

표고버섯 분말 대체에 따른 글루텐 저감 고수분 식물조직단백의 품질 특성

전재은¹ · 정선영² · 조용식³ · 안기홍⁴ · 이채진⁵ · 김경미^{6*}

¹국립식량과학원 발효가공식품과 박사후연구원, ²국립식량과학원 발효가공식품과 연구원,
³국립식량과학원 발효가공식품과 농업연구관, ⁴국립원예특작과학원 버섯과 농업연구사,
⁵㈜수지스링크 연구소장(이사), ⁶국립식량과학원 발효가공식품과 농업연구사

Quality Characteristics of Gluten-Reduced High-Moisture Textured Vegetable Protein by Replacement of Gluten with Shiitake Mushroom (*Lentinula edodes*) Powder

Jae-Eun Jeon¹, Sun-Young Jeong², Yong-Sik Cho³, Gi-Hong An⁴, Chae-Jin Lee⁵ and Kyung-Mi Kim^{6*}

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

⁵Director, CTO, R&D Center, Sujis Link Co., Ltd., Paju 10945, Republic of Korea

⁶Assistant Researcher, Fermented and Processed Food Research Division, National Institute of Crop and Food Science, RDA, Jeonju 54875, Republic of Korea

ABSTRACT

This study examined the effects of substituting gluten with shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) powder on the quality characteristics of high-moisture texturized vegetable protein (TVP). Color analysis indicated that mushroom substitution significantly decreased the lightness (L) values compared to the control, while it increased the redness (a) and yellowness (b) values ($p < 0.001$). The pH of the substitution groups ranged from 6.99 to 7.13, which were significantly lower than that of the control (7.20) ($p < 0.001$). The moisture content declined with increasing substitution levels ($p < 0.001$), whereas the water absorption capacity and soluble solids content increased, reflecting the influence of dietary fibers and soluble compounds in mushroom powder. Texture profile analysis showed that the 10% substitution group exhibited the highest hardness, chewiness, and cutting strength, while springiness and cohesiveness decreased progressively as the substitution levels increased ($p < 0.001$). Although substitution levels above 65% impaired elasticity and cohesiveness caused by the weakening of the gluten network, partial substitution at 30% preserved or even enhanced the color stability and textural quality. Overall, shiitake mushroom powder can be used as a functional ingredient for partial gluten replacement in TVP, supporting the development of alternative protein products with improved quality attributes.

Key words: textured vegetable protein (TVP), gluten reduction, shiitake mushroom

서론

고수분 식물조직단백(texturized vegetable protein; TVP)은 140~170℃의 고온에서 압출하는 과정에서 단백질 구조가 변성·재배열되며 섬유 구조를 형성하여 고기와 유사한 조직감과 식감을 구현할 수 있는 대표적인 식물성 대체식품 소재이다(Dekkers BL 등 2018). 이 제품은 일반적으로 수분함

량이 50~70% 범위로, 이러한 고수분 조건은 단백질의 변성과 섬유화를 촉진하여 최종적으로 다즙성과 섬유질 식감을 확보하는 데 중요한 역할을 한다(Choi HW 등 2023). 최근 고수분 압출 공정은 대체식품 산업 전반에서 활용이 확대되고 있으며, 예를 들어 유제품 산업에서는 치즈 및 지방 대체품 개발에 적용되고, 육류 대체 분야에서는 다양한 식물성 단백질을 혼합하여 실제 육류와 유사한 섬유성과 층상 구조를 구현하는 데 이용되고 있다(Guyony V 등 2023).

글루텐은 밀 단백질의 주요 성분으로, 글리아딘과 글루테

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

년의 상호작용을 통해 점탄성과 결합력을 부여한다. 또한 글루텐은 수분과 지방을 포획하여 제품의 다즙성과 풍미 유지에 기여하며, 가공 중 단백질 네트워크를 형성하여 조직감과 구조적 안정성을 높이는 역할을 한다(Wang P 등 2014; Wieser H 등 2023). 이러한 특성 때문에 글루텐은 제빵 산업뿐만 아니라, 고수분 TVP의 제조에서도 단백질 네트워크 형성과 섬유 조직화를 유도하는 필수 소재로 널리 활용되어 왔다(Chiang JH 등 2019). 그럼에도 불구하고 최근에는 글루텐 섭취와 관련된 한계가 지적되고 있다. 글루텐 과민증이나 셀리악병과 같은 질환이 알려지면서 글루텐을 피하려는 소비자가 늘고 있다. 동시에 건강 지향적 식습관의 확산으로 ‘글루텐 저감’과 ‘글루텐프리’ 제품의 수요도 꾸준히 증가하고 있다(Więch P 등 2018; Lionetti E 등 2020).

버섯에는 β -글루칸, 키틴, 헤미셀룰로오스 등 다양한 식이 섬유가 풍부하게 함유되어 있다(Valverde ME 등 2015). 이와 함께 갈산, 클로로겐산 등 폴리페놀 화합물과 플라보노이드는 항산화 활성을 부여할 뿐 아니라, 단백질과 상호작용하여 단백질 네트워크의 안정성을 높이는 역할을 할 수 있다는 점에서 식물성 단백질 기반 식품의 품질 개선에 긍정적으로 작용하는 것으로 보고되고 있다(Manzi P 등 2001; Vetter J 2007; Schmid EM 등 2022). 특히 TVP 제조에 있어 버섯의 폴리페놀은 단백질 네트워크의 가교화와 섬유화에 관여하는 것으로 알려져 있어 글루텐 기능을 일부 보완할 수 있는 소재라 보고되었다(Cho SY & Ryu GH 2021). 표고버섯(*Lentinula edodes*)은 국내외에서 널리 소비되는 식용 버섯 중 하나로 특유의 향미와 조직감을 가진 품종이다(Lee KH 등 2021). 그러나 표고버섯 분말에는 멜라닌과 같은 천연 색소가 다량 존재하고 불용성 섬유소 함량도 높다. 이로 인해 과량 첨가 시 제품의 외관은 어두워지고 균일한 섬유 조직 형성이 방해받을 수 있다(Wang L 등 2019). 실제로 여러 선행 연구에서 버섯 분말 첨가량이 증가할수록 제과·제빵 및 TVP 제품의 명도가 낮아지고,

기계적 텍스처 특성이 저하되는 경향이 보고된 바 있다(Wang L 등 2019; Chun S 등 2020; Soledad EMR 등 2024). 따라서 표고버섯 분말은 다양한 기능을 가진 원료로서 장점이 크지만, 첨가 비율을 적절히 조절해야만 TVP의 품질 특성을 유지할 수 있다.

이에 본 연구에서는 글루텐을 표고버섯 분말로 대체하여 고수분 식물조직단백을 제조한 후, 대체 수준에 따른 품질 특성을 분석하고자 하였다. 이를 통해 글루텐 첨가량을 저감하면서도 제품의 품질을 확보할 수 있는 적정 대체 수준을 검토하고, 글루텐 저감형 식물조직단백 개발을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험 재료

본 실험에 사용된 탈지대두 분말은 국산 대두(*Glycine max* (L.) Merr.) 품종 중 재배 면적이 가장 넓은 ‘대원콩’을 국립종자원에서 구입하여 제조하였다. 콩의 껍질을 제거한 뒤 착유기(STS304, Seoheung-eng Co., Paju, Korea)를 이용하여 80°C에서 압착하여 탈지하였고, 얻어진 탈지대두박은 롤러밀(KM18, Kyung Chang Precision, Seoul, Korea)로 분말화하였다. 글루텐(Comida, ADM BAZANCOURT, France)과 옥수수 전분(Samyang Ltd, Ulsan, Korea)은 시장에서 구입하였으며, 표고버섯 분말은 국립원예특작과학원에서 제공받아 사용하였다. 모든 시료는 재밀봉 가능한 폴리에틸렌 백(polyethylene zipper bag)에 밀봉하여 4°C에서 냉장 보관(GC-124GHFP, LG Electronics Inc., Seoul, Korea)하였다.

2. 고수분 식물조직단백 제조

표고버섯 분말을 첨가한 고수분 식물조직단백의 배합비는 Park CS 등(2023)의 선행연구를 참고하여 예비실험을 거쳐 설정하였다(Table 1). 기본 배합은 탈지대두분말 50%와 옥수

Table 1. Formulation of texturized vegetable protein (TVP) with replacement of gluten by mushroom powder (unit: %)

Ingredient	Group ¹⁾			
	Control	MP-10	MP-20	MP-30
Defatted soy flour	50	50	50	50
Corn starch	20	20	20	20
Wheat gluten	30	20	10	0
Mushroom powder	0	10	20	30

¹⁾ Control: Formulated with a gluten to mushroom powder ratio of 30:0 (w/w), 0% substitution level based on gluten; MP-10: Formulated with a gluten to mushroom powder ratio of 20:10 (w/w), 33.3% substitution level based on gluten; MP-20: Formulated with a gluten to mushroom powder ratio of 10:20 (w/w), 66.7% substitution level based on gluten; MP-30: Formulated with a gluten to mushroom powder ratio of 0:30 (w/w), 100% substitution level based on gluten.

수전분 20%를 고정하고, 나머지 30%는 글루텐과 표고버섯 분말의 비율을 달리하여(30:0, 20:10, 10:20, 0:30) 배합하였다. 글루텐을 기준으로 하였을 때, 표고버섯 분말의 대체 수준은 각각 0%, 33.3%, 66.7%, 100%였다. 대조군은 글루텐 30%를 포함한 기본 배합으로 설정하였으며, 모든 시료는 실온에서 충분히 혼합한 후 20 mesh 체를 통과시켜 균질화하여 사용하였다. 고수분 식물조직단백의 압출성형에는 Intermeshing twin-screw extruder(Process-11, Thermo Fisher Scientific, Inc., Germany)를 사용하였으며, 배럴 말단에는 냉각 다이를 연결하였다. 압출기 내 배럴은 총 8개의 독립적인 온도 제어 구간으로 이루어져 있고, 각 구간의 온도는 40℃, 60℃, 80℃, 100℃, 120℃, 150℃, 130℃로 설정하였다. 냉각 다이와 연결된 냉각기의 온도는 20℃ 이하로 유지하였다. 원료는 12 rpm (19.6 g/min)으로 주입하였고, 수분은 정량펌프(BT101S Peristaltic Pump Drive, Lead Fluid Technology Co., Baoding, China)를 이용하여 34 rpm(16.6 g/min)으로 주입하였다. 스크루 회전 속도는 250 rpm으로 유지하였다.

3. 외관 및 색도

외관은 시료를 수평으로 배치한 후 상부에서 촬영하였다 (Galaxy Jump 2, Samsung Electronics Co., Ltd, Suwon, Korea). 조직화 상태와 섬유상의 구조는 시료를 다양한 방향으로 절단하고, 섬유 조직이 노출되도록 펼친 뒤 내부 단면을 촬영하여 확인하였다. 색도 분석은 압출 직후의 시료를 직경 35 mm의 투명한 셀(cell)에 담아 준비한 뒤 측정하였다. 색차계(UltraScan VIS, Hunterlab, Reston, VA, USA)를 사용하였으며, 반사광 조건에서 Hunter 색 공간을 기준으로 명도(L, lightness), 적색도(a, redness), 황색도(b, yellowness)를 측정하였다. 표준 색판으로 백색 표준판(L: 95.78, a: -0.22, b: 2.72)을 사용하였다.

4. pH 및 수분함량

pH는 Seo MS 등(2024)의 방법을 참고하여 측정하였다. 시료 2 g을 증류수 18 mL에 넣어 10% 현탁액을 제조한 후 균질하였다. 준비된 현탁액은 원심분리기(2236HR, Gyrpen, Kimpo, Korea)를 이용해 4,000 rpm에서 20분간 원심분리하였고, 상등액을 취해 pH meter(Orion Star A211, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)로 측정하였다. 수분함량은 식품공전에 따라 상압가열건조법(MFDS 2024)으로 분석하였다. 각 시료 2 g을 알루미늄 접시에 펼쳐 담고, 105℃로 설정된 건조 오븐(KMC-1202D4, Vision Co., Ltd, Bucheon, Korea)에서 건조하였다. 건조가 끝난 시료는 데시케이터에서 방랭한 뒤 무게를 재었으며, 건조 전후 질량 차이를 통해 수분함량을 계산하였다.

5. 수분흡수력 및 고형분 용출률

수분흡수력 및 고형분 용출률은 Park CS 등(2023)의 방법을 참고하여 측정하였다. 수분흡수력은 압출 직후의 시료 10 g을 취해 시료 중량의 5배에 해당하는 끓는 물에 넣고 3분간 가열하여 측정하였다. 가열이 끝난 시료는 체에 걸러 상온에서 30분간 방랭한 뒤 표면 수분을 제거하고 무게를 측정하였다. 최종 수분흡수력은 아래의 식에 따라 계산하였다.

수분흡수력(%) =

$$\frac{\text{수분 흡수 후 시료의 무게(g)} - \text{시료의 무게(g)}}{\text{시료의 무게(g)}} \times 100$$

고형분 용출률은 수분흡수력 측정 과정에서 체에 걸러진 가열수를 미리 무게를 달아 둔 알루미늄 접시에 담아 105℃의 건조 오븐(KMC-1202D4)에서 24시간 건조한 후 분석하였다. 건조가 끝난 시료는 데시케이터에서 상온으로 방랭한 뒤 접시의 무게를 다시 측정하였으며, 아래의 식에 따라 고형분 용출률을 계산하였다.

고형분 용출률(%) =

$$\frac{\text{건조 후 접시의 무게(g)} - \text{건조 전 접시의 무게(g)}}{\text{시료의 무게(g)}} \times 100$$

6. 조직감

조직감 분석은 물성분석기(TAXTplus, Zwick Roell, Ulm, Germany)를 이용하여 수행하였다. 압출 직후 시료를 1.0 × 1.0 × 0.5 cm 크기로 절단한 후, 직경 2.5 cm probe로 변형률 30%, 2 bite 조건을 적용하여 경도(hardness), 탄력성(springiness), 씹힘성(chewiness), 응집성(cohesiveness)을 측정하였다. 절단 강도(cutting strength)는 레오미터(COMPAC-100 II, Sun Scientific Co., Tokyo, Japan)를 사용하여 시료의 결 방향(종단면)과 결 반대 방향(횡단면)에서 측정하였다. 시료는 1.0 × 2.0 × 0.5 cm 크기로 준비하였으며, 횡단면을 대상으로 절단 강도를 측정하였다. 조직화지수(texturization index)는 식물조직단백의 섬유화 정도를 평가하기 위해 측정하였다. 시료의 절단 강도를 횡단면과 종단면 방향으로 각각 측정한 뒤, 종단면 절단 강도를 횡단면 절단 강도로 나눈 값을 조직화지수로 정의하였다(Rajendra A 등 2023).

7. 통계분석

모든 실험은 3회 이상 반복하여 수행하였고, 실험 결과는 SPSS Statistics(ver. 23, IBM Corp., Armonk, NY, USA)로 분석한 뒤, 평균과 표준편차로 제시하였다. 표고버섯 분말 첨가

비율에 따른 시료 간 차이는 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)으로 검증하였고, 유의성이 확인된 경우 Duncan의 다중범위검정(Duncan's multiple range test)를 통해 평균값 간 차이를 비교하였다. 통계적 유의수준은 $p<0.05$ 로 설정하였다.

결과 및 고찰

1. 외관 및 색도

표고버섯 분말을 첨가한 식물조직단백의 색도 측정 결과는 Table 2와 같고, 외관은 Table 3에 제시하였다. 명도(L-value)는 대조군이 66.09로 가장 높은 값을 보였다. 글루텐을 표고버섯 분말로 대체한 처리군(이하 표고버섯 분말 대체군)에서는 30.20~51.34 범위로 유의적으로 낮아져 전반적으로 대체 수준이 증가함에 따라 명도가 저하되는 경향을 보였다($p<0.001$). 반면, 적색도(a-value)와 황색도(b-value)는 대조군에서 각각 3.31과 30.23으로 가장 낮은 값을 보였고, 표고버섯 분말 대체 수준이 가장 높은 MP-30이 유의적으로 가장 높은 값을 나타내었다($p<0.001$). 이러한 결과는 표고버섯에 함유된 색소 성분과 압출 과정에서 발생한 갈변 반응의 영향을 받은 것으로 생각된다. 표고버섯의 대표적인 색소 성분인 멜라닌은 L-도파, 카테콜, 티로신 등 페놀계 전구체가 티로시나 아제의 작용에 의해 산화·중합되어 형성되는 고분자 색소로, 갈색에서 흑색을 띠며 식품의 명도를 현저히 저하시킨다(Prados-Rosales R 등 2015; Asdullah HU 등 2024). 또한 버섯에 함유된 갈산, 클로로겐산 등의 페놀성 화합물은 산화되어 퀴논으로 전환된 뒤 단백질·당류와 결합하여 멜라노이딘과 같은 갈색의 고분자 색소를 형성한다. 이와 더불어 표고버섯에 존재하는 다양한 유리 아미노산과 환원당은 압출 가공 중

마이야르 반응의 전구물질로 작용하여 갈변을 촉진한다(Tepsongkroh B 등 2019; Lu X 등 2020). 따라서 표고버섯의 다양한 색소 성분, 페놀성 화합물의 산화 반응, 그리고 마이야르 반응으로 인한 색소 생성이 복합적으로 작용하여 대조군과 실험군 간 색도 차이를 유발한 것으로 판단된다.

외관 관찰 결과(Table 3), 대조군은 표면이 밝고 균일하며 섬유 조직이 비교적 일정하게 배열된 것을 확인하였다. 그러나 색도 측정 결과(Table 2)에서 볼 수 있듯이 표고버섯 분말 대체군은 표면이 어두워지고, 불균일한 입자가 관찰되었으며 대체 수준이 높아질수록 이러한 경향이 뚜렷하였다. 그러나 MP-10은 대조군과 유사하게 상부와 측면 섬유 구조가 길고, 정렬된 형태로 나타나 조직화 정도가 가장 뚜렷하게 관찰되었다. MP-20에서는 표면이 현저히 어두워지고 섬유 정렬이 부분적으로 끊어지는 양상을 보였다. 특히 MP-30의 경우, 일정 부분 섬유화가 유지되었으나 섬유 다발이 굵고 전반적으로 치밀도가 낮아 불균일한 모습이 관찰되었다. 표고버섯 대체 수준이 높을수록 조직화 정도가 감소한 것은 표고버섯 분말에 포함된 β -글루칸과 키틴 등의 다당류의 영향으로 판단되었다. Dekkers BL 등(2018)과 Yuliarti O 등(2021)도 본 연구와 유사한 경향을 보고한 바 있으며 β -글루칸과 키틴 등의 다당류가 단백질 시슬 사이에 개입하여 균일한 섬유 구조 형성을 방해한다고 하였다. 따라서 표고버섯 분말 대체는 식물조직단백의 색을 어둡게 변화시키는 영향을 미쳤으나, 30% 정도로 대체 시 외관상 조직화 정도가 우수한 것으로 확인되었다.

2. pH 및 수분함량

표고버섯 분말을 대체한 식물조직단백의 pH와 수분함량은 Table 4에 제시하였다. pH 측정 결과, 모든 시료가 6.99~

Table 2. Color characteristics of texturized vegetable protein (TVP) with replacement of gluten by mushroom powder

Group ¹⁾	Hunter's color value ²⁾		
	L-value	a-value	b-value
Control	66.09±1.96 ^a	3.31±0.55 ^d	30.23±1.37 ^b
MP-10	51.34±2.18 ^b	4.98±0.41 ^c	30.55±0.69 ^b
MP-20	40.32±1.40 ^c	6.37±0.38 ^b	30.95±1.16 ^b
MP-30	30.20±1.47 ^d	8.57±0.61 ^a	35.56±1.97 ^a
F-value	669.75 ^{***}	180.88 ^{***}	29.90 ^{***}

Data represent mean±standard deviations.

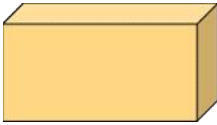
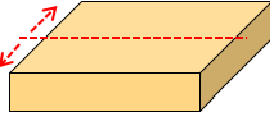
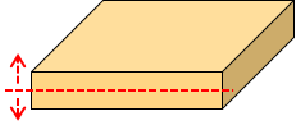









^{a~d} The mean values in the same column with distinct lowercase letters are significantly different by Duncan's multiple range test ($p<0.05$).

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

¹⁾ Refer to the Table 1.

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

Table 3. Appearance of texturized vegetable protein (TVP) with replacement of gluten by mushroom powder

Group ¹⁾	Appearance ²⁾		
	(A)	(B)	(C)
Control			
MP-10			
MP-20			
MP-30			

¹⁾ Refer to Table 1.

²⁾ (A): Photograph of surface, (B): Photograph of upper fiber structure, (C): Photograph of side fiber structure.

7.20의 범위를 보이며 중성을 유지하였으나 대조군(7.20)에 비해 표고버섯 분말 대체 비율이 증가할수록 유의적으로 감소하였다($p < 0.001$). Lee JG 등(2015)에 따르면 표고버섯에는 사과산, 구연산 등이 함유되어 있는데, 이러한 유기산이 pH에 영향을 준 것으로 판단된다. 한편, 고수분 식물조직단백은 보통 50~70% 수준의 수분함량을 유지하여야 섬유화가 원활히 이루어지고, 육류와 유사한 식감을 형성할 수 있는 것으로 알려져 있다(Choi HW 등 2023). 본 연구에서도 모든 시료가 52.60~57.98%의 값을 나타내어 고수분 식물조직단백의 범위 내에 속하였다. 다만, 표고버섯 분말 대체 수준이 높아질수록 수분함량은 점진적으로 감소하여 MP-30에서 가장 낮은 값을 나타내었다($p < 0.001$). 이는 글루텐이 표고버섯 분말로 대체되면서 단백질 네트워크가 약화되었기 때문에 보인 결과라 생각된다. 글루텐 단백질은 압출 과정에서 이황화 결합과 비공유 결합을 통해 강한 3차원 네트워크를 형성

한다. 이 네트워크는 단백질 매트릭스 사이에 수분을 포획·고정하는 역할을 하지만, 표고버섯 분말의 비단백질성 성분(β -글루칸, 키틴 등)이 증가하면 단백질 매트릭스의 구조적 보수력이 떨어져 자유수 손실이 커질 수 있다(Chiang JH 등 2019; Samard S 등 2019). 따라서 MP-30에서 가장 낮은 수분함량을 보인 것은 단백질 네트워크가 충분히 형성되지 못했기 때문이라 생각된다.

3. 수분흡수력 및 고형분 용출률

버섯 분말이 첨가된 식물조직단백의 수분흡수력과 고형분 용출률은 Table 4에 제시하였다. 표고버섯 분말에 함유된 식이섬유소는 다공성 구조와 다수의 친수성 작용기를 가지고 있어 수분을 잘 흡수한다(Sui W 등 2025). 이로 인해 수화 과정에서 단백질 네트워크보다 더 많은 수분을 흡수하여 최종 제품의 수분흡수력을 증가시킬 수 있다(Valverde ME 등

Table 4. pH, moisture content, water absorption capacity, and soluble solids content of texturized vegetable protein (TVP) with replacement of gluten by mushroom powder

Group ¹⁾	pH	Moisture content (%)	Water absorption capacity (%)	Soluble solids content (%)
Control	7.20±0.01 ^a	57.98±0.04 ^a	0.86±0.50	0.80±0.11 ^b
MP-10	7.13±0.00 ^b	55.83±0.85 ^b	1.90±1.19	0.90±0.13 ^b
MP-20	7.06±0.01 ^c	55.57±0.19 ^b	2.46±0.54	1.12±0.06 ^a
MP-30	6.99±0.01 ^d	52.60±0.73 ^c	3.00±1.22	1.22±0.08 ^a
<i>F</i> -value	1,027.89 ^{***}	45.02 ^{***}	2.91 ^{NS}	11.61 ^{**}

Data represent mean±standard deviations.

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

^{NS} not significant.

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

¹⁾ Refer to the Table 1.

2015). 본 연구에서 버섯 대체 수준에 따라 수분흡수력이 증가하였으나 시료간 유의적인 차이를 보이지 않았다. 반면, 고형분 용출률은 MP-20과 MP-30이 대조군에 비해 유의적으로 높은 값을 나타내었다($p<0.01$). 이는 표고버섯 분말에 함유된 β -글루칸과 헤미셀룰로오스 등의 다당류와 갈산, 클로로겐산과 같은 저분자 페놀성 화합물은 압출 과정 중 고온·고전단 조건에서 세포벽이 파괴되는 것으로 보고된 바 있는데(Tepsongkroh B 등 2019; Lu X 등 2020), 이러한 영향 때문인 것으로 판단된다. 또한 압출은 단순히 전분을 호화시키고 단백질을 변성시키는 데 그치지 않고 세포벽과 다당류 구조를 파괴하여 세포 내부의 수용성 성분을 더 쉽게 방출하는 것으로 알려져 있다(Mohamad Mazlan M 등 2020). 일반적으로 TVP 압출 과정에서 단백질과 다당류의 상호작용으로 겔 네트워크가 안정적으로 형성되면 수분이 구조 내부에 포집되고 수용성 성분의 용출도 억제된다(Xu Y 등 2025). 그러나 본 연구에서는 표고버섯 분말 첨가에 따라 이러한 네트워크가 상대적으로 약화되어 고형분 용출률이 증가한 것으로 보인다. 다만, MP-10은 대조군과 비교했을 때 고형분 용출률이 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않아 일정 수준까지의 버섯 분말 대체는 제품의 품질에 부정적인 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

4. 조직감

버섯 분말이 첨가된 식물조직단백의 조직감 측정 결과는 Table 5와 같다. 경도(hardness)는 대조군(17.89 N)에 비해 표고버섯 분말 대체군들이 21.66~27.89 N 범위를 나타내며 유의적으로 높은 값을 나타내었다($p<0.001$). 특히 MP-10은 27.89 N으로 가장 높은 값을 보여 글루텐 일부를 표고버섯 분말로 대체하는 것이 단단한 조직 형성에 효과적임을 확인

할 수 있었다. 또한 씹힘성(chewiness)과 절단강도(cutting strength) 역시 MP-10에서 각각 9.55 N과 775.72 g/cm²(횡단면), 568.75 g/cm²(종단면)로 가장 높게 나타나 조직감 특성이 뚜렷하게 증가하였다. TVP 제조 시 불용성 다당류는 단백질 네트워크 내부에 분산되면서 충전 효과를 일으켜 압축·절단에 대한 저항성을 높일 수 있다고 보고된 바 있다(Dekkers BL 등 2018; Sun Y 등 2024). 본 연구에서도 글루텐 함량 감소로 인해 단백질 네트워크는 약화가 예상되었지만 표고버섯 분말에 함유된 키틴과 같은 불용성 다당류의 영향으로 이와 같은 결과를 보인 것으로 생각된다. 반면, 탄력성(springiness)과 응집성(cohesiveness)은 표고버섯 분말 대체 수준이 높아질수록 감소하여 대조군이 각각 0.83과 0.52로 가장 높은 반면, MP-30에서는 0.61과 0.40으로 가장 낮은 값을 보였다($p<0.001$). 글루텐 네트워크가 약화되면 단백질 간 결합력이 저하되고, 비단백질성 다당류가 개입하여 연속적인 망상 구조 형성이 억제될 수 있다(Dekkers BL 등 2018; Samard S 등 2019). 본 연구에서도 이러한 영향으로 탄력성과 응집성이 낮아진 것으로 판단된다. 씹힘성은 경도, 탄력성, 응집성의 복합적 지표이므로 탄력성이나 응집성이 다소 감소하더라도 경도가 높을 경우 감소 효과를 상쇄하는 것으로 알려져 있다(St. Pierre SR & Kuhl E 2024). 따라서 MP-10에서 가장 높은 씹힘성을 나타낸 것은 경도가 높았기 때문으로 사료된다. 그러나 MP-20과 MP-30의 경우, 네트워크 붕괴가 뚜렷해져 씹힘성이 대조군보다 낮아진 것으로 보인다. 그러나 대체 수준이 과도할 경우 네트워크 붕괴가 뚜렷해져 씹힘성이 대조군보다 낮아지는 경향을 보였다. 버섯 분말이 첨가된 식물조직단백의 섬유화지수는 시료간 유의한 차이를 보이지 않았으나, 절단강도 및 외관 관찰 결과(Table 2)를 종합하면 MP-10에서 가장 뚜렷한 섬유화가 확인되었다. 그러나 표고

Table 5. Texture characteristics of texturized vegetable protein (TVP) with replacement of gluten by mushroom powder

Group ¹⁾	Hardness (N)	Springiness	Chewiness (N)	Cohesiveness	Cutting strength (g/cm ²)		Texturization index
					Crosswise	Lengthwise	
Control	17.89±2.38 ^c	0.83±0.03 ^a	7.53±0.82 ^b	0.52±0.02 ^a	650.54±128.49 ^b	481.61±17.42 ^b	1.35±0.26
MP-10	27.89±4.55 ^a	0.76±0.02 ^b	9.55±1.06 ^a	0.47±0.01 ^b	775.72±79.45 ^a	568.75±75.63 ^a	1.37±0.11
MP-20	21.66±1.42 ^b	0.71±0.04 ^c	6.71±0.50 ^c	0.45±0.02 ^b	569.11±33.04 ^b	378.39±27.59 ^c	1.51±0.16
MP-30	25.31±2.41 ^a	0.61±0.02 ^d	6.04±0.29 ^c	0.40±0.02 ^c	599.29±80.42 ^b	404.47±30.45 ^c	1.49±0.22
<i>F</i> -value	17.81 ^{***}	75.92 ^{***}	34.73 ^{***}	60.47 ^{***}	8.75 ^{***}	30.47 ^{***}	1.39 ^{NS}

Data represent mean observations of three replicates±standard deviations.

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

^{NS} not significant.

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

¹⁾ Refer to the Table 1.

버섯 분말을 과도하게 대체할 경우, 조직화 특성이 전반적으로 약화되는 양상을 나타냈다. 따라서 표고버섯 분말의 대체 수준은 글루텐 대비 비교적 낮은 범위(약 33.3%)에서 설정하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

요약

본 연구에서는 글루텐 저감형 고수분 식물조직단백(TVP)을 위해 표고버섯 분말의 대체가의 품질 특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 색도 측정 결과, 대조군에 비해 표고버섯 분말 대체군의 명도(L)는 낮은 값을 나타내었으며, 적색도(a)와 황색도(b)는 높은 값을 나타내었다($p<0.001$). pH는 대조군에 비해 표고버섯 분말 대체군은 6.99~7.13 범위로 유의적으로 낮은 값을 나타내었다($p<0.001$). 표고버섯 분말 대체 수준이 높아질수록 수분함량($p<0.001$)은 감소한 반면, 수분흡수력은 증가하였다. 고형분 용출률은 표고버섯 분말 대체군이 대조군에 비해 높은 결과를 보였다($p<0.01$). 조직감 측정 결과, MP-10의 경도, 씹힘성, 절단강도가 가장 높았으나, MP-20과 MP-30의 탄력성과 응집성이 크게 감소하였다. 이상의 결과, 표고버섯 분말이 글루텐을 부분적으로 대체할 때 TVP의 품질 특성 개선에 기여할 수 있음을 확인하였다. 특히 MP-10은 조직감이 유지되거나 향상되어 글루텐 저감의 가능성을 시사하였다. 다만 표고버섯 분말을 과도하게 대체할 경우 탄력성과 응집성 등이 감소하여 글루텐 저감에 한계가 있음을 확인하였다. 이에 본 연구는 글루텐을 부분 저감할 수 있는 식물조직단백의 제조 가능성을 보여주었다는 점에서 의의가 있으며, 향후 다른 단백질원과의 조합, 발효·효소 처리와 같은 전처리 기술 적용 등을 통해 글루텐 저감 효과를 높일 수 있는 추가 연구를 진행할 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ017288012025)의 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다. 본 연구는 2025년도 농촌진흥청(국립식량과학원) 전문연구원 과정 지원사업에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Asdullah HU, Chen F, Hassan MA, Abbas A, Sajad S, Rafiq M, Raza MA, Tahir Arslan, Wang D, Chen Y (2024) Recent advances and role of melatonin in post-harvest quality preservation of shiitake (*Lentinula edodes*). *Front Nutr* 11: 1348235.
- Chiang JH, Loveday SM, Hardacre AK, Parker ME (2019) Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues. *Food Struct* 19: 100102.
- Cho SY, Ryu GH (2021) Effect of oyster mushroom addition on physicochemical properties of full fat soy-based meat analog by extrusion process. *Food Eng Prog* 25(2): 85-94.
- Choi HW, Ryoo C, Hahn J, Choi YJ (2023) Development of a novel technology for high-moisture textured soy protein using a vacuum packaging and pressurized heat (vacuum-autoclaving) treatment. *Food Chem* 399: 133887.
- Chun S, Chambers IVE, Chambers DH (2020) Effects of shiitake (*Lentinus edodes* P.) mushroom powder and sodium tripolyphosphate on texture and flavor of pork patties. *Foods* 9(5): 611.
- Dekkers BL, Boom RM, van der Goot AJ (2018) Structuring

- processes for meat analogues. *Trends Food Sci Technol* 81: 25-36.
- Guyony V, Fayolle F, Jury V (2023) High moisture extrusion of vegetable proteins for making fibrous meat analogs: A review. *Food Rev Int* 39(7): 4262-4287.
- Lee JG, Kim KI, Hwang IG, Yoo SM, Min SG, Choi MJ (2015) Effects of various thermal treatments on physicochemical and nutritional properties of shiitake mushrooms. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 44(6): 874-881.
- Lee KH, Park HS, Lee MH (2021) Quality characteristics and functional analysis of pound cake added shiitake mushroom concentrate. *Culi Sci & Hos Res* 27(5): 40-51.
- Lionetti E, Antonucci N, Marinelli M, Bartolomei B, Franceschini E, Gatti S, Catassi GN Verma AK, Monachesi C, Catassi C (2020) Nutritional status, dietary intake, and adherence to the mediterranean diet of children with celiac disease on a gluten-free diet: A case-control prospective study. *Nutrients* 12(1): 143.
- 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.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS) (2024) Analytical Method of General Composition. Korea Food Code Notification No. 2024-71. <https://various.foodsafetykorea.go.kr> (accessed on 22. 11. 2024).
- Mohamad Mazlan M, Talib RA, Chin NL, Shukri R, Taip FS, Mohd Nor MZ, Abdullah N (2020) Physical and microstructure properties of oyster mushroom-soy protein meat analog via single-screw extrusion. *Foods* 9(8): 1023.
- Park CS, Seo MS, Jung SY, Park B, Park SY (2023) Effects of soy defatting on texturization of texturized vegetable proteins. *Food Sci Preserv* 30(5): 875-884.
- Prados-Rosales R, Toriola S, Nakouzi A, Chatterjee S, Stark R, Gerfen G, Tumpowsky P, Dadachova E, Casadevall A (2015) Structural characterization of melanin pigments from commercial preparations of the edible mushroom *Auricularia auricula*. *J Agric Food Chem* 63(33): 7326-7332.
- Rajendra A, Ying D, Warner RD, Ha M, Fang Z (2023) Effect of extrusion on the functional, textural and colour characteristics of texturized hempseed protein. *Food Bioprocess Technol* 16: 98-110.
- 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.
- 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, Park CS, Jung SY, Park B, Park JY, Jeon JE, Kim KM (2024) Effect of gellan gum addition on defatted soybean flour-based texturized vegetable protein quality. *Korean J Food Sci Technol* 56(6): 775-780.
- Soledad EMR, Nontién MAA, Castro JW, Barrios D, Mejía SMV (2024) Chorizo sausage with shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) as a fat substitute: Quality evaluation. *Foods Raw Mater* 12(1): 168-178.
- St. Pierre SR, Kuhl E (2024) Mimicking mechanics: A comparison of meat and meat analogs. *Foods* 13(21): 3495.
- Sui W, Wang S, Chen Y, Li X, Zhuang X, Yan X, Song Y (2025) Insights into the structural and nutritional variations in soluble dietary fibers in fruits and vegetables influenced by food processing techniques. *Foods* 14(11): 1861.
- Sun Y, Dong M, Bai J, Liu X, Yang X, Duan X (2024) Preparation and properties of high soluble wheat gluten protein based meat analogues. *J Sci Food Agric* 104(1): 42-50.
- 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.
- Valverde ME, Hernández-Pérez T, Paredes-López O (2015) Edible mushrooms: Improving human health and promoting quality life. *Int J Microbiol* 2015: 376387.
- Vetter J (2007) Chitin content of cultivated mushrooms *Agaricus bisporus*, *Pleurotus ostreatus* and *Lentinula edodes*. *Food Chem* 102(1): 6-9.
- Wang L, Guo H, Liu X, Jiang G, Li C, Li X, Li Y (2019) Roles of *Lentinula edodes* as the pork lean meat replacer in production of the sausage. *Meat Sci* 156: 44-51.
- Wang P, Chen H, Mohanad B, Xu L, Ning Y, Xu J, Wu F, Yang N, Jin Z, Xu, X (2014) Effect of frozen storage on

- physico-chemistry of wheat gluten proteins: Studies on gluten-, glutenin-and gliadin-rich fractions. *Food Hydrocoll* 39: 187-194.
- Więch P, Chmiel Z, Bazaliński D, Sałacińska I, Bartosiewicz A, Mazur A, Korczowski B, Binkowska-Bury M, Dąbrowski M (2018) The relationship between body composition and a gluten free diet in children with celiac disease. *Nutrients* 10(11): 1817.
- Wieser H, Koehler P, Scherf KA (2023) Chemistry of wheat gluten proteins: Qualitative composition. *Cereal Chem* 100(1): 23-35.
- Xu Y, Jia F, Wu Y, Jiang J, Zheng T, Zheng H, Yang Y (2025) The impact of extrusion cooking on the physical properties, functional components, and pharmacological activities of natural medicinal and edible plants: A review. *Foods* 14(11): 1869.
- Yuliarti O, Kovis TJK, Yi NJ (2021) Structuring the meat analogue by using plant-based derived composites. *J Food Eng* 288: 110138.
-

Date Received Oct. 1, 2025
Date Revised Oct. 13, 2025
Date Accepted Oct. 14, 2025