

## 무기 결합재의 처리가 간척지 토양의 입단형성에 끼치는 영향

### Effect of Inorganic Cementing Agents on Soil Aggregate Formation in Reclaimed Tidelands

손재권\* · 최진규\* · 조재영\*\*†

Son, Jae Gwon\* · Choi, Jin Kyu\* · Cho, Jae Young\*\*†

#### ABSTRACT

Soil aggregation is an important part of influencing the soil behaviors in reducing rainfall-runoff and soil erosion, aeration, infiltration, and root penetration. Some inorganic materials such as clay minerals, Fe and Al oxides/hydroxides, and calcium carbonate can act as cementing agents within macroaggregates. The objective of this study was to determine the effects of different cementing agents (Fe, Mn, and Al) on soil aggregate formation in reclaimed tidelands. Water stable aggregate ratio and MWD (mean weight diameter) were higher in iron dioxides treatment than two other treatments. This result indicates significant correlation between soil aggregate formation and iron dioxides.

**Keywords:** Inorganic cementing agents; iron; manganese; reclaimed tidelands; silicon; soil aggregate

#### 1. 서 론

우리나라에서 간척사업이 이루어지기 시작한 것은 오래된 일이지만, 간척지 토양과 관련된 본격적인 연구는 1960년대부터 시작되었다. 지금까지 국내에서는 간척지토양을 토양 생성론적인 견지에서 작물생산력이 낮은 특수토양의 일부로 규정하여 방치하여 둔 면이 없지 않다. 이러한 과정에서 간척사업으로 확보된 우량 농경지의 효율적인 이용이 거의 이루어지지 않은 상태이다 (RDA, 2006).

우리나라 간척지 토양의 토성은 세립질 또는 조립세립질로 되어 있으며, 이들 간척지 토양은 모두 지하수위가 높아 토양 배수가 불량하고 건조시 염분이 작토층으로 상승하는 재염화현상이 반복적으로 발생하고 있다. 특히 세립질 토양에서 토양구조가 발달되지 않은 간척지는 수직배수가 불량하고 연약지반을

형성하게 되고, 조립질 토양은 토층의 경반화로 수년간 이양작업이 곤란 내지 불가능한 경우도 있다 (KARICO, 2002). 따라서 이들 신간척지에서의 제염은 물론 물리성 개선을 위한 다양한 연구가 수행되어야 할 것이다.

토양입단은 토양중에서 침투, 통기성, 뿌리발달과 토양침식 그리고 유거를 저감시키기 때문에 토양관리에 매우 중요한 부분을 담당하고 있다. 일반적으로 토양입단의 파괴는 연속적인 경운시스템에서 기인하게 된다. 그러나 피복작물의 윤작체계하에서 토양입단의 형성이 촉진되기도 하는 것으로 알려져 있다. 그 밖에 점토입자, 철과 알루미늄, 탄산칼슘과 같은 무기물질이 거대 입단 형성에 필요한 결합제로 작용하는 것으로 보고되고 있다 (Baral et al., 1998). 무기물질 뿐만 아니라 수많은 미생물들의 생성물. 예를 들어 자연적인 고분자 물질인 polysaccharide, hemicellulose 또는 uronide 등이 양이온 가교, 수소결합, 반데르발스 결합 그리고 음이온 흡착을 통해 입단형성에 기여하는 것으로 알려지고 있다 (El-Swaify and Emerson, 1975).

이에 본 연구에서는 무기 결합제로 작용하여 토양입단의 형성을 촉진시킬 수 있는 망간, 철 그리고 알루미늄 처리가 간척지 토양의 입단형성에 어느 정도 기여하는 가를 조사하였다. 이 같은 연구결과는 간척지와 같은 특수토양의 물리적 특성 개량과 효율적인 토양관리 시스템 구축에 활용될 수 있을 것이다.

\* 전북대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

\*\* 전북대학교 농업생명과학대학 생물환경화학학과

† Corresponding author. Tel.: +82-63-270-2547

Fax: +82-63-270-2550

E-mail address: soilcosmos@chonbuk.ac.kr

2009년 7월 2일 투고

2009년 7월 21일 심사완료

2009년 7월 24일 게재확정

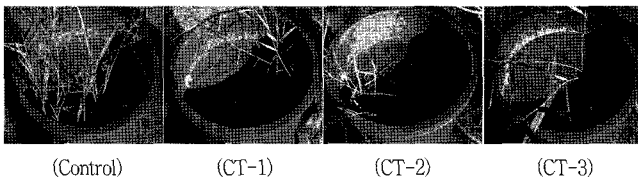
## II. 재료 및 방법

### 1. 실험구 처리

본 연구에 사용된 무기 결합재는 철 ( $Fe_2O_3$ ), 알루미늄 ( $Al_2O_3$ ) 그리고 망간 ( $MnO_2$ )이며 모두 산화물 형태이다. 이들 무기 결합재를 단독으로 토양 표면에 처리후 30 cm 토심까지 잘 혼합하였다. 현재 개발중인 우리나라 새만금 간척 예정지 토양을 대상으로 2005년 3월부터 2008년 2월까지 총 3년 동안 연구가 진행되었다. 라이시미터 시험구는 대조구를 포함하여 총 10조로 구성하였다 (3처리 × 3반복). 2005년 3월에 실험토양을 라이시미터 (0.16 m<sup>2</sup>)에 균일하게 100 kg씩 충전한 다음, 관개수를 공급하여 1개월 동안 토양내 공극이 치밀하게 채워지도록 하였다. 그 후 수세법에 의한 제염작업을 수행하여 토양의 염류농도가 2 dS/m 수준이 유지되도록 하였다. 본 처리구는 별도의 작물재배나 토양관리를 수행하지 않은 상태에서 무기 결합재 처리 후 3개월에 1회씩 정기적으로 30 cm 깊이로 산화-환원층 변경 작업만 수행하였다.

Table 1 Inorganic cementing agents treatments

Treatment	Application rates (kg/10a)			Code
	1st year	2nd year	3rd year	
$Al_2O_3$	5	5	7.5	CT-1
$MnO_2$	5	5	7.5	CT-2
$Fe_2O_3$	5	5	7.5	CT-3



### 2. 토양의 물리·화학적 특성 분석

토양 pH는 토양과 증류수를 1:5의 비율로 현탁액을 만들어 2시간 왕복진탕 시킨 후 pH-meter (TOA HM 20-S)를 사용하여 측정하였으며, 전기전도도는 25℃에서 포화추출액을 전기전도도계 (LF-520)를 이용하여 측정하였으며, 양이온교환용량은 1N-NH<sub>4</sub>OAc (pH: 7.0)을 이용한 침출법, 토성은 USDA 삼각분류법을 기준으로 하였다. 교환성 양이온은 1N-NH<sub>4</sub>OAc (pH: 7.0)을 이용하여 침출한 후 원자흡수분광광도계 (Perkin elmer 2380)로 측정하였다. 내수성 토양입단 분석은 습식체별법 (wet-sieving method)에 의해 수행하였으며, 사용된 토양체의 직경은 2.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.1 mm였다. 토양시료 30 g을 Yoder-type의 입단분석장치에 넣고 30분간 일정한 속도로 수

직강하시켰다. 체분리가 끝난 토양시료를 페트리디시에 옮긴후 105℃에서 12시간 건조시켜서 무게를 측정하여 각각의 입단 크기별 분포량을 계산하였다. 간척지 토양의 입단크기의 분포는 평균중량지름 (mean weight diameter)을 이용하여 비교하였으며, 평균중량지름 X는 식 (1)과 같다 (Son et al., 2005).

$$X = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i \quad (1)$$

여기에서  $x_i$ 는 체에 의해 분리된 입단들의 어느 일정한 크기 범위의 평균지름이고,  $w_i$ 는 분석된 시료의 전체 건물 중의 한 부분으로서 바로 그 크기범위의 입단들의 질량을 나타내고 있다.

처리 전 실험토양은 모래 23.4%, 미사토 70.2%, 점토 6.4%의 미사질 양토 (silt loam, SiL)였으며, 토양 pH 7.22, 전기전도도 21.4 dS/m, CEC 8.02 cmol(+)/kg, 유기물 함량 1.34%로 나타났다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 무기 결합재 처리에 따른 신간척지 토양의 입단화도

2005년 3월에 철, 알루미늄 그리고 망간 산화물을 간척지 토양에 처리한 후 2008년 2월에 토양을 채취하여 내수성 입단화도를 조사한 결과는 다음과 같다. 무처리구는 3.45%에서 3년 후 4.66%로 증가하는데 그친 반면에, CT-1 (알루미늄 산화물) 9.90%, CT-2 (망간 산화물) 9.35% 그리고 CT-3 (철 산화물) 12.35%를 나타내었다 (Fig. 1). 처리대상 3가지 무기 결합재 가운데 철 산화물의 처리가 간척지 토양의 입단화도에 가장 크게 기여한 것으로 조사되었다.

철과 알루미늄은 음으로 하전된 유기물과 점토광물을 연결시키는 주요 양이온으로 작용할 것이다. 알루미늄과 철 산화물은 점토의 분산과 팽윤 그리고 임계 응집농도를 감소시킴으로써 점토광물을 안정화시킬 수 있을 것으로 판단된다. 알루미늄과 철 산화물의 점토광물과의 상호작용은 pH 의존적이다. pH가 낮을 때, 알루미늄과 철 산화물은 점토광물의 표면에 침전이 될 것이고, pH가 높아질때 안정화 될 것으로 추정된다. 본 연구에서 사용된 토양의 pH가 알칼리성을 띠고 있으므로 철과 알루미늄의 산화물과 토양 입단화에 긍정적으로 작용하였을 것으로 추정된다.

철산화물이 토양 입단화에 긍정적인 영향을 끼치는지, 아무런 영향도 끼치지 못하는지에 대해 지금까지 여러 연구자들 사이에서 많은 논란이 되고 있다. 이는 토양중에 분포하는 철 산화

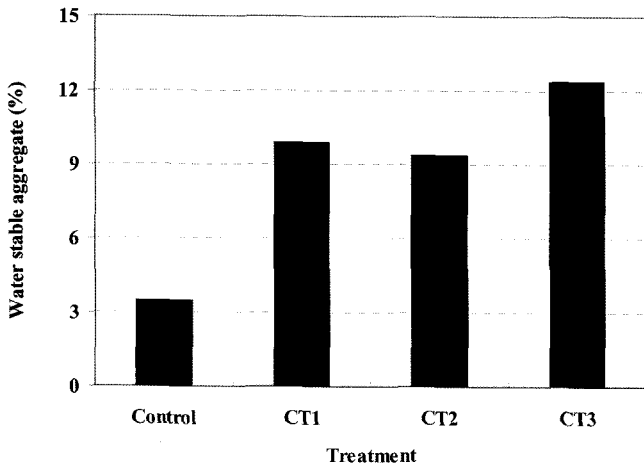


Fig. 1 Aggregation ratio of soils in reclaimed tidelands by inorganic cementing agents treatments

물의 존재형태와 양 그리고 토양 환경과 속성이 서로 다양하기 때문이다 (Schwertmann and Taylor, 1989). 먼저, 철 산화물이 토양 입단화에 아무런 영향을 끼치지 못한다는 주장은 Greenland et al. (1968) 그리고 Deshpande et al. (1968)에 의해 오래 전부터 제기되어 왔다. 이러한 주장은 토양이 오랫동안 풍화와 산화가 진행될 경우, 그 토양은 자유 철 산화물 (free iron oxide)을 다량 함유하게 되겠지만, 상대적으로 활성철 (active iron)의 함량이 감소하게 되기 때문이라는 것이다. Deshpande et al. (1968)의 연구에 의하면, 토양 중 철의 처리량이 15 %까지 증가하여도 토양입단의 발달이 전혀 개선되지 않았는데 이는 철 산화물이 토양내에서 자유 입자 (free particles) 또는 독립된 형태로 존재하였기 때문이라고 하였다.

그러나, Greenland et al. (1968) 그리고 Deshpande et al. (1968)의 주장과는 반대로 철 산화물이 토양입단화에 매우 유용하게 작용한다는 주장도 많은 설득력을 가지고 있다 (Schwertmann and Taylor, 1989). 대표적으로, Arca and Weed (1966), Krishna Murthi and Huang (1987)에 의하면, 내수성입단의 백분율과 철산화물간에 유의성 있는 상관관계가 나타났으며, Fordham and Noorish (1983) 그리고 Kitagawa (1983)의 연구에 의하면, 전자광학현미경을 이용하여 kaolinite 판상면에 철 산화물이 퇴적되어 있음을 확인하였는데 이러한 결과는 철 산화물이 토양 입단화도와 직접 관련이 있다고 하였다. 그 밖에도 McNeal et al. (1968)에 의하면, 환원제를 가지고 철산화물을 제거하였을 때 토양의 분산율이 증가하였으며, Blackmore (1973)과 Barral et al. (1998)에 의하면, 합성 철산화물을 토양에 처리시 토양의 입단화도가 현저히 증가하였음을 보고하였다.

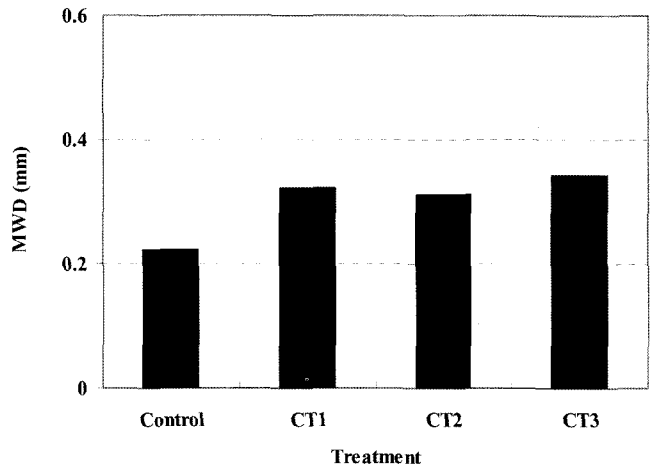


Fig. 2 Mean weight diameter (MWD) of soils in newly reclaimed tidelands by inorganic cementing agents treatments

## 2. 무기 결합재 처리에 따른 신간척지 토양의 입단 평균중량지름 (MWD)

토양 입단의 평균중량지름 (MWD)는 입단화도와는 별개의 의미로 형성된 입단의 크기를 비교하는 지표로 이용되고 있다. 3년 동안 3개월에 1회씩 토양의 산화-환원층 교환작업을 수행한 후 실험 대상 토양의 평균중량지름을 조사한 결과는 Fig. 2에 나타나 있다. 대조구 MWD 0.22 mm, CT-1 0.32 mm, CT-2 0.31 mm 그리고 CT-3 0.34 mm를 나타내었다. 각각의 무기 결합재 처리가 대조구에 비해 토양 입단의 크기를 증가시켰지만, 철, 망간 그리고 알루미늄 산화물 간에는 별다른 차이를 나타내지 않았다.

## 3. 무기 결합재 처리에 따른 신간척지 토양의 입단 크기별 분포

습식체별법에 의해 크기별 입단의 입단화도와 MWD를 산출한 다음 입단의 크기별 분포를 조사한 결과, 대조구에서는 0.25 mm 미만의 소립단이 전체의 96 % 이상을 점유하였고 0.5~1 mm 이상의 중립단은 3 % 수준에 불과하였다. 이는 자연 방임하에서는 간척지 토양의 입단 발달이 거의 이루어지지 않음을 보여주는 지표이다. 알루미늄 산화물을 처리한 CT-1에서는 0.25 mm 미만의 소립단이 약 91 %, 0.5~1 mm 이상의 중립단은 6.5 % 그리고 2 mm 이상의 대립단이 1.4 % 수준으로 나타났다. 망간 산화물을 처리한 CT-2에서는 0.25 mm 미만의 소립단이 약 93 %, 0.5~1 mm 이상의 중립단은 6.1 % 그리고 2 mm 이상의 대립단은 분포하지 않았다. 마지막으로 철

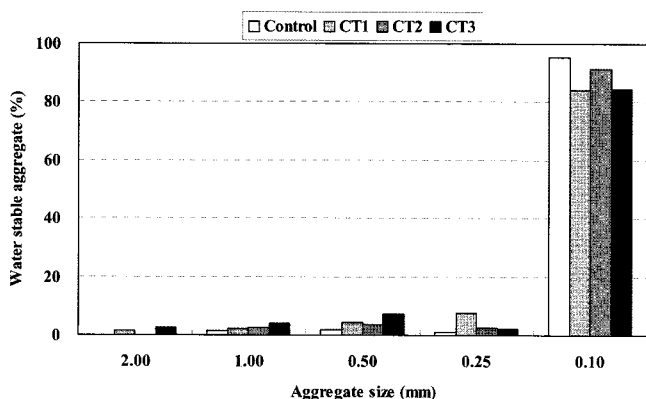


Fig. 3 Aggregation size distribution of soils in reclaimed tidelands by inorganic cementing agents treatments

산화물을 처리한 CT-3에서는 0.25 mm 미만의 소립단이 약 86 %, 0.5~1 mm 이상의 중립단은 11.3 % 그리고 2 mm 이상의 대립단이 2.4 % 수준으로 나타났다.

앞서 제시한 입단의 평균중량지름에서는 처리대상 3개의 무기 결합제별로 MWD가 큰 차이를 나타내지 않았으나 이를 보다 세분화해서 조사한 결과 철 산화물의 처리가 토양입단화를 비롯한 입단의 크기에도 매우 유용하게 작용하고 있는 것으로 평가되었다. 이같은 조사결과는 철 산화물이 토양입단화에 매우 유용하게 작용한다는 Schwertmann and Taylor (1989), Arca and Weed (1966), Krishna Murthi and Huang (1987), McNeal et al. (1968) 등 많은 연구자들의 결과를 뒷받침 할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 입단발달 상태 현미경 조사

광학현미경 (CAMSCOPE, sometech)에 부착된 304T camera probe를 이용하여 간척토양을 200배 확대하여 촬영한 결과는 다음과 같다. 여러 무기 결합제의 처리에 따른 토양표면에서 입단발달 상태를 조사한 결과, Photo 1에서 나타난 바와 같이 대조구의 경우에는 뚜렷한 입단 발달 상태를 확인하기가 어려웠다. 그러나 알루미늄과 철 산화물을 처리한 CT-1과 CT-3에서는 점토입자의 고결 및 입단화 작용이 일부 진행되고 있는 것으로 나타났다.

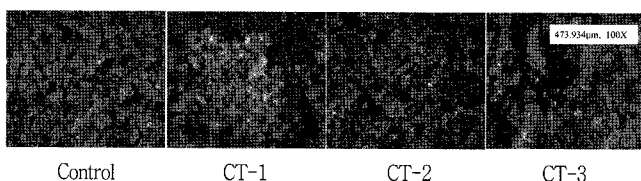


Photo 1 Aggregation formation state of soils in reclaimed tidelands by inorganic cementing agents treatments

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 무기 결합제로 작용하여 토양입단의 형성을 촉진시킬 수 있는 망간, 철 그리고 알루미늄 처리가 간척지 토양의 입단형성에 어느 정도 기여하는 가를 조사하였다.

1. 2005년 3월에 철, 알루미늄 그리고 망간 산화물을 간척지 토양에 처리한 후 2008년 2월에 토양을 채취하여 내수성 입단 화도를 조사한 결과, 처리대상 3가지 무기 결합제 가운데 철 산화물의 처리가 간척지 토양의 입단화도에 가장 크게 기여한 것으로 조사되었다.

2. 토양 입단의 평균중량지름 (MWD)은 무기 결합제 처리가 대조구에 비해 토양 입단의 크기를 증가시켰지만, 철, 망간 그리고 알루미늄 산화물 간에는 별다른 차이를 나타내지 않았다.

3. 입단크기별 분포특성을 조사한 결과, 철 산화물의 처리가 토양입단화도를 비롯한 입단의 크기에도 매우 유용하게 작용하고 있는 것으로 평가되었다. 광학현미경을 이용한 입단 표면 관찰 결과, 알루미늄과 철 산화물 처리구에서는 점토입자의 고결 및 입단화 작용이 일부 진행되고 있는 것으로 나타났다.

#### REFERENCES

1. Arca, M. N., and S. B. Weed, 1966. Soil aggregation and porosity in relation to contents of free iron oxide and clay. *Soil Sci.* 101: 164-170.
2. Blackmore, A. V., 1973. Aggregation of clay by the products of iron (III) hydrolysis. *Aust. J. Soil Res.* 11: 75-82.
3. Deshpande, T. L., D. J. Greenland, and J. P. Quirk, 1968. Changes in soil properties associated with the removal of iron and aluminum oxides. *J. Soil Sci.* 19: 108-122.
4. El-Swaify, S. A., and W. W. Emerson, 1975. Changes in the physical properties of soil clays due to precipitated aluminum and iron hydroxides: I. Swelling and aggregate stability after drying. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39: 1056-1062.
5. Fordham, A. W., and K. Norrish, 1983. The nature of soil particles particularly those reacting with arsenate in a series of chemically treated samples. *Aust. J. Soil Res.* 21: 455-477.
6. Greenland, D. J., J. M. Oades, and T. W. Sherwin, 1968. Electron-microscope observations of iron oxides in some red soils. *J. Soil Sci.* 19: 123-126.

7. KARICO, 2002. Studies on changes of soil characteristics and utilization after tidal land reclamation, Korea Agricultural and Rural Infrastructure Cooperation, Uiwang, Korea (in Korean).
8. Kitagawa, Y., 1983. Goethite and hematite in some soils from the Amazon region. *Soil Sci. Plant Nutr.* 29: 209-217.
9. Krishna Murthi, G. S. R., and P. M. Huang, 1987. Influence of constituents on the stability of mechanical separates of soils representing major taxonomic orders. *Appl. Clay Sci.*, 2: 299-308.
10. Barral, M. T., M. Arias, and J. Guerif, 1998. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil & Tillage Res.* 46: 261-272.
11. McNeal, B. L., D. A. Layfield, W. A. Norvell, and J. D. Rhoades, 1968. Factors influencing hydraulic conductivity of soils in the presence of mixed salt solution. *Soil Sci., Soc. Amer. Proc.* 32: 187-190.
12. RDA, 2006. Improvement of soil structure and acceleration of soil aggregation in newly reclaimed tidelands, Rural Development Administration, Suwon, Korea (in Korean).
13. Schwertmann, U., and R. M. Taylor, 1989. Iron oxides. In J. B. Dixon and S. B. Weed (eds.) Minerals in soil environments. 2nd ed., Madison, Wisconsin: *Soil Science Society of America*, 379-438.
14. Son, J. K., J. K. Choi, S. A. Hwang, B. J. Park, and J. Y. Cho, 2005. Soil aggregate distribution in reclaimed tidelands and tidelands of southwest coastal area of Korea, *Journal of Korean Society of Rural Planning*, 11(4): 93-98 (in Korean).