

## 시설하우스 폐양액의 토양 처리에 따른 질소 및 인의 이동

양재의 · 박창진<sup>1)</sup> · 옥용식\* · 유경열 · 김경희<sup>2)</sup>

강원대학교 자원생물환경학과, <sup>1)</sup>KT&G 중앙연구원, <sup>2)</sup>강원도 농업기술원  
(2005년 3월 4일 접수, 2005년 5월 31일 수리)

### Fate of Nitrogen and Phosphorous in Hydroponic Waste Solution Applied to the Upland Soils

Jae E. Yang, Chang-Jin Park<sup>1)</sup>, Yong-Sik Ok\*, Kyung-Yoal Yoo, and Kyung-Hee Kim<sup>2)</sup> (Division of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea, <sup>1)</sup>Central Research Institute, KT&G, Suwon 441-840, Korea, <sup>2)</sup>Gangwon Agricultural Research and Extension Services, Chuncheon 210-702, Korea)

**ABSTRACT:** Objective of this research was to evaluate the fate of nitrogen and phosphorous in hydroponic waste solution from the plastic film house cultivation applied to the upland soil by column leaching and field experiments. The pH and EC of leachate were decreased by the reaction with the upland soil in the column leaching experiment. The EC and concentrations of H<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> of leachate were decreased as the column length (soil depth) was increased. But, these were increased as the amounts of the hydroponic waste solution were increased. Field experiment growing red pepper (*Capsicum annum* L.) to monitor the nutrients movement using ion exchange resin capsule demonstrated that the nutrients concentration of soil solution was increased in the orders of PO<sub>4</sub>-P < NH<sub>4</sub>-N < NO<sub>3</sub>-N. Nitrate concentration of resin capsule inserted into the soil was relatively higher than other nutrients (NH<sub>4</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P) at the 45 cm of soil depth. The overall results demonstrated that the hydroponic waste solution could be recycled as plant nutrients to enhance fertility of soils. But, nitrate leaching was a major factor for safe use of the hydroponic waste solution in soil.

**Key Words:** hydroponic waste solution, nutrient, nitrate, column leaching, ion exchange resin capsule

### 서 론

양액재배란 토양이 없는 상태에서 생육에 요구되는 무기 양분을 용해시킨 수용액을 이용해 작물을 재배하는 시설재배의 한 형태로 배지 유무에 따라 고품배지경과 순수수경으로 분류된다. 우리나라에서는 고품배지경 중 펄라이트를 이용한 재배 방식이 가장 널리 이용되고 있다<sup>1)</sup>. 양액재배 기술은 국제적으로 원예 산업을 선도해 나가고 있는 첨단기술로서 작물 생산성의 극대화, 고품질화, 연작장해 극복, 토양 및 수질 오염 극소화 등을 이룰 수 있는 환경친화적 기술이다. 유럽의 온실재배 면적 중 양액재배 면적이 차지하는 비율은 네덜란드, 벨기에, 덴마크, 스웨덴, 프랑스의 경우 약 50% 이상을 차지하고 있다. 특히, 네덜란드는 2000년까지 온실 내 작물 재배를 토양 재배에서 100% 양액재배로 전환한다는 목표 하

에 범국가적인 노력을 기울여왔다. 우리나라의 경우도 2002년을 기준으로 한 양액재배 면적은 전체 시설면적의 약 1%를 차지하는 720 ha 수준에서 2020년에는 5% 이상으로 증가될 것으로 예측되고 있다<sup>2)</sup>.

현재 우리나라의 경우 양액재배와 관련된 직접적인 규제는 없지만 수질환경보전법 상 산업체 폐수 배출기준을 총 질소 60 mg L<sup>-1</sup> 및 총 인 8 mg L<sup>-1</sup> 이하로 규정하고 있다<sup>3)</sup>. 현재 우리나라의 양액재배 현황으로 볼 때 그 면적이 수질환경에 영향을 미칠 정도로 크지는 않지만 양액재배 면적이 급속히 확대되고 배출되는 폐양액의 양이 증가될 경우 허용기준을 초과할 우려가 있으므로 향후 우리나라에서도 양액재배 시 양액의 외부 유출에 대한 규제가 필요할 것으로 예상된다. 일례로 Van Os<sup>4)</sup> 등이 보고한 바에 의하면 비순환식재배로 인한 비료의 손실량은 토마토 재배의 경우 배액량 20% 수준에서 연간 ha당 질소 147 kg, 인산 71 kg, 칼리 282 kg, 칼슘 126 kg, 마그네슘 60 kg 정도이므로 양액재배 시설에 따라 발생량의 차이는 있으나 비료의 손실과 환경오염에 대한

\*연락처:

Tel: +82-33-255-9167 Fax: +82-33-241-6640

E-mail: soilok@kangwon.ac.kr

문제를 제기하게 된다. 이러한 관점에서 폐양액은 오염배출 물질로 규정될 수 있으나 폐양액 내에 함유된 비료적 가치가 높은 염류를 농업적으로 재활용할 경우 일반 화학비료의 대체 효과는 매우 클 것으로 판단할 수 있다.

토양은 오염물질의 유입에 대한 완충능력과 유입된 오염물질에 대한 자정능력이 있는 것으로 알려져 있다<sup>5)</sup>. 오염물질에 대한 토양의 완충작용은 유기 및 무기 오염원에 대한 흡착, 고정화, 착화합물형성, 킬레이트화 등의 작용에 의해 이루어지며 이는 주로 토성, 유기물, 산화물 등의 인자에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 오염물질에 대한 토양의 자정작용으로는 유기 및 무기 오염물질의 산화환원 반응에 의한 화학적 분해 과정과 토양 미생물에 의한 생물학적 분해 과정 등을 들 수 있다<sup>5,6)</sup>. 위에서 언급한 작용을 근간으로 하는 대표적 토양 정화방법으로는 트렌치(trench) 법이 있으며 정화시설이 설치되어 있지 않은 지역에서 주로 사용된다.

본 연구에서는 시설하우스 폐양액의 토양 투여에 따른 양분의 처리 효율을 평가하고 혼합이온교환수지캡슐을 이용하여 토양 중 양분이동 특성을 평가함으로써 폐양액의 친환경적 처리 방안을 제시하고자 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 시설하우스 폐양액

본 시험에 사용한 시설하우스 폐양액은 강원도 농업기술원의 시설하우스에서 방울토마토 재배에 사용된 폐양액으로 그 물리화학적 특성은 Table 1과 같다. 실험 대상 지역은 강

원도 춘천시 유포리에 위치한 강원대학교 부속 농장으로 선정하였고 동일한 지역에서 토양 시료를 채취하여 컬럼 시험에 사용하였다. 공시 토양의 물리화학적 특성은 Table 2와 같고 폐양액과 토양 시료는 각각 수질오염공정시험법<sup>7)</sup>과 토양화학분석법<sup>8)</sup>에 준하여 분석하였다.

### 컬럼 용탈시험

시험에 사용된 컬럼은 직경 5.5 cm의 투명 아크릴을 이용하여 제작하였고 공시 토양은 각각 20 cm, 30 cm, 40 cm 및 50 cm 길이로 충전하였다. 토양의 용적밀도는 1.2 g cm<sup>-3</sup>로 동일하게 조절하였다. 시설하우스 폐양액은 1회 400 ml, 총 3회 관주하였고 토양을 통과하여 용출되는 용액은 플라스틱 수기에 받은 후 pH, EC, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, K 등의 농도를 측정하였다.

### 혼합이온교환수지캡슐을 이용한 양분이동 평가

폐양액의 현장적용 시험을 위하여 강원도 춘천시 유포리에 위치한 강원대학교 부속 농장에 포장을 설치하였고 공시작물로는 고추를 선정하였다. 폐양액의 현장적용 시험은 화학비료 100% 처리구(A), 화학비료 70% + 폐양액 30% 처리구(B), 화학비료 50% + 폐양액 50% 처리구(C), 폐양액 100% 처리구(D), 무처리구(E)를 각각 3반복으로 처리하였다(Table 3). 화학비료 및 폐양액을 처리한 후 각 처리 토양 중 양분의 이동 특성을 평가하기 위하여 30 cm와 45 cm 깊이에 각각 혼합이온교환수지캡슐을 설치하였다(Fig. 1). 혼합이온교환수지는 2주일 간격으로 교체하였으며 수거한 혼합이온교환수지는 2M

Table 1. Chemical properties of the hydroponic waste solution used in the experiment

pH	EC (dS/m)	PO <sub>4</sub> -P	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	K	Ca	Mg
----- mg/L -----							
5.62	5.31	7.16	15.47	97.19	397.25	5.10	91.03

Table 2. Chemical properties of soil used in the experiment

pH	EC (μS/cm)	OM <sup>a)</sup> (%)	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>b)</sup>	K	Ca	Mg	Na	CEC
----- mg/kg -----										
----- cmol <sub>c</sub> /kg -----										
6.68	0.50	3.86	3.75	71.56	443	0.33	2.87	1.84	0.09	11.68

a) Organic matter

b) Available P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Table 3. Hydroponic waste solution application rates for red pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation experiment

Treatment	Fertilizer application
A	chemical Fertilizer 100% (20-20-24 as N-P-K)
B	chemical Fertilizer 70% + waste hydroponic solution 30%
C	chemical Fertilizer 50% + waste hydroponic solution 50%
D	waste hydroponic solution 100%
E	control

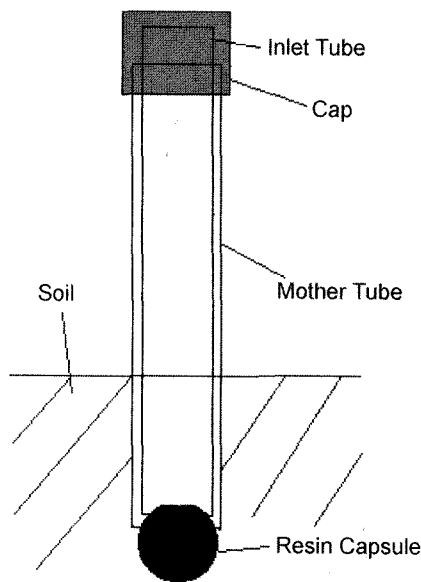


Fig. 1. Ion exchange resin capsule system used in the experiment.

HCl 용액을 이용하여 추출하였다<sup>9)</sup>. 추출 용액 중  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 농도는 Automated Ion Analyzer(LACHAT Quik-Chem 8000, USA)를 이용하여 측정하였다.

### 결과 및 고찰

#### 컬럼 용탈시험

시설 하우스 폐양액의 토양 처리에 따른 폐양액 내 존재하는 양분의 토양 이동 특성과 폐양액 처리 전·후 토양의 물리화학적 특성 변화를 평가하기 위하여 컬럼 용탈 시험을 수행하였다. 컬럼 시험은 폐양액의 토양 처리 효과를 평가하기

위한 모사 시험으로 토양층의 깊이를 달리하여 폐양액이 토양에 처리되었을 때 토양과 유출수 중 양분의 농도 변화를 조사하였다. 양분의 이동은 이온의 하전 특성과  $\text{NH}_4^+$  등 양이온을 흡착하는 토양의 특성 즉, CEC, 점토 및 유기물 함량 등에 의해 영향을 받는다<sup>10,11)</sup>. 양이온의 경우 음전하를 띠는 토양의 표면에 흡착될 수 있기 때문에 토양에 흡착되는 양은 토양의 CEC 및 토양 용액과 토양 간의 분배계수에 의해 결정된다. 그러나  $\text{NO}_3^-$ 와 같은 음이온의 경우 대부분이 토양에 흡착되지 않고 토양 용액에 잔류하고 있기 때문에  $\text{NO}_3^-$ 의 이동은 토양 용액의 이동 방향과 일치하게 된다<sup>10)</sup>. 예외적으로  $\text{PO}_4^{3-}$ 의 경우 토양 용액 중의  $\text{Ca}^{2+}$  혹은  $\text{Al}^{3+}$ 과의 결합력이 크기 때문에 이들 이온과 쉽게 반응하여 토양에 고정화되거나 침전된 형태로 존재한다<sup>12)</sup>.

Fig. 2는 컬럼 내 토양층의 깊이와 폐양액의 관주 회수에 따른 유출수 중의 pH와 EC의 변화를 나타낸다. 컬럼 길이가 증가함에 따라 pH는 대체적으로 감소하였고 관주 회수가 증가함에 따라 pH가 증가하였다. 컬럼 길이가 증가함에 따라 유출수의 pH가 감소한 것은 폐양액 중 함유된 양이온이 토양 표면에 흡착된  $\text{H}^+$  이온과 교환되면서 유출수 중  $\text{H}^+$  농도가 증가하였기 때문인 것으로 판단되었고 관주 회수의 증가에 따른 유출수의 pH 증가는 관주 회수가 증가할수록 폐양액 내 양이온과 토양 내  $\text{H}^+$  이온의 교환에 의해 용출되는  $\text{H}^+$  이온의 양이 감소하였기 때문으로 판단되었다<sup>13)</sup>. EC는 컬럼 길이가 증가할수록 감소하였는데 이는 폐양액 중 염류의 상당 부분이 토양에 흡착되었기 때문으로 판단되었다. 폐양액의 관주 회수가 증가할수록 침출되어 나오는 용액의 EC는 증가하였는데 이는 폐양액 중 이온이 토양 CEC 및 AEC를 점차적으로 포화시켜 토양의 흡착능력을 감소시켰기 때문으로 판단되었다<sup>14)</sup>. 초기 폐양액의 EC는  $5.31 \text{ dS m}^{-1}$ 에서 컬럼 길이 50 cm, 1회 관주 시에  $3.87 \text{ dS m}^{-1}$ 로 가장 큰 폭으로 감소하였다.

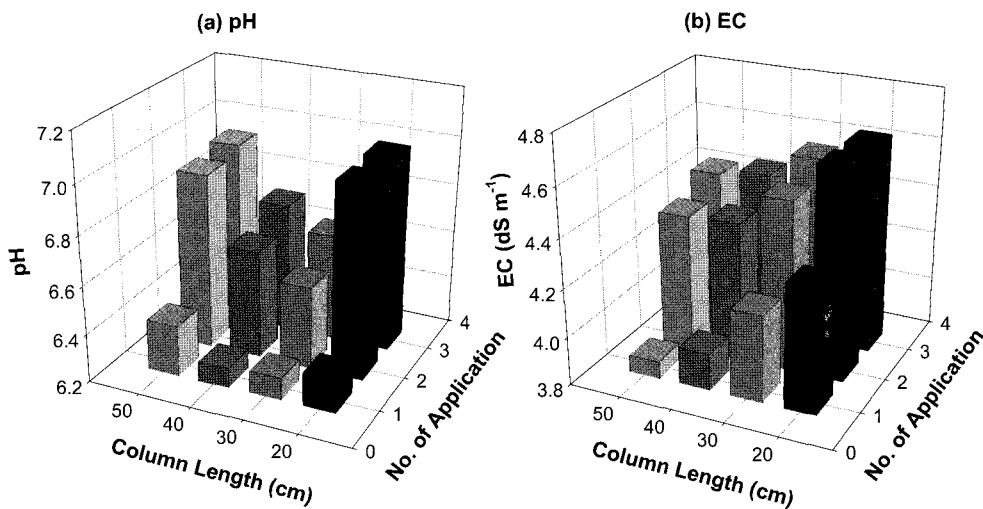


Fig. 2. Changes of pH and EC in the leachate with column length and amounts of hydroponic waste solution.

Fig. 3은 컬럼 길이와 폐양액 관주회수에 따른 토양 중  $\text{NH}_4\text{-N}$ 와  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도 변화를 나타낸다.  $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 컬럼 길이가 증가할수록 관주 회수가 감소할수록 감소하였는데 컬럼 길이 50 cm, 1회 관주 시에  $1.47 \text{ mg L}^{-1}$ 로 감소하였다.  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 경우 대부분이 토양 흡착에 의해 제거된 것으로 판단되었다. 이는 토양 1 kg 당 14 mg의  $\text{NH}_4\text{-N}$ 를 제거한 것으로  $1 \text{ m}^2$  토양에 처리시 50 cm 깊이에서 8.4 kg의  $\text{NH}_4\text{-N}$ 를 흡착할 수 있다. 이 경우 흡착된  $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 작물이 직접적으로 이용할 수 있는 무기태 질소의 형태로 토양에 존재하므로 작물에게 지속적으로 공급 가능하다. 그러나 관주가 계속될 경우 그 제거율은 감소하였는데 이는 폐양액 중의 양이온이 토양의 양이온교환능력을 포화시킨 것이 주된 원인이며 부가적으로 토양에 흡착되었던  $\text{NH}_4^+$  이온이  $\text{K}^+$ 와 같

은 다른 양이온과 교환되거나 다른 이온보다 토양과의 결합력이 약해 탈착된 것으로 판단된다<sup>5)</sup>. 이 현상은 각 이온에 대한 선택성의 차로 설명할 수 있으며 이러한 차이에 의해 각 이온과 토양의 결합력은 달라지게 된다<sup>5,15)</sup>. 음이온 형태인  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우 초기 폐양액의 양과 비교할 때 약 2/3 가량 제거되는 것으로 나타났으며 관주회수가 증가함에 따라 제거량은 감소하였다.

Fig. 4는 컬럼 길이와 폐양액의 관주 회수에 따른 토양 중  $\text{K}^+$ 와  $\text{PO}_4\text{-P}$  농도 변화를 나타낸다.  $\text{K}^+$ 는  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 경우와 마찬가지로 컬럼 길이가 길수록 관주 회수가 적을수록 감소하였다. 그러나  $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 비교할 때 제거 효율이 높아 관주 회수가 증가하여도 지속적으로 감소하였다. 이는  $\text{K}^+$  이온이  $\text{NH}_4\text{-N}$  보다 토양에 더 강하게 흡착되기 때문인 것으로 판

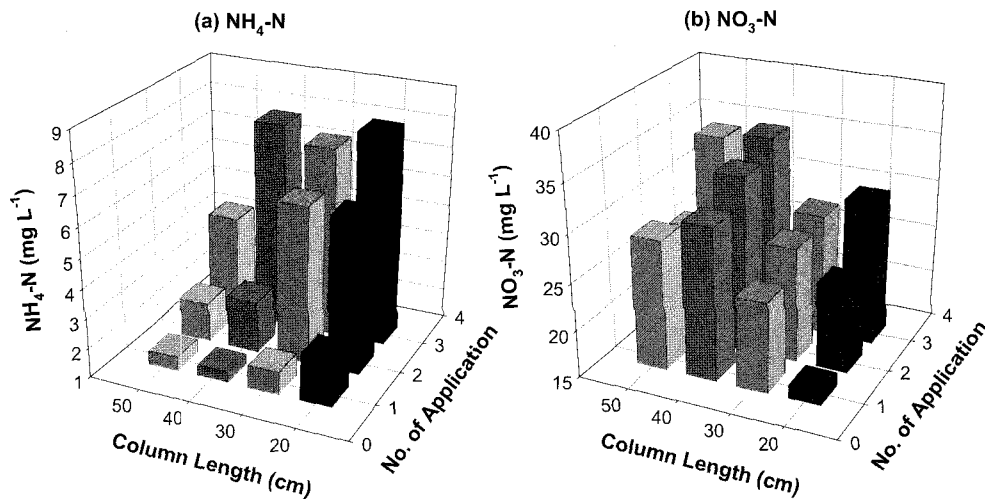


Fig. 3. Changes of concentrations of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{NO}_3\text{-N}$  in leachate with column length and amounts of hydroponic waste solution.

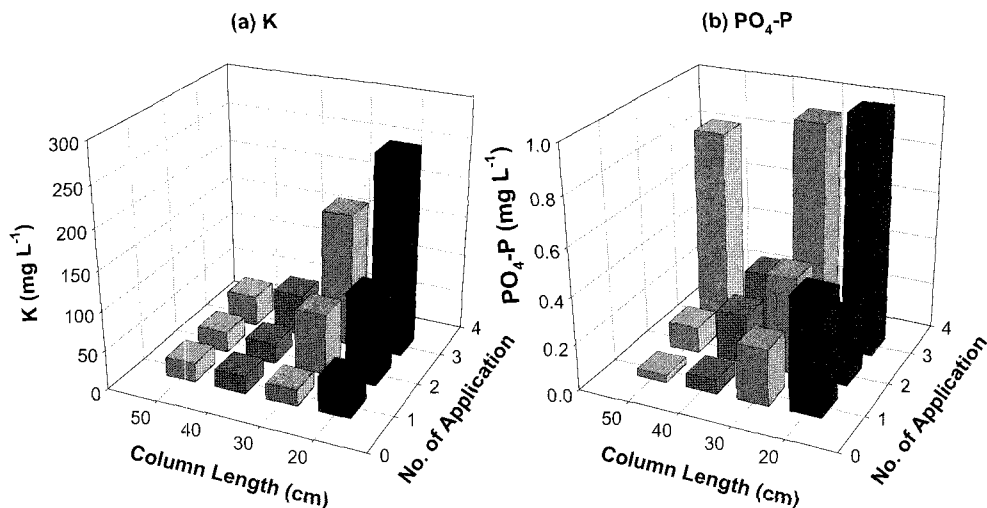


Fig. 4. Changes of concentrations of  $\text{K}^+$  and  $\text{PO}_4\text{-P}$  in leachate with column length and amounts of hydroponic waste solution.

단되었다<sup>5,15</sup>). 인산의 경우는 음이온임에도 불구하고 많은 양이 제거되었는데 대부분이 흡착보다는 고정화나 침전에 의한 것으로 판단되었다. Weaver and Ritchie<sup>16</sup>)는 돈분뇨의 용탈 시험에서 대부분의 인이 토양의 표층부(4 cm)에 집적되며 60~90 cm에서는 처리량의 13%가 검출되는 것으로 보고하였다. 인의 이러한 특성은 폐양액의 토양 처리에 따른 지하수의 부영양화 발생 가능성이 희박함을 간접적으로 증명해주는 것으로 판단되었고 그 경향은 포장에서의 시험 결과에서도 유사하게 나타났다<sup>17</sup>).

**혼합이온교환수지캡슐을 이용한 양분이동 평가**

혼합이온교환수지는 토양 내 염류의 이동 및 분포를 검정하기 위한 도구로 개발되어 활용되고 있으며 이 방법은 토양에 존재하는 식물양분에 대하여 비파괴적인 방법으로 생물유효태 농도를 검정할 수 있는 장점이 있다<sup>18-20</sup>). Fig. 5, 6, 7은 혼합이온교환수지를 이용하여 토양 내 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P의 농도 변화를 측정된 결과를 나타낸다. NH<sub>4</sub>-N의 경우 45 cm 보다 30 cm 깊이에서 농도가 높은 것으로 조사되었는데 이는 NH<sub>4</sub>-N가 토양에 강하게 흡착되어 폐양액을 관주하였을 때 지하부로의 이동성이 낮았기 때문인 것으로 판단되었다<sup>12</sup>). 여름철 집중 강우기인 8월 4일의 경우 45 cm에서 NH<sub>4</sub>-N의 농도가 높았는데 이는 상대적으로 많은 양의 강우에 의해 NH<sub>4</sub>-N의 일부가 하부로 이동되었기 때문인 것

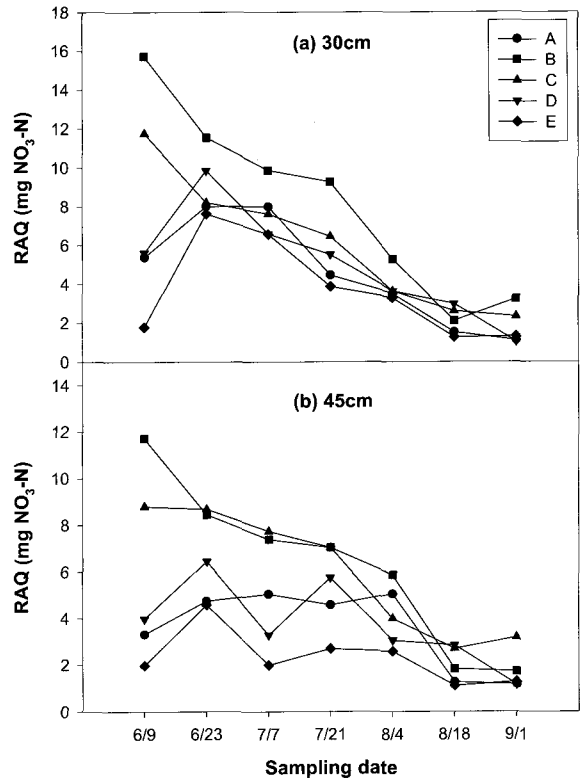


Fig. 6. Changes in RAQ (Resin Adsorption Quantity) of NO<sub>3</sub>-N at different soil depth with sampling time.

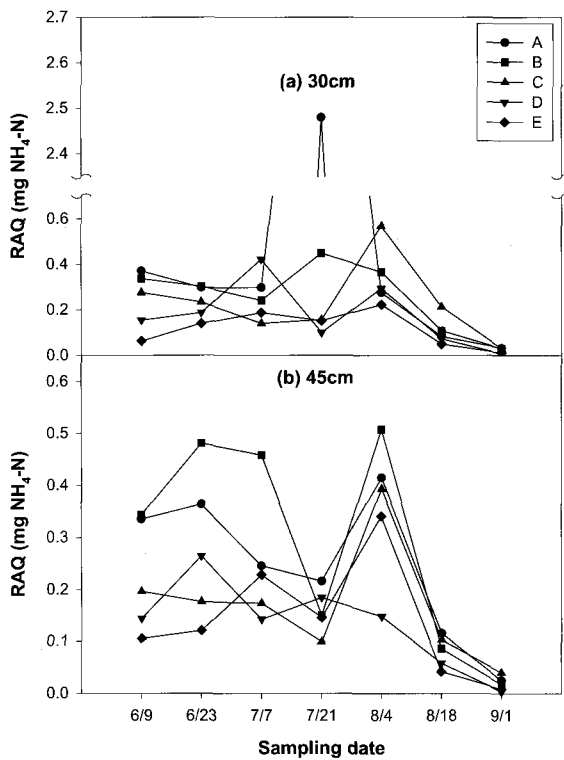


Fig. 5. Changes in RAQ (Resin Adsorption Quantity) of NH<sub>4</sub>-N at different soil depth with sampling time.

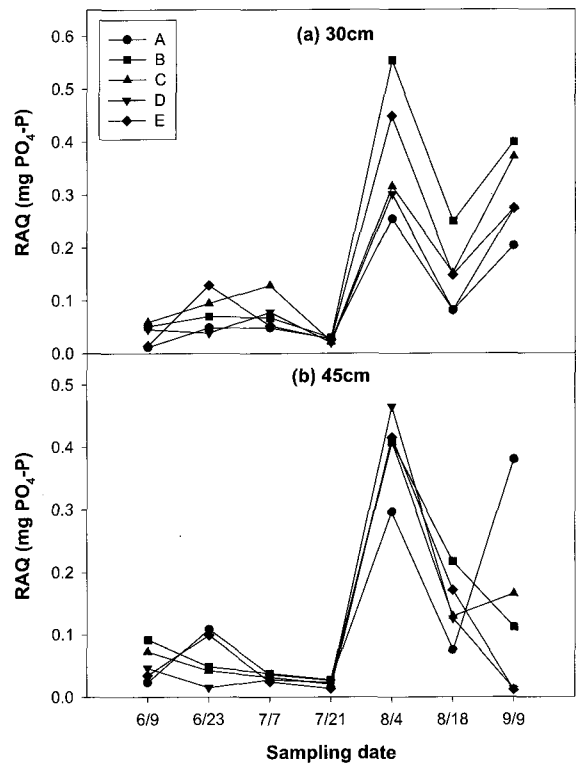


Fig. 7. Changes in RAQ (Resin Adsorption Quantity) of PO<sub>4</sub>-P at different soil depth with sampling time.

으로 판단되었다. 각 처리구별로 생물유효성  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도는 30 cm 및 45 cm 모두에서 대체적으로 화학비료 70% + 폐양액 30% 처리구  $\approx$  화학비료 100% 처리구 > 화학비료 50% + 폐양액 50% 처리구 > 폐양액 100% 처리구 > 무처리구 순으로 나타났다.  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우 30 cm와 45 cm 간의 차이가 크지 않았는데 이는  $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 비교할 때  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 이동성이 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단되었으며 화학비료 100% 처리구의 초기에  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 양이 낮은 것은 요소 비료를 시비하였기 때문인 것으로 판단되었다. 다른 처리구와 비교할 때 화학비료 100% 처리구 보다  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 높았는데 이는 양액 내에 존재하는  $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 함께 양액의 관개 효과에 의한 질산화 작용의 촉진에 기인한 것으로 판단되었다. 한편 시간이 경과함에 따라  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 양은 점차적으로 감소하였고 특히 30 cm의 경우 이러한 현상이 더욱 뚜렷하였는데 이는 작물이 생장을 하기 위하여 필요한 질소 성분을 흡수한 것과 수분의 이동 방향과 동일하게 이동하는  $\text{NO}_3^-$  이온의 용탈 특성에 의한 것으로 판단되었다<sup>13)</sup>.  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우 지하수로 이동될 수 있을 것으로 판단되어 폐양액의 토양 처리를 제한할 수 있는 주요한 인자로 작용하는 것으로 판단되었다<sup>10)</sup>. 반면에 인산의 경우는 30 cm와 45 cm 모두에서 토양 용액 중 다른 이온의 농도보다 낮은 것으로 조사되어  $\text{PO}_4^{3-}$  이온이 지하수로 유입될 가능성은 매우 낮을 것으로 판단되었다.

### 요 약

본 연구에서는 폐양액의 토양 처리에 따른 토양의 이화학적 특성 변화를 조사하고 혼합이온교환수지를 이용하여 토양 깊이에 따른 양분의 이동 및 농도 변화를 평가함으로써 폐양액이 토양에 미칠 수 있는 영향을 평가하고자 하였다. 폐양액을 토양에 처리한 경우 토양 중  $\text{H}^+$  이온과 폐양액의 양이온이 교환되어 토양을 통과한 폐양액의 pH와 EC는 감소하였다. 컬럼 시험 결과 폐양액의 EC, 암모늄태 질소 및  $\text{K}^+$ 는 컬럼 길이가 길어질수록 감소하였고 관주 횟수가 증가할수록 제거율이 감소하였다. 이러한 현상은 폐양액 중의 양분이 토양층을 통과하며 양이온교환용량을 포화시켰기 때문이며 따라서 토양의 양이온교환용량과 염기포화도는 폐양액의 처리 효율과 처리용량을 결정하는 주요인으로 판단되었다. 질산태 질소의 경우 초기 폐양액 농도의 약 2/3 정도가 감소하였고 컬럼 길이보다는 관주 회수에 더 큰 영향을 받았다. 인산의 경우 제거효율이 높았으며 대부분이 고정화 혹은 침전 반응에 의한 것으로 판단되었다. 고추재배 포장에 폐양액을 처리한 경우 질소 및 인은  $\text{NO}_3\text{-N} > \text{NH}_4\text{-N} > \text{PO}_4\text{-P}$  순으로 토양 용액에 존재하는 것으로 조사되었고 질산태 질소의 경우 45 cm 깊이에서도 농도가 높게 나타나 지하수로의 이동 가능성을 확인할 수 있었다. 따라서 질산태 질소의 경우 폐양액의 토양 처리를 제한할 수 있는 주요한 인자로 작용하는

것으로 사료된다. 인산의 경우 30 cm와 45 cm 모두에서 농도가 낮게 나타나 표층에서 대부분이 제거되는 것으로 확인되어 인산 이온이 지하수로 유입될 가능성은 매우 낮을 것으로 판단되었다.

### 참고문헌

1. Seo, B. C. (1999) Future prospects and counter-measures for hydroponics in 21C, *J. Hort. Sci. Technol.* 17, 796-802.
2. 김목원 (2000) 원예시설 산업의 발전과정과 현황 및 문제점, 한국시설원예연구회 제13회 심포지엄 proceeding, p.43-55.
3. MOE (1999) Water conservation act, Ministry of Environment, Gyeonggi-do, Korea, p.1-150.
4. Van Os, E. A. (1994) Closed growing systems for more efficient and environmental friendly production, *Acta Horticulturae* 396, p.25-32
5. Sparks, D. L. (2003) Environmental soil chemistry, 2nd ed., Academic Press, Inc., San Diego, USA, p.1-352.
6. Salomons, W., Förstner, U., and Mader, P. (1995) Heavy metal: problems and solutions, Springer-Verlag, Berlin, Germany, p.1-412.
7. MOE (2000) Korea standard methods for water quality, Ministry of Environment, Gyeonggi-do, Korea.
8. NIAST (1988) Methods of soil chemical analysis, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
9. Yang, J. E., Skogley, E. O., and Schaff, B. E. (1991) Nutrient flux to mixed-bed ion exchange resin: temperature effects, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 762-767.
10. Ok, Y. S., Lim, S. K., and Kim, J. G. (2002) Electrochemical properties of soils: principles and applications, *Life Sci. Nat. Resour. Res.* 10, 69-84.
11. Ok, Y. S., Choi, Y. S., Lee, S. E., Lim, S. K., Chung, N. H., and Kim, J. G. (2001) Effects of soil components and index ion on the surface charge characteristics of some Korean arable soils, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 34(4), 237-244.
12. Yoon, Y., Ok, Y. S., Kim, D. Y., and Kim, J. G. (2004) Agricultural recycling of the by-product concentrate of livestock wastewater treatment plant processed with VSEP RO and bio-ceramic SBR, *Water Sci. Technol.* 49(5-6), 405-412.
13. Miller, R. W. and Donahue, R. L. (1990) Soils: an

- introduction to soils and plant growth, Prectice-Hall, USA, p.95-106.
14. Bohn, H. L., McNeal, B. L. and O'connor, G. A. (1979) Soil chemistry, John Wiley and Sons, USA, p.185-192.
  15. Helfferich, F. (1962) Ion exchange kinetics: III. experimental test of the theory of particle-diffusion controlled ion exchange, *J. Phys. Chem.* 66, 39-44.
  16. Weaver, D. M. and Ritchie, G. S. P. (1994) Phosphorus leaching in soils amended with piggery effluent or lime residues from effluent treatment, *Environ. Poll.* 84, 227-235.
  17. Park, C. J., Yang, J. E., Kim, K. H., Yoo, K. Y., and Ok, Y. S. (2005) Recycling of hydroponic waste solution for red pepper (*Capsicum annum* L.) growth, *Korean J. Environ. Agric.* 24(1), 24-28.
  18. Yang, J. E., Skogley, E. O., Georgitis, S. J., Schaff, B. E. and Ferguson, A. H. (1991) Phytoavailability soil test: development and verification of theory, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 1358-1365.
  19. Yang, J. E., Park, C. J., Kim, D. K., Ok, Y. S., Ryu, K. R., Lee, J. Y., and Zhang, Y. S. (2004) Development of mixed-bed ion exchange resin capsule for water quality monitoring, *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 47(3), 344-350.
  20. Yang, J. E., and Skogley, E. O. (1992) Diffusion kinetics of multinutrient accumulation by mixed-bed ion exchange resin, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 408-414.
-