

과제구분	어젠다	수행시기		전반기	
연구과제 및 세부과제명		연구분야	수행기간	연구실	책임자
농경지 탄소저장 연구 및 농업환경 영향평가		농업환경	'99~	환경농업연구과	안희정
농경지 토양화학적 변동조사		농업환경	'21~'25	환경농업연구과	정재원
색인용어	농경지, 토양화학적, 토양비옥도				

ABSTRACT

This study evaluated the chemical properties and heavy metal concentrations of agricultural soils (upland, orchard, paddy, and greenhouse) in Gyeonggi Province from 2021 to 2025. The aim was to assess the current status of soil fertility by farming type and provide baseline data for sustainable soil management.

In upland soils, the organic matter content showed a slight decreasing trend, indicating the need for organic matter supplementation. Available phosphorus also showed a tendency to slightly exceed the optimal range in certain areas. Orchard soils generally maintained a favorable condition, although partial organic matter supplementation is recommended. Orchards exhibited surface accumulation of phosphorus and exchangeable cations due to limited deep plowing. Notably, apple orchards maintained higher pH and calcium levels reflecting soil conditioner use.

Paddy soils maintained stable chemical properties under waterlogged conditions, with available silicate significantly increasing to optimal levels thanks to government support programs. Conversely, greenhouse soils exceeded optimal electrical conductivity (EC) and available phosphorus ($Av.P_2O_5$) ranges by over twofold due to intensive rain-shelter cultivation, necessitating precision fertilization and salinity management.

Heavy metals across all soils remained safely below regulatory thresholds, confirming that the soils are in good condition for agricultural production. However, considering the minor fluctuations of Cu and Zn associated with farming activities, periodic monitoring and appropriate management are recommended.

Key words: Agricultural soil, Soil chemical properties, Soil fertility

1. 연구목표

최근 소비자의 안전농산물 생산에 대한 요구가 증가됨에 따라 농업환경을 보전하면서 소비자에게는 안전한 먹거리를 제공하기 위한 친환경농업의 중요성이 강조되고 있다. 이러한 친환경농업의 실현을 위해서는 작물 생산성과 밀접한 관계가 있는 토양 양분 상태뿐만 아니라, 농산물 안전성과 직결되는 토양 내 유해성분을 포함한 농업환경 전반을 종합적으로 파악하고, 이를 균형 있게 유지하는 관리체계가 필수적이다. 이에 따라 농경지 토양의 화학성 변동을 주기적으로 조사하고, 장기적인 변화 양상을 분석하는 사업의 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다.

농업환경 변동조사는 「친환경농어업 육성 및 유기식품 등의 관리·지원에 관한 법률 제11조」에 따른 법정업무로서, 1999년부터 현재까지 농촌진흥청과 각 도농업기술원이 참여하여 밭, 과수원, 논, 시설재배지를 대상으로 4년 1주기로 수행되고 있다(RDA, 2021). 농업환경 변동조사 결과는 토양 양분의 전반적인 수준을 제시하는 중요한 기초자료로 활용되며, 지속가능한 농업을 위한 정책수립에 도움이 되고 있다.

경기도는 수도권 핵심 농산물 공급지이지만 최근 급격한 도시화와 산업화로 인해 농업 환경의 급격한 변화를 겪고 있다. 또한 경기도는 시설하우스 및 과수원 등 집약농업의 비중이 높아 타 지역 대비 화학비료와 가축분퇴비의 투입량이 많으며, 이로 인해 발생하는 염류집적 및 양분 불균형 문제는 작물의 생육 저해뿐만 아니라 주변 수계의 부영양화를 초래할 위험이 있다(RDA, 2019). 이와 같은 배경에서 경기도 농경지 토양화학성을 체계적으로 파악하고 잠재적 환경 영향을 고려한 관리 전략을 수립하는 것은 매우 중요하다.

본 연구는 2021~2025년 경기도 내 밭, 과수원, 논, 시설재배지 토양을 대상으로 토양 화학성을 조사·분석하고, 이를 통해 토양 비옥도 현황과 문제 요인을 진단하는 것을 목적으로 수행하였다. 아울러 토심별 특성을 고려한 결과 해석을 통해 토양개량 및 시비 관리 방향을 제시하고, 토양 내 중금속 함량을 분석하여 토양오염 우려기준 충족 여부를 확인하였다.

2. 재료 및 방법

경기도 농경지 토양화학성 조사를 위해 시·군지역별로 면적을 고려하여 밭 190지점, 과수원 100지점, 논 240지점, 시설재배지 140지점을 선정하여 조사하였다(표 1). 토양 시료채취는 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법(RDA, 2000)에 따라 밭거름 사용 전에 밭과 논 토양은 표토(0~20cm), 과수원과 시설재배지는 표토(0~20cm)와 심토(20~40cm)를 채취하여 음지에서 건조한 다음 2mm 체를 통과한 토양 시료를 분석에 사용하였다.

토양화학성 분석 항목은 pH, 전기전도도(EC), 유기물(OM), 유효인산(Av.P₂O₅), 치환성 양이온(K, Ca, Mg, Na), 유효규산(Av.SiO₂), 석회소요량(LR), 질산태질소(NO₃-N)로 구성하였고, 중금속 분석 항목은 Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Hg, Cr(전함량)로 구성하였다. 토양화학성 분석방법은 국립농업과학원 토양화학분석법에 준하여 분석하였다.

표 1. 경기도 시군별 일반농경지 토양화학성 조사지점 분포 (단위: 점)

시 군	밭	과수원	논	시설
가 평	7	7	10	0
고 양	5	0	8	13
광 주	10	0	5	19
구 리	0	2	0	1
김 포	5	8	15	3
남양주	12	6	0	19
동두천	0	0	0	6
성 남	0	0	0	5
수 원	0	0	0	3
시 흥	0	0	6	0
안 산	0	5	2	8
안 성	17	22	22	6
양 주	10	1	8	4
양 평	12	5	21	4
여 주	16	4	9	8
연 천	12	9	15	0
용 인	10	1	15	8
이 천	16	13	19	10
파 주	14	0	18	1
평 택	15	0	29	11
포 천	10	5	6	2
하 남	0	0	0	6
화 성	19	12	32	3
합 계	190	100	240	140

3. 결과 및 고찰

가. 밭 토양화학성(2021, 2025)

경기도 밭 토양의 화학성을 연도별로 살펴보면, 2021년에는 pH 6.6, 전기전도도 0.71dS/m, 유기물 함량 20g/kg, 유효인산 615mg/kg이고, 교환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 각각 0.86, 6.2, 1.9cmol_c/kg이었다. 2025년에는 pH 6.6, 전기전도도 0.58dS/m, 유기물 함량 18g/kg, 유효인산 553mg/kg이고, 교환성 칼륨, 칼슘,



마그네슘은 각각 0.83, 5.9, 1.7cmol_c/kg이었다(표 2). 토양 pH는 2013년 6.2에서 2025년 6.6으로 증가하였으며, 전기전도도는 2017년 0.86dS/m에서 2025년 0.58dS/m로 감소 추세를 보였다. 밭 토양의 pH, 전기전도도는 적정범위 이내를 유지하였다. 토양유기물 함량은 2013년 23g/kg에서 2025년 적정기준 미만인 18g/kg까지 지속적으로 감소하였으며, 이에 따라 유기물을 보충하기 위한 토양관리와 공급 대책이 필요하다고 판단된다. 유효인산 함량은 2013년 659mg/kg에서 점차 감소하여 2025년 553mg/kg으로 나타났으나, 여전히 적정범위 상한치를 초과하였다. 교환성 칼륨은 2013~2025년 0.80~0.86cmol_c/kg 범위로 나타났고, 교환성 칼슘은 2013년 5.5cmol_c/kg에서 2025년 5.9cmol_c/kg로 소폭 증가하였다. 교환성 칼륨과 칼슘은 다소 높은 경향을 보였으나 전반적으로 안정적인 수준을 나타냈다. 교환성 마그네슘은 1.7~1.9cmol_c/kg 범위로 나타났다.

표 2. 연도별 밭 토양화학성 변화(2013~2025)

연 도	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/Kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/Kg)	Ex.Cation (cmol _c /kg)				LR (kg/10a)
					K	Ca	Mg	Na	
2013	6.2	0.63	23	659	0.80	5.5	1.7	0.09	171
2017	6.3	0.86	22	651	0.83	6.2	1.7	0.13	234
2021	6.6	0.71	20	615	0.86	6.2	1.9	0.09	143
2025	6.6	0.58	18	553	0.83	5.9	1.7	0.12	113
적정범위 ¹⁾	6.0-7.0	2 이하	20-30	300-550	0.5-0.8	5.0-6.0	1.5-2.0	-	-

¹⁾ 밭 토양화학성분 적정범위(농업자원과 농업환경의 실태조사 및 평가 기준 별표 4)

조사연도별 밭 토양화학성의 적정범위 대비 분포 비율을 조사한 결과는 그림 1과 같다. pH는 적정범위보다 부족한 비율이 점차 줄고, 과다 비율이 증가하는 경향을 보여 토양의 알칼리화가 진행 중인 것으로 보인다. 전기전도도는 대부분 적정범위에 속하였고, 유기물은 2017년 이후 부족 비율이 점차 증가하여 2025년 62%까지 증가하였다. 우리나라 밭 토양은 경사지가 많고 여름철 집중강우에 의한 표토 유실이 잦아(신경희, 2013) 유기물 축적이 어렵기 때문에 녹비작물 재배, 작물 잔재물 환원 등의 유기물 공급 확대가 필요할 것으로 판단된다. 유효인산은 과다 비율이 약 절반을 차지한 분포 형태로 2013~2025년 분포 비율이 큰 변동 없이 유지되는 것으로 보아 인산과잉 축적 문제가 고착화된 상태로 보인다. 교환성 양이온은 적정 비율이 매우 낮고, 과다하거나 부족한 비율이 높은 양극화 구조를 보였다.

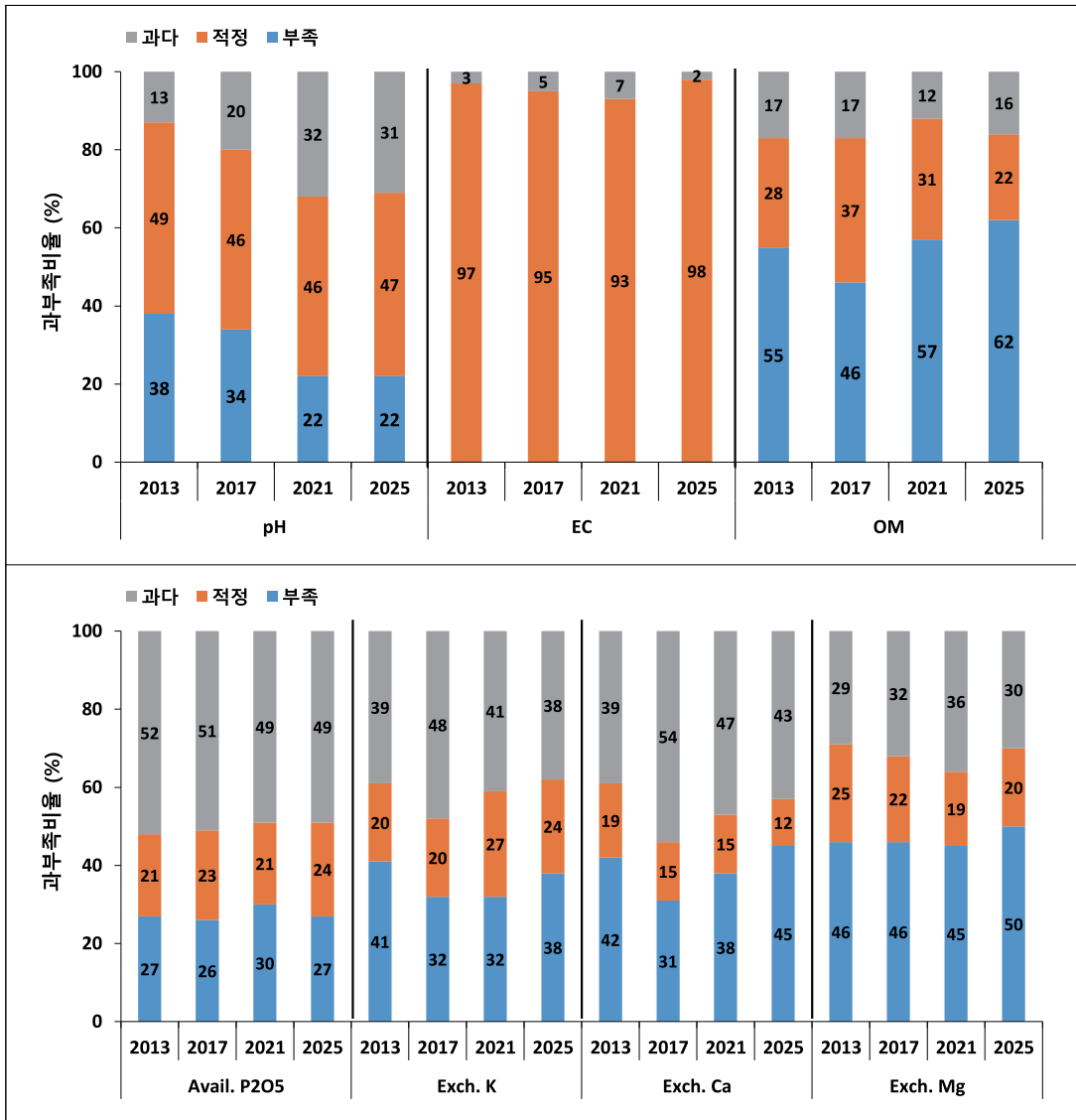


그림 1. 밭 토양화학성 적정범위 대비 분포 비율(%) 변화

2021년 밭 토양 중금속 분석 결과는 Cd 0.093mg/kg, Cu 29.6mg/kg, Pb 21.3mg/kg, Zn 128.7mg/kg, Ni 20.1mg/kg, Cr 60.9mg/kg, As 1.39mg/kg, Hg 0.035mg/kg이었고, 2025년 조사 결과는 Cd 0.083mg/kg, Cu 29.3mg/kg, Pb 18.8mg/kg, Zn 130.3mg/kg, Ni 19.3mg/kg, Cr 37.0mg/kg, As 3.86mg/kg, Hg 0.025mg/kg이었다(표 3). 연도별 변동을 보면 Cu, Pb, Ni은 점진적으로 감소하는 추세를 보였고, Zn은 완만히 증가하는 추세이나 토양오염 우려기준 대비 충분히 낮은 수준을 보였다.



표 3. 밭 토양 중금속 분석결과(2013~2025)

연 도	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cr (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
2013	0.658	38.6	49.5	123.5	23.1	42.9	4.53	0.022
2017	0.021	34.8	20.6	123.6	21.6	40.5	2.78	-
2021	0.093	29.6	21.3	128.7	20.1	60.9	1.39	0.035
2025	0.083	29.3	18.8	130.3	19.3	37.0	3.86	0.025
우려기준 ¹⁾	4	150	200	300	100	-	25	4

¹⁾ 토양오염 우려기준(토양환경보전법시행규칙, 2025)

2021년과 2025년 밭 토양의 중금속 함량을 토양오염 우려기준과 비교하여 함량 수준별 분포 비율을 조사한 결과는 표 4와 같다. 2021년과 2025년 밭 토양 중금속 7항목에 대해 토양오염 우려기준을 초과하는 지점은 없었다. Cd와 Hg는 대부분 1/20 이하에 분포하여 낮은 수치를 보였으나, Cu와 Zn은 기준~1/5 구간에 분포 비율이 높게 나타났다. Cu과 Zn가 상대적으로 높은 수준의 분포를 보이는 것은 돈분 퇴비 등의 가축분 퇴비로부터 점진적으로 누적된 것으로 판단된다. 특히 밭 토양화학성 분석에서 보였던 인산 과다 집적 문제와 연계하여 보면 가축분 퇴비의 무분별한 투입을 지양하고, 토양검정에 기반한 적정 시비가 필요하다고 판단된다.

표 4. 밭 토양 중금속 함량 수준별 분포(2021, 2025)

연도	구 분	Cd (%)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Ni (%)	As (%)	Hg (%)
2021	기준초과	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	기준~1/5	0.5	45.3	3.7	99.5	41.6	3.7	0.0
	1/5~1/10	2.1	38.4	40.5	0.5	30.5	12.6	1.6
	1/10~1/15	3.2	9.5	48.9	0.0	16.8	11.6	0.5
	1/15~1/20	3.2	2.1	4.2	0.0	4.7	11.1	0.0
	1/20 이하	91.1	4.7	2.6	0.0	6.3	61.1	97.9
2025	기준초과	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	기준~1/5	0.5	43.7	2.1	98.4	42.6	21.6	0.0
	1/5~1/10	0.5	40.0	26.8	1.6	28.4	50.0	0.0
	1/10~1/15	4.2	7.4	54.2	0.0	14.2	14.7	0.5
	1/15~1/20	2.1	4.2	13.2	0.0	7.4	2.6	0.0
	1/20 이하	92.6	4.7	3.7	0.0	7.4	11.1	99.5
우려기준		4	150	200	300	100	25	4

※ 우려기준 대비 분포 비율(%): (토양의 중금속 함량/토양오염 우려기준) * 100

나. 과수원 토양화학성(2022)

2022년 과수원 표토의 pH는 6.7, 전기전도도는 0.68dS/m, 유기물 함량은 22g/kg, 유효인산은 696mg/kg이고, 교환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 각각 1.00, 7.6, 2.0cmol_c/kg이었다(표 5). 2022년 과수원 심토 pH는 6.6, 전기전도도는 0.53dS/m, 유기물 함량은 14g/kg, 유효인산은 480mg/kg이고, 교환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 각각 0.74, 5.8, 1.8 cmol_c/kg이었다. pH는 표토 및 심토 모두에서 점진적으로 증가하는 추세였으나, 적정범위에 속하였다. 전기전도도 역시 표토와 심토 모두에서 2010년에 비해 2022년에 소폭 증가하였으나, 적정범위 이내로 조사되었다. 유기물 함량은 표토는 21~22g/kg, 심토는 12~14g/kg 범위에서 큰 변동 없이 유지되었다. 유효인산은 2014년에 약간 감소하였다가 다시 증가하였고, 표토의 유효인산 함량은 적정범위를 초과하였다. 이는 지속적인 비료 및 퇴비의 사용으로 인해 양분이 토양에 축적된 결과로 추정된다. 교환성 칼륨과 칼슘은 표토와 심토 모두에서 점차 증가하였고, 적정기준 대비 다소 높은 경향을 보였다. 교환성 마그네슘은 큰 변동 없이 유지되었으며, 석회 소요량은 2014년에 가장 높게 나타났다.

표 5. 연도별 과수원 토양화학성 변화(2010~2022)

연 도	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/Kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/Kg)	Ex.Cation (cmol _c /kg)				LR (kg/10a)	
					K	Ca	Mg	Na		
표토	2010	6.3	0.60	21	653	0.72	6.1	1.9	0.08	110
	2014	6.5	0.65	22	646	0.80	6.3	1.9	0.09	201
	2018	6.6	0.69	22	686	0.86	7.1	1.9	0.09	145
	2022	6.7	0.68	22	696	1.00	7.6	2.0	0.12	175
심토	2010	5.9	0.46	12	452	0.51	4.8	1.5	0.06	271
	2014	6.2	0.50	13	433	0.62	4.8	1.5	0.09	314
	2018	6.4	0.50	12	450	0.64	5.5	1.7	0.09	214
	2022	6.6	0.53	14	480	0.74	5.8	1.8	0.11	175
적정범위	6.0-7.0	2 이하	20-30	300-550	0.5-0.8	5.0-6.0	1.5-2.0	-	-	

2010~2022년 4주기 연도별 과수원 표토 토양화학성의 적정범위 대비 분포 비율을 조사한 결과는 그림 2와 같다. pH는 적정범위 내 분포가 2010년에는 71%에서 2022년 41%로 감소하면서, 과다 비율이 크게 증가되어 과수원 토양의 알칼리화가 진행되고 있었으며, 전기전도도는 대부분 적정범위에 속하였다. 유기물은 부족 비율이 가장 높게 나타났고, 조사기간 분포 비율이 큰 변동 없이 유지되고 있어 만성적인 유기물 부족 상태를 알 수 있다. 유효인산은 과다 비율이 2010년 57%에서 2022년 62%로 증가하여, 과반수 이상의 과수원 토양에서 인산과잉 현상이 나타났다. 교환성 양이온은 적정 비



율이 낮고, 지속적으로 과다 비율이 높게 나타났다. 과수원 토양은 일반 밭 토양과 달리 매년 경운하지 못하고, 뿌리손상이 우려되어 심경하지 못하기 때문에 비료 성분이 토양 하층부로 섞이지 못하고 표층에 집적된다. 특히 인산의 경우는 이동성이 낮아 인산 과잉 현상이 나타난 것으로 판단된다. 이러한 양분 과잉은 작물의 양분 흡수 불균형을 초래하고 미량요소 결핍 또는 생리장해를 유발할 가능성이 있어 토양검정에 기반한 적정 시비가 필요하다고 판단된다.

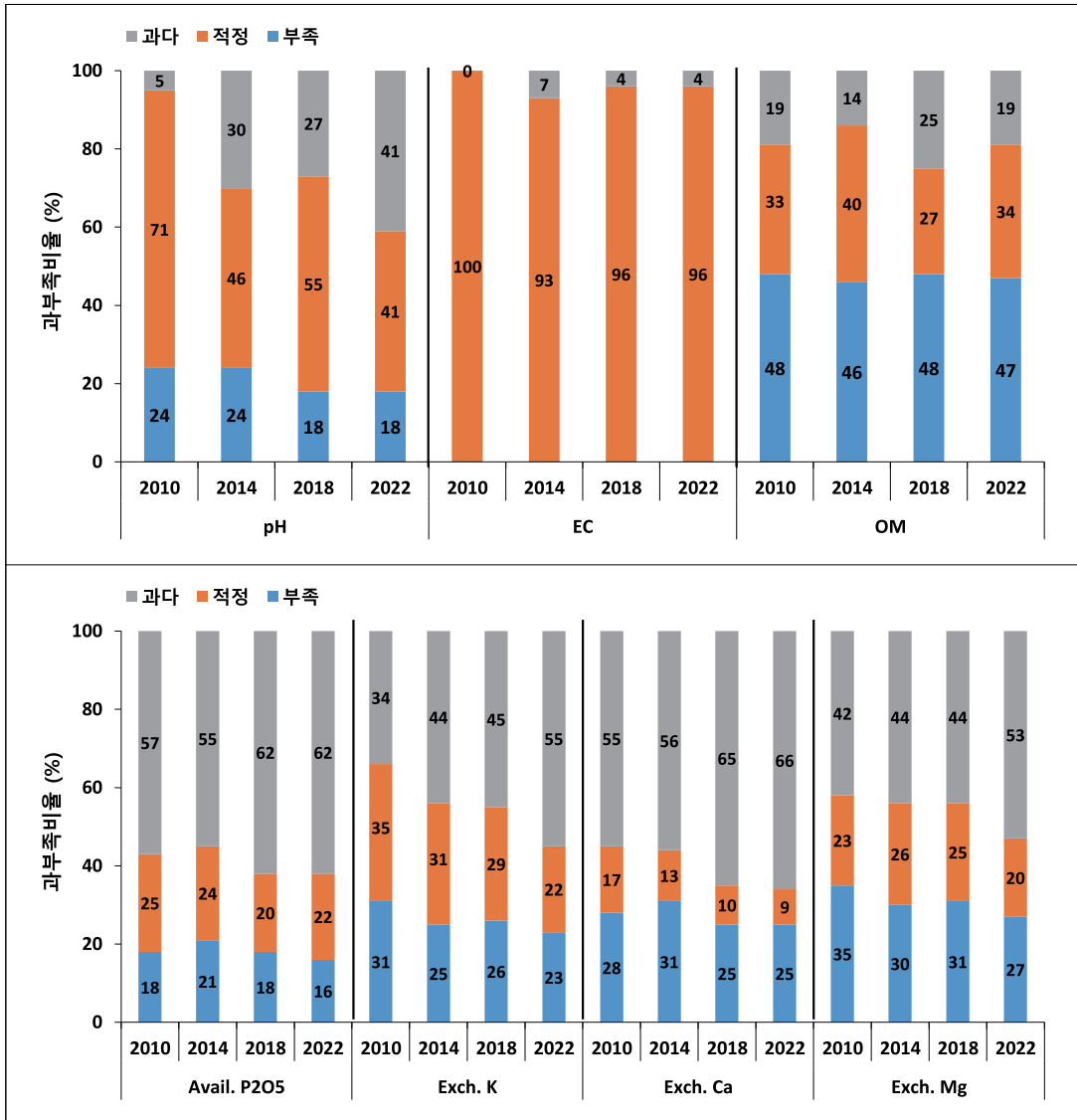


그림 2. 과수원 토양화학성 적정범위 대비 분포 비율(%) 변화

2022년 과수원 과종별 지점수는 배 41지점, 포도 33지점, 사과 16지점, 복숭아 10지점이었다(표 6). 배 과수원 토양은 유기물 함량이 높고, 유효인산, 교환성 칼륨과 교환성 칼슘 함량도 높은 편이었다. 포도 과수원은 전기전도도와 교환성 양이온 함량이 다른 과종 대비 가장 높게 나타났다. 사과 과수원은 pH가 상대적으로 높게 나타났는데, 이는 사과의 고두병 등 과수의 각종 생리장애를 예방하고 과육을 단단하게 만들기 위해 투입하는 토양개량제(석회고토 등)와 칼슘제(엽면시비 및 토양관주)의 영향으로 보인다(김 등, 2004). 복숭아 과수원은 유기물 함량이 타 작물 대비 낮아 적정범위 이하로 조사되었다. 이는 복숭아가 내습성이 약해 배수가 잘되는 경사지나 모래 함량이 많은 토양에서 재배되기 때문으로 생각된다. 실제로 주요 조사 지점인 이천, 용인 등은 모래가 많고 배수가 양호한 입지적 특성을 보였다.

표 6. 과종별 과수원 토양화학성 분포(2022)

과 종 (지점수)	토심	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/Kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/Kg)	Ex. Cation (cmol _c /kg)			
						K	Ca	Mg	Na
배 (41)	표토	6.6	0.41	24	767	1.09	7.7	1.8	0.05
	심토	6.5	0.35	15	589	0.88	5.5	1.5	0.05
포도 (33)	표토	6.6	1.24	21	737	1.12	8.5	2.4	0.26
	심토	6.4	0.92	13	372	0.75	6.3	2.0	0.23
사과 (16)	표토	6.9	0.40	20	563	0.73	7.2	2.0	0.07
	심토	6.9	0.36	16	433	0.54	6.8	2.1	0.07
복숭아 (10)	표토	6.7	0.37	16	489	0.62	4.9	1.5	0.05
	심토	6.6	0.29	11	464	0.49	3.9	1.5	0.04
적정범위		6.0~7.0	2 이하	20~30	300~550	0.5~0.8	5.0~6.0	1.5~2.0	-

2022년 과수원 표토의 중금속 분석 결과는 Cd 0.059mg/kg, Cu 29.9mg/kg, Pb 18.8mg/kg, Zn 118.1mg/kg, Ni 17.0mg/kg, Cr 54.4mg/kg, As 2.23mg/kg, Hg 0.031mg/kg이었다(표 7). 연도별 변동을 보면 Pb, Ni, As은 2010년에 각각 33.0, 25.2, 5.86mg/kg에서 2022년 18.8, 17.0, 2.23mg/kg으로 점진적으로 감소하는 추세를 보였고, Zn과 Hg는 2018년 대비 2022년 감소하였다.



표 7. 과수원 표토 중금속 분석결과(2010~2022)

연 도	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cr (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
2010	0.380	38.7	33.0	116.1	25.2	-	5.86	-
2014	0.020	38.0	22.9	120.3	21.5	43.9	3.72	0.022
2018	0.007	38.9	21.4	128.7	18.8	42.8	3.95	0.034
2022	0.059	29.9	18.8	118.1	17.0	54.4	2.23	0.031
우려기준	4	150	200	300	100	-	25	4

2022년 과수원 표토의 중금속 함량을 토양오염 우려기준과 비교하여 함량 수준별 분포비율을 조사한 결과는 표 8과 같다. 2022년 과수원 토양 중금속 7항목에 대해 토양오염 우려기준을 초과하는 지점은 없었다. Cd와 Hg는 대부분 1/20 이하에 분포하였으나, Zn은 대부분 우려기준~1/5 구간에 분포하는 것으로 나타났다. Cu는 상위 두 구간인 우려기준~1/5구간과 1/5~1/10 구간에 집중 분포하였다. Pb는 1/10~1/15 구간에 61%로 가장 많았으며, Ni와 As는 비교적 고르게 분포하였다.

표 8. 과수원 표토 중금속 함량 수준별 분포(2022)

연도	구 분	Cd (%)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Ni (%)	As (%)	Hg (%)
2022	기준초과	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	기준~1/5	0.0	47.0	3.0	99.0	39.0	5.0	0.0
	1/5~1/10	0.0	41.0	22.0	1.0	29.0	29.0	0.0
	1/10~1/15	0.0	6.0	61.0	0.0	15.0	23.0	0.0
	1/15~1/20	3.0	3.0	11.0	0.0	7.0	11.0	0.0
	1/20 이하	97.0	3.0	3.0	0.0	10.0	32.0	100.0
우려기준	4	150	200	300	100	25	4	

※ 우려기준 대비 분포 비율(%): (토양의 중금속 함량/토양오염 우려기준) * 100



다. 논 토양화학성(2023)

2023년 논 토양의 pH는 6.2, 전기전도도는 0.65dS/m, 유기물 함량은 23g/kg, 유효인산은 111mg/kg이고, 유효규산은 215mg/kg, 교환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 각각 0.33, 5.9, 1.5cmol_c/kg이었다(표 9). 토양 pH는 2011년 5.7에서 2023년 6.2로 완만히 증가하였으며, 전기전도도는 0.53~0.70dS/m 범위에서 변동을 보였으나 적정범위 이내였다. 토양유기물 함량은 큰 변화 없이 적정범위 내에서 유지되고 있었으며, 유효인산 함량은 2011년 84mg/kg에서 2023년 111mg/kg으로 적정범위를 초과하지 않는 범위에서 서서히 증가하였다. 논 토양은 담수 조건으로 인해 산소가 차단된 혐기성 상태가 되어 유기물 분해 속도가 늦고, 물을 대고 빼는 과정에서 잉여 염류가 용탈되기 때문에 밭이나 과수원에 비해 염류 집적이 발생하지 않은 것으로 생각된다. 교환성 칼륨은 2019년 이후 적정범위를 초과한 것으로 나타났고, 교환성 칼슘은 2011년 4.7cmol_c/kg에서 2023년 5.9cmol_c/kg로 증가하였으나 적정범위 이내였다. 교환성 마그네슘은 1.3~1.5cmol_c/kg 범위에서 유지되었고, 유효규산은 2011년 118mg/kg에서 2023년 215mg/kg까지 점진적으로 증가하여 적정범위 기준인 157mg/kg 이상을 만족하였다. 이는 농림축산식품부에서 수행하는 논 규산질비료 무상 지원사업의 효과로 규산질 비료 투입량이 증가한 영향으로 판단된다.

표 9. 연도별 논 토양화학성 변화(2011~2023)

연 도	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/Kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/Kg)	Ex.Cation (cmol _c /kg)				Av.SiO ₂ (mg/Kg)
					K	Ca	Mg	Na	
2011	5.7	0.64	24	84	0.30	4.7	1.3	0.25	118
2015	5.9	0.53	23	84	0.30	5.1	1.3	0.29	129
2019	6.0	0.70	24	90	0.34	5.1	1.3	0.33	138
2023	6.2	0.65	23	111	0.33	5.9	1.5	0.32	215
적정범위	5.5~6.5	2 이하	20~30	80~120	0.2~0.3	5.0~6.0	1.5~2.0	-	157 이상

2011년부터 2023년까지 4주기에 걸쳐 조사한 논 토양화학성의 적정범위 대비 분포 비율 결과는 그림 3과 같다. pH는 적정범위 내 분포가 높은 편이었고, 과다 비율이 점차 증가하는 추세를 보였으며, 전기전도도는 대부분 적정범위에 속하였다. 유기물은 적정 범위가 가장 높은 분포 비율을 보였고 큰 변동없이 안정적으로 유지되었으나, 여전히 일부 필지에서는 부족한 상태가 나타나고 있어 벗짚 환원, 동계 녹비작물 시용 등 유기물 공급이 필요하다고 판단된다. 유효규산은 2011년 적정 비율은 16%였으나, 2023년 63%로 증가하여 상당한 개선이 이뤄진 것으로 보인다. 유효인산은 부족 비율이 절반을 차지하였으나, 2013~2025년 과다 비율이 점차 증가하는 경향을 보였다. 교환성 칼륨과



칼슘은 적정 비율이 낮고, 과다하거나 부족한 비율이 높은 양극화 구조를 이루고 있으며, 불균형한 상태임을 알 수 있었다. 교환성 마그네슘은 2011년 부족 비율이 73%에서 2023년 60%로 다소 개선되었으나, 여전히 부족 비율이 높았다. 규산질 비료의 무상 지원 효과로 인해 논 토양 유효규산 함량이 상당히 증가하였으나, 다른 한편으로는 규산질 비료의 주성분인 슬래그에 포함된 석회로 인해 논 토양의 칼슘 과잉 축적과 pH 상승을 유발한 것으로 보인다.

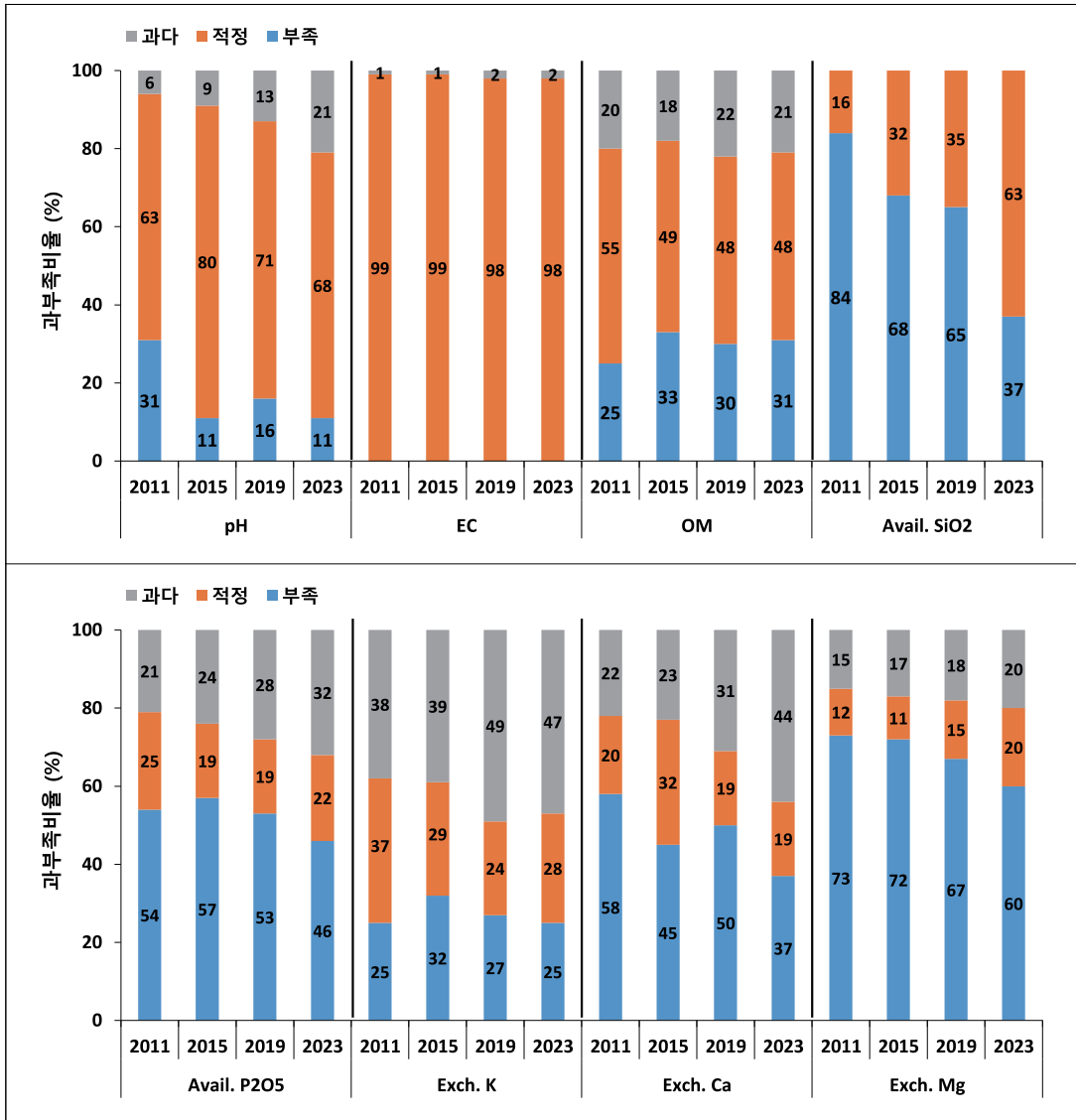


그림 3. 논 토양화학성 적정범위 대비 분포 비율(%) 변화



2023년 논 토양 중금속 분석 결과는 Cd 0.035mg/kg, Cu 17.8mg/kg, Pb 22.1mg/kg, Zn 85.5mg/kg, Ni 24.6mg/kg, Cr 63.8mg/kg, As 2.22mg/kg, Hg 0.037mg/kg이었다(표 10). 연도별 변동을 보면 Cd, Cu, As은 점진적으로 감소하는 추세를 보여 토양 건전성이 향상되었다. Zn은 2019년 대비 2023년 증가하였으나, 토양오염 우려기준 대비 28.5% 수준으로 안전한 수준으로 판단된다.

표 10. 논 토양 중금속 분석결과(2011~2023)

연 도	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cr (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
2011	0.323	23.7	27.4	79.6	24.5	-	6.19	-
2015	0.353	23.9	20.5	77.7	23.8	45.9	4.41	0.041
2019	0.213	19.9	20.8	74.5	21.4	42.1	4.66	0.032
2023	0.035	17.8	22.1	85.5	24.6	63.8	2.22	0.037
우려기준	4	150	200	300	100	-	25	4

2023년 논 토양 중금속 7항목에 대해 토양오염 우려기준 대비 분포 비율을 조사한 결과 기준을 초과하는 지점은 없었다(표 11). Cd와 Hg는 대부분 1/20 이하에 분포하여 매우 낮은 수치를 보였고, Cu와 Pb는 1/5~1/15 사이에 주로 분포하고 있었다. Zn과 Ni은 기준~1/5 수준에 분포하는 비율이 높아 타 항목에 비해 높은 수치를 보이고 있으며, 지속적인 모니터링이 필요하다고 판단된다.

표 11. 논 토양 중금속 함량 수준별 분포(2023)

연도	구 분	Cd (%)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Ni (%)	As (%)	Hg (%)
2023	기준초과	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	기준~1/5	0.4	9.6	4.6	90.4	62.9	4.2	0.0
	1/5~1/10	0.4	47.1	47.1	9.6	33.3	31.7	0.0
	1/10~1/15	0.4	28.3	41.3	0.0	2.9	22.1	0.0
	1/15~1/20	0.4	9.6	4.2	0.0	0.4	15.0	0.0
	1/20 이하	98.3	5.4	2.9	0.0	0.4	27.1	100.0
우려기준	4	150	200	300	100	25	4	

※ 우려기준 대비 분포 비율(%): (토양의 중금속 함량/토양오염 우려기준) * 100



라. 시설재배지 토양화학성(2024)

2024년 시설재배지 표토의 pH는 6.4, 전기전도도는 3.83dS/m, 유기물 함량은 33g/kg, 유효인산은 1,301mg/kg, 질산태질소는 217mg/kg이고, 교환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 각각 1.18, 10.2, 2.9cmol_c/kg이었다(표 12). 심토의 경우 pH는 6.5, 전기전도도는 2.43dS/m, 유기물 함량은 23g/kg, 유효인산은 1,011mg/kg, 질산태질소는 119mg/kg이고, 교환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 각각 0.89, 8.0, 2.3 cmol_c/kg이었다. 2012년부터 2024년까지의 시설재배지 토양화학성 변동 추이를 살펴보면, pH는 표토 6.3~6.6, 심토 6.2~6.5로 약산성~중성 상태를 유지하였고, 비교적 적정 상태인 것으로 보인다. 전기전도도는 표토와 심토 모두에서 적정범위를 크게 상회하여 심각한 염류 집적이 우려되었다. 유기물 함량은 표토 33~34g/kg로 적정범위 이내였고, 심토는 21~24g/kg 범위에서 변동하였다. 유효인산은 2012년 이후 점차 감소하는 추세를 보였으나, 최근 조사인 2024년에도 적정범위를 2배 이상 초과하여 표토뿐만 아니라 심토에서도 과잉 상태를 보였다. 교환성 양이온도 적정기준 대비 높은 경향을 보였고, 질산태질소는 2020년 대비 2024년에 증가하였다. 이러한 결과는 시설재배지의 특수한 환경적 요인에서 기인한다. 시설재배지는 노지와 달리 강우에 의한 양분 용탈이 차단되어 투입된 양분이 토양 내에 집적되기 쉬운 구조이다. 경기지역 시설재배지 토양의 높은 전기전도도와 유효인산 수치 결과를 보면 과도한 화학비료와 가축분 퇴비가 관행적으로 투입되어 토양 내 고정되고 있음을 알 수 있었다. 이러한 만성적인 염류집적은 작물의 뿌리발육을 저해하고 양분 흡수를 방해하여 작물 생산성을 떨어뜨리고, 장기적으로는 지하수 오염 등 환경 문제를 초래할 수 있으므로 주의가 필요하다고 판단된다.

표 12. 연도별 시설재배지 토양화학성 변화(2012~2024)

연 도	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/Kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/Kg)	Ex.Cation (cmol _c /kg)				NO ₃ -N (mg/Kg)	
					K	Ca	Mg	Na		
표토	2012	6.3	3.69	33	1,576	1.45	11.3	3.5	0.49	196
	2016	6.6	3.08	34	1,563	1.38	11.1	3.2	0.50	147
	2020	6.6	3.29	34	1,488	1.34	10.7	3.1	0.49	166
	2024	6.4	3.83	33	1,301	1.18	10.2	2.9	0.43	217
심토	2012	6.2	2.71	24	1,351	1.06	9.4	2.9	0.39	140
	2016	6.5	2.02	21	1,093	0.92	8.7	2.4	0.37	96
	2020	6.4	2.17	21	1,126	0.97	8.7	2.5	0.36	97
	2024	6.5	2.43	23	1,011	0.89	8.0	2.3	0.31	119
적정범위	5.5~6.5	2 이하	25~35	300~550	0.5~0.8	5.0~6.0	1.5~2.0	-	-	-

2012년부터 2024년까지 4주기에 걸쳐 경기지역 시설재배지 표토의 토양화학성 항목별 적정범위 대비 분포 비율을 분석한 결과는 그림 4와 같다. 세부 항목별로 보면, pH는 적정범위 비율이 2012년 64%에서 2024년 44%로 감소한 반면, 과다 비율은 2012년 7%에서 2024년 25%로 3배 이상 크게 증가하였다. 전기전도도는 4주기 조사 결과 모두에서 과다 비율이 60% 이상(2024년 69%)으로 나타나 과반수의 농가가 염류과잉 상태임을 확인하였다. 유기물은 과다 비율이 40~44%로 가장 높게 나타났으나, 부족 비율 역시 19~35%에 달해 농가 간 유기물 관리 편차가 매우 큰 양극화된 분포 형태를 보였다. 유효인산은 2012년 과다 비율이 96%에서 2024년 88%로 감소한 것은 긍정적이나, 여전히 시설재배지의 약 90%가 인산 과다 축적 상태인 것으로 나타났다. 교환성 양이온은 적정 비율이 10%대 안팎으로 낮고, 지속적으로 과다 비율이 높게 나타났다. 특히 교환성 칼슘은 85~96%, 마그네슘은 72~93%의 농가가 과다 수준인 것으로 조사되었다. 분포 비율 조사 결과를 통해, 표 12에서 경기지역 시설재배지 평균 화학성 수치가 높게 나온 배경에는 비료를 과용하는 일부 농가에서만 염류과잉 문제가 발생한 것이 아니라, 시설재배지 전반에 퍼져있는 문제임을 알 수 있었다. 이와 같은 토양 내 양분 과잉은 토양 용액의 삼투압을 상승시켜 작물의 수분흡수를 방해하고, 결국 작물이 시드는 염류장해를 유발한다. 또한 양분 불균형 토양에서는 토양 이온간 길항작용을 일으켜 작물의 필수 미량요소 흡수를 저해함으로써 생리장해가 발생할 가능성이 있다. 따라서 토양검정에 기반한 과학적인 시비 관리 및 염류 경감을 위한 적극적인 대처가 시급하다고 판단된다.

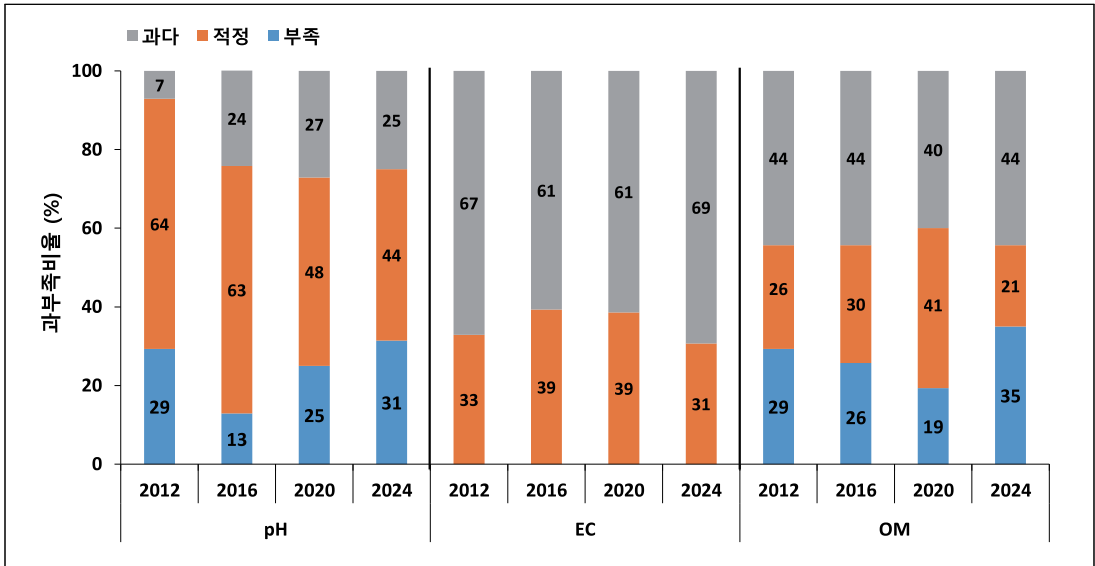


그림 4(가). 시설재배지 토양화학성 적정범위 대비 분포 비율(%) 변화

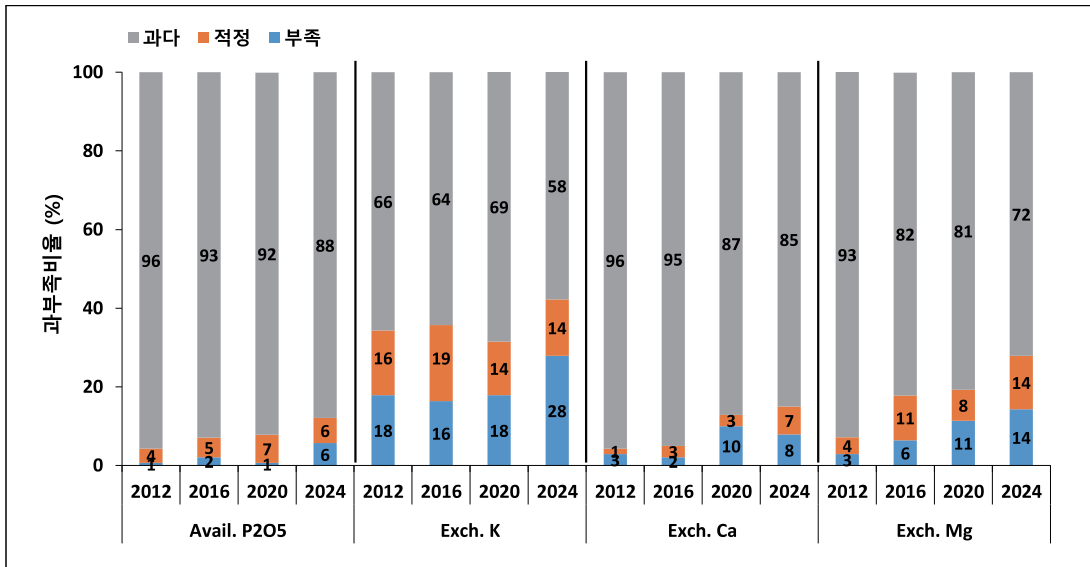


그림 4(나). 시설재배지 토양화학성 적정범위 대비 분포 비율(%) 변화

2024년 시설재배지 표토의 중금속 분석 결과는 Cd 0.212mg/kg, Cu 58.3mg/kg, Pb 19.7mg/kg, Zn 177.6mg/kg, Ni 27.1mg/kg, Cr 54.2mg/kg, As 5.39mg/kg, Hg 0.031mg/kg이었다(표 13). 연도별 변동을 보면 Cu, Hg은 2016년 이후 점진적으로 감소하는 추세를 보였고, Cr도 2012년 이후 꾸준히 감소하였다. Zn은 2012년 192.5mg/kg으로 토양오염 우려기준의 약 64%이었으나, 2024년 177.6mg/kg(약 59%)으로 감소하였다.

표 13. 시설재배지 표토 중금속 분석결과(2012~2024)

연 도	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cr (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
2012	0.540	67.2	40.0	192.5	23.5	66.8	5.48	0.004
2016	0.036	69.5	20.3	172.1	28.8	61.8	4.76	0.041
2020	0.091	63.4	22.5	173.7	21.9	54.4	5.08	0.037
2024	0.212	58.3	19.7	177.6	27.1	54.2	5.39	0.031
우려기준	4	150	200	300	100	-	25	4

2024년 시설재배지 표토의 중금속 함량을 토양오염 우려기준과 비교하여 함량 수준별 분포비율을 조사한 결과는 표 14와 같다. 2024년 시설재배지 토양 중금속 7항목에 대해 토양오염 우려기준을 초과하는 지점은 없었다. 항목별로 살펴보면, 수은(Hg)은 전체 지점 모두 우려기준의 1/20 이하 구간에 분포하였고, 카드뮴(Cd) 역시 1/20 이하 구간에 가장 많이 분포하여 오염도가 극히 낮았다. 납(Pb)과 비소(As)는 특정 구간에 치우치지 않고 비교적 고르게 분포하는 경향을 보였다. 반면, 구리(Cu), 아연(Zn), 니켈(Ni)은 대부분 '기준~1/5' 구간에 분포하여 상대적으로 높은 농도 구간에 집중된 것으로 나타났다. 이는 시설재배지의 특성상 비가림으로 인해 강우에 의한 물질의 유실이나 용탈이 적은 환경에서, 작물 재배 시 투입되는 가축분 퇴비와 액비, 그리고 일부 농약(동제 등)에 포함된 아연(Zn)과 구리(Cu) 성분이 토양 표층에 지속적으로 축적되었기 때문으로 판단된다. Jeong 등(2023)의 연구 결과에 따르면, 가축분퇴비를 장기 연용한 시설재배지에서는 토양 pH, 유기물, 유효인산, 교환성 양이온 함량이 증가할 뿐만 아니라, 가축분퇴비의 사용량 및 사용 연한이 길어질수록 구리(Cu)와 아연(Zn)의 토양 내 부하량이 유의미하게 증가하는 것으로 나타났다.

표 14. 시설재배지 표토 중금속 함량 수준별 분포(2024)

연도	구 분	Cd (%)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Ni (%)	As (%)	Hg (%)
2024	기준초과	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	기준~1/5	0.7	83.6	2.1	98.6	75.0	49.3	0.0
	1/5~1/10	2.1	14.3	37.1	0.7	20.0	35.7	0.0
	1/10~1/15	23.6	0.7	50.0	0.7	3.6	7.9	0.0
	1/15~1/20	25.7	0.7	3.6	0.0	1.4	4.3	0.0
	1/20 이하	47.9	0.7	7.1	0.0	0.0	2.9	100
	우려기준	4	150	200	300	100	25	4

※ 우려기준 대비 분포 비율(%): (토양의 중금속 함량/토양오염 우려기준) * 100

4. 적요

본 연구는 경기지역 주요 농경지(밭, 과수원, 논, 시설재배지)의 연도별 토양화학성 및 중금속 변동 특성을 분석하여 영농 형태별 토양 비옥도 현황과 양분 불균형 실태를 평가하고, 지속 가능한 토양 관리 및 적정 시비 방안을 제시하고자 수행하였다.

- 가. 밭 토양화학성 조사결과 유기물 함량의 지속적인 감소현상이 나타나, 유기물 공급 확대가 필요한 것으로 나타났다. 또한 유효인산은 과다 비율이 약 절반을 차지하여 인산 과잉 축적 문제가 고착화된 것으로 조사되었다.
- 나. 과수원 토양은 경운 및 심경을 하지 못하는 특성으로 인해 유효인산과 교환성 양이온의 표층 집적 현상이 뚜렷하게 나타났다. 특히 사과 과수원은 고두병 등 생리장해 예방을 위한 토양개량제 및 칼슘제 투입의 영향으로 타 과종 대비 토양 알칼리화 및 칼슘 과잉 현상이 두드러졌다.
- 다. 논 토양은 담수 조건으로 인해 산소가 차단되고, 잉여 염류가 용탈되어 밭이나 과수원 대비 EC와 유기물 등의 화학성이 안정적으로 유지되고 있었다. 특히 유효규산 함량은 정부의 규산질 비료 지원사업의 효과로 2023년 215mg/kg까지 크게 증가하여 적정기준을 충족하였다.
- 라. 시설재배지 토양은 강우가 차단된 환경에서 화학비료와 가축분 퇴비가 과다 투입되어 2024년 표토 기준 전기전도도(3.83dS/m) 및 유효인산(1,301mg/kg) 등이 적정범위를 초과하였다. 조사 농가의 과반수(61~69%)가 염류과잉 상태로 나타나 정밀 시비와 적극적인 염류경감 조치가 필요한 것으로 판단되었다.
- 마. 4개 토양 유형(밭, 과수원, 논, 시설재배지)의 중금속 8항목을 조사한 결과, 우려기준이 설정된 7개 항목 모두 전 지점에서 토양오염 우려기준을 초과하지 않아 매우 안전한 수준이었다. 다만 가축분 퇴비와 일부 농약(동제 등)의 지속적인 투입으로 인해 밭, 시설재배지, 과수원 표토에서 구리(Cu)와 아연(Zn)이 상대적으로 높은 구간(기준~1/5)에 집중 분포하여 지속적인 모니터링이 필요하다.

5. 인용문헌

- 농촌진흥청. 2019. 농업분야 양분수지 개선 방법론 및 정책 비교 평가.
- 농촌진흥청. 2020. 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법.
- 농촌진흥청. 2021. 농업환경자원변동평가(4년 1주기, 5차사업).
- 김명섭. 2004. 칼슘염면살포 및 점적관수에 의한 사과 고두병 발생억제. 현장농업연구지, 6(1), 73-80.
- 신경희. 2013. 토양자원 유실 최소화를 위한 국내외 환경영향평가 사례 연구. 한국환경연구원.

Myeong Seok Jeong, Mina Lee, Chaw Su Lwin, Namhee Yi, Taehee Baek, Kwon-Rae Kim.(2023). Investigating Heavy Metal Levels of Greenhouse Soils Using Long-Term Livestock Manure. 한국토양비료학회지, 56(3), 226-234.

6. 연구결과 활용제목

- 발토양 화학성 변동현황과 과부족 비율을 활용한 시비기술(영농활용, 2021년)
- 경기도 과수원 토양화학성 변동현황과 과부족 비율을 활용한 시비기술(영농활용, 2022년)
- 경기도 논토양 화학성 변동과 양분 과부족률 현황(영농활용, 2023년)
- 경기도 시설재배지 토양화학성 변동과 양분 과부족률 현황(영농활용, 2024년)
- 경기도 발토양 화학성 변동과 양분 과부족 현황(영농활용, 2025년)

7. 연구원 편성

세부과제	구분	소속	직급	성명	수행업무	참여년도				
						21	22	23	24	25
농경지 토양화학성 변동조사	책임자	환경농업 연구과	농업연구사	정재원	세부과제 총괄	○	○	○	○	○
	공동연구자	〃	농업연구사	장재은	자료 정리	-	-	-	-	○
	〃	〃	〃	주옥정	자료 정리	○	○	○	○	-
	〃	〃	〃	서재순	자료 정리	-	-	-	-	○
	〃	〃	〃	이정혜	자료 정리	-	○	○	○	-
	〃	〃	〃	안희정	자료 정리	-	-	○	○	○
	〃	〃	〃	김조은	자료 정리	○	○	-	-	-
	〃	〃	농업연구관	노안성	성적검토	○	○	-	-	-
	〃	〃	〃	소호섭	성적검토	○	○	○	○	○
	〃	〃	〃	이영순	연구자문	○	-	-	-	-
〃	〃	〃	박중수	연구자문	-	○	○	○	○	