

시설재배지 토양에서 염류장애 개선 방안

정덕영 · 이도경 · 김필주

(충남대학교 농과대학 농화학과)

Enhancement of salinity problem in a cultivated soil of greenhouse

D. Y. Chung · D. K. Lee · P. J. Kim

Dept. Agri. Chem., Chungnam National Uni., 220, Kung-dong, Yousung-ku, Taejon, Korea

적 요

본 연구는 시설재배지내 토양에서의 토양의 토양특성과 물질 이동 특성을 조사하고 이에 따른 염류집적의 원인을 구명하여 이에 적절한 대책 방안을 제시하고자 진행되었다. 토양내 가비중의 분포는 토양의 작토층 아래에 용적 밀도가 아주 높은 토층을 경계로 하여 작토층에서는 1.22g/cm³이었으며 그 하층부에서는 1.42g/cm³이었다. 작토층에서의 수리전도도는 1.15cm/day였으나 그 하층부에서는 0.18~0.39cm/day로 매우낮았다. 토양내 EC값은 작토층인 10cm이내에서는 5.08dS/m로 매우 높았으며 아래층으로 내려갈수록 감소하여 60cm부근에서는 3.4dS/m였다. 작토층에서의 치환성 양이온 농도는 K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 각각 1.07, 0.95, 7.70, 5.40cmol_c/kg이었으며 수용성 음이온 농도는 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄⁻², PO₄⁻³ 각각 1.07, 0.95, 7.70, 5.40cmol_c/kg 이었다. 단일흡착에서의 각 양이온의 최대 흡착량은 Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ 이 각각 8.47, 7.99, 6.67, 5.4cmol_c/kg으로 나타났으며, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺의 경쟁 흡착에서도 마찬가지로 Calcium이 가장 흡착력이 강한 것으로 나타났다. Potassium의 탈착은 Na와 Ca에 의해서 각각 2.68과 3.4cmol_c/kg이 이탈되었다. 염류의 이동 특성을 조사하고자 수용성 양이온과 음이온의 용출 특성을 조사한 결과 Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺은 1 Pore volume이 용출 되었을 때 각각 69%, 67%, 51%, 46%가 용출 되었으며 2 Pore volume이 용출 되었을 때 90%이상이 용출 되었으며 Cl⁻, NO₃⁻은 1.5 Pore volume에서, SO₄⁻²는 1.8 Pore volume에서 90%가 용출 되었다. 토양 블록에서의 토양수의 이동속도는 모래기둥(Sp), 모래삽입(Si), 자연상태(N) 블록에서 각각 0.95, 0.26, 0.13cm/day로 나타났으며, 음이온이 95%용출 되는데 각각 5, 13, 21일이 소요되었다. Chloride의 Breakthrough curve는 Sp블록에서 1.5일만에 정점에 도달하였으며 Si와 N블록에서는 각각 5, 10일이 소요되었다.

I. 서 론

국민의 생활수준 향상과 식생활 양식의 변화에 따라 신선 채소의 수요가 되고, 농업용 폴리에틸렌의 대량공급으로 인해 도시근교의 시설재배지 면적으로 크게 증가되고 있다. 시

설재배지 면적은 1990년에 4,592 ha에서 1994년 8,115 ha, 그리고 1995년에 9,104 ha까지 증가되고 있다²⁾. 일반 노지 농업과 비교하여 비닐하우스를 이용한 시설재배지 농업의 특징은 다모작을 통한 단위 면적당 다량 생산을 하는 집약적 농업형태를 하고 있다. 비닐하우스내 시설재배는 외부의 기후 조건과 관계없이 1년에 3~4회 연작을 시도하고 있으며, 많

을 경우 5회 연작까지 시도되고 있어 일반 노지 토양과는 크게 다른 농업구조를 가지고 있다^{45), 47), 48), 51)}. 특히 다모작을 위한 속성재배와 다량생산을 목적으로 과량의 화학비료와 유기질 비료가 매회 사용되고 있으며, 그로 인한 토양내 염류 및 유기물의 집적이 가속화되고 있다. 외부의 환경과 차단된 제한 공간 내에서 30~40℃ 내외의 고온이 늘 유지되어 수분 증발량이 지하 투수량보다 상대적으로 많기 때문에 많은 양의 관수에도 불구하고 모세관형상에 의한 염류의 지표면 축적이 발생하는 것으로 그간 보고되어 왔다^{45), 50), 55)}.

시설재배지내 염류집적의 원인구명과 이에 대한 대책에 관한 연구는 그간 여러 연구자들에 의해 꾸준히 진행되어 오고 있다. 류순호등은 비닐하우스내 토양의 이화학적 특성을 일반 노지 토양과의 비교를 통해, 염류가 주로 표층 토에 축적되어 있으며 연작 연수가 증가됨에 따라 염의 농도가 증가됨을 보고하였다⁴⁷⁾. 전국의 60여개 주요 비닐하우스 단지내 토양의 전기전도도와 주요 이온 분포의 분석을 주로 음이온이 EC값에 직접적으로 관여됨이 보고되었다⁵⁰⁾. 육창수의 충북지역 시설재배지 토양의 염류집적 실태의 조사에서 해당지역의 절반 이상이 EC값 4mmhos/cm 이상의 염류가 집적됨의 확인하였다⁴⁹⁾. 그리고 정구복은 충북부 지역 시설원예지 토양의 특성 및 염농도 분포의 조사보고를 통해, 시설재배지내에 NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻의 함량이 일반 노지 토양에 비해 약 3배 이상 높음을 확인하였다⁵²⁾. 그러나 이들의 연구내용은 주로 토양의 화학성 변화 및 현황 조사를 통해 염류집적의 원인 구명 및 현상 해석을 시도하였다. 소수 연구자들에 의해 염류 집적 토양내 입단화 변화와 같은 토양의 물리적 측면의 고찰을 통해 염류 집적 원인의 구명을 시도⁴⁷⁾했으나 그 결과는 다소 미흡하였다.

따라서 본 연구에는 시설재배지내에 토양의 물리화학적 특성을 조사하고 토양수의 이동과 염류이동 특성을 구명하여 염류집적의 정확한 원인을 규명함으로써 염류집적의 개선과 작물 생산 체계의 효율성을 제고하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 토양 시료채취

연구 대상토양은 충남 예산군 오가면의 시설재배지 토양을 선택하였다. 본 토양은 10년 이상시설재배가 진행되어 왔고,

1년 평균 4모작 (알타리무우-수박-배추(파)-상추)을 시도하고 있었으며, 다년간 화학비료 및 유기질 비료가 과량 사용되어 각종 염류 및 유기질이 과량 축적되어 작물에 대해 각종 염류장해로 인한 수량 감소가 발생되고 있으며, 지하수가 상당부분 오염되어 있는 지역적 특성을 가지고 있다.

분석 및 실험을 위해 논을 개답하여 시설재배지로 사용하고 있는 비닐하우스 3곳을 선정하여 각각의 장소에서 대표지역 3곳씩을 선정하여 매 10cm 깊이별로 60cm 깊이까지 시료를 채취하였다. 이때 토양 단면특성(Soil profile) 조사하였다. 가비중(Bulk density) 조사를 위한 비교란 시료와 물리화학성 조사를 위한 교란시료를 동시에 채취하였다. 각층별로 채취한 토양은 풍건후 2mm 사분하여 분석 및 실험에 이용하였다.

2. 토양분석

토양분석은 농업기술연구소⁴¹⁾의 토양화학분석법에 준하여 실험을 실시하였다. 이때 토성(Soil texture) 분석은 Sodium hexametaphosphate용액에 의한 분산후 Hydrometer를 이용하여 측정하였으며, 전기전도도(EC) 및 pH 분석은 물에 의한 1:5 용출법, CEC는 Ammonium acetate법, 유기물 함량(OM)은 Wakley black법에 의해 각각을 분석하였다. 기타 치환성 양이온은 1N Ammonium acetate 용액에 의한 침출후 Atomic Absorption Analyser로, 수용성 음이온은 Ion Chromatography (Dionex 2000I)를 이용 분석하였다. 이때 IC 칼럼은 AS4A를 이용하였다.

3. 포화 수리전도도(Saturated Hydraulic Conductivity) 및 이온의 용출특성 조사

가. 토양 칼럼 제작

토양칼럼은 20cm의 Acryl 칼럼(ID 4.4cm)을 이용하였다. 토양깊이별 수리전도도를 측정하기 위해 토양 단면특성 조사에서 얻어진 가비중에 따라 깊이별 토양을 충전하였으며, 그리고 가비중에 따른 수리전도도와 이온 용출특성을 조사하기 위해 A층 토양을 가비중 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5g/cm³으로 각각 충전하였으며 이때 토주의 높이는 10cm로 조정하였다⁷⁾.

나. 포화수리전도도(K_{st}) 및 이온의 용출특성 조사

수리전도도의 측정은 충전된 토양 칼럼을 48시간 동안 증류를 이용하여 포화 시킨 후, 일정수두법(Constant head method)에 의해 플럭스(Flux) 변화에 따른 수리전도도의 값을 Darcy's law¹⁷⁾에 의해 계산하였으며, Pore volume 변화 및 시간의 변화에 따른 전기전도도(EC), 양이온 그리고 음이온의 용출특성 변화를 측정하였다.

4. 이온의 흡·탈착 조사

토양중 양이온의 흡착능은 Batch 기술을 이용하였으며 토양:용액의 비율은 1:5로하여 8시간 진탕한 후 3000rpm에서 10분간 원심 분리한 후 여과하여 대상이온을 분석하였다^{6), 30), 31), 32)}. 이때 이온의 농도는 0, 10, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300 mmol/l 로하였다. 탈착능은 대상토양을 1N KCl과 NaCl로 각각 포화시키후 건조하여 실험에 이용하였다.

5. 토양 구조변화가 염류의 이동에 미치는 영향 조사

토양내 구조 변화가 염류의 이동에 미치는 영향을 조사하고자 PVC를 이용하여 30×30×40 cm의 상자를 만들어 3가지 서로 다른 방법으로 토양을 충전하여 상부로부터 관수한 다음 하부로 용출 되는 토양수의 양을 측정하였으며 이를 분석에 이용하였다. 물의 관수가 끝난 후 CaCl₂ 10mmol/l 용액으로 다시 용출 시켰다. 자연 상태의 토양 블록(N)은 Ap층 토양을 상부 표면으로부터 10cm까지 가비중 1.2g/cm³으로, 그 하부는 B층 토양을 가비중 1.5g/cm³으로

충진하였으며, 모래층 삽입 블록(Si)은 Ap층과 B층 사이에 모래층 3cm를 삽입하였으며 B층은 17cm로 하였다. 그리고 모래 기둥 블록은 B층 시작 부위로부터 지름 5cm의 모래 기둥 4개를 블록의 하부까지 설치하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 시설재배지 토양의 물리적 특성

가. 토양구조 특성

각 지역의 토양 물리적 특성을 조사한 결과 아래 표1과 같은 결과를 얻었다.

토양 단면 특성을 조사한 결과 약 20cm 깊이 까지 Ap층이 형성되어 있었으며, 29cm 이하에서부터 B층이 형성되어 60cm 이하까지 계속 되고 있음을 볼 수 있었다. 그리고 깊이별 토성을 미농무성법(USDA법)에 의해 분석한 결과 Ap와 B층은 모두 미사질양토(Silt Loam)로 분류되었다. 지표면 10cm 내의 점토 함량은 그이하의 층에 비해 약 2% 높음을 볼 수 있었으며, 이는 매년 반복된 객토 때문으로 해석된다.

나. 가비중의 분포특성

매 10cm 깊이별 토양의 가비중 분포를 조사한 결과 표층토 10cm 깊이 이내의 가비중은 평균 1.22g/cm³로 비교적 작물재배에 적당한 값을 유지하고 있었으며, 일반 농경지와 비슷한 수준을 보였다. 지하 10cm 이하의 층에서는 가비중이 크게 증가하기 시작하여, 11~20cm 구간에서 1.49g/cm³, 21~30cm에서 1.52 g/cm³로 최대의 값을 보였다. 이는 무거운 하층의 농기계 작업의 반복에 의한 경운층 이하에서 지속적인 다져

Table 1. Soil profile and physical properties of the reclaimed green house soil in Yesan, Chungnam.

| Profile | Depth (cm) | Particle Distribution (%) | | | Texture | BD* (g/cm ³) | Porosity (%) |
|------------|------------|---------------------------|------|------|---------|--------------------------|--------------|
| | | Clay | Silt | Sand | | | |
| AP Horizon | 0~10 | 19.4 | 58.2 | 22.4 | SiL | 1.22 | 53.2 |
| | 11~20 | 17.5 | 58.5 | 24.0 | " | 1.49 [†] | 42.7 |
| B Horizon | 21~30 | 17.3 | 60.8 | 21.9 | " | 1.52 | 41.5 |
| | 31~40 | 17.4 | 56.4 | 26.3 | " | 1.49 | 42.8 |
| | 41~50 | 17.2 | 55.1 | 27.7 | " | 1.44 | 44.5 |
| | 51~60 | 17.5 | 52.3 | 29.9 | " | 1.42 | 46.4 |

Note) * BD: Bulk density

짐(Compaction)으로 인한 Hard pan이 형성된 것으로 보인다^{9), 10), 25)}. 30cm 이하층에서 부터 깊이가 깊어질수록 가비중은 작은 쪽으로 감소하여 50~60cm 층에서는 1.42g/cm³ 까지 감소하였다.

토양의 다져짐은 토양물리성을 크게 변화시킨다. 특히 공극률, 대공극수, 토양의 수분함유도, 수리전도도와 입단형성에 크게 영향을 준다⁴⁾. 특히 Unger의 연구결과는 표층도의 가비중이 증가함에 따라 수리전도도는 큰 폭으로 감소하고 함수율도 함께 감소함을 보여 주고 있다²⁶⁾.

본 결과를 통해 비교적 가비중이 낮은 표층도 10cm 내외에서는 비교적 물의 흐름이 양호하고, 그로 인한 각종 수용성 염류의 수직 하강이동이 비교적 용이하게 이루어지다, 10cm 이후부터 높은 가비중의 Hard Pan의 영향에 의해 물의 수직흐름(Vertical flow)이 크게 지연되고^{9), 26)}, 수평이동(Horizontal flow)이 발생하거나 표층도내 머무름이 발생될 것으로 보인다¹⁾. 이에 따른 토양내 각종 수용성 염류의 이동도 함께 지연되어 표층도에 머무름이 발생되고, 그로 인한 염류의 표층도 집적이 가속화 될 것으로 보인다. 높은 가비중의 Hard pan은 염류의 이동을 방해 할뿐 아니라, 작물의 뿌리 신장을 방해하여 작물생육을 저해시키고^{11), 21), 34), 36), 38)}, 토양내 호흡이나 질소의 무기화와 같은 생물학적 작용에 매우 민감하게 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. Jensen 등의 연구 결과에 따르면 토양의 다져짐에 의해 토양내 혐기화는 CO₂ 방출량을 지속적인 감소시키고, 산소 확산율의 감소를 가져오는 것으로 조사되었다⁴⁰⁾. 그리고 탈질화에 의한 질소의 손실도 크게 증가하여^{9), 35)} 양분손실을 가져온다.

다. 수리전도도 특성

서로 다른 이화학적성을 지닌 깊이별 토양내 토양수의 이동 특성을 조사하기 위해 포화상태 수리전도도를 측정 한 결과 그림 1과 같은 결과를 얻었다.

토양 상층부인 Ap층(0~10cm)에서 초기 수리전도도 값은 4.4cm/day 이었으나 시간이 지남에 따라 큰 폭으로 감소하여 약 24hr 지난 후 용출액이 2.5 pore volume 되었을 때 수리전도도 값은 안정화되어 최종 값인 1.15cm/day가 되었다. 수리전도도 값이 안정화 될 때까지 시간의 변화에 따라 크게 감소한 요인은 교란된 토양 입자의 재배열에 의한 구조의 안정화⁴⁰⁾ 때문인 것으로 판단되었다. Ap층에서의 수리전

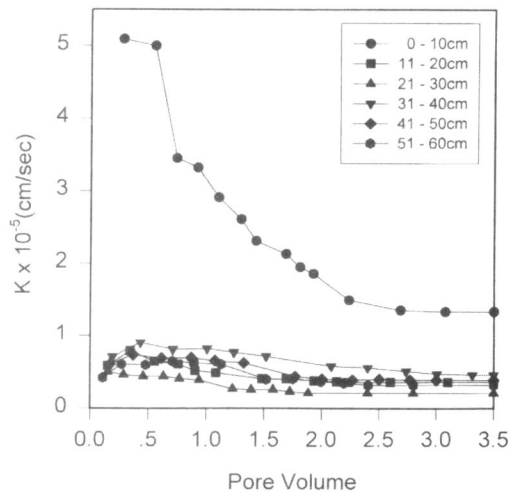


Figure 1. Saturated hydraulic conductivity(K) of the reclaimed green house soil from 0 to 60cm below the soil surface at every 10cm interval.

도도 값은 일반적인 양토의 1.7×10⁴ ~ 1.7×10⁷ cm/sec 와 비교해 볼 때 상당히 양호한 상태로 토양수의 흐름이 원활 할 것으로 기대되었다. 그러나 가비중이 급격히 증가된 Ap 층 하부 B층에서의 수리전도도 값은 0.18~0.39cm/day로 매우 낮은 값을 보였으며 특히 가비중이 가장 높았던 20~30cm 층에서 가장 낮은 수리전도도 값을 보였다. Ap층과 B 층의 경계면상에서 수리전도도 값이 급격히 저하되어 20~30cm층에서는 가장 낮은 값인 0.18cm/day로 저하되어 Ap 층에서 하향이동 된 토양수는 이 부분에서 하향이동이 단절 되고 토양수는 작토층에 머무르게된다. 결국 Ap층에 존재하는 토양내 염류들은 토양수의 흐름 차단으로 인해서 토양수와 함께 이탈되지 못하고 계속 작토층내 축적되게 된다. 이들 토양의 깊이별 토성은 미사질양토(Silt Loam)으로서 점토의 함량이 Ap층의 19%를 제외하고 모두 17%내외이며, 미사의 함량은 52~60%, 모래의 함량은 21~29%로 깊이별 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 깊이별 가비중을 볼 때 Ap층은 1.2g/cm³으로 일반 나지 토양과 같은 상태를 하고 있으나 그 이하 층에서는 1.44~1.52g/cm³의 높은 가비중을 갖는다. 따라서 이 토양내 포화수리전도도는 토성에 의해 좌우되 기보다는 가비중에 의해 크게 지배되는 것으로 판단된다.

라. 다층 칼럼에서의 포화수리전도도

층위별 그 자체 내에서 각기 동질성을 나타내며 일정한 두

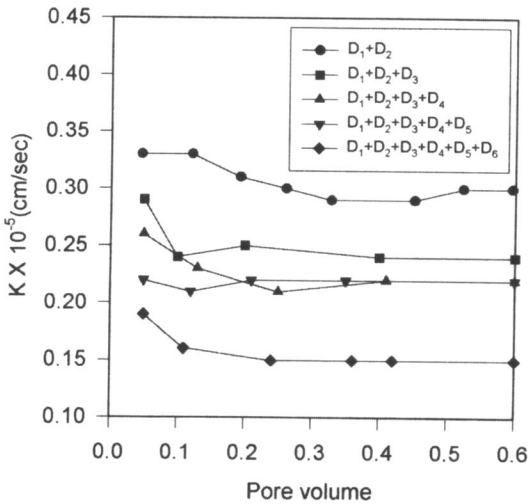


Figure 2. Saturated hydraulic conductivity(K) of the reclaimed green house soil from 0 to 60cm below the soil surface at every 10cm interval. *D₁: 0 - 10cm, D₂: 11 - 20cm, D₃: 21 - 30cm, D₄: 31 - 40cm, D₅: 41 - 50cm, D₆: 51 - 60cm

계와 수리전도도를 가지는 두 개의 뚜렷한 층위로 구성된 불균일한 토양에서 토양수의 이동 특성을 조사하기 위해 포화 수리전도도값을 조사한 결과 그림 2와 같았다. K_{st}가 1.33cm/sec인 D₁과 0.36cm/sec인 D₂를 결합한 다층 칼럼에서의 K_{st}값은 0.35cm/sec로 낮은 K_{st}값을 갖는 D₂와 같은 값을 나타내었다.

나머지 모든 다층칼럼에서도 모두 낮은 K_{st}값에 지배되는 것으로 나타났다. 서로 다른 K_{st}값을 갖는 두 층사이의 K_{st}값은 두 층중 낮은 K_{st} 값을 갖는 층에 지배되는 것으로 나타났다. 결과적으로 상층부 Ap층의 수리전도도의 값이 높다고 하여도 B층에서부터 낮은 수리전도도를 보이므로 토양내 토

양수의 이동은 B층에 의해 지배되고 따라서 B층으로부터는 토양수의 이동이 하향이동보다 A층에 머무르는 양이 많게 되고 오히려 수평이동 현상이 일어나게된다. 이러한 토양수의 원활하지 못한 하향 이동은 작토층내 과다 양분의 제거에 기여하지 못하게 되고 과다 양분은 작물 재배기간동안 Ap층의 하부에 계속 집적하다가 작물의 재배가 끝나고 관수가 차단 되면 하우스내 고온으로 인한 모세관 현상에 의해 표면으로의 상승작용을 하게된다. 염류의 상승은 다음 작물의 재배시에 과다 염류에 의한 생육장애를 일으키게 되는 것이다.

2. 시설재배지 토양의 화학적 특성

토양 깊이에 따른 토양의 화학적 특성은 아래 표 2와 같다.

가. pH 분포특성

토양 깊이변화에 따른 pH변화는 표층토 10cm 이내에서는 평균 pH 6.7로 중성 범위를 유지하고 있었으며, 11~20cm 토층에서는 약 pH 6, 21cm 이하의 층에서는 평균 pH 4.5 정도의 약산성을 보였다. 토양 깊이에 따른 pH의 큰 차이는, 지표면의 석회 사용 효과가 20cm 이하의 심토에 전달되지 않기 때문으로 보인다. 특히, 현재 시설재배농가에서 주로 사용하고 있는 석회고토와 소석회의 물에 대한 낮은 용해도와 20~30cm 부근의 Hard pan형성에 의한 토양수의 수직전달이 곤란하기 때문에 차이가 크게 나타난 것으로 보인다.

나. 전기전도도(EC) 분포특성

토양내 전기전도도의 크기는 주로 양이온(Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺등)과 음이온(Cl⁻, NO³⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻등)의

Table 2. Chemical properties of the reclaimed green house soil in Yesan, Chungnam

| Depth (cm) | pH (1:5) | EC (1:5) (dS/m) | OM (%) | CEC (cmolc/kg) | ESP* (%) |
|------------|----------|-----------------|--------|----------------|----------|
| 0~10 | 6.7 | 5.08 | 5.3 | 13.3 | 6.4 |
| 11~20 | 5.9 | 3.23 | 4.4 | 12.2 | 5.2 |
| 21~30 | 4.8 | 1.63 | 4.3 | 13.9 | 2.7 |
| 31~40 | 4.7 | 0.79 | 4.1 | 13.0 | 2.8 |
| 41~50 | 4.6 | 0.68 | 3.5 | 12.5 | 3.0 |
| 51~60 | 4.6 | 0.63 | 3.4 | 10.8 | 3.0 |

Note) * EPS:Exchangeable Sodium Percentage

농도에 의해 결정되며, 토양내 염의 함유 정도를 나타내는 지표로 이용되었다^{41, 14), 50), 52)}. 토양내 평균 EC값의 분포는 지표 10cm 이내에서는 평균 5.08 dS/m으로 대단히 높은량의 염류가 집적되어 있음을 볼 수 있었다. EC 5.08dS/m, pH 6.7, ESP 6.4의 본 층은 U.S. Salinity Laboratory Staff³⁷⁾의 염류도양 분류기준에 의해 Saline soil로 분류되며, 과량의 염류가 작물의 생육에 피해를 줄 수 있음을 간접적으로 알 수 있었다. 11~20cm 사이의 토층에서는 EC 3.23 dS/m으로 다소 감소된 값을 보였으며, Hard pan이 형성된 20cm 이하 층에서는 0.7 dS/m 이하의 낮은 EC값을 보여, 아주 적은 양의 염류가 존재하였다. 이와 같이 토양 깊이에 따른 EC값의 큰 차이는, 첫째, Hard pan에 의한 물의 수직 흐름이 원활치 못해서 염류의 표층내 이동지체 및 집적 발생, 둘째, 외부의 높은 온도에 의해 물의 증발량이 투수량보다 많기 때문에 발생하는 모세관 상승과 그로 인한 염류의 지표면 집적, 셋째, 토양 교질과 유기물에 이온의 흡착에 의한 염류의 지표면 집적 등으로 요약 할 수 있다. 여러 원인들중 본 토양에서는 첫 번째 요인의 높은 가비중에 의한 낮은 투수력 발생과 지표면 염류집적 발생이 가장 크게 관여한 것으로 보이며, 이에 대한 세밀한 추가적인 조사가 있어야 할 것으로 보인다.

다. 양이온 분포 특성

토양내 4가지 주요 양이온(Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)의 토양내 분포는 표 3과 같다. 토양내 치환성 양이온의 대부분은 화학비료와 토양 개량제 사용과 유기질 비료 분해 과정에서 발생된다. 그리고 많은 부분이 토양 광물의 풍화에 의해 토양내 유리 한다. 본 시설재배지에서 4가지 양이온은 공통적으로 지표 10cm 이내에 가장 높게 분포되어 있으며, 깊이가 깊어

짐에 따라 그 양은 크게 감소하여, Hard pan이 형성된 20cm 이하의 층에서 각 이온이 농도는 거의 일정하게 매우 낮은 농도로 분포되었다.

치환성 칼슘은 지표면 20cm 이내에 7.7~6.7cmolc/kg의 농도로 분포되어 있는 반면, 그이하의 층에서는 4.8~4.4 cmolc/kg의 매우 낮은 양으로 거의 일정한 분포를 보였다. 이는 CaCO₃을 사용했을 때 Ca는 심토로 거의 이동하지 않았다^{16), 33)}는 연구결과와 Ca(OH)₂를 사용시 Ca의 하향이동이 많았다^{18), 15), 46)}는 결과를 종합 할 때, Ca의 이동은 화합물의 형태와 수용성에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 국내 비닐 하우스 토양의 객토를 위해 이온의 용해도와 이행성이 비교적 높은 소석회를 많이 사용하는 점을 감안 할 때, Hard Pan 전후층간의 Ca농도의 큰 차이는 본 층의 불량한 투수력 때문으로 해석 할 수 있다.

치환성 마그네슘은 지표면 20cm 이내에 4.9~5.4 cmolc/kg의 농도로 분포되어 있는 반면, 그이하의 층에서는 3.5~2.9 cmolc/kg의 낮은 농도분포로 치환성 Ca에서와 같은 집적형태를 보였다. 치환성 마그네슘이 표층토에 비교적 많은 양 분포되어 있음을 발견하였으며, 이는 본 재배농가에서 MgO가 15~20%가 함유된 고토석회를 토양개량에 지속적으로 사용해왔기 때문인 것으로 조사되었다. 마그네슘은 비교적 Ca 이온에 비해 하향 이동되는 높은 특징을 가지고 있다^{12), 24), 27), 46)}. 본 조사 결과 Mg의 분포는 Hard Pan 전후에 큰 차이를 보였으며, 이는 Ca에서와 같은 원인으로 해석된다.

치환성 칼륨과 나트륨은 표층토 10cm 이내에서 각각 평균 1.07 cmolc/kg과 0.95cmolc/kg의 함량을 보였다. 11~20cm 층에서 칼륨과 나트륨은 각각 0.46 cmolc/kg과 0.63cmolc/kg까지 감소하였으며, 그 이하 층에서는 칼륨 0.17 cmolc/kg,

Table 3. Distribution of cations of the reclaimed green house soil in Yesan Chungnam.

| Depth (cm) | Ex. cation(cmole/kg) (1:5) | | | | Sol. cation(cmole/kg) | | | |
|------------|----------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² |
| 0~10 | 1.07 | 0.95 | 7.70 | 5.40 | 0.27 | 0.56 | 0.32 | 0.99 |
| 11~20 | 0.46 | 0.63 | 6.70 | 4.90 | 0.08 | 0.49 | 0.17 | 0.77 |
| 21~30 | 0.17 | 0.37 | 4.70 | 3.50 | 0.02 | 0.34 | 0.13 | 0.09 |
| 31~40 | 0.17 | 0.37 | 4.60 | 3.20 | 0.08 | 0.24 | 0.02 | 0.01 |
| 41~50 | 0.16 | 0.37 | 4.40 | 3.20 | 0.11 | 0.18 | 0.02 | 0.01 |
| 51~60 | 0.15 | 0.32 | 4.40 | 3.10 | 0.15 | 0.19 | 0.02 | 0.01 |

나트륨 0.32 cmolc/kg 정도의 농도로 거의 일정한 농도 분포를 보였다. 즉 토양내 이행성이 다량 양이온에 비해 비교적 큰 일가 양이온 나트륨과 칼륨 이온⁴⁾ 대부분이 표층토 20cm 이내에 분포되고 있음 알 수 있었다. 유관식 등의 연구결과에 따르면 일반 노지 토양내에서 K 이동은 Ca나 Mg에 비해 용이하게 이루어지며, 특히 토양수분 조건이 좋을수록 그 용탈량이 증대되는 것으로 조사되었다⁴⁶⁾. Edmeades 등은 석회 사용시 CEC의 증가에 의한 Ca의 흡착력은 증대되나 K의 흡착력이 증대되지 않았기 때문에 K비료를 매년 시용함에도 불구하고 치환성 K함량이 감소함을 밝혀냈고¹²⁾, 유사호는 밭토양에서 CEC가 낮을수록 K용탈이 용이하다고 보고하였다⁴⁹⁾. 거의 매일 충분한 양의 물을 관계하는 비닐하우스내 환경을 고려 할 때, 이와 같은 증변화에 따른 양이온 분포의 갑작스런 변화는 토층 20~30cm 범위에 형성된 Hard pan에 의한 토양수 수직이동 방해로 인해 기인된 것으로 해석된다.

라. 치환성 음이온 분포 특성

토양내 존재하는 주요 음이온은 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 와 PO₄³⁻ 등이며, 약간의 유기산 형태로 존재한다. 이들 음이온들은 주로 화학비료에 의해 토양에 공급 화학적으로 해리되어 생기거나, 생물학적 전환에 의해 토양내 주로 존재한다. 일부의 음이온이 유기질 비료의 생물학적 분해과정에 의해 발생되며, 비나 관계수로부터 토양에 가해지기도 한다⁴⁾. 따라서 음이온의 양은 시비량과 관계수 수질 및 토양미생물 분포와 직접적인 관계가 있다.

본 시설재배지 토양내의 수용성 음이온 분포를 조사한 결과 표 4와 같은 결과를 얻었다. 토양 교질과 비특이적 음이온 반응(Nonspecific anion reaction) 특성을 가지고 있어 결합력이 비교적 약하고 토양수에 의한 이행성이 높은 Cl⁻,

NO₃⁻와 SO₄²⁻ 는^{4),54)} 지표면 20cm 이내에 대부분이 존재하였다. 이들 세이온은 20cm 이하부터 깊이가 깊어짐에 따라 크게 감소하여, 50~60cm 층에서 Cl⁻ 0.06, NO₃⁻ 0.03, SO₄²⁻ 0.09 cmolc/kg의 분포를 각각 보였으며, 이때 각층간 5% 수준에서 최소유의차(LSD)는 Cl⁻ 0.026, NO₃⁻ 0.021, SO₄²⁻ 0.02로 유의성이 인정된다. 이에 반해 토양내 강한 결합력을 가지는 PO₄³⁻ 는 10cm 이내의 표층토에서 0.06 cmolc/kg이 수용성으로 검출되었으며, 그이하의 층에서 수용성 PO₄³⁻ 는 검출되지 않았다. 이는 토양내 인산은 토양교질과 특이적 음이온 반응(Specific anion reation)에 의한 강한 결합력을 하고 있기 때문에 물에 의한 용출이 거의 이루어지지 않는 것⁴⁾으로 보이며, 실제 EC값에도 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다. 인산은 토양에 쉽게 고정되거나 불용화하며 유효태로 존재하는 비율이 매우 낮으며³⁾, 인산의 함량이 높은 비옥한 토양이라도 토양 용액중 농도가 매우 낮기 때문에 토양중에서 거의 이동되지 않는다는 것이 일반적인 통념으로 받아들여지고 있다^{23), 29)}.

3. 시설재배지 토양에 있어서 이온의 흡·탈착 특성

토양에 있어서 양이온의 이동 특성과 관련하여 중요한 인자로 작용하는 흡착은 토양수의 이동에 따른 이온의 이동성을 결정하는 중요한 인자로서 작용하게된다. 토양내 양이온은 토양 교질입자 표면의 음하전에 결합하여 흡착되게 되는데, 이러한 흡착정도는 이온의 반지름과 전하의 크기 그리고, 농도에 의해 지배된다. 따라서 토양내 이온의 흡착 특성을 조사하는 것은 시설재배지 토양내 과량으로 존재하는 염류의 이동과 분포에 중요한 영향을 미치며 염류를 효율적으로 제거하기 위해서는 토양의 흡착 특성 조사가 선행되어야 한다.

Table 4. 2. Ditrubition of soluble anions of the reclaimed green house soil in Yesan, Chungnam.

| Depth (cm) | Soluble anion(cmolc/kg) | | | |
|---------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | PO ₄ ³⁻ |
| 0~10 | 1.07 | 0.95 | 7.70 | 5.40 |
| 11~20 | 0.46 | 0.63 | 6.70 | 4.90 |
| 21~30 | 0.17 | 0.37 | 4.60 | 3.20 |
| 31~40 | 0.17 | 0.37 | 4.60 | 3.20 |
| 41~50 | 0.16 | 0.37 | 4.40 | 3.20 |
| 51~60 | 0.15 | 0.32 | 4.40 | 3.10 |

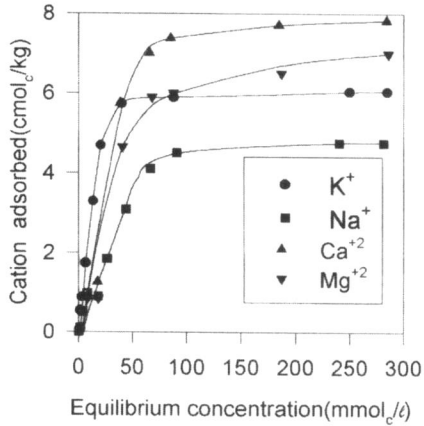


Figure 3. Adsorption isotherms of cations on the reclaimed green house soil.

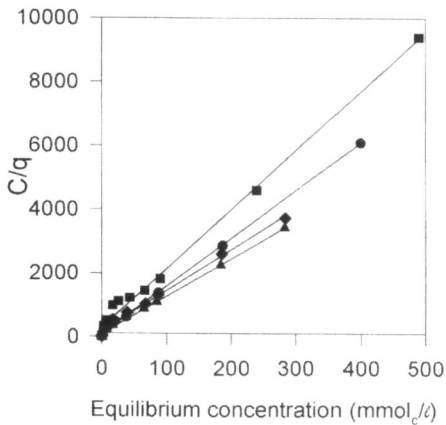


Figure 4. Adsorption isotherms of cations on the reclaimed green house soil as described by the Langmuir equation.

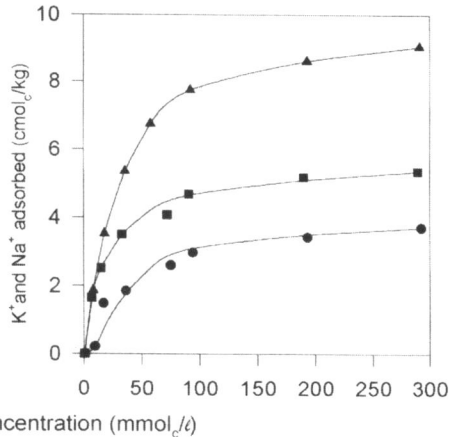
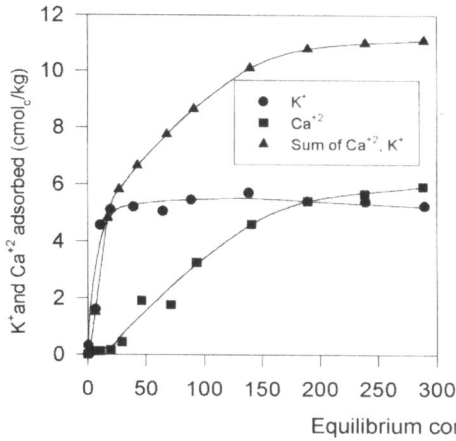


Figure 5. Competitive adsorption isotherms of cations on the reclaimed green house soil

가. 이온의 흡착 특성

토양의 양이온 등은 흡착 특성을 알아보기 위해 단일 흡착에서는 1가 양이온으로는 Na, K 그리고, 2가 양이온으로는 Ca, Mg를 이용하였으며, 경쟁흡착에서는 Na와 K, K와 Ca, Ca와 Mg, 그리고 K, Ca, Mg를 이용하여 조사한 결과는 다음과 같았다.

그림 3, 4에서 보는 바와 같이 단일이온의 흡착은 각각의 평형농도가 증가할수록 흡착량이 증가하여 최대치에 달하였다. K의 경우에는 낮은 평형 농도에서 최대 흡착량을 보이는 반면 Na는 Ca나 Mg보다 더 높은 평형 농도인 70mmol/l에서 최대 흡착량을 보였다. 특히, 동일 전하를 갖는 K와 Na 그리고, Ca와 Mg의 등은 흡착의 경우 주어진 평형 농도에 있어서 K와 Ca가 각각 높은 흡착량을 나타내고 있다. 이때 각 이온의 최대흡착량은 Ca는 8.47, Mg는 7.99, K는 6.67, Na는 5.40는 cmolc/kg로 Ca>Mg>K>Na순으로 흡착량이 증대되며, 이러한 결과로 추정컨대 토양 중에 Na를 비롯한 다른 많은 양이온이 존재할 경우 Na는 대부분 수용성 형태로 토양 용액 중에 존재하여 토양의 이화학을 악화시킬 것으로 추정되며, 이것은 이온의 전하와 이온의 수화반지름의 영향인 것으로 생각된다. 즉, 전하가 같을 때 이온의 반지름이 클수록 토양 흡착부위에 대한 이온의 친화성이 크기 때문이다.

경쟁흡착은 그림 5, 6에서 보는 바와 같이 Na 보다는 K, K나 Mg보다는 Ca가 토양의 흡착부위에 대한 흡착 친화성이 높았으며 K, Ca, Mg의 경쟁흡착에서는 전하가 크고 이온

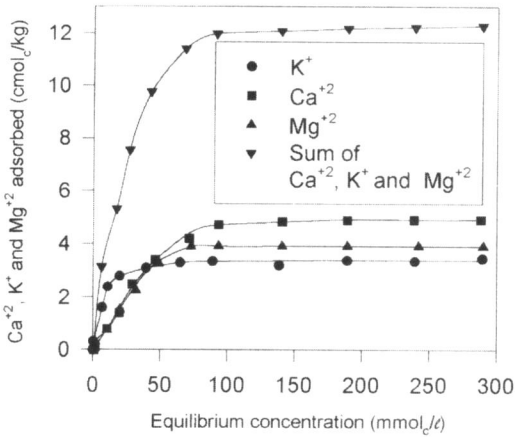


Figure 6. Competitive adsorption isotherms of K, Ca and Mg on the reclaimed green house soil.

반지름이 작은Ca가 가장 높은 흡착 친화성을 보였다. 이는 단일 흡착에서와 마찬가지로 전하가 클수록, 이온 반지름이 작을수록 상대적 흡착경쟁에서 토양 입자에 잘 흡착되는 것을 볼 수 있었다. 경쟁 흡착에 있어서 각 이온의 흡착량은 단일 흡착에서보다는 감소하였으나 이온들의 흡착 총량은 높아지는 것을 볼 수 있었으며 3가지 이온의 총 흡착량은 CEC값에 가까워지는 것을 볼 수 있었다.

나. 이온의 탈착 특성

토양에 기흡착된 이온의 이탈 현상을 알아보기 위하여 작물의 생육에 필요한 다량 원소중에 하나이며, 존재시 생육장애를 일으키는 Potassium(K)을 포화시킨 토양에서 1가 양

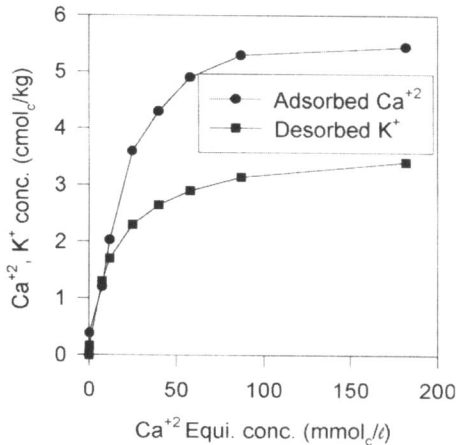


Figure 7. Adsorption of Ca and desorption of K in the reclaimed green house soil with the K-saturation.

이온인 Na와 2가 양이온인 Ca에 의한 K의 탈착 특성을 조사한 결과 다음과 같았다.

그림 7, 8에서 보는 바와 같이 Na에 의한 K의 이탈은 평형 농도가 75 mmol/l일 때 최대값 2.68cmol/kg을 보였으며 Na의 흡착량은 약 4cmol/kg으로 단일 흡착의 정점이었던 4.8cmol/kg보다는 약간 낮은 값을 보였는데 이는 기흡착된 K에 의한 것으로 판단되며 이탈량보다 흡착량이 많은 것은 K의 최대 흡착량이 6.67cmol/kg인 반면에 이 토양의 CEC는 13.3cmol/kg이다 따라서 흡착된 Na의 일부는 기흡착된 K와 치환 흡착되었으며 일부는 K이 흡착되지 않은 다른 흡착부위에 치환된 것으로 판단된다. Ca에 의한 K의 탈착 특성 또한 그림 8에서 보는 바와 같이 Na와 비슷한 경향을 보였으나 K보다 토양 교질에 대한 흡착 친화력이 높은 Ca에 의해서 이탈된 K의 양은 3.4cmol/kg으로 Na에 의한 2.68cmol/kg보다 많았으며 Na보다 흡착력이 강한 Ca 또한 5.45mmol/kg으로 더 많은 양이 치환흡착 되었다.

4. 염류의 이동 특성

토양내 존재하는 주요 양이온은 Na⁺, K⁺, Ca²⁺, 와 Mg²⁺ 등이며 이외에도 많은 미량원소들이 포함되어있다. 이들은 대부분 화학비료와 유기질비료의 시비에 의해 토양내 가해지며 일부는 지하수 등으로부터 전해진다. 이러한 양이온은 대부분 토양내 토양입자가 가지는 최대흡착량내에서 토양입자 표면에 흡착되며 최대 흡착량 이상으로 존재하는 양이온은 수용성으로 존재하여 작물의 생육 장애에 영향을 미치게 된

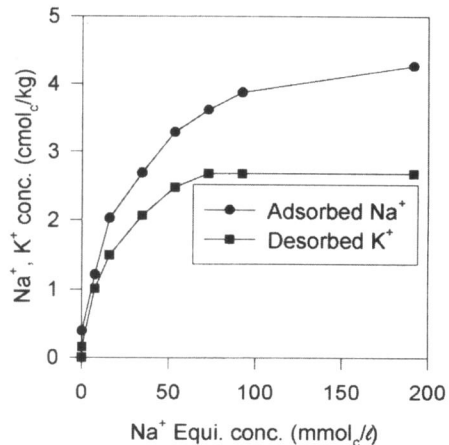


Figure 8. Adsorption of Na and desorption of K in the reclaimed green house soil with the K-saturation.

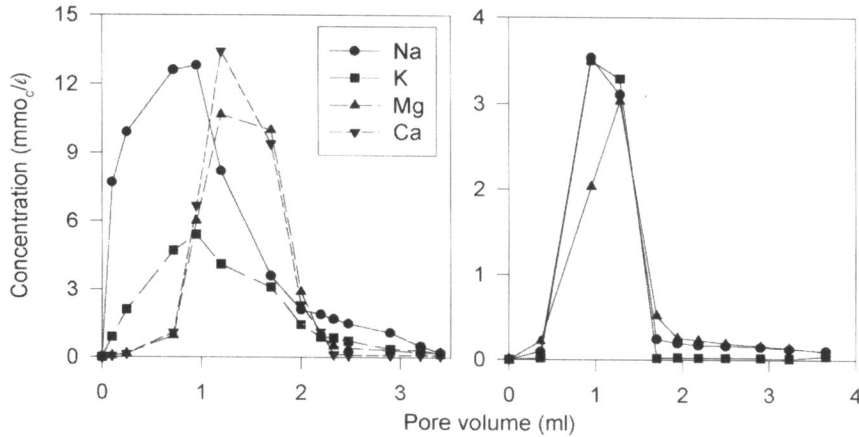


Figure 9. Elution pattern of cation and anions in the reclaimed green house soil.

다. 토양내 존재하는 주요 음이온은 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 와 PO_4^{3-} 등이며, 약간의 유기산 형태로 존재한다. 이들 음이온들은 주로 화학비료에 의해 토양에 공급되어 화학적으로 해리되어 생기거나, 생물학적 전환에 의해 토양내 주로 존재한다. 토양내 음이온중 Cl^- , NO_3^- 와 SO_4^{2-} 는 토양 교질과 비특이적 반응을 하며, 결합력이 매우 미약하여 토양수의 이동과 거의 같은 속도로 이동하는 특징을 가지고 있다. 따라서 이들 이온의 이동 특성을 알아보기 위해 가비중 $1.2g/cm^3$ 으로 충전한 토양 칼럼에서 각 이온의 용출 특성을 조사한 결과 다음 그림 9와 같았다.

가. 수용성 양이온의 용출 특성

토양내 존재하는 수용성 양이온의 이동은 토양내의 수분의 이동에 따라 이동하는 것이 관찰되었는데 1 Pore volume 토양수가 용출 되었을 때 Mg, Ca, Na, K는 각각 46%, 51%, 67%, 69%가 용출 되었다. 한편, 파쇄곡선을 얻기 위한 용출실험에서는 가해진 초기이온에 대한 상대적 용출총이온의 90%가 용출되는데 소요된 각 이온의 용출속도는 크게 차이 없으나 흡착력에 따라 흡착력이 큰 Mg와 Ca의 2가 이온들이 1가 이온보다 상대적 공극수량이 더 많이 소요되었다.

나. 수용성 음이온의 용출 특성

토양 칼럼을 이용한 가해진 음이온량의 90% 이상이 용출 수 내에서 발견되는 용출 특성의 결과를 살펴보면 Chloride는 약 1.28 Pore volume, Nitrate는 약 1.23 Pore

volume으로 유사한 용출 특성을 보이고 있으나, Sulphate는 약 1.87 Pore volume으로 상대적 공극수량이 증가 되었으며 Phosphate는 조사된 범위의 공극수량에서는 검출되지 않았다. 이상의 결과로 볼 때 토양중 수용성 상태의 Chloride와 Nitrate는 쉽게 용출이 가능하나 Sulphate와 Phosphate 이온은 상대적으로 토양내 집적이 된다는 것을 알 수 있는데 이는 Sulphate와 Phosphate가 갖는 토양교질과 특이적 음이온반응에 의한 강한 결합을 하고 있기 때문에 물에 이동에 따른 용출이 어려우며 특히 Phosphate는 타 음이온에 비해 결합력이 강해 토양입자표면에 불용성의 형태로 존재함을 추정할 수 있었다. 그러나 시설재배지에서 작물재배시 많은 관수에도 불구하고 수용성 염류가 제거되지 못하는 것은 앞에서 언급하였던 토양의 다져짐으로 인한 구조의 악화로 토양수의 하향 이동이 억제되고 있기 때문인 것으로 판단되었다.

5. 토양구조 변화가 염류의 이동에 미치는 영향

토양의 구조 변화가 염류의 이동에 미치는 영향을 조사하기 위해 토양이 충전된 블록에 있어서 토양수의 이동 특성과 이에 따른 이온의 이동 특성을 조사한 결과 다음과 같았다.

블록 내에서 토양수의 이동은 구조에 따른 큰 차이를 보여 토양수의 이동속도는 Sp, Si, N에서 각각 0.95, 0.26, 0.13 cm/day로 나타났다. 모래 기둥이 설치된 블록(Sp)에서의 토양수의 이동속도는 일반조건의 블록(N)에서 보다 약 7배 정도 빠름을 보였다. 이때 용출수내의 음이온을 분석한 결과

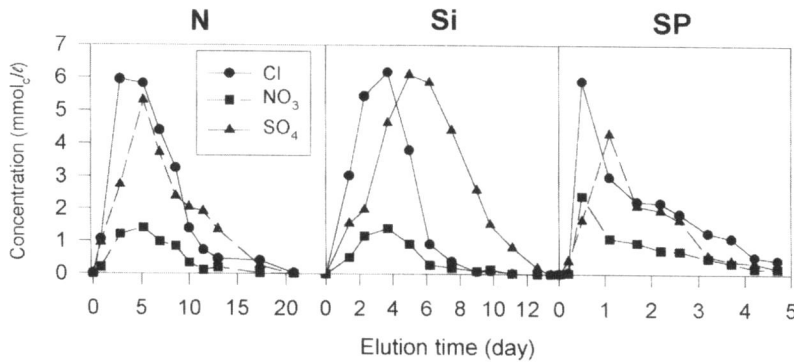


Figure 10. Elution pattern of cation and anions in the soil block with differential structure. N:Natural, Si:Sand interface, Sp:Sand pole

그림 10에서 보는 바와 같이 음이온의 95%가 용출되는데 Sp, Si, N 블록에서 각각 5, 13, 21일이 소요되었다. 이때 각 이온의 용출속도는 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 순이었으나 용출속도에는 큰 차이가 없음을 볼 수 있었다. 또한 토양의 구조에 따른 염류의 이동 속도를 측정하기 위해 이동 속도가 가장 빠른 이온인 Cl^- 을 지표 이온으로 하여 Breakthrough curve를 얻은 결과는 그림 11과 같았다.

Sp블록에서 Cl^- 은 1.5일만에 C/C_0 값이 0.9에 도달하였으며 Si블록에서는 5일, N블록에서는 10일이 소요되었다.

이러한 결과로부터 우리는 토양내 작토층 하부의 구조 변화가 토양수의 이동에 큰 영향을 미치며 이에 따른 염류의 토양내 동태에 중요한 작용을 한다는 것을 알수 있었다. Hard pan에 의한 토양수의 차단은 시설재배지 표층토내 염

류 집적을 가중시키며 이로 인해 작물의 생육 장애를 초래하게 되는 것이다. 실험에서 살펴 본 바와 같이 작토층의 배수를 용이하게 하는 것은 토양수의 이동뿐만 아니라 이로 인한 과잉 염류의 제거에 큰 효과가 있을 것으로 기대되었다.

IV. 결 론

시설재배지내 염류집적의 원인을 조사하기 위해 토양의 물리적·화학적 성질을 조사한 결과 다음과 같았다. 가비중은 Hard pan을 경계로 하여 작토층에서는 $1.22g/cm^3$ 였으며 그 이하에서는 $1.4g/cm^3$ 이었다. 따라서, 구조에 가장 큰 영향을 받는 수리전도도 또한 Ap층에서는 $1.15cm/day$ 로 양호하였으나 B층에서의 값은 $0.18\sim 0.39cm/day$ 로 매우 낮았다. 따라서 토양내 수리전도도는 상대적으로 낮은 수리전도도에 의해 결정되는 것으로 추정되기에 토양의 하층의 수리전도도를 높여주는 것이 토양의 수분관리에 적절할 것으로 판단된다.

토양내에 수용성 상태로 존재하는 염류의 분포 결과를 살펴보면 Ap층에서의 EC값은 $5.08dS/m$ 로 높은 값을 보였지만 용적밀도가 높은 Hard pan이하에서는 매우 낮은 값을 보였다. 이는 토양이 가지는 각 이온들에 대한 흡착력뿐만 아니라 수분의 이동에 따른 물질 이동속도도 저하되어 상대적으로 용적밀도가 급격히 증가되는 Hard pan의 상층부인 Ap층에서 현저히 많은량이 집적됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 특정 토양층내에 이온의 집적을 방지하기 위해서는 이러한 높은 용적밀도를 가지는 층의 물리적 특성을 개선해야 할 것으로 판단된다.

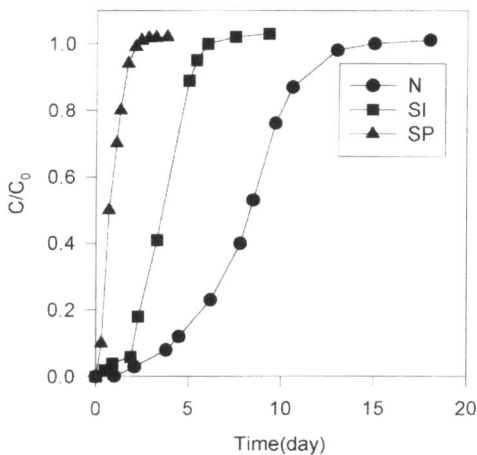


Figure 11. Breakthrough curves of Cl^- in soil block with differential structure. N:Natural, Si:Sand interface, Sp:Sand pole

양이온의 단일흡착은 $Ca > Mg > K > Na$ 순이었으며, 경쟁흡착에 있어서도 다른 이온에 비해 Ca이 가장 높았다. 따라서 토양내의 특정이온들의 토양흡착에 의한 이온 집적을 방지하기 위해서는 Ca 이온을 가진 비료의 사용이 권장되며 특히 토양입자 분산과 sodic soil에 직접적인 영향을 주는 Na이온의 용탈에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

따라서 상기에 조사된 결과를 근거로하여 토양내 특정층의 과잉 염류의 효율적 제거를 위한 방안을 모색하고자 토양 블록을 이용한 토양 구조 변화에 따른 염류의 이동 및 분산 결과는 용적밀도가 높은 층에 모래로 일정 넓이로 일정 깊이까지 처리한 토양 블록이 처리하지 않은 실험구보다 Chloride 이온이 블록의 하부로 배출되는데 소요되는 시간은 1.5일로 자연상태의 구조에서의 10일보다 매우 빨랐으며 특히 소요된 총 관개수량도 자연상태의 총 소요수량의 0.3이하의 관개수량이 소요되어 토양의 일정층에서 이러한 토양처리를 적용할 시 염류의 용탈이 매우 효율적 일 것으로 판단된다.

이러한 결과로 볼 때 염류가 과잉 집적된 토양에 있어서 염류의 효율적인 처리방안은 토양의 물리적 구조를 개선뿐만 아니라 집적된 이온의 이탈 및 용탈에 영향을 주는 Ca 이온을 포함하는 화학물질의 처리와 일정 간격으로 수리 전도도를 개선하기 위하여 모래심을 처리하여 물 빠짐이 원활하도록 하고 이를 통한 토양내 집적된 염류를 제거하므로서 작물의 염류장해를 개선하는 방법을 도모해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Azooz, R. H., and M. A. Arshad. 1996. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. *Canadian J. of Soil. Sci.* 143-152.
2. Baver, L.D.. 1966. *Soil Physics*. John Wiley & Sons Co. Ltd.
3. Bakken, L. R., T. Børrensen, and A. Njøs. 1987. Effect of soil compaction by tractor on soil structure, denitrification and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Soil Sci.*, 38:541-552.
4. Bohn, Hinrich, Brian McNeal, and George O'Connor. 1979. *Soil Chemistry*. A Wiley-Interscience Publication. pp 149-151, 172-181, 223-225, 284-286.
5. Bolt, G. H. and M. G. M. Braggenwent, 1981. *Soil chemistry, A basic elements*. P. 54-90
6. Bond, W. J. and I. R. Phillips, 1990. Cation Exchange Isotherm obtained with batch and miscible-displacement technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:722-728.
7. Bouma, J., and J. L. Anderson. 1973. Relationships between soil structure characteristics and hydraulic conductivity. p. 77-105. In R. R. Bruce (ed.) *Field soil water regime*. Spec. Pub. 5. Soil Sci. Soc. America. Madison WI
8. Bouwer, H.. 1961. A double tube method for measuring hydraulic conductivity of soil in sites above water table. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 25:334-342.
9. Brady, Nyle C.. 1980. *The Nature and Properties of Soils*. Tenth edition. MacMillan Publishing Company. pp 112.
10. Carter, L. M., and R. F. Colwick. 1971. Evaluation of tillage systems for cotton production systems. *Trans. ASAE* 14:1116-1121.
11. Danfors, B.. 1994. Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. *Soil & Tillage Res.*, 29:135-144.
12. Edmeades, D. C.. 1982. Effects of lime on effective cation exchange capacity and exchangeable cations on a range of New Zealand soils. *N.Z. J. Agr. Res.* 25:27-33.
13. Enfield, C. G., and R. Ellis, Jr.. 1983. The Movement of Phosphorous in Soil. pp.93-107. In *Chemical mobility and reactivity in soil systems*. D. W. Nelson, Kok. Tanji and D. E. Elrick (ed). *Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am. Spe. Pub. No.11*, Am. Soc. Agron, Madison, Wis.
14. Follett, Roy Hunter, Larry S. Murphy and Roy L. Donahue. 1981. *Fertilizers and soil*

- Amendments. Prentice-Hall, Inc. pp45-48.
15. Friesen, D. K., A. S. R. Juo, and M. H. Miller. 1982. Residual value of lime and leaching of calcium in a kaolinitic Ultiso in the high rainfall tropics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:1184-1189.
 16. Gonzalez-Erico, E., E. J. Kamprath, G. C. Naderman, and W. V. Soarse. 1979. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an Oxisol of central Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:1155-1158.
 17. Hillel, Daniel. 1982. *Introduction to Soil Physics*. Academic Press. pp 135-136, 180-181.
 18. Hoyt, P. B., and A. W. Henning. 1982. Soil acidification by fertilizers and longevity of lime applications in the Peace River region. *Can. J. Soil Sci.* 62: 155-163.
 19. Jardine, P. M. and D. L. Sparks. 1984. Potassium-calcium exchange in a multireactive soil system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:39-45.
 20. Jensen, L. S., D. J. McQueen, and T. G. Shepherd. 1996. Effects of soil compaction on N-mineralization and microbial-C and -N. I. Field measurements. *Soil & Tillage Research.* 38:175-188.
 21. Kayambo, B., R. Lal, and G. C. Mrema. 1986. Traffic-induced compaction in Mait, Cowpea and Soybean production on a tropical Alfisol after ploughing and no-tillage: *Crop Grow. J. Sci. Food Agric.* 37:1139-1154.
 22. Langerwerff, J. V., F. S. Nakayama, and M. H. Frere. 1969. Hydraulic conductivity related to porosity and swelling of soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33:3-11.
 23. Mengel, K.. 1985. Dynamics and availability and phosphorus to subsurface drainage water from intensively cropped mineral and organic soils in Ontario. *J. Enviro. Qual.* 8:42-48.
 24. Messick, C. L., M. M. Alley, and L. W. Zelazny. 1984. Movement of calcium and magnesium in Ultisols from diplomatic limestone. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1096-1101.
 25. Miller, W. Raymond, and Roy L. Donahue. 1990. *Soils, An introduction to Soils and Plant Growth*. Sixth edition. Prentice-Hall International, Inc.. pp 14.
 26. Patel, M. S. and N. T. Sigh. 1981. Changes in bulk density and water intake rate of a coarse textured soil in relation in different levels of compaction. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 29:110-112.
 27. Plushier, J. L., and A. S. R. Juo. 1981. Leaching of fertilizer ions in an Ultisol from the high rainfall tropics; Leaching through undisturbed soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:754-760.
 28. Pupisky, H., and I. Shainberg. 1979. Salt effects on the hydraulic conductivity of a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 43:429-433.
 29. Sharma, P. K., A. K. Sinha, and T. N. Chaudhary. 1985. Movement of surface and deep placed phosphorus in a S and Y loam soil in relation to initial soil wetness, amount of water applied, and evaporation potentials. *Soil Sci.* 140:256-262.
 30. Sparks, D. L., 1995. *Environmental soil chemistry*, Academic press. P. 99 - 131.
 31. Sposito, G., K. M. Holtzclaw, C. Jouany and C. Charlet, 1983. Cation selectivity in sodium-calcium, sodium-magnesium, and calcium-magnesium on Wyoming Bentonite at 298K-1. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:917-921.
 32. Suarez, D. L. and M. F. Zahow, 1989. Calcium-magnesium Exchange selectivity of Wyoming Montmorillonite in chloride, sulfate and perchlorate solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:52-57.
 33. Sumner, M. E., H. Shahandeh, J. Bouton, and J. Hammel. 1986. Amelioration of an acid soil

- profile through deep liming and surface application of gypsum. *Soil Sci. Am. J.* 50:1254-1258.
34. Taylor, H. M., and G. S. Brar. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil & Tillage Res.*, 19:111-119.
 35. Torbert, H. A. and C. W. Wood. 1992. Effects of soil compaction and water-field pore space on soil microbial activity and N losses. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 23:1321-1331.
 36. Unger, Paul W. 1996. Soil bulk density, penetration resistance, and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions. *Soil & Tillage Research*. 37:67-75.
 37. U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soil. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. USDA Handbook 60, pp160.
 38. Voorhees, W. B., S. D. Evans, and D. D. Warnes. 1985. Effect of replant wheel traffic on soil compaction, water use, and growth of spring wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:215-220.
 39. Zhang, Z. Z. And D. L. Sparks, 1996. Sodium-copper exchange on Wyoming Montmorillonites in chloride, percolate, nitrate, and sulfate solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1750-1759.
 40. 김필주, 이도경, 정덕영. 1997. 토양구조변화에 따른 시설재배지 토양내 염류집적. *한국토양비료학회지*. 투고중.
 41. 농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법. 농업기술연구소.
 42. 농림수산부. 1996. 작물통계(1995년산)
 43. 박무언, 유순호. 1981. 가시 생물공극이 토양의 투수계수에 미치는 영향. *한국토양비료학회지*. 14(2):64-69.
 44. 신원교, 박중춘. 1988. VIII. 시설재배 토양의 염류집적과 제염효과에 관한 연구, *농사시험 연구 보고서* 22(1):209-222
 45. 신원교. 1988. 시설원예지 토양의 염류집적과 장애 및 제염효과에 관한 연구. 서울대 박사논문.
 46. 유관식, 유순호, 송관철. 1994. 토양수분조건에 따른 Ca, Mg과 K의 이동. *한국토양비료학회지*. 27(4):255-262.
 47. 유순호, 이강만, 신용화. 1974. 비닐하우스내 토양의 이화학적질에 관하여, *한국토양비료학회지* 7(4):227-234
 48. 유순호. 1977. 밭토양의 물리성과 가리. *한국토양비료학회지* 10:189-201.
 49. 육창수, 김재정, 홍순달, 강보구. 1993. 충북지역 시설원예재배지 토양의 염류집적 실태조사. *한국토양비료학회지* 26(3):172-180
 50. 이상은, 박준규, 윤정희, 김만수. 1987. 비닐하우스 토양 화학적 특성에 관한 연구. *농사신문집*. 29(1):166-171.
 51. 이상은, 이강만. 1985. 시설원예지 염류집적토양에 대한 화학적 특성조사, *농사시험 연구보고서* (농기연) 1985:318-329
 52. 정구복, 유인수, 김복영. 1994. 충북부지역 시설원예지 토양의 토성, 염농도 및 화학성분의 조성, *한국토양비료학회지* 27(1):33-40
 53. 정영상, 유순호. 1975. 관수에 의한 비닐하우스내 토양의 제염. *한국토양비료학회지* 8(2):53-60.
 54. 조백현 외 14인. 1996. 삼정 토양학. 향문사. pp178-179.
 55. 최병주, 이종호, 박훈. 1990. 시설원예작물의 생리장애 유발 토양원인 연구, 1. 토마토, 무, 배추. *한국토양비료학회지* 23(2): 128-134.