

토마토 수경재배 배출 배액의 수질분석과 상관성 평가

손진관, 강태경, 박민정
농촌진흥청 국립농업과학원
e-mail:son007005@korea.kr

The Water Analysis and Correlation Evaluation of Drainage Water in Tomato Hydroponic Cultivation

Jin-Kwan Son, Tae-Gyeong Kang, Min-Jung Park
National Institute of Agriculture Science, Rural Development Administration,

요약

한국의 수경재배는 증가 추세에 있다. 수경재배 방법은 배액(폐양액)이 최대 30% 까지 발생하고 있어 부영양화 원인이 될 수 있다. 본 연구에서는 토마토 시설원예에서 배출되는 영양물질이 어느 정도의 부하인지 분석하였다. 토마토 배액의 주요항목 분석 결과 비료성분의 다량 함유를 확인하였다. 이러한 비료성분을 다량 포함한 토마토 배액은 원예 자체 재이용 및 기타 농업, 산림 등 다양한 차원에서 비점오염원이 되지 않도록 관리 및 활용방안을 찾아볼 필요성이 인정되었다. 103점의 토마토 배액 시료를 통계분석 한 결과 EC 농도 대비 pH, HCO₃⁻, Fe, Zn, Cu는 상관없음(N.S) 이지만, NO₃⁻(0.613**), Na⁺(0.214*), Ca²⁺(0.858**), Mg²⁺(0.792**), NH₄⁺(0.846**), PO₄-P(0.441**), K⁺(0.414**), Si₄⁺(0.198*), Cl⁻(0.226*), S₂⁻(0.658**), Mn(-0.228*), Mo(0.206*), B(0.470**)로 많은 항목에서 상관이 인정되었다. 상기에서 분석한 농도를 바탕으로 농업적 재이용에 필요한 농도를 설정하고 배출수 관리에 있어서는 처리용량 파악에 활용할 수 있는 자료가 될 수 있다고 기대한다.

1. 서론

한국의 시설원예 면적은 2018년 기준 53,109 ha로 통계되어 있으며, 그 중 최근 시설원예에서 많이 사용되는 양액재배 방법은 수경식 재배로 일컫고 '04년 609 ha에서 '18년 약 4,224 ha로 급격히 증가하고 있는 추세에 있다[1]. 수경식 재배 면적은 한국뿐 아니라 일본, 네델란드, 중국도 계속해서 증가하는 것으로 보고되고 있다[2]. 수경재배는 식물공장[3], 도시농업[4], 아쿠아포닉스[5] 형태로 계속 증가하고 있다. 이러한 양액재배는 토경에 비해 식물이 양분을 직접적으로 양분을 투입하게 되는 쉬운 영양 공급 방법이다. 하지만 양액 재배에 있어 비료를 넘쳐흐르게 하는 것은 원예 특유의 기술로[6], 최대 30% 정도까지 배액(폐양액)이 발생하고 있다[7, 8]. 이 버려지는 양액에는 다량의 N, P 등 영양 물질이 포함되어 있다[9, 10]. N과 P는 하천을 비롯해 식수에 까지 영향을 미치는 부영양화 원인 물질이다[11]. 한국은 최근 신규로 건설되는 온실을 중심으로 배액 재사용을 위한 순환식 양액 재처리 시설을 갖추고 있는 추세이다[12]. 양액의 재활용을 위해 필터링[13, 14], 저장[15], 침전[16], 마이크로버블[17] 등 다양한 기술이 개발되고 있다. 이 외에도 폐양액 처리를 위한 소형 인공습지[18, 19], 토양처리[20, 21], 자연정화공법[22, 23] 등이 연구되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 토마토 시설원예로 부터 배출되는 영양물질이 하천환경 기준으로 어느 정도의 부하인지 분석하

였다. 분석결과는 항목간 통계분석을 통해 간단한 현장 측정 농도를 측정해 배출 농도를 추정할 수 있는 근거 자료를 제시하였다. 본 연구를 통해 지속가능한 농업을 위한 시설원예의 개선점과 향후 친환경적 시설원예단지 조성 시 수질정화 시설의 투입 필요성과 당위성, 경제적 산출 근거의 기초자료로 활용할 수 있다고 판단한다.

2. 재료 및 방법

연구대상 작물 선정은 국내 시설원예 산업 중 수경재배를 통해 가장 많은 비율로 생산되는 토마토를 선정하였다. 농가는 총 24개소로 비닐온실 14개소와 유리온실 10개소로 구분된다. 농가별 시료수는 채취한 일정에 따라 농가별로 다르게 취득하였으나 월별로 구분하여 시료수가 비슷하도록 하였다.

주요 분석 항목은 산도(pH), 전기전도도(EC), 인산염인(PO₄-P), 음이온(질산태질소(NO₃-N), 염소이온(Cl⁻), 중탄산이온(HCO₃⁻), 황화이온(S²⁻), 양이온(암모늄태질소(NH₄⁺), 칼륨이온(K⁺), 칼슘이온(Ca²⁺), 마그네슘이온(Mg²⁺), 규소이온(Si⁴⁺), 나트륨이온(Na⁺), 미량원소(철(Fe), 망간(Mn), 구리(Cu), 아연(Zn), 몰리브덴(Mo), 붕소(B) 등 19항목을 분석하였다. pH와 EC는 각각 항목측정기 pH meter (MP220, Germany), EC meter (S30, Germany)를 사용하였으며, HCO₃⁻는 Bicarbonate법을 이용하였다. Cl⁻, NO₃-N, NH₄⁺-N은 이온크로마토그래피법(Sykam GmbH 135,

Germany)으로 분석하여 NO₃-N는 질산태질소(NO₃-NN), NH₄⁺-N는 암모늄태질소(NH₄⁺-N-N)의 농도로 환산하여 나타내었다. PO₄-P는 아스코르빈산환원법을 이용하였고, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B, Si⁴⁺, Na⁺은 유도 결합플라즈마분석기(ICP-OES, USA) 기기를 이용하여 분석하였다.

[표 1] 토마토 시설원에 농가 지역구분 및 분석시료 수

Material	Lacation	Code	Samples
Vinyl	Buyeo, Chungnam	Vg1	2
	Buyeo, Chungnam	Vg2	2
	Changnyeong, Gyeongnam	Vg3	5
	Changwon, Gyeongnam	Vg4	5
	Gimje, Jeonbuk	Vg5	4
	Hwasun, Jeonnam	Vg6	3
	Jangseong, Jeonnam	Vg7	4
	Jangsu, Jeonbuk	Vg8	3
	Jangsu, Jeonbuk	Vg9	3
	Namhae, Gyeongnam	Vg10	3
	Nonsan, Chungnam	Vg11	3
	Wanju, Jeonbuk	Vg12	4
	Gimje, Jeonbuk	Vg13	10
	Hwaseong, Gyeonggi	Vg14	10
Vinyl Green-house Total			61
Glass	Buyeo, Chungnam	Gg1	2
	Changnyeong, Gyeongnam	Gg2	3
	Geoje, Gyeongnam	Gg3	4
	Gimje, Jeonbuk	Gg4	3
	Hongcheon, Gangwon	Gg5	2
	Jeongeup, Jeonbuk	Gg6	3
	Jinju, Gyeongnam	Gg7	2
	Jangsu, Jeonbuk	Gg8	3
	Gimje, Jeonbuk	Gg9	10
	Hongseong, Chongnam	Gg10	10
Glass Green-house Total			42
Total Numbers of Study Samples			103

통계분석은 항목간 상관관계가 있는 항목을 알아보기 위하여 SPSS 22.0을 이용하여 Correlation Analysis를 하였다.

3. 결과 및 고찰

토마토 배액 시료의 주요항목 분석 결과는 표 2와 같다. 산도(pH)는 평균 6.16±0.62로 분석되었다. 이는 환경정책기본법 하천의 수질환경기준인 6.0~8.5 범위 내로 토마토 배액은 배출 기준을 초과하지 않는 것으로 분석되었다. 전기전도도(EC)는 농업에 종사하는 농민들이 기타 양액성분을 상시 분석하지 못하는 이유로 EC 측정 장비를 통해 비료투입 정도를 계산하여 유추한다. EC는 Na, Cl 등에 영향을 받고 해안에 가까이 위치할수록 높게 측정되며, 비료 성분 집적으로 농도가 높아지는 것으로 알려졌다. 본 연구대상지에서 배출되는 배액의 EC농도는 평균 4.25±1.01dS/m로 수질기준 0.5dS/m을 초과하였다. 하천과 지하수 수질 대비 높은 수치로 시설 외부

유출은 고려가 필요하다. 질소(N) 성분은 암모늄태질소(NH₄⁺-N)가 7.34±6.86mg/L이며, 질산태질소(NO₃-N)가 403.89±118.79mg/L의 평균값으로 분석되었다. 이 둘의 합이 약 410mg/L 수준으로 호소기준 매우나쁨(1.5 mg/L)을 매우 초과하며, 소규모처리장 방류기준(40 mg/L) 대비 10배이상, 중규모처리장 기준(20 mg/L) 대비 20배 이상의 농도가 확인되었다. 따라서 별다른 처리 없이 하천으로 유입되고 있는 시설원에 배액의 처리는 필요하다고 할 수 있다. 인(P)성분 또한 하천의 수질환경기준 매우나쁨(0.5 mg/L)과 비교할 때 토마토 배액 평균 47.74±23.55mg/L로 매우 높은 수준으로 분석되었다. 소규모 하수처리장 배출기준(4 mg/L) 대비 약 12배, 중규모 처리장 기준(2 mg/L) 24배 정도로 인 성분의 처리 또한 시급성이 확인되었다. K⁺의 평균값은 399.77±183.27mg/L, Na⁺는 114.42±57.87 mg/L, Mg²⁺은 133.83±46.93 mg/L로 비료성분의 다량 함유를 확인할 수 있었다. 이러한 비료성분을 다량 포함한 토마토 배액은 원예 자체 재이용 및 기타 농업, 산림 등 다양한 차원에서 비점오염원이 되지 않도록 관리 및 활용방안을 찾아볼 필요성이 있다고 판단된다.

[표 2] 토마토 배액 시료 103점의 성분 분석 결과

Contents	Vinyl (N=61)		Glass (N=42)		Total (N=103)	
	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
pH	6.11	0.65	6.23	0.57	6.16	0.62
EC	4.23	1.04	4.27	0.98	4.25	1.01
NH ₄ ⁺ -N-	7.77	7.28	6.72	6.24	7.34	6.86
NO ₃ -N	396.60	118.59	414.41	119.72	403.89	118.79
PO ₄ -P	47.69	23.26	47.81	24.24	47.74	23.55
K ⁺	404.50	184.20	392.89	183.92	399.77	183.27
Ca ²⁺	334.06	119.48	346.36	95.01	339.08	109.83
Mg ²⁺	132.38	46.91	135.94	47.44	133.83	46.93
Na ⁺	113.84	59.46	115.26	56.19	114.42	57.87
Cl-	84.99	75.83	60.81	75.26	75.13	76.17
S ₂ -	167.87	83.84	180.17	99.33	172.88	90.21
HCO ₃ ⁻	25.76	24.58	30.30	39.64	27.62	31.50
Fe	1.67	1.13	1.78	1.03	1.72	1.08
Mn	0.35	0.33	0.29	0.27	0.33	0.31
Zn	0.46	0.31	0.46	0.35	0.46	0.32
Cu	0.09	0.08	0.27	0.41	0.16	0.28
B	0.92	0.45	1.01	0.57	0.96	0.50
Mo	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02

이러한 활용 및 배출농도의 즉각적인 판단을 위해서는 수질 분석을 빠른 시간에 진행해야 하지만 농가 및 활용처에서는 수행하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 수질 분석을 쉽게 진행할 수 있는 pH 및 EC센서를 활용하여 기타 분석항목을 추정할 수 있는 근거가 필요하다. 본 연구에서 채취한 103점의 토마토 배액 시료를 통계분석하여 항목간 상관성을 알아보고 추세선을 이용하여 농도를 추정할 수 있는지 판단하였다. 분석결과 EC 농도를 기준으로 pH, HCO₃⁻, Fe, Zn, Cu는 상관없음(N.S) 이지만, NO₃-N(0.613**), Na⁺(0.214*), Ca²⁺(0.858**), Mg²⁺(0.792**), NH₄⁺-N(0.846**),

PO4-P(0.441**), K+(0.414**), Si4+(0.198*), Cl-(0.226*), S2-(0.658**), Mn(-0.228*), Mo(0.206*), B(0.470**)로 많은 항목에서 상관성이 인정되었다. 상관분석 기준을 근거로 추세식을 통하여 분석항목의 농도를 추정할 수 있는 추세식을 통계적으로 활용할 수 있는지 확인하였다. 분석결과 EC농도 대비 NH4+-N의 농도는 추세식이 $y(\text{NH}_4\text{-N 농도}) = 99.465x(\text{EC 농도}) - 18.569$ 이므로 EC 1.0ds/m 시 80.896mg/L, 2.0ds/m 시 180.361 mg/L 등으로 해석될 수 있다. 이와 같이 결정계수가 높은 Ca2+, Mg2+, S2- 정도는 간단한 EC 농도 측정만으로 항목의 분석농도를 추정할 수 있을 것으로 기대한다. 다만 상관성은 인정되었으나 추세식 결정계수가 다소 낮은 PO4-P, K+ 등은 비료 처방기준 및 타 항목간의 복합적인 상관성을 분석하여 추정하는 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

[표 3] 토마토 배액의 EC농도 대비 성분농도 추세식

Contents	Regression	R ²
NH4+-N-N	$y = 4.1592x - 10.323$	0.3756
NO3-NN	$y = 99.465x - 18.569$	0.7163
PO4-P	$y = 10.286x - 4.054$	0.1949
K+	$y = 75.094x - 80.836$	0.1715
Ca2+	$y = 93.22x - 56.835$	0.7361
Mg2+	$y = 36.764x - 22.303$	0.6271
Na+	$y = 12.272x + 62.300$	0.0459
Cl-	$y = 17.033x + 2.7911$	0.0511
S2-	$y = 58.737x - 76.576$	0.4332
Mn	$y = -0.0693x + 0.6219$	0.0521
B	$y = 0.2316x - 0.0258$	0.2210
Mo	$y = 0.0039x + 0.0058$	0.0424

이와 같은 결과를 미루어볼 때 시설원예단지에서 배출되는 배액에는 매우 높은 비료 성분이 함유되어 있어 처리가 필요하며, 이것의 재이용은 비점오염물질의 유출 방지와 더불어 가치 있는 비료의 절약에 도움이 될 수 있다. 따라서 상기에 서 분석한 농도를 바탕으로 농업적 재이용에 필요한 농도를 설정하고 배출수 관리에 있어서는 처리용량 파악에 활용할 수 있는 자료가 될 수 있다고 기대한다.

4. 결론 및 제언

우리의 농업의 원예산업 중 40% 이상으로 백색혁명을 성취했다고 평가받는다. 이러한 시설원예 산업은 지역경제와 농가소득 향상에 큰 순기능을 제공했다. 하지만 수경재배로 배출되는 배액은 환경적으로도 처리가 필요하다고 평가된다. 토마토 수경재배 시 발생하는 배액의 농도는 처리가 필요한

오염원인이 될 수 있는 물질임을 확인하였으며, 분석농도를 추정할 수 있는 통계분석을 실시하였다. 복합적인 다양한 분석방법을 통해 기타 항목간의 관계도 고려할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구결과는 지속가능한 시설원예를 위해 수처리 분야의 개선점과 앞으로의 시설원예단지 개발 사업에 반영할 수 있는 정책 자료로 활용되길 기대한다. 또한, 이러한 연구를 통해 농업생태계의 다양한 생태계서비스 가치가 저하되지 않고 보전, 향상되는데 기여하고자 한다.

사사 : 연구는 2022년 농촌진흥청 국립농업과학원 연구개발 및 박사후연구원 지원사업(과제번호 : PJ016761032022)에 의해 이루어진 것임.

참고문헌

- [1] Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA), 2019, 2018 Greenhouse Status and Vegetable Production Performance.
- [2] Sardare, Mamta D., and Shraddha V. Admane. "A review on plant without soil-hydroponics." International Journal of Research in Engineering and Technology 2.3 (2013): 299-304. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0203013>
- [3] Wada, Teruo. "Theory and technology to control the nutrient solution of hydroponics." Plant Factory Using Artificial Light. Elsevier, 2019. 5-14. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813973-8.00001-4>
- [4] Rufi-Salis, Marti, et al. "Exploring nutrient recovery from hydroponics in urban agriculture: An environmental assessment." Resources, Conservation and Recycling 155 (2020): 104683. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104683>
- [5] Suhl, Johanna, et al. "Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics." Agricultural water management 178 (2016): 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.013>
- [6] Soares, Tales Miler, et al. "Producao de alface utilizando aguas salinas em sistema hidroponico." Irriga 12.2 (2007): 235-248. <https://doi.org/10.15809/irriga.2007v12n2p235-248>
- [7] Lee, S., and Y. C. Kim. "Water treatment for closed hydroponic systems." J. Korean Soc. Environ. Eng 41 (2019): 501-513.

- [8] Ehret, David, et al. "Disinfestation of recirculating nutrient solutions in greenhouse horticulture." *Agronomie* 21.4 (2001): 323-339. <https://doi.org/10.1051/agro:2001127>
- [9] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2017, The organic law about agriculture, farming village & food industry.
- [10] Lee, Chungkeun, et al. "Waste nutrient solution as an alternative fertilizer in curled mallow cultivation." *J Agric Sci* 12 (2020): 55-66. <https://doi.org/10.5539/jas.v12n3p55>
- [11] Boneta, Anna, et al. "Agronomic and environmental assessment of a polyculture rooftop soilless urban home garden in a mediterranean city." *Frontiers in plant science* 10 (2019): 341. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00341>
- [12] Park, Chang-Jin, et al. "Recycling of hydroponic waste solution for red pepper (*Capsicum annum L.*) growth." *Korean Journal of Environmental Agriculture* 24.1 (2005): 24-28. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2005.24.1.024>
- [13] Chungo CO.,LTD, 2016, Recycle supplying systems of nutrient solution of cultivation under structure used ICT. Korea Konzession, Application No. 10-2016-0183339.
- [14] ShinHAN A-TEC Co.Ltd., 2016, Sterilizing method of waste nutrient solution using uv lamp., Korea Konzession, Application No. 10-2016-0147011.
- [15] Kohda, Jiro, et al. "Recycling of biodiesel fuel wastewater for use as a liquid fertilizer for hydroponics." *Journal of Material Cycles and Waste Management* 19.3 (2017): 999-1007. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0545-5>
- [16] Tozzi, Francesca, et al. "Agronomic performance and food safety of strawberry cultivated on a remediated sediment." *Science of The Total Environment* 796 (2021): 148803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148803>
- [17] Tamaki, Masahiko, Hiromi Ikeura, and Naoki Enmei. "Growth response of hydroponic leaf lettuce and komatsuna to ozone microbubble treatment." *Journal of Plant Nutrition* 43.10 (2020): 1369-1377. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1730896>
- [18] Park, S.D., Hwang, U.S., Sung, J.I., Chae, K.S., Kim, C.H., Jun, G.Y., Son, Y.M. and Song, J.D. 2009. A study on the effective agricultural utilization of reclaimed land. ed. Korea Rural Economic Institute, Seoul, Korea. p. 1-6.
- [19] Gagnon, Vincent, et al. "Treatment of hydroponics wastewater using constructed wetlands in winter conditions." *Water, Air, & Soil Pollution* 212.1 (2010): 483-490. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0362-8>
- [20] Yang, NI., 2017, The Study on Capacity of Small Scale Sewerage Facilities in Korea, Yonsei University Master's Thesis.
- [21] Roupael, Y., et al. "Yield, water requirement, nutrient uptake and fruit quality of zucchini squash grown in soil and closed soilless culture." *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 79.3 (2004): 423-430. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511784>
- [22] Rural Development Administration (RDA), 2006, Mitigation Effect on Non-point Source Pollution by Rice Cultivation in Paddy Field.
- [23] Willis, Arthur John, and E. W. Yemm. "Braunton Burrows: mineral nutrient status of the dune soils." *The Journal of Ecology* (1961): 377-390. <https://doi.org/10.2307/2257270>