



Research Article

# Changes in sulfur content and physicochemical properties related to storage and distribution of spent shiitake mushroom substrate by fermentation

## 발효에 따른 표고버섯 폐배지의 황 함량 저감 및 저장 · 유통 관련 물리화학적 특성 변화

Se-Hui Mun<sup>1</sup>, Myeong-Seon Kim<sup>1</sup>, Hyun-Ah Choi<sup>1</sup>, Ji-Hwan Beak<sup>1\*</sup>, Ji-Hun Shin<sup>2</sup>

문세희<sup>1</sup> · 김명선<sup>1</sup> · 최현아<sup>1</sup> · 백지환<sup>1\*</sup> · 신지훈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Food and Nutrition, Gwangju University, Gwangju 61743, Korea

<sup>2</sup>Department of Health and Safety Management, Songwon University, Gwangju 61756, Korea

<sup>1</sup>광주대학교 식품영양학과, <sup>2</sup>송원대학교 보건안전관리학과

**Abstract** This study evaluated the effects of fermentation using a sulfur-oxidizing bacterium on sulfur reduction and storage-related quality characteristics of spent shiitake mushroom substrate (SMS). Pretreated SMS was inoculated with *Sphaerotilus microaerophilus* sp. nov. (FB-5) at concentrations of 0.001%, 0.1%, and 10% and fermented at 25°C for 21 days. Before pretreatment and fermentation, the moisture content, pH, total acidity, sulfur content and nitrogen contents of SMS were 34.21%, pH 4.68, 0.64%, 3.14%, and 0.32%, respectively, and no pathogenic microorganisms were detected. After fermentation, the moisture content of the FB-5-inoculated groups increased to 36.67-38.42%, which was significantly higher than that of the control group (CG). The pH and total acidity ranged from pH 4.05 to 4.11 and 0.38 to 0.51%, respectively, with no significant differences among treatments. Sulfur content was highest in the control group, whereas all inoculated groups exhibited significantly reduced sulfur levels (2.91-2.95%), particularly at lower inoculation concentrations. The nitrogen content ranged from 0.32 to 0.33% and showed significant differences compared to the control group. The population of FB-5 with depending on inoculation concentration and gradually decreased over prolonged fermentation. These results demonstrate that FB-5 fermentation effectively reduces sulfur content in SMS and suggest its potential application as a pretreatment strategy to improve the storage and distribution suitability of spent mushroom substrates.

**Keywords** spent mushroom substrate, fermentation, sulfur reduction, upcycling



OPEN ACCESS

**Citation:** Mun SH, Kim MS, Choi HA, Beak JH, Shin JH. Changes in sulfur content and physicochemical properties related to storage and distribution of spent shiitake mushroom substrate by fermentation. Food Sci. Preserv., 33(2), 283-292 (2026)

**Received:** December 17, 2025

**Revised:** February 19, 2026

**Accepted:** March 16, 2026

**\*Corresponding author**

Ji-Hwan Baek

Tel: +82-62-670-2445

E-mail: jhback@gwangju.ac.kr

**Copyright** © 2026 The Korean Society of Food Preservation. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

참나무, 밤나무 등 활엽수의 고목에서 발생하는 표고버섯은 담자균류 주름버섯목 느타리과 잣버섯 속에 속하며(Han 등, 2015), 탄수화물과 단백질, 지방, 비타민 및 무기질 등의 영양소가 골고루 함유되어 있고 맛과 향이 우수하여 식용 및 약용으로 널리 이용되고 있다(Jang 등, 2015). 표고버섯은 세계에서 널리 재배되는 버섯 중 하나로 총생산량이 많고 경제적 및 영양적 가치가 높은 고가의 식용버섯 중 하나이다(Kim 등, 2024). 우리나라의 표고버섯 생산액은 약 2,000억 원에 이르는데, 전체 버섯류의 33.5%를 차지한다(Min, 2020).

표고버섯은 원목 재배와 톱밥 재배 방식으로 생산되는데, 원목 재배는 버섯의 수확까지 오랜 시간이 소요되고 생산성을 예측하기 어려운 단점이 있다(Jeong 등, 2019). 이에 따라 인공재배기술이

발달하였고 시설 재배를 통한 톱밥 재배로 전환되면서 계절에 상관없이 수확이 가능해졌다(Choi 등, 2021). 일반적으로 버섯 1 kg 생산 시 5 kg의 버섯 배지가 소비되며, 국내 버섯 폐배지는 연간 200만 톤 이상이 배출되는 것으로 추정된다(Lee 등, 2015). 버섯재배량이 증가함에 따라 버섯 폐배지 발생량 또한 증가하고 있으며, 폐배지는 적절히 처리되지 않으면 심각한 환경 문제를 야기한다(Park 등, 2025).

버섯 폐배지를 매립하거나 소각할 경우 토양과 대기 오염을 유발하며, 특히 메탄가스와 같은 온실가스가 배출된다(Kim 등, 2022a). 표고버섯 폐배지는 높은 수분 함량과 유기물 함량으로 인해 저장 및 유통 과정에서 썩기 발생과 미생물 증식이 용이하며, 특히 황 화합물은 저장 중 이취 발생과 미생물 불안정을 유발하여 식품 부산물의 유통 가능 기간을 단축시키는 주요 인자로 보고되고 있다(Kim, 2002; Kim 등, 2004). 버섯 폐배지를 재활용한 원예용 상토 개발에 관한 연구(Kim 등, 2014), 버섯 폐배지를 이용한 사료 및 이의 제조 방법에 관한 연구(Cho 등, 2012), 버섯 재배 후의 폐배지 또는 폐목재를 활용한 연료용 펠릿 제조 방법(Jeong 등, 2017) 등 최근 폐배지 재활용 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 퇴비화 공정을 통해 자원으로 활용하는 다양한 방법이 개발되고 있다. 그러나 기존 폐배지 연구들은 주로 퇴비화, 사료화 또는 자원화에 초점이 맞춰져 있으며, 저장 및 유통 과정에서 발생하는 썩기 및 위생 불안정 문제를 해결하기 위한 전처리 기술에 대한 체계적인 분석은 매우 제한적이다. 따라서 폐배지를 식품 산업 공정과 연계된 부산물로서 효율적으로 활용하기 위해서는 저장·유통 단계에서 발생하는 썩기 및 위생 불안정 요인을 저감할 수 있는 전처리 기술의 확보가 필수적이다.

한편, 일본 요코하마 하수 처리장의 활성 슬러지에서 분리된 미세 호기성 세균인 FB-5 (*Sphaerotilus microaerophilus* sp. nov.)는 황화수소를 산화할 수 있는 lithotrophic 특성을 지닌 황산화 균으로, *Sphaerotilus* 속에서 두 번째로 보고된 종이다(Narihara 등, 2024). 이에 본 연구에서는 표고버섯 폐배지에 FB-5 균주를 접종하여 발효함으로써 황 함량의 변화를 평가하고 저장 및 유통 과정에서 썩기 및 위생 불안정 요인을 완화할 수 있는 전처리 공정으로서의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험 재료

본 연구에 사용된 버섯 폐배지는 농업회사법인 주식회사 명진에서 제공받은 표고버섯 폐배지(Myeongjin, Gwangju, Korea)를 사용하였다. 황 저감을 위한 FB-5 균주(23146)는 KACC에서 분양받아 사용하였다(Korean Agricultural Culture Collection, Wanju, Korea).

### 2.2. 버섯 폐배지의 특성 분석

#### 2.2.1. 이화학적 분석

표고버섯 폐배지의 수분 함량은 시료를 채취하기 전 2분간 교반한 후 clean bag에 채취하여 생중량을 측정하였다. 이후 시료를 105°C drying oven (Puriven, CRYSTE, Bucheon, Korea)에서 48시간 동안 건조하여 건조 중량을 측정하였다. 수분 함량은 생중량에서 clean bag의 중량과 건조 중량을 제하여 백분율로 산출하였다(Lee 등, 1999). pH 및 총산 함량 분석을 위하여 표고버섯 폐배지를 멸균수로 희석하여 충분히 혼합 후 원심분리기(1580R, Labogene, Lillerød, Denmark)를 이용하여 6,000 ×g에서 15분간 원심분리하였다. 이후 상등액을 여과하여 이화학적 분석용 시료로 사용하였다(Lee 등, 2015). pH는 여과된 시료 10 mL를 취하여 pH meter (Aquasearcher Ab33ph Bench Meter, Ohaus, Seoul, Korea)로 측정하였으며, 총산 함량은 여과된 시료 10 mL에 0.1 N NaOH (Duksan General Science, Seoul, Korea) 용액을 pH 8.3에 도달할 때까지 중화 적정하였고, 적정에 소비된 0.1 N NaOH 용액의 총 소비량을 구해 lactic acid (%)로 환산하였다(Baek 등, 2025; Sung 등, 2018).

#### 2.2.2. 미생물 분석

미생물 분석을 위하여 표고버섯 폐배지를 멸균 생리식염수를 이용해 단계 희석한 후 여과하여 분석에 사용하였다. 총균수는 PCA (plate count agar, MB cell, Seoul, Korea)에 희석된 시료를 도말한 후 35°C에서 24-48시간 배양하였다. 살모넬라 분석은 시료 25 g에 펩톤 식염 완충액(MB cell)을 225 mL 첨가하여 35°C에서 18-24시간 동안 전 배양한 후, 이를 tetrathionate broth (MB cell)와 RV broth (Rappaport-vassiliadis, MB cell)에 각각 접종하여 35°C, 42°C에서 20-24시간 증균배양하였다. 각각의 증균배양액을 XLD (MB cell)에 도말하여 36°C에서 24시간 배양한 후 집락 형성을 기준으로 살모넬라 존재 여부를 판별하였다(Kang 등, 2024). 효모 및 곰팡이는 PDA (potato dextrose agar; MB cell)에 희석 시료를 도말하여 25°C에서 24-48시간 배양하였다. 모든 미생물 수는 배양 후 15-300 colony 범위의 집락 수만 계수해 log CFU/g (colony forming units)로 나타내었다.

#### 2.2.3. 황 및 질소 함량 분석

황 함량은 황 분석 표준법 ASTM D4239에 준하여 실시하였으며, 성균관대학교에 의뢰하여 수행하였다. 질소 함량은 식품 의약품안전처 식품공전에 따라(MFDS, 2025), 조단백 분석기 (CSB 8s, Gerhardt, Germany)를 사용하여 측정하였다. 시료 약 1 g에 Kjeldahl 분해 촉진제(VELP Scientigaca Srl, Italy)를 혼합한 후 진한 황산(Duksan General Science, Seoul, Korea)

12 mL를 첨가하여 420°C에서 45-60분간 분해하였다. 분해된 시험 용액을 자동 증류장치(Vapodest200, Gerhardt, Germany)를 이용하여 증류 및 적정하였으며, 이를 통해 질소 함량을 산출하였다.

### 2.3. 버섯 폐배지의 전처리

버섯 폐배지의 전처리 과정은 플라스틱, 돌, 금속, 포장지 등 큰 이물을 제거하고 먼지가 많은 경우 세척 후 배수하였다. 이후 배지 분쇄기(FL50, Livong machine, China)를 이용하여 3 mm의 입도로 분쇄한 후 121°C, 15분 동안 멸균을 진행하였다. 멸균 후 배지를 15°C로 냉각하여 실험에 사용하였다.

### 2.4. 균 접종 및 발효

버섯 폐배지의 균 접종은 미생물은행(KACC)에서 분양받은 FB-5 (*S. microaerophilus* sp. nov.)를 사용하였다. FB-5 균주는 15 g/L agar (BD, Franklin Lakes, NJ, USA), 2 g/L proteose-peptone No. 3 (BD), 0.01 mg/L 비타민 B<sub>12</sub> (Daejung CNP, Daejeon, Korea)로 구성된 배지에 도말 후 15-25°C에서 5-7일간 배양하였다. 이후 배양된 균주를 4 g/L glucose (Sigma Chemical Co., St. Louis, MO, USA), 2 g/L proteose-peptone No.3 (BD), 0.2 g/L yeast extract (BD), 0.2 g/L MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O (Sigma Chemical Co.)와 0.01 mg/L 비타민 B<sub>12</sub> (Daejung CNP)로 구성된 배지에 접종하여 25°C에서 5일 배양 후 실험에 사용하였다(Narihara 등, 2024). 배양된 균주를 버섯 폐배지에 0.001%, 0.1%, 10%로 접종하였으며, 시료는 control group (CG), low (L, 0.001%), mild (M, 0.1%), high (H, 10%)로 명명하였다. 발효온도는 FB-5의 배양온도인 25°C에서 진행하였다. 균 접종 직후를 포함하여 3, 7, 14, 21일 차에 FB-5 균 수, pH 및 총산 함량, 수분 함량, 황 함량 및 질소 함량을 측정하였다. 균수 측정은 2.2에 기술한 방법에 따라 수행하였다.

### 2.5. 통계 처리

통계 처리는 SPSS (27, IBM Corp., Armonk, NY, USA) 프로그램을 사용하여 일원배치 분산분석(ANOVA)으로 평가하였다. 실험 결과를 3회 반복하여 평균과 표준편차를 구하였으며, Duncan의 다중범위 검정을 실시하여 처리 평균치 간의 유의성(p<0.05)을 검정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 버섯 폐배지의 특성 분석

본 연구에서는 표고버섯 폐배지를 저장·유통 단계에서 안정적으로 관리 가능한 중간 소재로 활용하기 위한 기초 자료를 확

보하고자 수분 함량, pH, 총산, 총균수, 황 및 질소 함량 등 발효 전 기본 품질 지표를 분석하였다. 이러한 지표들은 저장 중 이취 발생 가능성, 미생물 증식 가능성 및 후속 발효 공정 적용 가능성을 판단하는 핵심 요소로 보고되고 있다(Jhune 등, 2010). 표고버섯 폐배지의 전처리 전 특성 분석결과는 Table 1과 같다.

#### 3.1.1. 이화학적 분석

표고버섯 폐배지는 유기물 함량이 높지만, 저장 또는 재사용 과정에서 미생물에 의한 유기화합물의 분해와 수분 손실로 인한 조성에 큰 변화가 발생한다고 알려져 있다(Martin 등, 2023). 본 연구에서도 폐배지의 평균 수분 함량은 34.21%로 나타났으며, 이는 표고버섯 배지의 수분 함량이 1차 수확 후 52.6%, 3차 수확 후 54.0%로 보고된 선행연구(Sung 등, 2018)와 차이를 보였다. 본 연구에서 사용한 폐배지는 수확 후 일주일이 경과한 시점의 시료로, 별도의 건조 과정을 거치지 않았음에도 수분 함량이 낮게 나타나 저장 중 자연 증발에 따른 수분 감소로 판단되며, 상대적으로 낮은 수분 함량은 저장 중 미생물 증식 및 이취 발생 가능성을 억제하는 방향으로 작용할 수 있어 저장 안정성 측면에서 유리한 특성으로 해석된다(Lee 등, 1986). 폐배지의 pH는 4.68로 나타났으며, Shon 등(2018)의 연구와 유사한 경향을 보였다. 반면, 총산 함량은 0.64%로 기존에 보고된 수확 직후 폐배지의 총산 함량인 0.8%보다 낮은 값을 보였고(Sung 등, 2018), 이는 시료의 저장 경과로 인한 유기산의 소비 또는 휘발에 따른 산 함량 감소가 발생했기 때문으로 해석된다. 이러한 산성 조건은 부패 미생물의 증식을 제한하는 요인으로 작용할 수 있어, 폐배지를 저장·유통 단계에서 중간 소재로 활용하기 위한 기본적인 위생적 안전성을 뒷받침하는 결과로 판단된다(Quatrini 등, 2018).

**Table 1. Physicochemical and microbiological properties of shiitake mushroom substrate(SMS)**

Category	Measurements
Moisture content (%)	34.21±0.02 <sup>1)</sup>
pH	4.68±0.06
Total acidity (%)	0.64±0.07
Total number of bacteria (log CFU/g)	2.73±0.25
Salmonella (Presence/absence)	absence
Yeast and mold (log CFU/g)	ND <sup>2)</sup>
Total nitrogen (%)	0.32±0.01
Sulfur content (%)	3.14±0.17

<sup>1)</sup>All values are mean±SD (n=3).

<sup>2)</sup>ND, not detected.

### 3.1.2. 미생물 분석

표고버섯 폐배지의 총균수는 2.73 log CFU/g로 나타났으며, 살모넬라와 효모 및 곰팡이는 검출되지 않았다. Schill 등(2021)의 연구에서 표고버섯 폐배지의 총균수는 평균 3.7 log CFU/g로 보고되었으며, 본 연구에서는 이보다 낮은 수치를 나타내었다. 이는 폐배지 자체의 미생물 부하가 낮고 병원성 미생물에 대한 오염이 없음을 시사하며, 재배환경이 병원성 미생물에 오염되지 않았거나, 폐배지에 존재하는 항균 물질에 의해 병원균 증식이 효과적으로 억제된 것으로 판단된다. 표고버섯 폐배지 추출물의 항균 활성을 분석한 연구에 따르면(Zepeda-Bastide 등, 2016), 폐배지 추출물이 대장균 및 살모넬라에 항균 작용을 보였으며, 폐배지 내 유효 항균 물질이 존재함이 확인되었다. 이러한 결과들을 종합할 때, 표고버섯 폐배지는 위생적으로 안정하며 병원성 미생물 오염 우려가 낮아 농업 및 산업 자원으로 재활용될 수 있는 잠재력이 높다고 판단된다.

### 3.1.3. 황 및 질소 함량 분석

황 함량은 3.14%로 느타리버섯의 폐배지인 6.73%보다 낮은 값을 보였고(Zakil 등, 2022), 이는 느타리버섯 배지와 표고버섯 배지의 첨가제 종류와 양의 차이로 판단되나, 저장 중 이취 유발 인자로 작용할 수 있는 수준으로 발효를 통한 황 저감의 필요성을 시사하였다. 표고버섯 폐배지의 질소 함량은 0.32%로 선행연구 대비 낮은 수준이었다(Catal 등, 2020). Fujihara의 연구에 따르면, 배지의 총질소량이 많을수록 자실체의 총질소량이 유의하게 증가함을 보고하였으며(Fujihara 등, 2000), 배지 내 질소가 자실체로 전이되는 점을 고려할 때, 재배 후의 폐배지에서 잔류 질소가 감소한 것으로 판단된다. 또한, 폐배지가 본래 양분이 고갈된 상태이며, 낮은 영양소 함량으로 인해 질소 공급원보다는 토양 개량제와 같은 유기물 공급원으로 주로 활용되는 특성과 일치한다(Martin 등, 2023). 특히 낮은 총균수와 병원성 미생물의 미검출 결과는 발효 전 단계의 폐배지가 저장

및 운송 과정에서 미생물학적 위해 가능성이 낮은 상태임을 의미하며, 이는 발효 처리, 건조 또는 펠릿화와 같은 후속 공정 적용 시 위생 관리 부담을 완화할 수 있는 기초 조건으로 작용할 수 있다. 또한, 비교적 낮은 수분 함량과 산성 pH 특성은 저장 중 부패 및 이취 발생 가능성을 억제하는 방향으로 작용할 수 있어, 본 폐배지가 식품 산업 공정과 연계된 중간 소재로 활용되기 위한 전처리 원물로서의 적합성을 시사한다.

## 3.2. 발효 특성 분석

FB-5는 황화수소를 산화하는 황산화균으로, 폐배지 내 황화합물을 산화·전환함으로써 이취 발생을 억제하고 저장 중 품질 안정성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다(Narihara 등, 2024). 이에 본 연구에서는 FB-5 접종 여부에 따른 수분 함량, pH, 총산, 황 및 질소 함량 및 균수 변화를 통해, 해당 균주의 적용이 폐배지의 이화학적·미생물학적 특성에 미치는 영향을 종합적으로 평가하고자 하였다.

### 3.2.1. 수분 함량

수분 함량은 저장 중 미생물 증식, 이취 발생 및 발효 반응성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 품질 지표이다(Gwag 등, 1998). 표고버섯 폐배지의 발효 기간별 수분 함량의 변화는 Table 2와 같다. 발효 초기 CG의 수분 함량이 36.04%로 전처리 전과 유사한 수준이었다. 균접종구는 41.13-42.63%로 대조구보다 높은 수분 함량을 보였다. 이는 FB-5 접종 시 사용한 종균액이 폐배지 내부로 흡수되면서 나타나는 물리적인 수분증가 현상으로 판단된다. 발효 3일 차 모든 처리구에서 수분 함량이 급격히 감소하였으며, 이후 안정화되었다. 이러한 결과는 폐배지가 발효되는 과정에서 미생물에 의해 유기물이 분해되어 에너지 소비에 따른 수분 손실에 기인한 것으로 해석된다(Kim 등, 2013). 최종 수분 함량은 CG 22.84%로 가장 낮은 함량을 보였고, 균접종구는 36.67-38.42%의 수분 함량을 보였다.

**Table 2.** Changes in moisture content of shiitake mushroom substrate(SMS) during the fermentation period

Day	Moisture content (%)			
	CG <sup>1)</sup>	L	M	H
0	36.04±0.11 <sup>2)kA3)</sup>	42.56±0.15 <sup>aA</sup>	41.13±0.17 <sup>bA</sup>	42.63±0.10 <sup>aA</sup>
3	31.49±0.18 <sup>dD</sup>	38.69±0.15 <sup>bC</sup>	38.24±0.07 <sup>cC</sup>	38.99±0.15 <sup>aBC</sup>
7	34.11±0.08 <sup>dB</sup>	38.39±0.09 <sup>bD</sup>	35.65±0.26 <sup>eE</sup>	39.09±0.18 <sup>aB</sup>
14	33.48±0.10 <sup>dC</sup>	39.74±0.14 <sup>aB</sup>	39.29±0.29 <sup>bB</sup>	38.78±0.17 <sup>cC</sup>
21	22.84±0.21 <sup>dE</sup>	38.42±0.09 <sup>aD</sup>	37.86±0.09 <sup>bD</sup>	36.67±0.11 <sup>cD</sup>

<sup>1)</sup>CG, control group; L, low, FB-5 0.001% inoculation; M, mild, FB-5 0.1% inoculation; H, high, FB-5 10% inoculation.

<sup>2)</sup>All values are mean±SD (n=3).

<sup>3)</sup>Different letters lowercase (<sup>a-d</sup>) for dates, uppercase (<sup>A-E</sup>) for samples indicate significant differences (p<0.05) by Duncan's multiple range test.

### 3.2.2. 이화학적 특성

pH와 총산은 발효 과정 중 미생물 대사 활성 및 유기산 생성 정도를 반영하는 지표이다(Luedeking 등, 1959). 발효 기간 동안 표고버섯 폐배지의 pH 변화는 Table 3과 같다. 발효 0일 차 CG를 포함한 모든 처리구의 pH는 pH 4.11-4.23으로 유의적인 차이를 보이지 않았으며( $p>0.05$ ), 전처리 전 pH보다 낮은 값을 보였다. 발효 3일 차 모든 처리구의 pH는 감소하였으며, CG의 경우 멸균의 고온으로 인해 목질계 물질에서 헤미셀룰로오스가 분해되면서 유기산이 증가한 반면(Hill 등, 2021), 균 접종 처리구는 FB-5가 당을 이용하여 유기산을 생성한 것으로 판단된다(Kashket, 1987). 발효 7일 차 이후 pH는 회복 또는 안정화되는 경향을 보였다. 발효 기간 동안 표고버섯 폐배지의 총산 함량 변화는 Table 4와 같다. 초기 CG의 총산 함량은 0.61%, 균 접종 처리구는 0.44-0.57%의 값을 보였다. 총산 함량은 발효 3일 차 뚜렷한 증가를 보였고, pH의 감소와 동반된 총산 함량의 증가는 유기산의 생성에 기인한 것으로 판단된다(Park 등, 1994). 이후 전반적으로 감소하였으며, 최종 총산 함량은 CG 0.43%, L 0.45%, M 0.38% 그리고 H 0.51%로 처리구간 유의적인 차이를 보이지 않았다( $p>0.05$ ).

### 3.2.3. 황·질소 함량

황 저감 효과는 단순한 화학적 성분 변화에 그치지 않고, 저장 및 유통 과정에서의 품질 안정성 확보 측면에서 중요한 의미를 가진다. 황 화합물은 저장 중 황화수소 생성 및 이취 발생의 주요 원인으로, 건조물, 사료, 식품 부산물의 관능적 품질을 저하시켜 유통 가능 기간을 제한한다(Hong 등, 2008; Oh 등, 2017). 본 연구는 단일 조건에서 발효 전·후의 황 함량 변화를 확인하는데 초점을 두었으며, 특정 조건의 우수성을 주장하기 보다는, 발효 공정 적용 시 황 함량 저감 가능성을 제시하는 기초 자료로 해석되어야 한다. 발효 기간 동안 표고버섯 폐배지의 황 함량 변화는 Table 5와 같다. CG의 황 함량 변화는 발효 0일 차 3.41%에서 3일 차 3.24%로 감소하였으며, 발효 종료까지 유의적으로 증가하였다( $p<0.05$ ). 발효 과정에서 유기물 분해와 수분 감소가 동반되며(Shalavina 등, 2020), 이에 따라 시료 전체 질량이 감소하여 특정 무기 성분의 상대적 농도가 증가하는 물리적 농축 효과가 발생할 수 있다(Kim 등, 2008). 본 연구에서도 대조구에서 황 함량이 증가한 현상은 이러한 효과에 기인한 것으로 판단된다. L의 황 함량 변화는 발효 초기 2.92%에서 발효 3일 차 3.07%로 증가하였으며, 이후 안정화되

**Table 3.** Changes in pH of shiitake mushroom substrate (SMS) during the fermentation period

Day	pH			
	CG <sup>1)</sup>	L	M	H
0	4.11±0.06 <sup>2)aA3)</sup>	4.13±0.07 <sup>aABC</sup>	4.14±0.13 <sup>aA</sup>	4.23±0.04 <sup>aA</sup>
3	4.05±0.03 <sup>aA</sup>	3.97±0.07 <sup>aC</sup>	4.01±0.09 <sup>aA</sup>	4.03±0.03 <sup>aC</sup>
7	4.04±0.26 <sup>aA</sup>	4.27±0.16 <sup>aA</sup>	3.99±0.13 <sup>aA</sup>	4.10±0.08 <sup>aBC</sup>
14	4.15±0.06 <sup>abA</sup>	4.23±0.05 <sup>abB</sup>	4.06±0.02 <sup>bA</sup>	4.15±0.09 <sup>abAB</sup>
21	4.08±0.07 <sup>aA</sup>	4.08±0.02 <sup>aBC</sup>	4.05±0.18 <sup>aA</sup>	4.11±0.04 <sup>aBC</sup>

<sup>1)</sup>CG, control group; L, low, FB-5 0.001% inoculation; M, mild, FB-5 0.1% inoculation; H, high, FB-5 10% inoculation.

<sup>2)</sup>All values are mean±SD (n=3).

<sup>3)</sup>Different letters lowercase (<sup>a,b</sup>) for dates, uppercase (<sup>A-C</sup>) for samples indicate significant differences ( $p<0.05$ ) by Duncan's multiple range test.

**Table 4.** Changes in total acidity of shiitake mushroom substrate (SMS) during the fermentation period

Day	Total acidity (%)			
	CG <sup>1)</sup>	L	M	H
0	0.61±0.02 <sup>2)aC3)</sup>	0.57±0.02 <sup>ab</sup>	0.46±0.05 <sup>bC</sup>	0.44±0.03 <sup>bD</sup>
3	1.66±0.18 <sup>aA</sup>	1.49±0.37 <sup>aA</sup>	1.37±0.21 <sup>aA</sup>	1.29±0.10 <sup>aA</sup>
7	1.24±0.16 <sup>abB</sup>	0.67±0.20 <sup>bb</sup>	0.88±0.22 <sup>bb</sup>	0.69±0.05 <sup>bBC</sup>
14	1.08±0.14 <sup>abB</sup>	0.63±0.08 <sup>bb</sup>	1.18±0.41 <sup>aAB</sup>	0.84±0.21 <sup>abB</sup>
21	0.43±0.09 <sup>aC</sup>	0.45±0.07 <sup>ab</sup>	0.38±0.05 <sup>aC</sup>	0.51±0.07 <sup>aCD</sup>

<sup>1)</sup>CG, control group; L, low, FB-5 0.001% inoculation; M, mild, FB-5 0.1% inoculation; H, high, FB-5 10% inoculation.

<sup>2)</sup>All values are mean±SD (n=3).

<sup>3)</sup>Different letters lowercase (<sup>a,b</sup>) for dates, uppercase (<sup>A-D</sup>) for samples indicate significant differences ( $p<0.05$ ) by Duncan's multiple range test.

**Table 5. Changes in sulfur content of shiitake mushroom substrate (SMS) during the fermentation period**

Day	Sulfur content (%)			
	CG <sup>1)</sup>	L	M	H
0	3.41±0.16 <sup>2)abc3)</sup>	2.92±0.07 <sup>bc</sup>	3.03±0.63 <sup>bA</sup>	2.92±0.11 <sup>bB</sup>
3	3.24±0.07 <sup>aD</sup>	3.07±0.03 <sup>bB</sup>	2.79±0.05 <sup>cB</sup>	2.81±0.04 <sup>cB</sup>
7	3.27±0.03 <sup>aCD</sup>	3.32±0.11 <sup>aA</sup>	2.88±0.06 <sup>bAB</sup>	2.91±0.11 <sup>bB</sup>
14	3.49±0.04 <sup>aB</sup>	3.12±0.02 <sup>bB</sup>	3.01±0.15 <sup>bEA</sup>	2.94±0.03 <sup>cB</sup>
21	4.15±0.06 <sup>aA</sup>	2.91±0.05 <sup>cC</sup>	2.95±0.04 <sup>cAB</sup>	3.18±0.11 <sup>bA</sup>

<sup>1)</sup>CG, control group; L, low, FB-5 0.001% inoculation; M, mild, FB-5 0.1% inoculation; H, high, FB-5 10% inoculation.

<sup>2)</sup>All values are mean±SD (n=3).

<sup>3)</sup>Different letters lowercase (<sup>a-c</sup>) for dates, uppercase (<sup>A-D</sup>) for samples indicate significant differences (p<0.05) by Duncan's multiple range test.

어 발효 종료 시 2.91%로 큰 변화가 없었다. M은 발효 0일 차 3.03%에서 3일 차 2.79%로 대조구 대비 통계적으로 유의미한 수준에서 감소하였다(p<0.05). 이는 동일 시점의 CG (3.24%), L (3.07%) 및 H (2.81%)와 비교하여 가장 낮은 수치로, FB-5 접종이 초기 발효 단계에서 황 저감에 결정적인 역할을 수행함을 시사한다. 이후 발효 종료 시까지 소폭 증가하였으나 발효 14일 차를 제외하고 유의적인 차이를 보이지 않았다(p>0.05). 이는 FB-5 접종이 폐배지 내부의 황 농도 급증을 억제하여 발효 중 황 농도가 일정 수준에서 유지되도록 한 것으로 해석된다. 이러한 경향은 황산화균이 유기 및 무기 황 화합물을 산화하여 황산염 등 용해성 형태로 전환시키는 생화학적 특성과 일치하는 것으로 선행연구와 유사한 결과를 보였다(Rohwerder 등, 2007). 반면 H 처리구에서는 2.92%에서 발효 3일 차 2.81%로 감소 후 발효 21일 차 3.18%로 증가하였는데, 이는 초기 세포 농도를 달리한 황화광물 생물산화의 연구에서 보고된 경향과 유사하였다. 해당 연구에 따르면, 높은 초기 세포 농도는 발효 초기에 산화를 촉진하지만, 시간이 경과함에 따라 사멸균체 증가 및 용해성 유기물 축적으로 인해 장기적인 산화 효율이 저하될 수 있다고 보고한 바 있다(Cheng 등, 2021). 이러한 기

전은 본 연구에서 관찰된 H의 황 농도 증가 현상을 설명할 수 있는 가능성 중 하나로 해석된다. 본 연구에서 FB-5 접종에 의해 황 함량이 유의적으로 감소한 결과는 향후 발효 처리된 표고버섯 폐배지가 저장·유통될 때 이취 발생을 억제하고 품질 변화를 완화할 수 있는 가능성을 시사한다. 발효 기간별 표고버섯 폐배지 질소 함량의 변화는 Table 6과 같다. 초기 질소 함량은 CG 0.36%, L 0.29%, M 0.30%, H 0.31%로 대조구에서 가장 높은 초기 질소 함량을 보였다. 전처리 후 질소 함량이 0.32%에서 0.36%로 증가한 것은 전처리 과정에서 분쇄 및 가열로 인한 균질화와 단백질 변성에 따른 질소 회수율 증가가 영향을 미친 것으로 판단된다(Owusu-Apenten, 2002). 발효 3일 차 모든 처리구가 0.26-0.34%의 함량을 보였으며, 발효 7일 차도 일부 시료에서 큰 변화가 관찰되지 않았다. 그러나 발효 14일 차 모든 처리구에서 질소 함량이 급격하게 증가하였다. 이는 잔존 균사체와 미생물 바이오매스에 의해 결정된다는 선행 연구와 동일하게 폐배지 내부의 단백질 분해 및 균사체 잔존량 변화 등과 관련된 생물학적 요인에 의해 영향을 받은 것으로 판단된다(Baharudin 등, 2025). 발효 21일 차 CG를 제외한 균 접종구에서 유의적인 차이를 보이지 않았다(p>0.05).

**Table 6. Changes in the total nitrogen content of shiitake mushroom substrate (SMS) during the fermentation period**

Day	Total Nitrogen (%)			
	CG <sup>1)</sup>	L	M	H
0	0.36±0.05 <sup>2)abA3)</sup>	0.29±0.03 <sup>bB</sup>	0.30±0.01 <sup>bAB</sup>	0.31±0.01 <sup>bA</sup>
3	0.34±0.01 <sup>aB</sup>	0.29±0.02 <sup>bB</sup>	0.26±0.01 <sup>cAB</sup>	0.33±0.02 <sup>aA</sup>
7	0.29±0.03 <sup>aAB</sup>	0.29±0.02 <sup>aB</sup>	0.26±0.03 <sup>aB</sup>	0.27±0.01 <sup>aB</sup>
14	0.40±0.07 <sup>aA</sup>	0.36±0.01 <sup>aA</sup>	0.31±0.04 <sup>aA</sup>	0.33±0.03 <sup>aA</sup>
21	0.43±0.03 <sup>aA</sup>	0.33±0.01 <sup>bA</sup>	0.32±0.03 <sup>bA</sup>	0.33±0.00 <sup>bA</sup>

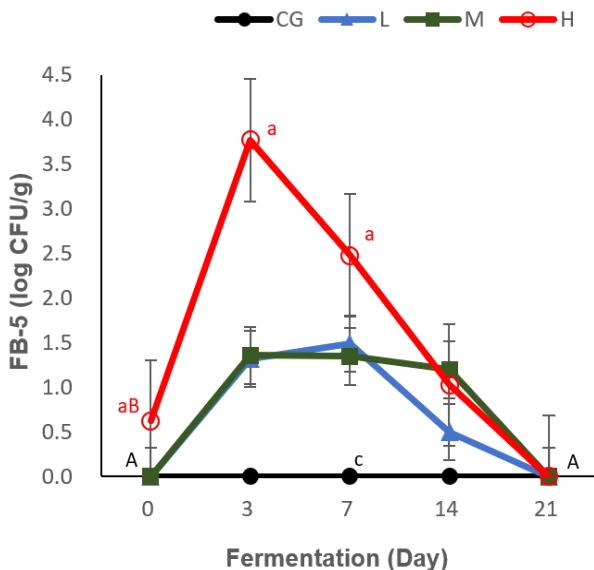
<sup>1)</sup>CG, control group; L, low, FB-5 0.001% inoculation; M, mild, FB-5 0.1% inoculation; H, high, FB-5 10% inoculation.

<sup>2)</sup>All values are mean±SD (n=3).

<sup>3)</sup>Different letters lowercase (<sup>a-c</sup>) for dates, uppercase (<sup>A,B</sup>) for samples indicate significant differences (p<0.05) by Duncan's multiple range test.

### 3.2.4. 총균수 변화

FB-5의 총균수 변화는 황 저감 효과의 생물학적 근거를 확인하고, 접종 농도에 따른 발효 지속성 및 미생물 생존 특성을 평가하기 위한 지표로 측정하였다. 발효 기간에 따른 FB-5의 균 수 변화는 Fig. 1에 나타내었다. 무접종구(CG)에서는 모든 기간 동안 황산화균이 검출되지 않았고, L의 FB-5 균 수는 발효 3일 차 1.32 log CFU/g, 7일 차 1.49 log CFU/g, 14일 차 0.5 log CFU/g로 확인되었으며, 발효 21일 차는 검출되지 않았다. M의 경우 발효 3일 차 1.36 log CFU/g, 7일 차 1.35 log CFU/g, 14일 차 1.2 log CFU/g로 L과 유사한 결과를 보였다. 저농도 접종구(L, M)는 발효 3-7일 차에 균 수가 소폭 증가하였으나, 전반적으로 낮은 수준을 유지하였으며, 이는 낮은 초기 접종량이 발효 과정 중 균 증식에 제한적으로 영향을 미친 것으로 판단된다(Pereira 등, 2013). 반면, H는 발효 0일 차 0.62 log CFU/g, 3일 차 3.77 log CFU/g, 7일 차 2.48 log CFU/g, 14일 차 1.03 log CFU/g로 검출되었으며, 발효 초기부터 높은 균 수를 나타내었고, 이후 발효 과정에서 일시적인 감소와 재증가가 관찰되었다. 이는 높은 초기 접종량이 폐배지 내 환경 변화에 따라 보다 뚜렷한 증감 패턴을 보일 수 있음을 시사한다. 모든 처리구는 21일 차에 균 수가 검출되지 않았으며, 이는 발효가 진행될수록 폐배지 내의 당과 같은 주요 영양소가 소모되



**Fig. 1.** Changes in FB-5 counts of shiitake mushroom substrate (SMS) during the fermentation period. FB-5, *Sphaerotilus microaerophilus* sp. nov.; CG, control group; L, low, FB-5 0.001% inoculation; M, mild, FB-5 0.1% inoculation; H, high, FB-5 10% inoculation. All values are mean±SD (n=3). Different letters lowercase (<sup>a-c</sup>) for dates, uppercase (<sup>A-B</sup>) for samples indicate significant differences (p<0.05) by Duncan's multiple range test.

어 미생물의 증식이 어려워졌거나(Kim과 Yi, 2010), 발효 과정에서 미생물 생육 억제 요인이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다(Kim 등, 2022b; Shim 등, 2013).

## 4. 요약

본 연구에서는 저장 및 유통 안정화를 위한 전처리 공정 개발의 일환으로, 표고버섯 폐배지의 발효에 따른 황 함량 변화와 이화학적 특성을 분석하였다. 표고버섯 폐배지에 황 저감 균주 FB-5 (*S. microaerophilus* sp. nov.)를 비율별로 접종하여 CG, L (0.001%), M (0.1%), H (10%)로 명명하였다. 폐배지 원물의 특성을 분석한 결과, 수분 함량은 34.21%, pH 4.68, 총산 함량 0.64%로 나타났다. 황 함량은 3.14%, 질소 함량은 0.32%로 분석되었다. 살모넬라, 효모 및 곰팡이는 모두 검출되지 않았고, 총균수는 2.73 log CFU/g로 미생물 부하가 낮고 병원성 미생물에 대한 오염이 없는 것으로 분석되었다. 이후 FB-5 접종 폐배지를 발효 기간별로 분석한 결과, 발효 종료 시 수분 함량은 CG 22.84%, 균 접종구 36.67-38.42%로 차이를 보였다. 모든 처리구에서 pH 4.05-4.11, 총산 함량 0.38-0.51%로 시료별로 유의적인 차이를 보이지 않았다(p>0.05). 질소 함량은 CG 0.43%, 균 접종구는 0.32-0.33%로 분석되었다. FB-5 균 수는 CG에서는 미검출되었으며, 저농도 접종구는 3-7일 차 균 수가 소폭 증가하였으나, 전반적으로 낮은 수준을 유지하였다. H는 발효 초기부터 높은 균 수를 나타내었으며, 발효 과정에서 일시적인 감소와 재증가가 관찰되었다. 황 함량 분석 결과, FB-5를 0.1% 접종한 처리구에서 발효 3일 차에 대조구 대비 유의적인 황 저감 효과가 확인되었으며, 발효 종료 시에도 CG보다 낮은 수준을 유지하였다. FB-5 균 수는 접종 농도에 따라 초기 발효 단계에서 차이를 보였으나 장기 발효 과정에서 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구 결과는 FB-5를 이용한 발효 공정이 초기 발효 단계에서 표고버섯 폐배지의 황 함량을 저감하면서 주요 이화학적 품질 지표를 안정적으로 유지할 수 있는 전처리 기술로 활용될 수 있음을 시사하며, 향후 식품 부산물의 저장 및 유통 적합성 향상을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### Funding

This research was supported by the Regional Innovation System & Education (RISE) program through the (Gwangju RISE Center), funded by the Ministry of Education (MOE) and the (Gwangju Metropolitan City), Republic of Korea (Grant number: 2025-RISE-05-Songwon University-010).

### Acknowledgements

None.

## Conflict of interests

The authors declare no potential conflicts of interest.

## Author contributions

Conceptualization: Beak JH, Shin JH. Methodology: Mun SH, Kim MS, Choi HA. Formal analysis: Mun SH, Baek JH. Validation: Baek JH, Shin JH. Writing - original draft: Mun SH. Writing - review & editing: Mun SH, Kim MS, Choi HA, Baek JH.

## Ethics approval

This article does not require IRB/IACUC approval because there are no human and animal participants.

## ORCID

Se-Hui Mun (First author)

<https://orcid.org/0009-0007-1621-3202>

Myeong-Seon Kim

<https://orcid.org/0009-0003-1861-1213>

Hyun-Ah Choi

<https://orcid.org/0009-0004-1949-2970>

Ji-Hwan Beak (Corresponding author)

<https://orcid.org/0000-0001-7759-0625>

Ji-Hun Shin

<https://orcid.org/0000-0001-5753-0019>

## References

- Baek IS, Kim JH, Lee YS, Shin BE, Lee YS. Improvement effect of total nitrogen and amino acid content in spent mushroom substrates by bacterial treatment. *J Mushrooms*, 16, 225-230 (2018)
- Baharudin AS, Zainol N, Aziz NH. Parameters evaluation for biofertilizer production from mushroom waste through design of experiment. *J Environ Manage*, 378, 124734 (2025)
- Beak SE, Mun SH, Cha SH, Son DM, Beak JH. Development of a coffee beer brewing process using coffee. *Food Sci Preserv*, 32, 674-683 (2025)
- Beckers SJ, Dallo IA, Campo ID, Rosecauer C, Klein K, Wurm FR. From compost to colloids-valorization of spent mushroom substrate. *ACS Sustainable Chem Eng*, 7, 6991-6998 (2019)
- Catal S, Peksen A. Physical, chemical and biological properties of spent mushroom substrates of different mushroom species. *Acta Hort*, 59, 1-8 (2020)
- Cheng KY, Acuña CCR, Boxall NJ, Li J, Collinson D, Morris C, du Plessis CA, Streltsova N, Kaksonen AH. Effect of initial cell concentration on bio-oxidation of pyrite before gold cyanidation. *Minerals*, 11, 834 (2021)
- Cho SJ, Mun YH, Shin PG, Yoo YB. Feed using mushroom waste medium and a method of manufacturing the same. Korea Patent No. KR20110095487A (2012)
- Choi JY, Kim MS. Comparison of the physicochemical components of *Lentinula edodes* cultivars cultivated in sawdust medium. *J Mushrooms*, 19, 184-190 (2021)
- Fujihara S, Kasuga A, Shgahara T, Hashimoto K, Kiyomizu Y, Nakazawa T, Aoyagi Y. Nitrogen content of shiitake mushroom [*Lentinus edodes* (Berk.) sing.] cultivated on sawdust medium and dependence on that in the medium. *Food Sci Technol Res*, 47, 191-196 (2000)
- Gwag IS, Sin HJ, Ju JJ. Effects of water activity on microbial growth in herb extract. *J Food Hyg Saf*, 13, 77-82 (1998)
- Ha SY, Kim HJ, Woo SM, Lee JB, Cho YJ, Kim YS, Bhan KN, Park JS, Kim HY, Jang YM, Kim MH. Study of sulfur dioxide contents in various fresh vegetables during the drying process. *J Food Hyg Saf*, 25, 303-309 (2010)
- Han SR, Kim MJ, Oh TJ. Antioxidant activities and antimicrobial effects of solvent extracts from *Lentinus edodes*. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 44, 1144-1149 (2015)
- Hill C, Altgon M, Rautkari L. Thermal modification of wood - A review: Chemical changes and hygroscopicity. *J Mater Sci*, 56, 6581-6614 (2021)
- Hong YP, Jo MA, Choi JW. Material of quality maintenance and inhibition of black-stain on oriental pear during cold storage. Korea Patent No. KR101152196B1 (2008)
- Jang HL, Lee JH, Hwang MJ, Choi YM, Kim HR, Hwang JB, Nam JS. Comparison of physicochemical properties and antioxidant activities between *Lentinula edodes* and new cultivar *Lentinula edodes* GNA01. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 44, 1484-1491 (2015)
- Jeong DK, Jeong JH, Chae YS. Method for producing pellets for fuel using disused culture media or logs after culturing mushrooms. Korea Patent No. KR20230118330A (2015)
- Jeong YS, Jang YS, Ryoo R, Ka KH. Utilization of various substrates for the cultivation. *Kor J Mycol*, 47, 373-83 (2019)
- Jhune CS, JAng KY, Jeong JC, Lee CJ, Kong WS, Yoo YB. Field research of cultivation technique for stable production of common mushroom (*Agaricus bisporus*). *J Mushrooms*, 8, 122-130 (2010)
- Kang EO, Cho MJ, Yang CH. Serovars and genetic characteristic of *Salmonella* spp. isolates from Jeju Island, South Korea. *J Food Hyg Saf*, 39, 134-151 (2024)
- Kim CG, Lee JH, Yoon YM. Biochemical methane potential analysis of mushroom waste medium. *J KORRA*, 30, 13-21 (2022a)

- Kim DH, Jae YJ, Lee HJ, Amanullah SM, Min CS, Kim SC. Effects of micro-organism supplementation on fermentation characteristic, nutrient content and microbial count of spent mushroom substrate. *J Agric Life Sci*, 47, 229-236 (2013)
- Kim EJ, Park MJ, Jang YS, Ka KH. Effects of mycovirus infections on mycelial growth and fruiting body yield of the edible mushroom *Lentinula edodes*. *Kor J Mycol*, 52, 283-292 (2024)
- Kim JY, Yi YH. pH, acidity, color, amino acids, reducing sugars, total sugars, and alcohol in puffed millet powder containing millet *Takju* during fermentation. *Korean J Food Sci Technol*, 42, 727-732 (2010)
- Kim SJ, Shin JS, Park HS, Song JS, Lee KW, Bang WS, Cho TJ. Production of antibacterial agents and genomic characteristics of probiotics strains for the foodborne pathogen control. *Curr Top Lact Acid Bact Probiotics*, 8, 1-16 (2022b)
- Kim YG. A study on the odor intensity for sulfur compounds related temperature and composition of LPG. *J Korean Chem Soc*, 46, 523-527 (2002)
- Kim YR, Moon ST, Park SK. Effects of yeast strains and fermentation temperatures in production of hydrogen sulfide during beer fermentation. *Korean J Food Sci Technol*, 40, 238-242 (2008)
- Lee HS, Lee SR. Carbohydrate characteristics and storage stability of Korean confections *Kangjeong* and *Dashik*. *Korean J Food Sci Technol*, 18, 421-426 (1986)
- Lee HY, Shin CY, Lee YK, Chang HH, Min BH. A short composting method by the single phase composter for the production of oyster mushroom. *Kor J Mycol*, 27, 10-14 (1999)
- Lee SY, Kang HW, Kim JJ, Han JH. Effect of spent mushroom substrates of *Hericium erinaceum* on plant pathogens of tomato. *Kor J Mycol*, 43, 185-190 (2015)
- Lee WH, Kim IY, Ko HG, Kim SC, Choi SG, Noh JH, Park HS. Cultural characteristics and formation of fruiting body in *Lentinula edodes*. *J Mushrooms*, 12, 24-28 (2014)
- Luedeking R, Piret EL. A kinetic study of the lactic acid fermentation. Batch process at controlled pH. *J Biochem Microbiol Technol Eng*, 1, 393-412 (1959)
- Martin C, Zervakis GI, Xiong S, Koutrotsios G, Steatkvern KO. Spent substrate from mushroom cultivation: Exploitation potential toward various applications and value-added products. *Bioengineered*, 14, 2552138 (2023)
- MFDS. Food code. Available from: <https://various.foodsafetykorea.go.kr/fsd/#/ext/Document/FC>. Accessed Sep. 23, 2025.
- Min GT. Trends and Development Direction of Shiitake Mushroom Industry, Monthly Forest (October Issue). Korea Rural Economic Institute, Naju, Korea, p 1-4 (2020)
- Narihara S, Chida S, Matsunaga N, Akimoto R, Akimoto M, Hagio A, Mori T, Nittami T, Sato M, Mun SH, Kang HJ, Back JH, Takeda M. Taxonomic characterization of *Sphaerotilus microaerophilus* sp. nov, a sheath-forming microaerophilic bacterium of activated sludge origin. *Arch Microbiol*, 206, 252 (2024)
- Oh MH, Lee EY. Reduction of sulfur compounds produced from swine manure, using *Brevundimonas diminuta*. *Microbiol Biotechnol Lett*, 45, 257-264 (2017)
- Owusu-Apenten RK. Food Protein Analysis: Quantitative Effects on Processing. Marcel Dekker, Inc., New York, NY, USA, p 221-439 (2002)
- Park DG, Lee SH. Economic feasibility analysis of recycling spent mushroom substrate through composting. *J Korea Acad-Ind Cooper Soc*, 26, 230-237 (2025)
- Park YS, Suh CS. Changes in pH, acidity, organic acid and sugar content of dough for Jeungpyun during fermentation. *J Korean Soc Food Cult*, 9, 329-333 (1994)
- Pereira AP, Mendes-Ferreira A, Oliveira JH, Estevinho LM, Mendes-faia A. High-cell-density fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* for the optimisation of mead production. *Food Microbiol*, 33, 114-123 (2013)
- Quatrini R, Johnson DB. Microbiomes in extremely acidic environments: Functionalities and interactions that allow survival and growth of prokaryotes at low pH. *Curr Opin Microbiol*, 43, 139-147 (2018)
- Rohwerder T, Sand W. Oxidation of inorganic sulfur compounds in acidophilic prokaryotes. *Eng Life Sci*, 7, 301-309 (2007)
- Schill S, Stessl B, Meier N, Tichy A, Wagner M, Ludewing M. Microbiological safety and sensory quality of cultivated mushrooms (*Pleurotus eryngii*, *Pleurotus ostreatus* and *Lentinula edodes*) at retail level and post-retail storage. *Foods*, 10, 816 (2021)
- Shalavina E, Briukhanov A, Vasilev E, Uvarov R, Valge A. Variation in the mass and moisture content of solid organic waste originating from a pig complex during its fermentation. *Agron Res*, 18, 1479-1486 (2020)
- Shim HJ, Cho JY, Moon JH, Kim SJ, Kim DW, Shin KH, Park KH. Changes of bacterial communities in microbial-fermented tea during fermentation. *J Kor Tea Soc*, 19, 91-98 (2013)
- Shin DK. Study on usefulness of used-mushroom-media for horticultural crops. MS Thesis, Kongju University, Korea, p 1-23 (2012)
- Shon HY, Park JE. A Pharmaceutical composition comprising the extraction of spent mushroom substrate for *Lentinus edodes* as an effective component for prevention or treatment of thrombosis and health functional food comprising the same. Korea Patent No. KR20200115030A (2018)
- Sung HJ, Pyo SJ, Kim JS, Park JY, Sohn HY. Physicochemical, nutritional, and enzymatic characteristics of shiitake

- spent mushroom substrate (SMS). *J Life Sci*, 28, 1339-1346 (2018)
- Woo SY, Ju YJ, Ryu DY, Lee JW, Kim DG. Performed gasification pyrolysis of biochar generated from mushroom waste medium. Paper presented at Korean Society of Environmental & Energy Engineers 2023 Spring Conference, June 15-16, Seoul, Korea (2023)
- Zakil FA, Isa RM, Sueb MSM, Isha R. Growth performance and mineral analysis of *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom) cultivated in spent mushroom medium mixed with rubber tree swadust. *Mater Today Proc*, 57, 1329-1337 (2022)
- Zepeda-Bastida A, Ojeda-Ramirez D, Soto-Simental S, Rivero-Perez N, Ayala-Martinez M. Comparison of antibacterial activity of the spent substrate of *Pleurotus ostreatus* and *Lentinula edodes*. *J Agric Sci*, 8, 43-49 (2016)
- Zhu L, Li W, Huang C, Tian Y, Xi B. Functional redundancy is the key mechanism used by microorganisms for nitrogen and sulfur metabolism during manure composting. *Sci Total Environ*, 912, 169389 (2024)