신선농산물의 안전성 확보를 위한 생산단계 안전관리의 필요성

The Need for Safety Management Required during the Production of Fresh Produces

이승훈[1], 남수진[1], 김세리[2], 황인준[2], 송시범[3], 신학동[4], 조민[5], 구옥경[1,6,*]

Seung Hun Lee[1], Su Jin Nam[1], Se-Ri Kim[2], Injun Hwang[2], Si Bum Song[3], Hakdong Shin[4], Min Cho[5], Ok Kyung Koo[1]

[1]경상대학교 식품영양학과, [2]농촌진흥청 국립농업과학원 유해생물팀, [3]㈜세니젠, [4]세종대학교 식품생명공학전공, [5]전북대학교 생명공학부, [6]경상대학교 농업생명과학원

[1]Department of Food and Nutrition, Gyeongsang National University, Jinju, Korea
[2]Microbial Safety Team, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju, Korea
[3]R&D Center, Sanigen Co., Ltd, Anyang, Gyeonggi-do, Korea
[4]Department of Food Science and Biotechnology, Sejong University, Seoul, Korea
[5]Division of Biotechnology, College of Environmental and Bioresource Sciences, Jeonbuk National University, Iksan, Korea
[6]Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

구 옥 경

Corresponding author:
Ok Kyung Koo
Tel: +82-55-772-1441
Fax: +82-55-772-1439
E-mail: okoo@gnu.ac.kr

서론

전세계적으로 건강하고 간편한 식생활에 대한 소비자의 요구가 증가하면서 샐러드, 가정간편식, 밀키트 등 농산물을 이용한 신선편의식품시장이 확대되고 있다. 우리나라 신선편의식품 생산액은 2015년 821억원에 비해 2018년 1,570억원으로 두 배 가까이 증가하였다. 특히 채소의 생산량은 세계에서 14번째로 많은 양을 생산하고 있으며, 성인 1인당 하루 평균 채소 섭취량은 2017년 기준 540 g으로 세계 평균(384 g)보다 높다. 이와 같이 늘어나는 농산물 수요를 충당하기 위하여 수출입이 확대되어 농산물의 유통 거리와 시간이 늘어나고 있다. 논문으로 보고된 신선편의농산물 관련 국제 식중독 사고는 1986년-1995년 연간 5.7건, 1996년-2005년 연간 13.7건, 2006년-2015년 연간 14.7건으로 증가하였다(Machado-Moreira et al., 2019). WHO는 엽채류를 신선농산물 안전사고에서 가장 중요한 비중으로 다루고 있으며 그중에서 샐러드와 양상추에 의한 식중독 사고가 가장 많이 발생하고 있다고 보고하고 있다(World Health Organization, 2008). 신선편의식품의 안전성 확보를 위해서는 제조환경과 유통의 위생관리가 중요하겠지만 원료인 신선농산물의 안전성 확보가 무엇보다도 중요할 것이다. 신선농산물(fresh produce)은 박피, 절단, 건조, 염장 등의 가공을 하지 않은 신선 상태의 1차 농산물로서, 엽채류, 경인채류, 근채류, 과채류 뿐만 아니라 특용작물, 화훼 등 농업을 통해 생산된 물자를 모두 포함하고 있다. 이러한 신선농산물의 초기 오염상태는 신선편의식품 제조과정에서도 완벽한 제어가 불가능하기 때문에 신선농산물의 재배 과정 중의 안전관리가 매우 중요하다. 따라서 본 논단에서는 신선농산물의 생산단계에서의 안

전관리에 대해 살펴보고자 한다.

신선농산물의 생산 과정중 주요 오염원 및 오염 경로

신선농산물은 일반적으로 수확후 선별, 세척, 포장 등의 과정을 거쳐 유통되거나, 절단, 박피, 세절 등의 단순가공처리를 통해 신선편의식품 형태로 유통되어 비가열형태로 소비자가 섭취하기 때문에 생산과정에서 오염된 농산물 중에 식중독균은 쉽게 제거하기가 어렵다. 신선농산물의 미생물 오염은 생산단계에서 유통까지 다양한 단계에서 이루어질 수 있다 (그림 1). 그 중 생산농가에서 발생할 수 있는 오염 경로에 대해 살펴보면 오염된 토양을 고려해 볼 수 있다. 농사를 지을 때 식물에 영양분을 공급할 목적으로 토양에 퇴비, 유기질 비료를 투입하게 되는데 퇴비나 유기질 비료에 식중독균이 존재할 경우 토양을 오염시킬 수 있다. 그리고 오염된 토양은 우천시 또는 관개수의 물방울에 의한 교차오염이 발생할 수 있으며 오염된 비료에 의한 식물 표면에의 직접적인 접촉 과정 중 오염발생이 가능하다. 신선농산물의 재배 과정중 사용되는 농업용수는 관개수, 살충제 도포, 냉각, 냉해 방지를 위한 온수 순환 등 직간접적으로 다양하게 적용되며 그 종류로는 지하수, 지표수, 하천수, 우수 등을 사용하고 있다. 기후 등의 환경 요인으로 홍수에 의해 범람한 물이 재배 농산물에 교차오염을 일으키거나 가뭄으로 농업용수의 미생물 오염 농도 증가로 인한 피해를 고려해볼 수 있다. 재배 시기 또한 영향을 받을 수 있는데 기온, 태양 복사열, 습도 등은 계절의 영향을 받을 수 있다. 특히 *E. coli*와 *Listeria innocua*를 양상추에 오염시켰을 때 봄-여름보다 가을-겨울에 생존률이 유의적으로 높았다(Olivera et al., 2012). 마지막으로 농산물 재배, 수확 및 수확후 처리과정 중 수작업이 필요한 경우가 많아 칼, 장갑, 수확물 작업박스 등의 오염도구 또는 감염된 작업자에 의한 교차오염이 발생하는 경우도 있다. 재배 환경에 의한 오염 이외에도 씨앗의 오염이 재배과정중 제거되지 못하고 남아 식중독 사고로 이어질 수 있다(Alegbeleye et al., 2018).

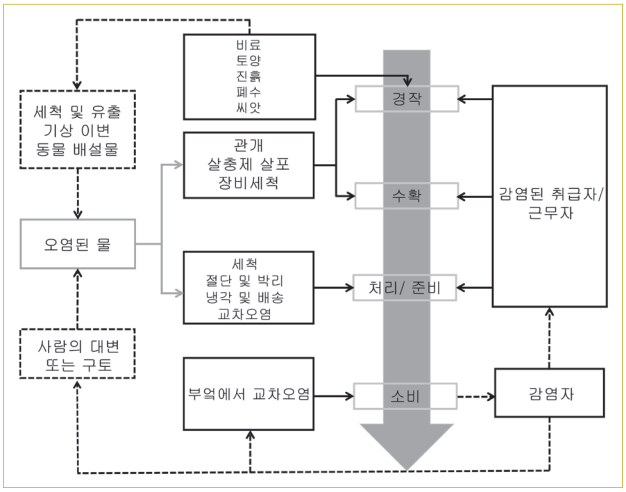

그림1. 신선농산물의 생산에서 소비에 이르는 과정에서의 미생물 오염 경로. 검은선은 각 단계에서 발생할 수 있는 잠재적 오염요소,회색박스와 선은 용수에 의해 발생할 수 있는 오염, 점선은 용수 또는 작업자에 의해 발생할 수 있는 오염 경로를 나타내고 있다. (출처: Machado-Moreira et al., 2019)

농산물의 재배 과정중 상기 언급한 주요 오염원에 의해 오염된 미생물은 농산물의 수확 후 세척과정 중 제거될 수 있으나 병원성 미생물이 바이오필름 형성과 함께 식물 표면에 부착되거나 가식부위 내부에 침투한 경우에는 제거가 어렵다. 따라서 생산단계에서의 철저한 위생관리와 함께 세척용수의 수질 관리 또한 매우 중요하며 특히 유수냉각의 경우 오히려 병원성 미생물의 내부 침투를 용이하게 할 수 있다.

오염된 미생물의 증식을 최소화하기 위해서는 가공처리 후 운송, 저장, 유통 과정 중 신선농산물의 저온저장이 매우 중요하다. 온도에 대한 관리가 부적절하게 이루어질 경우 미생물 증식은 용이하게 발생할 수 있으며 그 결과 식중독 사고로 이어질 위험성이 커질 수 있다. 마지막으로 조리 과정 중 조리에 사용되는 다른 원재료와의 교차오염에 의해서도 식중독 사고가 발생할 수 있으므로 소비자의 섭취까지 모든 오염의 가능성을 주의해야한다. 신선농산물의 경우 유통기한이 짧으므로 식중독 사고에 대한 역학조사시 보존식이 확보된 경우를 제외하고 대부분 폐기되

기 때문에 원인식품에 대한 추적이 매우 어렵다. 따라서 사전 위생관리가 더욱 철저히 이루어져야 할 것이다.

신선농산물의 국내 오염도

표 1과 2에서는 국내 신선농산물의 위생지표세균과 유해미생물에 대한 오염도 측정 연구결과를 정리하였다. 일반세균수의 농도 범위를 살펴보면 미나리의 일반세균수가 3.60 – 9.40 log CFU/g으로 가장 높은 농도까지 오염된 것을 확인할 수 있으며, 치커리, 새싹채소, 상추, 쑥갓, 오이, 깻잎이 8.50–9.40 log CFU/g이상의 농도범위까지 보이고 있어 철저한 위생관리가 필요한 것으로 나타났다. 특히 숙주, 로메인 상추, 새싹채소의 경우 각각 7.61 – 8.43 log CFU/g, 6.32 – 7.17 log CFU/g, 6.17 – 8.90 log CFU/g으로 전체적인 농도 범위가 높아 생산부터 유통까지 모든 단계에서 더욱 주의가 필요할 것이다. 대장균군의 경우 역시 치커리, 미나리, 상추, 깻잎 등에서 높은 오염도를 나타냈다. 신선농산물에 대한 국내 기준은 따로 없으므로 Solberg 등 (1990)이 제시하는 신선편의식품의 일반세균수에 대한 안전기준인 5 log CFU/g을 적용하면 조사한 모든 식품이 기준을 충족시키지 못하는 것으로 나타나며 대장균군의 경우 3.0 log CFU/g이하로 제시하고 있는데 이는 배추, 양상추, 파프리카, 양파를 제외하고 모두 그 기준을 넘고 있다. 주요 식중독균의

표 1. 국내 신선농산물의 위생지표세균 오염도 조사

Fresh Produce	Aerobic Plate Count (log CFU/g)	Coliforms (log CFU/g)	References
Cabbage	2.84 – 7.25	〈1.00 – 3.46	Bae et al., 2011; Kim et al., 2017
Carrot	1.90 – 5.75	〈1.00 – 3.43	Moon et al., 2017; Bae et al., 2011; Kim et al., 2017
Chicory	4.20 – 8.90	2.20 – 7.10	Hong et al., 2012
Chinese cabbage	5.53 – 7.54	〈1.00 – 2.90	Bae et al., 2011; Kim et al., 2017
Crown daisy	4.50 – 8.70	〈1.00 – 6.30	Hong et al., 2012
Cucumber	3.99 – 8.60	〈1.00 – 3.78	Jung et al., 2012; Bae et al., 2011
Dropwort	3.60 – 9.40	〈1.00 – 7.80	Hong et al., 2012; Bae et al., 2011
Green pepper	3.11 – 6.10	1.00 – 5.00	Jo et al., 2011; Moon et al., 2017
Iceberg lettuce	4.20 – 7.30	〈1.00 – 2.60	Bae et al., 2011
Korean leek	4.15 – 7.91	〈1.00 – 5.63	Bae et al., 2011
Lettuce	3.20 – 8.80	0.70 – 7.50	Hong et al., 2012; Jung et al., 2012; Jo et al., 2011; Kim et al., 2017
Mung bean sprout	7.61 – 8.43	〈1.00 – 6.35	Bae et al., 2011
Onion	1.68 – 5.46	〈1.0	Bae et al., 2011
Paprika	1.30 – 8.48	〈1.0 – 2.60	Moon et al., 2017; Bae et al., 2011
Perilla leaf	4.20 – 8.50	0.40 – 7.00	Hong et al., 2012; Jung et al., 2012; Jo et al., 2011; Bae et al., 2011
Romaine lettuce	6.32 – 7.17	0.30 – 5.14	Bae et al., 2011
Soybean sprout	3.04 – 8.13	〈1.00 – 5.38	Bae et al., 2011
Spinach	3.00 – 8.40	〈1.00 – 6.70	Hong et al., 2012
Sprout	6.17 – 8.90	1.87 – 6.19	Jo et al., 2011; Bae et al., 2011
Tomato	4.00 – 7.50	–	Jung et al., 2012

표 2. 국내 신선농산물의 병원성 미생물 오염도 조사

Fresh Produce	*E. coli*		*E. coli* O157:H7		*S. aureus*		*Salmonella* spp.		*L. monocytogenes*		*C. perfringens*		References
	No. of total tested samples	Positive rate, % (No. of positive samples)	No. of total tested samples	Positive rate, % (No. of positive samples)	No. of total tested samples	Positive rate, % (No. of positive samples)	No. of total tested samples	Positive rate, % (No. of positive samples)	No. of total tested samples	Positive rate, % (No. of positive samples)	No. of total tested samples	Positive rate, % (No. of positive samples)	
Chicory	20	10.0 (2)	20	0.00 (0)	20	10.0 (2)	20	0.00 (0)	20	0.00 (0)	20	10.0 (2)	Hong et al., 2012
Chinese cabbage	150	0.00 (0)	155	0.00 (0)	155	0.00 (0)	155	0.00 (0)	155	20.0 (1)	–	–	Bae et al., 2011; Kim et al., 2017
Crown daisy	15	13.3 (2)	15	0.00 (0)	15	6.67 (1)	15	0.00 (0)	15	0.00 (0)	15	0.00 (0)	Hong et al., 2012
Cucumber	–	–	50	0.00 (0)	50	0.00 (0)	55	0.00 (0)	55	3.64 (2)	–	–	Jung et al., 2012; Bae et al., 2011
Dropwort	18	16.7 (3)	18	0.00 (0)	18	16.7 (3)	23	8.70 (2)	18	0.00 (0)	18	22.2 (4)	Hong et al., 2012; Bae et al., 2011
Green pepper	14	0.00 (0)	–	–	14	0.00 (0)	14	0.00 (0)	14	0.00 (0)	–	–	Jo et al., 2011
Iceberg lettuce	–	–	5	0.00 (0)	5	0.00 (0)	5	0.00 (0)	5	20.0 (1)	–	–	Bae et al., 2011
Korean leek	–	–	5	0.00 (0)	5	0.00 (0)	5	20.0 (1)	5	0.00 (0)	–	–	Bae et al., 2011
Lettuce	192	5.21 (10)	242	0.00 (0)	256	3.13 (8)	256	0.94 (1)	256	0.00 (0)	42	11.9 (5)	Hong et al., 2012; Jung et al., 2012; Jo et al., 2011; Kim et al., 2017
Perilla leaf	54	13.0 (7)	95	0.00 (0)	104	3.85 (4)	109	0.00 (0)	104	0.00 (0)	40	7.50 (3)	Hong et al., 2012; Jung et al., 2012; Jo et al., 2011; Bae et al., 2011
Soybean sprout	–	–	5	0.00 (0)	5	0.00 (0)	5	0.00 (0)	5	20.0 (1)	–	–	Bae et al., 2011
Spinach	20	10.0 (2)	20	0.00 (0)	20	0.00 (0)	20	5.00 (1)	20	0.00 (0)	20	20.0 (4)	Hong et al., 2012
Sprout	16	0.00 (0)	–	–	16	6.25 (1)	16	0.00 (0)	16	0.00 (0)	–	–	Jo et al., 2011
Tomato	–	–	50	0.00 (0)	50	0.00 (0)	50	0.00 (0)	–	–	–	–	Hong et al., 2012

오염도를 정리한 결과 *E. coli* O157:H7은 전혀 발견되지 않았으나 *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*는 각각 미나리, 대파, 시금치와 배추, 오이, 양상추, 콩나물에서 확인된 바 있다. *Staphylococcus aureus*와 *Clostridium perfringens*의 경우 상대적으로 위험도가 낮은 식중독균이나 다양한 작물에서 발견되어 역시나 주의가 필요한 것으로 판단된다.

신선농산물은 생산단계에서 일반 토양 미생물 등의 영향으로 높은 오염도를 보일 수 있기 때문에 생산에서 유통까지 철저한 위생관리와 함께 소비 단계에서의 살균소독 시에도 주의가 필요할 것이다.

농업용수에 의한 신선농산물의 오염

농업용수는 농산물의 재배 과정, 또는 수확 후 세척 과정 중에 식물에 직접 살포를 통해서 오염을 발생시키거나 오염된 토양, 작업도구 또는 작업자가 농업용수를 매개체로 오염을 일으킬 수 있기 때문에 농산물의 재배 및 수확 후 가공처리까지 오염 경로는 광범위하게 발생할 수 있으며 농산물의 안전성 확보에서 중요한 역할을 담당한다. 또한 인구 증가와 도시화로 인한 물부족 지역의 증가, 기후변화에 의한 홍수와 가뭄 등의 날씨에 의한 영향 증가, 지하수 감소 등으로 인해 우수나 폐수의 재활용이 결국 용수의 오염도를 증가시킬 수 있어 국내 뿐만 아니라 국제적으로도 재배 과정중에서 수질 오염에 의한 식중독 사고의 가능성을 중요하게 고려하고 있다.

현재까지 국내에서는 농업용수에 대한 미생물학적 수질 기준이 정해져 있지 않으나 호주와 뉴질랜드의 경우 샐러드과 같은 신선편이채소에 대해 〈1 *E. coli*/100 mL, 껍질을 벗겨 섭취하거나 점적관개로 생산하는 농산물에 대해서는 〈100 *E. coli*/100 mL, 비식용작물에 대해서는 〈1,000 *E. coli*/100 mL의 가이드라인을 제시하고 있다. 캐나다는 지역에 따라 다소 차이가 있으나 지표수를 포함한 농업용수에 대해 1,000 total coliforms/100 mL와 〈100 fecal coliforms/100 mL의 기준을, 미국은 지표수에 대해 〈126 *E. coli*/100 mL등의 가이드라인을 제시하고 있으며 수입 농산물의 재배용수에서도 이를 따르도록 요구하고 있다(Steele and Odumeru, 2004; US Environmental Protection Agency, 2003).

농업용수의 종류

농업용수로 사용되는 물의 종류로는 지하수, 지표수, 생활용수, 우수(빗물) 및 폐수이며 품질은 일반적으로 생활용수, 지하수, 우수, 지표수, 폐수 순으로 높다. 폐수의 재활용은 주로 개발도상국에서 이루어지고 있으며 생활용수 또한 비용의 문제로 국내에서 활용도가 낮은편이다. 각 농업용수별 특징에 대해 살펴 보자(표 3).

전 세계적으로 대부분의 관개 용수는 지표수 또는 지하수를 주로 사용한다. 특히 지하수의 오염도는 다른 용수에 비해 상대적으로 낮은 편이며 이는 동물의 배설물 오염과 인접한 환경으로부터 오염을 방지할 수가 있기 때문이다. 지하수는 일반적으로 좋은 수질을 보이나 대수층의 깊이에 따라 영향을 미칠 수 있고 지표수보다 유기물은 적지만 더 많은 무기물을 포함하고 있어서 불쾌한 색과 냄새를 유발할 수 있다. 미생물의 변동성은 적음에도 불구하고 농가 주위에 집중된 분뇨 축적 지역, 분뇨 하수 처리 시설이 폭우와 홍수로 인해서 지하수를 오염시킬 위험성이 있다. 지표수는 연못, 저수지 및 호수, 강, 개울 등 지표로 유입되는 모든 물을 포함한다. 지표수의 특성상 폐수, 빗물 우출, 가축 또는 야생 동물 대변 등의 배출로 인해 지표수가 직접적으로 오염되는 경우가 많고 탁도에 큰 변화를 줄 수 있다. 따라서 일반적으로 미생물 오염도가 지하수에 비해 높으며 배수로를 통한 이동시 오픈된 환경에 의한 외부 오염물질 유입이 용이하며 배수로 바닥면의 침전물, 조류와 부착생물(periphyton) 등에 의한 오염이 발생할 수 있다. 파이프라인에 의한 관개용수 공급시에는 바이오필름 형성 가능성이 높다. 따라서 지표수를 관개 수원으로 사용하는 경우 배수로, 완충 스트립, 저류 시스템 및 배수 시스템을 구축하여 지표수의 오염을 방지 할 수 있다. 홍수로 인해

표 3. 농업 용수의 종류에 따른 특징 비교

양상	생활용수	우수	지하수	지표수
정의	강이나 호수의 물을 인간이 일상생활에 사용할 수 있도록 깨끗하게 만든 물로 상수도를 통해서 전달	강수로부터 모아진 물 (비, 눈)	지표면 아래의 다공성 암석, 얕은 우물 또는 깊은 대수층에 존재하는 물	강/운하/호수/개방 우물 등 환경에 노출된 원천의 물
오염원	수도관, 물탱크	유역 지역의 먼지, 유기물, 나뭇잎, 새와 동물의 배설물	정화조 시스템 고장, 토양과 균열을 통과하거나 지표수와의 상호작용을 통해 누수된 하수관과 토지의 방류	처리 된 폐수, 미처리 하수 배출, 도시 폐수, 우수 유출, 도시 및 농업 지역의 유출, 인간과 동물은 직 · 간접적인 오염의 원인이 된다.
날씨 영향	날씨의 영향을 받지 않는다.	빗물에 오염된 미생물은 지역 환경 조건과 풍속/풍향에 따라 달라진다. 가뭄 이후의 강우는 우수저류조 내 미생물이 더 많이 존재하게 된다. 홍수시 대부분의 오염물질이 저장소로 운반된다.	폭우가 유량 체계의 방향을 바꿔면서 일반적이지 않은 채널을 통한 흐름으로 오염이 될 수 있다.	폭풍, 조수 또는 강풍은 퇴적물 재부유를 유발하고 미생물도 다시 부유하여 높은 미생물 오염을 초래한다. 하수 범람 및 표면 유출을 통한 폭우 또는 폭풍으로 인해 지표수의 유기체 수가 증가할 수 있다.

출처: Uyttendaele et al. (2015)

발생할 수 있는 범람지점도 대비할 수 있어야 한다. 우수(빗물)은 상대적으로 좋은 미생물 수질을 가지고 있으나 오랜 기간동안 고인 물이나 오랜 가뭄 직후에는 새, 곤충 및 동물 배설물이 존재하기 때문에 병원성 미생물에 오염될 수 있다. 폐수는 일반적으로 물리화학적 · 미생물학적 품질이 매우 낮기 때문에 처리되지 않은 폐수를 사용하는 것은 심각한 건강 위험을 초래할 수 있다. 따라서 국내에서 이용하고 있지 않으나 만약 폐수를 이용할 경우 농가에 사용하기 전에 집중적인 처리가 필요할 것이다. 해수는 다른 지표수와 마찬가지로 산업 및 도시 폐기물 배출과 강 또는 하천 유출의 영향을 받으며 광범위한 인간 장내 병원균을 포함할 수 있다. 밀, 보리 등 내염성 높은 작물은 희석된 바닷물로 관개할 수 있다. 해수는 농업에 사용하기 전에 열 공정 또는 역삼투를 통해 탈염을 진행해야 하며 이 과정에서 미생물을 상당히 감소시킬 수 있다.

농업용수에 의한 오염경로

병원성 미생물은 농산물의 재배과정 중 농업용수 또는 토양을 통해 오염되면 병원성 미생물별로 생존 특성에 따라 부착, 생존, 증식이 이루어질 수 있다. 각 농산물의 내재적 요인에 의해, 기후나 환경적 요인에 의해, 그리고 생산, 가공, 유통 또는 조리 과정중에 발생할 수 있는 다양한 외적 요인에 의해 생존하여 소비자에게 전달될 수 있다. 이와 같이 복합적인 요소와 단계를 통해 오염이 발생하나 초기의 생산단계에서의 오염은 상대적으로 과소평가된 부분이 있어 좀 더 집중적으로 살펴보고자 한다. 일반적으로 관개용수의 경우 유기물 함량이 낮고 미생물 오염도가 매우 낮은 편이기 때문에 관개용수에 의한 오염은 간과하는 경향이 있으나 오히려 병원성 미생물의 경우 오염되면 관개용수의 수온이 낮아짐에 따라 생존률이 증가할 수 있다. *Campylobacter* spp.의 경우 지하수에 25℃에서 5일 뒤 검출한계 이하로 감소하였으나 4℃에서는 70일까지 살아남았으며, *E. coli* O157:H7의 경우 지하수 25℃에서 8주간 생존하였으나 8℃에서는 13주까지 생존하였다(Gonzalez and Hanninen, 2012; Wang and Doyle, 1998). 병원성 미생물의 식물 내 침투는 오염된 용수의 공급이 토양을 통해서 이루어지는 방법보다 스프링쿨링 시

표 4. 다양한 관개 방법의 장단점 비교

	수로/고랑 관개	스프링클러/두상관수	점적관개/지하관개
정의	– 논밭 주변에 고랑을 만들어 옆에서 물이 스며들게 하여 수분을 공급하는 방법으로서 밀, 보리, 채소류 등의 두둑재배 작물이나 줄뿌림 작물의 관개에 이용	– 물에 높은 압력을 걸어 노즐에서 물보라처럼 작물에 분사하는 장치	– 개거법: 개방된 토수로에 투수해 모관상을 통해 근권에 공급되게 하는 방법 – 암거법: 지하에 토관 등을 배치해 통수하고 간극으로부터 스며오르게 하는 방법 – 암임법: 뿌리가 깊은 과수 주변에 구멍을 뚫고 물을 주입하거나 기계적으로 암입하는 방법
장점	– 낮은 자본 비용	– 다양한 경사면, 토양 및 작물에 적합 – 물을 고르게 뿌려주고 낭비하는 것을 방지	– 물증발 감소로 물 절약가능 – 식물에 도달하는 물의 양과 영양분의 정확한 제어가 가능
단점	– 물의 불균일한 침투 – 일부 경사면 및 토양에 적합하지 않음	– 높은 초기 비용 – 표면 관개에 비해 높은 운영 비용 – 펌프를 사용하기 위한 에너지가 요구됨	– 불순물로 인해 관개 구멍이 막힐 수 있음
위험수준	낮음	높음	낮음

출처: Uyttendaele et al. (2015)

스템에 적용시킬 경우 침투 가능성이 높아질 수 있다(표 4). 특히 수확전 관개용수의 질에 따라 최종 오염도에 미치는 영향이 클 수 있기 때문에 수확전 일정기간동안 용수의 공급이 이루어지지 않는 것이 좋다. 실제로 상추에 오염된 관개용수 공급 24시간 후 *E. coli*의 유의적인 감소가 확인되었다(Decol et al., 2017).

오염된 관개용수가 농산물을 오염시킬 수 있으나 상대적으로 낮은 잎의 표면 상대습도와 부착이 어려운 잎의 표면적 특성, 잎 토착미생물(phyllosphere microbiome), 직사광선, 바람에 의한 표면 건조 등에 의해 병원성 미생물의 생존이 어려울 수 있다. 그러나 병원성 미생물은 잎 표면의 다른 미생물들과 복합 생물막을 형성하여 생존이 가능하며 관개용수를 통한 병원성 미생물의 뿌리 유입, 잎의 상처나 기공을 통한 유입이 가능하다. 관개용수나 비료를 통해 오염된 병원성 미생물은 양상추에서 1일에서 2개월까지 생존이 가능하며 토양에서는 7개월까지도 생존 가능하다. 이러한 병원균의 생존은 멍, 구멍과 같은 잎의 상처나 식물병원균에 의한 잎의 표피장벽의 파괴로 잎 내부에 침투하여 생존 및 증식이 용이해질 수 있다. 그러나 이는 채소의 종류, 재배 조건이나 재배 환경, 기후 영향에 따라 매우 다른 영향을 끼칠 수 있기 때문에 모든 채소와 농경지에 적용하기 어려울 수 있다.

Machado-Moreira 등 (2019)은 1980년부터 2016년까지 신선과채류 관련 식중독 사고 517건을 분석하였으며 그 결과 엽채류에 의한 사고(51.7%, 295건)가 가장 많이 발생하고, 새싹 채소에 의한 사망 사고(31.8%, 사망자 173명 중 58명)가 많이 발생한 것으로 보고하였다. 이 결과를 바탕으로 위험성이 높은 농산물의 종류별 농업용수에 의한 병원성 미생물의 오염경로를 살펴보자. 엽채류의 경우 특히 샐러드에 의한 식중독 사고가 많으며 엽채류의 특성상 잎의 표면이 대체로 거칠어 오염원이 쉽게 부착할 수 있고 넓은 표면적에 의한 노출 가능성이 높다. 주요 오염원인으로는 관개용수가 오염된 비료와 토양에 직 • 간접적으로 오염되어 살수, 세척, 또는 물이 튀는 과정에서 엽채류의 잎에 잔류하거나 노출되어 발생할 수 있다. 기후요인 중 홍수는 특히 관개용수 또는 엽채류에 오염된 오염

원의 전파를 더욱 용이하게 할 수 있다. 수확 후 샐러드를 포장하는 단계에서도 세척수에 의한 오염이 발생할 수 있다. 새싹채소의 경우 오염된 씨앗이 주요 오염원으로 보고되고 있다. 특히 발아 조건이 온도 18~25℃와 높은 수분 활성도로 인해 미생물의 증식에 최적화된 조건을 형성하며 이 과정에서 미생물은 발아새싹 내부에 침투하여 더욱 안정적으로 증식이 가능하다 (Machado-Moreira et al. 2019). 오염된 비료를 사용할 경우 그 위험성은 높아질 수 있으며 일반적인 새싹채소의 재배 조건은 주로 수경재배로 이루어지는 경우가 많아 오염된 관개용수에 의한 교차오염의 위험성이 더욱 높아질 수 있다. 뿌리채소류의 경우 비료, 토양과 관개용수에 직접적으로 노출되어 있기 때문에 주의가 필요하다.

농업용수에 의한 신선농산물의 주요 오염원인균

신선농산물에 오염이 보고된 병원성 미생물은 norovirus, hepatitis A virus, pathogenic *E. coli*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp. *Campylobacter* spp., *Listeria monocytogenes*, *Cyclospora cayetanensis*, *Cryptosporidium* 등이 있다. 관련 병원성 미생물에 대한 정보는 많이 알려져 있으므로 본 논단에서는 농업용수에 의해 병원성 미생물이 오염된 사례와 연구를 중심으로 오염 경로를 간단히 살펴보고자 한다.

Norovirus (NoV)에 의한 신선농산물 식중독 사고가 가장 많이 보고되었으며 분변-경구 감염의 주요 오염원이다. NoV는 지하수에서 분리된 사례가 종종 보고되는데 특히 작은 크기로 인해(27-35 nm) 토양에 의한 정화작용이나, 필터 등의 처리과정에서 제거되지 않고 지하수, 지표수, 수돗물 등에서 5주까지 생존 가능하다(Fallahi, and Mattison, 2011). 신선농산물을 저온보관시 90일, 상온보관시 10일까지 생존할 수 있으며 상추에 바이러스의 내재화(internalization) 또한 확인되어 특별한 주의가 필요하다(Hirneisen and Kniel, 2013). Hepatitis A (HAV)는 엽채류와 베리류에 90일, 토양에 30일까지 생존 가능한 것으로 확인되었으며 특히 무른 과일류를 통한 식중독에 주의해야 한다. 또한 HAV는 신선농산물의 가공 또는 조리과정중 오염이 쉽게 발생할 수 있다.

E. coli O157:H7은 인간과 동물의 위장관에 흔히 서식하는 *E. coli* 균주 중에서도 가장 강한 독성을 나타내며, 위장질환을 유발하는 Shiga 독소 생산자로 용혈성 요독증후군을 유발과 비뇨기 및 신경계에 질병을 일으킬 수 있다. *E. coli* O157:H7는 가축분뇨에서 최대 21개월 동안 생존 가능하며, 오염된 토양이나 비료가 비 또는 관개용수를 매개체로 교차오염을 유발하여 신선농산물이 오염될 수 있다(Franz et al., 2005). 특히 오염된 관개용수는 토마토, 새싹채소 및 상추와 같은 ready-to-eat (RTE) 식품의 식용부분에 *E. coli* O157:H7의 내재화(internalization)가 가능하다는 사실이 보고된 바 있다 (Murphy et al. 2016). 내재화된 병원균은 최종소비단계까지 제거되기 어렵기 때문에 심각한 건강 위협을 초래할 수 있다.

*Salmonella*는 2,700개 이상의 혈청형으로 구성되며, 그 중 200개가 인간 질병과 관련이 있다. 대표적으로 *S.* Typhimurium과 *S.* Enteriditis가 있으며, 환경에 널리 분포하여 배설물이나 배설물에 오염된 토양에서 최대 405일 생존하는 것으로 보고된 바 있다(You et al. 2006). *E. coli*와 유사하게 RTE 식품에 내재화 가능성이 있으며 보고된 살모넬라 사례 중 대부분이 오염된 종자로 인한 새싹채소에서 발생하였다 (Carstens et al. 2019).

*Campylobacter*의 경우 일반적인 식중독 증상 이외에도 Guillain-Barre 신드롬 또는 Miller Fisher 신드롬 등의 2차 감염이 발생할 수 있으며 주로 가금류를 포함한 육류에 의한 식중독 사고가 발생할 수 있다. 따라서 *Campylobacter*에 의한 신선농산물 식중독 사고는 조리나 가공 과정 중 교차오염에 의한 발생이 주로 보고되고 있다 (Machado-Moreira et al. 2019). 그러나 *Campylobacter*는 시금치의 저온저장(4, 12℃)시 7일까지 생존할 수 있으므로 주의가 필요하다(Guévremont, et

표 5. 농업용수에 의한 국외 식중독 사례

Causative agent	Year	Country	Human cases/ deaths	Implicated food	Source of contamination
Salmonella Newport	2020	USA	1,127 cases	Red onion	Irrigation water in a farm in California
		Canada	515 cases	Red onion	
Salmonella Muenchen	2016	USA	26 cases	Sprout	Irrigation water
Salmonella Montevideo	2018	USA	10 cases	Sprout	Irrigation water
Salmonella Saintpaul	2008	USA	1,500 cases	Jalapeno and Serrano peppers	Agricultural water
Salmonella enterica	1999–2000	Brazil	26 cases	Mango	Untreated water for final washing
E. coli O157:H7	2018	USA	210 cases/ 5 deaths	Romaine lettuce	Irrigation water
E. coli O157:H7	2006	USA	205 cases/ 3 deaths	Spinach	Agricultural surface water contaminated with cattle feces and wild pig feces
E. coli O157	2005	Sweden	135 cases	Iceberg lettuce	Irrigation water from a small stream and a cattle farm located upstream from the irrigation point
Listeria monocytogenes	2014	USA	5 cases/ 2 deaths	Mung bean sprout	Irrigation water
Cyclospora cayetanensis	2020	USA	701 cases	Salad	Canal contamination to supply irrigation water
Cyclospora cayetanensis	2000	Germany	34 cases	Fresh green leafy herbs	Fertilization with human waste or fecal contaminated water
Cryptosporidium parvum	1995	USA	31 cases	Apple cider	Final apple washing with contaminated water

출처: Uyttendaele et al. (2015), Carstens, et al. (2019), 미국 CDC (2021)

al. 2015).

*Listeria monocytogenes*는 30%의 치사율을 가지는 치명적인 병원균으로, 지상, 담수, 해수의 광범위한 환경에 존재하여 농 · 축 · 수산 식품 등 다양한 경로로 식중독을 일으킬 수 있다. 오염된 동물 사료나 퇴비, 관개용수 등으로 인해 오염될 수 있다. 또한 상대적으로 낮은 수분활성도와 냉장 조건에서도 성장하고 번식할수 있다. 2011년 미국에서 오염된 멜론으로 147건의 감염자과 33건의 사망자가 발생하였다 (Carstens et al. 2019).

*Cyclospora*와 *Cryptosporidium*은 대표적인 원충동물로 숙주 밖에서 오랜 시간동안 생존이 가능하여 물을 매개로 한 식중독을 일으킬 위험성이 크다. 특히 폐수처리 시설에 살아남아 저항성이 높으며 분변 오염 폐수에 의한 식물의 오염으로 인해 라즈베리에 의한 오염 사례들은 *Cyclospora* 식중독 사고의 53.8%를 차지하며, 샐러드는 *Cryptosporidium*에 의한 식중독 사고의 41.3%를 차지한 것으로 확인되었다 (Machado-Moreira et al, 2019).

농업용수에 의한 신선농산물 국외 식중독 사례

국내의 사례들은 주로 유통되는 농산물들을 분석한 것으로 생산단계에서의 오염을 확인하기 어렵고 그 위험도와 경로를 추정하는데 있어 한계가 있으므로 신선농산물 또는 신선편이농산물 관련 국외 식중독 사례 중 농업용

수에 의한 것으로 확인된 사례들을 정리하였다(표 5). 오염된 관개용수 또는 세척수에 의한 식중독 사고는 주로 *Salmonella* 또는 *E. coli* O157:H7에 의한 식중독 사고가 보고되었다. 최근에 알려진 사례로는 2020년 미국과 캐나다에서 1,600여명의 환자를 발생시킨 적양파에 의한 대형식중독 사고로 캘리포니아에 위치한 농장의 관개용수에서 원인균과 동일한 균이 발견되었다. 또다른 2020년 대형 식중독 사고는 *Cyclospora cayetanensis*에 의한 것으로 수로에서 원인 원충과 동일한 원충이 발견된 것으로 보아 이 수로를 통해 이동한 관개용수가 샐러드의 재료 중 일부에 오염된 것으로 추정하고 있다. *E. coli* O157:H7에 의해 발생한 식중독의 경우 농장 주변에 가축 또는 야생동물의 분변이 지표수 포함 관개용수를 매개체로 병원균 전파가 된 것으로 확인되었다 (CDC, 2021). 이러한 사례들을 통해 생산단계에서의 오염이 식중독 사고로 이어질 수 있음을 확인할 수 있다.

결론

신선농산물은 재배 과정 중 원재료, 재배지 환경, 기후, 작업자, 작업도구 등 복합적인 요인에 의해 오염이 발생할 수 있으며 유통기한이 짧아 식중독 사고 발생시 이미 폐기되어 추척관리를 하는데 한계가 있다. 특히 재활용 폐수를 관개용수로 사용하는 지역에서의 신선농산물에 의한 식중독 사고가 증가하고 있으나 이는 주로 국외에서 보고되고 있으며 우리나라의 경우 지하수가 농업용수의 큰 비중을 차지하고 있기 때문에 상대적으로 신선농산물에 대한 식중독 위험성이 낮은 편이다. 그러나 일부 지역의 경우 점점 지하수의 염분 농도 증가로 인해 하천수 등의 지표수 사용량이 증가하고 있어 꾸준한 모니터링이 필요하나 아직까지 국내에서는 이와 관련된 연구가 부족한 실정이다. 외국의 경우 농업용수에 대한 미생물학적 기준을 적용하여 관리하고 있어 우리나라에서도 꾸준한 모니터링을 기반한 미생물학적 안전관리 기준을 도입할 필요가 있다. 나아가 농업용수 이외에도 토양과 비료, 작업도구와 작업자의 위생관리를 통해 교차오염을 예방하고 재배 과정중 오염될 경우 이를 제어할 수 있는 저감화 기술 개발연구 또한 필요할 것이다. 이를 통해 조리를 최소화하여 섭취하는 신선농산물에 대해 소비자들이 안심하고 소비할 수 있는 기반이 조성될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 농촌진흥청 연구개발비(PJ015737022021)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Alegbeleye, O.O., Singleton, I., Sant'Ana, A.S. (2018). Sources and contamination routes of microbial pathogens to fresh produce druing field cultivation: A review. Food Microbiology, 73, 177-208.

2. Bae, Y.M., Hong, Y.J., Kang, D.H., Heu, S.G., Lee, S.Y. (2011). Microbial and pathogenic contamination of ready-to-eat fresh vegetables in Korea. Korean Journal of Food Science and Technology. 43(2), 161-168.

3. Carstens, C.K., Salazar, J.K., Darkoh, C. (2019). Multistate outbreaks of foodborne illness in the United States associated with fresh produce farm 2010 to 2017. Frontiers in Microbiology. 10, 2667.

4. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2021). Multistate outbreaks. https://www.cdc.gov/foodsafety/outbreaks/multistate-outbreaks/index.html

5. Decol, L.T., Casarin, L.S., Hessel, C.T., Batista, A.C.F., Allende, A., Tondo, E.C. (2017). Microbial quality of irrigation water used in leafy green production in Southern Brazil and its relationship with produce safety. Food Microbiology. 65, 105-113.

6. Fallahi, S., Mattison, K. (2011). Evaluation of murine norovirus persistence in environments relevant to food production and processing. Journal of Food Protection, 74(11), 1847-1851.

7. Franz, E., van Diepeningen, A.D., de Vos, O.J., van Bruggen, A.H.C. (2005). Effects of cattle feeding regimen and soil management type on the fate of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* Serovar Typhimurium in manure, manure-amended soil, and lettuce. Applied and Environmental Microbiology, 71(10), 6165-6174.

8. González, M., Hänninen, M.L. (2012). Effect of temperature and antimicrobial resistance on survival of *Campylobacter jejuni* in well water: application of the Weibull model. Journal of Applied Microbiology 113:84-293.

9. Guévremont, E., Lamoureux, L., Ward, P., Villeneuve, S. (2015). Survival of *Campylobacter jejuni* on fresh spinach stored at 4℃ or 12℃. Food Control, 50, 736-739.

10. Hirneisen, K.A., Kniel, K.E. (2013). Comperative uptake of enteric viruses into spinach and green onions. Food and Environmental Virology, 5(1), 24-34.

11. Hong, C.K., Seo, Y.H., Choi, C.M., Hwang, I.S., Kim, M.S. (2012). Microbial quality of fresh vegetables and fruits in Seoul, Korea. Journal of Food Hygiene and Safety. 27(1), 24-29.

12. Jo, M.J., Jeong, A.R., Kim, H.J., Lee, N., Oh, S.W., Kim, Y.J., Chun, H.S., Koo, M. (2011). Microbiological quality of fresh-cut produce and organic vegetables. Korean Journal of Food Science and Technology. 43(1), 91-97.

13. Jung, K.S., Roh, E.J., Ryu, K.Y., Kim, W.I., Park, K.H., Lee, D.H., Kim, K.H., Yun, J.C., Heu, S.G. (2012). Monitoring of pathogenic bacteria in organic vegetables from Korean market. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer. 45(4), 560-564.

14. Kim, W.I., Gwak, M.G., Jo, A.R., Ryu, S.D., Kim, S.R., Ryt, S.H., Kim, H.Y., Ryu, J.G. (2017). Investigation of microbiological safety of on-farm produce in Korea. Journal of Food Hygiene and Safety. 32(1), 20-26.

15. Machado-Moreira, B., Richards, K., Brennan, F., Abram, F., Burgess, C.M. (2019). Microbial contamination of fresh produce: What, where, and how? Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 18, 1727-1750.

16. Moon, B.G., Song, B.S., Park, J.H., Kim, J.K., Park, H.Y., Kim, D.H., Son, E.J., Im, D.S., Eun, J.B. (2017). Microbiological, physicochemical, and organoleptic evaluation of fresh-cut vegetables irradiated using X-rays. Korean Journal of Food Preservation. 24(1), 27-35.

17. Murphy, S., Gaffney, M.T., Fanning, S., Burgess, C.M. (2016). Potential for transfer of *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* Senftenberg from contaminated food waste derived compost and anaerobic digestate liquid to lettuce plants. Food Microbiology, 59, 7-13.

18. Solberg, M., Buchalew, J.J., Chen, C.M., Schaffner, D.W., O'Neill, K., McDowell, J., Post, L.S., Boderck, M. (1990). Microbial safety assurance system for foodservice facilities. Food Technology, 44: 68-72.

19. Steele, M., Odumeru, J. (2004). Irrigation water as source of foodborne pathogens on fruit and vegetables. Journal of Food Protection. 67, 2839-49.

20. US Environmental Protection Agency. (2003). Bacterial water quality standards for recreational waters (freshwater and marine waters). Available from: http://water.epa.gov/type/oceb/beaches/upload/2003_06_19_beaches_local_statrept.pdf.

21. Uyttendaele, M., Jaykus, L.A., Amoah, P., Chiodini, A., Cunliffe, D., Jacxsens, L., Holvoet, K., Korsten, L., Lau, M., McClure, P., Medema, G., Sampers, I., Jasti, P.R. (2015). Microbial hazards in irrigation water: Standards, norms, and testing to manage use of water in fresh produce primary production. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 14 336-356.

22. Wang, G., Doyle, M.P. (1998). Survival of enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157:H7 in water. Journal of Food Protection 61:662-7.

23. World Health Organization. (2008). Microbiological risk assessment series. Microbiological hazards in fresh fruits and vegetables. Available from:http://www.who.int/foodsafety/publications/micro/MRA_FruitVeges.pdf.

24. You, Y.W., Rankin, S.C., Aceto, H.W., Benson, C.E., Toth, J.D., Dou, Z.X. (2006). Survival of *Salmonella enterica* serovar Newport in manure and manure-amended soils. Applied and Environmental Microbiology, 72(9), 5777-5783.