

Review

## 버섯의 미생물 위해성 및 저감화 처리기술 개발 현황

송현지 · 한아름 · 맹경호 · 장아라 · 김지연 · 이선영\*

중앙대학교 생명공학대학 식품영양학과

### Microbial Hazards and Microbe Reduction Technologies for Mushrooms

Hyunji Song, Areum Han, Boyang Meng, A-Ra Jang, Ji-Yeon Kim, Sun-Young Lee\*

Department of Food and Nutrition, Chung-Ang University, Anseong, Korea

(Received June 8, 2023/Revised September 6, 2023/Accepted September 18, 2023)

**ABSTRACT** - Mushroom consumption is gradually growing annually worldwide for many centuries. Oyster mushrooms (*Pleurotus ostreatus*), button mushrooms (*Agaricus bisporus*), and enokitake (*Flammulina filiformis*) are mainly consumed in Korea. However, mushrooms can be contaminated with pathogenic microorganisms, such as *Listeria monocytogenes*, because antibacterial treatment during mushroom cultivation and processing is insufficient. Therefore, many cases of mushroom contamination-related foodborne illnesses and food recalls have been reported. Three representative treatments are used to prevent microbial contamination in mushrooms: chemical, physical, and combination treatments. Among the chemical treatments, chlorine compounds, peroxyacetic acid, and quaternary ammonium compounds are commercially used and ozone and electrolyzed water has recently been used. Additionally, physical treatments, including ultrasound, irradiation, and cold plasma, are being developed. Combination techniques include ultraviolet/chlorine compounds, ozone/organic acid, and ultrasound/organic acid. This review describes the domestically consumed mushroom types and their characteristics, and investigates the mushroom contamination levels. Additionally, effective antibacterial technologies for reducing microbial contamination in mushrooms are also discussed.

**Key words:** Mushroom, Microbiological hazards, Safety, Decontamination

식용 버섯은 맛과 영양가 때문에 전 세계적으로 소비되고 있으며, 중요한 영양소와 생물 활성 성분인 탄수화물, 단백질, 비타민, 미네랄, 불포화 지방산 및 섬유를 제공한다<sup>1,2)</sup>. 또한, 다수의 선행 연구에서 버섯의 생리활성 기능에 대한 면역력 향상 효과<sup>3)</sup>, 혈당 감소 효과<sup>4)</sup>, 혈압 저하 효과<sup>5)</sup>, 콜레스테롤과 혈중지질 감소 효과<sup>6)</sup>, 항산화 효과와 항 비만 효과 등이 검증되었다. 식량 농업 기구(Food and Agriculture Organization, FAO)에 의하면 2018년 전 세계 버섯 소비량은 약 4,000만 톤으로 추정되며<sup>7)</sup>, 2020년 전 세계 버섯의 생산가치는 약 58조로, 전년 대비 8.2%, 5년간 연평균 1.2% 증가한 것으로 보고되었다<sup>8)</sup>. 따라서 버섯 재배기술에 대한 투자 증가와 버섯을 동물성 단백질 대체

식품으로 이용하고자 하는 소비자가 증가함에 따라 생산량이 증가할 것으로 예상된다.

버섯은 최소한의 가공과정을 거쳐 생산되기 때문에 섭취 전 이물질, 식품 원인성 병원균 등 식중독을 유발하는 원인을 제거하기 위한 과정이 필요하다<sup>9)</sup>. 하지만 소비자들은 가열, 세척 등의 과정을 거치지 않고 섭취하기도 하며, 수도물 세척만으로는 병원균이 충분히 제거되지 않을 수 있어 식중독 발생 위험이 존재한다<sup>10)</sup>. 그중 팽이버섯에 존재하여 리스테리아증(listeriosis)을 일으키는 *Listeria monocytogenes*는 주요 식품 원인성 병원균으로 유제품, 육제품, 해산물, 신선 채소와 즉석식품 등 다양한 식품에서 식중독 원인균으로 존재하며, 저온의 냉장 보관에서도 생존 및 증식을 할 수 있다. 또한, 식품의 가공 공정 및 보관 과정에서 *L. monocytogenes*의 교차 오염이 발생하기 쉬운 것으로 보고되었다<sup>11)</sup>. 특히 최근 3년 동안 버섯에서의 리스테리아증에 의한 식중독이 발생하였고, *L. monocytogenes*을 비롯한 미생물 오염으로 인한 버섯의 리콜 사례가 다수 보고되었다. 2020년 3월 미국에서 *L. monocytogenes*에 오염된 팽이버섯으로 인해 36명이 입원했고 4명이 사망하

\*Correspondence to: Sun-Young Lee, Department of Food and Nutrition, Chung-Ang University, Anseong 17546, Korea  
Tel: +82-31-670-4587, Fax: +82-31-676-8741  
E-mail: nina6026@cau.ac.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.

였으며<sup>12)</sup>, 2020년 3월과 4월에는 미국 내 한국산 팽이버섯 수출업체 3곳이 미국 식품의약청(U.S. Food and Drug Administration, FDA)으로 부터 리콜 명령을 조치 받았다<sup>13)</sup>. 또한, 2020년 미국에서 *Salmonella*에 오염된 중국산 건목이버섯으로 인해 12개 주에서 55명이 감염되고 6명이 입원하여 리콜 명령 조치를 받은 사례가 있다<sup>14)</sup>. 이에 따라 미국 등에서는 식품 원인성 질환의 잠재적 위험을 최소화하기 위해 여러 식품안전 기준과 정책을 발표하였다<sup>7)</sup>. 그러나 한국의 경우 버섯에 대한 구체적인 법규와 기준이 마련되어 있지 않아 안전한 생산을 위한 체계가 미흡한 실정이며, 특히 버섯이 일반 농업 가공품과 즉석식품으로 분류되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 유통되는 다소비 버섯의 종류 및 특징, 관련 식중독 사례와 오염 현황을 살펴보고, 버섯에서의 미생물 저감화를 위한 기술에 대하여 리뷰하고자 한다.

### 버섯의 종류 및 특징

우리나라는 버섯을 농산버섯과 임산버섯으로 구분하며, 농산버섯은 주로 농부산물 배지를 이용하여 재배하는 버섯으로 느타리, 양송이, 새송이, 팽이버섯 등이 있다. 임산버섯은 산림에서 채취하는 자연산 버섯과 원목을 배지로 이용하는 버섯을 말하며, 송이, 표고, 목이, 싸리 등이 있다<sup>15)</sup>. 시중에 유통되고 있는 대표적인 버섯으로는 느타리버섯, 팽이버섯, 양송이버섯, 새송이버섯, 표고버섯이 있으며, 느타리버섯(*Pleurotus ostreatus*)은 국내에서 가장 많이 재배되고 있는 버섯으로, 굴 모양으로 생긴 갓을 가진 것이 특징이며 흰색부터 회색, 또는 짙은 갈색을 띤다. 팽나무 고목에서 자라는 팽이버섯(*Flammulina velutipes*)은 반구형의 점성이 강한 황갈색 또는 노란색의 갓을 가지고 다발로 재배되는 특징이 있으며, 양송이버섯(*Agaricus bisporus*)은 성장 초기에는 반구형 또는 구형의 모양이나 점차 백색의 편평형 모양으로 변화하는 특징을 가진다. 새송이버섯으로 알려져 있는 큰 느타리(*Pleurotus eryngii*)는 일반 느타리버섯과 비교하여 대가 길고 굵으며, 초기에는 적갈색(maroon) 또는 회갈색(grayish brown)을 나타내지만 갓이 성숙할수록 담회갈색(light brown)을 나타낸다. 표고버섯(*Lentinula edodes*)은 담자균류 주름버섯목 느타리과에 속하는 버섯으로 갓은 어두운 흑갈색을 나타내며 건조하

여 저장 시 표고버섯의 특유의 향이 생기고, 그 향과 맛이 좋아 생으로 식용하거나 말려서 천연조미료로도 사용된다. 야생에서는 서어나무, 혹은 그 주변에서 자생하고 재배가 쉽다는 특징을 갖는다.

버섯은 눈으로 식별할 수 있는 자실체를 생성하는 균류로써 영양기관인 균사체와 번식기관인 자실체로 구성되어 있다<sup>16)</sup>. 자실체는 버섯갓(pileus)과 버섯대(stipe)로 구성되어 있으며, 버섯 갓은 포자 병(sporophore) 및 주름살(gills)로 구성된다<sup>17)</sup>. 채소와 달리 엽록소가 없어 영양소를 합성하지 못하기 때문에 다른 식물이나 동물에 의존해 유기물을 섭취하는 형태의 영양대사를 한다. 버섯의 재배 공정은 버섯의 성장 기질 생산, 버섯 껍데기 생산, 버섯의 성장 등 세 단계를 포함한다. 첫 번째 단계는 내열·내압 용기에 분노와 쥘 등을 섞은 톱밥 및 버섯 생산에 필요한 혼합배지 등을 주입하여 버섯의 성장 기질을 준비하는 과정을 말하며, 이 단계에서 미생물의 호기성 소화가 시작된다<sup>18)</sup>. 두 번째 단계는 버섯의 껍데기를 생산하는 과정으로 준비된 기질에 버섯 종균(접종원)을 접종하는 과정을 의미한다<sup>19,20)</sup>. 이 과정에서 팽이버섯과 새송이버섯 등의 일부 버섯은 자실체를 만드는 발이 기간과 균일한 생육을 위한 자실체 생육 지연 단계인 발이 억제 기간을 필요로 한다. 또한 팽이버섯의 경우 갓의 크기를 제어하기 위한 고갈작업을 거친다. 세 번째 단계는 버섯의 생육과정으로 버섯의 생육을 위해 온도, 습도와 이산화탄소의 함량 등의 환경을 조절하는 단계를 말하며 이 과정에서 버섯을 발육 시킨 후 수확과 포장 과정이 진행된다<sup>21)</sup>.

### 버섯의 국내 생산현황

2020년 한국 재배버섯의 총 생산량은 144,393톤으로 느타리버섯(45,724톤)이 가장 많이 생산되고 있으며, 다음으로 팽이버섯(26,128톤)과 양송이버섯(20,493톤) 등의 순으로 생산되고 있다(Table 1). 농식품수출정보에 의하면 주요 수출버섯인 새송이버섯은 국내 버섯 생산 면적의 19.1%, 생산량의 32.9%를 차지하고 있으며, 팽이버섯은 생산 면적의 6.4%, 생산량의 18.0%를 차지하고 있다. 새송이버섯의 수출량은 59.5%로 전년대비 2.5% 증가하였지만, 팽이버섯의 수출량은 *L. monocytogenes*의 발생에 의한 안전성의 문제로 주요 수출국인 미국과 캐나다에서 각각 35.1%, 45.6%

**Table 1.** Total agricultural mushroom production in Korea (Unit: ton)

Year	<i>Agaricus bisporus</i>	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<i>Ganoderma iucidum</i>	<i>Flammulina velutipes</i>	Others	Total
2020	20,493	45,724	80	26,128	55,008	144,393
2019	21,913	48,327	78	31,818	50,717	152,853
2018	11,348	39,497	79	28,532	56,142	135,598
2017	10,638	53,532	97	28,535	57,088	149,890

Adapted from the ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs statistics (2021).

**Table 2.** Total forest mushroom production in Korea (Unit: kg)

Year	<i>Lentinula edodes</i>	<i>Tricholoma matsutake</i>	<i>Auricularia heimuer</i>	<i>Sarcodon imbricatus</i>	<i>Sparassis crispa</i>	<i>Wolfiporia extensa</i>	Other	Total
2021	17,386,026	170,353	412,098	9,940	1,861	21,045	257,356	18,562,051
2020	18,468,030	116,820	486,749	9,872	3,941	29,007	575,728	19,371,807

Adapted from survey for forest produce production (2021).

감소하였다<sup>8)</sup>. 2021년 임산버섯의 생산량은 18,562,051 kg으로 표고버섯(17,386,026 kg)이 가장 많이 생산되었고, 그 다음으로는 목이버섯(412,098 kg), 송이버섯(170,353 kg), 북령버섯(21,045 kg), 능이버섯(9,940 kg), 꽃송이버섯(1,861 kg) 등이 많이 생산된 것으로 나타났다(Table 2). 기존 임산버섯류인 표고버섯과 송이버섯 외에 목이버섯, 능이버섯, 꽃송이버섯, 북령버섯은 건강기능성 식품원료로의 활용성이 높고, 특히 목이버섯은 고함량 식이섬유를 포함하고 있어 체중조절을 위한 소재로 주목받고 있다<sup>16,22)</sup>.

### 버섯 관련 식중독 및 리콜 사례

버섯을 포함한 신선 농산물에 의한 식중독의 주요 원인 병원성 세균은 *L. monocytogenes*, *Escherichia coli*, *Salmonella* 등이 있다. 국내에서는 버섯을 주로 가열하여 섭취하기 때문에 버섯으로 인한 식중독 사례가 거의 발생하지 않았으나, 외국에서는 버섯을 샐러드에 이용하는 등 가열조리 없이 섭취하는 경우가 있어 버섯의 미생물 오염으로 인한

식중독 사례가 보고된 바 있다. 최근 몇 년간 오염된 버섯에 의한 식중독의 주요 원인균은 *L. monocytogenes*로 확인되었다. 2016-2020년 한국산 수출용 팽이버섯에 의해 미국 17개 주에서 36명이 식중독 증상을 보여 31명이 입원하였으며, 4명이 숨지고 2명이 유산하였다<sup>12)</sup>. 2020년 11월에는 미국에서 *Salmonella*에 오염된 중국산 건목이버섯으로 인해 55명이 감염되고, 6명이 입원한 것으로 보고되었다<sup>14)</sup>. 2022년 7월, FDA는 미국 전역에 팽이버섯에 대한 수입 경보를 발령했으며 한국 팽이버섯 제품 검역 시 물리적 검사 없이 역류를 가능하게 하는 등 강화된 수입 규제 조치를 적용하였다<sup>8)</sup>. 그 밖에도 2022년 8월에 발표된 EU rapid alert system for food and feed database에 의하면 *Staphylococcus aureus*에 오염된 스페인산 버섯 통조림으로 인한 식중독 사고가 보고된 바 있다(Table 3).

이 외에도 *L. monocytogenes*에 오염된 팽이버섯으로 인한 리콜 사례가 지속해서 발생하고 있으며, *Bacillus cereus*와 *E. coli*, *Salmonella*에 의한 리콜 사례도 보고되었다(Table 4).

**Table 3.** The case of foodborne outbreaks associated with mushrooms

Area	Year	Pathogen	Mushroom	Impatient	Death
USA	2016-2020	<i>Listeria monocytogenes</i>	<i>Flammulina velutipes</i>	31	4
USA	2020	<i>Salmonella</i> spp.	<i>Auricularia auricula-judae</i>	6	-
Spain	2020	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Boletus pseudocalopus</i> Hongo	2	-

**Table 4.** Mushrooms recalled due to foodborne pathogen contamination

Area	Year	Pathogen	Mushroom	Reference
USA	2020	<i>Listeria monocytogenes</i>	<i>Flammulina velutipes</i>	(23)
		<i>Listeria monocytogenes</i>	Sun Hong Foods, <i>Flammulina velutipes</i>	
		<i>Listeria monocytogenes</i>	Guan's Mushroom Co., <i>Flammulina velutipes</i>	
Canada	2007	<i>Escherichia coli</i>	Wellsley Farms, Mushroom	(25)
		<i>Listeria monocytogenes</i>	Golden Mushroom, <i>Flammulina velutipes</i>	
Slovenia	2019	<i>Listeria monocytogenes</i>	Jongilpoom, <i>Flammulina velutipes</i>	(24)
		<i>Listeria monocytogenes</i>	<i>Flammulina velutipes</i>	
Holland	2022	<i>Listeria monocytogenes</i>	<i>Flammulina velutipes</i>	(26)
		<i>Salmonella enterica</i>	Dried mushroom	
Germany	2016	<i>Salmonella enterica</i>	Dried sliced <i>Auricularia auricula-judae</i>	(26)
		<i>Bacillus cereus</i>		
		<i>Bacillus cereus</i>	Dried mushroom	
Germany	2012	<i>Bacillus cereus</i>	Dried mushroom	(26)
		<i>Salmonella</i> spp.	<i>Tuber indicum</i>	

미국에서는 2007년 *E. coli*, 2020년 *L. monocytogenes* 오염으로 인한 3건의 리콜 사례가 보고되었으며<sup>23)</sup>, 캐나다에서는 *L. monocytogenes*에 의해 2건<sup>24,25)</sup>의 리콜 사례가 보고되었다. 또한, 유럽에서도 *E. coli* 오염 최대 기준인 100 CFU/g을 초과한 버섯 및 버섯제품에 대한 리콜 명령이 다수 발생하였다<sup>26)</sup>.

### 버섯의 미생물 오염

버섯의 생산 및 가공 과정은 미생물의 생장에 매우 적합하며 특히 자연환경에 널리 존재하는 *L. monocytogenes*에 대한 버섯의 오염도가 높다<sup>27-29)</sup>. 아일랜드의 양송이버섯 재배환경에 대한 미생물 오염도를 조사한 연구에서 배지 내부의 온도가 60-70°C가 되도록 12시간동안 재배환경을 스팀처리 후, 1%의 sodium hypochlorite로 소독한 환경의 *L. monocytogenes*의 오염율은 13%를 나타냈다<sup>30)</sup>. 또한, 새송이버섯의 작업환경의 *L. monocytogenes* 오염율을 확인한 결과 버섯 재배에 이용되는 기구와 환경 등의 샘플 58건 중 20건(34%)에서 양성으로 나타났다<sup>31)</sup>. 그 밖에도 4곳의 팽이버섯 재배 공장의 재배과정 중 샘플 295개에 대한 샘플링을 진행한 결과 18.6%(55/295)에서 양성으로 확인되었으며, 제품에서 양성이 나온 경우 균사체 자극, 생육, 수확 과정에서도 *L. monocytogenes*가 검출되었다<sup>32)</sup>. 따라서 버섯 재배 및 생산환경에서 오염된 병원성 세균을 통해 버섯 제품으로 교차 오염될 위험성이 높음을 보여준다.

Table 5는 유통되는 버섯 제품에서의 미생물 오염도를 조사한 연구결과를 보여주고 있다. 양송이버섯에 있는 *Pseudomonas*, 중온균, 저온균은 각각 6.9, 7.5, 7.2 log CFU/g으로 나타나 매우 높은 오염도를 보였다<sup>33)</sup>. 그 밖에 시애틀의 신선한 버섯에서도 병원성 미생물인 *L. monocytogenes* (1%), *E. coli* O157:H7 (4%), *Salmonella* (7%)가 검출되어<sup>34)</sup>, 버섯에서의 미생물 생존능력은 버섯이 질병의 매개체가 될 수 있음을 보여준다<sup>35)</sup>. 중국 시장에서 구매한 655개 식용버섯 샘플 중 141개(21.20%)의 샘플에서 *L. monocytogenes*가 검출되었고, 그중 팽이버섯의 비율이 55.50%로 가장 높게 나타났으며, 양성으로 확인된 141개의 샘플 중 43개의 오염 수준은 10 MPN/g 이상으로 나타났다. Multilocus sequencing typing 결과 180개의 양성 분리 균주 중 21개에서 sequence type (ST)가 확인되었으며 그중 ST8과 ST87이 지배적이었다. 또한 대부분의 균주(53.89%)에서 다양한 종류의 항생제에 대한 내성을 보였으나, 분리 균주의 90% 이상은 sulbactam/ampicillin, amoxycillin/clavulanic acid, meropenem을 포함한 16가지의 항생제에 대해 감수성을 보였다<sup>7)</sup>. 미국의 시중에서 구입한 표고버섯의 75%에서 대장균군이 검출되었으며, 10%에서 *Listeria* spp.가 양성으로 확인되었다. 양성으로 확인된 *Listeria* spp.의 5%는 자르지 않은 버섯에서, 25%는 자른 형태의 버섯에서 검출되어 자른 형태의 버섯에서 미생물 오염도가 더 높은 것으로 확인되었다<sup>36)</sup>. 스페인에서 유통되는 22종 402개의 버섯의 총 균수는 4.4-9.4 log CFU/g

**Table 5.** The contamination level of foodborne pathogen in different edible mushrooms

Year	Pathogen	Mushroom	Positive sample (%)	Reference
2018	<i>Listeria monocytogenes</i>	<i>Flammulina velutipes</i>	55.5(116/209)	(7)
		<i>Volvariella volvacea</i>	11.76(2/17)	
		<i>Hypsizyguis marmoreus</i>	10.12(8/79)	
		<i>Pleurotus geesteranus</i>	8.33(1/12)	
		<i>Lentinula edodes</i>	2.88(3/104)	
		<i>Pleurotus ostreatus</i>	6.73(7/104)	
2016	<i>Listeria</i> spp.	<i>Lentinula edodes</i>	10(3/28)	(36)
	Coliform		75(21/28)	
2011	<i>Listeria monocytogenes</i>	<i>Boletus edulis</i>	18.2(4/22)	(37)
		<i>Calocybe gombasa</i>	40(8/20)	
		<i>Hygrophorus limacinus</i>	40(4/10)	
		<i>Lactarius deliciosus</i>	25(4/16)	
		<i>Tuber indicum</i>	100(6/6)	
		<i>Calocybe gombasa</i>	5(1/20)	
2018	<i>Yersinia enterocolitica</i>	<i>Cantharellus cibarius</i>	4.2(1/24)	(38)
		<i>Craterellus cornucopioides</i>	25(2/8)	
		<i>Agaricus bisporus</i>	98(49/50)	
2018	<i>Escherichia coli</i> O157:H7	<i>Agaricus bisporus</i>	98(49/50)	(38)

로 나타났고, 12종(23.4%)에서 대장균군이 검출되었다. 또한, *Pseudomonas* spp.가 21.6%로 가장 높은 비율로 검출되었고(3.7–9.3 log CFU/g), *L. monocytogenes*는 26개(6.5%)의 샘플에서 검출되었으며, 그중 밤버섯(40%), 뽕버섯(40%), 중국 송로버섯(100%)에서 높게 나타났다. *Yersinia enterocolitica*는 야생버섯의 6.5%에서 발견되었다<sup>37)</sup>. 이탈리아의 ready-to-eat 버섯의 경우 98%에서 *E. coli* O157:H7이 7.21 log CFU/g 수준으로 오염되어 있었고, 호기성 중온균과 저온균은 모든 버섯에서 각각 8.07 log CFU/g, 7.80 log CFU/g 수준으로 검출되었다<sup>38)</sup>(Table 5).

위와 같이, 버섯 재배 및 생산 환경에서의 병원성 세균의 오염이 관찰됨에 따라 버섯의 생산과 수확 과정에서의 잠재적 오염원을 확인하여 미생물 오염으로 인한 식중독을 예방하기 위한 위생관리가 필요하다. 특히 버섯은 퇴비 등과 가까운 곳에서 재배하기 때문에 병충해, 미생물, 화학물질 등에 의한 오염 가능성이 매우 크다. 또한, 가공 처리 장비와 기구는 미생물의 생물막(biofilm)이 형성되기 좋은 환경이며, 이러한 생물막은 버섯의 미생물 오염과 식품 유래 질병의 잠재적 위험성을 높일 수 있다<sup>39)</sup>. 버섯 재배 및 생산에 있어 수확 전 주요 오염원은 버섯 재배 배지, 농업용수와 작업환경의 오염 등으로 알려져 있으며<sup>40,41)</sup> 수확 후 오염원은 가공처리 과정에서 손상된 버섯 조직과 운송, 판매의 장시간 냉장 저장으로 알려져 있으며<sup>39,42)</sup> 수확 후 버섯의 보관 온도가 버섯의 미생물 증식에 영향을 끼칠 수 있는 것으로 보고되었다. *L. monocytogenes* 2 log CFU/g을 통, 자른, 다진 형태의 양송이버섯에 각각 접종한 후 20°C에 보관한 결과 1일 후 약 2 log CFU/g 증가하였으며 6일 후 통, 자른, 다진 형태의 버섯에서 각각 2.6, 3.5, 6.5 log CFU/g 증가하였다<sup>43)</sup>. 팽이버섯에 *L. monocytogenes*를 2.73 log CFU/g 접종 후 5°C, 10°C, 25°C

에서 보관한 결과 5°C에서는 7일 보관 후에도 큰 변화가 보이지 않았지만 10°C에서는 7일 후 5.15 log CFU/g으로 약 2.42 log CFU/g, 25°C에서는 1일 보관 후 5.94 log CFU/g으로 약 3.22 log CFU/g 증가함을 확인하였다<sup>44)</sup>.

#### 버섯의 미생물 저감화 처리- 화학적 소독제 활용

미생물 오염의 위험을 줄이기 위한 가장 일반적인 방법은 버섯 및 버섯 생산 환경 표면에 화학적 소독제를 사용하는 것이며 침지세척 또는 분무 세척이 주로 이용된다. 화학소독제 처리는 처리 과정에서의 농도, 처리 시간, 온도, pH, 천연 미생물 등이 소독제의 항균 효과에 영향을 미칠 수 있다는 점을 고려해야 한다. 식품업계에서 사용되는 화학적 소독제는 일반적으로 산화성과 비산화성 소독제로 나뉜다. 산화성 소독제는 chlorine compounds과 peroxyacetic acid (PAA)가 대표적이고, 비산화성 소독제로는 quaternary ammonium compounds (QACs)가 사용된다<sup>39)</sup>. Sodium hypochlorite (NaClO), chlorine dioxide (ClO<sub>2</sub>)과 chlorine (Cl<sub>2</sub>)는 가장 많이 사용되는 수성 소독제로 물에서 hypochlorous acid (HOCl)과 다른 reactive chlorine species (RCS)를 생성하며<sup>45)</sup>, 50-200 ppm의 농도 범위에서 세포 성분을 파괴해 멸균 효과를 내지만 발암 화합물이 생성될 수 있다는 문제가 존재한다<sup>46,47)</sup>. 느타리버섯에 100 mg/L NaClO를 1분간 처리한 결과 *L. monocytogenes*, *E. coli* O157:H7 와 *S. Typhimurium*이 각각 1.94, 1.42, 1.86 log CFU/g 감소하였다(Table 6). PAA은 세포막을 파괴해 멸균 효과를 내며 유효 pH 범위가 넓어 안정성이 높고 부산물이 적다는 장점이 있으며<sup>48,49)</sup> *L. monocytogenes*, *E. coli* O157:H7과 *Salmonella* 저감화에 효과적이다<sup>49,50)</sup>. 주로 100-400 ppm의 농도로 식품 표면 소독에 사용되는 QAC는 그람 양성균에 효과적이고 표면건조 후 잔류된

**Table 6.** Control of foodborne pathogens in mushroom by the combination of chemical treatments

	Treatment		Pathogen	Reduction (log CFU/g)	Reference
	Food	Condition			
Chlorine compound	<i>Pleurotus ostreatus</i>	NaClO, 100 mg/L, 1 min	<i>Listeria monocytogenes</i>	1.94	(53)
			<i>Escherichia coli</i> O157:H7	1.42	
			<i>Salmonella typhimurium</i>	1.86	
Ozone	<i>Agaricus bisporus</i>	Gaseous ozone, 5.3 mg/L, 60 min	<i>Listeria monocytogenes</i>	2.80	(52)
			<i>Escherichia coli</i> O157:H7	3.41	
			<i>Salmonella</i> spp.	3.61	
	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Aqueous ozone, 5 mg/L, 3 min	<i>Listeria monocytogenes</i>	1.06	(53)
			<i>Escherichia coli</i> O157:H7	0.75	
			<i>Salmonella typhimurium</i>	1.03	
Electrolyzed water	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Low concentration electrolyzed water, 5 mg/L, 3 min	<i>Listeria monocytogenes</i>	1.94	(53)
			<i>Escherichia coli</i> O157:H7	1.42	
			<i>Salmonella typhimurium</i>	1.86	

QAC는 살균 활성을 유지한다는 장점이 있으나, 포자에 대해서는 효과가 낮으며 환경오염의 문제가 있을 수 있다<sup>51)</sup>.

최근 인체 및 환경에 유해한 영향을 미치는 염소처리를 대체하기 위하여 오존과 전해수를 이용한 새로운 소독법이 개발되었다. 오존은 산화성이 좋아 산소로 분해되어 잔여물이 남지 않는다는 장점을 가진다. 양송이버섯에 5.3 mg/L의 오존을 60분 동안 처리했을 때 *L. monocytogenes*, *E. coli* O157:H7과 *Salmonella*가 각각 2.80, 3.41, 3.61 log CFU/g 이상 감소되었다<sup>52)</sup>. 전해수는 수돗물과 저농도의 염화나트륨(0.2% 이하)을 섞어 전기분해를 통해 생성되는 소독제를 말하며, 효소를 억제해 DNA를 분해하고 세포 대사를 파괴함으로써 작용된다. 전해수는 산성도 및 유효염소 함유량에 따라 강산성 전해수(strong acid electrolyzed water, pH 2.2-2.7, 20-60 mg/L available chlorine), 약산성 전해수(slightly acidic electrolyzed water, pH 2.7-5.0, 10-60 mg/L available chlorine), 미산성 전해수(low concentration electrolyzed water, pH 5.0-6.5, 10-80 mg/L available chlorine)로 분류된다. 강산성 전해수와 비교하여 미산성 전해수는 생성과정에서 발생하는 염소가스를 최소화할 수 있고 저렴하다는 장점을 갖는다. 한편, 실온에서 미산성 전해수를 5 mg/L의 농도로 느타리버섯에 3분간 처리한 결과 *L. monocytogenes*, *E. coli* O157:H7 및 *S. Typhimurium*가 각각 1.94, 1.42과 1.86 log CFU/g 감소하여 강산성 전해수의 평균 효과와 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다<sup>53)</sup>(Table 6).

버섯의 미생물 오염도의 저감화를 위해서는 버섯 자체

의 안전성 관리를 포함한 버섯 배지와 작업환경 등의 외부 요인 통제가 필요하다. 아일랜드의 양송이버섯 재배환경에서 채취한 *L. monocytogenes*를 재배공장의 콘크리트 바닥과 동일한 환경에 접종 후 PAA 소독제와 QAC 소독제를 5분간 처리한 결과 *L. monocytogenes*의 생물막이 4.1 log CFU/g, 4.0 log CFU/g 감소의 효과가 있음을 확인하였다<sup>54)</sup>. 또한, 버섯 재배 시 사용되는 기구 표면인 PVC, low density polyethylene (LDPE), PET, 플라스틱, 실리콘 주걱에 100°C의 온도의 스틱으로 6초간 각각 처리한 결과 *L. innocua*의 생물막이 2.5-3 log CFU/g 감소하였으며, 180 초 처리한 결과 플라스틱에서 6.4 log CFU/g 이상 감소하였다<sup>55)</sup>.

#### 버섯의 미생물 저감화 처리-물리적처리 및 병용처리 활용

버섯의 미생물 오염을 줄이기 위한 물리적 처리로는 ultrasound, irradiation 기술 등이 평가되었으며, 이러한 물리적 처리 기술은 화학적 소독제에 비해 잔류 물질에 대한 위험성이 낮기 때문에 관련 연구가 증가하고 있다. 이 중 ultrasound는 경제적이고 효율적인 물리적 처리 방식으로 과일과 채소의 부패는 줄이고 맛과 영양, 색을 유지하는 데 효과적이며 다양한 식품에서 사용되는 안전한 가공 기술이다<sup>56)</sup>. Ultrasound는 대량의 에너지를 방출해 미생물 세포벽을 파괴하고 DNA를 파괴해 미생물 제어 효과를 낸다<sup>57)</sup>. 일부 연구에서는 양상추를 32-40 kHz에서 10분간 처리 시 *S. Typhimurium*가 1.5 log CFU/g 감소하였고, 사

**Table 7.** Control of foodborne pathogens in mushroom by the combination of chemical and physical treatments

Treatment		Pathogen	Reduction (log CFU/g)	Reference
Mushroom	Condition			
UV	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<i>Bacillus cereus</i>	4.95	(60, 64)
		<i>Staphylococcus aureus</i>	4.10	
		<i>Bacillus cereus</i>	3.72	
		<i>Staphylococcus aureus</i>	2.75	
		<i>Bacillus cereus</i>	3.55	
		<i>Staphylococcus aureus</i>	3.33	
	<i>Agaricus bisporus</i>	<i>Escherichia coli</i> O157:H7	0.87	(59)
Ozone	<i>Flammulina velutipes</i>	<i>Listeria monocytogenes</i>	1.33	(61)
		<i>Escherichia coli</i> O157:H7	2.26	
Ultrasound	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<i>Listeria monocytogenes</i>	5.08	(9)
Ultrasound	<i>Flammulina velutipes</i>	<i>Listeria monocytogenes</i>	5.00	(62)
		<i>Escherichia coli</i> O157:H7	5.00	
LED	<i>Flammulina velutipes</i>	<i>Escherichia coli</i> O157:H7	4.60	(63)

과에 170 kHz에서 10분간 처리 시 *E. coli* O157:H7이 1.52 log CFU/g 감소하였다고 보고되었다<sup>58)</sup>. 또한, 신선한 버섯을 4°C에서 21일의 저장기간동안 UV-C (45-315 mWs/cm<sup>2</sup>)를 처리하였을 때, *E. coli* O157:H7과 총 호기성 미생물수가 각각 0.46-1.13 log CFU/g, 0.63-0.89 log CFU/g 감소하였다<sup>59)</sup>.

이외에도 버섯에서 미생물의 저감화 효과를 증가시키기 위해 화학적 소독제와 물리적 처리 기술을 병용하여 처리하는 연구도 보고되었다. *B. cereus*와 *S. aureus*를 접종한 느타리버섯에 70% 에탄올과 504 mWs/cm<sup>2</sup> UV, 2000 ppm H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>와 504 mWs/cm<sup>2</sup> UV, 200 ppm NaClO과 504 mWs/cm<sup>2</sup> UV를 각각 병용처리하였을 때 *B. cereus*는 4.95, 3.72, 3.55 log CFU/g, *S. aureus*는 4.10, 2.75, 3.33 log CFU/g의 저감 효과를 나타냈으며 70% 에탄올과 504 mWs/cm<sup>2</sup> UV를 처리하였을 때 가장 큰 효과를 보였다<sup>60,64)</sup>. 또한, 3 ppm ozone과 1% citric acid를 *L. monocytogenes*와 *E. coli* O157:H7을 접종한 팽이버섯에 병용처리한 결과, 각각 1.33 log CFU/g, 2.26 log CFU/g 감소하는 효과를 보였다<sup>61)</sup>. *L. monocytogenes*를 접종한 느타리버섯에 3% malic acid, 0.1% nisin, 40 kHz ultrasound를 25°C에서 30분간 처리한 결과 5.08 log CFU/g 감소하였으며<sup>9)</sup>, *L. monocytogenes*와 *E. coli* O157:H7을 접종한 팽이버섯에 3% lactic acid, 0.1% nisin, 40 kHz ultrasound를 복합처리한 결과 두 균주 모두에서 5 log CFU/g가 감소하는 효과가 나타났다<sup>62)</sup>. 또한, *L. monocytogenes*를 접종한 팽이버섯에 405 nm LED와 3% lactic acid를 병용처리한 결과 4.6 log CFU/g 감소하는 효과가 있는 것으로 확인되었다<sup>63)</sup>. 따라서, 버섯에 오염된 병원성 세균 저감화를 위해 화학적 소독제와 물리적 처리 기술을 병용처리 시 단독처리에 비해 높은 효과를 가지는 것으로 나타났다(Table 7).

## Conclusion

영양가가 높은 버섯에 대한 소비자의 관심과 수요가 크게 증가하였으나, 안전관리 방안의 부재로 인한 생산 및 제조 과정 중 미생물 오염, 그리고 저장 및 가공 과정에서 교차 오염 발생 가능성으로 인한 문제가 제기되고 있다. 버섯의 미생물 오염도에 대한 선행연구 결과에 의하면, 병원성 미생물 중 *L. monocytogenes* 오염이 가장 많은 것으로 나타났으며, 4 log CFU/g 이상 오염되었을 경우에는 리스테리아증을 유발할 수 있다. *L. monocytogenes*는 버섯 채취 후 단계인 신선한 버섯에서도 생육할 수 있으며, 48 시간 이내에 1-2 log 증가할 수 있기 때문에 효율적인 안전관리 방안과 제도의 연구 및 개발이 필요하다. 다수의 연구보고서에 따르면 가공 과정에서 분해된 균사체와 기계의 표면이 버섯의 *L. monocytogenes* 오염의 주요 원인이며, *L. monocytogenes*가 버섯 재배실을 지속적으

로 오염시킨다는 연구 결과도 존재한다. 따라서 버섯 가공과 관련 환경의 철저한 위생 운영 규정이 필요하다. 현재 버섯에 대한 미생물 오염을 방지하기 위하여 고온 소독, 소독제 세척, ultrasound와 같은 화학적·물리적 방법을 사용하고 있으나, 일부 기술의 효과적 한계, 환경 오염 및 버섯의 영양소 및 기능성 저하와 같은 한계점이 존재한다. 따라서 버섯의 특성 및 영양적 손실을 최소화할 수 있는 위생안전관리 방안에 대한 연구를 통해 관련 산업 발전에 기여해야 할 것으로 사료된다.

## Acknowledgement

본 연구는 2022년도 식품의약품안전처 연구개발비(22192 MFDS 024)로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 국문요약

세계적으로 버섯에 대한 소비는 매년 증가하고 있으며 한국에서는 느타리버섯, 양송이버섯, 팽이버섯이 주로 유통되고 있다. 하지만, 버섯의 재배와 가공 과정에서 미생물 오염을 예방하기 위한 대안의 부재로 인하여 *Listeria monocytogenes*와 같은 병원성 미생물의 오염이 검출되고 있으며 버섯에 의한 식중독 및 리콜 사례가 다수 보고되고 있다. 버섯에서 오염된 미생물을 저감화하는 방법으로는 화학적 및 물리적 처리, 또는 이들을 결합하여 사용하는 병용처리 방법이 이용되고 있다. 화학적 처리로는 염소 혼합물, 과산화아세트산, 4차 암모늄이온 화합물이 주로 사용되고 있으며 오존과 전해수를 이용한 방법도 최근에 개발되었다. 물리적 처리로는 초음파, 방사선조사, 콜드 플라즈마 기술이 이용되고 있으며, 병용처리 방법으로는 자외선/염소 혼합물, 오존/유기산, 초음파/유기산 등이 연구되었다. 본 리뷰에서는 국내에서 소비되는 버섯의 종류와 그에 대한 미생물 오염도를 조사하고, 버섯에 오염된 미생물을 제어할 수 있는 기술에 대하여 조사하여, 정리하였다.

## Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest.

## ORCID

Hyunji Song	<a href="https://orcid.org/0000-0002-8999-8609">https://orcid.org/0000-0002-8999-8609</a>
Areum Han	<a href="https://orcid.org/0000-0002-9905-0379">https://orcid.org/0000-0002-9905-0379</a>
Boyang Meng	<a href="https://orcid.org/0000-0002-5155-7437">https://orcid.org/0000-0002-5155-7437</a>
A-Ra Jang	<a href="https://orcid.org/0000-0002-4182-5274">https://orcid.org/0000-0002-4182-5274</a>
Ji-Yeon Kim	<a href="https://orcid.org/0000-0001-9463-4562">https://orcid.org/0000-0001-9463-4562</a>
Sun-Young Lee	<a href="https://orcid.org/0000-0003-3911-4200">https://orcid.org/0000-0003-3911-4200</a>

## References

- Chang, R., Functional properties of edible mushrooms. *Nutr. Rev.*, **54**, s91-93 (1996).
- Mattila, P., Könkö, K., Euroola, M., Pihlava, J.M., Astola, J., Vahteristo, L., Hietaniemi, V., Kumpulainen, J., Valtonen, M., Piironen, V., Contents of Vitamins, mineral elements, and some phenolic compounds in cultivated mushrooms. *J. Agric. Food Chem.*, **49**, 2343-2348 (2001).
- Sia, G.M., Candlish, J.K., Effects of shiitake (*Lentinus edodes*) extract on human neutrophils and the U937 monocytic cell line. *Phytother. Res.*, **13**, 133-137 (1999).
- Manohar, V., Talpur, N.A., Echard, B.W., Lieberman, S., Preuss, H.G., Effects of a water-soluble extract of maitake mushroom on circulating glucose/insulin concentrations in KK mice. *Diabetes Obes. Metab.*, **4**, 43-48 (2002).
- Kabir, Y., Yamaguchi, M., Kimura, S., Effect of Shiitake (*Lentinus edodes*) and maitake (*Grifola frondosa*) mushrooms on blood pressure and plasma lipids of spontaneously hypertensive rats. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, **33**, 341-346 (1987).
- Cheng, H.H., Hou, W.C., Lu, M.L., Interactions of lipid metabolism and intestinal physiology with *Tremella fuciformis* berk edible mushroom in rats fed a high-cholesterol diet with or without nebacitin. *J. Agric. Food Chem.*, **50**, 7438-7443 (2002).
- Chen, M., Cheng, J., Wu, Q., Zhang, J., Chen, Y., Zeng, H., Ding, Y., Prevalence, potential virulence, and genetic diversity of *Listeria monocytogenes* isolates from edible mushrooms in Chinese markets. *Front Microbiol.*, **9**, 1711 (2018).
- Korea Agro-Fisheries & Food Traded Corporation, (2023, September 6). Production status. Retrieved from <https://www.kati.net/product/basisInfo.do?lcdCode=MD162>
- Yoon, J.H., Jeong, D.Y., Lee, S.B., Choi, S., Jeong, M.I., Lee, S.Y., Kim, S.R., Decontamination of *Listeria monocytogenes* in king oyster mushrooms (*Pleurotus eryngii*) by combined treatments with organic acids, nisin, and ultrasound. *LWT.*, **144**, 111207 (2021).
- Kues, U., Liu, Y., Fruiting body production in basidiomycetes. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **54**, 141-152 (2000).
- Churklam, W., Chaturongakul, S., Ngamwongsatit, B., Aunpad, R., The mechanisms of action of carvacrol and its synergism with nisin against *Listeria monocytogenes* on sliced bologna sausage. *Food Control.*, **108**, 106864 (2020).
- FDA, (2022, December 2). Outbreak investigation of *Listeria monocytogenes*: enoki mushrooms. Retrieved from <https://www.fda.gov/food/outbreaks-foodborne-illness/outbreak-investigation-listeria-monocytogenes-enoki-mushrooms-march-2020>
- CDC, (2023, February 15). *Listeria* outbreaks, Retrieved from: <https://www.cdc.gov/listeria/outbreaks/>
- CDC, (2023, September 6). Outbreak of *Salmonella* Stanley infections linked to wood ear mushrooms. Retrieved from <https://www.cdc.gov/salmonella/stanley-09-20/>
- Ren, L., Perera, C., Hemar, Y., Antitumor activity of mushroom polysaccharides: a review. *Food Funct.*, **3**, 1118-1130 (2012).
- Ryoo, R., Production status of forest mushrooms. *J. Food Process. Preserv.*, **21**, 10-15 (2022).
- Kalač, P., Chemical composition and nutritional value of European species of wild growing mushrooms: A review. *Food Chem.*, **113**, 9-16 (2009).
- Zhang, X., Zhong, Y., Yang, S., Zhang, W., Xu, M., Ma, A., Zhuang, G., Chen, G., Liu, W., Diversity and dynamics of the microbial community on decomposing wheat straw during mushroom compost production. *Bioresour. Technol.*, **170**, 183-195 (2014).
- Cai, W.M., Yao, H.Y., Feng, W.L., Jin, Q.L., Liu, Y.Y., Li, N.Y., Zheng, Z., Microbial community structure of casing soil during mushroom growth. *Pedosphere.*, **19**, 446-452 (2009).
- Mcgee, C.F., Microbial ecology of the *Agaricus bisporus* mushroom cropping process. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **102**, 1075-1083 (2018).
- Kertesz, M.A., Thai, M., Compost bacteria and fungi that influence growth and development of *Agaricus bisporus* and other commercial mushrooms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **102**, 1639-1650 (2018).
- Ryoo, R., Forest mushroom material status. *J. Food Process. Preserv.*, **20**, 3-8 (2021).
- NBC News, (2023, September 6). Prepackaged mushrooms recalled for *E. coli*. Retrieved from <https://www.nbcnews.com/health/health-news/prepackaged-mushrooms-recalled-e-coli-flna1c9469929>
- Canadian Food Inspection Agency (CFIA), (2023, September 6). Notification - Jongilpoom brand Enoki mushrooms recalled due to *Listeria monocytogenes*. Retrieved from <https://inspection.canada.ca/food-recall-warnings-and-allergy-alerts/2019-07-05-r13072/eng/1563312477630/1563312479417>
- Canadian Food Inspection Agency (CFIA), (2023, September 6). Food Recall Warning - Golden Mushroom brand Enoki Mushroom recalled due to *Listeria monocytogenes*. Retrieved from <https://inspection.canada.ca/food-recall-warnings-and-allergy-alerts/2020-03-24/eng/1585081415872/1585081416327>
- RASFF, (2023, September 6). Notification. Retrieved from <https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/screen/search>
- Chen, M., Wu, Q., Zhang, J., Guo, W., Wu, S., Yang, X., Prevalence and contamination patterns of *Listeria monocytogenes* in *Flammulina velutipes* plants. *Foodborne Pathog. Dis.*, **11**, 620-627 (2014).
- Murugesan, L., Kucerova, Z., Knabel, S.J., LaBorde, L.F., Predominance and distribution of a persistent *Listeria monocytogenes* clone in a commercial fresh mushroom processing environment. *J. Food Prot.*, **78**, 1988-1998 (2015).
- Weil, J.D., Cutter, C.N., Beelman, R.B., LaBorde, L.F., Inactivation of human pathogens during phase II composting of manure-based mushroom growth substrate. *J. Food Prot.*, **76**, 1393-1400 (2013).
- Lake, F.B., Van Overbeek, L.S., Baars, J.J.P., Koomen, J., Abee, T., Den Besten, H.M.W., Genomic characteristics of *Listeria monocytogenes* isolated during mushroom (*Agari-*

- cus bisporus*) production and processing. *Int. J. Food Microbiol.*, **360**, 109438 (2021).
31. Xu, J., Wu, S., Liu, M., Xiao, Z., Peng, Y., He, H., Prevalence and contamination patterns of *Listeria monocytogenes* in *Pleurotus eryngii* (king oyster mushroom) production plants. *Front. Microbiol.*, **14**, 1064575 (2023).
  32. Pennone, V., Dygico, K.L., Coffey, A., Gahan, C.G.M., Grogan, H., McAuliffe, O., Burgess, C.M., Jordan, K., Effectiveness of current hygiene practices on minimization of *Listeria monocytogenes* in different mushroom production-related environments. *Food Sci. Nutr.*, **8**, 3456-3468 (2020).
  33. Simon, A., Gonzalez Fandos, E., Tobar, V., The sensory and microbiological quality of fresh sliced mushroom (*Agaricus bisporus*) packaged in modified atmospheres. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **40**, 943-952 (2005).
  34. Samadpour, M., Barbour, M.W., Nguyen, T., Cao, T.M., Buck, F., Depavia, G.A., Mazengia, E., Yang, P., Alfí, D., Lopes, M., Stopforth, J.D., Incidence of enterohemorrhagic *Escherichia coli*, *Escherichia coli* O157, *Salmonella*, and *Listeria monocytogenes* in retail fresh ground beef, sprouts, and mushrooms. *J. Food Prot.*, **69**, 441-443 (2006).
  35. Brennan, M., Le Port, G., Gormley, R., Post-harvest treatment with citric acid or hydrogen peroxide to extend the shelf life of fresh sliced mushrooms. *LWT*, **33**, 285-289 (2000).
  36. Kim, C., Nartea, T.J., Pao, S., Li, H., Jordan, K.L., Xu, Y., Stein, R.A., Sismour, E.N., Evaluation of microbial loads on dried and fresh shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) as obtained from internet and local retail markets, respectively. *Food Saf. (Tokyo)*, **4**, 45-51 (2016).
  37. Venturini, M.E., Reyes, J.E., Rivera, C.S., Oria, R., Blanco, D., Microbiological quality and safety of fresh cultivated and wild mushrooms commercialized in Spain. *Food Microbiol.*, **28**, 1492-1498 (2011).
  38. Jiang, H., Miraglia, D., Ranucci, D., Donnini, D., Roila, R., Branciarri, R., Li, C., High microbial loads found in minimally-processed sliced mushrooms from Italian market. *Ital. J. Food Saf.*, **7**, 7000 (2018).
  39. Mendoza, I.C., Luna, E.O., Pozo, M.D., Vásquez, M.V., Montoya, D.C., Moran, G.C., Romero, L.G., Yépez, X., Salazar, R., Romero-Peña, M., Leon, J.C., Conventional and non-conventional disinfection methods to prevent microbial contamination in minimally processed fruits and vegetables. *LWT*, **165**, 113714 (2022).
  40. Alegbeye, O.O., Singleton, I., Sant'Ana, A.S., Sources and contamination routes of microbial pathogens to fresh produce during field cultivation: A review. *Food Microbiol.*, **73**, 177-208 (2018).
  41. Gil, M.I., Selma, M.V., Suslow, T., Jacxsens, L., Uyttendaele, M., Allende, A., Pre- and postharvest preventive measures and intervention strategies to control microbial food safety hazards of fresh leafy vegetables. *Crit. Rev. Food. Sci. Nutr.*, **55**, 453-468 (2015).
  42. Francis, G.A., Gallone, A., Nychas, G.J., Sofos, J.N., Colelli, G., Amodio, M.L., Spano, G., Factors affecting quality and safety of fresh-cut produce. *Crit. Rev. Food. Sci. Nutr.*, **52**, 595-610 (2012).
  43. Lake, F.B., Van Overbeek, L.S., Baars, J.J., Abee, T., Den Besten, H.M.W., Variability in growth and biofilm formation of *Listeria monocytogenes* in *Agaricus bisporus* mushroom products. *Food Res. Int.*, **165**, 112488 (2023).
  44. Fay, M.L., Salazar, J.K., George, J., Chavda, N.J., Lingaredygar, P., Patil, G.R., Juneja, V.K., Ingram, D.T., Modeling the fate of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella enterica* on fresh whole and chopped wood ear and enoki mushrooms. *J. Food Prot.*, **86**, 100075 (2023).
  45. Gray, M.J., Wholey, W.Y., Jakob, U., Bacterial responses to reactive chlorine species. *Annu. Rev. Microbiol.*, **67**, 141-160 (2013).
  46. Artés, F., Gómez, P., Aguayo, E., Escalona, V., Artés Hernández, F., Sustainable sanitation techniques for keeping quality and safety of fresh-cut plant commodities. *Postharvest Biol. Technol.*, **51**, 287-296 (2009).
  47. Ryther, R., Stokes, R., Development of a comprehensive cleaning and sanitizing program for food production facilities. *J. Food Saf.*, **31**, 679-698 (2023).
  48. Lee, W.N., Huang, C.H., Formation of disinfection byproducts in wash water and lettuce by washing with sodium hypochlorite and peracetic acid sanitizers. *Food Chem.*, **1**, 100003 (2019).
  49. Singh, P., Hung, Y.C., Qi, H., Efficacy of peracetic acid in inactivating foodborne pathogens on fresh produce surface. *J. Food Sci.*, **83**, 432-439 (2018).
  50. Brilhante São José, J.F., Dantas Vanetti, M.C., Effect of ultrasound and commercial sanitizers in removing natural contaminants and *Salmonella enterica* Typhimurium on cherry tomatoes. *Food Control.*, **24**, 95-99 (2012).
  51. Zhang, C., Cui, F., Zeng, G.M., Jiang, M., Yang, Z.Z., Yu, Z.G., Zhu, M.Y., Shen, L.Q., Quaternary ammonium compounds (QACs): a review on occurrence, fate and toxicity in the environment. *Sci. Total Environ.*, **518-519**, 352-362 (2015).
  52. Akata, I., Torlak, E., Erci, F., Efficacy of gaseous ozone for reducing microflora and foodborne pathogens on button mushroom. *Postharvest Biol. Technol.*, **109**, 40-44 (2015).
  53. Ding, T., Rahman, S.M.E., Oh, D.H., Inhibitory effects of low concentration electrolyzed water and other sanitizers against foodborne pathogens on oyster mushroom. *Food Control.*, **22**, 318-322 (2011).
  54. Dygico, L.K., Gahan, C.G.M., Grogan, H., Burgess, C.M., Examining the efficacy of mushroom industry biocides on *Listeria monocytogenes* biofilm. *J. Appl. Microbiol.*, **130**, 1106-1116 (2021).
  55. Hua, Z., Younce, F., Tang, J., Ryu, D., Rasco, B., Hanrahan, I., Zhu, M.J., Efficacy of saturated steam against *Listeria innocua* biofilm on common food-contact surfaces. *Food Control.*, **125**, 107988 (2021).
  56. Roberts, P.B., Food irradiation is safe: Half a century of studies. *Radiat. Phys. Chem.*, **105**, 78-82 (2014).
  57. Bhilwadikar, T., Pounraj, S., Manivannan, S., Rastogi, N.K.,

- Negi, P.S., Decontamination of microorganisms and pesticides from fresh fruits and vegetables: A comprehensive review from common household processes to modern techniques. *CRFSFS*, **18**, 1003-1038 (2019).
58. Bilek, S.E., Turantas, F., Decontamination efficiency of high power ultrasound in the fruit and vegetable industry, a review. *Int. J. Food. Microbiol.*, **166**, 155-162 (2013).
  59. Guan, W., Fan, X., Yan, R., Effects of UV-C treatment on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, microbial loads, and quality of button mushrooms. *Postharvest Biol. Technol.*, **64**, 119-125 (2012).
  60. Ha, J.H., Jeong, S.H., Ha, S.D., Synergistic effects of combined disinfecting treatments using sanitizers and UV to reduce levels of *Bacillus cereus* in oyster mushroom. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.*, **54**, 269-274 (2011).
  61. Yuk, H.G., Yoo, M.Y., Yoon, J.W., Marshall, D.L., Oh, D.H., Effect of combined ozone and organic acid treatment for control of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* on enoki mushroom. *Food Control.*, **18**, 548-553 (2007).
  62. Yoon, J.H., Jeong, D.Y., Lee, S.B., Kim, S.R., Control of *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* O157:H7 in enoki mushrooms (*Flammulina velutipes*) by combined treatments with organic acids, nisin, and ultrasound. *Food Control.*, **129**, 108204 (2021).
  63. Yoon, J.H., Chu, H., Jeong, D.Y., Choi, S., Hwang, I.J., Lee, S.Y., Kim, S.R., Decontamination of *Listeria monocytogenes* in enoki mushrooms using a 405-nm light-emitting diode illumination combined with organic acid dipping. *LWT.*, **133**, 110048 (2020).
  64. Ha, J.H., Jeong, S.H., Ha, S.D., Synergistic effects of combined disinfection using sanitizers and UV to reduce the levels of *Staphylococcus aureus* in oyster mushrooms. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.*, **54**, 447-453 (2011).