윤답전환형태로 운영되는 시설재배지 토양의 인산수지의 특성

김필주 · 이창훈 · 이용복

(경상대학교 농업생명과학대 환경생명화학 전공)

Phosphorus Balance in Plastic Film House Soil Under Rotating System between Upland and Paddy Type

Kim, Pil-Joo · Lee, Chang-Hoon · Lee, Young-Bok

Dept. of Agricultural Chemistry, College of Agriculture, Gyeongsang National University

적 요

남부지방을 중심으로 많은 시설재배지가 염류집적의 문제를 해결하기 위해 윤답전환체계로 운영되고 있으며, 이는 토양내 염류제거 효과는 있을 것으로 예상되나 양분유출에 의한 2차 환경오염을 심화시킬것으로 예상되어왔다. 본 연구에서는 윤답전환 과정 중 발생될 것으로 예상되는 다양한 문제들 중에서, 토양내 인산의 분포특성 변화를 현장조사 통해 비교하고, Pot 재배시험을 통해 윤답전환과정 중 유출되는 인산 량을 인산수지특성 분석을 통해 산출하였다.

1. 시설재배지 관리 유형에 따른 인산의 분포특성

전인(T-P) 함량은 윤답전환지(RS)의 표층토가 비윤답전환지(NRS)에 비해 약 850㎎ ㎏-1 낮았으며, 이러한 경향은 심토까지 계속되었다. 축적인산의 약 90% 이상은 Inorganic-P의 형태이었으며, T-P에서와 같이 RS가 NRS에 비해 낮은 농도로 분포하였다. RS에서 Organic-P는 NRS에서와 달리 깊이가 깊어짐에 따라 점점 증가하여 윤답전환지에서 인산이 상당 부분 Organic-P의 형태로 이행되고 있음을 예측할 수 있었다. Ca-P와 W-P는 전 토양깊이에서 RS가 NRS에 비해 낮았으나 Al-P는 두 형태간 큰 차이가 없었다. 이에 반해 Fe-P는 RS가 NRS에 비해 높은 농도로 분포하였으며 20~40 ㎝ 사이에 가장 높은 농도로 분포하여 논 토양 조건에서 영향을 받은 것으로 판단되었다. 결과적으로 윤답전환에 의한 약간의 T-P의 감소는 주로 W-P, Ca-P와 Organic-P 형태로 이동되었던 것으로 간접 해석되었다.

2. 시설재배지 운영형태별 인산수지 특성

윤답전환방식(RS)으로 운영되고 있는 시설재배지 토양내 인산수지특성을 Pot 재배를 통해 비윤답전환지(NRS)와 비교하였다. 윤답전환시 화학비료와 퇴비를 통해 65㎏ P ha-1의 인산이 투입되었으며, 이중 51%가 작물에 의해 흡수 이용되었으며 투입량의 약 61%가 침출수를 통해 유출되었다. 결과적으로 인산수지는 -8.6㎏ P ha-1로 공급량보다 제거량이 많아 토양내 인산제거에 효과가 있었다. 침출수를 통한 인산의 유출농도는 재배초기 10㎎ P L-1 이상을 상당기간 유지하였으며, 전 재배기간동안 2-4㎎ P L-1의 인산 용출이 계속되어 일반 논 토양에 비해 높은 인산유출이 지속되었다. 그러나 비윤답전환지에서 공급인산의 약 34%가 작물에 의해 흡수 이용되고 나머지 43.1㎏ P ha-1로 토양내 지속적으로 축적되는 것으로 조사되었다. 결과적으로 윤답전환방식은 토양내 축적인산의 효과적 제거에는 효과적이었으나 인산유출에 의한 2차 환경오염을 크게 가중시키는 것으로 조사되었다. 따라서 토양내 인산 축적을 저감하기 위해 윤답전환방식의 토지이용보다는 시비인산의 이용율 향상을 통한 시비량 저감방안의 노력이 필요할 것으로 평가되었다.

I. 서론

전국 시설재배지의 70% 이상이 분포된 경남북과 전남북의 시설재배지중 상당부분은 토양내 과다 축적된 염류를 제거하기 위해 답전윤환 형태의 영농을 실시하고 있다. 특히 진주지역 시설재배지중 대형 연동 비닐하우스 조건을 제외한 단동 비닐하우스의 거의 대부분은 답전윤환을 실시하고 있다. 즉, 동절기동안 비닐하우스 조건에서 호박, 멜론, 수박 등을 2~3차례 집약재배 후 6월 하순경 비닐을 걷어내고 조생종 벼를 이앙 10월초 수확하는 형태를 취하고 있다. 그리고 연동 비닐하우스의 상당부분도 연중 약 1~2달 정도 환수제염을 실시하고 있는 현실이다. 즉 고추 피망 등의 장기생육작물을 재배하고 휴경기 동안 물을 가두어 제염을 반복실시하고 있다. 이 과정에서 토양내 가용성 염류는 물에 의해 세척되어 일부 용탈(Leaching) 및 유거(Washing)에 의해 수계로 유입되고, 일부 작물에 의해 흡수제거될 것으로 예상되나 이에 대한 정량적 조사사례는 아직 없는 형편이다. 특히 하천 부영양화의 주요 원인물질이며 토양내 과도하게 축적되어 문제가 되고 있는 난용성 인산이 논 상태로 운영되는 과정중 산화환원전위(Redox) 변화에 의해 용해도가 크게 증대되어 유출량이 크게 증가(Gotoh and Patrict, 1974; Moore and Reddy, 1994; Olila and Reddy, 1997; Patrick,1964; Patrick and Henderson, 1981)할 것으로 예상되나 이에 대한 연구가 거의 되어 있지 못한 상태이다.

본 연구는 답전윤환과 비답전윤환의 영농형태로 운영되는 시설재배지 토양을 대상으로 각 작물의 재배시기별 인산수지(Phosphorus Balance)특성을 조사하였다. 이를 위해 본 연구실에서 기초 조사를 실시한 경남 진주지역 시설재배지 중 답전윤환과 비답전윤환 형태로 운영되고 있는 대표포장의 토양을 선발하였다. 연구를 위한 토양내 인산분포특성에 대한 정밀조사를 실시하고 현장조건과 근접하게 Macro-pot를 설치하여 농가에서 행하고 있는 포장관리방법에 준하여 작물을 재배하고자 한다. Macro-pot 상태에서 각 작기 별, 논과 밭의 토양유형별 인산의 분배 및 수지특성을 정밀조사하고, 답전윤환지로부터 유출되는 인산의 양을 조사하여 환경평가를 실시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서는 ① 경남 진주지역내 시설재배지 중 윤답전환식으로 운영되고 있는 포장내 인산의 분포특성을 비윤답전환지와 비교하였으며, ② 윤답전환시 유출되는 인산량과 식물체의 인산이용량을 각각 산정하여 인산수지(P balance)특성을 다음과 같은 방법으로 조사하였다.

가. 윤답전환 시설재배지 토양내 인산분포조사

경남 진주시 대곡면내 시설재배지 중 윤답전환지(RS)와 비윤답전환(NRS) 형태의 농가포장을 각각 22곳과 20곳을 선정하였다(표 1). 조사대상 윤답전환지 시설재배지의 대부분은 10년 이상 시설재배를 실시하고 있었으며 단동형태로 운영되고 있었다. 주요 재배작물은 시대의 요구도 및 토양의 이화학적 특성 변화 등의 환경변화에 따라 다소 바뀌기는 했으나, 조사시기에는 대부분 호박-수박-벼의 연속작물재배 형태로 운영되고 있었다. 이에 반해 비윤답전환지의 대부분 연동식 대형 비닐하우스 형태로 운영되고 있었으며, 평균 6년 정도의 짧은 경작년수를 가지고 있었다. 주요 재배작물은 청고추를 년중 생산하는 단일경종형태로 운영되고 있었다. 본 조사지역은 대단위

Table 1. Cultivation background for rotation and non-rotation farming fields in plastic film houses in Chinju in March 2002

Farming types	Sample size	Cultivated crops and rotation system	Average cultivation period
Rotation	22	Pumpkin-Watermelon-Rice	More than 10 years
Non-rotation	20	Red pepper(single cropping system)	More than 6 years

시설재배단지로서 작물의 생산 및 판매를 조합단위 공동체로 운영되고 있었으며, 퇴비를 포함한 농자재 등을 공동 구매하는 등 서로 비슷한 형태의 농장관리를 실시하고 있었다.

윤답전환지 농가는 대부분 계분과 톱밥이 혼합된 30~40Mg ha^{-1}의 계분퇴비를 기비로 시용하고 있었으며 채소작물(호박과 수박) 재배시 추비로 복합비료(N-P_2O_5-K_2O=21-11-11)를 평균 400~600kg ha^{-1}를 시용하고 있었다. 그러나 제염을 목적으로 운영되고 있는 벼 재배시기에는 추가적인 시비없이 운영되고 있었다. 비윤답전환지에서는 윤답전환지보다 비교적 적은 양의 계분톱밥퇴비와 화학비료가 시용되고 있었으며, 염류집적 등을 미연에 막기 위해 농장관리에 세심한 주의를 기하고 있었다. 평균 20~30Mg ha^{-1}의 계분톱밥퇴비가 기비로 매년 시용되고 있었으며 300~500kg ha^{-1}의 복합비료 (N-P_2O_5-K_2O=21-11-11)가 추비로 사용되고 있었다. 이때 사용된 계분톱밥퇴비의 이화학적 특성 중 전 질소(T-N), 인(P)과 칼리(K)의 함량은 각각 평균 5.1, 5.8, 4.8g kg^{-1}이었다.

이화학적 특성 및 인산의 분포특성을 조사하기 위해 2002년 3월 비영농기에 표층토(0~20㎝)로부터 매 10㎝ 간격으로 지하 80㎝까지 토양시료채취를 채취하여 분석에 이용하였다. 토양은 풍건 후 사분(2mm 이하)하여 이화학적 분석에 이용하였다. 토양 이화학적 특성은 pH(1:5 water extraction), 유기물(Wakley and Black method; Allison 1965), 치환성 Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+(1M NH_4-acetate pH 7.0, AA, Shimazu 660), 유효규산(1M Na-acetate pH 4.0, UV spectrometer)함량을 논과 밭토양 모두 동일한 방법으로 분석하였다(RDA 1998). 그러나 유효 인산은 논토양에서는 Lancaster법으로, 밭토양에서는 알칼리 토양에서 유효인산 분석에 널리 이용되는 Olsen법을 이용하여 분석하였다(RDA 1998; Chang and Juo 1963).

결합형태별 무기태 인산함량은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 연속침출법에 의해 분석하였다. 수용성인산(water-soluble P, W-P)은 물로 침출한 다음 여기에 1 M NH_4Cl 2회 세척후 25 g L^{-1} acetic acid (calcium bounded P, Ca-P)로 침출한 후 이어서 1 M NH_4F(aluminum bounded P, Al-P)와 1 M NaOH

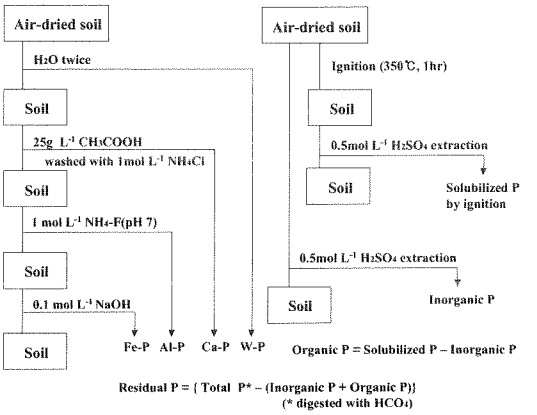

Fig. 1. Flow chart of soil phosphate fraction ation (Hirata *et. al* 1999)

(iron bounded P, Fe-P)로 침출하였다(Sekiya, 1983; Watanabe and Kato, 1983). 그리고 유기태 인산은 350℃에서 1시간 회화후 0.5 M H_2SO_4로 침출한 인산의 양에 회화 없이 0.5 M H_2SO_4 침출한 인산의 양을 뺀 값으로 계산하였으며(Egawa and Nonaka, 1980) T-P는 $HClO_4$로 분해 후 인산을 측정하였다. 이때 인산정량은 ascorbic acid 환원법(Murphy and Riley, 1962)을 이용하였다.

벼 및 배추 식물체 시료는 70℃에서 72시간 동안 열풍 건조 후 분쇄하여 분석용 시료로 이용하였다. T-N은 황산으로 분해 후 Kjeldahl법으로 정량하였고, 무기성분은 ternary solution(HNO_3 : H_2SO_4 : $HClO_4$, 10:1:4 volume/volume)을 이용하여 완전 분해 후 K, Ca, Mg 함량은 ICP로 정량하였고, P는 ammonium metamolybdate법에 의해서 정량하였다.

나. 시설재배지 운영형태별 인산수지 특성조사

윤답전환과 비윤답전환 방식으로 운영되고 있는 시설재배지 대표 농가포장에서 표층토를 채취하여 Wagner Pot를 이용하여 농가에서 운영하고 있는 방식으로 작물을 재배하면서 경작과정 중 인산수지특성을 조사하였다. 이때 처리구는 윤답전환지(RS)와 비윤답전환지(NRS)로 구분하였다.

Table 3. Physical and chemical properties of the soil used for the test before the experiments

Items	Mean	SD
pH (1:5 with H_2O)	7.7	0.2
OM (g kg^{-1})	2.4	0.12
EC (dS m^{-1})	2.8	0.22
Total N (g kg^{-1})	30.2	1.1
Available P2O5 (mg kg^{-1})	348	11
Available SiO2 (mg kg^{-1})	265	
Ex. cations (cmolc kg^{-1})		
Ca	15.9	0.5
Mg	6.01	0.23
K	2.33	0.31
CEC (cmolc kg^{-1})	14.2	2.2

윤답전환지 처리구에서는 동절기 작물로 배추를 2002년 4~5월 사이 재배한 후, 하절기 작물로 벼를 동년 6월부터 10월까지 연속재배를 실시하였다. 이때 작물의 관리형태는 동절기 작물인 배추를 시설하우스내에서 재배한 후, 하절기 작물인 벼는 노지에서 재배를 실시하여 현장과 유사한 운영체계로 관리하였다. 비윤답전환지는 윤답전환지와 동일한 방법으로 배추를 1차 작물로 재배한 후, 장기성 작물인 고추를 공시작물로 선발하여 동년 6월부터 10월말까지 비닐하우스내에서 연속 재배하였다.

음건한 공시토양은 잘게 분쇄한 후 토양 15 kg에 퇴비와 화학비료 기비를 처리하여 완전히 혼합 후 Pot(D 35cm×H 40cm)에 충진하였다. 이때 Pot 바닥에 약 5cm 두께로 자갈을 깔고 망사 처리를 미리 하였으며, 유리 온실에서 배추 및 고추 재배시험을 실시하였다.

이때 1차 배추재배시 모든 처리에 질소(320kg N ha^{-1}), 인산(78kg P_2O_5 ha^{-1}), 칼륨(200kg K_2O ha^{-1})과 계분톱밥퇴비 20Mg ha^{-1}를 시비하였다. 시비량 중 질소 50%, 인산 100%, 칼륨 60%, 퇴비 100%를 2002년 4월 2일 기비로 시용하였다. 그리고 질소 25%를 1차 추비로, 질소 25%와 칼륨 40%는 2차 추비를 통해 시용하였다. 윤답전환지에서 2차 재배작물로는 벼를 공시하였으며, 추가적인 시비는 실시하지 않았다. 비윤답전환지에서 2차 작물로 고추를 공시하였으며, 이때 비윤답전환지와 정확한 비교를 위해 추가적인 시비를 실시하지 않고 잔존 비옥도에 의존하였다. 각 처리구는 5반복으로 실시하였으며, Pot는 완전 임의배치법으로 배치하였다. 공시토양의 이화학적 특성과 인산분획 특성은 위와 동일한 방법으로 조사하였다(표 3과 4). 공시토양은 오랫동안 시설재배를 실시하여 염류함량이 높고 총 인(Total P)이 2140mg kg^{-1} 축적되어 있었다. 축적 인산의 대부분이 무기태(약 70%)이었으며, Extractable P는 대부분 Al- and Ca-P 형태로 분포하고 있었다.

Table 4. Characteristics of phosphorus in soil used for the pot test before the experiments

Items	Contents	Ratio(%)†
Total P (mg kg^{-1})	2,140	
Organic P (mg kg^{-1})	174	8.5
Inorganic P (mg kg-1)	1586	74.1
Residual P (mg kg^{-1})	380	17.7
Extractable P (mg kg^{-1})		
Water soluble P	13	0.6
Ca bounded P	490	23.9
Al bounded P	628	30.7
Fe bounded P	132	6.4

†Ratio mean the composition of rate (%) of each P to total P

Table 2. Treatment and cropping background

Treatment	1st cropping		2nd cropping	
	Plants	Location	Plants	Location
Rotation system(RS)	Chinese cabbage in glass house		Rice	in outdoor
Non-rotation system(NRS)	Chinese cabbage in glass house		Red pepper	in glass house

작물재배과정 중 인산수지(P balance) 조사는 작물별 인산의 투입량, 즉 시비와 관개수, 강우 등을 통해 공급된 인산량을 산출하였다. 이때 관개수는 관정수가 이용되었으며, 관개수와 강수 중 총 인의 함량이 0.1㎎/ℓ 이하로 존재하였으며 전체 인산투입량 산정에 큰 영향을 주지 못해 본 인의 수지 계산에서는 제외하였다. 인 제거량은 각 작물에 의한 흡수량과 침출수 발생으로 인 유출량을 각각 조사하여 산출하였다. 침출수는 일정량 단위로 채취하여 수중 인의 함량과 물량을 이용하여 인산 유출량을 산출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 시설재배지 관리 유형에 따른 인산의 분포특성

경남 진주시 대곡면 소재 시설재배단지 중 윤답전환 방식의 시설재배지(RS) 22곳과 비윤답전환 방식의 시설재배지(NRS) 20곳의 토양을 깊이별로 채취하여, 인산의 분포특성을 주요 이화학적 특성과 함께 조사하였다.

가. 염류 및 유기물 분포특성

윤답전환지(RS) 표층토(Ap)의 전기전도도(EC)는 평균 1.9 dSm^{-1}로 비윤답전환지(NRS) 평균 2.8dS m^{-1}에 비해 약 평균 약 1.0dSm^{-1} 정도가 낮았으나 30㎝ 이하의 심층부에서는 RS의 EC값이 NRS에 비해 높아졌다(그림 2). 토양의 깊이가 깊어질수록 두 형태간 EC값의 차이는 증가하여 세척된 염분이 상당부분 심층부로 이동되고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 조사지역은 남강주변지역으로 하성충적토의 사양토가 폭넓게 분포되어 높은 투수특성을 가지고 있다. 윤답전환지 방식의 시설재배지가 벼를 재배하는 과정중 상당부분의 염분이 지하수 및 주변수계로 유출되고 있음을 간접적으로 알 수 있다.

기대와 달리 표층토의 평균 유기물 함량은 윤답전환지(RS) 38㎎ kg^{-1}로 비윤답전환지(NRS) 41㎎ kg^{-1}에 비해 약 3g kg^{-1}이 높았다(그림 3).

이는 두 형태가 년간 퇴비 시용량 차이, 즉 윤답전환지(RS)에서 기비로 시용하고 있는 계분톱밥퇴비

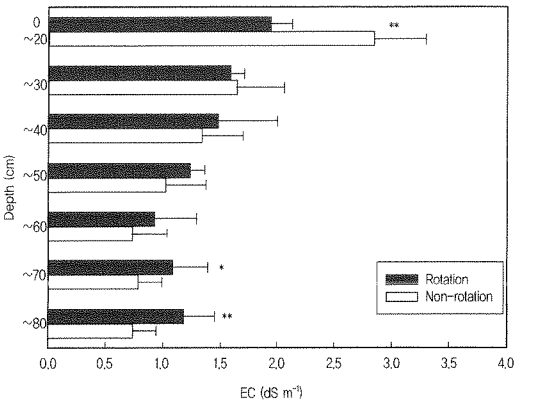

Fig. 2. Distribution patterns of electrical conductivity(EC) in soil profiles of a rotation system and a non-rotation system in plastic film house soils. Bars indicate SD(*P < 0.05, **P < 0.01)

시용량이 평균 30~40Mg kg^{-1}로 비윤답전환지(NRS)의 평균 투입량 20~30Mg kg^{-1}에 비해 높았기 때문으로 해석되었다. 깊이가 증가할수록 유기물 농도는 EC분포와 동일한 경향을 보여 윤답전환 과정 중 다소의 수용성 유기물이 심층부로 이동되고 있음을 확인할 수 있었다.

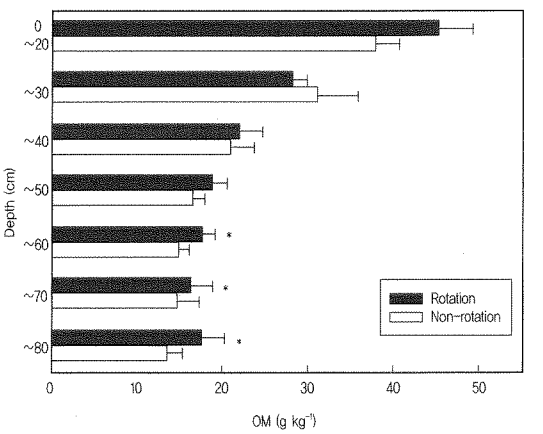

Fig. 3. Distribution patterns of organic matter(OM) in soil profiles of a rotation system and a non-rotation system in plastic film house soils. Bars indicate SD(*P < 0.05, **P < 0.01)

나. 인산분포특성

비윤답전환지(NRS) 1789mg kg^{-1} 표층토의 평균 유효인산(P_2O_5) 함량은 윤답전환지(RS)의 1611mg kg^{-1}에 비해 크게 높았으며(그림 4), 약 170mg kg^{-1} 정도가 윤답전환과정 중 표층토로부터 세척되어 제거된 것으로 평가된다. 그러나 두 지역 모두에서 시설재배지의 유효인산 적정관리범위인 400~500mg kg^{-1} (RDA, 11999)을 크게 초과하고 있었다.

윤답전환지(RS)의 표층토의 전인산(T-P) 함량은 평균 4593mg kg^{-1}으로 비윤답전환지(NRS)의 5440mg kg^{-1}에 비해 약 850mg kg^{-1} 낮았으며, 이러한 경향은 심토까지 계속되었다(그림 5). T-P의 약 90% 이상은 Inorganic-P의 형태이었으며, Organic-P와 Residual-P가 적은 비율로 분포되었다. Inorganic-P는 T-P에서와 같이 RS가 NRS에 비해 낮은 농도로 분포하였으며 깊이가 증가함에 따라 큰 폭으로 감소하였다. 이에 반해 Organic-P는 30cm 이상의 표층토에서는 RS

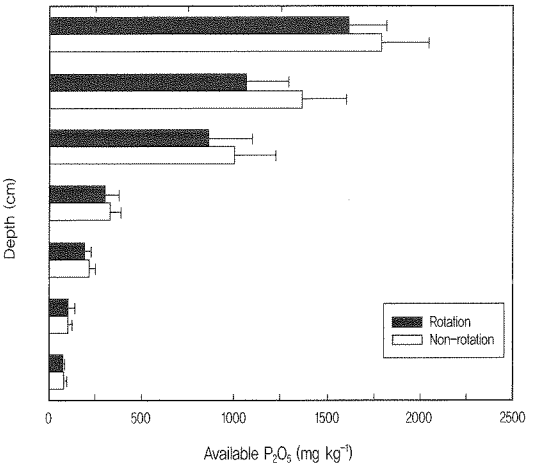

Fig. 4. Distribution patterns of Lancaster P_2O_5 in soil profiles of a rotation system and a non-rotation system in plastic film house soils. Bars indicate SD(*P < 0.05, **P < 0.01)

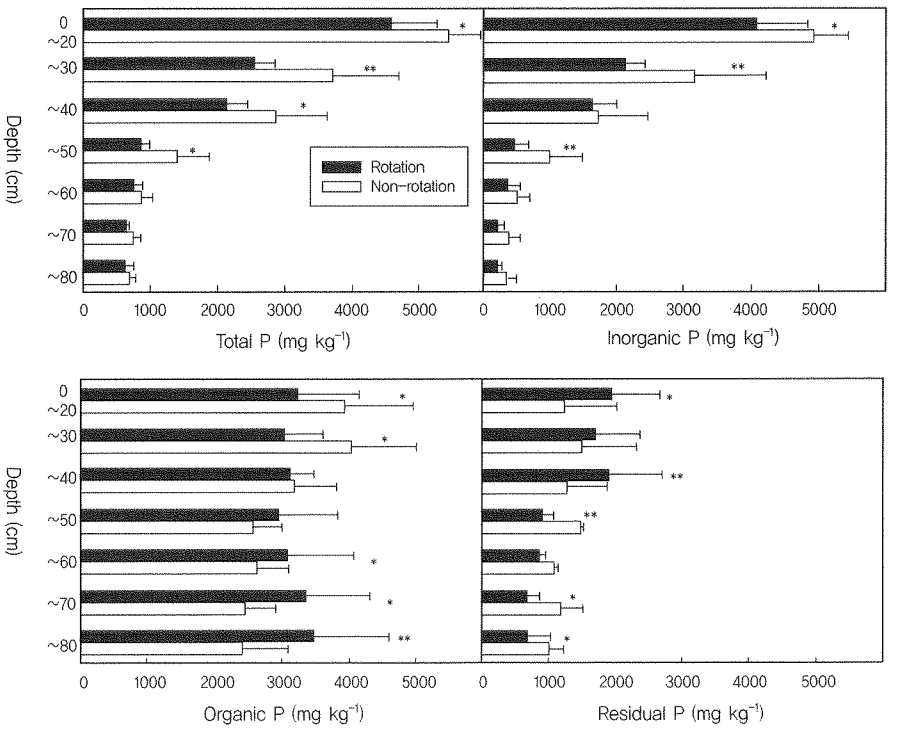

Fig. 5. Distribution patterns of phosphorus in soil profiles of a rotation system and a non-rotation system in plastic film house soils. Bars indicate SE(*P < 0.05, **P < 0.01)

가 NRS에 비해 낮은 농도로 분포하였으나 30㎝ 이하의 심층토에서는 RS가 NRS에 비해 높은 농도로 분포하였다. 특히 RS에서 Organic-P는 NRS에서와 달리 깊이가 깊어짐에 따라 점점 증가하여 윤답전환지에서 인산이 상당 부분 Organic-P의 형태로 이행되고 있음을 알 수 있었다.

토양내 인산은 무기태와 유기태로 분류되며 시비방법과 시비량, 토양내 유기물 함량 및 토양관리방법, 기후조건 등에 따라 각각의 구성비율을 달리하고 있다. 무기태 인산은 광물(Apatite, Tinticite)의 구성성분이나 이온의 형태(PO_4^{-3}, HPO_4^{-2}, $H_2PO_4^{-1}$)로 존재한다. 무기인산은 토양교질과 특이적흡착(Specific adsorption)을 통해 일부 강하게 흡착 고정되거나(그림 1), 토양내 다량 존재하는 무기이온(Fe, Al, Ca)과 결합하여 불용화되어(그림 2) 작물에 대한 시비효율 감소시킨다(Chang and Jackson, 1957, 류 등, 1977; 윤 등, 1977; 홍과 홍, 1977, Bohn et al., 1979, 신 등, 1988; 김과 류, 1991; Kim et al., 2000; Kim et al., 2001). 이에 반해 토양내 유기태 인은 주로 축분 등의 유기질 비료나 퇴비의 공급을 통해 다량 유입되며, 토양내 존재하는 유기물(Organic matter)과 미생물체의 구성성분으로 순환과정을 통해 토양내 공급된다. 토양내 유기태 인의 형태는 유기물의 종류 및 유기물의 분해정도 등에 따라 다양한 구조특성을 갖는다. 지금까지 토양내에서 확인된 유기태인의 형태는 Monoester(Inositol hexaphosphate), Diester (Phospholipids, Nucleic acid), Biomass P(Microbial P, Adenosine triphosphate)과 Humic P 등으로 구분되고 있다(표 2). 이상의 유기태 인은 토양내 식물에 대한 이용가능성 정도에 따라 labile organic P, moderately P, stable organic P, moderately organic P, highly stable P로 구분되며 이들 분포 특성에 따라 토양의 잠재 비옥도가 결정된다.

이 등(Lee et al., 2002)에 의해 조사된 경남 진주지역 시설재배지 토양의 표층토(Ap 층)내 전인산(Toatal P) 함량은 평균 약 5440 ㎎ kg-1이었으며, 약 90%가 무기태 인(Inorganic P)이며 약 7%가 유기태 인(Organic P)의 형태로 분포하고 있었다. 이에 반해 단위 면적당 시비량이 비교적 적고 토양의 자연 비옥도에 크게 의존하는 서구의 농경지내 전인산의 함량은 우리나라에 비해 크게 낮았으며 유기태 인이 차지하는 비율은 온대기후 조건에서 전 인산의 약 15~30%를 구성하고 있으며(Zhang and MacKenzie, 1997a,b; Zhang et al., 1999), 일본의 화산회 토양에서는 전 인산의 약 30~70% 정도가 유기태 인산으로 존재하는 것으로 알려져 있어(Amano, 1981; Otani and Ae, 1999), 시비관리방안에 따라 상당히 다른 분포특성을 보이고 있다. 국내의 집약적 다비농업여건을 고려할 때 토양내 인산의 축적량은 재배년수가 경과함에 따라 지속적으로 증가될 것으로 판단되며, 그에 따른 문제도 가중될 것으로 전망된다.

표층토내 Extractable P는 Al-P와 Ca-P가 가장 높은 비율로 존재하였으며, Fe-P와 수용성 P(W-P)의 순으로 낮은 비율로 분포하였다(그림 6). Ca-P와 W-P는 전 토양 깊이에서 윤답전환지(RS)가 비윤답전환지(NRS)에 비해 낮았으나 Al-P는 두 형태간 큰 차이가 없었다. 이에 반해 Fe-P는 RS가 NRS에 비해 높은 농도로 분포하였으며 20~40 ㎝ 사이에 가장 높은 농도로 분포하여 논 토양 조건에서 영향을 받은 것으로 판단되었다. 결과적으로 윤답전환에 의한 약간의 T-P의 감소는 주로 W-P, Ca-P와 Organic-P 형태로 이동되었던 것으로 간접 해석되나 그 양은 기대했던 것에 비해 미미한 수준인 것으로 나타났다.

2. 시설재배지 운영형태별 인산수지 특성

윤답전환방식(RS)으로 운영되고 있는 시설재배지 토양내 인산수지특성을 비윤답전환지(NRS)와 비교하였다. 이때 윤답전환지와 비윤답전환지 모두에서는 2002년 4월초부터 5월말까지 약 2개월간 배추를 재배하였다. 윤답전환지에서는 이어 6월 10일 벼를 이앙하여 동년 10월 15일 벼를 수확하였다. 상대적으로 비윤답전환지에서는 배추재배에 이어 고추를 정식하여 동년 10월말까지 재배하였다.

두 유형의 토양조건에서 공통 공시된 1차 작물 배추의 평균수량은 98,840㎏ ha^{-1}이었다(표 5). 이때 화학비료와 퇴비로 투입된 인산은 각각 27과 38㎏ P ha^{-1}이었으며, 총 65㎏ P ha^{-1}가 시용되었다(표 6). 배

추재배를 통해 흡수된 인산은 총 9.6kg P ha^{-1}(표 5와 6)로 시용 인산의 약 15% 만이 작물에 흡수 이용되었다. 1차 배추의 재배기간동안에 침출수 발생에 의한 인산유출은 거의 발생되지 않았다. 이는 일반 시설재배지 토양조건에서 공통적으로 볼 수 있는 현상으로, 비닐하우스내 높은 대기온도에 의해 증발산량(Evapor- transpiration)이 침투수량(Infiltration) 보다 많고, 인위적인 관수량의 경제적 관리로 수분의 대부분이 표층토에 한정적으로 분포되기 때문으로 해석된다. 결과적으로 두 토양조건 모두에서 1차 배추재배에 의한 인산의 공급량(Input)과 제거량(Output)간의 차이인 인산수지(P balance)는 55.4kg P ha^{-1}로 50kg P ha^{-1} 이상의 인산이 초기에 과량 공급되고 있었다.

2차 작물재배는 윤답전환지(RS)에서는 벼를 공시하였으며 비윤답전환지(NRS)에서는 고추를 각각 공시하였다. 윤답전환지에서 여름철 벼 재배목적은 농민들이 제염을 목적으로 하기 때문에 추비는 실시하지 않고 있으며 토양내 잔존 비옥도를 이용하고 있다. 본 연구에서도 벼 재배시에는 추비는 실시하지 않았으며, 이때 벼 수확량은 4,988kg P ha^{-1}로 우리나라 평균 벼의 수량성을 보였다(표 6). 이때 56.5kg P ha^{-1}의 인산이 벼를 통해 흡수제거되었다. 결과적으로 윤답전환지에서 인산의 총 투입량은 65kg P ha^{-1} 이었으며, 이중 51%인 33.3kg P ha^{-1}가 1차, 2차 재배작물에 의해 흡수 제거되었다. 벼 재배기간 중 총 32.8kg P ha^{-1}의 인산이 Pot로부터 유출되었다. 이는 현장에서 표층토의 인산이 표층토로부터 유출되어 주변수계나 심층부로 이동하는 성분으로 고려할 수 있다. 결과적으로 윤답전환지에서 1년간 인산수지는 -1.1kg P ha^{-1}로 공급량에 비해 제거량이 약간 높았으며, 윤답전환방식의 토양관리기법이 토양내 축적인산의 제거 및 축적방지에 다소의 효과가 있는 것으로

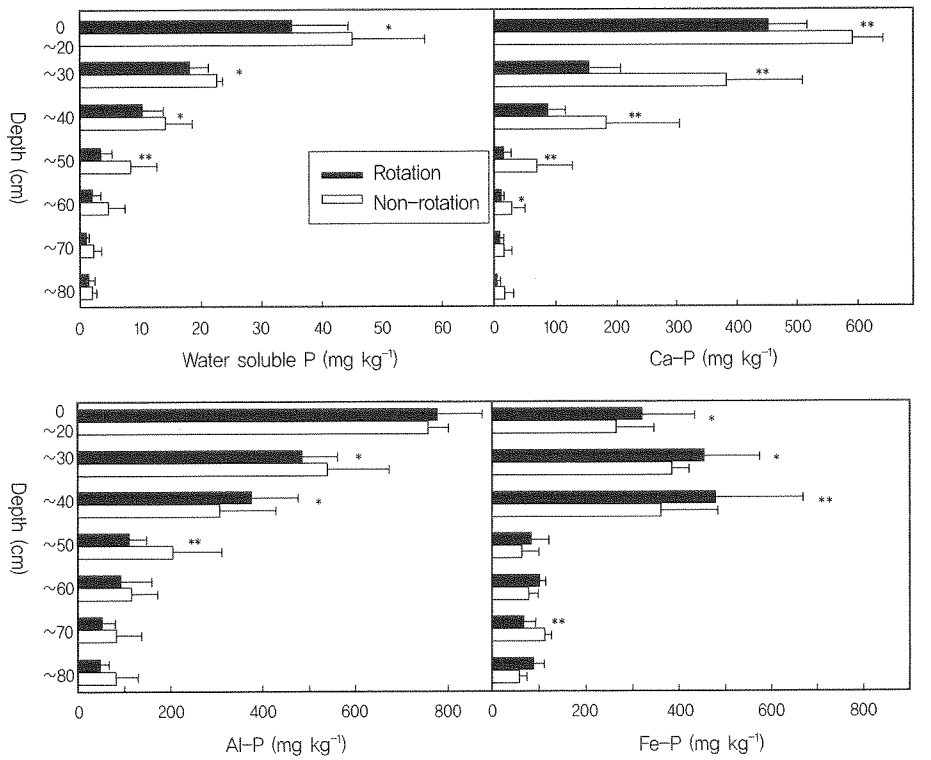

Fig. 6. Distribution patterns of extractable P in soil profiles of a rotation system and a non-rotation system in plastic film house soils. Bars indicate SE(*P < 0.05, **P < 0.01)

평가되었다.

비윤답전환지(NRS)에서는 2차 공시작물로 고추가 재배되었으며, 이때 윤답전환지와 객관적 비교를 위해 추비는 실시하지 않았다. 재배기간 중 붉은 생고추 생산량은 총 14,126kg ha^{-1}이었으며, 인산 흡수량은 12.3kg P ha^{-1}이었다. 이때 침출수 발생에 의한 인산의 유출은 발생되지 않았다. 1차 배추와 2차 고추를 통해 흡수된 인산 총량은 21.9kg P ha^{-1}로 공급인산 65kg P ha^{-1}의 34%가 흡수 이용되었다. 결과적으로 비윤답전환지에서 인산수지(P balance)는 43.1kg P ha^{-1}로 과량의 인산이 표층토 내 지속적으로 축적되고 있었으며, 시비량 조정을 통한 축적량 감소방안의 연구가 절실히 필요한 것으로 나타났다.

1차 작물(배추)과 2차 작물(윤답전환지-벼, 비윤답전환지-고추) 재배 후 토양의 이화학적 특성과 인산의 분획 특성은 표 7, 8과 같다. 윤답전환 방식으로 운영되는 토양내 1차 배추와 2차 벼 재배 후 토양내 염류함량(EC)과 유효인산의 함량이 크게 감소하였다. 이는 벼 재배기간 중 추비가 이루어지지 않았고

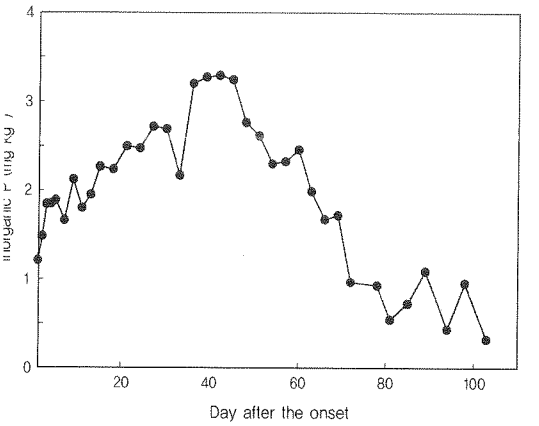

Fig. 7. Changes of inorganic P in the infilatrated water during rice cultivation

Table 5. Yield and phosphorus uptake characteristics

Items	Rotation system(RS)		Non-rotation system NRS	
	Chinese Cabbage	Rice	Chinese Cabbage	Red pepper
Yield (kg/ha)	98,840(fresh weight) 1,680(dry weight)	Grain 4,988 Straw 7,152	98,840(fresh weight) 1,680(dry weight)	14,126(fresh weight) 3,379(dry weight)
P content (g/kg)	5.71 (on dry base)	Grain 2.6 Straw 1.5	5.71(on dry base)	5.71(on dry base)
P uptake (kg/ha)	Total 9.6	Grain 13.0 Straw 10.7 Total 23.7	Total 9.6	Fruit 12.3

Table 6. Comparison of phosphorus balance after crop plant harvest

	Items	Rotation system(RS)			Non-rotation system(NRS)		
		Chinese cabbage	Rice	Sub-total	Chinese cabbage	Red pepper	Sub-total
Input	Chemical fertilizer	27	0	27	27	0	27
	Compost	38	0	38	38	0	38
	Sub-total (A)	65	0	65	65	0	65
Output	Plant uptake	9.6	23.7	33.3	9.6	12.3	21.9
	Leaching	0	40.3	40.3	0	0	0
	Sub-total (B)	9.6	64.0	73.6	9.6	12.3	21.9
Phosphorus balance(kg/ha) (A-B)		55.4	-64.0	-8.6	55.4	-12.3	43.1

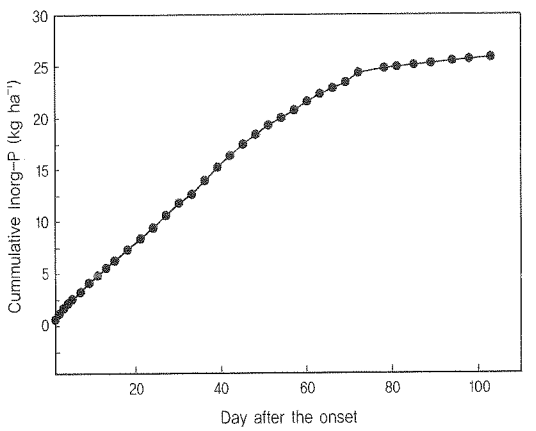

Fig. 8. Cummulative amount of inorganic P leached by the infilatrated water during rice cultivation

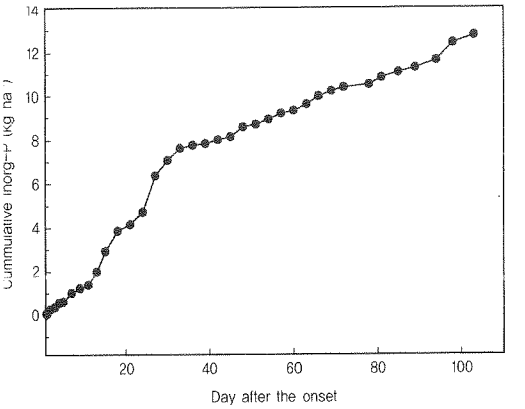

Fig. 9. Cummulative amount of organic P leached by the infilatrated water during rice cultivation

Table 7. Physical and chemical properties of soils after plant harvest of each crop

	aRotation system(RS)		Non-rotation system(RS)	
	Chinese cabbage	Rice	Chinese cabbage	Red pepper
pH (1:5 with H_2O)	7.2	6.3	7.2	7.0
EC (dS m^{-1})	1.5	1.1	1.5	1.3
OM (g kg^{-1})	19.7	19.2	19.7	18.1
Av. P2O5 (mg kg^{-1})	314	281	314	310
Ex.cations (cmolc kg^{-1})				
Ca	12.3	10.2	12.3	10.9
Mg	3.54	3.21	3.54	3.12
K	0.62	0.46	0.62	0.55

Table 8. Characteristics of phosphorus composition in soils after crop plant harvest

		Before the test	Rotation system(RS)		Non-rotation system(NRS)	
			Chinese cabbage	Rice	Chinese cabbage	Red pepper
Phosphorus (mg/kg)	Total P	2,140	2,171	1762	2,171	2,018
	Organic P	174	145	112	145	132
	Inorganic P	1586	1,522	1318	1,522	1,503
	Residual P	380	540	332	540	383
Extractable P (mg/kg)	W-P	13	13.0	7.6	13.0	14.2
	Ca-P	490	543	438	543	556
	Al-P	628	666	496	666	673
	Fe-P	132	116	165	116	114

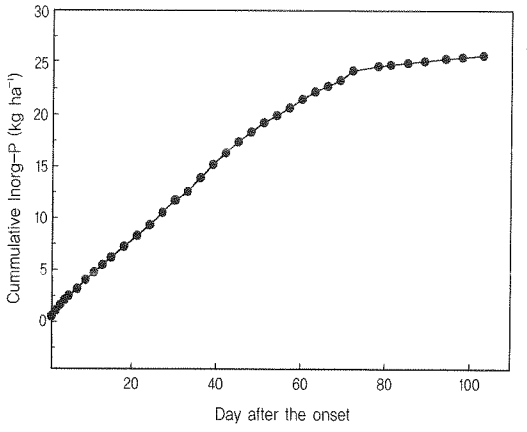

Fig. 10. Cummulative amount of total P leached by the infilatrated water during rice cultivation

벼 재배기간 중 과량의 침출수 발생에 의한 염류 및 인산이 용출되었기 때문으로 해석된다.

벼 재배기간 침출수 중 전 인산(Total P)과 무기태 인(Inorganic P) 농도는 각각 산 Digestion법과 Ion chromatography법에 의해 정량하였다. 침출수 중 유기태 인(Organic P)농도는 전 인 함량에서 무기태 인의 함량을 감하여 계산하였다. 이때 침출수 중 전 인산의 함량은 관수초기 최고 10mg P l^{-1}까지 상승하였으며 생육중기 이후 평균 3~4 P l^{-1}의 농도로 유출이 지속되어 일반 논 토양내 1mg P l^{-1} 이하의 인산 용출과는 큰 차이를 보였다. 각 Pot에서 유출되는 물량을 조사하여 단위면적당 유출량을 산출하였으며, 수중 전 인산함량을 곱하여 인산 유출량을 산출하였다(그림 8, 9, 10). 용출인산의 절대량은 무기태 인의 형태로 유출되었으며, 벼 재배과정 중 무기인과 유기태 인은 각각 13과 27kg P ha^{-1}가 침출수와 함께 용출되었으며, 전체 약 40kg P ha^{-1}가 유출되었다.

표층토에서 유출되어 심층토로 이동된 인산의 대부분은 토양내 인산반응 및 이동특성을 고려할 때 심층토에서 재차 흡착되거나 침천되어 이동성을 상실할 수 있다. 그러나 표면수를 통한 주변수계로 유출되거나 경운 및 경작과정 중 토양유실에 의해 주변수계로 유출되어 비점오염원으로 부영양화의 원인물질이 될 수 있다. 이러한 관점에서 윤답전환과정에서 유출되는 약 40kg P ha-1의 인산은 수계의 주요 오염원이 될 수 있을 것으로 판단되며, 인산유출 저감을 위한 합리적 토양관리방안의 모색이 절실히 요구되고 있다.

비윤답전환지 토양에서 염류함량(EC), 유효인산 및 전인산의 함량은 지속적으로 증가하고 있었으며, 고농도의 염류집적에 의한 2차 문제 발생 가능성이 대단히 높은 것으로 조사되었다. 즉, 고농도의 염류집적에 의한 작물의 수분 및 양분의 흡수저해, 특정 이온의 과다에 의한 이온독성 발현 및 타 유효 미량필수원소의 흡수저해 등의 재배학적 문제가 야기될 것으로 예측되었다. 따라서 현재의 시설재배지내 시비관리방안은 토양내 인산의 지속적인 축적가능성을 가지고 있으며, 인산축적량 저감을 위해 인산 이용율 증대방안과 시비량 저감방안의 모색이 절실히 필요한 것으로 평가되었다.

IV. 결론

영남과 호남지방을 중심으로 많은 시설재배지가 집적염류 문제를 해결하기 위해 윤답전환 체계로 운영되고 있다. 윤답전환 방식은 비록 집적염류의 제거에는 효과가 다소 있을 것으로 판단되나, 침출수와 함께 유출되는 염류에 의해 2차 오염원이 될 수 있다. 지금까지 윤답전환 방식이 토양의 이화학적 특성 및 인산 등의 염류집적에 미치는 영향에 대한 연구가 거의 없었다. 본 연구에서는 이러한 문제요인들 중 윤답전환 방식의 토양관리가 토양환경과 인산분포에 미치는 영향을 현장조사를 통해 검토하고, 윤답전환지 토양의 인산수지를 비윤답전환지와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시설재배지 관리 유형에 따른 인산의 분포특성

윤답전환지(RS) 표층토(Ap)의 전기전도도(EC)는 비윤답전환지(NRS)에 비해 약 평균 약 1.0dS m^{-1} 정도가 낮았으나 30㎝ 이하의 심층부에서는 RS의 EC값이 NRS에 비해 높아졌다. 깊이가 깊어질수록 두 형태간 EC값의 차이는 증가하여 세척된 염분이 상당

부분 심층부로 이동되고 있음을 확인할 수 있었다. 기대와 달리 표층토의 유기물 함량은 RS가 NRS에 비해 약 3g kg^{-1}이 높았으며 이는 두 형태가 년간 유기물 시용량 차이에 기인된 것으로 해석되었다. 깊이가 증가할수록 유기물 농도는 EC분포와 동일한 경향을 보여 윤답전환 과정중 다소의 유기물이 심층부로 이동되고 있음을 추정할 수 있었다.

전인산(T-P) 함량은 RS의 표층토가 NRS에 비해 약 850mg kg^{-1} 낮았으며, 이러한 경향은 심토까지 계속되었다. T-P의 약 90% 이상은 Inorganic-P의 형태이었으며, Organic-P와 Residual-P가 적은 비율로 분포하였다. Inorganic-P는 T-P에서와 같이 RS가 NRS에 비해 낮은 농도로 분포하였으며 깊이가 증가함에 따라 큰 폭으로 감소하였다. 이에 반해 Organic-P는 30cm 이상의 표층토에서는 RS가 NRS에 비해 낮은 농도로 분포하였으나 30cm 이하의 심층토에서는 RS가 NRS에 비해 높은 농도로 분포하였다. 특히 RS에서 Organic-P는 NRS에서와 달리 깊이가 깊어짐에 따라 점점 증가하여 윤답전환지에서 인산이 상당 부분 Organic-P의 형태로 이행되고 있음을 알 수 있었다.

표층토내 Extractable P는 Al-P와 Ca-P가 가장높은 비율로 존재하였으며, Fe-P와 수용성 P(W-P)의 순의 낮은 비율로 분포하였다. Ca-P와 W-P는 전 토양깊이에서 RS가 NRS에 비해 낮았으나 Al-P는 두 형태간 큰 차이가 없었다. 이에 반해 Fe-P는 RS가 NRS에 비해 높은 농도로 분포하였으며 20~40cm 사이에 가장 높은 농도로 분포하여 논토양 조건에서 영향을 받은 것으로 판단되었다. 결과적으로 윤답전환에 의한 약간의 T-P의 감소는 주로 W-P, Ca-P와 Organic-P 형태로 주로 이동되었던 것으로 간접 해석되었다.

2. 시설재배지 운영형태별 인산수지 특성

윤답전환방식(RS)으로 운영되고 있는 시설재배지 토양내 인산수지특성을 비윤답전환지(NRS)와 비교하였다. 두 처리에서 공통적으로 1차 배추를 재배하고, 윤답전환지는 2차 작물로 벼, 비윤답전환지는 고추를 재배하였으며, 시비관리는 1차 작물 배추의 추천시비량을 공시하고 2차 작물재배시에는 추가시비처리를 실시하지 않았다.

윤답전환시 화학비료와 퇴비를 통해 65kg P ha^{-1}의 인산이 투입되었으며, 이중 51%가 작물에 의해 흡수이용되었으며 투입량의 약 61%가 침출수를 통해 유출되었다. 이때 인산수지는 -8.6kg P ha^{-1}로 공급량보다 제거량이 높아 토양내 인산 및 염류제거에 좋은 효과가 있는 것으로 평가되었다. 그러나 윤답전환지 운영시 논 토양조건에서 담수초기 고농도의 인산이 유출되었으며, 전 생육기간동안 2-4mg P L^{-1}의 인산이 유출되어 주변 수계의 부영양화를 가속화하는 주요 비점오염원 중 하나가 될 것으로 평가되었다. 이에 반해 비윤답전환지에서 공급인산의 약 34%가 작물에 의해 흡수 이용되었다. 이때 인산수지가 43.1kg P ha^{-1}로 토양내 인산이 지속적으로 축적이 발생되었으며, 이로 인한 토양내 염류함량 상승 및 인산의 과량축적으로 작물재배를 위한 토양환경이 악화될 것으로 전망되었다.

결론적으로 윤답전환 방식은 토양환경 개선에는 효과가 있었으나 많은 양의 염류와 인산이 용출되어 주변 수계의 주요 오염이 될 수 있었다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 인산의 이용율 향상 등에 의한 시비량 저감을 도모하거나 합리적 시비방안의 수립이 필요할 것으로 판단되었다.

인용 문헌

1. Allison, L. E., 1965: Organic carbon. p.1367-1376. *In* C.A. Black et al. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2.ASA, Madison, WI.
2. Amanoi, Y., 1981. Phosphorus status of some Andisols in Japan. JARQ. 15: 14-21.
3. Bohn, H., McNeal, G. and O'connor, G., 1979. Soil Chemistry. A Wiley-Interscience Publication.
4. Chang, S.C. and M. L. Jackson. 1957. Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci. 84, 133-144.
5. Change, S.C. and S. R. Juo. 1963. Available

phosphorus in relation to forms of phosphate in soils. Soil Sci. 94, 91-96.

6. Egawa, T. and M. Nonaka. 1980. Studies on soil organic phosphorus. 1) Organic phosphorus content in some Andosols. Bull. Fac. Agric., Meiji Univ., 52, 55-68.(in Japanese with English summary)
7. Gotoh, S., W. H. Patrick. 1974. Transformation of iron in a waterlogged soil as affected by redox potential and pH. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38:66-71
8. Kim, P.J., D.Y. Chung, and D. Malo. 2001. Characteristics of phosphurs accumulation in organic and conventional farming soils in plastic film houses in korea. Soil Science and Plant Nutrition 47(2) : 281-289
9. Kim, P.J., S.M. Lee, H.b. Yoon, Y.H. Park, J.Y.Lee, and S.C. Kim. 2000. Characteristic of phosphorus accumulation in organic farming fields. Korean J. Soil. Sci. and Fert. 33(4), 234-241.
10. Lee, Y.B, Ha, H.S, Park, B.K, Cho, J.S. and Kim, P.J., 2002. Effect of a fly ash and gypsum mixture on rice cultivation. Soil Sci. Plant Nutr. 48(2), 171-178.
11. Moore, P.A. Jr., K.R. Reddy. 1970. Role of 또 and pH on phosphorus geochemistry in sediments of lake Okeechobee, Florida. J. Environ. Qual. 23: 955-964.
12. Murphy, J. and Riley, J.P., 1960. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. Anal. Chim. Acta. 27, 31-36.
13. Olila, O.G., K. R. Reddy. 1997. Influence of redox potential on phosphorus uptake by sediments in two sub-tropical eutrophic lakes. Hydrobiologia. 345: 45-57.
14. Otani, T., and N. Ae. Extraction of organic phosphorus in Andisols by various method. Soil Sci. Plant Nutri. 45: 151-161.
15. Patrick, W.H., Jr., 1964. Extractable iron and phoisphorus in a submerged soil at controlled redox potentials. 8th Int. Cong. of Soil Science, Bucharest, Romania, IV. 66:605-609.
16. Patrck, W.H., and R.E. Handerson. 1981. A method for controlling redox potential in packed soil cores. Soil Sci. Sco. Am. J. 45: 35-38.
17. Sekiya, K., 1983. Phosphorus. In Methods of Soil Analysis(Dojou Youbun Bunsekihou), Ed. Min. Agirc., Forest., Fish., p. 225-257. Youkendou, ToKyo(in Japanese)
18. Watanabe, M. and Kato, N., 1983. Research on the behavior of applied phosphorus fertilizer in soil. 1) Fractionation method of soil inorganic phosphorus compounds in soil. 2) Changes in phosphorus compounds in soil with time. Misc. Publ. Fertil. Res. Div., Natl. Inst. Agric. Sci. Ser., 251, 1-31.(in Japanese)
19. Zhang, T.Q., and A.F. MacKenzie. 1997a. Changes of soil phosphorus fractions under long-term corn (Zea mays L.) mono culture. Soil Sci. Sco. Am.J. 61: 485-493.
20. Zhang, T.Q., and A.F. MacKenzie. 1997b. Changes of phosphorus farctions under continuos corn production in temperate clay soil. Plant Soil 192: 133-139.
21. Zhang, T.Q., A.F. MacKenzie, and F. Saurial. 1999. Nature of soil organic phosphorus as affected by long-term fertilization under continous corn (Zeamays L.): A ^{31}P NMR study. Soil Sci. 164: 662-670.
22. 김찬섭, 류순호. 1991. 담수처리가 토양의 인산흡착 특성에 미치는 영향(Ⅱ 인산흡착과 무기태 인산 분획, 韓土肥誌. 24(4)
23. 농촌진흥청(RDA). 1998. 토양 및 식물체 분석법. 농업과학기술원.
24. 申喆雨, 金慕濟, 尹禎熙. 1988. 경작지 밭토양의 인산특성에 관한 연구. Ⅰ. 집적인산의 형태별 조성과 유효인산 함량과의 관계. 韓土肥誌.

21(1), 21-29.

25. 柳寅秀, 申喆雨, 尹禎熙,, 柳順昊. 1977. 田土壤無機態燐酸의 組成과 有效燐酸 分析方法에 關한 比較 硏究. 韓土肥誌 10(4) : 211-217
26. 윤정희, 신철우, 류인수, 홍종운. 1977. 전토양의 유효인산 분석방법비교, 韓土肥誌 10(4) : 219-224
27. 洪政國, 洪鐘雲. 1977. 우리나라 主要土壤中 燐酸의 特性에 關한 硏究 韓土肥誌. 10 : 13-22