

품종별 버섯 분말 첨가에 따른 고수분 압출성형 식물조직단백의 품질 특성

전재은¹ · 서미숙¹ · 정선영² · 조용식³ · 안기홍⁴ · 김경미^{5*}

¹국립식량과학원 발효가공식품과 박사후연구원, ²국립식량과학원 발효가공식품과 연구원,

³국립식량과학원 발효가공식품과 농업연구관, ⁴국립원예특작과학원 버섯과 농업연구사,

⁵국립식량과학원 발효가공식품과 농업연구사

Quality Characteristics of High-Moisture Extruded Texturized Vegetable Protein (TVP) with Mushroom Powders from Different Cultivars

Jae-Eun Jeon¹, Mi Sook Seo², Sun-Young Jeong², Young Sik Cho³, Gi-Hong An⁴ and Kyung-Mi Kim^{5*}

¹Ph.D. Researcher, Fermented and Processed Food Research Division, National Institute of Crop and Food Science, RDA, Jeonju 54875, Republic of Korea

²Researcher, Fermented and Processed Food Research Division, National Institute of Crop and Food Science, RDA, Jeonju 54875, Republic of Korea

³Senior Researcher, Fermented and Processed Food Research Division, National Institute of Crop and Food Science, RDA, Jeonju 54875, Republic of Korea

⁴Assistant Researcher, Mushroom Research Division, National Institute of Horticultural and Herbal Science, RDA, Eumseong 27709, Republic of Korea

⁵Assistant Researcher, Fermented and Processed Food Research Division, National Institute of Crop and Food Science, RDA, Jeonju 54875, Republic of Korea

ABSTRACT

This study investigated the effects of adding six types of mushroom powder on the quality characteristics of high-moisture extruded texturized vegetable protein (TVP). Addition of mushroom decreased the lightness and yellowness while increasing redness. Moisture content and water absorption varied significantly depending on the polysaccharide composition and insoluble fiber content of each mushroom. Soluble solids content reflected the differences in the low-molecular-weight soluble components, and turbidity was lower than the control. Hardness, chewiness, and cutting strength increased significantly, while springiness decreased slightly with addition of mushroom powder. These changes were attributed to interactions between the mushroom-derived polysaccharides and polyphenols with proteins, promoting a denser internal network. Overall, the effects seen with the addition of mushroom powder highlighted the potential for developing TVP products using various mushroom cultivars.

Key words: textured vegetable protein (TVP), high-moisture extrusion (HME), mushroom

서 론

전 세계적인 인구 증가와 환경오염 심화로 인해 지속 가능한 식량 공급에 대한 관심이 높아지면서, 기존의 전통적인 가축 사육 및 육류 생산 방식만으로는 미래 식량 수요를 충족하기 어려울 것으로 전망된다(Giller KE 등 2021). 국제연합은 2050년까지 세계 인구가 약 97억 명에 이를 것으로 전망하고 있으며, 이에 따른 식량 수급 불균형과 단백질 공급 부족에 대한 우려가 커지고 있다(Canti M 등 2024). 이러한 사회 환경 변화와 함께 건강과 지속 가능성을 중시하는 식품 소비 트렌드가 확산되고 있으며, 식물성 단백질 기반 식품

시장과 식물성 대체육 제품 개발이 빠르게 확대되고 있다(Tang M 등 2024). 현재 식물성 대체육은 고단백, 저지방, 고식이섬유 식품으로서 영양학적 장점을 가지며, 환경적 측면에서도 육류 생산 대비 온실가스 배출량과 자원 소모가 적어 친환경 식품으로 주목받고 있다. 최근 다양한 원료와 가공 기술을 활용한 대체육 개발 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 고수분 압출성형 기술은 식물성 단백질에 섬유질 구조를 부여하여 실제 고기의 조직감과 유사한 질감을 구현하는 대표적인 제조 공정으로 활용되고 있다(Baune MC 등 2022; Schmid EM 등 2022).

한편, 버섯은 특유의 감칠맛과 섬유성 조직감을 지닌 식품으로, 대체육 제품의 조직감 개선과 풍미 향상에 기여할 수 있는 원료로 주목받고 있다(Cho SY & Ryu GH 2021). 버섯

* Corresponding author : Kyung-Mi Kim, Tel: +82-55-249-6330, Fax: +82-505-999-2104, E-mail: kimkm@korea.kr

에는 키틴 및 불용성 β -글루칸 같은 다당류뿐만 아니라 만노오스, 글루코스, 자일로스 등의 저분자 수용성 당류 및 유리 아미노산이 풍부하게 함유되어 있다(Manzi P 등 2001; Vetter J 2007; Kim MY 등 2009). 이러한 성분들은 고수분 압출 공정 중 고온·고압·전단력 조건에서 식물성 단백질과의 상호작용을 유도하여, 보다 조밀하고 섬유화된 네트워크 구조 형성에 기여할 수 있다(Schmid EM 등 2022). 불용성 β -글루칸과 키틴은 특히 고분자 성분으로 단백질 사슬과 물리적·화학적 상호작용을 통해 강인한 조직감을 부여하며, 압출 후 제품의 기계적 물성 개선에 긍정적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Xiao T 등 2023). 또한 이러한 복합체 형성은 제품 내부의 섬유 배열과 밀도를 높여 실제 육류와 유사한 식감을 구현하는 데 중요한 역할을 한다(Cho SY & Ryu GH 2021). 버섯은 품종에 따라 β -글루칸, 키틴, 유리 아미노산, 저분자 다당류 등 성분 조성에 차이가 있으며(Vetter J 2007; Sari M 등 2017), 이러한 성분 차이는 압출 후 식물 조직단백의 조직감 및 물리적 특성에 다양한 영향을 미칠 수 있다. 그럼에도 불구하고, 품종별 버섯을 첨가한 고수분 압출성형 식물조직단백 제품 개발 및 품질 특성에 대한 연구는 아직 제한적인 상황이다.

이에 본 연구에서는 6종의 버섯을 고수분 압출성형 식물 조직단백 제조에 첨가하여 각각의 품질 특성을 비교·분석하였으며, 이를 통해 대체육 개발 소재로서 버섯의 활용 가능성을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료

본 실험에 사용된 단백질 원료인 탈지대두분말은 국산 대두(*Glycine max* (L.) Merr.) 품종 중 가장 재배량이 많은 대원콩을 국립종자원에서 구입하여 콩의 껍질을 벗기고 착유기(STS304, Seoheung-eng Co., Paju, Korea)를 이용하여 80°C에서 압착 탈지하여 얻어진 탈지박을 롤러밀(KM18, Kyung Chang Precision Seoul, Korea)로 분말화하였다. 글루텐(Comida, ADM BAZANCOURT, France), 옥수수 전분(Samyang Ltd, Ulsan, Korea)은 시중에서 구매하여 사용하였다. 버섯은 느타리(Oyster mushroom, ‘수한’), 큰느타리(King oyster mushroom), 표고(Shiitake mushroom, ‘모리209’), 북령(Poria mushroom, ‘북령1호’), 팽이(Enoki mushroom, ‘아람’), 양송이(Button mushroom, ‘이담’)는 국립원예특작과학원에서 분말화 상태로 제공받아 사용하였다. 모든 시료는 각각 밀봉하여 4°C 냉장 보관하였으며(GC-124HGFP, LG Electronics Inc., Seoul, Korea), 실험 직전에 꺼내어 사용하였다.

2. 고수분 압출성형 식물성 단백질 제조

버섯 분말이 첨가된 식물조직단백은 Seo MS 등(2024)과 Cho SY & Ryu GH(2021)의 연구를 참고하여 여러 차례의 예비실험을 통해 배합비를 결정하였다(Table 1). 예비실험에서 버섯 분말 15% 이상 첨가 시 조직감이 현저히 저하되어 적절한 물리적 안정성을 유지하기 어려웠다. 이에 따라 버섯 분말 첨가 수준을 10%로 결정하였다. 즉, 탈지대두분말 50%, 글루텐 30%, 옥수수전분 20%로 구성된 기본 배합을 바탕으로, 기본 배합 90%에 버섯 분말 10%를 혼합하였다. 대조군은 버섯 분말을 첨가하지 않은 기본 배합 100%로 구성하였으며, 6종의 버섯 분말은 각각 동일한 조건으로 기본 배합과 혼합하여 시료를 제조하였다. 모든 시료는 실온에서 균일하게 혼합하여 사용하였다. 고수분 식물조직단백은 Intermeshing twin-screw extruder(Process-11, Thermo Fisher Scientific, Inc., Germany)를 사용하였으며, 배럴 말단에는 냉각 다이(cooling die)를 연결하였다. 압출기는 총 7개의 독립적인 온도 제어 구간으로 구성되어 있으며, 각 구간별로 Zone 2(40°C), Zone 3(60°C), Zone 4(80°C), Zone 5(100°C), Zone 6(120°C), Zone 7(120°C), Zone 8(150°C)로 설정하였다. 냉각 다이의 온도는 130°C로 설정하였다. 스크루 회전 속도는 250 rpm으로 유지하였고, 수분은 정량펌프(BT101S Peristaltic Pump Drive, Lead Fluid Technology Co., Baoding, China)를 이용해 34 rpm (16.6 g/min)의 속도로, 원료는 12 rpm (19.6 g/min)의 속도로 각각 주입하였다.

3. 외관 및 색도

색도 측정을 위해 압출성형 직후의 시료를 지름 35 mm의 투명 셀(cell)에 담아 준비하였다. 색도 측정은 색차계(Color i7, X-rite Inc., Grand Rapids, MI, USA)를 사용하여 반사광 조건에서 수행하였으며, Hunter color 체계에 따라 표면의 명도(L, lightness), 적색도(a, redness), 황색도(b, yellowness)를 측정하였다. 표준 색판으로는 백색판(L: 95.78, a: -0.22, b: 2.72)을 사용하였다. TVP의 섬유 구조와 조직화 정도를 관찰하기 위해 시료를 다양한 방향에 따라 절단하여 촬영하였다(Galaxy Jump 2, Samsung Electronics Co., Ltd, Suwon,

Table 1. Formulation of texturized vegetable protein (TVP) with mushroom powders from different cultivars

Ingredient	Control (%)	Mushroom-added TVP (%)
Defatted soy flour	50.0	45.0
Wheat gluten	30.0	27.0
Corn starch	20.0	18.0
Mushroom powder	0.0	10.0
Total	100.0	100.0

Korea). 먼저 외관 확인을 위해 수평으로 놓고 상단에서 촬영하였으며, 가로 방향 및 높이 절단 지점을 절단한 후 단면이 드러나도록 펼친 후 내부 섬유 조직을 촬영하였다.

4. pH 및 수분함량

pH 측정을 위해 시료 2 g을 증류수에 현탁하여 10% 현탁액을 제조한 뒤, 교반하여 균질화하였다. 이후 원심분리기(2236HR, GYROZEN, Kimpo, Korea)를 이용해 4,000 rpm에서 20분간 원심분리하고, 상등액을 취하여 pH meter(Orion Star A211, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)로 측정하였다. 수분함량은 식품공전에 명시된 상압가열건조법에 준하여 측정하였다(MFDS 2024). 각 시료 2 g을 정확히 칭량하여 건조용 알루미늄 접시에 고르게 펼친 뒤, 105°C로 설정된 건조기(KMC-1202D4, Vision Co., Ltd, Bucheon, Korea)에서 건조하였다. 이후 시료는 데시케이터에서 실온으로 냉각하였으며, 냉각된 시료의 무게를 측정하여 건조 전후의 질량 차이를 바탕으로 수분 함량을 계산하였다.

5. 수분흡수력

수분흡수력은 Park CS 등(2023)의 방법을 참고하여 측정하였다. 측정을 위해 압출성형 직후의 시료 10 g을 5배 중량의 끓는 물에 넣고 3분간 가열하였다. 체에 받쳐 실온에서 30분간 냉각한 뒤 표면의 수분을 제거하고 무게를 측정하여 아래의 식에 따라 수분흡수력(Eq. 1)을 계산하였다.

$$\text{수분흡수력(\%)} = \frac{\text{수분 흡수 후 시료의 무게(g)} - \text{시료의 무게(g)}}{\text{시료의 무게(g)}} \times 100 \quad (1)$$

6. 고형분 용출률 및 탁도

고형분 용출률은 Park CS 등(2023)의 방법을 참고하여 측정하였다. 측정을 위해 수분흡수력 측정 시 체에 받쳐 수거한 가열수를 미리 무게를 측정해 둔 알루미늄 접시에 담아 105°C로 설정된 건조기(Vision Co., Ltd)에서 24시간 건조하였다. 이후 데시케이터에서 실온으로 냉각한 뒤, 접시의 무게를 측정하여 아래의 식(Eq. 2)에 따라 고형분 용출률을 계산하였다. 탁도 측정을 위한 시료는 고형분 용출률 측정 시 사용한 것과 동일한 방법으로 준비하였다. 체에 받쳐 수거한 액의 흡광도는 분광광도계(Cary 3500 Multicell, Agilent, Santa Clara, USA)를 이용하여 600 nm 파장에서 측정하였다.

$$\text{고형분용출률 (\%)} = \frac{\text{건조 후 접시의 무게 (g)} - \text{건조 전 접시의 무게(g)}}{\text{시료의 무게(g)}} \times 100 \quad (2)$$

7. 조직감

조직감은 물성분석기(TAXTplus, Zwick Roell, Ulm, Germany)를 사용하여 측정하였다. 압출성형 직후의 시료를 1.0 × 1.0 × 0.5 cm 크기로 절단한 뒤, 직경 2.5 cm의 probe를 이용해 변형률 30%, 2 bite 조건으로 경도(hardness), 탄력성(springiness), 씹힘성(chewiness), 응집성(cohesiveness)을 측정하였다. 절단 강도는 레오미터(COMPAC-100II, Sun Scientific Co., Tokyo, Japan)를 사용하여 측정하였으며, 시료는 1.0 × 2.0 × 0.5 cm 크기로 절단하여 횡단면의 절단 강도(cutting strength)를 측정하였다.

8. 통계분석


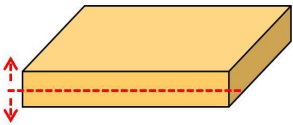



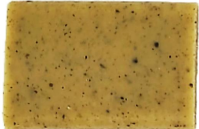


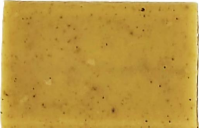


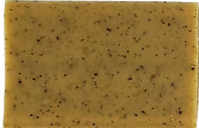




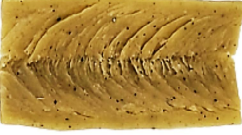






모든 실험은 3회 이상 반복하여 진행하였다. 실험 결과는 SPSS Statistics(ver. 23, IBM Corp, Armonk, NY, USA)를 이용하여 평균과 표준편차로 나타내었다. 시료 간의 유의성을 검증하기 위해 분산분석을 실시하였고, 시료별 평균값에 대한 유의성은 Duncan's multiple range test를 실시하여 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 외관 및 색도

버섯 분말이 첨가된 식물조직단백의 외관은 Table 2에 제시하였으며, 외부 표면의 색도 측정 결과는 Table 3과 같다. 명도(L-value)는 버섯 분말 첨가군에서 44.08~53.25 범위를 나타내어 대조군(61.32)에 비해 유의적으로 낮은 결과를 보였다($p < 0.001$). 적색도(a-value)는 팡이버섯(EM) 첨가군이 7.73으로 가장 높은 값을 나타내었으며, 대조군과 느타리버섯(OM) 첨가군이 각각 4.07, 3.93으로 가장 낮은 값을 나타내었다($p < 0.001$). 황색도(b-value)는 대조군이 32.84로 가장 높은 값을 나타내었으며, 버섯 첨가군은 22.58~29.35 범위로 대조군에 비해 유의적으로 낮은 황색도를 나타내었다($p < 0.001$). 버섯에 함유된 멜라닌 색소는 유멜라닌과 페오멜라닌의 혼합물 형태로 존재하며, 각각 흑갈색과 황적색을 띤다(Zhang Y 등 2022). 또한 버섯에는 상대적으로 비단백질 성분(당류, 페놀류, 탄닌류 등)이 풍부하고 유리 아미노산과 환원당을 다량 함유하고 있는데, 이들 성분은 Maillard 반응의 전구물질 농도를 증가시키는 역할을 한다(Lu X 등 2020; Tepsongkroh B 등 2019). 따라서 버섯 고유의 색소 성분과 압출 공정 중 축진된 Maillard 반응으로 인한 색소 생성 증가가 본 연구의 색도 변화에 관여한 것으로 판단된다. Ketnawa S & Rawdkuen S(2023)는 새송이버섯과 느타리버섯을 첨가하였을 때 식물조직단백의 명도와 황색도는 낮아지고, 적색도는 높아졌다고 보고하였다. 또한 Moorthi P 등(2022)의 연구

Table 2. Appearance of texturized vegetable protein (TVP) with mushroom powders from different cultivars

Group ¹⁾	Appearance		
			
CON			
OM			
KM			
SM			
PM			
EM			
BM			

¹⁾ CON: control, texturized vegetable protein (TVP) without mushroom powder; OM: TVP with oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*); KM: King oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*); SM: Shiitake mushroom (*Lentinula edodes*); PM: Poria mushroom (*Wolfiporia extensa*); EM: Enoki mushroom (*Flammulina velutipes*); BM: Button mushroom (*Agaricus bisporus*).

에서도 버섯 첨가 비율이 증가할수록 병아리콩 기반 너겟의 명도 및 황색도가 감소하는 결과가 보고된 바 있다. 본 연구에서도 이와 유사한 결과를 보여 선행 연구 결과를 뒷받침하였다. 한편, Table 2에 제시한 외관 이미지에서 볼 수 있듯이, 대조군은 밝은 색상을 띠고 섬유층 형성은 미약한 반면, 버

섯 분말 첨가군은 종류에 따라 어두운 색상을 띠며 섬유층이 뚜렷하게 발달하였다. 특히 팽이버섯(EM) 및 표고버섯(SM) 첨가군은 명확한 섬유층 형성과 일정한 결 방향을 보였으며, 느타리버섯(OM) 및 큰느타리버섯(KM) 첨가군은 굵고 일정한 섬유층을 형성하였다. 복령(PM) 및 양송이버섯(BM) 첨가

Table 3. Color characteristics of texturized vegetable protein (TVP) with mushroom powders from different cultivars

Group ¹⁾	Hunter's color value ²⁾		
	L-value	a-value	b-value
CON	61.32±1.58 ^a	4.07±0.29 ^e	32.84±1.16 ^a
OM	52.90±1.79 ^b	3.93±0.17 ^e	26.13±1.24 ^c
KM	53.25±1.19 ^b	5.77±0.21 ^b	29.04±0.64 ^b
SM	48.17±1.21 ^c	5.32±0.25 ^e	25.95±0.62 ^c
PM	47.80±0.90 ^c	4.71±0.12 ^d	22.58±1.37 ^d
EM	44.08±0.25 ^d	7.73±0.41 ^a	29.35±3.08 ^b
BM	48.70±1.47 ^c	4.56±0.31 ^d	22.88±0.63 ^d
<i>F</i> -value	150.10 ^{***}	192.39 ^{***}	49.72 ^{***}

Data represents mean observations of nine replicates±standard deviations.

^{a-e} The mean values in the same column with distinct lowercase letters are significantly different by Duncan's multiple range test ($p<0.05$).

^{***} $p<0.001$.

¹⁾ Refer to the Table 2.

²⁾ L-value: lightness (100=pure white, 0=black); a-value: redness (+100=red, -80=green); b-value: yellowness (+70=yellow, -70=blue).

균은 상대적으로 치밀하고 촘촘한 조직 구조를 나타내었다. 이는 버섯에 함유된 다당류 성분이 압출 공정 중 단백질과의 상호작용을 통해 교차결합을 형성하여 섬유층 발달에 기여한 것으로 판단된다(Cho SY & Ryu GH 2021). 특히 버섯에는 품종에 따라 불용성 β -글루칸이 건조물 기준 15~22 g/100 g으로 다량 함유되어 있는 것으로 알려져 있는데(Sari M 등 2017), 불용성 β -글루칸 함량 차이로 인해 형성된 섬유층 형태에 차이가 있었던 것으로 사료된다.

2. pH 및 수분함량

버섯 분말이 첨가된 식물조직단백의 pH 및 수분함량은 Table 4에 제시하였다. pH 측정 결과, pH는 대조군과 버섯 분말 첨가군 간 유의적인 차이($p<0.001$)를 나타내었으나, 전체적으로 모든 시료의 pH는 중성 범위를 나타내었다. 이러한 결과는 사용된 원료들의 pH가 대부분 중성 범위(pH 6.5~7.5)에 속하며, 압출 과정에서도 pH 변화가 크게 발생하지 않았기 때문으로 판단된다. 수분함량 측정 결과, 대조군(54.51%)과 느타리버섯(OM) 첨가군(54.39%)이 가장 높은 값을 나타낸 반면, 양송이버섯(BM) 첨가군(47.31%)이 가장 낮은 값을 나타내었다($p<0.001$). 앞서 언급하였듯이 고수분 압출성형 식물조직단백은 일반적으로 수분함량 40~70% 수준에서 압출이 이루어지는데 본 연구 결과도 해당 범위에 포함되었다. 다만, 품종별로 유의적인 차이를 보였는데, 이는 첨가된 버섯 분말의 불용성 식이섬유소 함량 차이에 기인한 것으로 사료된다. 불용성 식이섬유소는 수용성 다당류에 비

해 수분 결합력이 상대적으로 낮은 것으로 알려져 있으며(Manzi P 등 2001; Dhingra D 등 2012), 이러한 성분 비율의 차이가 압출 후 수분함량에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 한편, 양송이버섯은 상대적으로 키틴 및 불용성 섬유소 비율이 높은 것으로 보고되었는데(Vetter J 2007; Sari M 등 2017), 이로 인해 양송이버섯(BM) 첨가군이 가장 낮은 수분함량을 나타낸 것으로 사료된다.

3. 수분흡수력

버섯 분말이 첨가된 식물조직단백의 수분흡수력은 Table 4에 제시하였다. 수분흡수력 측정 결과, 대조군이 4.15%로 가장 높은 값을 나타내었다($p<0.001$). 버섯 분말 첨가군은 1.55~2.24% 범위로 대조군에 비해 유의적으로 낮은 값을 나타내었으며, 첨가군 간 유의한 차이는 나타나지 않았다. 이러한 결과는 버섯 분말 첨가로 인해 불용성 다당류 비율이 높아지면서 압출 공정 중 단백질-다당류 간 상호작용이 증가하고, 제품 내부의 다공성 구조가 감소했기 때문이라 판단된다. 일반적으로 불용성 다당류는 압출 공정 시 점도를 증가시키며, 단백질과의 교차결합을 통해 보다 밀집된 네트워크 구조를 형성한다(Cho SY & Ryu GH 2021). 이로 인해 압출 중 다이 출구에서의 수분 증발과 팽창이 제한되어 다공성 구조가 감소하며 밀집된 네트워크 형성이 촉진된다(Schmid EM 등 2022). 또한, 이렇게 형성된 치밀한 조직은 수분을 유효하게 결합·보유하기보다는 구조 내부에서 수분 이동을 제한하며, 결과적으로 압출 후 최종 제품의 잔류 수분함량에 영

Table 4. pH, moisture content, water absorption capacity, soluble solids content, and turbidity of texturized vegetable protein (TVP) with mushroom powders from different cultivars

Group ¹⁾	pH	Moisture content (%)	Water absorption capacity (%)	Soluble solids content (%)	Turbidity
CON	7.10±0.01 ^a	54.51±0.70 ^a	4.15±0.52 ^a	1.02±0.03 ^{ab}	0.18±0.00 ^a
OM	7.04±0.00 ^c	54.39±0.27 ^a	1.89±0.36 ^b	1.00±0.07 ^{ab}	0.16±0.00 ^b
KM	7.02±0.01 ^d	53.17±0.13 ^{ab}	2.24±0.60 ^b	1.12±0.05 ^a	0.14±0.00 ^c
SM	6.98±0.00 ^e	49.20±0.51 ^c	1.74±0.52 ^b	0.96±0.04 ^b	0.12±0.01 ^d
PM	6.91±0.01 ^f	52.01±1.21 ^b	1.61±0.66 ^b	0.84±0.06 ^c	0.13±0.00 ^d
EM	7.03±0.01 ^c	49.42±1.22 ^c	1.69±0.51 ^b	1.00±0.05 ^b	0.12±0.00 ^d
BM	7.05±0.00 ^b	47.31±0.47 ^d	1.55±0.05 ^b	1.02±0.11 ^{ab}	0.12±0.00 ^d
<i>F</i> -value	533.67 ^{***}	41.41 ^{***}	10.29 ^{***}	5.26 ^{**}	116.80 ^{***}

Data represents mean observations of three replicates±standard deviations.

^{a~f} The mean values in the same column with distinct lowercase letters are significantly different by Duncan's multiple range test ($p<0.05$).

^{**} $p<0.01$, ^{***} $p<0.001$.

¹⁾ Refer to the Table 2.

향을 미칠 수 있다(Ketnawa S & Rawdkuen S 2023). 이러한 조직 밀도 증가와 수분보유력 저하는 수분흡수력 감소에도 영향을 준 것으로 판단된다. 유사하게 Xiao T 등(2023)도 β -글루칸 첨가량이 증가할수록 식물조직단백의 수분흡수력이 감소하는 경향을 보고하였으며, 이는 β -글루칸이 대두단백의 친수성기와 물 간의 결합을 방해한 결과로 설명하였다. 본 연구 결과도 역시 이러한 선행 연구와 일치하는 결과를 나타내었다.

4. 고형분 용출률 및 탁도

버섯 분말이 첨가된 식물조직단백의 고형분 용출률 및 탁도는 Table 4에 제시하였다. 고형분 용출률 측정 결과, KM 첨가군이 1.12%로 가장 높은 값을 나타냈으며, 복령(PM) 첨가군이 0.84%로 가장 낮은 값을 보였다($p<0.01$). 이러한 결과는 첨가된 버섯 분말의 용해성 및 불용성 성분 구성과 압출 후 형성된 식물조직단백의 밀도 차이에 따른 영향으로 사료된다. 일반적으로 압출 공정 중 불용성 다당류와 단백질 간 교차결합이 증가할수록 내부 네트워크 구조가 조밀하게 형성되며, 이는 조직의 팽창성 감소와 높은 밀도로 이어진다(Cho SY & Ryu GH 2021; Schmid EM 등 2022). 이때 저분자 다당류 및 유기산 등의 용해성 성분은 단백질-다당류 복합체 내부에 완전히 포획되지 않고 자유 상태로 존재할 가능성이 높으며, 재수화 시 물에 쉽게 용출되어 고형분 용출률이 증가할 수 있다(Osen R 등 2014; Schmid EM 등 2022).

버섯에는 만노오스, 글루코스, 자일로스 등 저분자 수용성

당류와 트레오닌, 히스티딘, 발린 등 유리 아미노산이 풍부하게 함유되어 있다(Kalač P 2013). Kim MY 등(2009) 또한 버섯 품종에 따라 약용 버섯보다 식용 버섯의 유리 아미노산 함량이 높으며, 특히 양송이버섯, 느타리버섯, 팽이버섯이 높은 유리 아미노산 함량을 보인다고 보고하였다. 본 연구에서도 큰느타리버섯(KM) 및 양송이버섯(BM) 첨가군의 고형분 용출률이 상대적으로 높은 결과를 보여, 해당 품종의 저분자 수용성 성분의 영향으로 용출 성분 증가가 나타난 것으로 판단된다. 반면 복령(PM) 첨가군은 상대적으로 수용성 성분 함량이 낮아 고형분 용출이 적게 나타난 것으로 보인다.

탁도 측정 결과, 대조군이 0.18로 가장 높은 값을 나타냈으며, 버섯 분말 첨가군은 0.12~0.16 범위로 유의적으로 낮은 값을 보였다($p<0.001$). 버섯 분말 첨가군 중 표고버섯(SM), 팽이버섯(EM), 양송이버섯(BM) 첨가군에서 탁도는 가장 낮은 수준을 나타내었다. 대조군은 탈지대두 및 글루텐 기반의 단백질 비율이 높아, 압출 시 고온·고압 조건에서 강한 단백질 변성과 응집이 발생하고, 이로 인해 형성된 불용성 미세 입자가 재수화 시 용액 내 부유하여 빛 산란을 유발해 탁도 증가에 영향을 준 것으로 사료된다(Osen R 등 2014). 반면, 버섯 첨가군은 탈지대두 및 글루텐 기반 단백질 비율이 낮은 반면, 유리 아미노산 함량이 높고 다당류와 복합체 형성 특성으로 인해 단백질 변성과 응집 반응이 억제되어 보다 조밀한 네트워크 조직 형성이 촉진되었을 가능성이 높다(Kim MY 등 2009; Kalač P 2013; Schmid EM 등 2022). 이러한 조직적 특성으로 인해 미세 부유 입자 생성이 억제되

어, 버섯 첨가군에서는 고형분 용출률이 증가했음에도 불구하고 탁도는 상대적으로 낮게 유지된 것으로 판단된다.

5. 조직감

버섯 분말이 첨가된 식물조직단백의 조직감 측정 결과는 Table 5와 같다. 버섯 분말 첨가군은 경도(hardness), 씹힘성(chewiness), 절단 강도(cutting strength) 특성에서 대조군 대비 유의적으로 높은 값을 나타내었다($p < 0.001$). 반면, 탄력성(springiness)은 팽이버섯(EM) 및 양송이버섯(BM) 첨가군에서만 대조군 대비 유의적으로 낮았으며, 표고버섯(SM) 및 복령(PM) 첨가군은 수치상 다소 낮게 나타났으나 통계적으로 유의적인 차이는 보이지 않았다. 응집성(cohesiveness)은 팽이버섯(EM) 및 양송이버섯(BM) 첨가군이 낮은 값을 나타내었으나, 다른 시료군들 사이의 유의한 차이를 보이지 않았다. 전반적으로 버섯 첨가로 인해 식물조직단백의 내부 네트워크가 보다 조밀하게 형성되고, 구조적 밀도와 기계적 저항성이 증가한 것으로 판단되었다. 앞서 언급한 버섯 유래 다당류뿐만 아니라 버섯에 다량 함유되어 있는 폴리페놀 성분은 압출 공정 중 단백질과 상호작용하여 단백질-폴리페놀 복합체 교차결합을 형성하며, 이는 내부 구조의 강도를 높이고 섬유화 구조 형성에 기여하는 것으로 알려져 있다(Cho SY & Ryu GH 2021; Sakai K 등 2021). 또한, Cho SY & Ryu GH(2021)는 느타리버섯 첨가량이 증가할수록 분리대두단백 기반 압출 식물조직단백의 경도, 씹힘성, 그리고 절단 강도가 모두 증가한다고 보고하였으며, 이는 본 연구 결과와 유사하였다. 한편, 탄력성은 고온·고압 조건에서 고분자 단백질 간의 교차결합을 통해 형성된 3차원 네트워크의 구조적 유연성 및 복원력에 의해 결정된다(Cho & Ryu 2021). 그러나 버섯 분말 첨가로 인해 전체 단백질 비율이 감소하고, 유

리 아미노산 및 저분자 당류 성분이 증가하면서 이러한 성분들이 단백질 간 결합 형성을 방해하거나 네트워크 내부 공간을 점유하여, 네트워크의 복원력이 약화되었을 가능성이 높다(Samard S 등 2019; Mohamad Mazlan M 등 2020). 또한, β -글루칸 및 키틴과 같은 불용성 다당류는 압출 중 치밀한 네트워크 구조 형성에는 기여하지만, 이러한 구조는 변형 후 복원되는 탄성 특성에는 부정적인 영향을 줄 수 있다(Schmid EM 등 2022). 따라서 본 연구 결과에서 버섯 분말 첨가군들이 경도, 절단 강도는 높았으나 탄력성은 다소 낮은 값을 나타낸 것은 이러한 복합적인 요인에 의한 것이라 판단된다. 아울러, 품종별로 버섯의 다당류, 유리 아미노산 및 기타 성분 조성 차이에 따라 조직감 특성에서도 차이를 보인 것으로 사료된다.

요 약

본 연구에서는 버섯 분말(6종) 첨가가 식물조직단백(TVP)의 색도, 수분함량, 수분흡수력, 고형분 용출률, 탁도 및 조직감 특성에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 버섯 첨가로 인해 색도는 전반적으로 명도와 황색도가 감소하고 적색도는 증가하였다. 수분함량 및 수분흡수력은 품종별 다당류 조성 과 불용성 섬유소 함량 차이에 따라 유의적 차이를 나타내었다. 고형분 용출률은 저분자 수용성 성분 함량에 따라 품종별 차이를 보였으며, 탁도는 대조군 대비 낮은 값을 나타내었다. 조직감 특성에서는 경도, 씹힘성, 절단 강도가 유의적으로 증가하였고, 탄력성은 다소 감소하는 경향을 보였다. 이는 버섯 유래 다당류 및 폴리페놀 성분이 단백질과 상호작용하여 내부 네트워크 구조를 보다 조밀하게 형성한 결과로 판단된다. 또한, 버섯 품종별 성분 조성 차이가 최종 품질 특

Table 5. Texture characteristics of texturized vegetable protein (TVP) with mushroom powders from different cultivars

Group ¹⁾	Hardness (N)	Springiness	Chewiness (N)	Cohesiveness	Cutting strength (g/cm ²)
CON	20.15±3.25 ^d	0.78±0.03 ^b	7.82±0.75 ^c	0.51±0.03 ^a	495.54±29.31 ^d
OM	22.48±0.96 ^{cd}	0.80±0.01 ^a	9.14±0.32 ^b	0.51±0.01 ^a	465.71±16.97 ^e
KM	24.18±1.17 ^c	0.81±0.02 ^a	9.88±0.35 ^b	0.52±0.01 ^a	557.50±25.48 ^b
SM	31.96±4.42 ^b	0.76±0.02 ^b	12.00±1.17 ^a	0.51±0.01 ^a	533.57±11.09 ^e
PM	24.84±2.31 ^c	0.76±0.01 ^b	9.50±0.78 ^b	0.51±0.01 ^a	439.82±6.89 ^f
EM	35.61±1.14 ^a	0.73±0.01 ^c	12.52±0.73 ^a	0.49±0.01 ^b	593.93±29.88 ^a
BM	34.91±2.35 ^a	0.72±0.01 ^c	12.02±0.58 ^a	0.48±0.01 ^b	577.05±32.84 ^{ab}
<i>F</i> -value	49.72 ^{***}	24.37 ^{***}	52.35 ^{***}	48.79 ^{***}	47.89 ^{***}

Data represents mean observations of three replicates±standard deviations.

^{a-f} The mean values in the same column with distinct lowercase letters are significantly different by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

^{***} $p < 0.001$.

¹⁾ Refer to the Table 2.

성에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이러한 결과는 버섯 분말의 첨가가 식물조직단백의 품질 특성에 유의미한 영향을 미쳤음을 보여주며, 특히 첨가된 버섯 품종에 따른 다당류, 유리 아미노산, 폴리페놀 등의 성분 조성 차이가 색도, 수분 특성, 고형분 용출 및 조직감 특성 변화에 중요한 요인으로 작용한 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 버섯 분말을 활용한 식물조직단백의 제조 가능성을 제시하였으며, 향후 소비자 검사 및 감각 강도 평가 등 감각 특성에 대한 평가를 병행하여 다양한 품종의 버섯 분말을 활용한 최적 배합비 및 가공 조건 설정 연구가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립식량과학원 연구사업(과제번호: PJ017480012024)의 지원에 의해 이루어진 것임. 본 연구는 2024년도 농촌진흥청 국립식량과학원 전문연구원 과정 지원사업에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Baune MC, Terjung N, Tülbek MÇ, Boukid F (2022) Textured vegetable proteins (TVP): Future foods standing on their merits as meat alternatives. *Future Foods* 6: 100181.
- Canti M, Owen J, Putra MF, Hutagalung RA, Utami N (2024) Development of patty meat analogue using anchovy protein isolate (*Stolephorus insularis*) as a binding agent. *Heliyon* 10(1): e23463.
- Cho SY, Ryu GH (2021) Effects of oyster mushroom addition on physicochemical properties of full fat soy-based meat analog by extrusion process. *Food Eng Prog* 25(2): 85-94.
- Dhingra D, Michael M, Rajput H, Patil RT (2012) Dietary fibre in foods: A review. *J Food Sci Technol* 49(3): 255-266.
- Giller KE, Delaune T, Silva JV, Descheemaeker K, Van De Ven G, Schut AG, van Wijk M, Hammond J, Hochman Z, Taulya G, Chikowo R, Narayanan S, Kishore A, Bresciani F, Teixeira HM, Andersson JA, van Ittersum MK (2021) The future of farming: Who will produce our food? *Food Sec* 13: 1073-1099.
- Kalač P (2013) A review of chemical composition and nutritional value of wild growing and cultivated mushrooms. *J Sci Food Agric* 93(2): 209-218.
- Ketnawa S, Rawdkuen S (2023) Properties of texturized vegetable proteins from edible mushrooms by using single-screw extruder. *Foods* 12(6): 1269.
- Kim MY, Lee SJ, Ahn JK, Kim EH, Kim MJ, Kim SL, Moon HI, Ro HM, Kang EY, Seo SH, Song HK (2009) Comparison of free amino acid, carbohydrates concentrations in Korean edible and medicinal mushrooms. *Food Chem* 113(2): 386-393.
- Lu X, Brennan MA, Narciso J, Guan W, Zhang J, Yuan L, Serventi L, Brennan CS (2020) Correlations between the phenolic and fibre composition of mushrooms and the glycaemic and textural characteristics of mushroom enriched extruded products. *LWT - Food Sci Technol* 118: 108730.
- Manzi P, Aguzzi A, Pizzoferrato L (2001) Nutritional value of mushrooms widely consumed in Italy. *Food Chem* 73(3): 321-325.
- MFDS (Ministry of Food and Drug Safety) (2024) National Food Composition Database (final update: November 14, 2024). <https://various.foodsafetykorea.go.kr> (accessed on 29. 5. 2024).
- Mohamad Mazlan M, Talib RA, Chin NL, Shukri R, Taip FS, Mohd Nor MZ, Abdullah N (2020) Physical and micro-structure properties of oyster mushroom-soy protein meat analog via single-screw extrusion. *Foods* 9(8): 1023.
- Moorthi P, Bakar CAA, Ismail-Fitry MR, Ismail I (2022). Physicochemical and sensory characteristics of meatless nuggets of boiled chickpea and in combination with oyster mushroom. *Malays Appl Biol* 51(6): 17-25.
- Osen R, Toelstede S, Wild F, Eisner P, Schweiggert-Weisz U (2014) High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: Raw material characteristics, extruder responses, and texture properties. *J Food Eng* 127: 67-74.
- Park CS, Seo MS, Jung SY, Lee S, Park B, Park SY, Kim YS (2023) Quality properties of texturized vegetable protein made from defatted soybean flour with different soybean seed coat contents. *Food Sci Preserv* 30(5): 896-904.
- Sakai K, Sato Y, Okada M, Yamaguchi S (2021) Improved functional properties of meat analogs by laccase catalyzed protein and pectin crosslinks. *Sci Rep* 11(1): 16631.
- Samard S, Gu BY, Ryu GH (2019) Effects of extrusion types, screw speed and addition of wheat gluten on physicochemical characteristics and cooking stability of meat analogues. *J Sci Food Agric* 99(11): 4922-4931.
- Sari M, Prange A, Lelley JI, Hambitzer R (2017) Screening of beta-glucan contents in commercially cultivated and

- wild growing mushrooms. *Food Chem* 216: 45-51.
- Schmid EM, Farahnaky A, Adhikari B, Torley PJ (2022) High moisture extrusion cooking of meat analogs: A review of mechanisms of protein texturization. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 21(6): 4573-4609.
- Seo MS, Jung SY, Park B, Park SY, Park C (2024) The effect of particle size of defatted soybean flour on the quality characteristics of texturized vegetable protein. *Korean J Food Sci Technol* 56(4): 484-490.
- Tang M, Miri T, Soltani F, Onyeaka H, Al-Sharify ZT (2024) Life cycle assessment of plant-based vs. beef burgers: A case study in the UK. *Sustainability* 16(11): 4417.
- Tepsongkroh B, Jangchud K, Jangchud A, Charunuch C, Prinyawiwatkul W (2019) Healthy brown rice based extrudates containing straw mushrooms: Effect of feed moisture and mushroom powder contents. *J Food Process Preserv* 43(9): e14089.
- Vetter J (2007) Chitin content of cultivated mushrooms *Agaricus bisporus*, *Pleurotus ostreatus* and *Lentinula edodes*. *Food Chem* 102(1): 6-9.
- Xiao T, Su X, Jiang R, Zhou H, Xie T (2023) Low moisture extrusion of soybean protein isolate: Effect of β -glucan on the physicochemical properties of the product. *LWT - Food Sci Technol* 179: 114660.
- Zhang Y, Wu X, Huang C, Zhang Z, Gao W (2022) Isolation and identification of pigments from oyster mushrooms with black, yellow and pink caps. *Food Chem* 372: 131171.
-
- | | |
|---------------|---------------|
| Date Received | Jul. 22, 2025 |
| Date Revised | Aug. 9, 2025 |
| Date Accepted | Aug. 12, 2025 |