

신선채소재배지 농업용수의 미생물 오염 분석 및 UV 수처리 기술 적용

황인준^{1*} · 박대수¹ · 김은선¹ · 최송이¹ · 박경민¹ · 구옥경² · 신학동³ · 엄미정⁴ · 송시범⁵ · 조민⁶

¹농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부 유해생물과, ²충남대학교 식품공학과,
³세종대학교 식품생명공학과 및 탄수화물소재연구소, ⁴전북특별자치도 농업기술원,
⁵(주)세니젠연구소, ⁶전북대학교 생명공학부

Microbial Water Quality Assessment and Application of UV Disinfection Technology in Agricultural Water for Fresh Vegetable Cultivation

Injun Hwang^{1*}, Daesoo Park¹, Eunsun Kim¹, Song-Yi Choi¹, Kyung-Min Park¹, Ok Kyung Koo²,
Hakdong Shin³, Mijeong Uhm⁴, Si-Bum Song⁵, Min Cho⁶

¹Microbial Safety Division, Department of Agro-food Safety and Crop Protection,
National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju, Korea

²Department of Food Science & Technology, Chungnam National University, Daejeon, Korea

³Department of Food Science & Biotechnology, and Carbohydrate Bioproduct Research Center,
Sejong University, Seoul, Korea

⁴Jeonbuk State Agricultural Research and Extension Services, Iksan, Korea

⁵R&D Center, Sanigen CO., Ltd., Iksan, Korea

⁶Division of Biotechnology, Chonbuk National University, Iksan, Korea

(Received November 1, 2024/Revised November 12, 2024/Accepted November 26, 2024)

ABSTRACT - Microbial contamination in agricultural water is a critical concern for the safety of fresh produce, as contaminated water used for irrigation or post-harvest washing can transmit pathogens. This pathogen transfer leads to foodborne illnesses. In this study, we monitored microbial contamination levels in agricultural water from diverse sources, including stream water, reservoirs, and groundwater, from 2021 to 2023. We also evaluated the effectiveness of ultraviolet (UV) disinfection in reducing microbial contamination. The results demonstrated that *Escherichia coli* contamination levels differed depending on the water source. Stream water exhibited an average concentration of 0.95 ± 1.23 log CFU/100 mL, reservoirs averaged 0.76 ± 1.07 log CFU/100 mL, groundwater demonstrated the lowest contamination with an average of 0.1 ± 0.47 log CFU/100 mL, and other sources averaged 0.6 ± 0.87 log CFU/100 mL. UV disinfection tests demonstrated that the UV dose for 99.9% microbial inactivation ranged from 1.2 to 1.6 mW/cm²·sec for distilled water and 2.0 to 2.7 mW/cm²·sec for untreated agricultural water. Pre-treated agricultural water, enhanced through flocculant treatment, exhibited higher UV transmittance, thereby requires a lower UV dose for a 3-log microbial reduction compared to untreated water. While UV transmittance decreases were associated with reduced disinfection efficiency, the UV doses tested consistently achieved 99.9% microbial reduction within seconds, regardless of water quality. These findings indicate that UV disinfection, particularly when combined with pre-treatment, is a highly effective strategy for mitigating microbial risks in agricultural water.

Key words: Agricultural Water, Water Quality, Monitoring, UV Disinfection, Food Safety

*Correspondence to: Injun Hwang, Microbial Safety Division,
Department of Agro-food Safety and Crop Protection, National
Institute of Agricultural Sciences, Rural Development
Administration, Wanju, 55365, Korea

Tel: +82-63-238-3397, Fax: +82-63-238-3840

E-mail: injun0370@korea.kr

Copyright © The Korean Society of Food Hygiene and Safety. All rights reserved. The Journal of Food Hygiene and Safety is an Open-Access journal distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

농산물의 미생물 관리는 식품 안전과 공중 보건을 위한 중요한 문제로, 병원성 미생물에 오염된 농산물은 식중독 사고를 일으킬 수 있다. 신선 농산물은 대부분 세척 후 바로 섭취되기 때문에 오염에 취약하며, 특히 대장균, 살모넬라, 리스테리아와 같은 병원성 미생물에 의해 식중독 사고가 발생할 수 있다¹⁾. 여러 국가에서 이러한 사고가 보고됨에 따라, 농산물 생산 단계에서부터 미생물 오염을 예방하고 관리하는 것이 더욱 중요해지고 있다.

농업용수는 농산물 오염의 주요 원인 중 하나로, 관개수나 수확 후 세척에 사용되는 농업용수를 통해 병원성 미생물이 농산물로 전이될 가능성이 크다. 따라서 농업용수의 미생물 오염 수준을 모니터링하고 이를 통해 적절한 관리 방안을 수립하는 것이 필수적이다^{2,3)}.

외국의 경우 농업용수로 인해 발생하는 식중독 사고를 예방하기 위해 대장균군과 대장균과 같은 위생지표미생물을 통해 미생물 수질기준을 설정하여 관리하고 있다. 이러한 지표미생물은 오염의 정도를 평가하는 중요한 역할을 하며, 특히 대장균은 사람과 동물의 장에서 주로 발견되므로 검출된 경우 농업용수가 분변성 오염원에 노출되었을 가능성을 나타내므로 식품 안전성에 중요한 지표가 된다⁴⁾. 농업용수 미생물 기준이 설정된 국가를 살펴보면, 미국은 밭아식물이나 수확 후 농산물에 접촉되는 농업용수의 경우 대장균이 불검출되도록 규정하고 있으며, 작물 성장기에 사용하는 농업용수의 경우 대장균이 기하평균 2.10 log CFU/100 mL (126 CFU/100 mL) 이하, 통계한계치 2.61 log CFU/100 mL (410 CFU/100 mL)를 넘지 않도록 관리하고 있다⁵⁾. 캐나다는 모든 농업용수에서 대장균군 3 log CFU/100 mL, 분원성 대장균군 2 log CFU/100 mL 를 넘지 않도록 규제하고 있다. 호주와 뉴질랜드는 작물의 용도에 따라 기준을 세분화하였으며, 날 것으로 섭취되는 농산물에 사용되는 농업용수는 대장균 0 log CFU/100 mL (1 CFU/100 mL), 대장균군 1 log CFU/100 mL 를 넘지 않도록 규정하고 있다⁵⁾. 그러나 국내에서는 농업용수 수질 기준에 미생물 관련 항목이 포함되어 있지 않으며, 농업용수의 미생물 오염 수준을 파악하기 위한 모니터링도 부족한 상황이다.

한편, 농업용수의 미생물 오염을 예방하고 관리하기 위해서는 적절한 수처리 기술이 필수적이다. 농업용수 내 미생물 제어를 위한 수처리 기술에는 여과(filtration), 염소소독(chlorination), 자외선(ultraviolet, UV) 소독 등이 있다. 여과 기술은 용수의 탁도를 감소시키고 입자성 물질 및 미생물을 제거하는데 효과적이다. 하지만, 농업용수에 적용할 경우 다양한 부유물질로 인해 여과막의 막힘(fouling) 현상이 발생할 수 있어 사용이 제한될 수 있다⁶⁾. 염소소독은 강력한 미생물 제어 능력으로 상하수도 처리에 널리 사용되지만, 잔류 염소와 소독부산물의 형성으로 농업용수 적용을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다⁶⁾. 자외선

소독은 화학적 잔류물이 남지 않고 물의 물리적 특성에 영향을 미치지 않으며, 병원성 미생물의 제거에 높은 효율을 보여 농업용수 소독에 매우 적합한 기술로 평가되고 있다⁷⁾. 이러한 수처리 기술들은 상하수도 처리 분야에서 널리 사용되고 있으나, 농업용수에 적용된 사례는 드물기 때문에 수처리 기술을 농업용수에 적용하기 위해서는 농업용수의 물리적·화학적 특성을 고려한 기술 적용성 평가와 처리강도 결정이 필요하다. 예를 들어, 수원의 탁도나 유기물 함량 등은 수처리 효율에 영향을 줄 수 있기 때문에, 각 수원의 특성에 맞는 기술 선택과 처리 강도 설정이 중요하다^{8,9)}.

본 논문에서는 향후 농업용수의 안전관리를 위한 지침 설정에 기여하기 위해 전국적인 농업용수의 위생지표미생물 오염 수준을 조사하였다. 아울러, UV 처리 실험을 통해 농업용수 내 병원성 미생물 저감을 평가하고, 이를 통해 농업용수의 미생물 관리에 UV 처리 기술의 적용가능성을 확인하고자 하였다.

Material and Methods

농업용수 채취 지점 및 채취 방법

본 연구에서는 2021년에서 2023년까지 날것으로 섭취하는 신선농산물 7종(배추, 양배추, 양상추, 상추, 깻잎, 부추, 미나리) 재배지 526지점을 대상으로 농업용수 시료를 채취하였다. 시료는 작물이 재배되고 있는 재배지와 수확기 사이에 매년 1-3회 채취되었다. 수원별 채취된 샘플은 Table 1과 Fig. 1에 기술되어 있으며, 총 하천수 599샘플, 저수지 150샘플, 지하수 1,863샘플, 기타수원 44샘플을 포

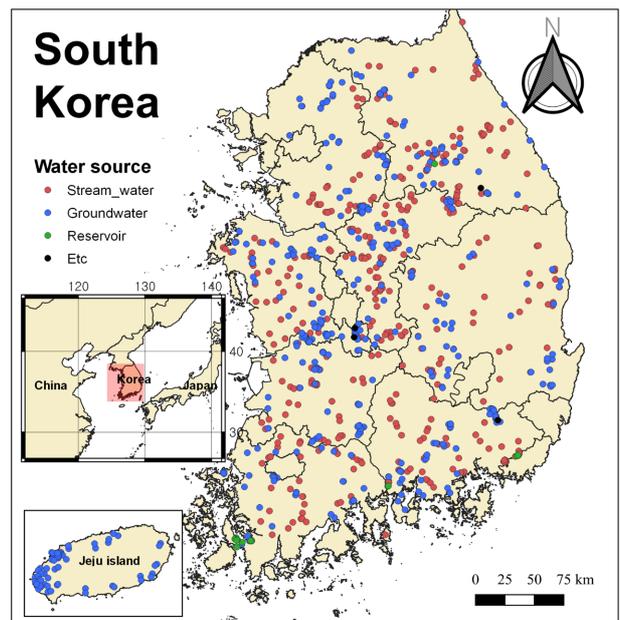


Fig. 1. Geographical map and sampling sites of the Republic of Korea.

Table 1. Sampling sites of agricultural water by crops and water source

Crops	Year	Stream water	Reservoir	Groundwater	Other sources ¹⁾
Napa_cabbage	2021	102	19	120	2
	2022	144	35	168	8
	2023	119	19	137	2
Cabbage	2021	20	5	44	2
	2022	12	10	43	0
	2023	21	16	36	6
Lettuce	2021	0	0	183	16
	2022	33	0	257	0
	2023	22	0	178	0
Iceberg_lettuce	2021	15	0	36	0
	2022	33	6	54	0
	2023	28	12	38	0
Chives	2021	2	8	66	2
	2022	9	12	85	4
	2023	6	8	57	2
Perilla_leaf	2021	0	0	60	0
	2022	0	0	57	0
	2023	0	0	92	0
Water_dropwort	2021	0	0	36	0
	2022	11	0	53	0
	2023	22	0	63	0
Total	2021	139	32	545	22
	2022	242	63	717	12
	2023	218	55	601	10
	Total	599	150	1,863	44

¹⁾ Other sources: non-natural water sources such as rainwater, tap water and water stored in containers.

합한 총 2,656 샘플을 채취하였다. 각 지점은 신선농산물별 주요 재배지를 중심으로 선정되었으며, 다양한 수원으로 부터 샘플을 채취하여 미생물 오염도를 평가하였다. 샘플링 방법은 이전 연구에서 제시된 방법에 따라 다음과 같이 수행하였다^{10,11)}. 하천수와 저수지 시료는 비커봉(Bürkle GmbH, Germany)을 사용하여 하천, 저수지의 중앙지점 또는 물가에서 최소 3 m 떨어진 곳에서, 2 m 이내의 깊이에서 채수하였다. 지하수 시료는 채취 전에 용수 펌프를 5분 이상 가동하여 관정 내 고인 물을 제거한 후, 무균 채수병을 이용하여 채취하였다. 모든 시료는 채취 후 즉시 아이스 박스에 보관하여 실험실로 이송되었으며, 실험실 도착 후 4°C 조건에서 보관한 후 24시간 이내에 분석을 완료하였다.

농업용수 내 위생지표미생물 분석

농업용수 시료에서 위생지표미생물을 분석하기 위해 건조필름배지(3M, St. Paul, MN, USA)를 사용하여 대장균

군(coliform) 및 대장균(*Escherichia coli*)의 집락수를 측정하였다. 시료는 제조법에 따라 1 mL의 원액, phosphate-buffered saline (PBS, Biosesang, Yongin, Korea) 1/10, 1/100배 희석액 1 mL를 건조필름배지에 접종하였다. 접종된 배지는 35±0.5°C에서 24-48시간 동안 배양하였으며, 배양 후 집락수를 측정하였다. 대장균군은 붉은 집락 중 기포가 형성된 집락을 계수하였고, 대장균은 청색 집락 주위에 기포가 형성된 집락수를 계수하여 대장균 수를 산출하였다. 건조필름배지에서 대장균군과 대장균이 검출되지 않을 경우 농촌진흥청에서 발행한 『농업용수 미생물분석 매뉴얼』에 따라 분석을 수행하였다¹²⁾. 농업용수 100 mL를 0.45 µm 나이트로셀룰로스 여과막(Merck Millipore, Tullagreen, Ireland)에 여과시킨 후 총대장균군 분석을 위해 여과막을 membrane Endo's lawrence experimental station (m-Endo LES) agar 배지(Difco Laboratories, Detroit, MI, USA)에 올려 35±0.5°C에서 24시간 동안 배양하였다. 배양 후 금

속성 붉은 집락을 계수하여 총대장균군을 산출하였다. 대장균은 총대장균군을 계수한 여과막을 무균적으로 nutrient agar with MUG (NA-MUG) 배지(Difco Laboratories)에 옮긴 뒤, 35±0.5°C에서 4시간 배양한 후, 붉은 금속성 집락 중 UV (366 nm) 하에서 형광을 띠는 집락을 계수하여 대장균 집락수를 확인하였다. 위생지표미생물의 집락수는 희석배수를 곱한 뒤 log로 환산해 100 mL 당 집락수(log CFU/100 mL)로 정량하였다. 모든 시험은 3반복으로 수행되었다. 또한, 수원별 기상환경(평균기온, 강수량)과 위생지표미생물 농도 간의 상관성을 분석하기 위해 기상청 기상자료개방포털에서 수집한 지역별 월간 평균기온 및 강수량 데이터를 활용하였다¹³⁾. 이를 통해 각 수원에서 위생지표미생물 농도와 기상환경의 연관성을 평가하였다.

UV 조사를 통한 농업용수 내 미생물 저감 실험

자외선 소독 실험은 Blatchley 연구에서 제시된 방법에 따라 collimated-beam UV 시스템을(Fig. 2) 사용하여 진행되었다¹⁴⁾. 실험 장치의 광원으로는 저압 UV 램프(4 W, Philips Co., Amsterdam, Netherlands) 4개를 사용하였으며, 램프에서 나오는 자외선은 수직 방향으로 실험 대상에 조사되도록 설계되었다. 자외선이 조사되는 부분에는 50 mL의 pyrex deep petri-dish (Corning Inc., Corning, NY, USA)를 올려놓을 수 있도록 magnetic stirrer를 설치하였다. 실험에 사용된 농업용수는 전라북도 지역의 하천수에서 채취한 농업용수를 사용하였다.

실험 전, UV 램프는 최소 10분 이상 예열하여 안정적

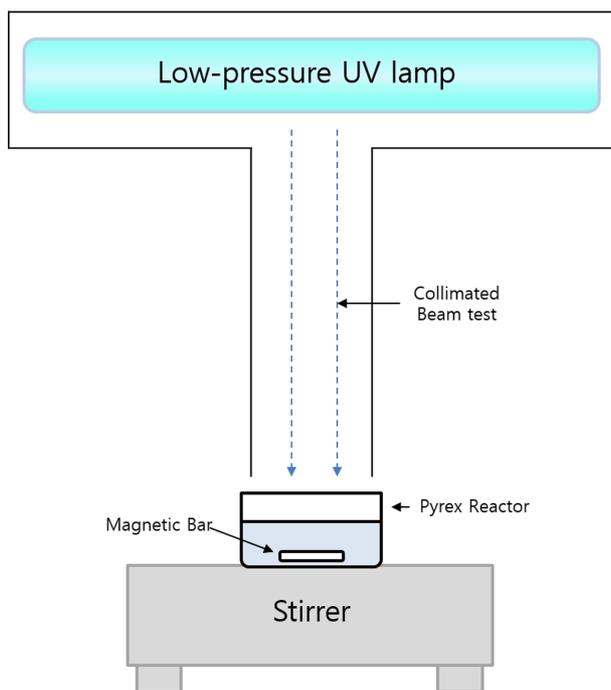


Fig. 2. Collimated-beam ultraviolet (UV) system.

인 조사 환경을 마련하였으며, 램프와 반응기 사이의 거리를 조절하여 UV 253.7 nm에서의 빛 세기를 0.1-0.4 mW/cm²로 설정하였다. 빛의 세기는 UVX radiometer (UVP Co., Upland, CA, USA)를 사용하여 측정하였으며, 자외선 조사량(UV dose)은 아래 식을 통해 계산되었다.

$$\text{UV dose (IT): light intensity (mW/cm}^2\text{)} \\ \times \text{contact time (sec) (mW/cm}^2\text{-sec)}$$

자외선 투과도 변화에 따른 소독 효율을 확인하기 위해 고분자 응집제를 사용하여 전처리 단계를 거쳤으며, 처리 수준은 4가지로 설정하였다: 전처리를 하지 않은 원수(농업용수), 총유기탄소(total organic carbon, TOC) 기준으로 50% 및 90% 전처리된 용액, 그리고 증류수로 구성되었다. 자외선 투과도는 UV-visible 분광광도계(Agilent 8435 UV-VIS, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)를 이용해 254 nm 파장에서 측정하였다. 각각의 처리 수준에 따른 용액을 각각 40 mL씩 Pyrex deep petri-dish에 분주한 뒤, 농업용수에서 분리된 대장균(*E. coli* ET19), 살모넬라(*Salmonella enterica* ST13), 리스테리아 모노사이토제네스(*Listeria monocytogenes* LT7)를 초기 농도 5-6 log CFU/mL 수준으로 각 용액에 접종하였다. 그 후, UV를 차단한 상태에서 Magnetic Stirrer를 이용해 혼합하였다. 자외선 조사를 시작한 후 3초 간격으로 시료를 1 mL씩 채취하여 1.6 mL 튜브에 담았으며, 이후 serial dilution을 통해 희석한 뒤, 대장균과 살모넬라는 tryptic soy agar (TSA, Difco Laboratories)에, 리스테리아는 tryptic soy agar with yeast extract (TSAY, Difco Laboratories)에 도말 후 37±0.5°C에서 24시간 동안 배양한 뒤 콜로니를 계수하여 생존율을 측정하였다.

통계분석

본 연구에서는 2021년부터 2023년까지의 수질 데이터 통계분석에 R 언어(version 4.3.1)를 사용하였다¹⁵⁾. 기술 통계(평균, 표준 편차)는 각 그룹(수원, 지표미생물, 연도)에 대해 계산되었으며 “평균±표준편차” 표시되었다. 연도별 지표미생물 차이를 평가하기 위해 일원 분산 분석을 수행한 후 ‘agricolae’ 패키지¹⁶⁾를 사용하여 Tukey honestly significant difference (HSD) 검정을 수행하였고, 연도 간 차이를 알파벳(a, b 등)으로 표시하였다. 수원별 기상조건과 지표미생물과의 상관성은 R 기본 함수 “cor()”와 “cor.test()”를 사용해 상관계수 및 유의수준(P value)을 계산하였다.

Results and Discussion

농업용수 수원별 대장균군(Coliform) 분포도

농업용수 수원별, 연도별 대장균군 분포는 Table 2와 같

Table 2. Concentration of coliform and *E. coli* by water source

Water sources	Year	n	Coliform		<i>E. coli</i>		Detected samples (<i>E. coli</i> > 0)
			Mean ±SD (log CFU/ 100 mL)	P	Mean ±SD (log CFU/ 100 mL)	P	
Stream water	2021	139	3.08±1.04 ^{a1)}	<0.001	1.71±1.09 ^a	<0.001	105 (75.54%)
	2022	242	2.56±1.33 ^b		0.43±0.8 ^c		77 (31.82%)
	2023	218	1.77±1.55 ^c		1.05±1.4 ^b		91 (41.74%)
	Total	599	2.39±1.45		0.95±1.23		273 (45.81%)
Reservoir	2021	32	2.76±1.14 ^a	<0.001	1.22±1.07 ^a	<0.001	20 (62.50%)
	2022	63	3.15±1.25 ^a		0.29±0.58 ^b		21 (33.33%)
	2023	55	1.82±1.78 ^b		1.04±1.3 ^a		24 (43.64%)
	Total	150	2.57±1.56		0.76±1.07		65 (43.62%)
Ground water	2021	545	0.81±1.19 ^a	0.02	0.07±0.38 ^b	<0.001	21 (3.85%)
	2022	717	0.77±1.23 ^{ab}		0.04±0.27 ^b		22 (3.07%)
	2023	601	0.63±1.13 ^b		0.19±0.68 ^a		51 (8.49%)
	Total	1,863	0.71±1.17		0.1±0.47		94 (5.05%)
Other sources	2021	22	2.3±0.99 ^a	0.95	0.86±0.91 ^a	0.04	12 (54.55%)
	2022	12	2.12±1.96 ^a		0.09±0.27 ^b		2 (16.67%)
	2023	10	2.21±2.35 ^a		0.65±1.05 ^{ab}		3 (30.00%)
	Total	44	2.23±1.62		0.6±0.87		17 (38.64%)

¹⁾Tukey's significance letter for each group: different superscript letters within the same column indicate statistically significant differences between means as determined by Tukey's multiple comparison test ($P < 0.05$).

다. 하천수에서 대장균군의 평균 농도는 2.39 ± 1.45 log CFU/100 mL로 조사되었고, 연도별로는 2021년 3.08 ± 1.04 log CFU/100 mL, 2022년 2.56 ± 1.33 log CFU/100 mL, 2023년 1.77 ± 1.55 log CFU/100 mL로, 2021년에 가장 높았고, 2023년에는 가장 낮았다($P < 0.001$). 이러한 연도별 오염도 차이는 다양한 환경적 요인에 의해 설명될 수 있다. 하천수는 외부 환경에 지속적으로 노출되기 때문에 다양한 환경 요인에 의해 쉽게 오염될 수 있다. 대표적인 오염 요인으로는 축사, 농경지, 도시 등 주변 오염원에서 발생하는 표면 유출이 있다. 강수량이 많을 때, 특히 폭우나 홍수가 발생하면 이러한 오염물질이 하천으로 유입되면서 미생물 농도가 급격히 증가할 수 있다^{17,18)}. 또한, 기온 변화도 미생물 오염 수준에 영향을 미친다. 여름철 높은 기온은 미생물 증식을 촉진하는 반면, 겨울철 낮은 기온은 오염도를 줄이는 요인으로 작용할 수 있다. 지역별 샘플링 시기의 평균 기온과 강수량을 보면, 2021년 평균 기온은 18.9°C , 평균 강수량은 127.8 mm였고, 2022년은 18.4°C , 136.4 mm, 2023년은 18.2°C , 165.2 mm였다. 대장균군 검출과 평균 기온과의 상관관계를 보면 상관계수는 0.16 ($P < 0.001$)로 약한 양의 상관관계를 나타냈고, 평균 강수량과는 -0.01 ($P = 0.745$)로 유의미하지 않은 상관관계를 보였다(data not shown). 하천수의 연도별 변동 요인을 파악하기 위해서는 동일 지점에서 장기적인 모니터링을 통해 강

우량, 기온, 주변 환경 변화 등의 요인들이 하천수 오염에 어떤 영향을 미치는지 분석해야 한다¹⁹⁾. 하지만 본 연구는 전국적인 농업용수 오염 수준을 파악하는 데 초점을 맞추고 있어, 시료 채취 지점수와 샘플수가 제한되어 연도별 환경조건과 위생지표미생물 농도 간에 상관성을 규명하는데 한계가 있었다.

저수지에서 대장균군의 평균 농도는 2.57 ± 1.56 log CFU/100 mL로 조사되었고, 연도별로는 2021년 2.76 ± 1.14 log CFU/100 mL, 2022년 3.15 ± 1.25 log CFU/100 mL, 2023년 1.82 ± 1.78 log CFU/100 mL로, 2022년에 증가한 농도가 2023년에는 다시 감소하였다($P < 0.001$). 저수지는 하천수와 마찬가지로 외부 환경에 노출되어 있어, 강우 시 주변 농경지, 축사, 생활하수 등에서 유입되는 표면 유출로 인해 오염될 수 있다. 특히 저수지는 물의 흐름이 거의 없거나 느리기 때문에, 유입된 오염 물질이 장기간 축적되는 경향이 있다²⁰⁾. 또한, 저수지 주변에서 이루어지는 인간 활동도 미생물 오염에 영향을 미친다. 저수지는 농업용수나 레저 활동에 자주 사용되기 때문에, 사람이 많이 모이는 지역일수록 오염원이 더 많이 유입될 가능성이 크다²¹⁾. 저수지 샘플링 시기의 평균 기온과 강수량을 보면, 2021년 평균 기온은 13.0°C , 평균 강수량은 82.4 mm였고, 2022년은 20.3°C , 145.1 mm, 2023년은 20.7°C , 162.0 mm였다. 대장균군 검출과 평균 기온과의 상관관계를 보면 상관계수

는 0.10($P=0.216$)로 유의미하지 않았고, 평균 강수량과는 -0.19($P=0.022$)로 약한 음의 상관관계를 보였다(data not shown). 본 연구에서 관찰된 저수지의 대장균군 오염도 변화는 다양한 환경적 요인들이 연관된 것으로 추정되나, 하천수와 마찬가지로 정확한 원인을 규명하기 위해서는 추가적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

지하수에서 대장균군의 평균 농도는 $0.71 \pm 1.17 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$ 로 조사되었고, 연도별로는 2021년 $0.81 \pm 1.19 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$, 2022년 $0.77 \pm 1.23 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$, 2023년 $0.63 \pm 1.13 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$ 로, 연도별 차이는 있지만 30% 내외의 샘플에서 대장균군이 검출되었고(data not shown), 평균 농도는 1 $\log \text{CFU}/100 \text{ mL}$ 미만으로 낮은 수준이었다. 지하수는 일반적으로 자연적으로 여과되는 과정을 거치기 때문에 표면수에 비해 미생물 오염 가능성이 낮다²²). 본 연구에서도 지하수는 하천수와 저수지에 비해 대장균군 검출률과 농도가 현저히 낮은 것으로 나타났으며, 이는 지하수가 상대적으로 오염원으로부터 보호되는 환경에 있음을 알 수 있었다. 그러나 주변 오염원, 특히 축사나 비료 사용이 많은 농업 지역에서는 오염원이 시추공을 통해 지하수로 유입되거나, 지표면을 통해 간접적으로 지하수를 오염시킬 수 있다²³). 지하수는 자연 여과 과정을 거치지만, 지하수층으로 유입되는 물이 불완전하게 여과될 경우 대장균과 같은 미생물이 오염될 가능성이 있다. 특히, 강수량이 많을 때는 지하수로의 유입 속도가 빨라지면서 자연 여과 과정이 충분히 이루어지지 않아 지하수 내 오염물질이 유입될 위험이 있다²⁴). 지하수 샘플링 시기의 평균 기온과 강수량을 보면, 2021년 평균 기온은 15.3°C, 평균 강수량은 110.2 mm였고, 2022년은 16.8°C, 124.7 mm, 2023년은 17.2°C, 135.5 mm였다. 대장균군 검출과 기온과의 상관관계를 보면 상관계수는 0.08($P=0.531$)로 유의미하지 않았고, 강수량과는 -0.05($P=0.668$)로 역시 유의미하지 않았다(Data not shown). 이러한 결과는 지하수가 외부 환경으로부터 보호되어 있어 환경 조건에 직접적인 영향을 적게 받았기 때문으로 판단된다.

기타수원에서 대장균군의 평균 농도는 $2.23 \pm 1.62 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$ 였고, 시료수가 적어 연차별 통계적인 차이는 알 수 없었다. 본 연구에서 기타 수원으로서는 빗물, 통에 받아놓은 물, 상수 등이 있었고, 수원에 따라 미생물 오염 편차가 크게 나타났다.

농업용수 수원별 대장균(*E. coli*) 분포도

농업용수 수원별, 연도별 대장균 검출률은 Table 2과 같다. 하천수에서 대장균 검출률은 45.8%(273/599)로 나타났고, 평균 농도는 $0.95 \pm 1.23 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$ 로 조사되었다. 연도별로는 2021년 $1.17 \pm 1.09 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$, 2022년 $0.43 \pm 0.8 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$, 2023년 $1.05 \pm 1.4 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$ 로, 2022년에는 검출률과 농도가 모두 감소하였으

나 2023년에는 다시 증가하였다($P<0.001$). 하천수의 대장균 오염은 앞서 대장균군에서 설명한 여러 오염 요인들과 유사하지만, 대장균은 특히 분변 오염과 더 밀접한 관련이 있다. 국내 하천수와 지하수의 미생물 오염을 조사한 선행 연구에서도 하천수에서 병원성 대장균을 비롯한 다양한 식중독균과 항생제 내성균이 분리된 바 있다^{10,11}). 따라서 하천수를 농업용수로 사용할 경우 농산물 오염을 예방하기 위해 관개 후 수확 시기를 조정하거나, 적절한 농업용수 소독 기술 도입이 필요할 것으로 보인다. 하천수에서 대장균과 평균 기온의 상관관계는 상관계수 -0.03($P=0.451$)로 유의미하지 않았고, 평균 강수량과의 상관관계는 상관계수 -0.13($P=0.002$)로 약한 음의 상관관계를 나타내었다(Data not shown). 이는 강수량이 많을 때 강우로 인한 오염원 유입으로 대장균 농도가 증가할 수 있다는 기존 연구와 상반된 결과였지만, 상관계수가 낮아 강수량과 대장균 농도와의 상관성은 약한 것으로 판단되었다^{17,18}).

저수지에서 대장균의 검출률은 43.6%(65/150)로 나타났고, 평균 농도는 $0.76 \pm 1.07 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$ 로 조사되었다. 연도별로는 2021년 $1.22 \pm 1.07 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$, 2022년 $0.29 \pm 0.58 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$, 2023년 $1.04 \pm 1.3 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$ 로, 2022년에 감소한 후 2023년에 다시 증가하였다($P<0.001$). 앞서 설명한대로 저수지는 하천수와 마찬가지로 외부 환경에 노출되어 있어 오염에 취약하기 때문에, 저수지를 농업용수로 사용하기 위해서는 미생물 오염 상태를 확인하고, 필요시 적절한 처리 과정을 통해 미생물 오염을 줄이는 조치가 필요할 것으로 보인다. 저수지의 경우 대장균과 평균 기온의 상관계수는 -0.24($P=0.003$)로 유의미한 음의 상관관계를 나타냈으며, 강수량과의 상관관계는 -0.32($P<0.001$)로 음의 상관관계를 보였다(Data not shown). 이러한 결과는 기온이 상승 시 대장균 농도가 증가하고, 강수량 증가 시 오염원이 유입되어 대장균 농도가 증가한다는 기존 연구와 상반된다^{17,18}). 하지만 상관계수가 낮은 점을 고려했을 때, 본 연구에서 외부환경 조건이 저수지 내 대장균 농도에 미친 영향은 크지 않은 것으로 판단되었다.

지하수에서 대장균의 검출률은 5.05%(94/1,863)로 나타났고, 평균 농도는 $0.1 \pm 0.47 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$ 로 조사되었다. 연도별로는 2021년 $0.07 \pm 0.38 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$, 2022년 $0.04 \pm 0.27 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$, 2023년 $0.19 \pm 0.68 \log \text{CFU}/100 \text{ mL}$ 로 2021년과 2022년에 비해 2023년 농도가 높았다($P<0.001$). 지하수의 대장균 오염도는 하천수와 저수지에 비해 상대적으로 낮은 수준을 보였다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 지하수도 미생물에 오염될 가능성이 있기 때문에, 지하수를 농업용수로 사용할 경우에도 주기적인 미생물 조사가 필요할 것으로 판단된다^{23,24}). 지하수에서 대장균 검출과 기온과의 상관관계는 상관계수 -0.12($P=0.217$)로 유의미하지 않았고, 강수량과의 상관관계는 -0.09

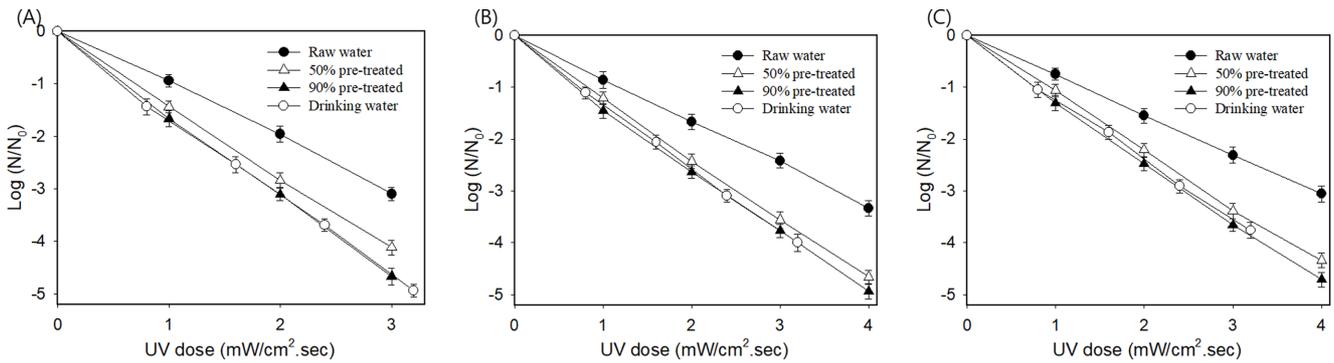


Fig. 3. UV disinfection efficacy on three major foodborne pathogens isolated from agricultural water at different pretreatment levels (A) *Escherichia coli* ET19, (B) *Salmonella enterica* ST13, (C) *Listeria monocytogenes* LT7.

($P=0.354$)로 역시 유의미하지 않았다(data not shown). 이러한 결과는 지하수가 외부 환경 변화에 상대적으로 영향을 덜 받기 때문일 수 있다.

기타수원에서 대장균의 검출률은 38.6%(17/44)로 나타났다, 평균 농도는 0.6 ± 0.87 log CFU/100 mL로 조사되었다.

UV 조사에 의한 병원성 미생물 불활성화

전처리 수준에 따른 자외선 투과도 조사 결과 증류수에서 자외선 투과도는 100% 였고, 농업용수 원수에서는 75.72%였으며, 고행물 응집제를 사용하여 TOC 기준으로 50% 처리한 결과 89.52%, 90% 처리한 경우 96.24%로 투과도가 증가하였다. 이는 전처리 과정에서 고행물이 제거됨에 따라 용수의 투과율이 증가했기 때문으로 판단되었다. 자외선에 의한 용수 내 미생물 저감은 Fig. 3과 같다. 용수 내 미생물을 3 log CFU/mL(99.9%) 불활성화하기 위한 UV dose는 증류수에서 $1.2\text{--}1.6$ mW/cm²·sec, 90% 전처리 농업용수에서 $1.2\text{--}1.7$ mW/cm²·sec, 50% 전처리 농업용수에서 $1.4\text{--}1.9$ mW/cm²·sec, 농업용수 원수에는 $2.0\text{--}2.7$ mW/cm²·sec이었다. 이는 기존 연구들에서 대장균이 1-15 mW/cm²·sec 수준에서 최대 6 log CFU/mL 불활성화되고, 살모넬라가 2-10 mW/cm²·sec 수준에서 최대 5.6 log CFU/mL 불활성화된 결과와 유사한 경향을 보였다²⁵). UV에 의한 미생물 저감효과는 자외선이 미생물에 직접 도달하는 것이 중요한데, 투과도가 높은 용수일수록 자외선이 미생물 표면에 더 많이 도달하기 때문에 불활성화 효율이 높아진다고 알려져 있다²⁶). 본 실험에서도 대장균, 살모넬라, 리스테리아의 불활성화 효율은 자외선 투과도가 가장 높은 증류수에서 가장 높았고, 그 다음으로 90% 전처리 농업용수, 50% 전처리 농업용수, 농업용수 원수 순서로 높게 나타났다. 본 연구에서 사용된 자외선 램프는 표면에서 5-10 mW/cm²의 강도를 유지하며 작동하였기 때문에, 농업용수 내 미생물을 저감하기 위해 UV를 조사할 경우 모든 탁도조건에서 미생물이 1초 이내에 99.9% 불활성화 될 것으로 판단되었다. 농업용수 모니터링 결과 미생물 오염도

가 가장 높았던 하천수에서 대장균 오염 수준이 0.95 ± 1.22 CFU/100 mL인 것을 고려하면, UV 소독 기술은 농업용수의 다양한 수질 조건에서도 효과적인 미생물 제어 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 연구는 국립농업과학원 농촌진흥청의 “농업과학기술 개발연구 프로그램(프로젝트 번호 RS-2021-RD009855)”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

국문요약

농산물 재배, 수확 후 세척 등에 사용되는 농업용수는 미생물에 오염될 경우 병원균을 농산물로 전파하여 식중독을 유발할 수 있기 때문에 관리가 필요하다. 이 연구는 2021년부터 2023년까지 하천수, 저수지, 지하수 등 다양한 수원의 농업용수에서 대장균과 대장균의 오염 수준을 조사하고 자외선(ultraviolet, UV) 소독이 농업용수 내 미생물을 저감시키는 데 얼마나 효과적인지 평가하였다. 농업용수의 미생물 수질조사 결과 대장균 오염도는 수원에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 하천수의 대장균 농도는 평균 0.95 ± 1.23 log CFU/100 mL였으며, 저수지는 평균 0.76 ± 1.07 log CFU/100 mL, 지하수는 평균 0.1 ± 0.47 log CFU/100 mL로 조사되었다. 수원별로 보면 하천수, 저수지, 지하수 순으로 높은 미생물 오염을 보였다. 다양한 용수 조건에서 자외선 소독을 테스트한 결과, 99.9% 미생물 불활성화에 필요한 UV 선량은 증류수에서 $1.2\text{--}1.6$ mW/cm²·sec, 농업용수 원수에서 $2.0\text{--}2.7$ mW/cm²·sec 범위 였다. 고행물 응집제를 통해 전처리된 농업용수는 처리되지 않은 농업용수 원수에 비해 자외선 투과율이 높았으며, 미생물을 99.9% 감소시키는 데 필요한 자외선 선량이 더 낮아지는 것으로 나타났다. 용수 자외선 투과도가 감소함에 따라 소

독 효율이 감소함에도 불구하고 본 실험에서 조사된 선량은 수질에 상관없이 수초 내 99.9%의 미생물 감소를 달성하는 것으로 나타나, UV 소독기술은 농업용수의 미생물 위험을 줄이는 데 효과적인 방법으로 판단된다.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest

ORCID

Injun Hwang <https://orcid.org/0000-0001-8960-9354>
 Daesoo Park <https://orcid.org/0000-0001-8026-090X>
 Eunsun Kim <https://orcid.org/0009-0009-5376-4104>
 Song-Yi Choi <https://orcid.org/0000-0002-5343-2945>
 Kyung-Min Park <https://orcid.org/0000-0003-3858-9773>
 Ok Kyung Koo <https://orcid.org/0000-0002-9328-8626>
 Hakdong Shin <https://orcid.org/0000-0001-7615-9809>
 Mijeong Uhm <https://orcid.org/0009-0004-8208-841X>
 Si-Bum Song <https://orcid.org/0009-0009-2588-3739>
 Min Cho <https://orcid.org/0000-0003-1606-6437>

References

- Machado-Moreira, B., Richards, K., Brennan, F., Abram, F., Burgess, C.M., Microbial contamination of fresh produce: what, where, and how?. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **18**, 1727-1750 (2019).
- Gurtler, J.B., Gibson, K.E., Irrigation water and contamination of fresh produce with bacterial foodborne pathogens. *Curr. Opin. Food Sci.*, **47**, 100889 (2022).
- Steele, M., Odumeru, J., Irrigation water as source of foodborne pathogens on fruit and vegetables. *J. Food Prot.*, **67**, 2839-2849 (2004).
- Sanders, E.C., Yuan, Y., Pitchford, A., Fecal coliform and E. coli concentrations in effluent-dominated streams of the upper Santa Cruz watershed. *Water*, **5**, 243-261 (2013).
- Rock, C.M., Brassill, N., Dery, J.L., Carr, D., McLain, J.E., Bright, K.R., Gerba, C.P., Review of water quality criteria for water reuse and risk-based implications for irrigated produce under the FDA Food Safety Modernization Act, produce safety rule. *Environ. Res.*, **172**, 616-629 (2019).
- van Haute, S., Sampers, I., Jacxsens, L., Uyttendaele, M., Selection criteria for water disinfection techniques in agricultural practices. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, **55**, 1529-1551 (2015).
- Usaga, J., Beauvais, W., Englishbey, A.K., Marconi, C.M., Cholula, U., Belias, A.M., Wemette, M., Churey, J.J., Worobo, R.W., Enciso, J., Anciso, J.R., Nightingale, K., Ivanek, R., Inactivation of Salmonella and Escherichia coli in surface agricultural water using a commercial UV processing unit. *Food Prot. Trends.*, **42**, 377-382 (2022).
- Friedler, E., Chavez, D.F., Alfiya, Y., Gilboa, Y., Gross, A., Impact of suspended solids and organic matter on chlorine and UV disinfection efficiency of greywater. *Water*, **13**, 214 (2021).
- Jones, L.A., Worobo, R.W., Smart, C.D., UV light inactivation of human and plant pathogens in unfiltered surface irrigation water. *Appl. Environ. Microbiol.*, **80**, 849-854 (2014).
- Hwang, I., Lee, T.K., Park, D., Kim, E., Choi, S.Y., Hyun, J.E., Rajalingam, N., Kim, S.R., Cho, M., Investigation of Microbial Safety and Correlations Between the Level of Sanitary Indicator Bacteria and the Detection Ratio of Pathogens in Agricultural Water. *Korean J. Environ. Agric.*, **40**, 248-259 (2021).
- Hwang, I., Park, D., Chae, H., Kim, E., Yoon, J.H., Rajalingam, N., Choi, S., Kim, S.R., Microbiological quality and antibiotic susceptibility of E. coli isolated from agricultural water in gyeonggi and gangwon provinces. *Korean J. Environ. Agric.*, **39**, 343-351 (2020).
- Ham, H., Kim, H.J., Kim, S.R., Kim, W.I., 2018, Microbiological analysis manual for agricultural water, Rural Development Administration National Institute Agricultural Sciences, Wanju, Korea.
- Korea Meteorological Administration (KMA), (2024, November 8). Open MET data portal. Retrieved from <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>
- Blatchley III, E.R., Numerical modelling of UV intensity: application to collimated-beam reactors and continuous-flow systems. *Water Res.*, **31**, 2205-2218 (1997).
- The R Development Core Team, 2013. R: a language and environment for statistical computing, Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- de Mendiburu, F., (2024, November 8). Agricolae: statistical procedures for agricultural research. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- Frağ, M., Escherichia coli as a potential indicator of Biebrza River enrichment sources. *J. Water Land Dev.*, **19**, 31-37 (2013).
- Yard, E.E., Murphy, M.W., Schneeberger, C., Narayanan, J., Hoo, E., Freiman, A., Lewis, L.S., Hill, V.R., Microbial and chemical contamination during and after flooding in the Ohio River—Kentucky, 2011. *J. Environ. Sci. Health*, **49**, 1236-1243 (2014).
- Salikova, N.S., Rodrigo-Ilarri, J., Alimova, K.K., Rodrigo-Clavero, M.E., Analysis of the water quality of the ishim river within the Akmola Region (Kazakhstan) using hydrochemical indicators. *Water*, **13**, 1243 (2021).
- Baudišová, D., Microbial pollution of water from agriculture. *Plant Soil Environ.*, **55**, 429-435 (2009).
- Traoré, A.N., Mulaudzi, K., Chari, G.J., Foord, S.H., Mudau, L.S., Barnard, T.G., Potgieter, N., The impact of human activities on microbial quality of rivers in the Vhembe District, South Africa. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **13**, 817 (2016).
- Pachepsky, Y., Shelton, D.R., McLain, J.E., Patel, J., Mandrell, R.E., Irrigation waters as a source of pathogenic micro-

- organisms in produce: a review. *Adv. Agron.*, **113**, 75-141 (2011).
23. Foster, T., Willetts, J., Kotra, K.K., Faecal contamination of groundwater in rural Vanuatu: prevalence and predictors. *J. Water Health*, **17**, 737-748 (2019).
24. Dey, U., Sarkar, S., Duttagupta, S., Bhattacharya, A., Das, K., Saha, S., Mukherjee, A., Influence of hydrology and sanitation on groundwater coliform contamination in some parts of western bengal basin: implication to safe drinking water. *Front. Water*, **4**, 875624 (2022).
25. Hijnen, W.A.M., Beerendonk, E.F., Medema, G.J., Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo) cysts in water: a review. *Water Res.*, **40**, 3-22 (2006).
26. Farrell, C., Hassard, F., Jefferson, B., Leziart, T., Nocker, A., Jarvis, P., Turbidity composition and the relationship with microbial attachment and UV inactivation efficacy. *Sci. Total Environ.*, **624**, 638-647 (2018).