한국환경농학회지 제21권 제2호 (2002)
Korean Journal of Environmental Agriculture Vol. 21, No. 2, pp. 109~116

우리나라 중부지방의 시설원예 토양 및 지하수 환경

김진호* · 이종식 · 김원일 · 정구복 · 윤순강 · 정연태 · 권순국[1)]
농업과학기술원 환경생태과, [1)]서울대학교 농공학과
(2002년 3월 21일 접수, 2002년 5월 30일 수리)

Groundwater and Soil Environment of Plastic Film House Fields around Central Part of Korea

Jin-Ho Kim*, Jong-Sik Lee, Won-Il Kim, Goo-Bok Jung, Sun-Gang Yun, Yeun-Tae Jung, and Soon-Kuk Kwun[1)]
(Lab. of Environmental Pollution, Department of Environment & Ecology, National Institute of Agricultural Science & Technology, RDA, [1)]Department of Agricultural Engineering, Seoul National University)

ABSTRACT: The objective of this study was to know the qualities of soil and shallow groundwater in plastic film house fields around Central Part of Korea. The study was conducted at 11 sites in Suweon, Hwasung, Pyungtaek, Yongin, and Chuncheon through May to August in 1999. Soil textures of plastic films house were mainly sandy loam or loam. Electric conductivity and organic matter content of surface soils mostly exceeded the critical levels for crop production. Average concentration of NO_3-N in the shallow groundwater was 19.1 mg/L, and it reached almost the limiting level of agricultural groundwater quality (20 mg/L). Moreover about 36% of survey sites exceeded the limiting level of agricultural groundwater quality. Sulfate concentrations also at some sites exceeded agricultural groundwater quality limit level (50 mg/L). Nitrate-N, one of the most important factors in the groundwater quality, had positive correlations with other ions in groundwater.

Key words: plastic film house, groundwater, water quality, soil properties

서 론

우리나라는 최근 급격한 산업의 발달과 더불어 소비 농산물의 고급화를 추구하게 되었다. 이에 원예작물의 시설재배가 급진적으로 보급되었는데, 우리나라의 시설원예는 1951년경 김해지방에 염화비닐하우스로 시작된 이래 1954년 폴리에틸렌의 국내 생산과 함께 급속도로 성장하여 2000년에는 시설작물재배 면적이 1,005,758 ha에 달했다[1)]. 이러한 시설재배면적의 급증과 더불어 재배 작형이 다양화되었고, 소비자들은 언제나 신선한 농산물을 구할 수 있게 되었으며, 또한 농가소득증대에 기여한 바가 크다. 그러나 시설원예작물의 생산성 증대를 위한 각종 비료와 가축분 퇴비의 무분별한 시용과 작물의 연작은 토양내 염류집적을 초래한다. 그 결과물에 의한 염류의 용탈은 지하수의 오염을 가속화시키고 있는 실정이다. 이는 토양내 축적된 염류의 성분 중 음전하를 띤 성분은 토양내 잔류성이 적고, 이동성이 크므로 지하수오염으로 직결된다. 이들 성분 중 일부는 영양염류로서 비점오염원의 잠재성을 지니게 된다[2-8)]. 이러한 관점에서 우리나라 중부지역에서 연중 상추를 주작목으로 재배하고 있는 수원, 용인, 화성, 평택, 춘천 등 총 11개 지점 시설재배지의 지하수와 토양의 특성을 조사하였다. 그리고 이들 시설원예지 토양의 물리, 화학성분과 시기별 지하수의 화학 성분변화 조사를 통해 농산물의 안전성 확보와 농업활동에 의한 환경에 미치는 영향을 최소화하고, 최근 급변하는 농업환경정책에 농업이 좀더 적극적으로 대응할 수 있는 기초 자료를 얻고자 하였다.

*연락저자:
Tel: +82-31-290-0220 Fax: +82-31-290-0277
E-mail: jh-kim@rda.go.kr

재료 및 방법

조사지역 농업 개황

조사대상지점은 우리나라 중부지방의 수원(S), 용인(Y), 화성(H), 평택(P), 춘천(C)에 위치한 대표적인 시설원예지로서 연중 멀칭상태를 유지하고 있는 11개 지점을 대상으로 하였으며, 이들 조사대상 지점의 주작목은 상추이었다. 연구대상 시설재배지점은 Fig. 1에 나타내었다. Table 1은 조사지점의 관정 깊이와 연작 연수를 나타낸 것이다. 이는 농업인들의 설문에 의한 조사를 실시한 것이다. Y지점들이 연작 연수가 짧았고 관정도 깊지 않았다. 그러나 그 외 지점들은 대체적으로

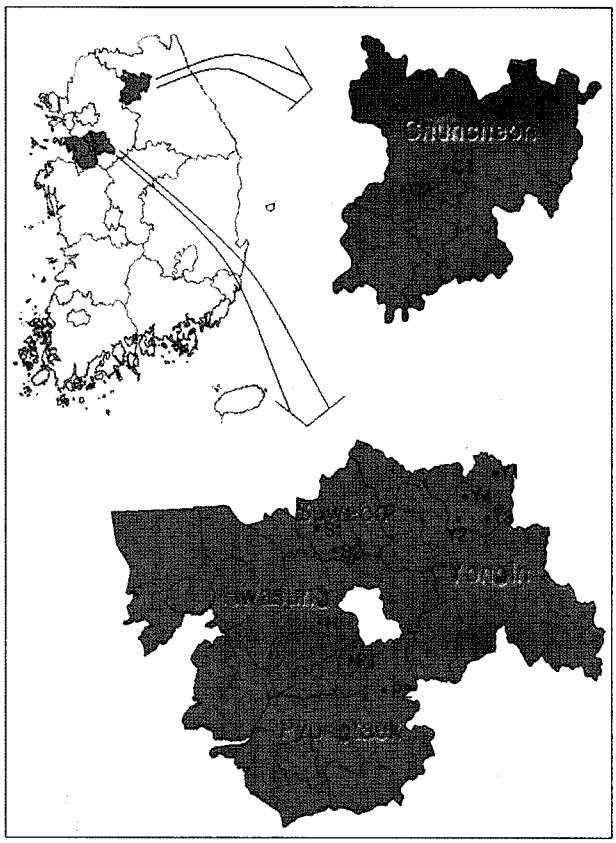

Fig. 1. Location of surveyed fields around the central part of Korea.

Table 1. Well depth of groundwater and years of continuous cultivation at sampling sites

Site	Location		Continuous cultivation	Well depth
	Province	City		
			year	m
H	Kyonggi	Hwaseong	17	8
P1	Kyonggi	Pyongtaek	15	30
P2	Kyonggi	Pyongtaek	16	7
S1	Kyonggi	Suwon	5	40
S2	Kyonggi	Suwon	10	25
C1	Gangwon	Chuncheon	15	8
C2	Gangwon	Chuncheon	14	10
Y1	Kyonggi	Yongin	6	6
Y2	Kyonggi	Yongin	3	6
Y3	Kyonggi	Yongin	11	6
Y4	Kyonggi	Yongin	6	6

10년 이상의 연작을 하고 있는 것으로 조사되었다. 이러한 시설재배지의 연작은 토양내 염류집적을 통해 엽채류인 상추의 질산염 증가에 큰 영향을 미친다. 또한 사용하는 지하수위 대부분 천층 지하수이기 때문에 시설원예지의 염류집적은 지하수계의 오염으로 이어질 수 있는 수질 환경특성을 보였다.

Table 2. Particle size distribution of soils in the plastic film house investigated

Site	Depth	Sand	Silt	Clay	Texture
		%			
H	Surface[a)]	61.3	28.3	10.4	SL
	Subsurface[b)]	57.3	29.0	13.7	SL
P1	Surface	52.9	34.6	12.5	SL
	Subsurface	44.1	41.7	14.2	L
P2	Surface	11.9	67.5	20.6	SiL
	Subsurface	9.9	67.1	23.0	SiL
S1	Surface	17.2	63.7	19.1	SiL
	Subsurface	15.3	63.3	21.4	SiL
S2	Surface	51.8	37.6	10.6	L
	Subsurface	68.5	22.2	9.3	SL
C1	Surface	57.0	32.3	10.7	SL
	Subsurface	50.5	37.1	12.4	L
C2	Surface	61.4	31.5	7.1	SL
	Subsurface	69.1	22.5	8.4	SL
Y1	Surface	59.6	30.0	10.4	SL
	Subsurface	61.8	28.9	9.3	SL
Y2	Surface	45.3	43.2	11.5	L
	Subsurface	43.7	43.8	12.5	L
Y3	Surface	58.9	30.9	10.2	SL
	Subsurface	60.9	28.3	10.8	SL
Y4	Surface	52.8	38.8	8.4	SL
	Subsurface	56.0	32.9	11.1	SL

[a)] Surface, 0~15 cm depth; [b)] Subsurface, 15~30 cm depth.

시료채취 및 분석방법

지하수 시료는 6월에서 9월까지 매월 1회 조사 대상 지점에서 pump를 이용, 2분간 토출시킨 후 2 L PE 용기에 채수하여, EC 및 pH를 현장에서 측정하였고 기타 성분은 시료를 Ice Box에 넣어 실험실로 운반한 후, 수질오염공정시험방법과 Standard Method에 준하여 분석하였다[9,10]. COD는 산화제로 $K_2Cr_2O_7$을 사용하였으며, NH_3-N은 Indophenol법을, NO_3-N은 자외선흡광광도법을, PO_4-P는 흡광광도법 중 염화제일주석 환원법, Cl^-은 질산은 적정법, SO_4^{2-}는 $BaCl_2$에 의한 비탁법으로 분석하였다. 이때 사용한 UV-spectrophotometer는 BECKMAN-DU650 이었다. 또한 양이온은 6번 여지로 여과 후, ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, GBC INTERGRA XMP)를 이용하여 측정하였으며, Zn과 Fe는 질산에 의한 분해방법으로 전처리 하였다. 토양시료는 6월에 채취하였는데, 표층시료는 0~15 cm에서 심층시료는 15~30 cm에서 채취한 후, 토양의 화학성 및 토성은 토양 및 식물체 분석법으로[11] 중금속은 토양오염공정시험방법에 준하여 분석하였다[12]. 음이온 NO_3^-, PO_4^{3-}, SO_4^{2-}, Cl^- 등은 Ion chromato-

Table 3. Chemical properties of the plastic film house soils

Site	Depth	pH (1:5)	EC (dS/m)	O.M (%)	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Ca^{++}	K^+	Mg^{++}	Na^+
					mg/kg				cmol$^+$/kg			
H	Surface	5.7	2.00	2.67	223.5	266.5	651.2	88.3	8.89	1.29	3.28	0.83
	Subsurface	6.0	1.63	1.19	155.4	258.6	528.4	73.4	6.61	0.70	2.17	0.48
P1	Surface	5.6	0.93	2.05	104.1	29.0	107.5	24.9	5.87	1.03	1.91	0.22
	Subsurface	4.6	0.46	1.02	27.8	132.1	94.0	11.6	3.48	0.46	1.27	0.28
P2	Surface	6.1	0.46	1.89	17.21	71.5	114.2	23.9	4.77	0.54	1.15	0.23
	Subsurface	4.6	0.46	1.65	nd	88.7	111.2	24.5	3.70	0.20	0.98	0.21
S1	Surface	4.4	3.50	4.05	190.8	509.8	977.7	305.2	12.85	1.58	5.18	1.32
	Subsurface	6.2	2.94	3.02	144.1	351.7	892.4	214.9	9.76	0.89	3.56	1.21
S2	Surface	5.8	0.71	3.53	296.3	101.0	162.5	25.2	7.86	1.35	2.32	0.30
	Subsurface	5.4	0.93	0.58	190.4	155.7	239.8	46.7	3.94	0.65	1.55	0.28
C1	Surface	5.2	1.03	2.80	189.0	69.6	294.0	44.7	7.33	1.44	1.65	0.32
	Subsurface	4.8	0.88	1.31	138.6	83.3	259.9	66.7	5.74	1.06	1.63	0.30
C2	Surface	5.9	0.27	4.09	72.4	14.4	20.7	7.2	9.18	1.34	1.97	0.30
	Subsurface	6.0	0.61	1.76	41.5	29.9	12.1	8.8	5.81	0.83	1.02	0.24
Y1	Surface	6.2	0.61	2.68	175.9	123.3	183.2	35.6	6.67	0.32	1.44	0.43
	Subsurface	5.9	0.81	1.58	nd	155.2	193.7	40.2	4.46	0.21	0.93	0.35
Y2	Surface	5.4	1.52	5.06	345.3	202.1	426.7	44.3	10.06	1.89	4.25	0.55
	Subsurface	4.8	1.43	3.41	247.1	230.0	407.7	50.2	7.11	1.23	2.90	0.48
Y3	Surface	6.0	4.06	4.73	469.6	353.7	1279.4	124.3	9.31	2.75	3.54	0.67
	Subsurface	4.4	2.30	2.21	237.4	235.7	869.6	66.7	6.50	2.29	2.58	0.56
Y4	Surface	6.3	1.85	5.07	312.7	200.2	562.8	77.3	8.61	1.81	4.30	0.64
	Subsurface	6.2	0.92	2.61	195.4	155.4	264.8	76.1	5.10	1.01	2.41	0.45

graphy (Dionex, DX300)를 그리고 양이온과 중금속은 ICP를 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

Table 2는 시험된 시설재배지 토양의 입경분석 결과이다. 시설재배지 토양의 토성은 대부분이 모래의 비율이 높은 사질 양토이거나 양토로 배수가 잘되는 토양으로 판단되었으나, P2나 S1에서는 미사의 비율이 높은 미사질 양토이었다. 대부분의 표토와 심토에서 모래 > 미사 > 점토 순으로 분포 비율을 나타내고 있으나, P2와 S1에서는 미사 > 점토 > 모래 순으로 나타내고 있어 입도 분포 특성이 다른 것을 알 수 있었다. 즉, P2와 S1에서는 미사질로 구성되어 있었는데 이는 넓은 충적 평탄지이므로 입도의 분급이 원활하였음을 알 수 있다. 토양중에 모래의 비율이 높으면, 통기성과 투수성이 양호하고 지온 상승이 용이하나, CEC가 낮고, 비료분의 용탈이 용이하여 가뭄시 수분부족으로 인한 한발 피해를 유발하기 쉽고 작물 생육이 불량해지며, 미사 함량이 많으면, 통기와 투수의 불량, 경반 형성의 우려가 있다. 또한 미사함량이 많은 토양은 침식의 우려가 크고, 보비력이 낮은 문제점이 있다. 밭토양은 미사 함량이 15~25%를 초과하지 않는 것이 좋으나, P2과 S1의 경우 이 비율을 크게 초과하는 것으로 나타났다. 조사대상 지점중 P2와 S1은 해안 평탄지에 분포된 미사질 양토로서 미사의 함량이 다른 토양보다 높은 해성토의 특징을 나타내고 있다. 또한 P2와 S1은 점토 함량도 19.1~23%로 약간 높은 편이므로, 이 지점들의 투수 및 통기성이 불량할 것으로 보이므로 유기물증시, 중경(中耕)등의 관리를 잘하여 토양 물리성이 양호하도록 할 필요가 있다. 반면, 보비력이 높으므로 지하수로의 영양염류 유출은 상대적으로 낮을 것으로 판단된다. 점토가 25%이상이면 기계화 농작업이 불량해지며, 투수 및 통기성의 악화를 가져온다. 논의 경우 15~35%가 적합하지만, 밭토양의 경우는 10~15% 정도가 적합하다.

Table 3은 조사 토양의 화학성을 나타낸 것이다. 시설재배를 위한 토양의 화학성의 적정범위는 pH의 경우 6.0~6.5, EC의 경우 2.0 dS/m 이하이다[13]. 조사토양의 심토에서는 대부분의 EC가 기준치이하이나, 표토에서는 기준치에 도달하거나, 초과하는 지점이 상대적으로 많았다. 이는 작물의 연작 및 영양물질의 과다사용 때문으로 인한 토양의 염류집적에 기인한 것으로 판단된다. 또한 유기물 함량은 조사 대상지점의 대부분에서 적정수준 2~3%를 상회하였고[13], 심토의 경우 이 수준을 넘는 곳도 일부 있었다. 이는 생산력 증대를 위한 유기물의 과다 투입에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 질산성 질소, 인산 및 염소 이온 등의 음이온이 과다한데 이는 미량요소 양분의 불용화를 초래하여 작물의 생리장해를 유발할 수 있다.

Table 4. Content of heavy metals in the plastic film house soils

Site	Depth	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr
		mg/kg				
H	Surface	0.84	0.062	56.5	0.034	ND[a]
	Subsurface	2.86	3.518	28.1	0.137	ND
P1	Surface	4.09	3.455	36.2	0.120	1.403
	Subsurface	3.37	3.329	6.8	0.069	0.180
P2	Surface	4.59	5.087	11.4	0.051	0.036
	Subsurface	4.89	4.899	7.6	0.034	0.072
S1	Surface	2.42	1.822	50.1	0.154	0.468
	Subsurface	4.29	3.141	25.7	0.103	0.360
S2	Surface	2.57	1.131	71.0	0.154	0.540
	Subsurface	2.66	2.136	11.2	0.017	0.144
C1	Surface	2.72	2.073	49.3	0.120	0.612
	Subsurface	2.88	1.131	27.0	0.069	0.288
C2	Surface	1.33	1.445	34.1	0.103	0.468
	Subsurface	2.79	3.832	18.2	0.051	0.648
Y1	Surface	8.32	3.518	19.4	0.069	0.468
	Subsurface	7.81	4.271	8.3	0.051	0.288
Y2	Surface	19.97	1.194	147.8	0.171	0.792
	Subsurface	21.69	2.136	73.5	0.137	0.864
Y3	Surface	27.78	1.445	142.7	0.120	0.900
	Subsurface	17.68	2.387	54.7	0.086	0.756
Y4	Surface	21.03	1.947	127.5	0.103	0.792
	Subsurface	16.06	4.646	37.5	0.069	0.504

[a] ND : not detected.

시설재배의 가장 큰 특징은 강우가 차단된 피복 상태에서 작물을 재배하는 것으로 노지와는 생산 환경 조건이 크게 다른 점이다. 따라서 시설 내에서는 강우에 의한 영향을 받지 않고 다비재배하는 경향이기 때문에 토양이나 지하수내 영양염류 들이 과다해 질 수 있다. 이에 대한 주원인은 다수확을 위한 유기물은 물론 비료 등 각종 토양 개량자재의 과다한 투입이다[14]. 이러한 양분의 과다 축적 및 불균형 현상은 생육장해의 원인이 되고, 농산물의 품질악화를 초래하고 결과적으로는 토양 병해 발생의 원인이 되고 있다[14]. 시설원예지 토양의 치환성 양이온의 적정범위는 K^+의 경우 0.7~0.8, Ca^{2+}의 경우 5.0~6.0, Mg^{2+}의 경우 1.5~2.0정도이다[13]. 대부분의 조사 대상 지점에서 이 수준을 초과하는 것으로 나타났다. 특히 석회와 칼륨이 과다한 편이며, S1의 경우에는 Na도 다량 축적되어 있어 작물의 정상적인 생육이 어려울 것으로 추정된다. Ca의 과다는 붕소 결핍을 일으킬 수 있고, K의 과다는 Mg의 흡수를 방해한다.

Table 4에 나타낸 조사 대상 지점의 토양의 중금속 함량은 토양환경보전법상의 토양오염우려기준을 초과하는 수준은 아닌 것으로 조사되었다[15]. 특히 아연 및 구리 농도의 경우 토양오염우려기준인 50 mg/kg과 200 mg/kg에는 미치지 않으나[15], Y2, Y3, Y4지점이 조사 대상 지점중 여타 지점보다 상대적으로 높은 것으로 조사되었다. 이는 이 지역 인근이 양돈단지 밀집 지역으로 다량의 돈분 발효 부산물 비료의 연용에 기인한 것이었다. 특히 식물체에서도 구리 집적에 의한 피해로 상추의 엽맥이 휘는 생리장해현상을 보이기도 했다. 이는 양돈사료에 돼지의 생리작용을 조절하기 위해 아연과 구리를 첨가하기 때문으로, 이런 이유로 최근에 비료공정규격에서 구리 허용량은 500 mg/kg에서 300 mg/kg으로 조정한바 있다. 따라서 하우스 연작시에 돈분 발효 부산물 비료를 연용시에는 구리와 아연의 축적에 의한 토양 오염 가능성을 고려해야 할 것이다.

Table 5. Changes of EC and COD_{Cr} in the groundwater of plastic film house areas

Site	EC (dS/m)				COD_{Cr} (mg/L)			
	Jun	Jul	Aug	Sept	Jun	Jul	Aug	Sept
H	0.268	0.284	0.309	0.297	14.1	18.2	11.8	13.3
P1	0.986	0.721	0.756	0.705	24.0	7.2	20.8	14.6
P2	0.794	0.877	0.941	0.958	3.5	22.6	19.2	26.4
S1	0.346	0.491	0.431	0.498	29.8	35.2	15.4	16.3
S2	0.344	0.307	0.287	0.274	23.7	43.0	17.8	12.3
C1	0.291	0.322	0.253	0.326	18.9	22.7	8.3	6.6
C2	0.628	0.588	0.728	0.759	22.7	47.0	7.8	18.2
Y1	0.417	0.476	0.492	0.437	5.1	30.2	6.6	12.3
Y2	0.313	0.321	0.392	0.370	3.5	65.3	91.5	8.5
Y3	0.324	0.340	0.423	0.470	9.3	13.4	28.5	5.6
Y4	0.343	0.343	0.345	0.345	3.2	9.3	4.5	17.1
Ave	0.459	0.461	0.487	0.494	14.4	28.6	21.1	13.8

Table 5는 조사 대상지의 시기별 지하수의 EC와 COD_{Cr}의 변화를 나타낸 것이다. EC는 물 속의 전해질 농도를 추정하는데 이용한다[17]. 현재 농업용수 수질 기준에서는 EC에 대한 규정이 없으나, FAO의 농업용수 수질 해석을 위한 지도 기준에 의하면 EC가 0.7 dS/m이하에선 피해가 전혀 나타나지 않고, 0.7~3.0 dS/m에서 피해가 조금 나타나며 그 이상에서는 피해가 심하게 나타나는 것으로 보고하였다[18]. 조사 지점들의 EC는 대부분이 피해가 나타나지 않는 수준이었으나, 평택의 조사 지점에서는 피해가 약간 나타날 수 있을 것으로 조사되었다. 시기별로는 EC는 대체로 6, 7월에 비하여 8, 9월이 상대적으로 높게 나타났다. 이는 강우량이 상대적으로 많은 7월 하순부터 8월까지의 영향을 받아 지표의 영양물질들이 지하로 이동했기 때문이라고 판단된다. COD의 경우, 수중에 다량의 유기물을 함유함은 토양의 산화환원전위를 저하시키고, 환원성 유해물이나 이상 환원의 원인이 되어 작물 수량 감소의 위험성이 매우 높다. 우리나라의 농업용 지하수의 경우 COD_{Mn}

Table 6. Changes of nitrogen concentration in the groundwater of plastic film house areas

Site	NH_3-N				NO_3-N			
	Jun	Jul	Aug	Sept	Jun	Jul	Aug	Sept
	mg/L							
H	0.052	0.056	0.235	0.162	3.41	4.67	5.27	5.05
P1	0.016	0.059	0.182	0.009	55.73	31.73	41.16	31.75
P2	0.123	0.140	0.187	0.019	41.65	47.60	51.02	54.99
S1	0.140	0.285	0.250	0.120	0.08	1.00	0.77	1.14
S2	0.100	0.091	0.178	0.017	0.05	0.13	0.17	0.36
C1	0.073	0.103	0.078	0.013	16.47	18.82	12.49	18.62
C2	0.074	0.109	0.199	0.011	36.12	34.13	47.49	55.46
Y1	0.151	0.080	0.177	0.010	20.25	26.64	26.66	20.19
Y2	0.087	0.120	0.204	0.018	11.97	11.31	19.92	16.09
Y3	0.098	0.134	0.317	0.041	2.69	2.17	3.39	9.09
Y4	0.080	0.095	0.031	0.046	12.23	13.75	12.64	14.84
Ave	0.090	0.120	0.200	0.040	18.24	17.45	20.09	20.69

의 한계 수준을 8 mg/L로 정하고 있으며, 농업 용수중의 COD_{Cr}에 의한 농작물 피해 기준은 50 mg/L로 설정해 두고 있다[19]. 이번 조사에서 실시한 COD_{Cr}의 경우 조사 지점들의 전체 평균 농도는 이 기준 이하이나 Y2지점에서는 피해 기준을 초과하였다. 이는 시설재배 토양의 유기물 과다도 원인이 될 수 있겠으나, 유기물에 오염된 지하수의 외부 유입에 의한 영향도 있을 것으로 판단된다.

Table 6은 지하수중의 암모니아성 질소와 질산성 질소의 농도를 나타낸 것이다. 질소 함량이 높은 물을 사용하면 작물에 직접적으로 피해를 주거나 혹은 토양 질소의 부영양화를 증가시켜 벼 재배에 지장을 줄 수 있으며, 특히 암모니아성 질소는 토양 중 유기질소의 무기화와 요소의 가수분해에 의해서 다량 생산되면, 혐기성 상태 하에서 질산의 환원으로 발생할 수도 있다. 이러한 암모니아성 질소는 수도의 경우 품질 저하와 등숙 불량 등 다른 형태의 질소에 비해 작물에 악영향을 미칠 수 있다. 동경도 농업시험장에서 시행한 조사사례와 시험 결과에 따르면 3 mg/L까지는 시비대책 및 기타 재배 기술 개량 등으로 대응할 수 있으나, 5 mg/L이상에서는 수확량이 감소하는 것을 막을 수 없다고 했다[20]. 조사 대상 지점들의 농업용수는 이러한 수준에는 미치지 않는 것으로 조사되었다. 질산성 질소는 지하수내 질소의 주된 형태이다. 지하수의 높은 질산성 질소의 농도는 지질학적 퇴적, 자연 유기물 분해 및 비료 시용에 따른 질산염의 심층 침투 등의 몇 가지 원인에 의해 발생할 수 있다[21]. 또한 질산성 질소의 경우 암모니아성 질소보다 용탈, 탈질되기가 쉬우며, 작물에도 생리적으로 장해가 작기 때문에 허용 한계농도는 다른 항목에 비해 높다. 우리나라 농업용 지하수의 수질 기준으로 20 mg/L로 정하고 있는데[22], 조사 대상 지점의 지하수중의 질산성 질소의 농도는 P1, P2, C2, Y1에서 높게 나타났다.

Table 7. Changes of anion concentrations in the groundwater of plastic film house areas

Site	PO_4^{3-}				SO_4^{2-}				Cl^-			
	Jun	Jul	Aug	Sept	Jun	Jul	Aug	Sept	Jun	Jul	Aug	Sep
	mg/L											
H	0.011	0.010	0.027	0.036	11.1	12.9	14.6	17.3	20.	21.8	25.2	20.
P1	0.050	0.065	0.041	0.022	136.4	71.2	87.2	75.6	68.	83.8	52.8	57.
P2	0.018	0.046	0.017	0.020	72.8	79.2	69.9	86.7	70.	76.0	89.0	92.
S1	0.014	0.069	0.018	0.019	12.6	54.7	26.9	55.3	26.	62.9	53.5	67.
S2	0.010	0.069	0.028	0.024	2.9	2.8	2.2	4.6	18.	14.5	18.3	16.
C1	0.040	0.079	0.008	0.046	14.7	23.7	9.7	17.5	18.	17.4	16.7	30.
C2	0.016	0.002	0.015	0.013	59.0	50.7	45.0	46.1	36.	41.1	52.1	44.
Y1	0.013	0.051	0.013	0.020	28.1	38.9	41.0	44.9	36.	34.4	36.9	33.
Y2	0.011	0.005	0.021	0.021	28.9	35.6	28.3	27.9	33.	34.7	37.9	40.
Y3	0.010	0.028	0.080	0.016	35.1	35.0	61.4	49.1	22.	27.5	22.0	19.
Y4	0.027	0.016	0.051	0.032	55.5	49.2	32.0	34.2	29.	22.5	32.6	28.
Ave	0.020	0.040	0.029	0.024	41.6	41.3	38.0	41.7	34.	39.7	39.7	41.

Table 7은 지하수중의 음이온의 농도를 나타낸 것이다. 우리나라의 지하수법에 의하면 농업용수중의 PO_4^{3-}는 기준을 설정해 놓고 있지 않으나, FAO에서 설정한 일반 관개용수의 일반범위를 0~2 mg/L로 정해놓고 있다[23]. Table 7에서 보듯이 조사 대상 지점의 PO_4^{3-}의 농도는 0.008~0.050 mg/L로서 FAO기준에 의한 농업용수 목적으로는 안전한 수준인 것으로 조사되었다. 특히 지하수인 경우 토양에서 지하수계로의 PO_4-P의 이동성이 약하므로 지표수에 비하여 상대적으로 낮은 수준을 보여준다. 이번 조사 대상 시설원예지에서 SO_4^{2-}는 최저 2.2 mg/L에서 최고 136.4 mg/L 수준을 나타내고 있었다. 이는 우리나라의 농업용 지하수의 수질 기준에는 SO_4^{2-}에 대한 기준은 제정해 놓고 있지 않으나, 실험 연구 결과인 농작물 피해 기준인 54.6 mg/L에 상당히 많은 지점에서 초과하는 것으로 조사되었다. SO_4^{2-}과다는 토양의 산성화 촉진 및 식물체 뿌리의 썩음병을 유발시킬 수 있다는 보고가 있다[5]. 우리나라 지하수법에 의하면 농업용수중 Cl^-의 기준은 250 mg/L[22]을 정해놓고 있는데, 조사 대상 지점의 수준은 이에 미치지 않는 것으로 조사되었다.

Table 8과 Table 9는 지하수중의 양이온의 농도와 SAR (Sodium Adsorption Ratio)의 조사 시기별 변화를 나타낸 것이다. 조사 시기별 지하수중의 양이온의 변화는 거의 없는 것으로 조사되었다. 농업용수내 Na^+이온의 양이 Mg^{2+}와 Ca^{2+}의 양과 비교하여 상대적으로 과다한 경우 Na^+이온이 토양 입자를 분산시켜 배수가 불량한 토양을 형성하게 되어 경작을 어렵게 한다. 토양은 Na^+에 의해서 일시적으로 알칼리성이 되지만

Table 8. Changes of cation concentrations in the groundwater of plastic film house areas

Site	Ca^{2+}				K^{+}				Mg^{2+}				Na^{+}			
	Jun	Jul	Aug	Sept	Jun	Jul	Aug	Sept	Jun	Jul	Aug	Sept	Jun	Jul	Aug	Sept
	mg/L															
H	25.9	26.7	30.7	30.2	1.92	2.07	2.21	2.34	5.6	5.5	5.9	5.8	19.3	19.8	21.0	20.4
P1	93.6	48.7	60.8	51.7	3.06	4.68	5.56	5.19	22.3	16.6	19.7	17.7	17.7	64.0	57.7	60.2
P2	68.3	72.9	80.3	83.2	2.39	2.69	3.00	3.16	22.9	24.7	27.1	28.9	50.3	55.9	58.8	56.0
S1	40.7	52.6	46.7	52.1	1.46	1.72	1.63	1.76	8.0	9.9	8.8	10.0	19.2	25.9	24.0	27.0
S2	42.7	33.6	32.6	30.7	1.57	1.56	1.60	1.49	9.0	7.3	7.0	6.7	18.5	18.2	18.7	17.9
C1	32.2	30.9	28.4	32.8	1.11	2.42	1.65	1.58	5.1	6.2	4.0	5.9	16.6	17.1	13.2	17.6
C2	77.7	64.2	83.8	89.2	2.91	2.74	3.22	3.22	14.5	12.2	16.0	16.9	21.5	22.2	26.1	25.0
Y1	38.4	41.2	45.7	38.4	4.49	4.87	5.69	5.42	8.8	9.8	10.8	9.5	26.4	27.9	29.7	26.8
Y2	25.4	23.0	29.7	28.0	6.40	6.71	8.44	8.35	6.4	6.0	7.7	7.2	20.7	21.2	27.0	26.2
Y3	34.9	32.4	48.1	45.9	5.46	5.82	8.35	8.38	6.0	5.4	7.8	7.6	20.1	21.6	21.0	20.9
Y4	32.7	29.4	29.9	30.7	3.68	3.73	4.53	4.29	7.2	6.7	6.6	7.2	20.2	20.2	21.9	21.8
Ave	46.6	41.4	47.0	46.6	3.08	3.55	4.17	4.11	10.5	10.0	11.0	11.2	22.8	28.6	29.0	29.1

Table 9. Changes of SAR in the groundwater of plastic film house areas

Site	Jun	Jul	Aug	Sep	Ave
H	0.89	0.91	0.91	0.89	0.90
P1	0.43	2.01	1.64	1.84	1.48
P2	1.34	1.44	1.44	1.34	1.39
S1	0.72	0.86	0.84	0.90	0.83
S2	0.67	0.74	0.77	0.76	0.73
C1	0.72	0.73	0.61	0.74	0.70
C2	0.59	0.66	0.68	0.64	0.64
Y1	1.00	1.01	1.02	1.00	1.00
Y2	0.95	1.02	1.14	1.14	1.06
Y3	0.83	0.92	0.74	0.75	0.81
Y4	0.83	0.87	0.94	0.92	0.89
Min	0.43	0.66	0.61	0.64	0.58
Max	1.34	2.01	1.64	1.84	1.70
Ave	0.82	1.02	0.98	0.99	0.94

물 속의 수소이온에 의해 치환되어 산성이 된다. 따라서 농업용수에서는 Na^{+}에 의한 영향을 SAR를 이용하여 척도로 사용, 이를 비교함으로써 토양에 미치는 영향을 알 수 있다. 미국에서도 농업용수의 수질을 SAR지수의 수치로 표시하는데 일반적으로 0~10에서는 작물 및 토양에 영향이 없는 범위로 판단하고 있다[19]. 이 기준에 의하면 조사 대상 지점들의 SAR의 최대치가 2.0미만으로 Na에 의한 토양 및 작물에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

Table 10은 조사 대상 지점의 시설원예단지의 제 1 대수층 지하수중의 각 이온간의 상관계수를 나타낸 것이다. 특히 지하수중의 이온의 양을 간접적으로 나타내는 전기전도도인 EC는 양이온인 경우 Mg^{2+}, Ca^{2+}, Na^{+}, 및 K^{+}와 정의상관이 있었으며, 특히 2가 양이온인 Mg^{2+}와 Ca^{2+}간에는 고도의 정의상관을 보이고 있었다. 또한 EC와 음이온간에는 NO_3^{-}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, PO_4^{2-}와 상관을 보이고 있었다. 또한 지하수의 오염지표인 NO_3^{-}의 경우에는 COD를 제외한 모든 이온들과 상관을 보이고 있었다. 특히 SO_4^{2-}, Cl^{-}, Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}와는 고도의 정의 상관을 보여주고 있다. 이는 NO_3^{-}는 EC와 함께 지하수 오염의 중요한 지표중의 하나임을 보여주고 있다. 그러나 지하수중의 유기물 지표인 화학적 산소 요구량은 다른 오염지표들과는 상관관계가 없는 것으로 나타났는데, 이는 기존의 연구 결과와 일치하였다. 특히 질산성 질소는 다른 이온 물질들과 고도의 정의 상관을 보이고 있으므로, 질산성 질소의 오염은 곧 다른 이온들에 의한 오염을 의미한다. 지하수는 지표수와는 달리 일단 오염이 되면 오염 물질이 지하수맥을 따라 이동하며, 지하 대수층 내에서 장기간 잔존하므로 지하수 오염의 정도를 추정하거나 인위적으로 정화가 어렵다[25]. 따라서 농업지역 내에서의 지하수 오염을 방지하기 위해서는 점원 배출원에서는 오염 물질의 지하 유출을 차단하고, 농경지에서는 토양 검정 등을 통하여 작물별 최적 시비량으로 영농을 하며, 특히 시설재배지와 같이 염류 집적의 우려가 높은 것에서는 정밀농업 및 제염을 통해 지하로의 오염 물질 유출을 차단한다면 지하수계 오염방지의 첩경이 될 것이다.

요 약

연구대상 시설재배지 토양의 물리성은 대부분이 모래의 비율이 높은 sandy loam이나 loam으로 투수성이 양호할 것으로 판단되나, P2나 S1에서는 미사의 비율이 높은 미사 loam으로 투수성 및 통기성이 상대적으로 낮은 것으로 판단된다. 토양의 화학성은 EC의 경우 표토의 대부분이 기준치에

Table 10. Correlations between the measured properties of groundwater

	EC	COD	NH_3-N	NO_3-N	PO_4-P	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+
pH	-0.2412	-0.1394	-0.0784	-0.3146*	-0.0406	-0.3002*	-0.3094*	-0.1195	-0.1309	-0.2409	-0.2388
EC		0.1259	0.3540**	0.8944**	0.3310*	0.8421**	0.8744**	0.9252**	0.3306*	0.9728**	0.7615**
COD			0.0628	0.1054	0.0091	0.1007	0.0937	0.1094	0.1284	0.1097	0.0521
NH_3-N				0.3018*	0.9758**	0.5003**	0.2115	0.3556**	0.8709**	0.2655	-0.0902
NO_3-N					0.3052*	0.7252**	0.7019**	0.8254**	0.3160*	0.8497**	0.6249**
PO_4-P						0.4921**	0.1856	0.3265*	0.8522**	0.2444	-0.0893
SO_4^{2-}							0.7490**	0.7100**	0.5780**	0.7747**	0.6447**
Cl^-								0.7190**	0.1869	0.8715**	0.8109**
Ca^{2+}									0.2691	0.8722**	0.5163**
K^+										0.2150	-0.0118
Mg^{2+}											0.8142**

*,** : significant at 5 and 1% level, respectively.

도달하거나, 초과하는 경향이었고, 심토의 경우는 기준치 이하로 조사되었다. 또한 유기물 함량은 적정수준 2~3%보다 조사 대상 지점의 대부분에서 상회하였고, 심토의 일부분도 이 수준을 넘는 곳도 있었다. 조사 대상 지역의 수질 특성 중 시설재배지 지하수의 가장 중요한 염류 지표인 EC는 연평균 0.48 dS/m로 농업용수로서 작물에 미치는 영향은 없는 것으로 판단되나, 수질오염지표인 질산성 질소의 경우 19.1 mg/L로 농업용수 수질 기준인 20 mg/L에 근접한 수준을 나타내었다. 특히 조사 대상 지점의 36.4%가 수질 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 지하수중의 이온의 양과 영양염류의 양을 간접적으로 나타내는 전기전도도인 EC는 양이온인 경우 Mg^{2+}, Ca^{2+}, Na^+, K^+와 정의상관이 있었으며, 특히 2가 양이온인 Mg^{2+}와 Ca^{2+}간에는 고도의 정의상관을 보이고 있었다. 또한 EC와 음이온간에는 NO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, PO_4^{2-}와 상관을 보이고 있었다. 지하수의 오염지표인 NO_3-N의 경우에는 COD를 제외한 모든 이온들과 상관을 보이고 있었다. 특히 SO_4^{2-}, Cl^-, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}와는 고도의 정의 상관을 보여주고 있다. 이는 NO_3-N는 EC와 함께 지하수오염의 중요한 지표중의 하나임을 보여주고 있다.

참고문헌

1. Ministry of Agriculture and Forestry (2001) *Agriculture and Forestry Statistical Yearbook.*
2. Park, D. G. (1999) Development of Environment of friendly cropping systems to be reduce the soil-sickness in the cultivation of fruit vegetables, Symposium on the improvement of environment and reducing of physiological disorders in the green housed horticulture, Yeongnam Agricultural Experiment Station, 1999. 10. 8.
3. Choi, J. D. (1996) The effluent characteristics of pollutants of non-point sources at agricultural basins, Proceedings of the Korean Rural Environment Council Seminar.
4. Jung, G. B., Lee, J. S. and Kim, B. Y. (1996) Survey on groundwater quality under plastic film house cultivation areas in southern part of Gyeonggi province, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 29, 389-395.
5. Lee, S. H. (1992) Groundwater pollution and well management in Japan, *J. Korean Soc. Groundwater*, 2, 70-85.
6. Bergstrom, L. (1987) Nitrite leaching and drainage from annual and perennial crops in tile-drained plots and lysimeters, *J. Environ. Qual.* 16, 11-18.
7. Yun, S. G. and Yoo. S. H. (1993) Behavior of NO_3-N in soil and groundwater quality, *Korean J. of Environ Agric.* 12, 281-297.
8. Kim, J. H., Lee, J. S. and Ahn, S. K. (1997) Major factors affecting of ground water quality characters for agriculture in Kyonggi area, *J. Korean Soc. Water Qual.* 15, 353-361.
9. 환경부 (2000) 수질오염공정시험방법.
10. APHA-AWWA-WPCF (1992) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater,* 18th ed., Washington D.C.
11. 농업과학기술원 (2000) 토양 및 식물체 분석법.
12. 환경부 (1997) 토양오염공정시험방법.
13. 농촌진흥청 (1997) 시설재배지 연작장해 대응기술, 표준영농교본 88.
14. Nam, K. U. (1999) Biological control and soil born pests in the green hosed horticultural soils, Symposium on

the improvement of environment and reducing of physiological disorders in the Green housed horticulture, Yeongnam Agricultural Experiment Station, 1999. 10. 8.
15. Shin, S. E. (1998) *Environmental Science and Engineering Dictionary*, Dong-Hwa Tech. Seoul.
16. 농촌진흥청 (2001) 비료공정규격.
17. Shin, C. K., Park, S. K., Ryu, J, K., Rhew, D. H., Huh, I. A., Hong, K. H., Lee, C. L., Kim, K. W. and Park, W. C. (1997) A study on the most appropriate management of water quality standard on the COD, Report of NIER, Korea, 19, p.243-257.
18. Ayers, R. S. and Wescot, D. W. (1985) Water quality for agriculture, FAO, Irrigation and Drainage Paper 29.
19. Kim, B. Y. (1988) Water pollution and agriculture, *Korean J. of Environ Agric*, 7, 152-169.
20. Hong, M. K., Won, K. P., Kim, M. H., Sho, Y. S., Chung, S. Y., Yun, H. K., Ryu, K. J., Lee, H. S., Kim, S. C. and Chang, M. I. (1998) Studies on nitrate contents of various vegetables cultivated in Korea, KFDA Report 1, p.50-56.
21. Hong, M. K., Won, K. P., Kim, M. H., Sho, Y. S., Chung, S. Y., Yun, H. K., Ryu, K. J., Lee, H. S., Kim, S. C. and Chang, M. I. (1998) Study on restriction and safety of nitrate contents of various vegetables, KFDA Report 2, p.617.
22. 田淵俊雄 (1985) 農業土木技術者のための水質入門, 日本農業土木學會.
23. Madramootoo, C. A., Johnson, W. R. and Willardson, L. S. (1997) Management of agricultural drainage water quality, FAO/UN, Water Reports 13.
24. 환경부 (1997) 지하수 수질보전 등에 관한 규칙 별표 3.
25. FAO (1977) Water quality for agriculture, FAO/UN29, 1, p.174.
26. Park, H. W. (1998) *Professional Engineer of Water Supply and Drainage*, Yemun Publish, Co., Seoul.
27. Korea Environment Science Concil (1983) The study on the standards of groundwater and the standard of judgement for groundwater pollution.