



Research Article

Changes in quality characteristics of shiitake mushrooms treated with UV-C and the inhibitory effect of their ethanol extract on lung cancer cell proliferation

표고버섯의 UV-C 처리에 따른 품질 특성 변화 및 에탄올 추출물의 폐암세포 증식 억제 효과

MiAe Cho^{1†*}, Ji Weon Choi², Chang Moo Lee¹, Jong Cheol Park¹

조미애^{1†*} · 최지원² · 이창무¹ · 박종철¹

¹Cheonsu Mountain Medicinal Herb Research Association, Seongnam 13637, Korea

²Postharvest Technology Division, Institute of Horticultural and Herbal Science, RDA, Wanju 55365, Korea

¹사단법인 천수산약초연구회, ²농촌진흥청 국립원예특작과학원 저장유통과



OPEN ACCESS

Citation: Cho MA, Choi JW, Lee CM, Park JC. Changes in quality characteristics of shiitake mushrooms treated with UV-C and the inhibitory effect of their ethanol extract on lung cancer cell proliferation. Food Sci. Preserv., 32(4), 733-744 (2025)

Received: December 24, 2024

Revised: April 09, 2025

Accepted: April 11, 2025

*Corresponding author

MiAe Cho
Tel: +82-31-698-3737
E-mail: agar0818@daum.net

Copyright © 2025 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.

Abstract This study evaluated the quality characteristics of fresh shiitake mushrooms after UV-C treatment and storage at 20°C, along with the antioxidant activity and antiproliferative effects of their 85% ethanol extracts on A549 lung cancer cells. UV-C treatment delayed tissue softening, reduced decay rates, and maintained phenolic compound content and antioxidant activity. The highest guanylic acid and ergosterol contents were observed in the UV-C 180 s treatment. Ethanol extracts from UV-C-treated mushrooms inhibited A549 cell proliferation by 20.5-42.4%, but antiproliferative activity decreased over time. Cytotoxicity toward normal lung epithelial cells (MRC-5) increased across all groups by day 5, with the untreated group exhibiting the sharpest rise. Pearson correlation analysis revealed a positive correlation between A549 cell viability and total phenolics, flavonoids, antioxidant activity, guanylic acid, and ergosterol, whereas MRC-5 cell viability negatively correlated with weight loss. UV-C treatment effectively maintained mushroom quality and enhanced antioxidant activity but increased moisture loss, potentially reducing bioactive compounds and elevating cytotoxicity during prolonged storage. UV-C 90 s treatment is optimal for quality retention, while UV-C 180 s may be preferable for functional food applications. Further research is needed to evaluate long-term storage effects and safety under varying UV-C conditions.

Keywords *Lentinula edodes*, UV-C treatment, quality characteristics, A549, MRC-5

1. 서론

표고버섯(*Shiitake* mushroom, *Lentinula edodes*)은 담자균류 주름버섯목 느타리과에 속하며, 독특한 맛과 효능으로 인해 가장 기호성 높은 버섯 중 하나에 속한다.

신선 표고버섯은 수확 후 높은 호흡율($640.8 \text{ mg/kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), 얇은 표피구조, 90-92%로 높은 수분 함량, tyrosinase의 높은 활성으로 인해 품질 변화가 매우 빠르게 진행된다(Abdelshafy 등, 2023). 품질 저하의 요인으로는 부패, 중량감소, 연화, 변색 및 이취 발생 등으로, 신선 표고버섯의 저장 및 유통 기간에 영향을 미친다. 때문에 표고버섯의 대부분은 건조된 후 저장, 유통되고 있었으나, 건조시 조직 및 영양 성분 변화, 조리 전 수침을 통해 원형 복원시 유용성분 용출 등 문제(Subramaniam 등, 2021; Xu 등, 2024)로 인해 신선 표고버섯에 대한 기호도와 소비가 증가하고 있다.

신선 표고버섯의 저장 방법으로 저장 온도(Li 등, 2022a), modified atmosphere packaging(Li 등, 2014; Ye 등, 2012), 기능성 코팅(Asdullah 등, 2024), 방사선 및 UV 처리(Hu 등, 2020; Jiang 등, 2010), 그리고 오존 처리가 보고되었다(Abdelshafy 등, 2023). UV-C 처리는 품질 유지를 위한 대표적인 비열처리 방법으로, 미생물 억제, 갈변 방지 및 기능성 성분 보존 효과가 보고되면서 신선 농산물의 저장성 향상 기술로 주목받고 있다(Hu 등, 2020; Jiang 등, 2010). UV-C 처리 조건으로는 파장 200-280 nm, 주로 1-10 kJ/m² 범위의 광량이 활용된다. 지나치게 강한 강도로 처리시 세포 구조 파괴, 수분 손실, 갈변 현상 발생, 풍미 저하 등이 발생할 수 있어 적절한 조건에서 조사하는 것이 중요하다.

표고버섯에는 식이섬유, 다당류, 테르페노이드, 페놀성 화합물을 포함한 다양한 생리활성 물질이 함유되어 있다(Mizuno, 1995). 이러한 화합물의 효능으로 면역증강, 항균, 항세균, 항바이러스, 혈당 강하, 콜레스테롤 저하, 혈압 강하, 항혈전, 항염증, 신장 보호, 간독성 보호, 신경섬유 활성화(치매 예방) 등에 대해 보고되어 있다(Ahmad 등, 2023; Finimundy 등, 2014). 표고버섯에 함유된 β -glucan(Murphy 등, 2020), lentinan(Imam 등, 2021) 등 다당체, eritadenine, 항산화 물질(Ahmad 등, 2023) 등이 면역 증강 및 암세포 증식을 억제하여 항암효과를 가진다고 보고되어 있다. 글루타민산, 구아닐산, β -glucan 등은 버섯의 주요 맛 성분이다. 구아닐산은 표고버섯의 주요 맛 성분일 뿐 아니라 항산화, 항염증, 면역 강화, 신경 보호 등 다양한 생리적 효능을 가지고 있는데, 건조, 냉장, 냉동 등 보존 방법에 따라 함량 변화를 보인다(Abdelshafy 등, 2023). Ergosterol은 균류, 특히 효모와 버섯에서 발견되는 스테로이드 화합물로 균류 세포막의 유동성 및 구조적 안전성을 유지하게 하는 중요한 역할을 한다. Ergosterol은 항균, 항진균 특성을 보이며, 비타민 D₂의 전구 물질로, UV 조사시 비타민 D₂(ergocalciferol)로 전환된다. 비타민 D₂는 인체에서 칼슘 흡수를 촉진하고 뼈 건강을 유지하는 데 중요한 역할을 한다(Hu 등, 2020). 식용 버섯 중에서는 표고버섯에 ergosterol이 가장 많이 함유되어 있다고 알려져 있다.

본 연구에서는 UV-C 처리를 적용한 신선 표고버섯의 20°C 저장 중 품질 특성 변화와 저장성을 평가하고, UV-C 처리 후 기능성 성분(총페놀, 플라보노이드, 항산화 활성)과 항암 효과(A549 폐암 세포 증식 억제) 및 정상 폐세포(MRC-5)에 대한 독성 여부를 분석하였다. 이를 통해 UV-C 처리의 최적 조건을 제시하고, 실용적 적용 가능성을 논의하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

2022년 9월 22일(목) 김제 오규승 농가에서 봉지 톱밥배지

방식으로 재배된 표고 ‘산조715’를 오전에 수확하였다. 수확한 표고버섯 중 화고 등급만 선별하여 국립원예특작과학원으로 운송하여 오전 12시에 0°C 저온저장고에 입고하여 강제 통풍 예냉을 2시간 실시한 후 저장하였다. 그 다음날 0.02% 유공 PE0.03 mm 필름에 포장하여 저장하다 9월 26일(월)에 시험처리하였다.

2.2. UV-C 처리

표고버섯을 갓이 위로 오도록 스티로폼 상자에 담아 주파장 254 nm의 자외선 램프(TUV 25W T5 4P-SE, Philips, Poland)를 15 cm 높이에서 3.9 mW/cm²의 강도로 0, 90, 180초간 조사하여 총 에너지가 1-7 kJ/m²가 되도록 처리하였다. 이 처리는 상업적 선별 라인을 적용할 것을 고려한 처리 조건이다. 처리된 표고버섯을 20°C에 저장하면서 1일, 3일, 5일째 품질 특성 조사 및 분석 시료를 채취하였다.

2.3. 신선 표고버섯 품질 특성 조사

표고버섯 수확 직후, 그리고 UV-C 처리 후 20°C에 저장하면서 1일, 3일, 5일째 품질 특성을 조사하였다. 신선 표고버섯의 중량감소율을 처리구별로 3반복으로 측정하여 저장초기 중량에 대한 중량감소율을 백분율로 환산하였다. 갓의 내외부 색도는 색차계(CR-400, Konica Minolta Corp, Japan)를 이용하여, 백판으로 영점을 보정한 후 가장 높은 부위의 Hunter L* (lightness), a*(red-green)와 b*(yellow-blue)값을 측정하였다. 갓을 슬라이스한 단면의 색도도 동일한 방법으로 측정하였다. 갓의 경도는 texture analyzer(TA XT2, SMS, UK)를 이용하여 지름 3 mm probe를 2.0 mm/s의 속도로 가장 높은 부위를 10 mm 깊이까지 관입한 투과력을 측정한 후 최대값을 Newton(N)으로 표현하였다. 색도와 경도는 6반복으로 조사하였다.

2.4. 성분 분석 및 세포실험 시료 조제

채취한 표고버섯 시료를 동결 건조하여 분말화하였다. 표고버섯 분말을 85% 에탄올에 20배, 3반복으로 환류 냉각 추출하여 농축한 후 50 mg/mL로 stock solution을 만들어 -56°C 초저온냉동고에 보관하면서 성분 분석 및 세포 실험에 이용하였다. 사용시 0.45 μ m PVDF 멤브레인 필터로 여과하여 분석 시료로 이용하였다.

2.4.1. 총페놀성 화합물 및 총플라보노이드 함량 측정

총페놀성 화합물 함량은 Folin-Ciocalteu's 방법(Singleton 등, 1999)에 따라 시료 0.1 mL, 증류수 8.4 mL, 2 N Folin-Ciocalteu reagent(Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA) 0.5 mL, 20% Na₂CO₃(Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO,

USA) 1 mL를 혼합하여 1시간 반응시킨 후 725 nm에서 분광광도계(EPOCH 2, Agilent, CA, USA)를 이용하여 흡광도 값을 측정하였다. 총페놀성 화합물 함량은 표준물질인 gallic acid (Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA)를 사용하여 작성한 표준곡선으로 양을 환산하였고, mg gallic acid equivalent (GAE)/mL로 나타내었다. 총플라보노이드 함량은 (+)-catechin (Kogyo Co., Tokyo, Japan)을 표준품을 사용하여 aluminium trichloride 방법으로 측정하였다(Zhishen 등, 1999). 시료 125 μ L를 75 μ L의 5% NaNO₂ 용액(Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)에 첨가한 후, 혼합물을 6분 동안 방치한 후, 150 μ L의 10% aluminium trichloride(Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA)를 첨가하고 5분 동안 반응시킨 다음, 750 μ L의 1M NaOH(Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA)를 첨가하였다. 증류수를 사용하여 용액의 최종 부피를 2.5 mL로 조정하였다. 15분 동안 반응시킨 후 510 nm에서 분광광도계(EPOCH 2, Agilent, CA, USA)를 이용하여 측정하였다. 총플라보노이드 함량은 mg CE/mL로 계산하였다.

2.4.2. Ergosterol 함량 측정

INNO C18 column(4.6 $\times$ 250 mm, 5 μ m)이 장착된 HPLC 시스템(1260 Infinity II, Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, USA)에 quaternary pump와 Diode array detector (DAD WR detector, Santa Clara, CA, USA)를 연결하여 시료의 ergosterol 함량을 분석하였다. 컬럼온도는 25°C, 이동상은 isocratic 조건으로 A, MeOH: B, CAN를 0-60분까지 30:70으로 조절하였다. 유속은 1 mL/min, 검출기 파장은 UV 280 nm였다. 표준물질은 ergosterol 1 mg을 MeOH에 용해하여 1 mg/mL가 되게 녹여 표준원액(1,000, 500, 250, 125, 62.5, 31.3, 15.6 ppm)으로 하고, 초음파 진탕기로 20분간 용해시킨 후 0.45 μ m PVDF membrane 필터로 여과하여 표준용액으로 이용하였다.

2.4.3. Guanylic acid 함량 측정

Aegispak C18-L column(250 $\times$ 4.6 mm, 5 μ m)이 장착된 HPLC(Alliance 2695 Separations Module, Waters Corp., Milford, MA, USA)에 Aegispak C18-L column(250 $\times$ 4.6 mm, 5 μ m; YoungJin, Seongnam-si, Korea)과 PDA detector(996 Photodiode Array Detector, Waters Corp., Milford, MA, USA)를 장착하여 guanylic acid 함량을 분석하였다. 컬럼온도는 35°C, 이동상의 gradient는 A, water(0.05% TEA):B, ACN(0.05% TEA)를 시간대별로 0-5분까지는 100:0, 15-30분까지는 0:100, 35-55분까지는 100:0으로 조절하였다. 유속은 0.8 mL/min, 검출기 파장 UV 254 nm였다. 표준물질은 5'-guanylic acid 1 mg을 water(HPLC grade)에 용해하여 1 mg/mL가 되게 녹여 표준용

액(250, 125, 62.5, 31.3, 15.6, 7.8 ppm)으로 하고, 초음파 진탕기로 20분간 용해시킨 후 0.45 μ m PVDF 멤브레인 필터로 여과하여 사용하였다.

2.4.4. 항산화 활성 측정

항산화 활성은 DPPH radical scavenging activity(Ku 등, 2010)와 ABTS radical scavenging activity(Re 등, 1999) 두가지 방법으로 분석하였다. DPPH 라디칼 소거 활성은 에탄올에 용해된 시료 0.5 mL를 100 μ M의 DPPH 용액 3 mL에 첨가하여 반응액을 완전히 섞은 후에 실온에서 10분간 반응시킨 후, 남아있는 DPPH의 양을 측정하기 위해서 spectrophotometer (Multiskan FC, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA)를 이용하여 517 nm에서 흡광도를 측정하였다. ABTS 라디칼 소거 활성은 7.4 mM ABTS(2,2-azino-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid, Sigma-Aldrich Co.)와 2.6 mM potassium persulfate를 하루 동안 암소에 방치하여 ABTS 양이온을 형성시킨 후 이 용액을 735 nm에서 흡광도 값이 1.4-1.5가 되도록 물 흡광계수 ($\epsilon=3.6 \times 10^4$ M⁻¹cm⁻¹)를 이용하여 증류수로 희석하였다. 희석된 ABTS 용액 1 mL에 추출액 50 μ L를 가하여 흡광도의 변화를 정확히 30분 후에 측정하였다. 항산화 활성은 대조구에 대한 시료의 반응을 백분율로 표시하였다.

Radical scavenging activity(%)

$$= [(Abs\ control - Abs\ sample) / Abs\ control] \times 100$$

2.5. 세포 실험

2.5.1. 세포 배양

실험에 사용한 인체 폐암세포주(A549)와 인체 정상 폐세포(MRC-5)는 한국세포주은행(Seoul, Korea)에서 분양받았다. A549 세포주는 RPMI-1640(Welgene, Gyeongsan, Korea) 배지, MRC-5 세포주는 MEM(Welgene, Gyeongsan, Korea) 배지에 10% FBS(Gibco Inc., San Francisco, CA, USA)와 1% Penicillin(Gibco Inc.)을 첨가하여 사용하였다. 세포는 37°C, 5% CO₂ 조건에서 배양하였다.

2.5.2. 세포 독성 평가 및 폐암세포 성장억제 평가

에탄올 추출물의 50 mg $\times$ mL⁻¹ 농도 stock solution을 희석하여 인체 정상 폐세포(MRC-5) 및 인체 폐암세포(A549)에 투입한 후 생존율을 계산하여 평가하였다. 48-well cell culture plate (SPL Life Sci., Pocheon, Korea)에 세포 현탁액을 well 당 4×10^4 cells/300 μ L씩 처리하고 5% CO₂ 배양기에서 24시간 배양하였다. 배양 후 희석 시료를 25 μ L/well로 처리하고 5% CO₂ 조건에서 24시간 배양하였다. 이때 대조구로 멸균 증류수

를 사용하였다. 배양 후 세포생존율은 EZ-Cytox(DoGenBio Co., Seoul, Korea)를 이용하여 측정하였다. EZ-cytox의 WST (water soluble tetrazolium salt)는 물에 잘 녹는 수용성으로 살아 있는 세포의 dehydrogenase와 반응하여 오렌지 색의 수용성 formazan을 생성한다. Dehydrogenase는 대사적으로 왕성한 활동을 하는 세포의 미토콘드리아 전자전달계에 존재하는 효소로써 살아있는 세포에만 유효하다. 따라서 formazan의 생성은 살아있는 세포 수와 정의 상관관계를 가진다. Formazan의 생성은 흡광도 450 nm에서 측정하였고, 세포의 증식 및 세포독성은 다음 식에 의해 계산되었다.

$$\text{Cell viability (\%)} = \frac{(\text{Exp.} - \text{Blank})}{(\text{Control} - \text{Blank})} \times 100$$

Exp.: Absorbance of a well with cell, test solution and EZ-cytox

Blank: Absorbance of a well with medium and EZ-cytox, without cell

Control: Absorbance of a well with cell and EZ-cytox, without test solution

2.6. 통계 처리

완전임의배치 요인 분석 실험 설계에 의거하여, 3반복 실험을 수행하였으며, 데이터는 평균값을 구한 후 표준오차(standard error, SE)로 나타내었다. 데이터는 IBM SPSS 통계프로그램(ver 30.0.0.0)을 이용하여 Duncan의 다중비교법으로 평균간 다중비교를 실시하였다. 웹 기반 플랫폼인 MetaboAnalyst 5.0 (<https://www.metaboanalyst.ca/>)을 이용하여 표고버섯 내외품질이 A549와 MRC-5 세포주의 생존율에 미치는 영향에 대해 heatmap correlation coefficient matrix를 작성하였다. 이때 모

든 데이터를 중앙값 scaling을 통해 정규화하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 표고버섯 품질 특성

3.1.1. 중량감소율, 경도 및 부패율

수확 직후 강제 통풍 예냉한 신선 표고버섯에 UV-C를 0, 90, 180초 처리 후 20°C 상온 저장 5일째 중량감소율은 9.3-10.2% 범위로 처리구들 간에 큰 유의차는 없었다(Fig. 1A). 그러나 UV-C 처리구가 무처리구에 비해 중량감소율이 약간 높았는데, 이는 UV-C 조사량이 조직의 건조를 유발하였을 가능성이 있다. 갓의 경도는 20°C 상온 저장 3일째까지 UV-C 처리구들이 무처리구에 비해 높게 유지되어(Fig. 1B) 조직 연화를 지연시키는 효과를 보였다. 이 결과는 UV-C 처리로 표고버섯의 연화를 지연시킨다는 보고와 일치한다(Jiang 등, 2010). UV-C 처리는 세포벽 분해 효소의 활동을 감소시키고 세포벽 분해 속도에 영향을 미쳐 연화를 지연시킬 수 있다(Barka 등, 2000).

20°C 상온 저장 3일째 표고버섯의 대와 주름살 부분에서 부패가 발생하기 시작하였다. 20°C 상온 저장 5일째 부패율은 무처리구에서 약 16%로 UV-C 처리구들에 비해 높았다(Fig. 1C). 이는 UV-C 처리가 미생물 억제효과를 통해 부패율을 감소시키는 것을 의미한다.

3.1.2 갓과 주름살 색도, 슬라이스한 갓의 단면 색도

UV-C 처리구는 저장 중 갓과 주름살의 색도를 유지하는데 효과적이었다. 갓의 명도는 저장 기간 동안 UV-C 처리구들에서 무처리구에 비해 상대적으로 높은 값을 보였으나, 통계적 유의차는 없었다(Fig. 2A). Hunter a*값 및 b*값은 처리구 간 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 2B-2C). 갓의 Hue angle은 모든 처리구에서 수확직후보다 저장 5일째의 값이 더 높아져 저장 기

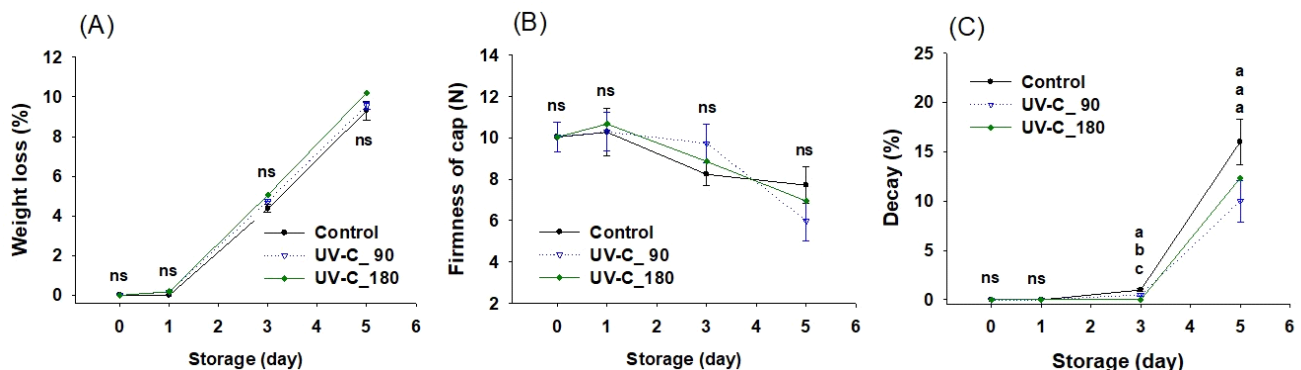


Fig. 1. Weight loss (A), firmness of cap (B), and decay rate (C) of shiitake mushrooms according to the UV-C treatment time and elapsed days at 20°C. All values are mean±SE (n=3). Means with different superscript letters on the bars are significantly different (p<0.05) by Duncan's multiple range test. ns, not significant.

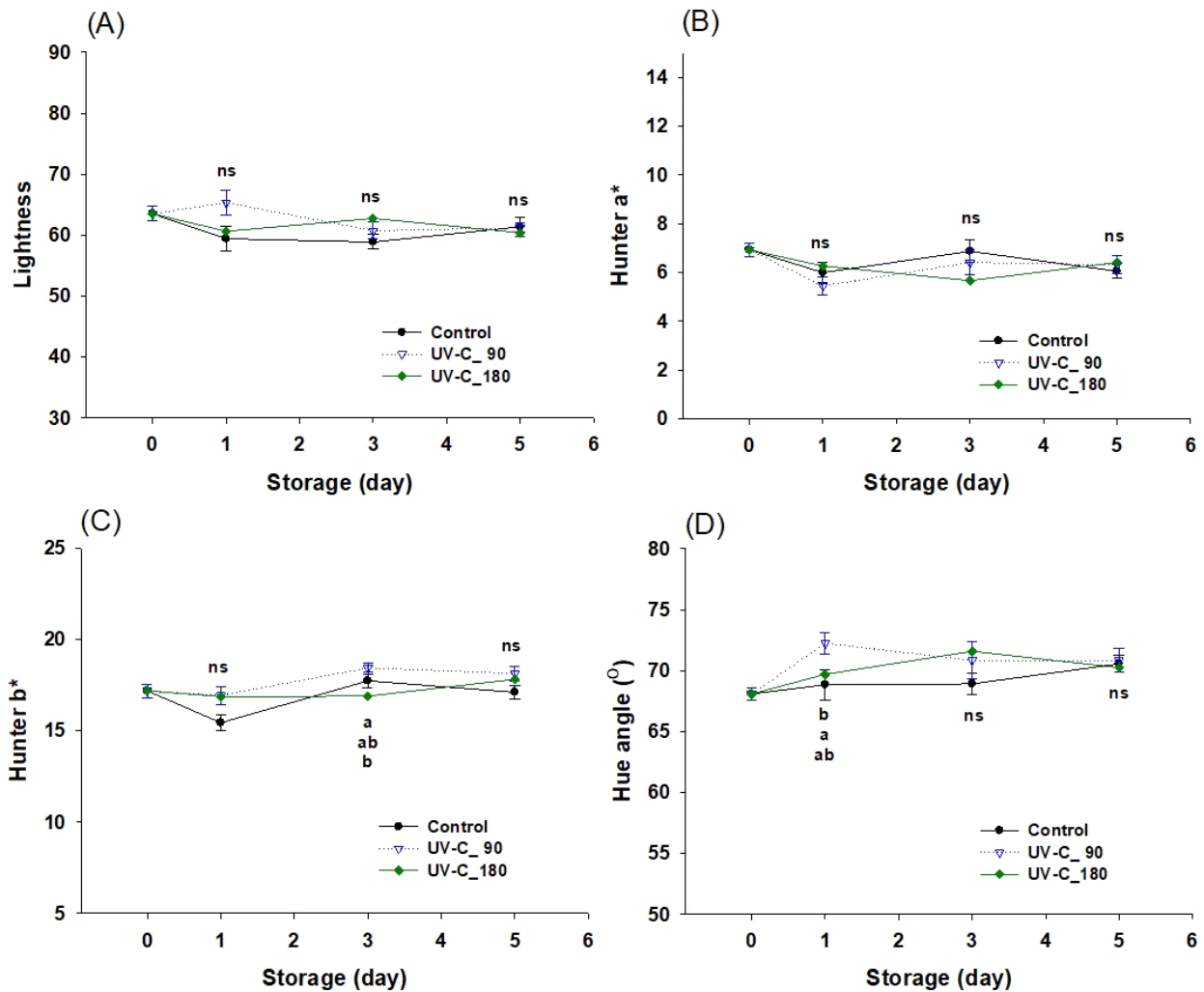


Fig. 2. Color changes in Hunter L* (lightness) (A), a* (red-green) (B), b* (yellow-blue) (C) and Hue angle (D) of pileus of shiitake mushrooms according to the UV-C treatment time and elapsed days at 20°C. All values are mean±SE (n=3). Means with different superscript letters on the bars are significantly different ($p<0.05$) by Duncan's multiple range test. ns, not significant.

간동안 갈변이 진행되었음을 알 수 있다. 처리구별로 비교시 무처리구가 저장 3일째까지 UV-C 처리구들에 비해 낮게 유지되었다(Fig. 2D).

저장 3일째에 주름살의 명도는 무처리구가 UV-C 처리구들에 비해 낮은 값을 보였고(Fig. 3A), Hunter a*값과 b*값은 무처리구가 더 높은 값을 보였다(Fig. 3B-3C). Hue angle은 저장 3일째까지 무처리구에서 낮게 유지되다가 저장 5일째에는 UV-C 90초 처리구가 낮아졌는데(Fig. 3D), 이는 a*값의 감소와 b*값의 차이가 반영된 결과이다.

표고버섯 갓을 슬라이스한 단면의 명도는 무처리구가 전 저장 기간 동안 높았다(Fig. 4A). a*값은 저장 3일째까지 무처리구가 높았으며, b*값은 저장 3일째까지 무처리구와 UV-C 180초 처리구에서 낮게 유지되었다(Fig. 4B-4C). Hue angle은 저

장 3일째까지 무처리구에서 낮은 값을 보이다가 저장 5일째 UV-C 180초 처리구에서 가장 낮아졌다(Fig. 4D).

3.1.3 총페놀성 화합물, 총플라보노이드 함량 및 항산화 활성

UV-C 처리구는 저장 3일째까지 총페놀성 화합물 및 항산화 활성을 유지하는 데 효과적이었으나, 5일째에는 무처리구에서 총페놀성 화합물 함량이 급격히 감소하였다(Fig. 5A). 신선 표고버섯의 저장 중 페놀성화합물 함량은 저장 시간이 경과할수록, 저장 온도가 증가할수록 신선도가 떨어지면서 감소하는데, 이는 저장 중 대사 활동이 진행되고, 높은 온도에서는 산화 반응 및 polyphenol oxidase 등 효소 활성의 증가에 기인한다(Li 등, 2022b). 따라서 20°C 저장 3일째까지는 표고버섯의 신선도가 유지된 것으로 보인다. 총플라보노이드 함량은 저장 3일째

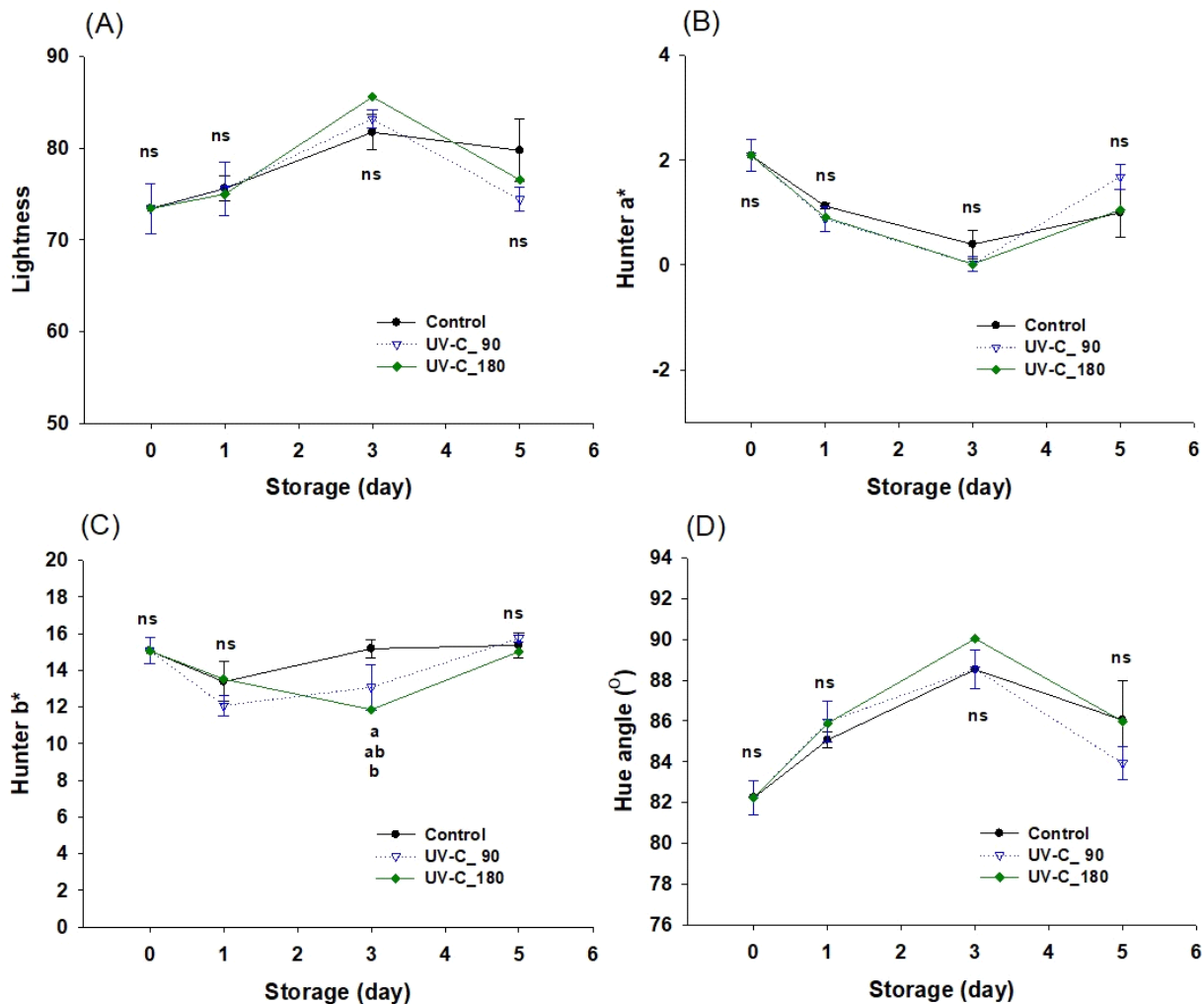


Fig. 3. Color changes in Hunter L* (lightness) (A), a* (red-green) (B), b* (yellow-blue) (C) and Hue angle (D) of gill of shiitake mushrooms according to the UV-C treatment time and elapsed days at 20°C. All values are mean±SE (n=3). Means with different superscript letters on the bars are significantly different ($p<0.05$) by Duncan's multiple range test. ns, not significant.

무처리구가 가장 높았으나, 저장 5일째에는 UV-C 90초 처리구보다 낮아지는 경향을 보였다. 총플라보노이드 함량은 저장 3일째까지 무처리구에서 가장 높았으나, 저장 5일째는 UV-C 90초 처리구보다 낮아졌다(Fig. 5B). DPPH 항산화 활성과 ABTS 항산화 활성은 저장기간이 경과함에 따라 UV-C 처리구들이 무처리구에 비해 유의적으로 높았고, 특히 180초 처리구가 90초 처리구에 비해 높은 항산화 활성을 보였다(Fig. 5C-5D).

3.1.4 구아닐산과 에르고스테롤 함량

구아닐산 함량은 UV-C 처리구들이 무처리구에 비해 유의하게 높았다(Fig. 6A). Ergosterol 함량은 저장 기간이 경과함에 따라 감소하는 경향을 보였으나, UV-C 180초 처리구에서 가장 높은 값을 유지하였다(Fig. 6B). 기존 연구에서 UV-C 처리가

비타민 D₂로의 전환을 유도한다는 보고와 달리(Hu 등 2020), 본 연구에서는 짧은 조사 시간(90초, 180초)으로 인해 이러한 변화가 충분히 일어나지 않았을 가능성이 있다. Hu 등(2020)은 이러한 전환이 시간 의존적, 즉 용량 의존적이거나 비타민 D₂의 증가율은 시간이 지남에 따라 감소하였다고 보고하였다.

본 연구에서는 미생물 억제제를 통한 신선 표고버섯의 신선도 유지 기간 연장을 목적으로 선별 라인에 UV-C 처리를 적용하고자 90초-180초간 단시간 처리를 하였다. 이 처리는 20°C 상온 저장 및 유통시 색도 유지 및 부패 억제 효과를 보였다.

3.1.5. 인체 폐암세포 증식 억제 및 세포 독성 평가

인체 폐암세포주인 A549 세포 생존율을 평가한 결과, 무처리구를 포함한 모든 UV-C 처리구들에서 약 20.5-42.4%의 항

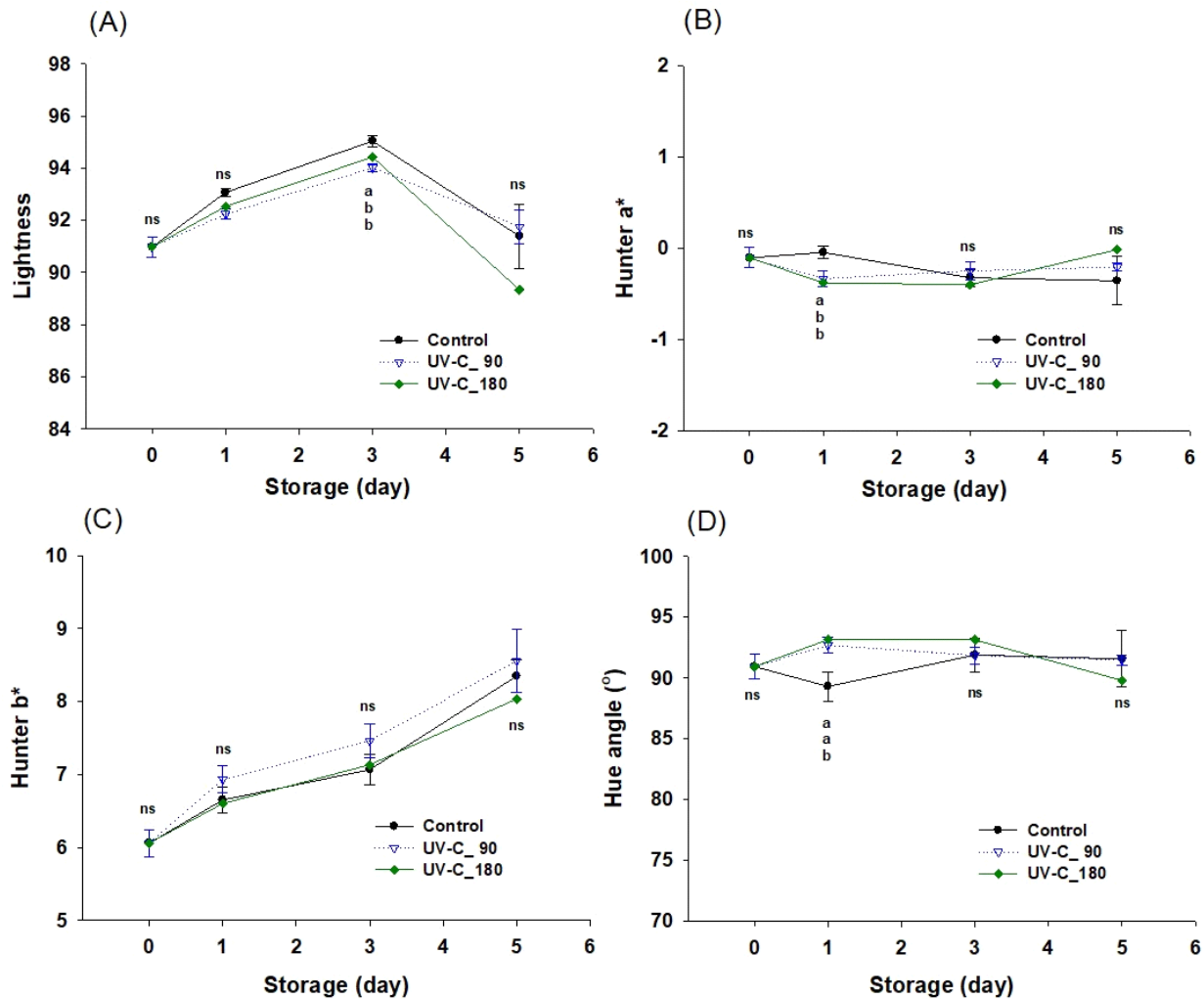


Fig. 4. Color changes in Hunter L* (lightness) (A), a* (red-green) (B), b* (yellow-blue) (C) and Hue angle (D) of sliced pileus of shiitake mushrooms according to the UV-C treatment time and elapsed days at 20°C. All values are mean±SE (n=3). Means with different superscript letters on the bars are significantly different (p<0.05) by Duncan's multiple range test. ns, not significant.

증식 활성을 보였다(Fig. 7A). 처리구별로 비교시, 3일째까지는 모든 처리구가 유사한 항증식 활성을 보였으나, 5일째에는 무 처리구에서 더 높은 항증식 활성이 나타났다. 표고버섯에 함유된 β -glucan(Murphy 등, 2020), lentinan(Imam 등, 2021) 등 다당체, eritadenine, 항산화 물질(Ahmad 등, 2023) 등이 면역 증강 및 암세포 증식을 억제하여 항암효과를 가진다고 보고되어 있다. 인체 폐암 세포주인 A549에 대한 항 증식 활성을 가지는 특정 페놀 화합물로는 gallic acid, caffeic acid, p-coumaric acid 등이 주된 성분으로 밝혀져 있다(Imam 등, 2021). 이러한 화합물들은 강력한 항산화 및 항염 효과를 지니며, 암세포의 증식을 억제하고 자가 사멸(apoptosis)을 유도한다. 본 실험에서 A549 세포에 UV-C 처리된 표고버섯 추출물의 항증식 효과가 감소한 이유는 특정 페놀성 화합물의 조성 변화와 관련될 가능

성이 있다. 특히 gallic acid, caffeic acid 등의 생리활성 물질이 UV-C 조사에 의해 변화하거나 감소했을 수 있으며, 이를 확인하기 위해 HPLC 또는 LC-MS를 활용한 추가 분석이 필요할 것으로 보인다.

MRC-5 세포 생존율은 수확 직후의 표고버섯 추출물 처리시 세포 생존율이 평균 증류수 대비 약 51.5% 높았으나 저장 기간이 경과할수록 급격히 감소하였고, 특히 저장 5일째의 추출물 처리시에는 모든 처리구에서 급격히 감소하였다(Fig. 7B). UV-C 처리구별 비교시, 저장 3일째 UV-C 90초 처리구의 추출물은 MRC-5 세포생존율을 평균 증류수 대비 약 25.9% 억제하여 세포독성을 보였고, UV-C 180초 처리구의 추출물은 수확 직후에 비해 급격히 하락하였으나 세포독성을 보이는 수준은 아니었다. 저장 5일째에는 모든 처리구의 추출물은 세포생존율을

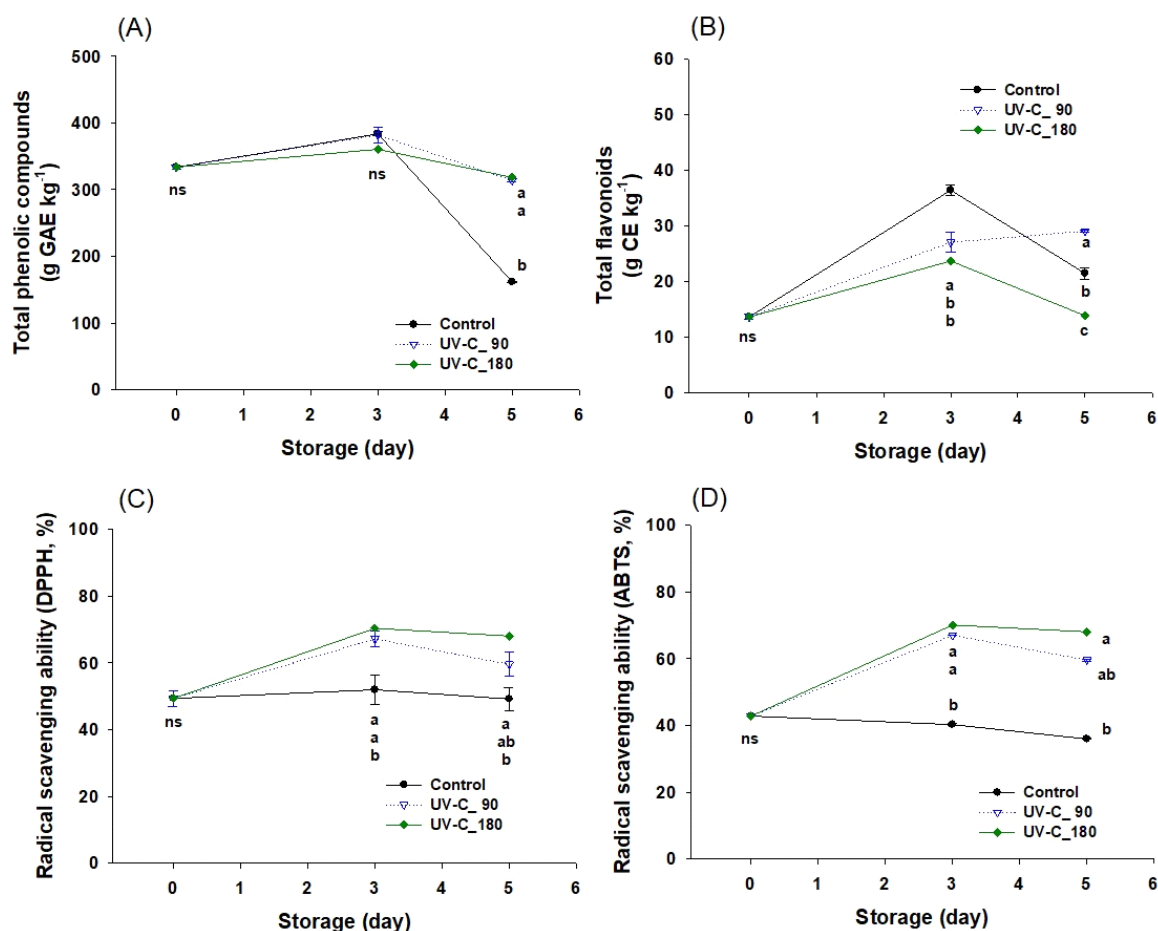


Fig. 5. Total phenolic compounds (A), total flavonoids (B), and antioxidant activity (C, D) of 85% ethanol extracts of shiitake mushrooms according to the UV-C treatment time and elapsed days at 20°C. All values are mean±SE (n=3). Means with different superscript letters on the bars are significantly different (p<0.05) by Duncan's multiple range test. ns, not significant.

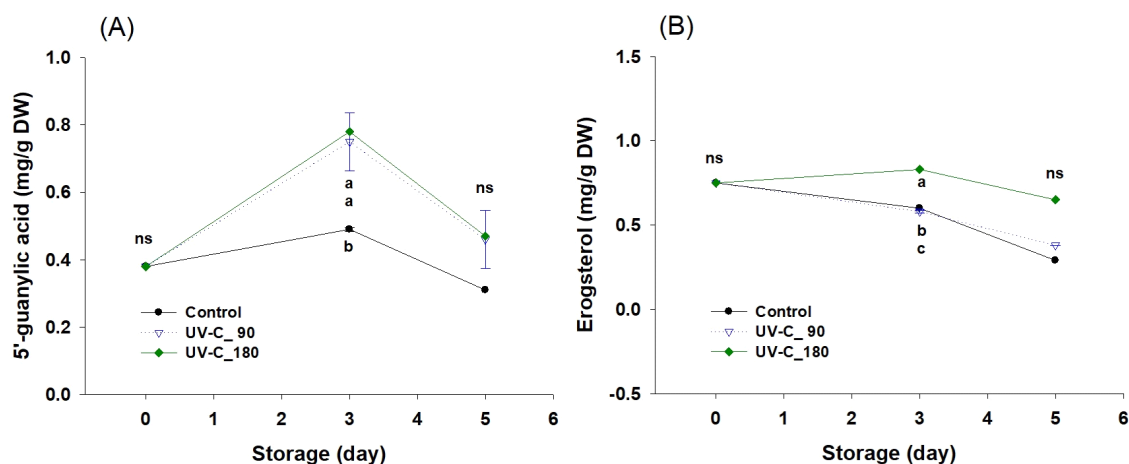


Fig. 6. Guanylic acid (A) and ergosterol (B) content of 85% ethanol extracts of shiitake mushrooms according to the UV-C treatment time and elapsed days at 20°C. All values are mean±SE (n=3). All values are mean±SE (n=3). Means with different superscript letters on the bars are significantly different (p<0.05) by Duncan's multiple range test. ns, not significant.

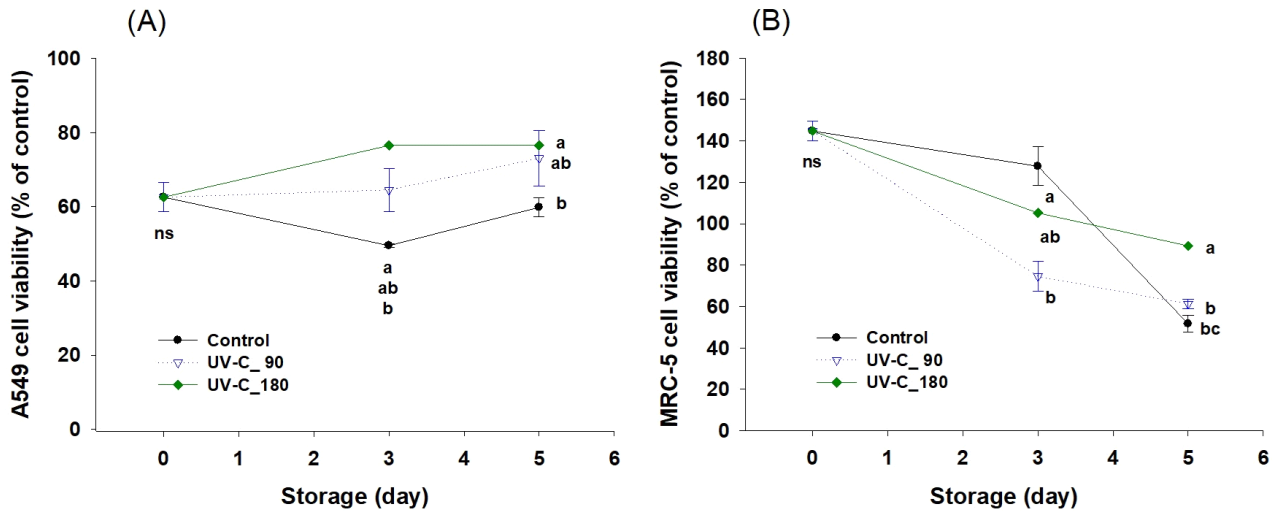


Fig. 7. Effect of 85% ethanol extracts of shiitake mushrooms on the viability of human lung cancer cell (A549) (A) and human lung epithelial cells (MRC-5) (B) according to the UV-C treatment time and elapsed days at 20°C. Cells were treated with extracts of shiitake mushrooms extracts for 24 h, and viability was assessed using EZ-Cytox. Distilled water was used as a control. All values are mean±SE (n=3). Means with different superscript letters on the bars are significantly different ($p<0.05$) by Duncan's multiple range test. test. ns, not significant.

50.9-89.3%로 떨어뜨려 세포독성을 보였으며, 세포 독성은 UV-C 180초 처리, UV-C 90초 처리, 무처리 순으로 높았다. 이는 저장 기간이 경과함에 따라 산화 스트레스와 지질 과산화물 및 퀴논류와 같은 산화 부산물이 증가하였을 가능성이 있다. 특히 무처리구에서는 미생물 오염 및 산화 부산물 증가로 인해 세포 독성이 급격히 증가한 것으로 판단된다.

3.2. UV-C 처리가 품질 유지에 미치는 영향

UV-C 처리는 신선 표고버섯의 저장 중 품질 유지에 긍정적인 영향을 미쳤으며, 특히 연화 지연과 부패 억제효과가 뚜렷하게 나타났다. 중량감소율은 UV-C 처리 시 다소 증가하였으나 큰 차이를 보이지는 않았다. UV-C 처리구에서 저장 초기 동안 유의적으로 높게 유지되었으며, 이는 세포벽 분해 효소의 활성 감소와 관련될 가능성이 있다.

중량감소율은 표고버섯의 저장 및 유통 중 품질 저하를 대표하는 품질 요인이다. 본 실험에서 MCR-5 세포에 대한 독성을 보이지 않은 저장 3일째 중량감소율은 약 4.3-5.0%였고, 모든 처리구에서 세포 독성을 보인 저장 5일째의 중량감소율은 약 9.2-10.1%였다. 저장 3일째 UV-C 90초 처리구에서만은 세포독성을 보인 것과, 저장 5일째 모든 처리구에서 세포 독성을 보이는 것으로 미루어 보면 중량감소율 등 신선도에 영향을 미치는 요인들과 UV-C 처리에 의한 생리활성 물질 변화가 복합적으로 MRC-5 세포 생존율에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

한편, 신선 표고버섯의 저장 및 유통 기간이 경과할 때 품질 저하와 동반되는 중량감소 시, 그리고 건조품을 조제 시 건조

과정 중 발생하는 중량감소 시의 내부 기능성분의 변화에는 차이가 있을 수 있다. 신선 표고버섯의 품질 저하와 동반하여 나타나는 중량감소 시에는 총페놀성 화합물이 감소하는 반면, 열풍 건조 등 건조품 조제 과정 중에는 비효소적인 글리코실화와 Maillard reaction으로 다양한 항산화물질이 합성되어 항산화 활성은 높아졌다고 보고되었다(Chaiyapoot 등, 2023).

부패율 또한 저장 5일째 무처리구에서 16%로 급격히 증가한 반면, UV-C 처리구에서는 상대적으로 낮게 유지되었다. 이는 UV-C 처리가 미생물 생장을 억제하고 병원성 미생물의 감염을 지연시켜 부패 진행을 늦춘 것으로 판단된다. 색도 변화에서도 UV-C 처리 효과가 관찰되었다. 값과 주름살의 명도(L값)는 저장 기간 동안 UV-C 처리구에서 더 높은 값을 유지하였으며, 이는 갈변 진행을 억제하는 효과를 나타낸다. UV-C 처리는 표고버섯 주름살의 황색도(yellowness)를 감소시켰으며 무처리구가 b* 값 변화 측면에서 상대적으로 더 안정적인 경향을 보였다. 이러한 현상은 UV-C 처리가 polyphenol oxidase(PPO) 및 peroxidase(POD) 활성에 영향을 미쳐 색소 성분의 산화를 촉진할 가능성을 시사한다. 특히 b* 값이 낮아지는 경향은 UV-C 처리가 카로티노이드나 플라보노이드와 같은 황색 색소의 산화 혹은 분해를 유발할 수 있음을 의미할 수 있다.

항산화 활성 분석 결과, UV-C 처리구에서는 저장 5일까지 총페놀성 화합물 함량이 안정적으로 유지되었으며, 이로 인해 DPPH 및 ABTS 항산화 활성도 무처리구 대비 높은 수준을 유지하였다. 저장 5일째에는 UV-C 180초 처리구가 가장 높은 항산화 활성을 보였다. 이는 UV-C 처리가 페놀성 화합물 함량

유지에 긍정적인 영향을 미쳤을 가능성을 나타낸다. 특히 구아닐산과 에르고스테롤 함량 분석에서 UV-C 180초 처리구가 가장 높은 값을 보였으며, 이는 기능성 성분의 보존 측면에서 UV-C 처리의 활용 가능성을 시사한다.

3.3. UV-C 처리와 생리활성 물질 변화

Fig. 8의 Pearson 상관 행렬 분석 결과, A549 세포 생존율은 총페놀성 화합물, 총플라보노이드, 항산화 활성, 구아닐산 및 에르고스테롤 함량과 높은 정의 상관관계를 보였다. 반면, MRC-5 세포 생존율은 저장 기간이 길어질수록 증량감소율과 부의 상관관계를 나타내었으며, 총페놀성 화합물 및 항산화 활성과도 부의 상관을 보였다. 이러한 결과는 저장 후반부로 갈수록 UV-C 처리된 표고버섯에서도 생리활성 성분의 감소가 일어나며, 이로 인해 정상 폐세포에 대한 세포 독성이 증가할 가능성이 있음을 시사한다.

신선 표고버섯에 UV-C 처리는 총페놀성 화합물 및 항산화

활성 유지에 기여하였으나, 특정 항암 활성 화합물(p-coumaric acid, gallic acid 등)의 조성 변화를 유도할 가능성이 있다. 또한, UV-C 강도가 신선도 유지에는 적절했으나 항암 활성에는 충분한 영향을 미치지 못했을 가능성도 있다. 이는 UV-C 처리 강도가 낮으면 생리활성 물질 합성이 충분히 유도되지 않으며, 너무 높으면 스트레스 반응으로 인해 항산화 성분이 분해될 가능성이 있기 때문이다.

본 실험 결과는 신선 표고버섯을 20°C 저장 시 시간이 경과함에 따라 품질이 저하되며, 품질에 따라 인체 폐암세포주인 A549에 대한 항증식 활성과 인체 건전 세포주인 MRC-5에 대한 영향이 있음을 보여준다. 증량감소율은 A549 및 MRC-5 세포주의 생존율에 저장기간에 따른 상관관계를 보였다(Fig. 8). A549 세포주에서는 저장 기간이 길어질수록 생존율에 대해 부의 상관을 보이는 방향성을 보였는데(Fig. 8A), 이는 항증식 활성이 증량감소율이 높아질수록 감소하는 것을 의미한다. MRC-5 세포주에서는 저장 기간이 길어질수록 생존율에 대해 부의 상관관

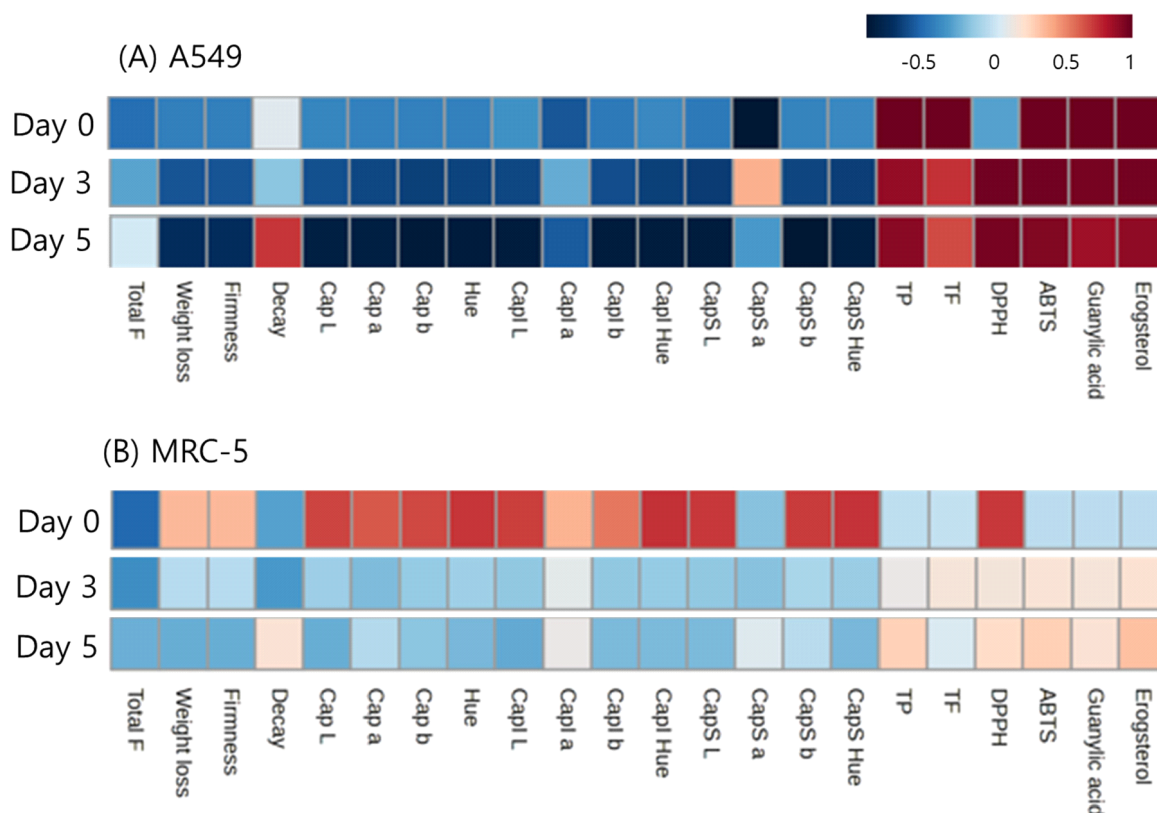


Fig. 8. Pearson's correlation coefficient heatmap matrix showing the effects of quality factors and bioactive compounds of fresh shiitake mushrooms stored for 0, 3, and 5 days at 20°C on the viability of A549 (A) and MRC-5 (B) cell lines. Figure legend indicates the results of correlation coefficient (r). Red and blue colors provide positive and negative correlation coefficients between variables, respectively. TF, total flavonoids; TP, total phenolic compounds; Cap, pileus of shiitake mushrooms; CapS, sliced pileus of shiitake mushrooms; CapL, gill of shiitake mushrooms; Hue, Hue angle; L, lightness; a, hunter a*; b, hunter b*; Decay, the ratio of decayed shiitake mushrooms; Total F, total freshness.

계를 보였으며(Fig. 8B), 이는 중량감소율이 높아질수록 인체 건강 폐세포주인 MRC-5의 생존율은 낮아짐을 의미한다. 이는 신선 표고버섯을 이용할 때 신선도가 높은 것을 이용하는 것이 더 바람직함을 시사한다. 또한 표고버섯을 건조하여 제품화할 때 수확 후 어느 정도의 품질 상태 이내에서 건조해야 하는지에 대한 정보를 제공할 수 있다. 또한 UV-C 처리 조건을 설정할 때, 단순히 항산화 활성 및 기능성 성분의 유지뿐 만이 아니라, 장기간 저장 중 나타날 수 있는 세포 독성 영향까지 고려해야 하며, 신선 표고버섯을 건조하여 상품화할 때 수확 후 가능한 빠른 시일 내에 조제하는 것이 좋다는 것을 시사한다.

3.4. UV-C 최적 처리 조건 및 실용적 적용 가능성

신선 표고버섯의 품질 유지와 일반 유통을 고려하면 UV-C 90초 처리가 적절한 조건으로 판단된다. 반면, UV-C 180초 처리는 A549 폐암 세포 증식 억제 효과가 90초 처리구보다 더 크게 나타나 기능성 식품 개발을 위한 조건으로 적절할 수 있다. 단, 이 때 MRC-5 정상 폐세포에서는 저장 3일까지 UV-C 처리에 의한 세포 독성이 나타나지 않았고, 저장 5일째에는 90초 처리구보다는 세포 독성이 낮았으나 독성이 증가하는 경향을 보여 장기 저장 시 안전성을 고려해야 한다.

UV-C 처리 조건은 적용 목적에 따라 달라질 수 있으며, 장기 저장 및 소비자 건강 안전성을 고려할 때, UV-C 120-150초의 중간 처리 시간이 새로운 최적 조건이 될 가능성이 있다. 추가 연구를 통해 UV-C 조사량과 특정 항암 성분 변화의 연관성을 명확히 분석할 필요가 있다.

4. 요약

본 연구는 UV-C 처리 후 20°C에서 저장한 신선 표고버섯의 품질 특성을 평가하고, 85% 에탄올 추출물의 항산화 활성 및 A549 폐암 세포 증식 억제 효과를 분석하였다. UV-C 처리는 조직 연화를 지연시키고, 부패율을 감소시키며, 페놀성 화합물 함량과 항산화 활성을 유지하는 효과를 보였다. 구아닐산과 에르고스테롤 함량은 UV-C 180초 처리구에서 가장 높게 나타났다. UV-C 처리된 표고버섯의 에탄올 추출물은 A549 세포 증식을 20.5-42.4% 억제하였으나, 저장 기간이 길어질수록 항산화 활성이 감소하였다. 정상 폐세포(MRC-5)에 대한 세포 독성은 저장 5일째 모든 처리구에서 증가하였으며, 특히 무처리구에서 가장 큰 폭으로 상승하였다. Pearson 상관 분석 결과, A549 세포 생존율은 총페놀성 화합물, 플라보노이드, 항산화 활성, 구아닐산 및 에르고스테롤 함량과 정의 상관관계를 보였으며, MRC-5 세포 생존율은 중량감소율과 부의 상관관을 나타냈다. UV-C 처리는 표고버섯의 품질 유지와 항산화 활성 증진에 효과적이지만, 수분 손실로 인한 중량감소가 증가하고, 장기 저장 시 생리활성 물질 감소 및 세포 독성이 증가할 가능성이 있다. 신선 표고버

섯의 품질 유지를 위해서는 UV-C 90초 처리가 적절하며, 기능성 식품 개발에는 UV-C 180초 처리가 더 적합할 수 있다. 장기 저장 시 안전성 평가를 위한 추가 연구가 필요하다.

Funding

The research was supported by Cheonsu Mountain Medicinal Herb Research Association 2023-2024.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial and administrative support provided by the Cheonsu Mountain Medicinal Herb Research Association, which made this research possible.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflicts of interest.

Author contributions

Conceptualization: Cho MA, Lee CM. Methodology: Cho MA, Choi JW. Formal analysis: Cho MA, Choi JW. Validation: Park JC. Writing - original draft: Cho MA. Writing - review & editing: Cho MA, Choi JW, Park JC.

Ethics approval

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

ORCID

MiAe Cho (First & Corresponding author)

<https://orcid.org/0009-0007-1711-1873>

Ji Weon Choi

<https://orcid.org/0000-0003-1929-4697>

Chang Moo Lee

<https://orcid.org/0009-0004-6012-7377>

Jong Cheol Park

<https://orcid.org/0009-0006-1260-7397>

References

- Abdelshafy AM, Luo Z, Belwal T, Ban Z, Li L. A comprehensive review on preservation of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*): Techniques, research advances and influence on quality traits. Food Rev Int, 39, 2742-2775 (2023)
- Ahmad I, Arif M, Xu M, Zhang J, Ding Y, Lyu F.

- Therapeutic values and nutraceutical properties of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*): A review. Trends Food Sci Technol, 134, 123-135 (2023)
- Asdullah HU, Chen F, Hassan MA, Abbas A, Sajad S, Rafiq M, Raza MA, Tahir A, Wang D, Chen Y. Recent advances and role of melatonin in post-harvest quality preservation of shiitake (*Lentinula edodes*). Front Nutr, 11, 1348235 (2024)
- Barka EA, Kalantari S, Makhlof J, Arul J. Impact of UV-C irradiation on the cell wall-degrading enzymes during ripening of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) fruit. J Agric Food Chem, 48, 667-671 (2000)
- Chaipoot S, Wiriyacharee P, Phongphisutthinant R, Buadoktoom S, Srisuwun A, Somjai C, Srinuanpan S. Changes in physicochemical characteristics and antioxidant activities of dried shiitake mushroom in dry-moist-heat aging process. Foods, 12, 2714 (2023)
- Finimundy TC, Dillon AJP, Henriques JAP, Ely MR. A review on general nutritional compounds and pharmacological properties of the *Lentinula edodes* mushroom. Food Nutr Sci, 5, 1095-1105 (2014)
- Hu D, Chen W, Li X, Yue T, Zhang Z, Feng Z, Li C, Bu X, Li QX, Hu CY. Ultraviolet irradiation increased the concentration of vitamin D₂ and decreased the concentration of ergosterol in shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) and oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) powder in ethanol suspension. ACS Omega, 5, 7361-7368 (2020)
- Imam KMSU, Xie Y, Liu Y, Wang F, Xin F. Extraction, isolation, and identification of cytotoxic secondary metabolites from shiitake mushroom 808 *Lentinula edodes* (Berk.). ACS Food Sci Technol, 1, 551-558 (2021)
- Jiang T, Jahangir MM, Jiang Z, Lu X, Ying T. Influence of UV-C treatment on antioxidant capacity, antioxidant enzyme activity and texture of postharvest shiitake (*Lentinus edodes*) mushrooms during storage. Postharvest Biol Technol, 56, 209-215 (2010)
- Li Y, Ding S, Kitazawa H, Wang Y. Storage temperature effect on quality related with cell wall metabolism of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) and its modeling. Food Packag Shelf Life, 32, 100865 (2022a)
- Li Y, Ding S, Wang Y. Shelf life predictive model for postharvest shiitake mushrooms. J Food Eng, 330, 111099. (2022b)
- Li Y, Ishikawa Y, Satake T, Kitazawa H, Qiu X, Rungchang S. Effect of active modified atmosphere packaging with different initial gas compositions on nutritional compounds of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*). Postharvest Biol Technol, 92, 107-113 (2014)
- Mizuno T. Shiitake, *Lentinus edodes*: Functional properties for medicinal and food purposes. Food Rev Int, 11, 109-128 (1995)
- Murphy EJ, Masterson C, Rezoagli E, O'Toole D, Major I, Stack GD, Lynch M, Laffey JG, Rowan NJ. β -Glucan extracts from the same edible shiitake mushroom *Lentinus edodes* produce differential *in-vitro* immunomodulatory and pulmonary cytoprotective effects: Implications for coronavirus disease (COVID-19) immunotherapies. Sci Total Environ, 732, 139330 (2020)
- Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radic Biol Med, 26, 1231-1237 (1999)
- Singleton VL, Orthofer R, Lamuela-Raventós RM. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. Methods Enzymol, 299, 152-178 (1999)
- Subramaniam S, Jiao S, Zhang Z, Jing P. Impact of post-harvest processing or thermal dehydration on physiochemical, nutritional and sensory quality of shiitake mushrooms. Compr Rev Food Sci Food Saf, 20, 2560-2595 (2021)
- Xu Y, Zhao Y, Zhang Y, Shi Q. Effect of postharvest storage time on quality characteristics of explosion puffing dried whole shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) crisps. J Sci Food Agric, 104, 629-642 (2024)
- Ye JJ, Li JR, Han XX, Zhang L, Jiang TJ, Miao X. Effects of active modified atmosphere packaging on postharvest quality of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) stored at cold storage. J Integr Agric, 11, 474-482 (2012)
- Zhishen J, Mengcheng T, Jianming W. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food Chem, 64, 555-559 (1999)