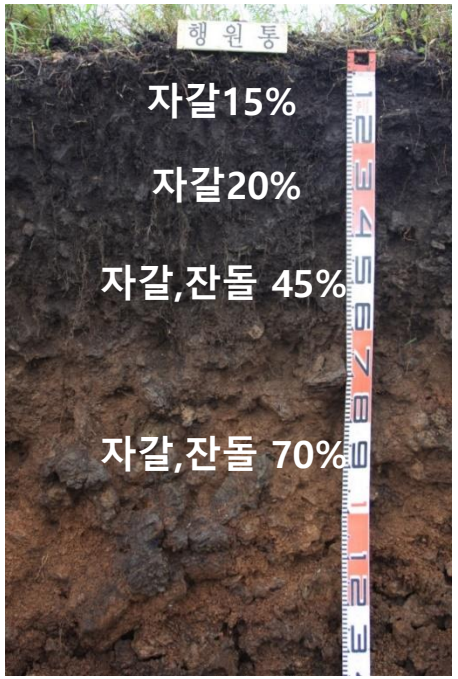
Inceptisols

# 제주 토양 단면

- **제주도 토양통 판별**
  - 흑색토인 경우 50cm를 기준으로 토색 확인
  - 비화산회토 구분시 명도/채도가 3/3이하, 이상(4/4)인지 확인

- **자갈, 돌에 따라 구별(흑색 깊이로 구분 안함.)**

흑색, 돌있음
10YR 2/2

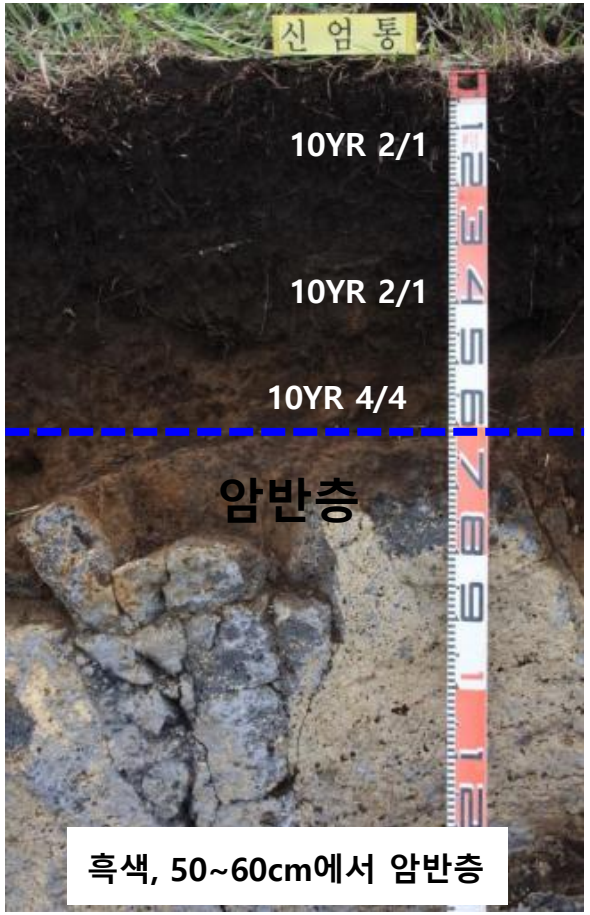



흑색, 자갈(35% 이상)
10YR 2/1

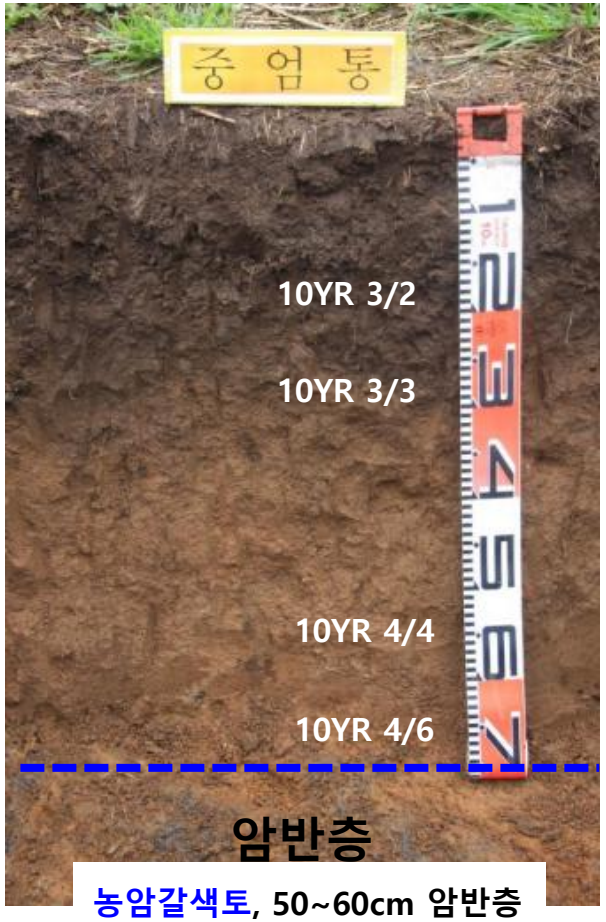
# 제주 토양 단면

- **제주도 토양통 판별**
  - 흑색토인 경우 50cm를 기준으로 토색 확인
  - 비화산회토 구분시 명도/채도가 3/3이하, 이상(4/4)인지 확인

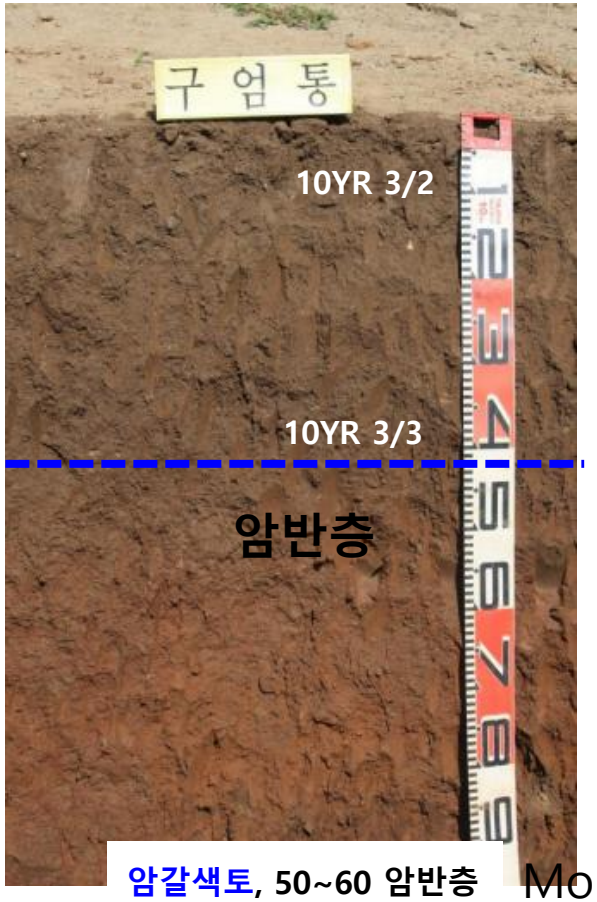
- **토색 및 암반층까지 토양 깊이**



흑색, 50~60cm에서 암반층



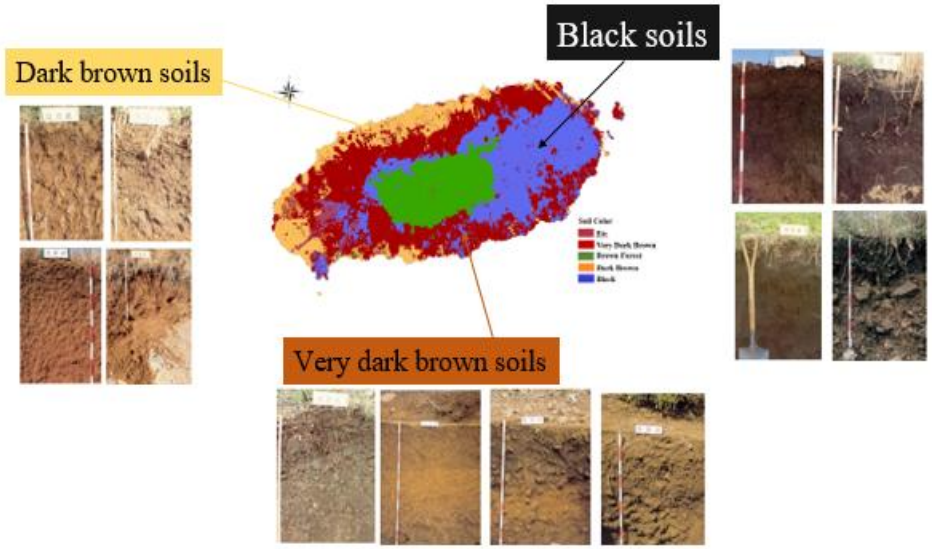
농암갈색토, 50~60cm 암반층

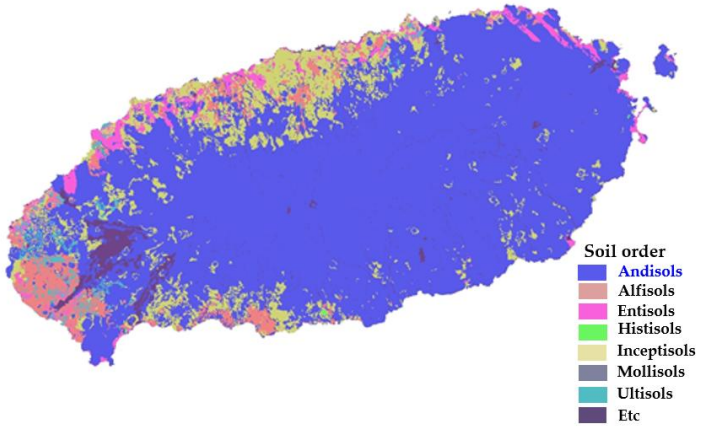


암갈색토, 50~60 암반층 Mollisols

# 제주도 토양의 분포

- 제주는 지역마다 토양색이 다르다.
- 작은 면적에 비해 다양한 토양색과 토양목이 분포




제주섬이 형성과정, 지역적 강수량, 식생 차이가 토양색, 부식 함량 차이를 만든다.

● 제주도 지역별 토양목 분포 (단위: ha)

| 분류 | 화산회토 | 비화산회토 | | | | | | 합계 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 지역 | Andisols (38통) | Histosols (1통) | Ultisols (3통) | Mollisols (11통) | Alfisols (8통) | Inceptisols (3통) | Entisols (2통) | (66통) |
| 제주시 | 65,536 | 0 | 4,644 | 8,763 | 4,631 | 7,630 | 2,651 | 93,855 |
| (비율%) | (69.8) | (-) | (4.9%) | (9.3) | (4.9) | (8.1) | (2.8) | (100) |
| 서귀포시 | 71,819 | 50 | 2,754 | 1,859 | 3,424 | 3,618 | 484 | 84,008 |
| (비율%) | (85.5) | (0.06) | (3.3) | (2.2) | (4.1) | (4.3) | (0.6) | (100) |
| 전체 | 137,355 | 50 | 7,398 | 10,622 | 8,055 | 11,248 | 3,135 | 177,863 |
| (비율%) | (77.2%) | (0.03) | (4.2%) | (6.0) | (4.5) | (6.3) | (1.8) | (100) |

# Andisols의 주요개념

- **화산쇄설물(화산회, 부석, 분석 등)의 풍화과정에서 발달하며, short-range-order (allophane, imogolite, ferrihydrite) 광물질 또는 알루미늄 유기 복합체에 의해 토양 특성이 지배되는 토양**

**Andisol 분류의 두께 기준**

- 상부 **60 cm의 ≥60%**, 즉 **≥36 cm**에서 **andic soil properties**를 가져야 함

※ 60 cm 이내에 제한층이 있는 경우: **표면–제한층 구간의 ≥60%**

● Andic soil properties

➢ 토양이 유기탄소함량이 25%미만이고, 다음 두 조건 중 하나 또는 둘 모두를 충족해야 한다.

**1. a. $Al_o$+½$Fe_o$ ≥ 2.0%, 그리고**

**b. Bulk density(용적밀도) ≤ 0.90 g/cm³, 그리고**

**c. Phosphate retention(인산 보유능) ≥ 85% ; 또는**

**2. 인산 보유능이 25%이상이고, 2mm이하 토양중 최소한 30%가 0.02 ~ 2mm일 때,**

a. $Al_o$+½$Fe_o$≥0.40%이고, 0.02 ~ 2mm 토양의 화산 Glass함량이 최소한 30%여야한다. 또는

b. $Al_o$+½$Fe_o$≥2.0%이고, 0.02 ~ 2mm 토양의 화산 Glass함량이 최소한 5%여야하며, 또는

c. 0.40%≤$Al_o$+½$Fe_o$≤2.0%이면 0.02 ~ 2mm 토양의 화산 Glass함량이 최소한 30 ~ 5%여야한다.

# Al-유기복합체와 Allophane 분석

## ▪ 선택적 추출 특성

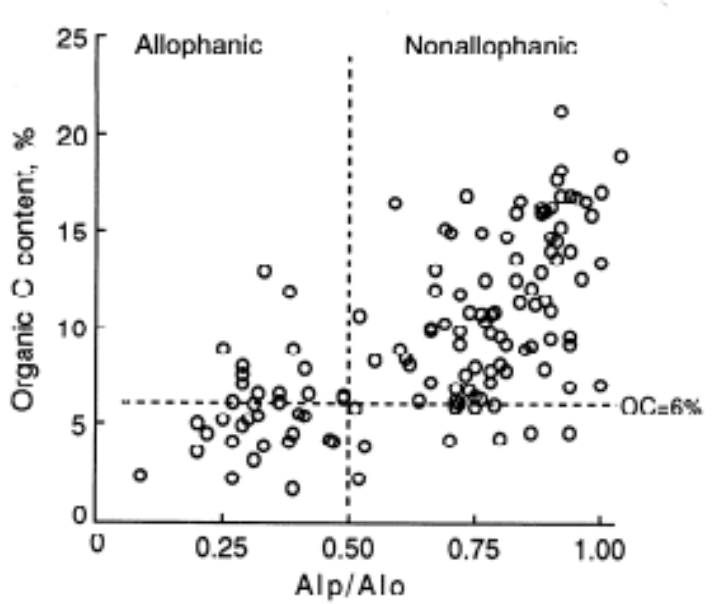
| | |
|---|---|
| **Pyrophosphate Ext.** $Al_p$, $Fe_p$ | Al과 Fe의 유기물과 결합하여 **Al(Fe)-유기복합체**를 형성한 Al, Fe를 선택적으로 추출 |
| **$NH_4$-Oxalate Ext.** $Si_o$, $Al_o$, $Fe_o$ | ▪ **Al(Fe)-유기복합체**, 비결정 수산화물, **Allophane**, Ferrihydrite의 Si, Al, Fe를 선택적으로 추출 (차광 필수)<br>▪ **$Si_o$함량이 6 g $kg^{-1}$ 이하이면 allophane의 존재하지 않는다고 판단** |

▪ **$Al_p/Al_o$비는 Al-유기복합체와 Allophane의 상대적 조성**

- $Al_p/Al_o$ : 0.5이상, Al-유기복합체가 주가 되는 토양(pH 5이하)
- $Al_p/Al_o$ : 0.5미만, Allophane이 주가 되는 토양(pH 5이상)

▪ Allophane 함량은 **$Al_p$, $Al_o$, $Si_o$, 함량으로 계산**(Mizota C. and L. P. van Reeuwijk,1989)

$$Allophane(\%) = \frac{Si_o}{23.4 - 5.1 \times \left(\frac{(Al_o - Al_p)}{Si_o}\right) \times \left(\frac{Al}{Si}\, atomic\ ratio\right)} \times 100$$



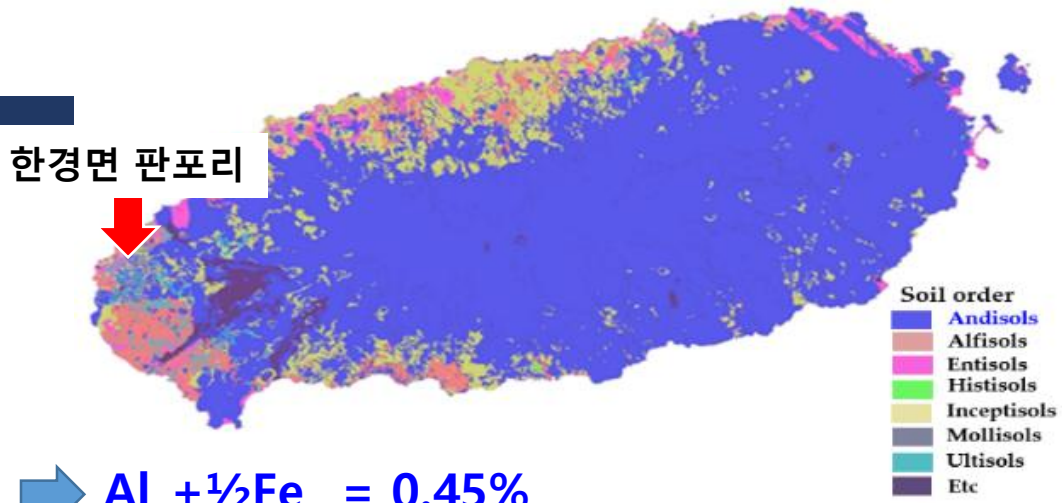

Alp/Alo 값과 유기탄소 함량과의 관계

# 화산성 모재에서 발달한 Alfisol

- 오름 토양: Alfisols(non-Andisols)

**화산회적특성**

| 토층 | 토심 (cm) | 멜라닉 지수 | 인산보유능 (%) | 산성 옥살레이트 침출성 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Al | Fe | Si |
| 표토(A) | 0-14 | | 40.8 | 0.20 | 0.49 | 0.03 |
| 심토1(BA) | 14-35 | | 41.1 | 0.19 | 0.43 | 0.03 |
| 심토2(Bw) | 35-56 | | | | | |
| 심토3(Bt1) | 56-102 | | 48.6 | 0.24 | 0.52 | 0.03 |
| 심토4(Bt2) | 102-200 | | 80.2 | 0.37 | 1.34 | 0.13 |




$Al_o + ½Fe_o$ = 0.45%

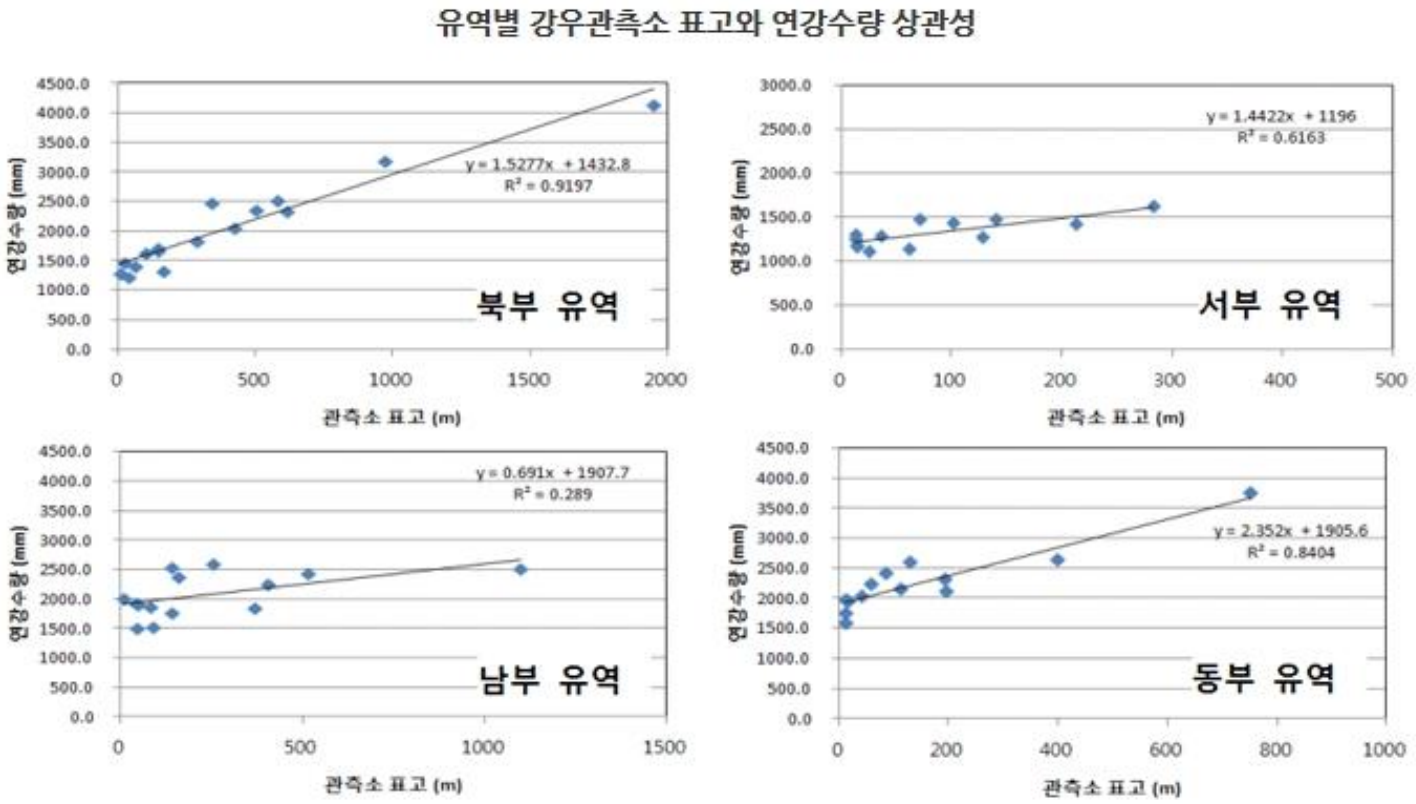
수산통의 토양단면 및 분포지형

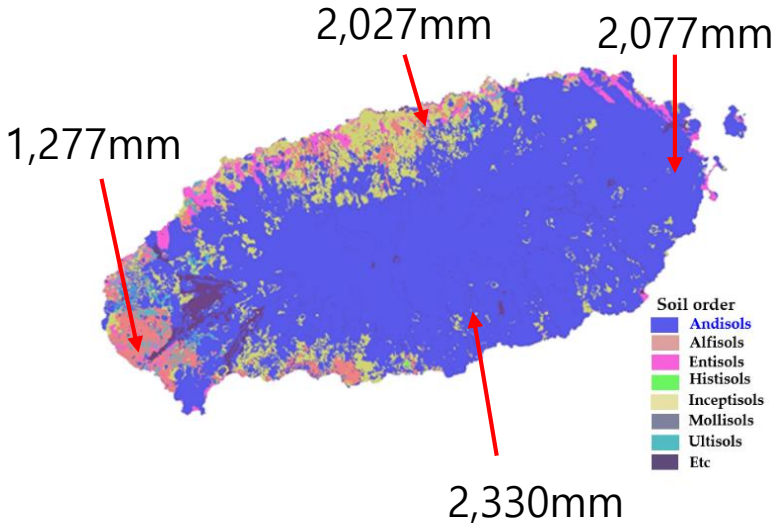
판포오름 분화구

판포오름(널개오름)

# 지역별 강수량 차이(기후인자)가 토양 발달에 영향을 미침

- 고도별 연평균 강수량은 고도가 100m 높아짐에 따라
  - 북부지역은 약 153 mmm, 서부지역은 약 144 mm, 남부지역은 70 mm, 동부지역은 약 235 mm 증가

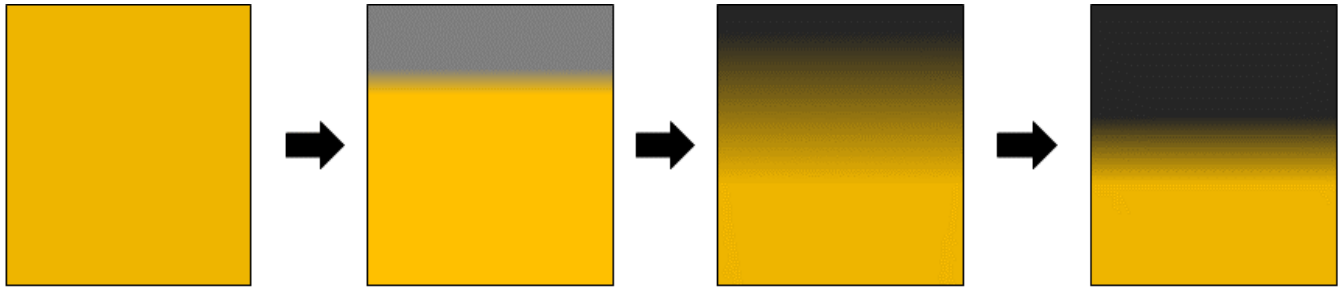


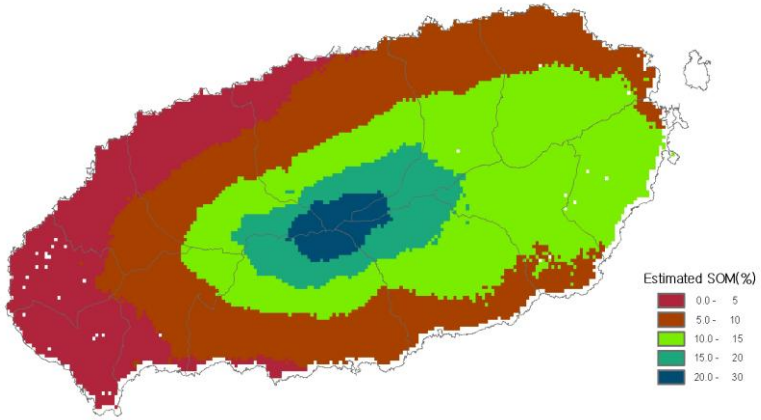




**제주도 지역별 연평균 강수량**

# 제주 화산회토양 생성

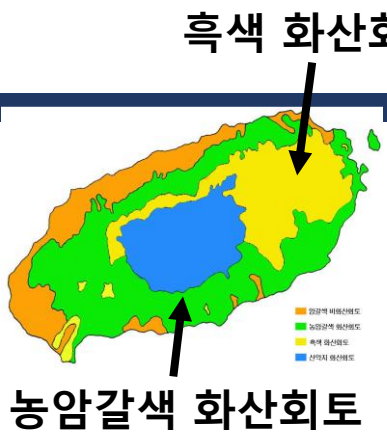
- 화산재 퇴적 후 식생으로부터 유기물이 지속적으로 공급되고, 풍화로 생성된 Al과 유기물이 결합·안정화되면서 유기물이 축적되어 흑색 토양으로 발달



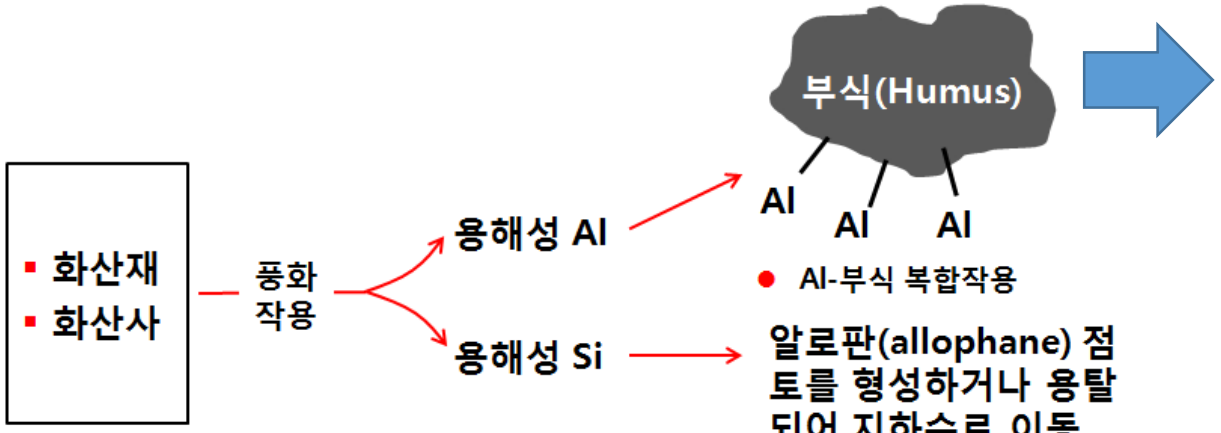

제주도 토양의 유기물 함량 분포

# 화산회 토양의 생성




■ **Al-부식 복합체**, Allophane 점토광물, 지하수 $SiO_2$ 생성 특성

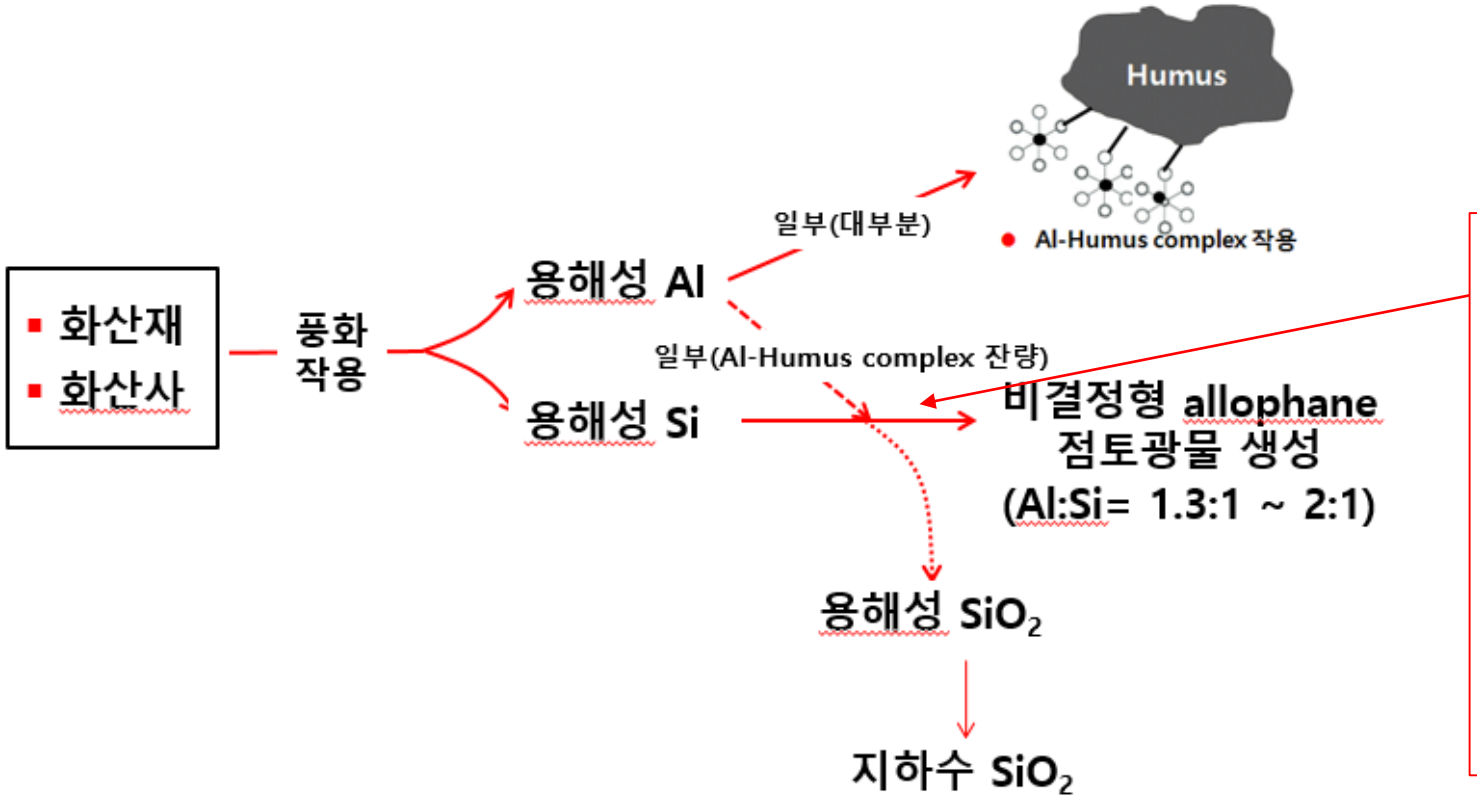
- 화산재 풍화로 방출된 Al이 식생에서 공급된 유기물과 Al–유기복합체를 형성하여 유기물을 안정화하고 축적시킴



# 화산회 토양의 생성

## ■ Al-부식 복합체, Allophane 점토광물, 지하수 $SiO_2$ 생성 특성

- 심토층에서 용해성 Al이 농도가 높아져 중합되고 용해된 Si와 결합하여 비결정형 점토광물인 allophane을 형성하며, 남은 용해성 Si가 토양에 잔존하였다가 빗물에 의해 서서히 지하수로 이동




- 심토로 갈수록 유기물 공급 감소로 Al-유기복합체 형성 감소
- 유기산의 농도가 낮아져 pH는 5.0 이상으로 높아지게 됨
- 토양용액 중 Al 농도 증가, Si가 충분히 존재하는 조건에서는 Al과 Si가 재결합하여 allophane·imogolite 형성
- 강한 Si 용탈 조건에서 gibbsite 등 Al 산화물·수산화물 형성 가능

# 제주 토양의 발달과 유기물 축적 경로

강수량 차이가 Si 거동과 Al의 반응 경로를 바꾸고, 그 결과 토양광물 형성과 유기물 축적 차이가 나타남

**현무암 유래 화산쇄설물**

서북부 ~1,200 mm/yr — **강수량** — 동남부 ~2,500 mm/yr

유기물 공급 상대적으로 적음 — **풍화(용해성 Si, Al)** — 지속적 유기물 공급 상대적으로 많음

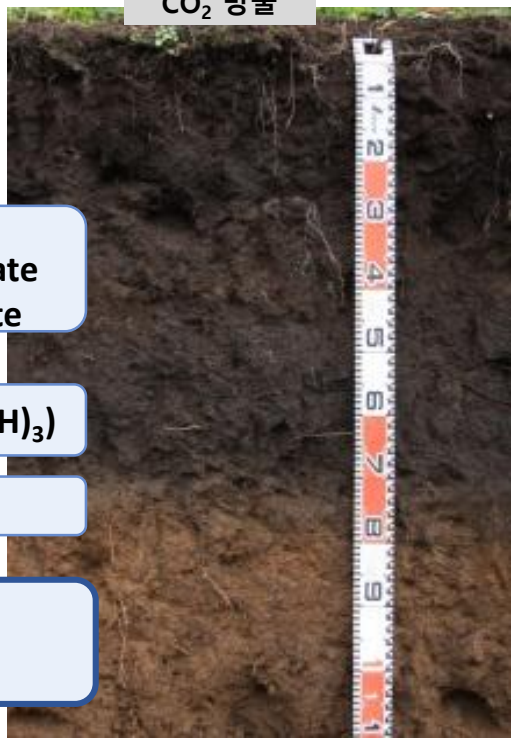
## 서북부 지역 (non-Andisols)

유기물 분해 $CO_2$ 방출

- 강수량 상대적으로 적음
- Si 용탈 약함/ Si 상대적 잔류
- Al + Si 재결합
  결정질 규산염 점토광물 형성
  Secondary crystalline silicate clay minerals, Quartz, kaolinite 등
- 유기물 안정화·보호 상대적으로 약함
- **낮은 유기물 축적**
  **Non-Andisols**

## 동남부 지역 (Andisols)

유기물 분해 $CO_2$ 방출



- 강수량 많음
- 풍화 및 Si 용탈 강함
- Al + 유기물 (Al-유기복합체)
- Al + Si
  Noncrystalline silicate
  Allophane, imogolite
- 탈규산화 -> Gibbsite($Al(OH)_3$)
- 유기물 안정화·보호 증가
- **높은 유기물 축적**
  **Andisols**

# 제주 지역 토양의 광물 조성 변화

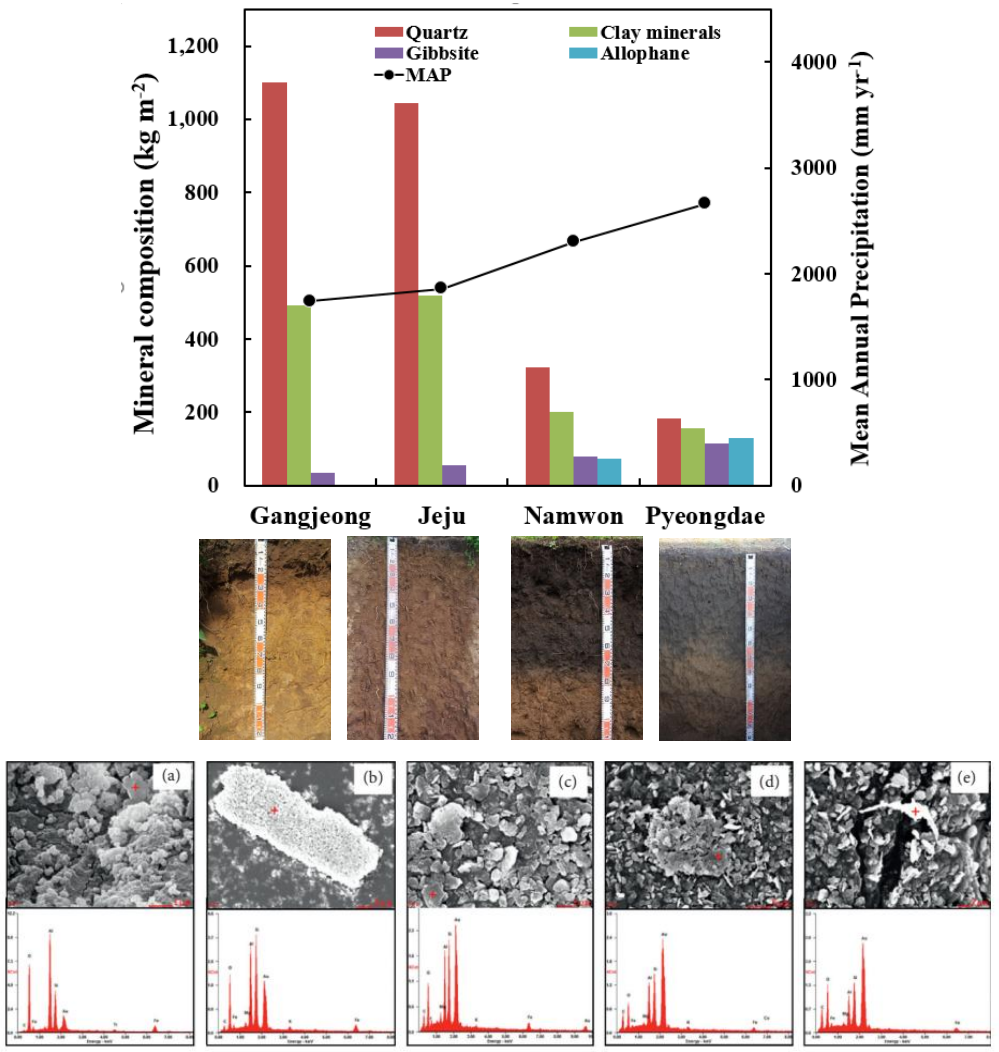
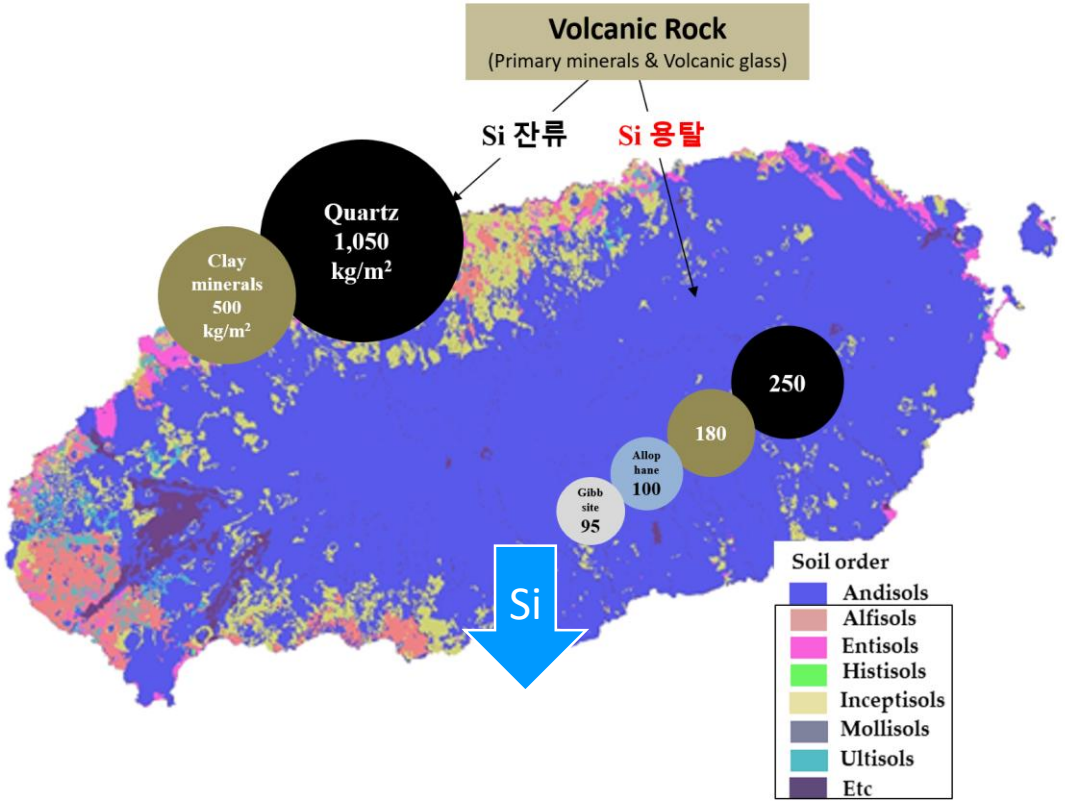



FIGURE 3: SEM/EDS of selected horizons of the profiles less than 2 $\mu$m in particle size. (a) Allophane in Pyeongdae Bw2 horizon; (b) illite; (c) chlorite in Jeju Bt2 horizon; (d) kaolinite and (e) vermiculite in Gangjeong Bt2 horizon.



# 초지(melanic)와 산림(fulvic)식생에 따른 토양 발달

## Melanudands (초지 영향토양)

| | | |
|---|---|---|
| 10YR 2/1 | Munsell color (moist) | 7.5YR 2.5/2 |
| 1.52 | melanic index | 1.82 |

▪ 분석

0.5% NaOH 침출액 흡광도 측정

Melanic index (MI)= 450 nm / 520 nm

▪ Melanic 감식 표층의 주요 요건

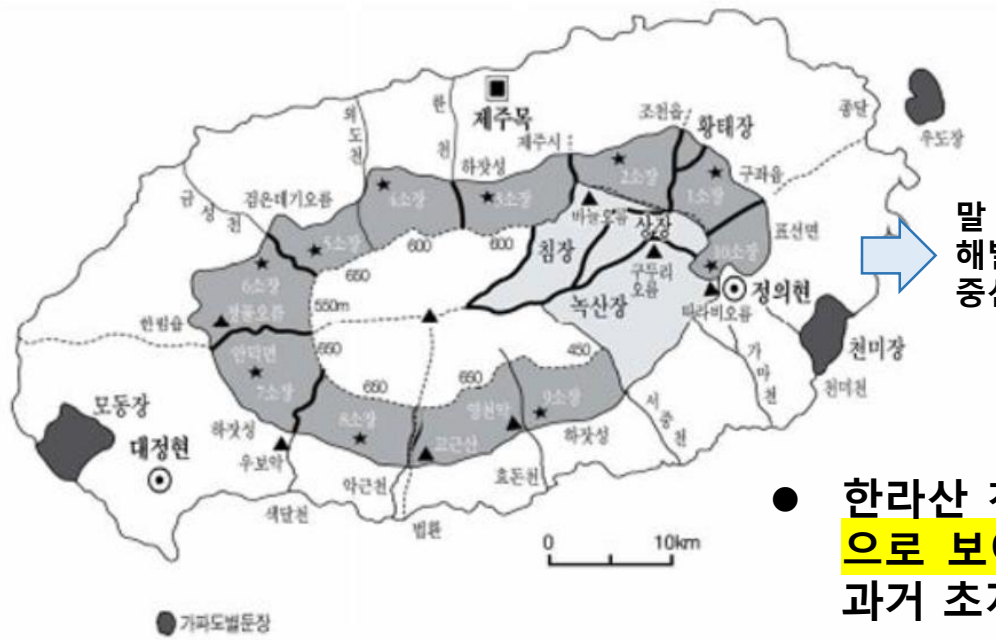
1. Andic 토양 특성을 가지고 있는 유기층의 상부 경계에서 30cm 이내
2. 총 두께 40cm 이내의 누적 두께가 30cm 이상인 층에서
   a. 전체적으로 Andic 토양특성
   b. 습윤 시 명도 및 채도가 2 이하
   c. 전체적으로 1.70 이하의 멜라닉 지수
   d. 유기탄소 6% 이상(가중평균), 모든 층에서 유기탄소 4% 이상

## Fulvudands (산림 영향토양)

▪ Fulvic 표층 특징

1. 유기물 풍부한 andic 표층이지만, melanic color와 지수 기준을 충족하지 않는 표층
2. 멜라닉 지수가 1.7 보다 큼

# 과거 초지 방목 이력이 남긴 melanic 특성



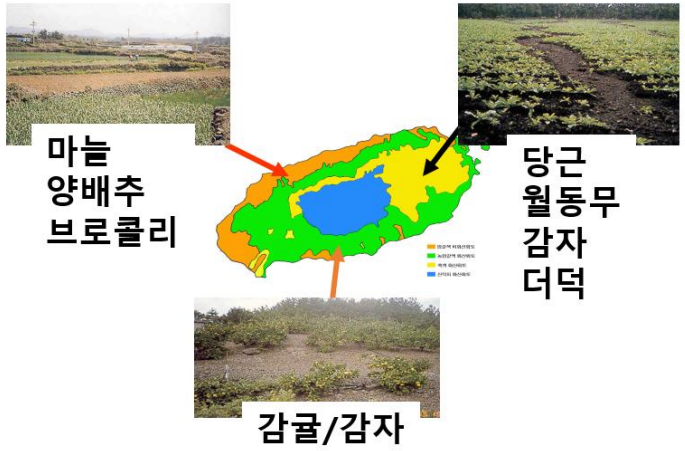

말 방목지
해발 약 200~700 m
중산간 초지

그림 1. 조선후기 제주도 목장의 범위와 분포(강만익, 2016)

5·16도로변 제주마 방목지(해발 650-700m)

- 한라산 천연보호구역 **해발 725 m 이하 지역에 분포하는 토양은 현재 산림으로 보이는 지역에서도** 전 토층의 melanic index가 1.70 이하로 나타나, 과거 초지·방목 이력의 영향을 반영함

# 제주 토양의 이화학적 특성과 농업관리




▪ 제주 토양 표토에서 나타나는 대표적 이화학적 특성

| | Non-Andisols | Andisols | |
|---|---|---|---|
| | | Al-유기복합체 /Allophane | Al-유기복합체 우세 |
| 토색 | 암갈색 | 농암갈색 | 흑색 |
| 유기물함량(%) | 0~5 | 6~11 | 12이상 |
| 양이온교환용량($cmol_c/kg$) | 15이하 | 20~30 | 30이상 |
| 인산보유능(%) | 50이하 | 85이상 | 85이상 |
| 중금속 흡착 | 보통 | 큼 | 매우 큼 |
| 용적밀도($g/cm^3$) | 1.2 | 0.8 | 0.5 |
| 공극률(%) | 50 | 70이상 | 70이상 |
| 수분보유능 | 낮음 | 높음 | 높음 |

● 토양 발달의 차이는 농업적 관리 특성의 차이로 이어진다.

▪ 유기물·CEC 차이 → 양분 보유·공급능 및 시비관리 차이

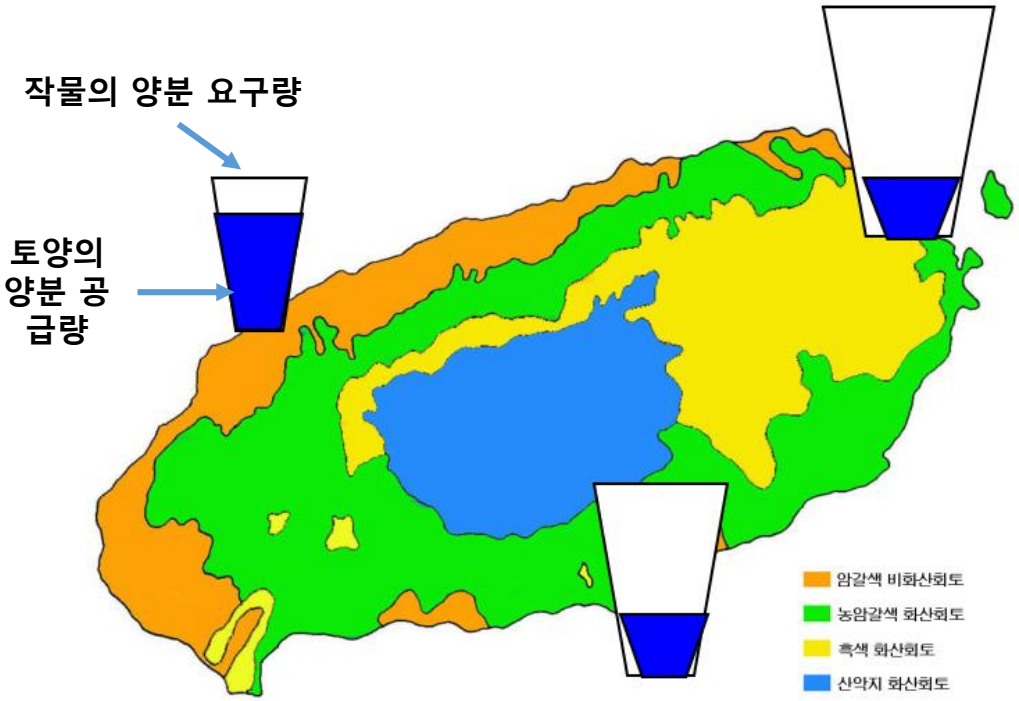
▪ 높은 인산 흡착 → 인산비료 이용효율 및 시비관리 차이

▪ 용적밀도·공극률·수분보유능 차이 → 물관리 차이

➢ 토양의 생성·광물학적 차이가 양분 보유, 인산 반응 및 수분 특성을 달리하므로 토양별 농업 관리가 필요함

# 제주 토양의 양분관리

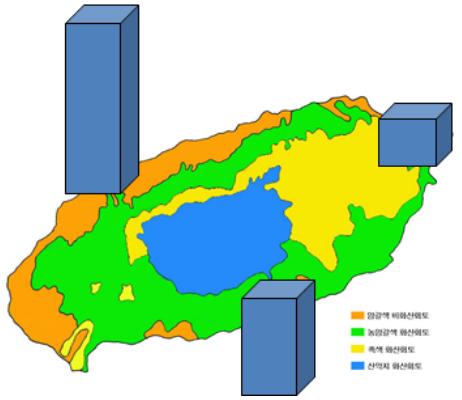
## 무기질 비료가 없는 조건에서의 비료요구량 (토양의 양분 공급 능력을 반영)




- 과거 동부 흑색 화산회토는 낮은 자연 비옥도와 강한 인산고정 등으로 작물 재배가 어려웠음
- 보리 재배가 어려워 피 등 상대적으로 척박한 토양에 적응하는 작물이 재배됨

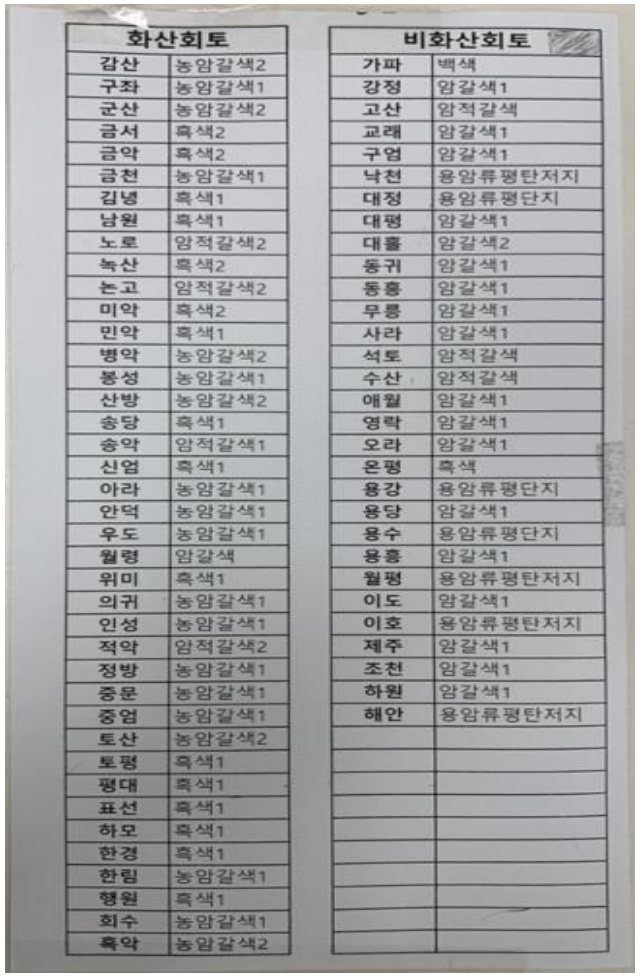
**과거의 상대적인 토지생산성**

일제 강점기 때 자료



- 암갈색 비화산회토: 10가마
- 농암갈색 화산회토: 6~7가마
- 흑색 화산회토: 4~5가마

# 제주 토양의 양분관리



| 화산회토 | |
|---|---|
| 감산 | 농암갈색2 |
| 구좌 | 농암갈색1 |
| 군산 | 농암갈색2 |
| 금서 | 흑색2 |
| 금악 | 흑색2 |
| 금천 | 농암갈색1 |
| 김녕 | 흑색1 |
| 남원 | 흑색1 |
| 노로 | 암적갈색2 |
| 녹산 | 흑색2 |
| 논고 | 암적갈색2 |
| 미악 | 흑색2 |
| 민악 | 흑색1 |
| 병악 | 농암갈색2 |
| 봉성 | 농암갈색1 |
| 산방 | 농암갈색2 |
| 송당 | 흑색1 |
| 송악 | 암적갈색1 |
| 신엄 | 흑색1 |
| 아라 | 농암갈색1 |
| 안덕 | 농암갈색1 |
| 우도 | 농암갈색1 |
| 월령 | 암갈색 |
| 위미 | 흑색1 |
| 의귀 | 농암갈색1 |
| 인성 | 농암갈색1 |
| 적악 | 암적갈색2 |
| 정방 | 농암갈색1 |
| 중문 | 농암갈색1 |
| 중엄 | 농암갈색1 |
| 토산 | 농암갈색2 |
| 토평 | 흑색1 |
| 평대 | 흑색1 |
| 표선 | 흑색1 |
| 하모 | 흑색1 |
| 한경 | 흑색1 |
| 한림 | 농암갈색1 |
| 행원 | 흑색1 |
| 회수 | 농암갈색1 |
| 흑악 | 농암갈색2 |

| 비화산회토 | |
|---|---|
| 가파 | 백색 |
| 강정 | 암갈색1 |
| 고산 | 암적갈색 |
| 교래 | 암갈색1 |
| 구엄 | 암갈색1 |
| 낙천 | 용암류평탄저지 |
| 대정 | 용암류평단지 |
| 대평 | 암갈색1 |
| 대흘 | 암갈색2 |
| 동귀 | 암갈색1 |
| 동흥 | 암갈색1 |
| 무릉 | 암갈색1 |
| 사라 | 암갈색1 |
| 석토 | 암적갈색 |
| 수산 | 암적갈색 |
| 애월 | 암갈색1 |
| 영락 | 암갈색1 |
| 오라 | 암갈색1 |
| 온평 | 흑색 |
| 용강 | 용암류평단지 |
| 용당 | 암갈색1 |
| 용수 | 용암류평단지 |
| 용흥 | 암갈색1 |
| 월평 | 용암류평탄저지 |
| 이도 | 암갈색1 |
| 이호 | 용암류평탄저지 |
| 제주 | 암갈색1 |
| 조천 | 암갈색1 |
| 하원 | 암갈색1 |
| 해안 | 용암류평탄저지 |

- **비료사용 처방서 발급시**
  - ▪지번을 입력하면 토양환경지도의 **토양통 자료 근거로** 화산회토양과 비화산회토양을 구분하여 작물별 비료 시비량이 결정

### 6) 화산회토, 비화산회토 처방

○ 국립농업과학원과 제주도농업기술원에 수행한 시험연구사업 결과 및 영농정보를 수집하였음

**화산회토, 비화산회토 비료량 설정 작물**

밭벼, 보리, 메밀, 대두, 땅콩, 유채, 감자, 고구마, 당근, 무, 콜라비, 양파, 마늘, 배추, 양배추, 방울다다기양배추, 브로콜리, 감귤, 유자, 참다래, 더덕

# 제주 토양의 양분관리 어려움

- 대정, 한림, 한경, 애월, 조천, 강정 지역은 비화산회토양과 화산회토양이 혼재된 지역이 많음.
- 토양환경지도 정보가 **필지별 토양통과 일치하지 않는 필지가 상당수 존재 할 수 있음**

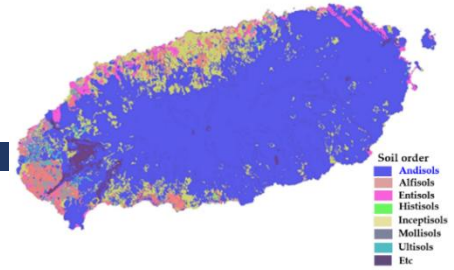
<한경면 지역 토양 목>

- 작물별 시비처방기준의 비료 사용량은 화산/비화산회토양으로 구분하여 관리되고 있음.
- **필지별 토양을 두 토양의 유형으로 분류할 필요가 있음.**

**필지별 토양이 화산/비화산회 토양이 같이 존재함.**

화산회토양(구좌통) | 비화산회토양(구엄통) | 비화산회토양(하원통) | 비화산회토양(대정통), 표토 화산회토

# 제주 토양의 양분관리의 어려움




- $Al_o+1/2Fe_o$ 함량에 따른 동일 필지(90지점)내 화산회토양과 비화산회토양 구분

| 분류 | | 화산회토(Andisols) | | | 비화산회토(Non-Andisols) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 지역 | | 흙토람 (지점) | $Al_o+1/2Fe_o$ 함량 기준 | | 흙토람 (지점) | $Al_o+1/2Fe_o$ 함량 기준 | |
| | | | 화산 | 비화산 | | 화산 | 비화산 |
| 한경면 | 고산리 | 19 | 1 | 18 | 19 | 3 | 16 |
| 한경면 | 낙천리 | 5 | 0 | 5 | 6 | 1 | 5 |
| 한경면 | 두모리 | 4 | 0 | 4 | 4 | 0 | 4 |
| 한경면 | 용수리 | 8 | 0 | 8 | 9 | 0 | 9 |
| 한경면 | 조수리 | 2 | 0 | 2 | 2 | 0 | 2 |
| 한경면 | 판포리 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 한경면 | 청수리 | 6 | 0 | 6 | 7 | 0 | 7 |
| 한림읍 | 동명리 | 7 | 2 | 5 | 8 | 2 | 6 |
| 한림읍 | 상대리 | 5 | 2 | 3 | 5 | 0 | 5 |
| 한림읍 | 한림리 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 한림읍 | 명월리 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 한림읍 | 귀덕리 | 2 | 0 | 2 | 2 | 0 | 2 |
| 애월읍 | 봉성리 | 11 | 2 | 9 | 11 | 0 | 11 |
| 제주시 | | 62 | 6 | 56 | 66 | 7 | 59 |
| 대정읍 | 보성리 | 5 | 1 | 4 | 5 | 1 | 4 |
| 대정읍 | 구억리 | 4 | 1 | 3 | 4 | 2 | 2 |
| 대정읍 | 안성리 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 대정읍 | 인성리 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 대정읍 | 신평리 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0 | 2 |
| 대정읍 | 신도리 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 대정읍 | 무릉리 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 서귀포시 | | 78 | 11 | 67 | 82 | 12 | 70 |
| **합계** | | **90** | **13 (14.4%)** | **77 (85.6%)** | **94** | **13** | **81** |

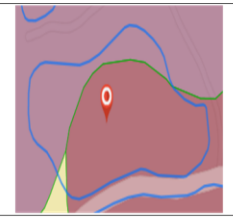
- **정확한 시비처방을 위해 필지별 실제 토양 특성에 근거한 화산회토·비화산회토 구분이 필요함**

가. 한경면

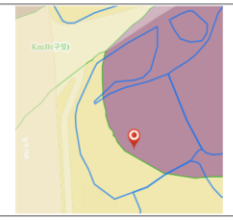
1. 고산리

| 한경면 고산리 1021-1 | | |
|---|---|---|
| 목 | Inceptisols | Andisols |
| 통 | 구엄 | 구좌 |
| 유기물(%) | 2.24 | 1.76 |
| Alo+1/2Feo(%) | 0.87 | 0.92 |
| NaF | 8.43 | 9.87 |

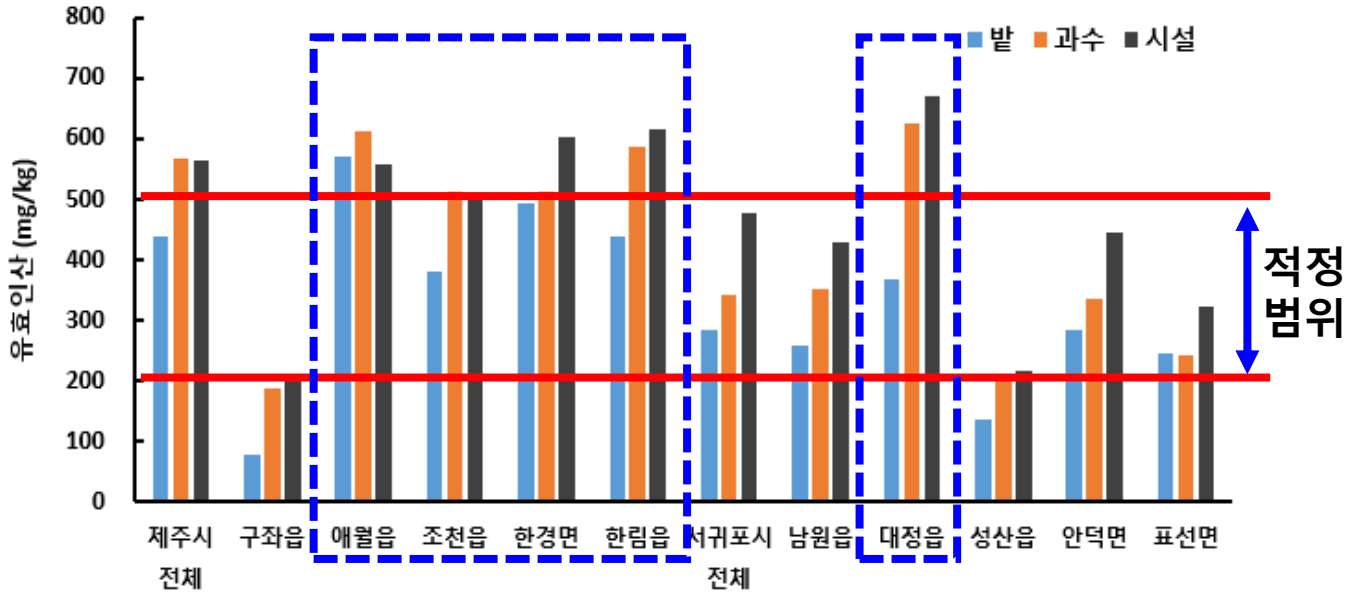
| 한경면 고산리 1377-2 | | |
|---|---|---|
| 목 | Ultisols | Andisols |
| 통 | 하원 | 구좌 |
| 유기물(%) | 1.98 | 2.21 |
| Alo+1/2Feo(%) | 1.09 | 1.16 |
| NaF | 8.03 | 9.5 |

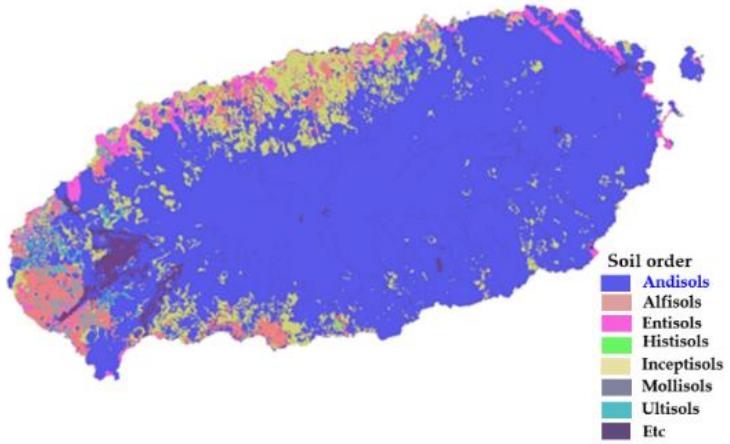


| 한경면 고산리 2082-5 | | |
|---|---|---|
| 목 | Inceptisols | Andisols |
| 통 | 구엄 | 구좌 |
| 유기물(%) | 2.56 | 1.89 |
| Alo+1/2Feo(%) | 1.01 | 0.89 |
| NaF | 8.28 | 9.91 |



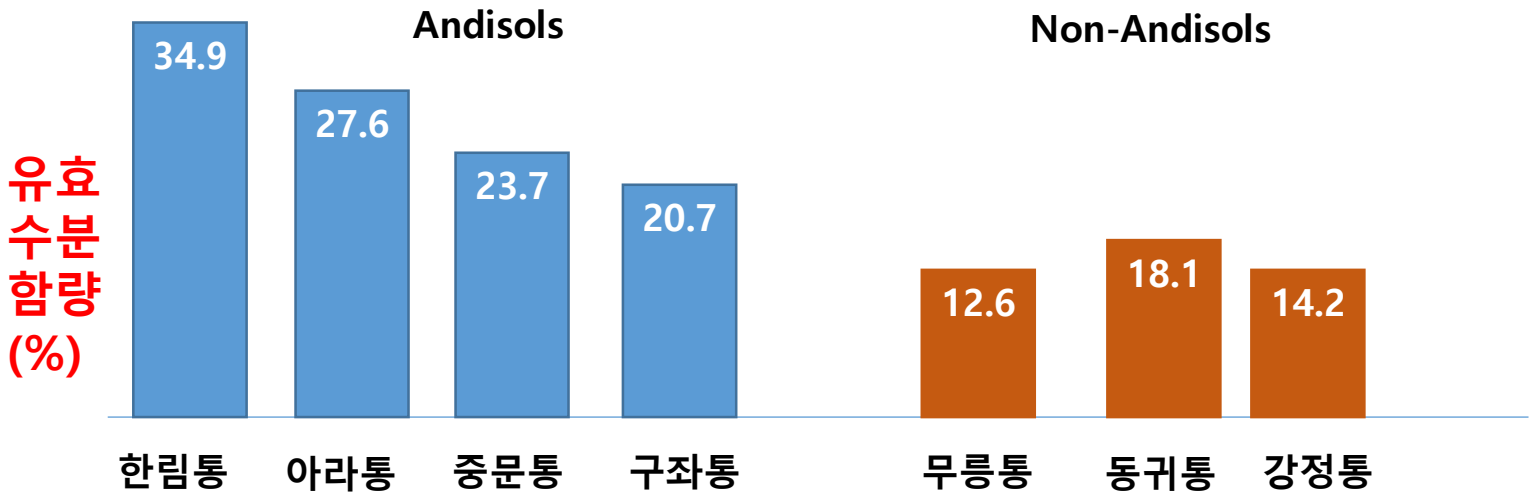
# 지역별 토양의 유효인산 함량




인산 고정 작용이 없는 **비화산회토양** 지역에서 복합비료(21-17-17) 과다 사용으로 **유효인산 과다 집적**

# 지역별 토양의 물관리

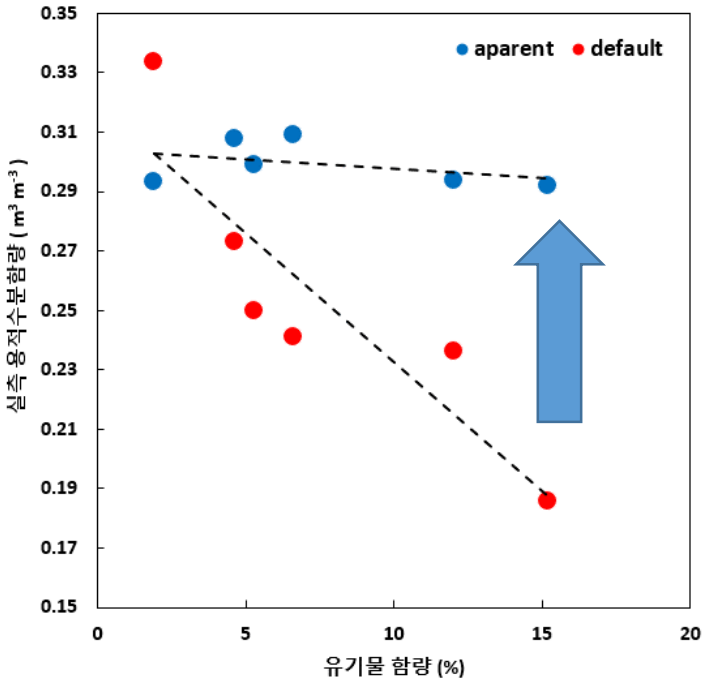


타이벡 이용 수분관리

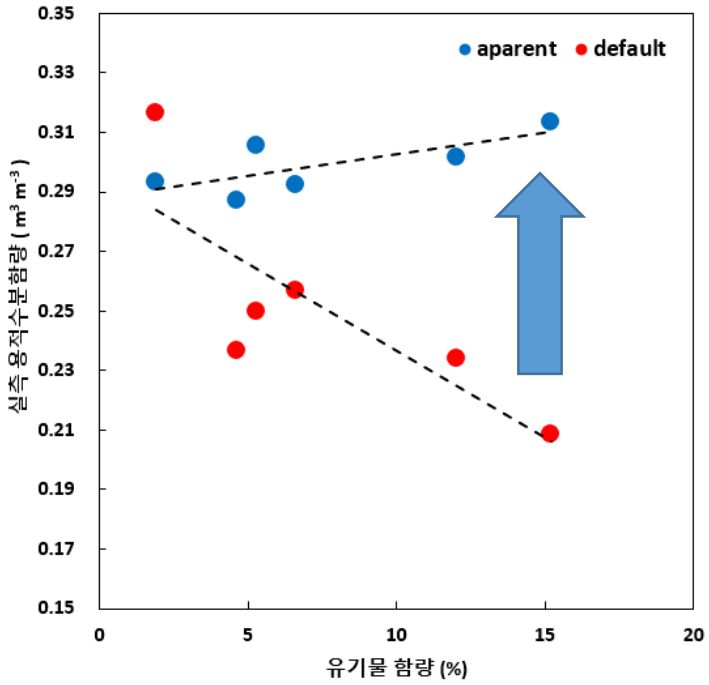
- **토양에 따른 감귤 당도 관리**
  - **유효수분함량 차이:** 화산회토양(Andisols) 약 30% 내외, 비화산회토양(non-Andisols) 약 15% 내외
  - 화산회토양(Andisols): 수분보유능 높음 → 수분스트레스 유도 어려움 → 타이벡 시기 조절 필요
  - non-Andisols: 수분보유능 낮음 → 수분스트레스 빠름
  - **타이벡 덮는 시기:** 토양에 따라 6월 중순~8월 중순까지 타이백 덮는 시기를 조절

# 제주토양에서 유기물함량별 토양수분센서 보정

- 용적수분함량 30%수준에서 유기물함량별 제조사 기본 보정식과 교정된 보정식을 적용한 용적수분함량 비교

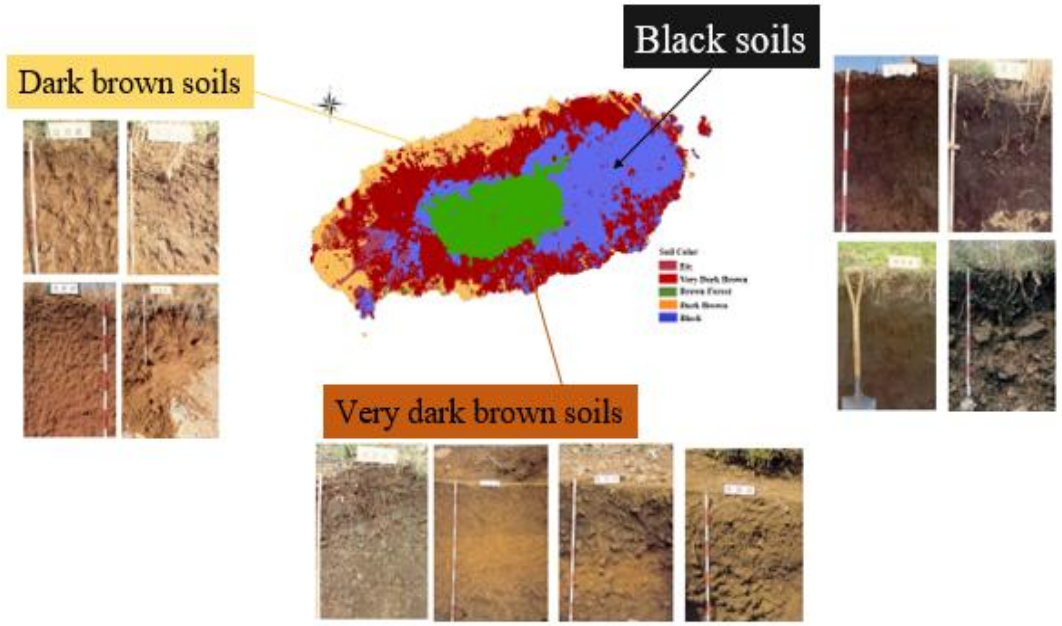



<TEROS 10>




<TEROS 12>

- 필지별 수분 관리 위해서는 수분센서 보정이 필수임
- 유기물 함량이 높을수록 교정된 보정식을 사용할 경우 센서의 정확도가 TEROS 10 과 12 센서에서 각각 66~98%와 48~92% 향상

## 마무리 :

- 제주 토양은 생성·광물학적 특성이 지역별로 다르다.
- 이 차이는 양분 보유, 인산 반응, 수분 보유능 차이로 이어진다.
- 따라서 제주 농업에서는 토양 특성에 기반한 맞춤형 양분·수분 관리가 필요하다.