

팽이버섯의 저장유통 중 품질유지를 위한 수확 후 관리 기술 연구 동향

김동신¹ · 한경숙² · 박혜성² · 조재한^{1,*}

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 저장유통과

²농촌진흥청 국립원예특작과학원 버섯과

Research trends in postharvest technologies for quality preservation of *Flammulina velutipes* during storage and distribution

Dong-Shin Kim¹, Kyung-Sook Han², Hye-Sung Park², and Jae-Han Cho^{1,*}

¹Postharvest Technology Division, National Institute of Horticultural and Herbal Science, RDA, Wanju 55365, Korea

²Mushroom Research Division, National Institute of Horticultural and Herbal Science, RDA, Eumseong 27709, Korea

ABSTRACT: *Flammulina velutipes* highly valued and widely consumed because of its nutritional and functional benefits, and its global demand is steadily increasing. However, rapid quality deterioration and short shelf life create an urgent need for effective preservation and advanced quality assessment of *Flammulina velutipes*. The aim of this review was to identify methods that reduce postharvest quality loss, extend shelf life, and optimize storage and distribution practices for *Flammulina velutipes*. Chemical treatments (including antioxidants, 1-methylcyclopropene, and edible coatings), low-temperature plasma, and innovative nanocomposite-based packaging have been effective in maintaining *Flammulina velutipes* quality after harvest. Nevertheless, further discussions on the economic feasibility, safety, and sustainability of these technologies are essential for their practical and industrial applications in *Flammulina velutipes* preservation.

KEYWORDS: *Flammulina velutipes*, Quality deterioration mechanism, Postharvest technologies

서론

버섯은 전 세계적으로 약 2,000여종 이상 보고되어 있지만, 그 중 식용으로 소비되는 종류는 느타리속버섯(*Pleurotus*

spp.), 양송이버섯(*Agaricus bisporus*), 표고(*Lentinus edodes*), 팽이버섯(*Flammulina velutipes*) 등이 있다(Xia *et al.*, 2024). 또한 세계 식용버섯 생산량은 2000년 이후 경제 발전에 따라 점점 증가하고 있으며, 유엔 식량 농업기구에 따르면 버섯 시장은 2025년 204억 달러에 달할 것으로 예상하기도 하였다(Xia *et al.*, 2024). 식용버섯 중 팽이버섯은 한국, 중국, 일본 등 아시아 국가에서 재배되는 식용버섯으로 국, 샐러드 등 다양한 방식으로 소비되고 있다(Sharma *et al.*, 2021). 팽이버섯은 또한 식이섬유, 비타민 B군, 아미노산, 미네랄 및 β -glucan 같은 성분들로 인하여 영양적 측면에서 매우 우수하며(Kang, 2012), 항산화(Lee *et al.*, 2018), 항염증(Kang, 2012), 항돌연변이(Oh *et al.*, 2010) 및 항암효과(Lee *et al.*, 2009) 등 기능성을 가진 건강식품으로서의 가치 또한 높다.

국내 팽이버섯은 1990년도 이후부터 병 재배법과 액체종균 제조기술, 생산시설의 자동화로 대량생산과 연중재배가 가능해졌으며 생산량과 소비가 증가하는 추세이다(Im *et al.*, 2023). 현재 국내에서는 19농가에서 팽이버섯을 재배하는 것

J. Mushrooms 2024 December, 22(4):157-166

<http://dx.doi.org/10.14480/JM.2024.22.4.157>

Print ISSN 1738-0294, Online ISSN 2288-8853

© The Korean Society of Mushroom Science

Dong-Shin Kim(Researcher), Kyung-Sook Han(Senior Researcher), Hye-Sung Park(Researcher), Jae-Han Cho(Researcher)

*Corresponding author

E-mail : limitcho@korea.kr

Tel : +82-43-238-6522

Received November 18, 2024

Revised November 27, 2024

Accepted December 2, 2024

This is an Open-Access article 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.

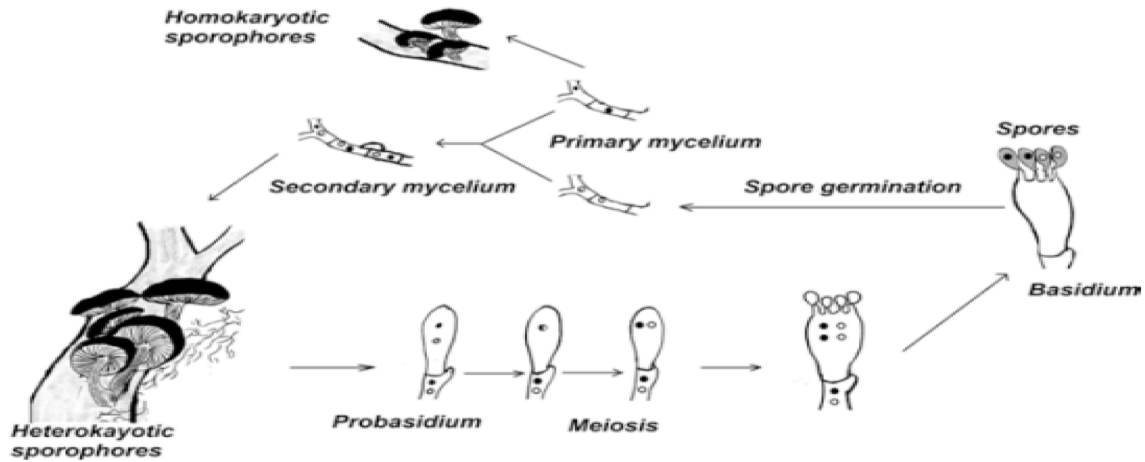


Fig. 1. Life cycle of *Flammulina velutipes* (Sharma et al., 2021).

으로 조사되고 있으며 연간 27,000톤 이상 생산되고 있다(Lee et al., 2023). 국내 생산되는 팽이버섯은 대부분 백색 품종으로 백아, 설성, 백작, 우리1호, 백승, 백이와 같은 품종들이 대표적이며(Lee et al., 2023), 야생 균주를 기반으로 한 갈뿔, 여름향1호, 여름향2호, 금향2호, 아삭골드 등 갈색 품종들 또한 개발되었다(Im et al., 2023; Lee et al., 2023). 그러나 팽이버섯은 수확 후에도 호흡과 대사 작용이 활발하기 진행되어 품질 저하가 빠르게 일어난다(Lim et al., 2014; Kim et al., 2016). 또한 다른 버섯류에 비해 상대적으로 얇은 갓과 긴 대가 있어 기계적 손상이 잦고(Shin et al., 2009), 최근 미국 수출 팽이버섯에 *Listeria monocytogenes*가 검출되는 등 미생물오염에 취약하다(Pereira et al., 2023).

일반적으로 식용버섯은 수확 후 modified atmosphere(MA) 필름으로 포장 후 상온 또는 저온저장하여 유통하는 방법이 보편적으로 사용되고 있다(Shin et al., 2009; Choi et al., 2014; Lim et al., 2014). 팽이버섯은 100~200 g 단위로 소분되어 두께가 얇은 polypropylene(PP)필름(<20 μm)으로 감싼 뒤 스펀지 압착에 의한 유사진공 형태로 포장된다(Choi et al., 2014; Lim et al., 2014). 하지만 유통기한은 상온에서는 3~4일, 냉장에서는 8~9일로 매우 짧으며(Lim et al., 2014; Arjun et al., 2022), 소매단가 또한 150 g 당 600원 이하로 매우 낮아 특수포장재나 항균제 사용 등 수확 후 관리 기술 적용의 현실적 한계가 있다. 게다가 국내 팽이버섯의 약 40%가 해외로 수출되는 상황에서 팽이버섯의 수확 후 유통 중 신선도를 유지할 수 있는 실용적인 기술이 필요한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 팽이버섯의 생리적 특성과 수확 후 품질 저하 메커니즘을 상세히 검토하고, 국내외 연구되었던 팽이버섯 수확 후 관리 최신 연구 동향을 심도 있게 분석하여 수확 후 품질유지를 위한 미래 방향을 제시하고자 한다.

팽이버섯의 생리적 특성

자연상태의 팽이버섯은 아열대부터 온대 지역에 이르는 다

양한 기후에서 나무 줄기, 그루터기, 활엽수 뿌리 등에 군집 형태로 무리 지어 자란다(Sharma et al., 2021). 분류학적으로 Hughes 등 (1999)은 북반구의 *Flammulina* 속 중에 *F. velutipes*, *F. mexicana*, *F. populicola*, *F. rossica*, *F. ononidis*, *F. elastica* 및 *F. fennae* 등이 포함된다고 제안했으며, Bas (1983)는 *F. velutipes*를 두 가지 변종, *F. velutipes* var. *velutipes*와 흰색 또는 크림색의 갓을 가진 창백한 형태인 *F. velutipes* var. *ladea*로 분류했다. 또한 *velutipes*의 다양성은 추가로 *F. velutipes*와 *F. longispora*의 두 형태로 세분화되기도 하였다(Sharma et al., 2021). 팽이버섯의 형태적 특징은 품종마다 다르지만 일반적으로 자연종은 자실체의 색이 노란색 또는 갈색인 반면, 재배종은 대가 가늘며 갓은 흰색이다. 또한 팽이버섯의 갓의 직경은 2~8 cm, 대의 크기는 2~8 cm × 2~8 mm이며, 포자문은 백색이고 포자의 크기는 4.5~7.0 × 3.0 × 4.5 μm의 타원형이다(Sharma et al., 2021).

팽이버섯의 생활주기는 자실체→담자포자→단핵균사→이핵균사(세포질 융합, 클램프 형성)→핵융합(n+n→2n)→감수분열→담자기형성→담자포자 형성(n)→자실체 순으로 이루어진다(Fig. 1). 특히 팽이버섯은 일반 버섯류의 생활주기와는 다소 다른 차이를 보이며, 단핵균사가 바로 자실체를 형성할 수 있으며, 성장 중에 이핵균사가 분열자를 형성, 탈이핵화 현상을 나타낸다(Sharma et al., 2021).

팽이버섯의 수확 후 품질저하 메커니즘

일반적으로 식용버섯의 수확 후 유통 중 품질저하 요인은 연화, 갈변, 외형변화, 수분손실, 맛·향 손실이 있으며, 팽이버섯인 경우도 이와 크게 다르지 않다.

외형변화

팽이버섯은 수확 후에도 호흡이 계속되며, 저장이 진행됨에 따라 갓이 신장-개열되거나 대 신장, 그리고 포자가 방출되는 외형적 변화가 발생한다(Kang et al., 2001). 이러한 변화는 품질 손실을 가속화하고 시각적으로 부정적인 인식을 야기하

여 소비자층의 선호도 감소로 이어질 수 있다(Xia *et al.*, 2024). 버섯류의 세포벽은 일반적으로 chitin과 β -glucan으로 구성된 복합 구조로, 버섯은 형태 형성 과정에서 여러 구조적 변화와 재구성이 발생한다(Cao *et al.*, 2024). 팽이버섯에서의 수확 후 대 신장은 세포벽의 주요 구성 다당류인 β -glucan과 chitin을 분해하는 $\text{exo-}\beta$ -1,3-glucanase와 chitinase의 활성 증가가 주요 원인으로 보고되어 있다(Zhao *et al.*, 2023). 선행연구에서는 수확 후 표고버섯과 풀버섯(*Volvarella volvacea*)에서 $\text{exo-}\beta$ -1,3-glucanase의 발현 유전자인 *exg2*의 고농도 확산이 버섯의 줄기-갓 팽창 및 자실체 노화에 모두 관여한다고 제시하였다(Tao *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2021).

팽이버섯의 갓은 저장이 진행됨에 따라 포자를 노출하기 위해 외부로 확장된 뒤 위로 개열된다(Zhao *et al.*, 2023). 식용버섯에서는 포자 방출 시점이 버섯의 호흡이 절정에 달하는 시점과 일치하므로 수확 후 버섯 노화의 시작점으로 간주하기도 한다(Singh *et al.*, 2010). 반면, 팽이버섯의 갓 신장 및 개열과 관련된 유전자는 보고된 바가 거의 없으나, 유사 사례로 표고버섯에서는 수확 후 *Dmc1*과 *Cdc28*의 발현이 증가하고, 포자 방출 후 하향 조절되어 포자 형성 및 방출을 조절한다고 보고된 바 있다(Sun *et al.*, 2020). 양송이버섯의 수확 후 호흡 절정 시기에 trehalose, mannitol, glycogen과 같은 특정 대사물질들의 생성이 갓 개열 및 포자 방출과 연관이 있을 수 있다고 보고되었으며(Singh *et al.*, 2010; Criado *et al.*, 2021), Fang 등(2017)도 nanoparticles(nano-TiO₂ 및 nano-SiO₂)가 포함된 polyethylene 필름으로 포장된 팽이버섯의 저온저장 중 β -glucosidase와 trehalase의 발현 억제가 대 신장 억제와 연관이 있다고 제안하였다.

연화 및 수분손실

식용버섯은 수확 후 구조 다당류의 파괴, 세포막 지질 과산화 등 다양한 이유에 의해 연화가 발생하며(Xia *et al.*, 2024), 그 중 주요 원인은 구조 다당류의 분해에 의한 세포벽이 파괴이다(Khan *et al.*, 2017; Ni *et al.*, 2017; Guo *et al.*, 2022). 팽이버섯은 cellulose, β -glucan, chitin이 주요 구조 다당류로 보고되어 있으며(Zhao *et al.*, 2023), cellulase, β -glucosidase, β -1,3-glucanase, chitinase와 같은 구조 탄수화물 분해효소의 활발한 발현이 팽이버섯의 연화와 직접적인 연관이 있다고 보고되었다(Fang *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2023). 또한 pectin methyltransferase, polygalacturonase과 같은 펙틴분해효소 활성 증가도 수확 후 팽이버섯의 연화와 연관이 있다(Wang *et al.*, 2022). 식용버섯 중 하나인 먹물버섯(*Coprinus comatus*)에서는 fumarate reductase의 발현이 증가하여 fumaric acid를 succinic acid로 환원하는 비가역적 반응도 자실체의 연화와 관련이 있다고 보고되었다(Qu *et al.*, 2022).

수분은 팽이버섯의 품질 저하에 미치는 중요 요소 중 하나로 pectin이나 cellulose 같은 세포벽 구성 다당류에 결합되어 있다(Cao *et al.*, 2024). 하지만 수확 후 호흡과 효소활성 등에 의한 세포벽-세포막 손상은 버섯 내에 고정되어 있던 수분을 유

출시키고(Zhao *et al.*, 2022), 그 결과 버섯의 수축과 중량 손실 등의 품질 저하가 발생한다(Paudel *et al.*, 2016; Zalewska *et al.*, 2021). 또한 버섯에서 수분이 유출되면 맛의 변화로 인해 소비자 기호도에 영향을 줄 수 있다(Xia *et al.*, 2024). 특히 팽이버섯은 대와 갓이 얇아 표면적이 넓은 형태적 특성으로 인해 다른 버섯류에 비해 저장 중 수분이 빠르게 손실된다(Kang *et al.*, 2001).

갈변

팽이버섯은 수확 후 조직이 손상되어 산소에 노출되면 산화 스트레스가 증가하여 갈변 현상이 나타나게 되며(Xia *et al.*, 2024), 주로 흰색 품종에서의 갈변이 소비자 선호도에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 농식품 소재에 있어 주요 갈변은 비효소적 갈변(Maillard reaction 및 caramelization)과 효소적 갈변으로 나뉘는데(Friedman, 1996) 버섯류의 갈변은 주로 활성산소종(reactive oxygen species, ROS)와 폴리페놀 산화효소(polyphenol oxidase, PPO)에 의해 발생한다(Shekari *et al.*, 2021). 일반적으로 식용버섯류는 저장 조건과 성장 조건이 다르므로 자실체 세포 내 전자 이동이 차단되고 ROS가 축적되며, 축적량이 버섯 자체 항산화 능력을 초과하면 산화 스트레스를 유발하여 지질과 단백질 산화, 효소활성 저해, 세포와 세포 소기관의 손상을 초래한다(Wang *et al.*, 2021). 그 결과 액포에서 방출된 버섯의 페놀화합물은 엽록체에서 방출된 PPO와 반응하여 갈변을 유도한다(Shekari *et al.*, 2021). 버섯에서의 주요 PPO는 tyrosinase와 laccase가 있으며, 이들 요소는 모두 페놀화합물을 기질로 하여 최종 산물인 멜라닌 생합성에 관여한다(Xia *et al.*, 2024). 특히 cold plasma 처리를 한 팽이버섯의 저장 중 품질연구 결과에서는 팽이버섯의 저장 중 높게 유지된 PPO 활성이 버섯 갈변에 영향을 주었다고 보고하였다(Ding *et al.*, 2023). 특히 catecholase 또는 diphenol oxidase로 불리는 tyrosinase는 특히 팽이버섯의 갈변 원인으로 알려진 PPO의 한 종류로서, 방향족 아미노산인 tyrosine과 같은 monophenol류를 L-3,4-dihydroxyphenylalanine(L-DOPA)로 전환 후 산화과정을 통해 melanin 생합성에 관여한다(Zhu *et al.*, 2023).

관능성분 손실

팽이버섯의 맛은 주로 5'-nucleotides류의 핵산, 일부 아미노산(glutamic acid 및 aspartic acid), 펩타이드, 및 유기산의 조성에 따라 달라지며, 특히 핵산류와 glutamic acid, aspartic acid는 팽이버섯의 감칠맛에 관여한다(Xia *et al.*, 2021). 팽이버섯의 감칠맛 성분들은 수확 후 저장하는 동안 내인성 가수분해효소의 작용, pH, 온도 및 미생물 발효에 의한 복합적인 반응에 의해 변화될 수 있다(Sun *et al.*, 2020; Xia *et al.*, 2021). 팽이버섯에서 감칠맛 성분 변화를 규명한 연구는 없으나 느타리버섯(*P. geesteramus*)의 수확 후 ATP와 AMP 함량이 높은 고에너지 상태에서 감칠맛 손실 억제와 상관관계가 있다고 보고하였다(Zhang *et al.*, 2019). 또한 느티만가다버섯(*Hypsizygus marmoreus*)의 수확 후 에너지 대사 조절을 통해 감칠맛 성분의

조성을 변화시킬 수 있다고 보고하였다(Yan *et al.*, 2020).

팽이버섯의 향을 나타내는 주요 성분은 알코올, 케톤, 알데하이드류의 성분들로 보고되었으며, 3-octanone과 5-methyl-5-hepten-3-one과 같은 케톤류와 3-octanol이나 1-hexanol 같은 알코올류가 주로 향기에 관여한다(Yang *et al.*, 2016). 특히 3-octanol은 식용버섯에서 버섯향을 강하게 나타내는 화합물로 보고되어 있다(Hou *et al.*, 2022). 수확 후 버섯의 향기성분은 지방산, 아미노산, 리놀렌산 및 페닐알라닌의 대사 과정에 의해 발생하며, 특히 수확 후 버섯의 지방산 대사는 lipoygenase 및 관련 효소들에 의해 지방산이 분해되어 버섯의 휘발성 알코올 및 케톤류 생성에 관여한다(Sun *et al.*, 2020).

미생물오염

팽이버섯의 높은 수분 함량은 미생물이 번식하기 좋은 환경을 제공하며, 특히 부적합한 저장 온도와 습도에 의해 곰팡이와 같은 미생물에 의한 부패가 발생하기 쉽다(Li *et al.*, 2022a). 식용버섯류의 주요 부패 박테리아는 *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Pantoea* 및 *Rahnella*속 균류가 대표적이며, 이들은 다양한 효소들을 보유하고 있어 버섯의 탄수화물이나 단백질을 분해하여 독소를 생성하는 등 자실체의 연화 및 부패를 촉진한다(Cao *et al.*, 2024). 또한 2020년도에 미국과 캐나다로 수출된 팽이버섯에서 주요 식중독균인 *Listeria monocytogenes*가 검출되기도 하였다(Pereira *et al.*, 2023). 팽이버섯에서의 미생물 오염은 주로 팽이버섯 생육 전 균류기 과정, 수확 중 및 수확 후 공정에서 발생하며, 작업장 위생과 포장재의 청결, 저장 환경이 미생물 오염 방지에 중요한 요소로 작용할 수 있다(Chung *et al.*, 2023).

에틸렌 민감성

팽이버섯의 에틸렌 민감성과 관련된 연구 사례는 없지만, 에틸렌이 버섯의 노화에 영향을 미친다는 보고(Li *et al.*, 2022a; Zhang *et al.*, 2022)는 팽이버섯 또한 에틸렌에 민감할 수 있다는 사실을 시사한다. 에틸렌은 버섯에서 1-aminocyclopropane-1-carboxy acid(ACC) 경로를 통해 ACC 합성효소와 ACC 산화효소의 작용에 의해 합성된다(Zhang *et al.*, 2016). 또한 식용버섯의 수확 후 노화 조절에 관한 메커니즘은 호흡형 과일과 유사하며(Li *et al.*, 2022a), 포장필름의 수분투과도 제어를 통해 풀버섯의 자가분해를 조절한 연구에서는 버섯에는 두 개의 hybrid histidine kinase가 존재하며, 이 두 수용체가 에틸렌 반응의 증가를 조절한다고 보고되어 있다(Wang *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). 결과적으로 팽이버섯에서 에틸렌 민감성과 관련된 인자들의 발현이 관계가 있는지, 그리고 수확 후 관련 인자들의 감소나 활성을 조절하는 연구가 필요하다.

팽이버섯의 수확 후 관리 기술

팽이버섯은 수확 후 관행적으로 PP필름으로 감싼 뒤 스펀지 로 압착하여 탈기하여 포장되며, 0~2°C 온도에서 저온저장 한

다(Choi *et al.*, 2014; Lim *et al.*, 2014). 관행적 조건에서의 저장 기간은 28일이며(Park *et al.*, 2001), 실질적으로 대형마트나 시장에 유통되는 온도인 10°C에서는 9일간 품질 유지가 가능한 것으로 보고되어 있다(Lim *et al.*, 2014). 하지만 수확 후 품질변화가 심한 팽이버섯의 선도 유지 기술의 요구로 인하여 화학제 처리, 식용 코팅, 나노복합소재를 기반으로 한 팽이버섯 포장재 등 다양한 최신 기술이 개발되고 있다(Table 1).

화학제 처리

화학제 처리는 식용버섯에 있어 사용되는 대표적인 화학제의 종류는 항산화제, 식용 코팅제, 오존 등이 대표적이다(Cao *et al.*, 2024). 식용버섯의 수확 후 관리에 사용될 항산화제는 높은 활성과 독성 및 잔류물이 없어야 하며, 대표적으로 활용되는 예는 methyl jasmonate와 1-methylcyclopropene(1-MCP)가 있다(Xia *et al.*, 2024). 팽이버섯에서는 1-MCP가 활용된 사례가 있으며, Xia 등(2021)은 수확 전·후 1-MCP 처리(7 µL/L 1-MCP, 18 ± 2°C, 5 h)에 따른 팽이버섯의 저장(10°C) 중 품질변화를 관찰하였으며, 수확 전 1-MCP 처리가 수확 후 팽이버섯의 저장기간을 8일에서 10일로 연장되었다고 보고하였다. 또한 수확 전 1-MCP 처리는 수확 후 팽이버섯의 저장 중 호흡량과 에틸렌 생성을 급격히 감소시키고 감칠맛 성분인 5'-nucleotides의 함량을 증가시키고 향기성분 함량을 유지시키는 등 관능적인 특성에 긍정적으로 작용했다고 보고하였다(Xia *et al.*, 2021). Wang 등(2022)은 1-MCP(5.625 µL/L)처리와 + PP crisper(294 × 210 × 215 mm, 4 mm thickness)의 동시 적용은 수확 후 팽이버섯의 연화와 목질화를 지연시켰으며, 관련 효소 유전자들인 phenylalanine ammonia-lyase(PAL), cinnamyl alcohol dehydrogenase(CAD), cellulase(Cx), pectin methylesterase(PME) 및 polygalacturonase(PG)의 전사 수준을 감소시켰다고 보고하였다. 또한 scanning electron microscopy(SEM)와 transmission electron microscopy(TEM)에 의해 1-MCP처리와 PP crisper의 동시 적용은 팽이버섯의 세포 구조 무결성과 안정성이 유지되었고 세포막의 파열이 관찰되지 않았다고 보고하였다(Wang *et al.*, 2022).

가식성 코팅 처리 기술은 식품 등급의 코팅제에 식품을 직접 담그거나 분무한 다음 건조하여 형성된 식용 가능한 얇은 층을 형성하는 기술이다(Ribeiro *et al.*, 2024). 식용 버섯에서 사용되었던 가식성 코팅에 사용되는 기질은 alginate(Zhu *et al.*, 2019), cellulose(Louis *et al.*, 2022), chitosan(Diaz Montes *et al.*, 2021), gelatin(Roy *et al.*, 2022), 및 인지질(Cavusoglu *et al.*, 2021)이 있으며, 이들 가식성 코팅은 식품 표면 향미 물질 방출 억제, 수분 손실 감소, 산소 접촉 차단과 같은 기능이 있어 수확 후 버섯에 광범위하게 적용되고 있다(Cao *et al.*, 2024; Xia *et al.*, 2024). 수확 후 팽이버섯에서도 가식성 코팅을 적용한 사례가 있으며, Li 등(2022b)은 수확 후 팽이버섯에 0.2% glutathione이 포함된 carboxymethyl chitosan 코팅을 적용하였으며, 3°C에서 12일 저장하였을 시 무처리군에 비해 호흡량, 중량감소율, 갈변 정도가 감소하였으며, 관능적 품질 저하를 억제함과 동시에 저장기

Table 1. Postharvest techniques for *Flammulina velutipes*

Techniques	Material property	Processing conditions	Results	Ref.
Chemical treatment	Ozone + citric acid solution	3 ppm ozone (w/v) + 1% citric acid (w/v)/immersion for 5 min	Reduction in <i>E. coli</i> O157 and <i>L. monocytogenes</i>	Yuk <i>et al.</i> , 2007
	Organic acids (lactic acid, malic acid, citric acid) solutions	3% lactic acid (w/v) or 3% malic acid(w/v)/immersion for 10 min	Reduction in <i>L. monocytogenes</i>	Kim <i>et al.</i> , 2020
	Caprylic acid + thymol solution	0.4% caprylic acid + 0.15% thymol/ immersion for 10 min at 22°C	Reduction in <i>L. monocytogenes</i> without quality deterioration	Chung <i>et al.</i> , 2023
Cold plasma	1-MCP	7 µL/L 1-MCP/pre-harvest exposure for 5 h at 18°C	Inhibition of respiration and ethylene production; preservation of flavor qualities	Xia <i>et al.</i> , 2021
	1-MCP + PP crisper	PP crisper(294 × 210 × 215 mm, 4 mm thickness) with 5.625 µL/L 1-MCP	Inhibition of softening and lignification; maintenance of cell integrity	Wang <i>et al.</i> , 2022
	Isoamyl ITC	50 µL/L isoamyl ITC/exposure for 15 min at 25°C	Inhibition of microbial growth and browning; increase in antioxidant enzyme activity	Zhu <i>et al.</i> , 2023
MA packaging	Carboxy chitosan + glutathione edible coating	1% carboxy chitosan + 1% glutathione (w/v)	Inhibition of respiration, weight loss, and browning	Li <i>et al.</i> , 2022
	Pullulan + soybean lecithin/ cinnamaldehyde emulsion coating	6% pullulan (w/v) + 1% soybean lecithin (w/v) + 5 % cinnamaldehyde (w/v)	Reduction in ROS accumulation; increase in antioxidant enzyme activity; maintenance freshness	Shao <i>et al.</i> , 2023
	Cold plasma treatment	150 Hz + 95 kV/treatment for 150 s	Reduction in microbial growth; maintenance antioxidant activity; prevention of cell damage and browning	Ding <i>et al.</i> , 2022
Nano-PM	LDPE film + active MA	LDPE film (20 µm thickness) + CO ₂ :O ₂ :N ₂ = 50:10:40	Prevention of quality deterioration (off-odor, browning, and decay)	Shin <i>et al.</i> , 2009
	High-oxygen active MA	O ₂ :N ₂ = 80:20	Increase in antioxidant enzyme activity; prevention of browning	Wang <i>et al.</i> , 2011
	OPP film + vacuum packaging	OPP film (20 µm thickness) + vacuum	Maintenance of color and texture; inhibition of respiration and browning	Lim <i>et al.</i> , 2014
Nano-PM	Nano-Ag, TiO ₂ , SiO ₂ , attapulgite	nano-Ag:nano-TiO ₂ :nano-SiO ₂ :attapulgite = 30:35:10:25 (wt.%)	Inhibition of weight loss, respiration, and postharvest growth (cap opening and stripe elongation)	Donglu <i>et al.</i> , 2016a
	Nano-Ag, TiO ₂ , SiO ₂ , attapulgite	nano-Ag:nano-TiO ₂ :nano-SiO ₂ :attapulgite = 30:35:10:25 (wt.%)	Reduction of ROS production	Donglu <i>et al.</i> , 2016b
	Nano-Ag, TiO ₂ , SiO ₂ , attapulgite	nano-Ag:nano-TiO ₂ :nano-SiO ₂ :attapulgite = 30:35:10:25 (wt.%)	Maintenance of flavor components and nutrients	Donglu <i>et al.</i> , 2017
	Nano-Ag, TiO ₂ , SiO ₂ , attapulgite	nano-Ag:nano-TiO ₂ :nano-SiO ₂ :attapulgite = 30:35:10:25 (wt.%)	Improvement of appearance quality; Reduction of weight loss and cap opening	Shi <i>et al.</i> , 2018
	Nano-Ag, TiO ₂ , SiO ₂ , attapulgite	nano-Ag:nano-TiO ₂ :nano-SiO ₂ :attapulgite = 30:35:10:25 (wt.%)	Maintenance of mitochondria membrane and ATP content	Yang <i>et al.</i> , 2019
	Nano-Ag, TiO ₂ , SiO ₂ , attapulgite	nano-Ag:nano-TiO ₂ :nano-SiO ₂ :attapulgite = 30:35:10:25 (wt.%)	Inhibition of cell membrane damage; maintenance ATP content	Shi <i>et al.</i> , 2020
	Nano-Ag, TiO ₂ , SiO ₂ , attapulgite	nano-Ag:nano-TiO ₂ :nano-SiO ₂ :attapulgite = 30:35:10:25 (wt.%)	Maintenance of mitochondria membrane and ATP content; improvement of stress resistance	Zuo <i>et al.</i> , 2021
	Nano-Ag	Nano-Ag	Inhibition of chitinase and β-1,3-glucanase activities; Reduction of growth hormone levels	Zhao <i>et al.</i> , 2022
	I-MCP, 1-methylcyclopropene; PP, polypropylene; ITC, isothiocyanate; ROS, reactive oxygen species; LDPE, low-density polyethylene; OPP, oriented polypropylene; Nano-PM, nanocomposit packing material; ATP, adenosine triphosphate.			

간이 최소 6일 연장되었다고 보고하였다. 또한 Shao 등(2023)은 수확 후 팽이버섯에 pollulan을 안정제로 사용한 인지질/cinnamaldehyde 에멀전으로 코팅하여 10°C에서 12일간 저장하였으며, 6% pullulan을 첨가한 에멀전에서 저장 중 팽이버섯의 색변화를 억제하고 catalase와 superoxide dismutase와 같은 항산화효소의 활성을 증가시켜 ROS의 함량을 감소시켜 팽이버섯의 유통기한을 연장시켰다고 보고하였다.

팽이버섯의 수확 후 화학제 처리는 미생물 오염 억제에도 활용될 수 있다. 특히 최근 팽이버섯의 수출 안정성 확보를 위해 수확 후 버섯에 오염된 *L. monocytogenes*의 성장을 억제하기 위한 여러 연구도 수행되고 있다. Yuk 등(2007)은 3 ppm 오존과 1% citric acid 병용 처리가 초기 *L. monocytogenes* 생존율을 약 1.32 log까지 감소시키는 데 효과가 있었으나, 장기 저장 중에는 *L. monocytogenes*가 재성장 되었다고 보고하였다. Kim 등(2020)은 수확 후 팽이버섯에서 acetic acid, lactic acid 및 malic acid같은 유기산 처리에 의한 *L. monocytogenes* 저감 효과를 조사하였으며, 3% lactic acid 또는 3% malic acid에 10분 이상 처리했을 때 3 log 수준의 성장 억제 효과가 있다고 보고하였다. Chung 등(2023)도 낮은 농도의 caprylic acid(0.4%, w/v)와 thymol(0.15%, w/v) 동시처리 의해 팽이버섯의 품질 저하 없이 오염된 *L. monocytogenes*의 성장을 억제하였다고 보고하였다. Zhu 등(2023)은 50 µL/L 농도의 isoamyl isothiocyanate(IAITC)를 팽이버섯에 처리하였을 시 팽이버섯 표면의 주요 박테리아 군집인 *Serratia*속 미생물의 성장을 억제하는 효과가 있다고 보고하였다. 또한 IAITC 처리에 의해 팽이버섯의 저장 중 tyrosinase 활성 억제를 통한 갈변 억제, 아미노산과 지방산 함량 유지, chitin 함량 증가, 중량감소 억제 및 세포손상 억제 등 전반적으로 팽이버섯 수확 후 품질 유지에 긍정적인 효과를 보였다고 보고하였다(Zhu et al., 2023).

저온 플라즈마(Cold plasma)

플라즈마는 고에너지 전자에 의한 기체의 분해에 의해 생성되는 물질의 4번째 상태를 의미하며, 특히 저온 플라즈마는 새로운 저온 살균 및 보존 기술로 식용버섯의 수확 후 관리에 있어 주목받고 있다(Cao et al., 2024). 식용버섯과 같은 식품 소재는 plasma activated water, dielectric barrier discharge (DBD), negative air ion 방식에 의해 저온 플라즈마를 생성하는 방식이 주로 사용되며, 이러한 기술들은 버섯의 미토콘드리아 세포막 전위를 감소시켜 에너지 이용률을 개선하고, 결과적으로 저장 기간 동안 버섯의 노화를 지연시키는 것으로 보고되었다(Xu et al., 2014; Gavahien et al., 2020; Pourbagher et al., 2021; Jiang et al., 2022; Zhang et al., 2022). 팽이버섯에는 DBD 방식이 적용된 바 있으며, Ding 등(2022)은 DBD 방식에 의한 팽이버섯의 수확 후 저온 플라즈마 처리 조건을 최적화하였고(150 Hz, 95 kV 및 150 s), 저온 플라즈마 처리가 팽이버섯의 저장 중 미생물 증식을 억제하고 항산화 효소 활성을 증가시키며 갈변과 세포 손상을 줄여 전반적인 저장 품질을 개선하고 저장기간을 연장했다고 보고하였다.

포장기술

식용버섯의 포장에는 modified atmosphere(MA) 필름 또는 용기를 사용한 MA포장이 주로 활용되고 있다. MA포장은 포장 시 기체 조성을 인위적으로 조절하는 active MA와 포장 후 농산물의 호흡에 의해 포장 내 기체 조성이 자연스럽게 조절되는 passive MA로 나뉜다(Rashvand et al., 2023). 하지만 팽이버섯은 수확 후에도 호흡과 대사작용이 활발하기 때문에(Lim et al., 2014; Kim et al., 2016) 비교적 접근이 용이한 MA포장에 의한 호흡조절 및 선도유지 효과를 규명하는 연구가 수행되었다. Shin 등(2009)은 20 µm 두께의 low-density polyethylene(LDPE) 필름을 사용하여 팽이버섯의 진공포장, passive MA 및 active MA 포장에 따른 저장 중 품질변화를 관찰하였으며, CO₂:O₂:N₂ 비율이 50%:10%:40%인 active MA 조건에서 1°C 12일 저장 동안 이취, 변색, 부패 등이 발생하지 않았다고 보고하였다. 또한 Wang 등(2011)은 O₂:N₂ 비율이 80%:20% 조건인 active MA포장이 저장 중 팽이버섯의 SOD나 CAT 같은 항산화 효소의 활성을 증가시키고 PPO의 활성을 감소시켜 저장 중 팽이버섯의 품질 유지와 유통기한 향상에 기여하였다고 보고하였다. 게다가 Lim 등(2014)은 20 µm 두께의 oriented PP(OPP) 필름을 사용한 진공 포장이 10°C 저장 중 팽이버섯의 호흡률과 갈변을 지연시키고, PP+PE 합지필름 및 LDPE 필름 포장보다 유통기한을 약 14일까지 연장할 수 있다고 보고하였다.

최근 나노복합소재를 플라스틱 필름에 적용한 나노복합소재 포장재(Nano-PM)를 활용하여 팽이버섯의 선도 유지 효과를 규명하는 연구가 증가하는 추세이다(Xia et al., 2024). Nano-PM은 일반적으로 nano-Ag, nano-TiO₂, nano-SiO₂ 또는 nanoattapulgite들의 나노 입자들을 개별 또는 일정 비율 혼합하여 활용되며, 뛰어난 기체 차단력과 항균 특성 덕분에 식품의 저장성과 품질을 크게 향상시키는 방법으로 주목받고 있다(Idumah et al., 2020). 또한 Nano-PM은 식용버섯의 수확 후 저장에 있어 맛 성분을 보존시키고, 에너지 대사와 세포막 지질 대사를 조절하여 식용버섯의 노화를 늦추고 유통기한을 연장시키는 효과들이 보고되고 있다(Yan et al. 2020; Zuo et al. 2021; Cai et al. 2022; Ma et al. 2022). 팽이버섯의 수확 후 저장에서도 Nano-PM을 활용한 다양한 연구들이 수행되었다(Table 1). 특히 중국의 난징대학 연구팀은 nano-Ag, nano-TiO₂, nano-SiO₂ 및 attapulgite(30:35:10:25, wt.%)가 혼합 LDPE 필름을 제작하여 수확 후 팽이버섯의 포장에 적용하였으며, 제작된 Nano-PM이 대조군(LDPE)에 팽이버섯의 저장기간(4°C/12일) 동안 중량감소, 갓 개열, 대 신장, 호흡을 상당히 억제하였고(Donglu et al., 2016a), 저장 중 세포막 손상과 관련된 ROS 생성을 감소시켰으며(Donglu et al., 2016b), 향미성분과 영양성분 변화를 최소화하였다고 보고하였다(Donglu et al., 2017). 또한 Yang 등(2019)과 Zuo 등(2021)은 Nano-PM 포장이 에너지 대사를 조절하여 미토콘드리아의 구조적 안정성을 유지하고 ROS 생성을 감소시켜 팽이버섯의 노화를 지연시킨다고 보고하였으며, Shi 등(2020)도 Nano-PM 포장이 팽이버섯의 저장 중 세포막 손상을 억제하고 ATP 수치를 유지하여 세포 사멸을 지연시키는 데

효과적이라고 보고하였다. Zhao 등(2022)은 nano-Ag를 포함하는 Nano-PM이 팽이버섯의 저장 조건 중(4°C/18일) 높은 CO₂와 낮은 O₂ 수준을 유지하였으며, chitinase와 β-1,3-glucanase의 활성을 감소 및 auxin, abscisic acid, gibberellin, 및 cytokinin의 수준을 낮게 유지하여 결과적으로 대 신장과 같은 외형 변화를 억제하였다고 보고하였다.

기타 응용기술

팽이버섯에서 앞서 언급한 수확 후 관리 기술 이외의 응용 기술을 적용한 사례는 매우 미흡하다. 하지만 다른 식용버섯에서는 유전자편집, 초음파 처리, 방사선 조사, intense pulsed light(IPL)와 같은 기술들이 버섯의 수확 후 선도유지를 위해 적용되고 있다(Cao *et al.*, 2024; Xia *et al.*, 2024). 유전자 편집은 대표적으로 CRISPR/Cas9과 같은 기술을 활용해서 수확 후 품질 저해 관련 유전자를 편집하는 기술로, Choi 등(2023) CRISPR/Cas9을 활용해서 양송이 버섯의 PPO1 유전자를 편집하여 버섯의 갈변을 방지하였다고 보고한 사례가 있다.

초음파, 방사선 조사, IPC와 같은 물리적 처리 또한 식용 버섯에 적용될 수 있다. Zan 등(2020)은 풀버섯에 초음파 처리(40 kHz, 300 W, 10분)를 한 뒤 15°C에서 저장하였으며, 초음파 처리가 미토콘드리아에서의 호흡과 관련된 효소들(phosphohexose isomerase, succinic acid dehydrogenase 및 cytochrome C oxidase)의 활성과 전사를 감소시켰으며, 에너지 수준을 증가시키는 등 버섯의 수확 후 품질 유지에 긍정적으로 작용할 수 있다고 보고하였다. 또한 Shi 등(2022)은 초음파+방사선 복합 처리가 표고버섯의 수확 후 품질저하 원인 미생물인 *Pseudomonas aeruginosa*와 *Enterobacteriaceae*와 같은 미생물을 감소시켰다고 보고했다. IPL은 버섯에 직접 처리한 결과는 없지만, Zhang 등(2021)은 IPL 조사가 버섯에서 분리된 PPO의 활성을 억제했다고 보고하여 버섯의 수확 후 갈변억제에 활용될 가능성을 제시하였다.

향후 연구 방향

팽이버섯의 수확 후 선도유지를 위한 향후 연구 기술의 사용화 및 지속 가능한 품질 유지 방안을 모색하는 데 중점을 두어야 할 것이다. 우선 화학제 처리, 나노복합소재 필름, 가식성 코팅, 저온 플라즈마 처리 등 최신 기술들을 상업적으로 적용하기 위한 최적화 및 기술비용 절감이 필요하다. 특히 팽이버섯은 단가가 매우 낮기 때문에 기술 개발 및 적용에 있어서 경제성 검토가 필수적이며, 기술 개발 및 적용 과정에서 비용 대비 효과를 극대화 할 수 있는 방안도 필요하다. 예를 들어, 나노복합소재 필름의 경우 나노소재의 비율을 조정하거나 저비용-고효율 소재를 탐색하여 필름을 개발하는 것이 필요하다. 화학제 처리, 나노복합소재 필름 소재, 유전자 편집 기술 등은 활용 효율성과 소비자 안전성을 고려하여 상용화 가능성을 높이는 방향으로 발전시켜야 한다.

지능형 포장 시스템의 개발과 친환경 포장 소재의 연구도 고

려해야 한다. 포장 내부 상태를 실시간으로 감지하고 자동으로 조장할 수 있는 스마트 포장 기술을 도입하여 팽이버섯의 유통 중 품질 저하를 최소화 하는 연구도 필요하다. 예를 들어 온도, 습도, 기체 조성을 자동으로 조절하는 스마트 센서 기술을 적용하는 방안도 있다. 더불어 기존에 사용되는 플라스틱 소재 필름 대신 polylactic acid(PLA)나 polyhydroxyalkanoate(PHA) 같은 생분해성 바이오폴리머를 포장재로 활용하여 환경 문제를 해결하고 지속 가능한 포장 방안도 필요하다(Mármol *et al.*, 2020). 이와 함께, 글로벌 수출 시장을 겨냥하여 각국의 유통 환경에 적합한 맞춤형 품질 유지 기술 개발도 필요하다. 이러한 접근은 향후 팽이버섯 산업의 경쟁력을 강화하고 지속 가능한 발전을 도모하는 데 기여할 것이다.

적 요

본 논문에서는 팽이버섯의 저장 중 품질 저하 문제를 해결하기 위한 다양한 수확 후 관리 기술을 검토하였다. 기존에 활용되었던 MA 포장을 비롯하여 화학제 처리, 나노복합소재 필름, 가식성 코팅, 저온 플라즈마 처리 등은 팽이버섯의 미생물 증식 억제, 수분 유지, 구조적 안정성 강화 등의 측면에서 상당한 효과를 보였다. 특히 MA 포장과 나노복합제 필름은 팽이버섯의 호흡률을 조절하고 항산화 효소 활성화를 통해 갈변을 억제하는 데 유리한 역할을 하여, 소비자에게 더욱 신선한 상태로 공급될 수 있는 가능성이 있다. 가식성 코팅제와 1-MCP 처리는 팽이버섯의 외관과 향미를 유지하며 갈변을 줄여주어 관능적 품질을 더욱 개선시킬 수 있음을 보여주었다. 저온 플라즈마 처리는 항산화 활성 증가와 산화적 스트레스 억제를 통해 버섯의 생리적 안정성도 유지하여, 신선도 연장에 크게 기여할 수 있는 가능성이 있다. 다만 해당 기술들을 팽이버섯 수확 후 관리에 적용하려면 경제성 분석과 안전성 검증, 그리고 지속 가능성이 필수적으로 검토되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: RS-2023-00230820)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Bas C. 1983. *Flammulinain* western Europe. *Persoonia molecular phylogeny. Evol Fungi* 12: 51-66.

Cai M, Zhong H, Ma Q, Yang K, Sun P. 2022. Physicochemical and microbial quality of *Agaricus bisporus* packaged in nano-SiO₂/TiO₂ loaded polyvinyl alcohol films. *Food Control* 131: 108452.

Cao Y, Wu L, Xia Q, Yi K, Li Y. 2024. Novel post-harvest preservation techniques for edible fungi: A review. *Foods* 13: 1554.

Cavusoglu S, Uzun Y, Yilmaz N, Ercisli S, Eren E, Ekiert H, Elansary HO, Szopa A. 2021. Maintaining the quality and storage life of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) with gum, agar, sodium alginate, egg white protein, and lecithin coating. *J Fungi* 7: 614.

- Chen X, Ciarletta P, Dai HH. 2021. Physical principles of morphogenesis in mushrooms. *Phys Rev E* 103: 022412.
- Choi JW, Lee HE, Lee JH, Kim YP, Kim JG. 2014. Survey on packaging status and sensory quality of fresh-cut mushrooms from retail markets. *J Mushrooms* 12: 287-292.
- Choi Y, Eom H, Yang S, Nandre R, Kim S, Kim M, Oh Y, Nakazawa T, Honda Y, Ro H. 2023. Heterokaryosis, the main obstacle in the generation of PPO1-edited *Agaricus bisporus* by CRISPR/Cas9 system. *Sci Horti* 318: 112095.
- Chung SY, Cho TJ, Yu H, Park SG, Kim SR, Kim SA, Rhee MS. 2023. Efficacy of combined caprylic acid and thymol treatments for inactivation of *Listeria monocytogenes* enoki mushrooms in household and food-service establishments. *Food Res Int* 166: 112601.
- Criado P, Frascini C, Shankar S, Salmieri S, Lacroix M. 2021. Influence of cellulose nanocrystals gellan gum-based coating on color and respiration rate of *Agaricus bisporus* mushrooms. *J Food Sci* 86: 420-425.
- Díaz Montes E, Yáñez Fernández J, Castro Muñoz R. 2021. Dextran/chitosan blend film fabrication for bio-packaging of mushrooms (*Agaricus bisporus*). *J Food Process Preserv* 45: e15489.
- Ding Y, Mo W, Deng Z, Kimatu BM, Gao J, Fang D. 2023. Storage quality variation of mushrooms (*Flammulina velutipes*) after cold plasma treatment. *Life* 13: 70.
- Donglu F, Wenjian Y, Kimatu BM, Mariga AM, Liyan Z, Xinxin A, Qiuhui H. 2016a. Effect of nanocomposite-based packaging on storage stability of mushrooms (*Flammulina velutipes*). *Innov Food Sci Emerg Technol* 33: 489-497.
- Donglu F, Wenjian Y, Kimatu BM, Xinxin A, Qiuhui H, Liyan Z. 2016b. Effect of nanocomposite packaging on postharvest quality and reactive oxygen species metabolism of mushrooms (*Flammulina velutipes*). *Postharvest Biol Technol* 119: 49-57.
- Donglu F, Wenjian Y, Kimatu BM, Liyan Z, Xinxin A, Qiuhui H. 2017. Comparison of flavour qualities of mushrooms (*Flammulina velutipes*) packed with different packaging materials. *Food Chem* 232: 1-9.
- Fang D, Yang W, Deng Z, An X, Zhao L, Hu Q. 2017. Proteomic investigation of metabolic changes of mushroom (*Flammulina velutipes*) packaged with nanocomposite material during cold storage. *J Agric Food Chem* 65: 10368-10381.
- Friedman M. 1996. Food browning and its prevention: An overview. *J Agric Food Chem* 44: 631-653.
- Gavahian M, Sheu FH, Tsai MJ, Chu YH. 2020. The effects of dielectric barrier discharge plasma gas and plasma-activated water on texture, color, and bacterial characteristics of shiitake mushroom. *J Food Process Preserv* 44: e14316.
- Guo X, Chen X, Gong P, Guo J, Deng D, He G, Ji C, Wang R, Long H, Wang J, Yao W, Yang W, Chen F. 2022. Effect of shiitake mushrooms polysaccharide and chitosan coating on softening and browning of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during postharvest storage. *Int J Biol Macromol* 218: 816-827.
- Hughes KW, McGhee LL, Methven AS, Johnson JE, Petersen RH. 1999. Patterns of geographic speciation in the genus *Flammulina* based on sequences of the ribosomal ITS1-5.8S-ITS2 area. *Mycologia* 91: 978-986.
- Hou Z, Wei Y, Sun L, Xia R, Xu H, Li Y, Feng Y, Fan W, Xin G. 2022. Effects of drying temperature on umami taste and aroma profiles of mushrooms (*Suillus granulatus*). *J Food Sci* 87: 1983-1998.
- Idumah CI, Zurina M, Ogbu J, Ndem JU, Igba EC. 2020. A review on innovations in polymeric nanocomposite packaging materials and electrical sensors for food and agriculture. *Compos Interfaces* 27: 1-72.
- Im JH, Oh M, Kim M, Oh YL. 2023. Breeding a new variety of the white winter mushroom, *Flammulina velutipes* 'Baekwoon'. *J Mushrooms* 21: 241-246.
- Jiang H, Lin Q, Shi W, Yu X, Wang S. 2022. Food preservation by cold plasma from dielectric barrier discharges in agri-food industries. *Front Nutr* 9: 1015980.
- Kang JS, Park WP, Lee DS. 2001. Quality of enoki mushrooms as affected by packaging conditions. *J Sci Food Agric* 81: 109-114.
- Kang HW. 2012. Antioxidant and anti-inflammatory effect of extracts from *Flammulina velutipes* (Curtis) singer. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 41: 1072-1078.
- Khan Z, Jiayin UL, Khan NM, Mou W, Li D, Wang Y, Feng S, Luo Z, Mao L, Ying T. 2017. Suppression of cell wall degrading enzymes and their encoding genes in button mushrooms (*Agaricus bisporus*) by CaCl₂ and citric acid. *Plant Foods Hum Nutr* 72: 54-59.
- Kim KJ, Jin SE, Choi BS, Kim JK, Koh YW, Ban SE, Seo KS. 2016. Evaluation of the nutrition properties of *Flammulina velutipes*. *J Mushrooms* 14: 44-50.
- Kim SR, Kim WI, Yoon JH, Jeong DY, Choi SY, Hwang I, Rajalingam N. 2020. Growth survival of *Listeria monocytogenes* enoki mushroom (*Flammulina velutipes*) at different temperatures and antilisterial effect of organic acids. *J Food Hyg Saf* 35: 630-636.
- Lee WH, Han SR, Yu SC, Oh TJ. 2018. Comparison of physiological activities of *Flammulina velutipes* according to solvent extractions. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 47: 83-89.
- Lee KW, Seo BM, Kim SD, Jeon JO, Kim MJ, Kim JH, Jang MJ. 2023. Characteristics and breeding of a new brown variety of *Flammulina velutipes* 'Asakgold' for high quality and yield. *J Mushrooms* 21: 167-172.
- Lee SR, Nam DY, Lee HJ, Park CH, Heo JC, Kim JG, Lee JM, Lee CY, Park HJ, Lee SH. 2009. Analysis of anti-tumor activity of *Flammulina velutipes* extract on B16 cells. *Korean J Food Preserv* 16: 599-603.
- Li Y, Ding S, Kitazawa H, Wang Y. 2022a. Storage temperature effect on quality related with cell wall metabolism of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) and its modeling. *Food Packaging Shelf Life* 32: 100865.
- Li F, Han Q, Wang W, Wu S. 2022b. Carboxymethyl chitosan-based coatings loaded with glutathione extend the shelf-life of harvested enoki mushrooms (*Flammulina velutipes*). *LWT Food Sci Technol* 166: 113807.
- Lim S, Hong YP, Lee EJ, Kim J, Lee JH, Choi JW. 2014. Extension of shelf-life in golden needle mushroom (*Flammulina velutipes*) according to pressure composition packaging using oriented polypropylene film. *Korean J Food Preserv* 21: 767-775.
- Louis A, Venkatachalam S. 2022. Post-harvest quality and shelf life assessment of *Agaricus bisporus* influenced by nanocellulose/nanohemicellulose loaded starch based packaging. *Polym Compos* 43: 7538-7550.
- Ma N, Wang C, Pei F, Han P, Su A, Ma G, Kimatu BM, Hu Q, Fang D. 2022. Polyethylene-based packaging material loaded with nano-Ag/TiO₂ delays quality deterioration of *Agaricus bisporus* via membrane lipid metabolism regulation. *Postharvest Biol Technol* 183: 111747.
- Mármol G, Gauss C, Fanguero R. 2020. Potential of cellulose microfibrils for PHA and PLA biopolymers reinforcement.

- Molecules* 25: 4653.
- Ni Z, Xu S, Bu J, Ying T. 2017. Secondary metabolism associated with softening of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) induced by O₂ depletion and CO₂ accumulation. *Int J Food Sci Technol* 52: 2303-231010.
- Oh SI, Lee MS. 2010. Functional activities of ethanol extracts from *Flammulina velutipes*. *Korean J Food Nutr* 23: 15-22.
- Park YM, Lee JH. 2001. Effects of film materials, vacuum packaging and shelf temperature on the quality of peeled lance Asia bell roots. *Food Sci Biotechnol* 10: 331-334.
- Paudel E, Boom RM, van Haaren E, Siccama J, van der Sman RGM. 2016. Effects of cellular structure and cell wall components on water holding capacity of mushrooms. *J Food Eng* 187: 106-113.
- Pereira E, Conrad A, Tesfai A, Palacios A, Kandar R, Kearney A, Locas A, Jamieson F, Elliot E, Otto M, Kurdilla K, Tijerina M, Son I, Pettengill JB, Chen Y, Fox T, Lane C, Aguilon R, Huffman J, Low MSF, Wise M, Edwards L, Bidol S, Blankenship HM, Rosen HE, Leclercq A, Lecuit M, Tourdjman M, Herber H, Singleton LS, Viazis S, Bazaco MC. 2023. Multinational outbreak of *Listeria monocytogenes* infections linked to enoki mushrooms imported from the Republic of Korea 2016–2020. *J Food Prot* 86:110101.
- Pourbagher R, Abbaspour-Fard MH, Sohbatazadeh F, Rohani A. 2021. In vivo antibacterial effect of non-thermal atmospheric plasma on pseudomonas tolaasii, a causative agent of *Agaricus bisporus* blotch disease. *Food Control* 130: 108319.
- Qu H, Zhou H, Ma T, Zheng Z, Zheng E, Yang H, Gao H. 2022. TMT-based quantitative proteomic analysis of postharvest *Coprinus comatus* fruiting body during storage. *Postharvest Biol Technol* 185: 111786.
- Rashvand M, Matera A, Altieri G, Genovese F, Fadji T, Opara UL, Mohamadifar MA, Feyissa AH, Renzo GCD. 2023. Recent advances in the potential of modeling and simulation to assess the performance of modified atmosphere packaging (MAP) systems for the fresh agricultural product: Challenges and development. *Trends Food Sci Technol* 136: 48-63.
- Ribeiro I, Maciel G, Bortolini D, Fernandes IA, Maroldi W, Pedro A, Rubio F, Haminiuk C. 2024. Sustainable innovations in edible films and coatings: An overview. *Trends Food Sci Technol* 143: 104272.
- Roy S, Rhim J. 2022. Gelatin/cellulose nanofiber-based functional films added with mushroom-mediated sulfur nanoparticles for active packaging applications. *J Nanostructure Chem* 12: 979-990.
- Sharma VP, Barh A, Bairwa RK, Annepu SK, Kumari B, Kamal S. 2021. Enoki Mushroom (*Flammulina velutipes* (Curtis) Singer) Breeding. In J. M. Al-Khayri, S. M. Jain & D. V. Johnson (ed.), *Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable crops*, Springer, Berlin, Germany. 423-441.
- Shao X, Niu B, Fang X, Wu W, Liu R, Mu H, Gao H, Chen H. 2023. Pullulan-stabilized soybean phospholipids/cinnamaldehyde emulsion for *Flammulina velutipes* preservation. *Int J Biol Macromol* 246: 125425.
- Shekari A, Hassani RN, Aghdam MS, Rezaee M, Jannatizadeh A. 2021. The effects of melatonin treatment on cap browning and biochemical attributes of *Agaricus bisporus* during low temperature storage. *Food Chem* 348: 129074.
- Shi C, Wu Y, Fang D, Ma N, Mariga AM, Hu Q, Yang W. 2020. Nanocomposite packaging regulates extracellular ATP and programmed cell death in edible mushroom (*Flammulina velutipes*). *Food Chem* 309: 125702.
- Shi D, Yin C, Fan X, Yao F, Qiao Y, Xue S, Lu Q, Feng C, Meng J, Gao H. 2022. Effects of ultrasound and gamma irradiation on quality maintenance of fresh *Lentinula edodes* during cold storage. *Food Chem* 373: 131478.
- Shin SH, Jung JY, Choi JH, Kim D, Jeong M. 2009. Effect of packaging methods on enoki mushroom qualities. *Korean J Food Preserv* 16: 179-185.
- Singh P, Langowski HC, Wani AA, Saengerlaub S. 2010. Recent advances in extending the shelf life of fresh *Agaricus* mushrooms: A review. *J Sci Food Agric* 90: 1393-402.
- Sun L, Zhang Z, Xin G, Sun B, Bao X, Wei Y, Zhao X, Xu H. 2020. Advances in umami taste and aroma of edible mushrooms. *Trends Food Sci Technol* 96: 176-87.
- Tao Y, Xie B, Yang Z, Chen Z, Chen B, Deng Y, Jiang Y, van Peer AF. 2013. Identification and expression analysis of a new glycoside hydrolase family 55 exo-beta-1,3-glucanase-encoding gene in *Volvariella volvacea* suggests a role in fruiting body development. *Gene* 527: 154-60.
- Wang CT, Wang CT, Cao YP, Nout JMR, Sun BG, Liu L. 2011. Effect of modiWed atmosphere packaging (MAP) with low and superatmospheric oxygen on the quality and antioxidant enzyme system of golden needle mushrooms (*Flammulina velutipes*) during postharvest storage. *Eur Food Res Technol* 232: 851-860.
- Wang T, Yun J, Zhang Y, Bi Y, Zhao F, Niu Y. 2021. Effects of ozone fumigation combined with nano-film packaging on the postharvest storage quality and antioxidant capacity of button mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Postharvest Biol Technol* 176: 111501.
- Wang W, Li Y, Li F, Zeng K, Ming J. 2022. Polypropylene crisper and 1-MCP delay the softening, lignification and transcription levels of related enzyme genes of golden needle mushrooms (*Flammulina velutipes*). *J Integr Agric* 21: 249-260.
- Xia R, Wang L, Xin G, Bao X, Sun L, Xu H, Hou Z. 2021. Preharvest and postharvest applications of 1-MCP affect umami taste and aroma profiles of mushrooms (*Flammulina velutipes*). *LWT Food Sci Technol* 114: 111176.
- Xia R, Hou Z, Xu H, Li Y, Sun Y, Wang Y, Zhu J, Wang Z, Pan S, Xin G. 2024. Emerging technologies for preservation and quality evaluation of postharvest edible mushrooms: A review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 64: 8445-8463.
- Xu Y, Tian Y, Ma R, Liu Q, Zhang J. 2016. Effect of plasma activated water on the postharvest quality of button mushrooms, *Agaricus bisporus*. *Food Chem* 197: 436-444.
- Yan M, Yuan B, Cheng S, Huang H, Huang D, Chen J, Cao C. 2020. Nanocomposite-based packaging affected the taste components of white *Hypsizygus marmoreus* by regulating energy status. *Food Chem* 311: 125939.
- Yang W, Yu J, Pei F, Mariga AM, Ma N, Fang Y, Hu Q. 2016. Effect of hot air drying on volatile compounds of *Flammulina velutipes* detected by HS-SPME-GC-MS and electronic nose. *Food Chem* 196: 860-866.
- Yang W, Shi C, Hu Q, Wu Y, Fang D, Pei F, Mariga AM. 2019. Nanocomposite packaging regulate respiration and energy metabolism in *Flammulina velutipes*. *Postharvest Biol Technol* 151: 119-126.
- Yuk HG, Yoo MY, Yoon JW, Marshall DL, Oh DH. 2007. Effect of combined ozone and organic acid treatment for control of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* enoki mushroom. *Food Control* 18: 548-553.
- Zalewska M, Górska-Horczyzak E, Marcinkowska-Lesiak M. 2021. Effect of applied ozone dose, time of ozonization, and storage time on selected physicochemical characteristics of mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Agriculture* 11: 748.
- Zan X, Jia W, Zhuang H, Cui FJ, Li N, Zhang J, Sun W, Zhao X.

2020. Energy status and mitochondrial metabolism of *Volvariella volvacea* with controlled ultrasound treatment and relative humidity. *Postharvest Biol Technol* 167: 111250.
- Zhang C, Huang T, Shen C, Wang C, Qi Y, Shen J, Song A, Qiu L, Ai Y. 2016. Downregulation of ethylene production increases mycelial growth and primordia formation in the button culinary-medicinal mushroom, *Agaricus bisporus* (*Agaricomycetes*). *Int J Med Mushrooms* 18: 1131-1140.
- Zhang Z, Zhang X, Xin G, Gong X, Wang Y, Wang L, Sun B. 2019. Umami taste and its association with energy status in harvested *Pleurotus geesteranus* stored at different temperatures. *Food Chem* 279: 179-86.
- Zhang J, Yu X, Xu B, Yagoub AEA, Mustapha AT, Zhou C. 2021. Effect of intensive pulsed light on the activity, structure, physico-chemical properties and surface topography of polyphenol oxidase from mushroom. *Innov Food Sci Emerg Technol* 72: 102741.
- Zhang S, Fang X, Wu E, Tong C, Chen H, Yang H, Gao H. 2022. Effects of negative air ions treatment on the quality of fresh shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during storage. *Food Chem* 371: 131200.
- Zhao Y, Yun J, Guo G, Li W, Wang B, Zhao F, Bi Y. 2022. Regulation of polyethylene nano-packaging on postharvest stipe elongation of *Flammulina velutipes*. *Agronomy* 12: 2362.
- Zhao Y, Yun J, Wang B, Qu Y, Zhao F, Bi Y. 2023. The delaying effect of a novel polyethylene nanopackaging on postharvest stipe elongation of *Flammulina velutipes* and its mechanism analysis. *Postharvest Biol Technol* 205: 112496.
- Zhu D, Guo R, Li W, Song J, Cheng F. 2019. Improved postharvest preservation effects of pholiota nameko mushroom by sodium alginate-based edible composite coating. *Food Bioprocess Technol* 12: 587-598.
- Zhu P, Wang P, Teng Q, Chen T, Tian G, Yao C, Yalimaimaiti N, Liu Q. 2023. Postharvest preservation of *Flammulina velutipes* with isoamyl isothiocyanate. *Agronomy* 13: 1771.
- Zuo C, Hu Q, Su A, Pei F, Ma G, Xu H, Xie M, Liu J, Mariga AM, Yang W. 2021. Transcriptome analysis reveals the underlying mechanism of nanocomposite packaging in delaying quality deterioration of *Flammulina velutipes*. *Postharvest Biol Technol* 182: 111723.