

제주도 감귤원 토양의 화학적 특성과 물 분산성 콜로이드 함량

오상실 · 현해남^{*1)} · 정종배²⁾

제주도 보건환경연구원, ¹⁾제주대학교 원예생명과학부, ²⁾대구대학교 생명환경학부
(2002년 5월 7일 접수, 2002년 6월 10일 수리)

Chemical Characteristics and Water Dispersible Colloid Content of Jeju Citrus Orchard Soils

Sang-Sil Oh, Hae-Nam Hyun^{*1)}, and Jong-Bae Chung²⁾ (Jeju Provincial Institute of Health and Environment, Jeju, 690-171, Korea, ¹⁾Faculty of Horticultural Life Science, Jeju National University, Jeju, 690-756, Korea, ²⁾Dept. of Agricultural Chemistry, Daegu University, Gyeongsan, 712-714, Korea)

ABSTRACT: Water-dispersible colloids are suspected to facilitate transport of contaminants to groundwater. This study evaluated some soil chemical properties in relation to the stability of colloids in soils of Jeju citrus orchards. Thirty surface soil samples were collected, and pH, organic matter content, oxalate-extractable Al and Fe contents, and water-dispersible colloid content were measured. In soils of higher pH, water-dispersible colloid contents were higher. The stability of colloids was found to be significantly promoted at pH above 5~6. Since organic matter can act as a flocculant, organic matter content significantly enhanced the colloid stability. In soils of less than 5% organic C, water-dispersible colloid content was expected to be significantly higher. In soils of higher oxalate-extractable Al and Fe contents, colloids remaining in suspension were lower. This indicated that amorphous oxides and hydroxides play important stabilizing roles in soil structure and can stabilize soil clay against dispersion. Therefore in soils of higher pH, lower organic matter, and lower amorphous clay minerals, the stability of water-dispersible colloids and the potential of colloid-mediated transport of organic chemicals to groundwater could be higher.

Key words: amorphous clay minerals, colloid-mediated transport, colloid stability, organic matter, water-dispersible colloids

서 론

제주도는 우리나라의 다른 지역과는 달리 작은 용암터널인 습골이 산재해 있으며, 이들 습골은 지하수와 직접 연결되어 있어서 중요한 지하수 충전 경로로 알려져 있다. 농약은 일반적으로 토양 입자에 쉽게 흡착되므로 지하수로의 이동이 어려우나 일부 수용성이 큰 농약의 경우에는 직접 물의 이동과 함께 지하수를 오염시킬 수 있을 것이다. 그러나 습골이 존재하는 제주도의 지하 암반층 구조를 고려하면 토양에 쉽게 흡착되는 농약일지라도 농약을 흡착한 콜로이드가 물에 분산되어 습골을 통해 지하수로 이동할 수 있을 것이며, 이때 물분산성 콜로이드 (Water-dispersible colloids, WDC)는 농약을 이동시키는 매체로 작용할 것으로 판단된다^{1,2)}.

토양중 물의 이동은 micropore와 macropore를 통하여 이루어지지만, macropore가 지하수 충전의 주요 통로이다³⁾. 또한,

물분산성 콜로이드의 이동은 이러한 macropore가 발달된 토양에서 잘 일어난다⁴⁾. 토양 중에서 점토나 유기물에 강하게 흡착되어 지하로의 이동이 어려운 농약의 지하수 오염이 농약을 흡착할 수 있는 물분산성 콜로이드를 매체하여 유발될 수 있다는 지적이 제기되었으며 이에 대한 많은 연구들이 이루어졌다. 비극성이어서 토양과 강하게 흡착되는 DDT, PCB, HCB 등과 극성이지만 양이온성이기 때문에 토양에 강하게 흡착되는 paraquat가 지하수에서 검출되는 것은 물분산성 콜로이드를 매체로 한 이들 농약의 이동이 가능하기 때문이다^{5,6)}. 또한 atrazine의 경우에도 물분산성 콜로이드에 의해 이동이 촉진되며, 물분산성 콜로이드 자체의 이동성과 흡착력의 차이에 따라서 atrazine의 이동을 촉진시키는 정도에 차이가 있는 것으로 알려져 있다⁴⁾. 모형식 (conversion-dispersion model)에 의해 추정된 atrazine의 용탈량이 실제 측정된 atrazine의 용탈량에 미치지 못하는데, 이러한 차이는 결국 물분산성 콜로이드에 흡착되어 용탈되는 atrazine의 양을 모형식에서 고려하지 않았기 때문으로 판단된다.

제주도 감귤원 토양에서 습골의 분포를 조사하여 보고된

*연락처:

Tel: +82-64-754-3345 Fax: +82-64-756-3351

E-mail: hnhyun@cheju.ac.kr

논문은 없으나, 제주도 전지역에 습골이 산재되어 있는 것으로 예상하고 있다. 따라서, 제주도 감귤원에 사용된 농약이 물분산성 콜로이드에 흡착된 상태로 토양층이 아닌 습골 등의 macropore를 통해 지하수로 유입될 수 있다고 보면, 토양층의 물분산성 콜로이드 생성량이 농약의 지하수로의 농약의 유입을 결정하는 요인이 될 수 있다. 따라서 물분산성 콜로이드의 생성과 안정성에 미치는 토양 특성과 그 영향을 밝힘으로써 감귤원 토양에 사용된 농약이 지하수로 유입될 가능성을 평가하는데 있어서 중요한 기준으로 활용될 수 있을 것이다.

물분산성 콜로이드의 생성 정도는 토양의 물리화학적 특성에 따라서 달라지는데, 일반적으로 토양의 입단 형성에 긍정적인 영향을 미치는 유기물 함량과 Al 및 Fe 등의 양이온이 많을수록 물분산성 콜로이드의 생성량이 적으며, 물분산성 콜로이드의 영점전하 pH와 토양 pH의 차이인 ΔpH와 이온강도 등도 물분산성 콜로이드의 생성에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다⁹⁾. 제주도 감귤원 토양은 지역 및 토양군에 따라 pH, 유기물 함량, Al, Fe 등 양이온 함량이 차이가 많기 때문에 물분산성 콜로이드의 생성량이 다를 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 제주도 감귤원 토양에서 pH, 유기물 함량 및 비정형 Al과 Fe 등의 토양 특성과 물분산성 콜로이드 생성과의 관계를 밝히고자 수행되었다.

재료 및 방법

공시토양

제주도 감귤원에 분포하고 있는 21개 토양통에서 유기물 함량이 다양한 30개의 토양을 선정하여 실험에 사용하였는데, 유기물 함량이 낮은 암갈색 비화산회토는 8개 토양통에서 10개 토양, 유기물 함량이 높은 농암갈색 및 흑색 화산회토는 각각 10개 토양통 및 8개 토양통에서 12개 및 8개씩의 토양 시료를 0~20 cm 깊이에서 채취하였다. 화산회 토양과 비화산회 토양 시료는 정밀토양도에 따라 채취되었으나, 실제 토양의 특성으로 보아서 유기물 함량이 6% 이하인 토양은 이라통을 제외하면 모두 비화산회토로 분류할 수 있었다.

물분산성 콜로이드 생성과 관련된 공시토양의 화학적 특성은 Table 1에 나타내었다. pH (H₂O)는 4.45~6.05 범위에 있었으며, 평균 5.38을 나타내었다. pH (KCl)은 평균 4.11로 pH (H₂O)에 비해 1.27 낮았다. Oxalate 용액 추출성 Al과 Fe의 함량은 각각 평균 16.4 및 15.7 g/kg으로 육지 토양에 비해서는 높은 경향을 나타내었다¹⁰⁾. 따라서 본 시험에 사용한 공시 토양에는 물분산성 콜로이드 생성에 미치는 요인인 pH, 유기물 함량 그리고 Al 및 Fe 함량이 다양한 토양들이 골고루 포함되어 있었다.

분석방법

pH (H₂O)와 pH (KCl)은 각각 H₂O와 1 N KCl의 1:5 현탁액을 30분간 진탕 후 유리전극으로 측정하였으며, 유기물의 함량은 Walkley-Black법으로 측정하였다¹¹⁾. 물분산성 콜로이드 함량은 Seta와 Karathanasis가 보고한 방법을 수정하여 측정하였다¹²⁾. 공시토양 5 g과 증류수 25 mL를 원심분리관에 넣고 분산제를 넣지 않은 상태에서 150 rpm으로 16시간 동안 진탕하고 2500 rpm으로 20분간 원심분리 후 상정액을 시험관에 조심히 따라 부었다. 방치한 상태에서 2~24시간 동안 침전되지 않는 것을 안정한 콜로이드로 간주하므로¹³⁾, 본 실험에서는 2시간 방치한 후 2 cm 깊이에서 5 mL를 채취하여 105°C로 건조시킨 후 중량법으로 물분산성 콜로이드를 정량하였다. Oxalate 용액 추출성 Al과 Fe은 0.5 mm 체로 친 토양 0.4 g을 원심분리관에 넣고 pH 3.5의 0.2 M NH₄-oxalate 용액 40 mL를 가한 후 즉시 뚜껑을 닫고 알루미늄 박지로 싸서 차광하고 4시간 동안 진탕한 후 즉시 2500 rpm으로 20분간 원심분리한 후 여과하여 추출하였고¹⁰⁾, KCl 추출성 Al은 1 N KCl 용액으로 추출하였다. 추출된 Al과 Fe은 원자흡광광도계 (AA220FS, Varian, Melbourne, Australia)로 정량하였다.

결과 및 고찰

pH와 물분산성 콜로이드 함량

물분산성 콜로이드의 이동성과 이들 콜로이드를 매체로 한농약의 이동성은 결국 토양 용액 중에서 이들 콜로이드들이 얼마나 안정하게 분산된 상태로 존재할 수 있는냐에

Table 1. Statistic description of chemical properties of soils used in the experiment

	pH		Organic C %	KCl ext. ^{a)}	Oxalate ext. ^{b)}		WDC ^{c)}
	H ₂ O	KCl		Al	Al	Fe	
	g/kg						
Mean	5.38	4.11	6.73	0.082	16.4	15.7	0.240
Minimum	4.45	3.22	1.28	0.001	1.9	3.5	0.015
Maximum	6.05	4.86	15.70	0.275	35.8	38.7	0.659

^{a)} 1 N KCl extractable; ^{b)} 0.2 M NH₄-oxalate (pH 3.5) extractable; ^{c)} Water-dispersible colloids.

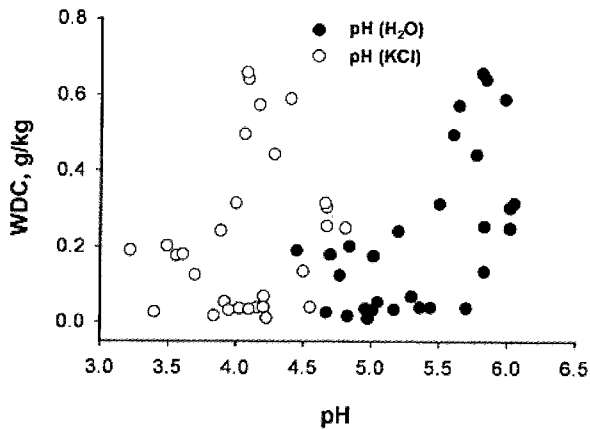


Fig. 1. Relationships between pH and water-dispersible colloid content in Jeju citrus orchard soils.

달려있다. 입자들 사이에 반발력이 최대로 유지될 수 있는 조건 하에서 콜로이드들은 토양 용액 중에서 안정한 분산 상태를 유지할 수 있다. 토양의 pH는 콜로이드의 표면전하를 결정하는 요인으로 콜로이드의 영점전하 pH와 토양 pH 사이의 차이가 클수록 콜로이드 입자의 순전하가 커지므로 따라서 이들 입자 사이의 전기적 반발력이 커지며 토양 용액 중에서 콜로이드의 안정성이 높아진다.

토양의 pH (H_2O) 및 pH (KCl)과 물분산성 콜로이드 함량과의 관계를 Fig. 1에 나타내었는데, 토양의 pH가 증가할수록 물분산성 콜로이드 함량이 높아지는 것으로 나타났다. pH (H_2O)와 pH (KCl)이 각각 5.5 및 4.0 이상인 토양에서 물분산성 콜로이드의 함량이 높게 나타날 수 있는 것으로 판단된다. Seta와 Karathanasis의 연구 결과에서도 토양에 따라서 차이는 있지만 4~5 이하로 pH가 낮아질수록 콜로이드의 안정성이 현저히 감소하는 것으로 나타났다¹².

pH가 콜로이드의 영점전하 pH에 근접하게되면 순표면전하가 감소하고 결국 입자간의 정전기적 반발력이 약해지며 콜로이드 입자들이 응집되기 시작한다. 따라서 토양의 pH가 콜로이드의 영점전하에 근접할수록 콜로이드의 안정성이 감소된다. 토양 콜로이드는 광물별로 다양한 영점전하 pH를 가지는데, allophane은 5~6, 철·알루미늄 산화물이나 수산화물의 경우에는 5~10 범위, kaolinite는 4 내외, smectite는 3 이하로 알려져 있다¹⁴. 본 연구에 사용된 토양 콜로이드의 광물 조성이 대한 분석은 하지 않았으나, 일반적으로 제주도의 한라산 기슭에 분포된 근세 화산회층에서 발달된 화산회 토양의 경우 allophane이 주요 점토광물이며 gibbsite, imogolite, halloysite 등이 함유되어 있고, 해안에 인접한 고화산회층이나 일부 퇴적층에서 발달된 토양에서는 halloysite와 vermiculite가 주요 점토광물이며 allophane도 포함되어 있다¹⁵. 비화산회 토양의 점토광물 구성에 대해서는 잘 알려져 있지 않지만 kaolinite, allophane 등이 주요 점토광물인 것으로 추정된다. 그리고 Al과 Fe의 산화물 및 수산화물도 특히 화산회 토양에 비교적 많이 함유된 것으로 알려져 있다. 이와

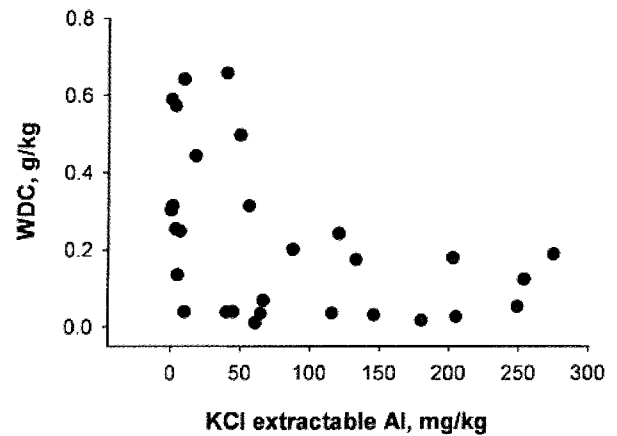


Fig. 2. Relationships between 1 N KCl extractable Al and water-dispersible colloid content in Jeju citrus orchard soils.

같이 조사된 토양들이 다양한 형태의 점토광물을 함유할 수 있으므로 특정 점토광물의 영점전하 pH를 기준으로 토양 pH에 따른 콜로이드의 안정성을 판단하는 것은 불가능하다. 그러나 위에서 언급한 제주도 토양의 점토광물 조성과 Fig. 1에서 나타난 결과를 고려할 때, pH(H_2O) 5~6 이상의 감귤원 토양에서는 콜로이드의 표면 음전하량이 증가할 것으로 판단되며 이러한 토양에서 콜로이드의 안정성과 이동성이 높아질 것으로 해석할 수 있을 것이다.

그리고 유리 Al과 Fe는 결합체로 작용하여 순음전하를 띠는 콜로이드의 안정성을 감소시키는 것으로 알려져 있다¹⁶. 토양의 pH가 낮아질수록 유리 Al과 Fe 함량이 증가하는 현상은 모든 토양에 공통적으로 적용되는 것이며, 특히 낮은 pH 조건에서 광물로부터 Al이 유리되어 활성화되는 성질은 화산회 토양에서 매우 강하게 나타난다¹⁰. 따라서 Fig. 1과 같이 낮은 pH 조건에서 물분산성 콜로이드의 함량이 낮은 것은 이러한 활성 Al 또는 Fe에 의한 콜로이드들의 결합에도 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구에서 조사된 토양에서도 pH (H_2O) 또는 pH (KCl)이 낮아질수록 1 N KCl 용액에 추출되는 Al 함량 유의성 있게 증가하는 것으로 나타났으며, Fig. 2에 나타난 것처럼 1 N KCl 용액에 추출되는 Al 함량이 50 mg/kg 이상이면 물분산성 콜로이드 함량이 현저히 낮아졌다.

유기물 함량과 물분산성 콜로이드 함량

토양에서 물분산성 콜로이드의 안정성은 유기물 함량의 영향을 크게 받는다. 유기물의 영향은 두 가지로 설명되는데, 먼저 유기물의 크기가 콜로이드 입자의 크기보다 작은 경우에는 콜로이드 표면에 이들 유기물이 흡착되면 음전하를 크게 증가시키게 되며 따라서 정전기적인 반발력이 커짐에 따라 콜로이드의 안정성이 높아진다¹⁷. 대개 수용성 유기물 부분이 이렇게 콜로이드의 안정성을 높일 수 있는데, Shanmuganathan과 Oades의 연구 결과에서 fulvate, citrate, oxalate 등의 유기 음이온을 첨가하면 점토의 분산이 촉진되는 것으로 나타났다¹⁸. 즉, 콜로이드 입자에 음이온성 유기물이

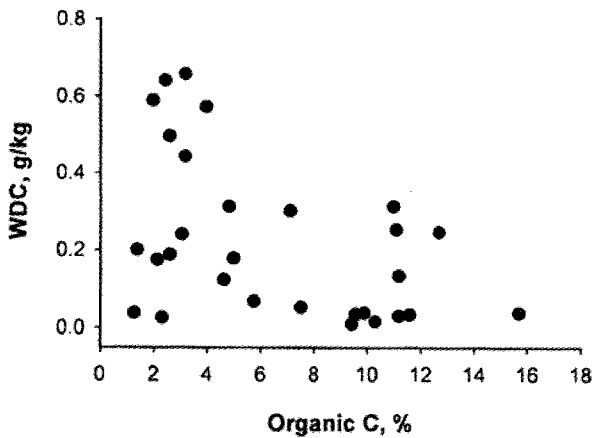


Fig. 3. Relationships between organic matter and water-dispersible colloid content in Jeju citrus orchard soils.

흡착되면 표면음전하가 증가되고 따라서 입자간의 반발력이 증가되어 결국 콜로이드의 분산이 촉진된다. 점토 입자에 흡착된 유기물은 콜로이드의 안정성을 증가시킬 뿐만 아니라 점토 입자에 흡착된 유기물이 atrazine 등의 농약을 강하게 흡착함으로써 콜로이드에 의한 농약의 이동을 용이하게 한다는 연구결과도 있다¹²⁾. 반면 유기물의 크기가 콜로이드 입자보다 큰 경우에는 이들 유기물에 여러 콜로이드 입자가 흡착될 수 있어 콜로이드의 응집을 촉진시키므로 오히려 콜로이드의 안정성을 감소시키는 역할을 한다¹⁹⁾. 감귤원 토양 중의 유기물 함량과 물분산성 콜로이드 함량과의 관계를 Fig. 3에 나타내었는데, 유기물 함량이 높을수록 콜로이드의 안정성은 감소하는 것으로 나타났으며, 유기탄소 함량 5% 이하의 토양에서 특히 물분산성 콜로이드의 함량이 높게 나타날 가능성이 많은 것으로 판단된다.

위에서 언급한 것처럼 수용성 유기물이 물분산성 콜로이드의 안정성을 높이는 역할을 할 수 있는 반면, 일반적으로 유기물 자체가 점토 입자의 입단화를 촉진시키는 역할을 한다는 것은 보편적으로 인정되는 사실이며 유기물 함량이 높은 토양에서 곰팡이를 포함한 미생물의 활성 증가에 따른 입단화 촉진 효과 또한 잘 알려져 있다. 특히 제주도 화산회 토양에서는 활성 Al과 Fe의 함량이 높고 이들이 유기물과 복합체를 형성하므로 유기물의 분해가 느리고 축적량이 많아진다. 이러한 유기물 복합체들은 비교적 강한 입단의 형성에 크게 기여하는 것으로 알려져 있다²⁰⁾. 본 연구에서 조사된 감귤원 토양 중의 유기물은 콜로이드 입자의 분산을 촉진하는 수용성의 작은 분자량의 유기물보다 콜로이드의 안정성을 감소시키는 큰 분자량의 비수용성 유기물 함량이 훨씬 많은 것으로 판단되며, 이러한 유기물의 영향으로 인해 유기물 함량이 높은 토양일수록 물분산성 콜로이드 함량이 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

Oxalate 추출성 Al 및 Fe 함량과 물분산성 콜로이드 함량

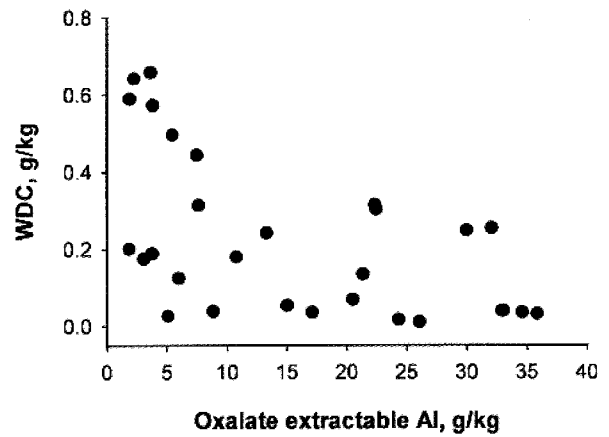


Fig. 4. Relationships between oxalate extractable Al and water-dispersible colloid content in Jeju citrus orchard soils.

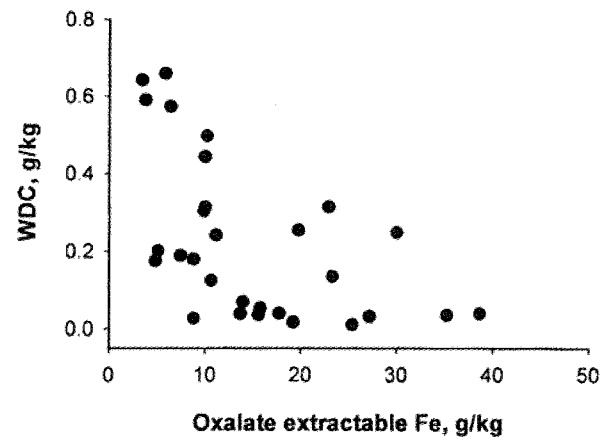


Fig. 5. Relationships between oxalate extractable Fe and water-dispersible colloid content in Jeju citrus orchard soils.

Oxalate 용액에 의해 추출된 Al 또는 Fe는 주로 allophane, imogolite, 산화물 또는 수산화물 등의 비결정형 광물들과 유기물 복합체에 기인한 것으로 볼 수 있으며 일부 유리 활성 Al과 Fe도 포함되어 있을 것이다. Table 1에 나타난 것처럼 1 N KCl 용액에 추출된 Al이 0.001~0.275 g/kg 정도인 것을 고려하면, 대부분의 oxalate 추출성 Al 및 Fe이 비결정형 점토 광물이나 유기물 복합체에 기인한 것으로 볼 수 있을 것이다. Oxalate 추출성 Al 및 Fe 함량과 물분산성 콜로이드 함량과의 관계를 Fig. 4와 5에 나타내었는데, oxalate 추출성 Al 및 Fe 함량이 증가할수록 물분산성 콜로이드 함량이 낮아지는 것으로 나타났다. 알루미늄과 Fe의 산화물 또는 수산화물들 그리고 유기물 복합체는 토양 중에서 콜로이드 형태로 존재할 수도 있으나 점토광물의 입단화를 촉진시키는 결합제로 작용할 수 있다. McNeal 등은 철 산화물을 제거한 하와이 토양에서 토양의 투수성이 현저히 감소하는 것으로 조사되었으며²¹⁾, 염류 농도가 낮고 Na 함량이 높은 토양에서 철 산화물이 입단

의 분산을 억제할 수 있다고 하였다. Shin과 Stoops의 연구 결과에 따르면²⁰⁾, 한라산 기슭에 분포하는 평대통과 흑악통의 토양은 일반적인 분산제의 처리로 점토의 분산이 매우 어려우며 아라통의 토양 또한 분산이 쉽지 않은 것으로 나타났는데, 이들 토양의 주요 점토광물인 allophane에 의한 강한 입단 형성이 그 원인인 것으로 밝혀졌다. 또한 콜로이드의 농도가 증가할수록 용액 중에서 콜로이드 입자간의 충돌 빈도가 증가하고 따라서 응집 현상이 촉진되므로 콜로이드의 안정성이 감소된다.

감굴원 토양 중의 oxalate 용액 추출성 비정형 Al과 Fe의 함량은 0~40 g/kg 범위로 조사되었으며, 유기물 함량과 직선적으로 비례하였다. 화산재가 풍화되는 과정에서 생성된 비정형의 Al과 Fe은 유기물과 복합체를 형성하고, 시멘트체로서 입단을 형성하기 때문에 점토입자의 분산을 저해하는 것으로 보고되어 있다^{16,22)}. 유기물 함량이 많고 pH가 높은 토양에서 콜로이드성의 Al 또는 Fe 광물들이 대개 입단화 되어 존재하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 토양 중의 oxalate 용액 추출성 Al과 Fe 함량은 전체적으로 물분산성 콜로이드의 분산을 억제하는 것으로 판단되며, 이는 Seta와 Karathanasis이 보고한 결과와 일치하였다¹²⁾.

요 약

토양 중에서 농약을 대공극과 습공극을 통하여 지하수로 이동시킬 수 있는 매체로 작용하는 물분산성 콜로이드 함량과 그 안정성은 여러 가지 토양의 이화학적 특성에 의해 결정된다. 본 연구에서는 제주도 감굴원에서 채취한 30개 토양을 사용하여 pH, 유기물, oxalate 용액 추출성 Al과 Fe 등이 물분산성 콜로이드의 함량에 미치는 영향을 조사하였다. 토양의 pH가 증가할수록 물분산성 콜로이드의 함량이 높았으며, pH 5~6 이상의 토양에서는 표면 음전하의 증가에 따라 콜로이드의 안정성이 높아질 가능성이 많은 것으로 나타났다. 낮은 pH 조건에서는 표면 음전하의 감소와 함께 활성 Al 또는 Fe 함량이 증가함에 따라 콜로이드의 응집 현상이 촉진되는 것으로 나타났다. 물분산성 콜로이드의 함량은 콜로이드의 입단화를 촉진시킬 수 있는 토양의 유기물 함량과 반비례하였으며, 유기탄소 함량 5% 이하의 토양에서 특히 물분산성 콜로이드의 함량이 많게 나타날 가능성이 높은 것으로 나타났다. Oxalate 용액 추출성 Al과 Fe 함량 또한 분산성 콜로이드의 함량과 반비례하였으며, Al과 Fe의 산화물 또는 수산화물들 그리고 Al의 유기물 복합체는 토양 중에서 콜로이드 형태로 존재할 수도 있으나 점토광물의 입단화를 촉진시키는 결합제로 작용함으로써 물분산성 콜로이드의 분산을 억제하는 것으로 판단되었다.

참고문헌

- McCarthy, J. F. and Zachara, J. F. (1989) Subsurface transport of contaminants, *Environ. Sci. Technol.* 27, 667-676.
- Lafrance, P., Banton, O., Campbell, P. G. C. and Villeneuve, J. P. (1990) A complexation-adsorption model describing the influence of dissolved organic matter on the mobility of hydrophobic compounds in groundwater, *Water Sci. Tech.* 22, 15-22.
- Thomas, G. W. and Phillips, R. E. (1979) Consequence of water movement in macropores, *J. Environ. Qual.* 8, 149-152.
- Seta, A. K. and Karathanasis, A. D. (1997) Atrazine adsorption by soil colloids and co-transport through subsurface environments, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 612-617.
- Ballard, T. M. (1971) Role of humic carrier substances in DDT movement through forest soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 35, 145-147.
- Vinten, J. A., Yaron, B. and Nye, P. H. (1983) Vertical transport of pesticides into soil when adsorbed on suspended particles, *J. Agric. Food Chem.* 31, 662-664.
- Enfield, C. G., Bengtsson, G. and Lindqvist, R. (1989) Influence of macromolecules on chemical transport, *Environ. Sci. Technol.* 23, 1278-1286.
- Dunnivant, F. M., Jardine, P. M., Taylor, D. L. and McCarthy, J. F. (1992) Transport of naturally occurring dissolved organic carbon in laboratory columns containing aquifer material, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 437-444.
- van Olphen, H. (1977) *Introduction to Clay Colloid Chemistry*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York.
- Song, K. C. (1989) Andic properties of major soils in Cheju island, Ph. D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Nelson, D. W. and Sommers, L. E. (1982) Total carbon, organic carbon, and organic matter, In *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*, Page, A. L. et al. (ed.), Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Seta, A. K. and Karathanasis, A. D. (1997) Stability and transportability of water-dispersible soil colloids, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 604-611.
- Sposito, G. (1989) *The Chemistry of Soils*, Oxford University Press, New York.
- Sparks, D. L. (1995) *Environmental Soil Chemistry*, Academic Press, New York.
- Shin, J. S. and Tavernier, R. (1988) Composition and genesis of volcanic ash soils in Jeju island, II. Mineralogy of sand, silt and clay fractions, *J. Miner. Soc. Korea* 1, 40-47.
- Goldberg, S., Kapoor, B. S. and Rhoades, J. D. (1990) Effect of aluminum and iron oxides and organic matter

- on flocculation and dispersion of arid zone soils, *Soil Sci.* 50, 588-593.
17. Jekel, M. R. (1986) The stabilization of dispersed mineral particles by adsorption of humic substances, *Water Res.* 20, 1543-1554.
 18. Shanmuganathan, R. T. and Oades, J. M. (1983) Influence of anions on dispersion and physical properties of the A horizon of a red-brown earth, *Geoderma* 29, 257-277.
 19. Durgin, P. B. and Chaney, J. G. (1984) Dispersion of kaolinite by dissolved organic matter from Douglas-fir roots, *Can. J. Soil Sci.* 64, 445-455.
 20. Shin, J. S. and Stoops, G. (1988) Composition and genesis of volcanic ash soils in Jeju island, I. Physico-chemical and macro-micromorphological properties, *J. Miner. Soc. Korea* 1, 32-39.
 21. McNeal, B. L., Layfield, D. A., Norvell, W. A. and Rhoades, J. D. (1968) Factors influencing hydraulic conductivity of soils in the presence of mixed salt solutions, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32, 187-190.
 22. Shoji, S., Nanzyo, M. and Dahlgren, R. (1993) Classification of volcanic ash soils, In *Volcanic Ash Soils; Genesis, Properties and Utilization*, Shoji et al. (ed.), Elsevier Science Publishers, New York.
-