

TITLE PAGE

- Food and Life-

Upload this completed form to website with submission

ARTICLE INFORMATION	Fill in information in each box below
Article Type	Review
Article Title (English)	Nutritional and Functional Properties of Yeast, Fungal, and Microalgal Proteins for Food Applications : A Review
Article Title (Korean) English papers can be omitted	식품 소재로서 효모, 사상균, 미세조류 단백질의 영양·기능적 특성
Running Title (English, within 10 words)	Yeast, Fungal, and Microalgal Proteins for Food Applications
Author (English)	Seonmin Lee ¹ , Hyuk-Cheol Kwon ¹ , Min Kyung Park ^{1,2} , Jung Min Sung ¹ , Jun Jae Jung ² , Yun-Sang Choi ^{1,3}
Affiliation (English)	¹ Research Group of Food Processing, Korea Food Research Institute, Wanju, 55365, Republic of Korea ² Major in Food Biotechnology, University of Science and Technology, Wanju 55365, Republic of Korea ³ Food Industry Promotional Agency of Korea, Iksan-si, 54576, Republic of Korea ⁴ Department of Food Science and Biotechnology of Animal Resources, Konkuk University, Seoul, 05029, Republic of Korea
Author (Korean) English papers can be omitted	이선민 ¹ , 권혁철 ¹ , 박민경 ^{1,2} , 성정민 ¹ , 정준재 ³ , 최윤상 ⁴
Affiliation (Korean) English papers can be omitted	¹ 한국식품연구원 가공공정연구단 ² 과학기술연합대학원대학교 식품생명공학전공 ³ 한국식품산업클러스터진흥원 ⁴ 건국대학교 축산식품생명공학과
Special remarks – if authors have additional information to inform the editorial office	
ORCID and Position(All authors must have ORCID) (English) https://orcid.org	Seonmin Lee (https://orcid.org/0000-0002-5713-1795) Hyuk-Cheol Kwon (https://orcid.org/0000-0001-6234-2530) Min Kyung Park (https://orcid.org/0000-0002-3619-9491) Jung Min Sung (https://orcid.org/0000-0003-1464-2648) Jun Jae Jung (https://orcid.org/0009-0003-2782-6777) Yun-Sang Choi (https://orcid.org/0000-0001-8060-6237)
Conflicts of interest (English) List any present or potential conflict s of interest for all authors. (This field may be published.)	The authors declare no potential conflict of interest.
Acknowledgements (English) State funding sources (grants, funding sources, equipment, and supplies). Include name and number of grant if available. (This field may be published.)	This work was supported by the Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through the High Value-added Food Technology Development Program, funded by the Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (Grant No. RS-2026-25519548). This research was also supported by IPET through the Advanced Bio-Technology-Based Demand-Linked Green Bio-Material Industrialization Technology Development Program, funded by MAFRA (Grant No. RS-2026-25513907).
Author contributions (This field may be published.)	Conceptualization: Lee S, Choi YS Formal analysis: Lee S, Kwon HC, Park MK, Choi YS Validation: Sung JM, Jung JJ, Choi YS Investigation: Choi YS Writing - original draft: Lee S, Kwon HC, Park MK, Sung JM, Jung JJ, Choi YS Writing - review & editing: Lee S, Kwon HC, Park MK, Sung JM, Jung JJ, Choi YS

Ethics approval (IRB/IACUC) (English) (This field may be published.)	This manuscript does not require IRB/IACUC approval because there are no human and animal participants.
--	---

CORRESPONDING AUTHOR CONTACT INFORMATION

For the <u>corresponding</u> author (responsible for correspondence, proofreading, and reprints)	Fill in information in each box below
First name, middle initial, last name	Yun-Sang Choi
Email address – this is where your proofs will be sent	kcys0517@konkuk.ac.kr
Secondary Email address	
Postal address	120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Republic of Korea
Cell phone number	010-4713-5623
Office phone number	02-450-3696
Fax number	063-219-9076

Accepted

Abstract(within 250 words)

The growing global demand for sustainable protein sources has accelerated interest in microbial proteins as promising alternatives to conventional animal- and plant-based proteins. This review comprehensively summarizes the nutritional value, functional properties, safety, and food application potential of yeast, fungal, and microalgal proteins. These proteins generally contain high protein levels with well-balanced essential amino acid profiles, making them effective complements to cereal-based diets. However, protein digestibility varies considerably depending on microbial species, cell wall composition, and processing methods. Technologies such as cell disruption, protein concentration, fermentation, and enzymatic treatment substantially improve protein quality by enhancing enzyme accessibility. Beyond their nutritional advantages, microbial proteins exhibit diverse functional properties, including solubility, emulsifying and foaming capacities, gel formation, and water- and oil-holding capacities, which are strongly influenced by microbial structure and processing conditions. Safety considerations, including nucleic acid content, toxins, endotoxins, allergenicity, and regulatory compliance, remain essential for commercial application. Overall, yeast, filamentous fungal, and microalgal proteins represent highly sustainable and nutritionally valuable food ingredients with significant potential for future food systems. Their successful utilization will depend on the integrated optimization of microbial strain selection, production processes, protein quality, functional performance, safety assessment, and consumer acceptance.

Keywords: Yeast, Fungi, Microalgae, Nutritional value, Food functionality

1. 서론

전 세계적으로 인구 증가와 경제 발전에 따른 단백질 수요가 지속적으로 증가하면서 안정적인 단백질 공급원 확보는 식량안보와 지속가능한 식품시스템 구축을 위한 중요한 과제로 대두되고 있다(Nirmal et al., 2025). 현재 단백질 공급의 상당 부분을 차지하는 동물성 단백질은 우수한 영양학적 가치를 지니고 있으나 생산 과정에서 많은 토지와 물을 필요로 하고 온실가스 배출, 생물다양성 감소 등 다양한 환경적 문제를 야기하는 것으로 알려져 있다(Robinson et al., 2011). 이에 따라 환경 부담을 줄이면서도 충분한 영양학적 가치를 제공할 수 있는 대체 단백질에 대한 관심이 크게 증가하고 있다.

현재 대체 단백질은 식물성 단백질, 곤충 단백질, 배양육, 미생물 단백질 등 다양한 형태로 개발되고 있으며(Kwon et al., 2024; Lee et al., 2024; Cha et al., 2025; Oh et al., 2025; Choi et al., 2026; Kang et al., 2026; Kim et al., 2026; Lee et al., 2026), 이 중 미생물 단백질(microbial protein)은 높은 생산성과 지속가능성을 동시에 갖춘 차세대 단백질 자원으로 주목받고 있다(Jung et al., 2026). 미생물 단백질은 세균, 효모, 사상균 및 미세조류 등의 미생물을 배양하여 얻은 단백질이 풍부한 바이오매스 또는 이로부터 회수·농축한

42 단백질 소재를 의미한다. 여기에는 단세포 단백질(single-cell protein, SCP),
43 미생물 전체 바이오매스(whole microbial biomass), 단백질 농축물 및
44 분리물(protein concentrate/isolate), 그리고 사상균의 균사체로부터 생산되는
45 마이코프로틴(mycoprotein) 등이 포함될 수 있다(Sharifian et al., 2025).
46 SCP는 일반적으로 미생물 바이오매스를 단백질 공급원으로 이용하는
47 개념으로, 명칭에 'single-cell'이 포함되어 있지만 실제로는 사상균과 같이
48 다세포성인 미생물도 SCP 생산에 포함될 수 있다(Ritala et al., 2017).

49 미생물 단백질은 지속가능성뿐만 아니라 영양학적 측면에서도 다양한
50 장점을 가진다. 대부분의 미생물은 건조 중량 기준으로 높은 단백질 함량을
51 나타내며 필수 아미노산 조성이 우수하여 기존 식물성 단백질의 제한점을
52 보완할 수 있는 가능성이 제시되고 있다(Yamada and Sgarbieri, 2005;
53 Janssen et al., 2022). 또한 비타민, 무기질, 식이섬유 및 생리활성 물질을
54 함께 함유하는 경우가 많아 단순한 단백질 공급원을 넘어 기능성 식품
55 소재로서의 활용 가능성도 기대된다. 그러나 미생물의 종류와 배양 조건,
56 가공 방법에 따라 단백질 함량과 아미노산 조성, 소화율 및 생체이용률이
57 달라질 수 있으며, 핵산 함량과 세포벽 성분 등도 영양학적 특성에 영향을
58 미칠 수 있다(Kose et al., 2017; Xing et al., 2022; Pobiega et al., 2024; Ayele

et al., 2026). 또한 미생물 단백질을 실제 식품 원료로 활용하기 위해서는
영양학적 특성뿐만 아니라 식품 제조 및 가공 과정에서 요구되는 기능적
특성을 종합적으로 고려할 필요가 있다. 단백질의 기능적 특성은 식품의
조직감과 물성 형성에 관여하며, 최종 제품의 적용 가능성을 결정하는 주요
특성으로 평가된다(Kim et al., 2022). 아울러 알레르기 유발 가능성, 독성,
잔류 핵산 및 규제 적합성 등에 대한 검토 역시 미생물 단백질의 안전한
식품 소재화와 상용화를 위해 중요하다(Khan et al., 2024).

본 리뷰에서는 인간 식품 적용과 관련하여 비교적 충분한 연구가 축적된
효모, 사상균, 미세조류 유래 단백질에 초점을 맞추어 이들의 영양적 품질과
기능적 특성 및 식품 소재로서의 활용 가능성을 종합적으로 검토하고자
한다.

2. 미생물 단백질의 분류

미생물 단백질(microbial protein)은 미생물을 배양하여 얻은 단백질이
풍부한 미생물 바이오매스 또는 이로부터 분리·농축한 단백질 성분을 식품
및 사료용 단백질 원료로 활용하는 개념이다. 미생물 단백질의
영양적·기능적 특성은 단순히 생산 미생물의 분류군에 의해서만 결정되지

76 않는다. 균주 자체의 유전적·생리적 특성뿐 아니라 탄소원 및 질소원, 배양
77 온도와 pH, 산소 공급, 성장속도 및 수확 시점 등의 배양 조건, 세포벽
78 구조와 세포 내 조성, 그리고 세포 파쇄·열처리·건조·단백질 추출 및 분획
79 등의 후속 공정에 의해 단백질 함량, 아미노산 조성, 소화율, 기능적 특성이
80 크게 달라질 수 있다.

81 현재 식품 및 사료용 미생물 단백질 생산에 활용되는 주요 미생물군은
82 세균(bacteria), 효모(yeast), 사상균(filamentous fungi), 미세조류 및
83 남세균(microalgae and cyanobacteria)으로 구분된다(Fig. 1). 이들은 각각
84 성장 속도, 탄소원 이용 능력, 세포 구조, 단백질 축적 방식 및 기능적
85 특성에서 차이를 가지며, 이에 따라 적용 가능한 식품 분야와 산업적 활용
86 가능성도 달라진다.

87 세균은 높은 성장속도와 체적 생산성을 바탕으로 미생물 단백질 생산에
88 활용될 수 있으며, 다양한 탄소원과 에너지원에 적응하는 균주가 보고되어
89 있다. 대표적인 생산 균주로는 *Methylophilus methylotrophus*,
90 *Methylococcus capsulatus* 및 *Cupriavidus necator* 등이 있다(Nath, 2026).
91 그러나 세균 SCP는 핵산 함량, 식품 안전성 및 규제적 고려사항 등으로
92 인해 인간 식품 소재로서의 활용 연구가 다른 미생물 단백질에 비해

상대적으로 제한적이다(Volk et al., 2026). 이에 본 리뷰에서는 식품 적용과 관련하여 비교적 충분한 연구가 축적된 효모, 사상균 및 미세조류 유래 단백질에 초점을 맞추어 이들의 영양적 품질, 기능적 특성 및 식품 소재로서의 활용 가능성을 종합적으로 검토하고자 한다.

효모는 산업적으로 오랫동안 이용되어 온 미생물 단백질 생산 플랫폼으로, 빠른 성장, 다양한 기질 이용 능력, 발효공정의 확립 및 비교적 풍부한 식품·사료 적용 사례들을 갖는다는 장점이 있다(Bajić et al., 2022; Jach et al., 2022). 대표적인 생산 균주로는 *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida utilis*, *Kluyveromyces marxianus* 및 *Cyberlindnera jadinii* 등이 보고되어 있다(Jach et al., 2022). 효모의 세포벽은 단백질과 소화효소의 접근성을 제한할 수 있기 때문에 전체 세포 바이오매스를 식품 원료로 사용할 경우 세포 파쇄, 자가분해(autolysis), 효소 처리 또는 기타 세포벽 분해공정을 적용하여 단백질의 접근성과 기능적 특성을 개선할 수 있다(Bertolo et al., 2019).

사상균 단백질은 균사(hyphae) 형성 능력으로 인해 다른 미생물 단백질과 구별되는 독특한 구조적 특성을 가진다. *Fusarium venenatum* A3/5로부터 생산되는 마이코프로틴(mycoprotein)은 상업적으로 성공한 대표적인 미생물 기반 대체 단백질 소재이다(Nath, 2026; Ayele et al., 2026). 그러나 *Fusarium*

및 *Aspergillus* 속에는 mycotoxin을 생성할 수 있는 종이 존재하므로 식품용 사상균 단백질의 경우 균주 수준의 독소 생성 가능성 평가와 공정 및 최종 제품에 대한 안전성 관리가 중요하다(Hadi and Brightwell, 2021).

미세조류는 광합성을 통해 이산화탄소를 단백질로 전환할 수 있는 지속가능한 단백질 생산 플랫폼으로 주목받고 있다. 대표적인 단백질 생산 소재로는 *Chlorella vulgaris*와 *Arthrospira* spp.가 있으며, 후자는 전통적으로 'Spirulina'라는 상품명으로 널리 알려져 있다(Sharifian et al., 2025; Nath, 2026). 미세조류 및 남세균의 단백질 함량은 종, 균주 및 배양조건에 따라 상당한 차이를 보인다. *Chlorella*와 *Arthrospira*를 비롯한 일부 종은 건물 기준 약 40–70%의 높은 단백질 함량을 나타낼 수 있으며(Sharifian et al., 2025) 질소 공급량, 광조건 및 기타 배양조건에 따라 단백질 함량과 아미노산 조성이 변할 수 있다. 그러나 미세조류 단백질의 실제 안전성은 생산균주와 배양환경, 중금속 및 미생물 오염, 남세균 독소 등의 관리, 가공공정 및 최종 제품의 품질에 따라 달라질 수 있다.

3. 미생물 단백질 관련 연구동향 및 문헌 네트워크 분석

Scopus 데이터베이스에서 TITLE-ABS-KEY (("microbial protein*" OR

"microbial biomass*" OR "single cell protein*" OR "single-cell protein*" OR "mycoprotein*") AND (bacteri* OR yeast* OR "filamentous fungi" OR myceli* OR fungi OR fungus OR microalga* OR "micro algae")) AND (food*) AND NOT ("ruminant stomach" OR soil OR "animal feed*" OR "waste water")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) 검색식을 이용해 834개 문헌을 수집하였다. 이후 본문 리뷰 범위는 인간 식품 적용에 대한 문헌 축적 정도를 고려하여 효모, 사상균, 미세조류 유래 단백질로 한정하였으나, 클러스터 분석을 위한 문헌 수집 과정에서는 미생물 단백질 전반의 연구동향을 파악하기 위해 bacteria, yeast, fungi 및 microalgae를 모두 포함하여 검색하였다. 또한 본 연구의 분석대상을 식품 분야로 한정하기 위해 food를 필수 검색어로 설정하였다. 반면, 미생물 단백질이 식품 이외에도 반추동물 위장관, 토양, 동물사료 및 폐수처리 등의 분야에서 연구되고 있다는 점을 고려하여 ruminant stomach, soil, animal feed 및 waste water와 관련된 문헌은 제외하였다. 이후 학술지에 게재된 최종 출판 논문(article, journal, final) 중 영어로 작성된 문헌으로 범위를 제한하였다.

이러한 검색전략을 적용한 결과 총 834편의 문헌이 수집되었으며, 이를 최종
분석대상으로 설정하였다. 관련 문헌을 VOSviewer(ver. 1.6.20;
<https://www.vosviewer.com/>)를 이용해 20번 이상 언급된 키워드의
공출현(co-occurrence)을 분석한 결과(Fig. 2) 연구 주제는 크게 단세포
단백질 및 미생물 단백질 생산, 발효 및 단백질의 식품·영양학적 활용,
그리고 미생물 생물량과 대사·미생물학적 특성을 중심으로 형성된 것으로
나타났다. 네트워크에서는 키워드의 출현 빈도와 다른 키워드와의 연결
정도에 따라 주요 키워드가 중심적인 위치를 차지하였으며, 특히 biomass,
microbial biomass, fermentation, protein, single cell proteins, microbial
protein 등이 주요 핵심어로 확인되었다.

적색 클러스터에서는 single cell protein, microbial protein, protein
production, yeast, microalgae, bioreactor, substrates, food waste, carbon
dioxide, nitrogen 및 ammonia 등이 높은 연결성을 나타냈다. 이는 효모와
미세조류 등을 활용한 바이오매스 및 단백질 생산과 생산공정 최적화가
주요 연구축임을 보여준다. 특히 bioreactor, substrates, growth rate, biomass
production 등이 연결되어 있어 미생물의 성장과 바이오매스 형성을
기반으로 단백질 생산성을 향상시키는 생물공정 연구가 강조되고 있다. 또한

food waste, carbon dioxide, nitrogen, ammonia 등의 키워드는 폐기물과 탄소·질소원을 활용한 자원순환형 단백질 생산 시스템과의 연계를 보여준다.

녹색 클러스터에서는 microbial biomass와 biomass를 중심으로 bacteria, microbial community, microbial activity, metabolism, enzyme activity, microbiology, temperature, genetics, physiology 및 biofilm 등이 연결되었다. 이는 미생물의 성장, 대사 및 효소활성, 미생물 군집과 생리적 특성이 주요 연구대상임을 의미한다. 특히 microbial biomass, metabolism, enzyme activity 및 microbial activity의 높은 연결성은 미생물의 성장·대사과정과 바이오매스 생산 간의 연계성을 보여주며, 단일 미생물뿐만 아니라 미생물 군집 수준의 기능과 상호작용도 중요한 연구영역으로 나타난다.

청색 클러스터에서는 fermentation을 중심으로 amino acids, protein synthesis, digestion, bacterial proteins, fungal protein, mycoprotein, human 및 animal 등이 연결되었다. 이는 발효를 통한 미생물·균류 유래 단백질 생산과 함께 생산된 단백질의 영양학적 특성 및 식품 소재로서의 활용이 주요 연구관심사임을 보여준다. 특히 fungal protein, mycoprotein과 amino acids, digestion, protein intake의 연결은 균류 유래 단백질이 생산기술뿐 아니라 단백질 공급원 및 대체 식품 소재로 연구되고 있음을 나타낸다.

종합하면 키워드 네트워크 분석 결과는 미생물 바이오매스 생산과 발효를
기반으로 한 단백질 생산 및 식품·영양학적 활용이 본 연구 분야의 핵심적인
연구구조를 형성하고 있음을 보여준다. 연구의 한 축에서는 효모, 세균 및
미세조류 등을 활용하여 바이오매스와 단백질을 생산하는 생물공정 및
생산기술이 강조되고 있으며, 다른 한 축에서는 발효 및 미생물·균류 유래
단백질의 아미노산 조성, 소화 및 단백질 섭취 등 식품·영양학적 특성이
주요 연구 대상으로 나타났다. 동시에 미생물의 대사활성, 효소활성, 군집 및
생리적 특성에 관한 연구가 이들 생산기술을 뒷받침하는 기초적
연구영역으로 연결되어 있었다. 따라서 본 네트워크 분석은 해당 분야가
단순한 미생물 단백질 생산기술 연구에 국한되지 않고, 미생물학적
기초연구-발효 및 생물공정-바이오매스 생산-단백질 생산-식품 및 영양학적
활용이 상호 연계된 다학제적 연구영역으로 구성되어 있음을 보여준다. 특히
biomass, microbial biomass, fermentation, metabolism 및 protein이 서로
다른 연구 클러스터를 연결하는 중심적인 역할을 하고 있어, 향후 관련
연구에서는 미생물 자원의 효율적 활용과 바이오매스 생산성 향상, 단백질
품질 개선 및 지속가능한 식품 소재로의 활용이 주요 연구 방향으로 논의될
수 있을 것으로 판단된다.

196 4. 효모, 사상균, 미세조류 단백질의 영양학적 가치

197 효모, 사상균, 미세조류 단백질은 높은 단백질 함량과 우수한 필수
198 아미노산 구성을 바탕으로 차세대 식품 단백질 공급원으로 주목받고 있다.
199 또한 비타민, 무기질, 불포화지방산 및 생리활성 성분 등을 함께 함유하여
200 단순한 단백질 공급원을 넘어 영양학적으로 우수한 식품 소재로 평가되고
201 있다. 그러나 미생물의 종류, 배양 조건 및 후처리 공정에 따라 영양성분의
202 구성과 생체이용률이 크게 달라질 수 있으므로 식품 원료로서의 활용
203 가능성을 평가하기 위해서는 다양한 영양학적 특성을 종합적으로 고려할
204 필요가 있다. 일반적으로 미생물 단백질의 단백질 함량은 건물 기준 약 30–
205 80% 범위로 보고되며 균주와 배양 및 가공, 추출 조건에 따라 달라질 수
206 있다 (Bajić et al., 2022; Li et al., 2026).

207

208 4.1. 아미노산 조성

209 Table 1에 기존 문헌에서 보고된 효모, 사상균, 미세조류 단백질의
210 아미노산 구성을 나타내었다. 효모와 사상균 균사체 biomass의 아미노산
211 구성을 보고한 연구들을 제외하고는 FAO 기준으로 제시한 18세 이상

212 **인간의** 필수 아미노산 요구량을 대부분 충족하거나 이에 근접하는 아미노산
213 조성을 나타내었다. 그러나 아미노산 조성만으로 실제 단백질의 영양학적
214 품질을 판단할 수는 없으며, 개별 필수 아미노산의 소화율과 생체이용률을
215 함께 고려해야 한다. FAO는 이러한 점을 반영하여 단백질 품질 평가에 소화
216 가능한 개별 필수 아미노산을 반영하는 DIAAS(digestible indispensable
217 amino acid score)를 권고하고 있다(FAO, 2013). 따라서 실제 단백질 품질의
218 우수성을 판단하기 위해서는 소화율 및 DIAAS 등의 추가적인 지표가
219 필요하다.

220 Wang et al. (2023a)은 효모 단백질의 **필수 아미노산 점수가 39.24%임을**
221 보고했으며 Jin et al. (2025)은 **단백질 중 필수 아미노산이 45-46%를**
222 **차지함**을 보고했다. *Aspergillus oryzae*, *Neurospora intermedia*, *Fusarium*
223 *venenatum*, *Rhizopus delemar*, *Rhizopus oligosporus* **단백질에서도 전체**
224 **아미노산 중 필수** 아미노산 비율이 약 41–48% 범위로 보고되어 연어,
225 닭가슴살, 우육과 같은 동물성 단백질과 유사한 수준을 나타냈다(Wang et al.,
226 2023b). 또한 미세조류에서는 종에 따라 차이가 존재하지만, *Chloromonas cf.*
227 *reticulata*, *Pseudopediastrum boryanum*, *Chloroidium saccharophilum*
228 단백질의 필수 아미노산 비율이 각 54.1%, 72.6%, 61.2%인 것으로

229 보고되었다(Santiago-Diaz et al., 2021). 이러한 결과는 미생물 단백질이 특정
230 미생물군에 국한되지 않고 전반적으로 우수한 필수 아미노산 조성을
231 갖는다는 점을 시사한다.

232 특히 라이신은 대부분의 미생물 단백질에서 공통적으로 높은 함량을
233 나타내는 대표적인 아미노산이다. 효모 단백질은 FAO/WHO 권장 패턴을
234 상회하는 라이신 함량을 가지며(Wang et al., 2023a; Jin et al., 2025), 사상균
235 단백질 역시 라이신 함량이 높은 것으로 보고되었다(Wang et al., 2023b;
236 Chen et al., 2025). 미세조류에서도 *Nannochloropsis granulata*와
237 *Chloroidium saccharophilum* 등 일부 종에서 높은 라이신 함량이
238 확인되었다(Santiago-Diaz et al., 2021; Chen et al., 2025). 곡류 단백질은
239 일반적으로 라이신이 제한 아미노산으로 작용하기 때문에(Delgado-Andrade
240 et al., 2007), 미생물 단백질을 곡류 기반 식단과 함께 이용할 경우 아미노산
241 균형을 개선하고 단백질의 생물학적 가치를 향상시킬 수 있다.

242 반면, 제한 아미노산은 미생물의 종류와 생산조건에 따라 다르게 나타난다.
243 효모 단백질에서는 류신 또는 황 함유 아미노산이 제한 아미노산으로
244 보고되었으며(Yamada and Sgarbieri, 2005; Wang et al., 2023a; Jin et al.,
245 2025), 일부 사상균 단백질에서도 메티오닌 함량이 상대적으로 낮은 것으로

나타났다(Wikandari et al., 2023; Chen et al., 2025). 미세조류의 경우에도 종에 따라 라이신, 메티오닌, 시스테인 또는 아르기닌의 함량에 차이가 존재하였다(Brown, 1991; Santiago-Diaz et al., 2021; Chen et al., 2025). 이러한 차이는 미생물의 종 및 균주뿐 아니라 배양기질, 질소원, 성장단계, 배양환경, 단백질 추출 및 정제과정 등의 영향을 받기 때문으로 해석된다. 즉, 미생물 단백질의 아미노산 조성은 고정된 특성이 아니라 생산공정에 따라 조절 가능한 특성으로 이해할 수 있다.

미생물 단백질의 영양적 가치는 아미노산 조성뿐 아니라 단백질의 소화성과 생체이용률을 함께 고려할 때 더욱 높아진다. 효모 단백질은 단백질 농축 및 세포벽 제거를 통해 protein digestibility corrected amino acid score(PDCAAS)와 DIAAS가 향상되었으며(Yamada and Sgarbieri, 2005; Jaeger et al., 2025), 사상균 단백질 역시 균질화 처리 후 필수 아미노산 지수가 크게 증가하여 대두단백질 수준에 근접하는 것으로 보고되었다(Zhou et al., 2025). 이는 동일한 아미노산 조성을 가지더라도 제조 및 가공공정이 단백질의 실제 이용성을 크게 향상시킬 수 있음을 의미한다.

종합하면 효모, 사상균 및 미세조류를 포함한 미생물 단백질은 높은 필수 아미노산 함량과 우수한 아미노산 균형을 바탕으로 식물성 단백질의 제한

아미노산을 효과적으로 보완할 수 있는 고품질 단백질원이다. 다만 제한
아미노산의 종류와 아미노산 조성은 미생물의 종류, 균주, 배양조건 및
가공공정에 따라 달라질 수 있으므로(Wang et al., 2023a; Wang et al., 2023b;
Chen et al., 2025; Jin et al., 2025), 향후 미생물 단백질의 산업적 활용에서는
목적에 적합한 미생물의 선발과 생산공정의 최적화가 핵심 요소가 될
것으로 판단된다.

4.2. 단백질 소화율

효모 단백질의 소화율은 원료의 형태와 가공 방법에 따라 큰 차이를
보이며, 특히 세포벽 성분의 존재 여부와 단백질 구조 변화가 주요 결정
요인으로 작용한다. Wang et al. (2023a)은 효모 단백질 농축물과 유청단백질
농축물의 체외 소화 특성을 비교한 결과, pepsin 소화 후 단백질 소화율이
각각 31.25%와 86.23%, pancreatin 소화 후에는 각각 75.12%와 95.20%로
나타나 효모 단백질 농축물이 상대적으로 느린 소화 특성을 나타내는
것으로 평가하였다. 연구진은 β -glucan 등 세포벽 다당류가 단백질과
복합체를 형성하거나 치밀한 미세구조를 유지하여 pepsin의 접근을
제한하기 때문으로 해석하였다. Jin et al. (2025)은 *Kluyveromyces marxianus*

280 유래 효모 단백질의 초음파 처리와 산 침전을 통해 β -glucan 등의 다당류를
281 제거하고 단백질 구조를 이완시킨 시료에서 최대 98.26%의 체외 단백질
282 소화율을 확인하였다. 또한 Jaeger et al. (2025)은 *Lactobacillus amylovorus*
283 FST 2.11을 이용하여 brewer's spent yeast를 가공한 결과 *in vitro* DIAAS가
284 발효 전 시료보다 크게 향상됨을 보고하여 발효 역시 단백질 이용성을
285 개선하는 효과적인 가공기술임을 제시하였다. 이러한 결과들은 효모 세포의
286 구조적 장벽을 감소시키는 전처리 및 단백질 구조를 변화시키는 가공이
287 단백질의 효소 접근성과 소화 특성을 개선할 가능성이 있음을 보여준다.

288 사상균 단백질의 소화율 역시 세포벽의 구조적 특성에 크게 좌우되며, β -
289 glucan과 chitin을 주요 골격 성분으로 포함하는 세포벽이 단백질의 효소
290 접근성을 제한하는 핵심 요인으로 보고되고 있다. Chen et al. (2025)은
291 사상균 단백질의 체외 위장 및 소장 소화율이 돈육, 우육보다 유의적으로
292 낮다고 보고하였다. 이는 소화 과정에서도 섬유상 세포벽 구조가 유지되어
293 단백질이 보호되기 때문이며, β -glucan과 chitin이 형성하는 물리적 장벽이
294 효소의 침투와 확산을 제한하여 단백질 분해를 지연시키는 것으로
295 설명하였다. 다만 이러한 특성은 장시간에 걸친 아미노산의 지속적 공급과
296 세포벽 성분의 프리바이오틱 기능이라는 잠재적 이점을 가질 수 있다고

297 제시하였다.

298 Wang et al. (2023b)은 다양한 사상균 단백질의 체외 위장관 단백질
299 분해율이 43–62%로 59–67%의 값을 나타낸 계육 및 우육과 유사하거나
300 다소 낮은 수준임을 보고하였으며, 이는 소화효소가 세포벽을 통과하여 내부
301 단백질에 도달하는 과정이 소화율을 결정하는 주요 기전임을 시사하였다.
302 또한 균종별 세포벽 조성 차이가 단백질 소화율의 차이를 유발할 가능성을
303 제시하였다. Zhou et al. (2025)은 균질화를 통해 세포벽을 물리적으로 파괴한
304 결과 체외 위장 소화율이 28.52%에서 56.97%로, 최종 위장관 소화율이
305 75.17%에서 86.39%로 증가함을 보고하여 세포벽 손상이 효소 접근성을
306 향상시키는 핵심 요인임을 확인하였다.

307 미세조류 단백질의 소화 특성은 종에 따른 세포 외피의 구조와 조성,
308 단백질의 세포 내 위치 및 원료의 가공 상태에 따라 크게 달라질 수 있으며,
309 특히 세포벽 또는 세포 외피의 물리적 장벽을 완화하는 전처리는 단백질의
310 효소 접근성과 생체접근성을 향상시키는 중요한 방법으로 연구되고 있다.

311 Wild et al. (2018)은 여러 미세조류 및 남세균의 세포 파괴 여부에 따른
312 단백질 소화 특성을 비교하여 세포 구조의 물리적 장벽이 종에 따라 체외
313 단백질 소화율에 미치는 영향이 다를 수 있음을 보고하였다. 특히

314 *Nannochloropsis*는 세포 구조의 파괴에 따른 소화율 증가가 49%로
315 상대적으로 크게 나타난 반면, *Arthrospira*, *Chlorella* 및
316 *Phaeodactylum*에서는 증가 폭이 5-8%로 상대적으로 작아 세포 외피의
317 구조적 특성이 전처리 효과를 결정하는 중요한 요인 가운데 하나임을
318 시사하였다. 다만 이러한 차이를 특정 세포벽 성분 하나의 존재 여부만으로
319 설명하기보다는 세포 외피의 두께와 구조적 견고성, 세포벽 다당류의 조성
320 및 단백질의 세포 내 분포 등을 종합적으로 고려할 필요가 있다.

321 Kose et al. (2017)은 *Chlorella vulgaris*와 *Spirulina platensis*의 체외 단백질
322 소화율을 비교한 결과, *C. vulgaris*는 약 70%, *S. platensis*는 약 97%로
323 확인하였다. *C. vulgaris*는 상대적으로 두껍고 견고한 셀룰로스 세포벽을
324 가지는 반면, 남세균인 *S. platensis*의 세포 외피는 이에 비해 상대적으로
325 효소 접근성이 높은 구조를 가지므로 이러한 차이가 나타날 가능성이
326 제시되었다. 따라서 동일한 '미세조류 단백질'이라 하더라도 종에 따라 세포
327 구조가 다르기 때문에 단백질 소화율과 효소 가수분해 효율에 상당한
328 차이가 발생할 수 있다.

329 종합적으로 미생물 단백질의 소화율은 공통적으로 단백질 자체의
330 특성보다 세포벽의 구조와 조성에 의해 크게 좌우되는 것으로 보인다. β -

glucan, chitin, cellulose, algaenan 및 peptidoglycan으로 구성된 세포벽은 소화효소의 확산을 제한하고 단백질을 물리적으로 보호하여 단백질 분해와 아미노산 방출을 저해한다. 반면 세포벽 제거 또는 파괴, 단백질 농축, 효소가수분해, 초음파 처리, 고압 균질화, 산 침전 및 발효와 같은 가공기술은 효소 접근성을 향상시켜 소화율과 단백질 이용성을 효과적으로 개선할 수 있다(Kose et al., 2017; Bertolo et al., 2019; Jin et al., 2025; Jaeger et al., 2025). 그러나 동일한 가공기술이라도 미생물 종과 세포 구조에 따라 효과가 달라질 수 있으므로(Paterson et al., 2024), 원료의 세포벽 특성과 단백질 특성을 고려한 맞춤형 가공공정의 설계가 미생물 단백질의 영양적 이용성 향상에 중요하다.

5. 효모, 사상균, 미세조류 단백질의 식품 원료로서의 기능적 특성

상용화를 위해서는 높은 단백질 함량과 우수한 아미노산 조성뿐 아니라 실제 식품 제조에 요구되는 기능적 특성을 확보하는 것이 중요하다. 단백질의 식품 적용성은 용해도(solubility), 유화능(emulsifying capacity), 유화안정성(emulsion stability), 기포형성능(foaming capacity), 기포안정성(foam stability), 수분보유력(water holding capacity),

유지보유력(oil holding capacity), 겔 형성능(gelation ability) 등 다양한 물리화학적 특성에 의해 결정된다(Table 2). 이러한 특성은 단백질의 분산, 계면 안정화 및 식품의 조직감 형성에 직접적으로 영향을 미친다. 특히 미생물 단백질의 기능성은 균주, 세포 구조, 비단백질 성분 및 추출·가공 조건에 따라 달라질 수 있으므로, 식품 적용성을 높이기 위해서는 원료의 구조적 특성과 가공조건을 함께 고려할 필요가 있다.

5.1. 효모 단백질

효모 단백질은 단백질 자체의 기능성뿐 아니라 세포벽 유래 만노단백질(mannoprotein)과 같은 기능성 생체고분자를 포함할 수 있다는 점에서 식품 소재로서 높은 적용 가능성을 가진다. 만노단백질은 단백질 골격에 만노스가 풍부한 올리고당 또는 다당류가 결합된 고도로 당화된 단백질로, 그 구조와 당화 정도가 다양하며 단백질 및 다당류 부분의 특성에 따라 계면활성 특성을 나타낼 수 있다(Timira et al., 2024). 특히 단백질 부분의 상대적으로 소수성인 영역과 당질 부분의 친수성 특성은 만노단백질이 유·수 계면 및 기·액 계면에서 흡착하고 계면막을 형성하는 데 기여할 수 있으며, 이에 따라 유화 및 기포 안정화 기능이 보고되고

365 있다(Shokri et al., 2026). 따라서 효모 단백질의 기능성은 단백질 분자
366 자체의 계면활성뿐 아니라 추출·세포파쇄 과정에서 함께 존재하거나
367 회수되는 만노단백질과 같은 세포벽 유래 성분의 영향을 받는 복합적인
368 시스템으로 이해할 필요가 있다.

369 효모 단백질의 기능성은 제조공정을 통해 선택적으로 향상될 수 있다는
370 점에서도 식품 원료로서 중요한 장점을 가진다. Jin et al. (2025)은 pH-
371 shifting과 초음파 처리를 병행한 효모 단백질에서 용해도와 유화성이 크게
372 향상되었으며, 일부 조건에서는 대두 단백질 분리물보다 우수한 기능성을
373 나타냈다고 보고하였다. 이는 초음파에 의해 단백질 내부의 비공유결합이
374 부분적으로 약화되고 구조가 재배열되면서 단백질 표면의 친수성 부위가
375 증가하고 물과의 상호작용이 향상된 결과로 해석된다.

376 만노단백질과 가공기술의 조합은 효모 단백질의 기능을 극대화하는
377 전략으로 활용될 수 있다. Luo et al. (2025)은 효모 단백질과 만노단백질을
378 초음파 처리와 함께 적용했을 때 용해도, 유화활성, 유화안정성, 기포형성능
379 및 기포안정성이 모두 향상되었다고 보고하였다. 이는 만노단백질이 계면
380 흡착 능력을 증가시키고, 초음파 처리가 입자 크기 감소 및 구조적 유연화를
381 유도하여 단백질-물 및 단백질-계면 상호작용을 동시에 향상시킨 결과이다.

따라서 효모 단백질은 원료 자체의 기능성뿐 아니라 특정 기능성 성분과 물리적 개질 기술을 조합함으로써 목적 식품에 맞는 특성을 설계할 수 있는 조절 가능성이 높은 단백질 소재로 평가된다.

그러나 효모 단백질의 기능성은 모든 가공공정에서 동일하게 증가하는 것은 아니다. Bertolo et al. (2019)은 맥주 발효 유래 *Saccharomyces cerevisiae*를 대상으로 세포 파쇄 방법에 따른 기능성을 비교한 결과, 초음파를 이용한 기계적 세포 파쇄 처리군에서 기포형성능, 기포안정성, 유지보유력이 증가한 반면, NaCl과 ethanol을 이용한 modified autolysis에서는 수분보유력과 수용성 지표가 증가하고 유화 특성은 감소하는 상반된 결과를 보고하였다. 이는 효모 단백질의 기능성이 세포 파쇄 및 단백질 회수 방식에 따라 서로 다른 기능적 특성이 선택적으로 나타날 수 있음을 의미한다.

궁극적으로 효모 단백질의 식품 적용성을 높이기 위해서는 특정 가공법이 기능성을 일괄적으로 향상시킨다고 보기보다 단백질의 구조와 함께 만노단백질 등 비단백질 성분의 조성, 추출 및 세포파쇄 조건, 그리고 최종 식품의 pH·이온강도·지방함량과 같은 매트릭스 조건을 종합적으로 고려하여 최적의 기능성을 설계하는 접근이 필요하다.

400 5.2. 사상균 단백질

401 사상균 단백질은 일반적인 분리 단백질과 달리 단백질 분자의 계면활성뿐
 402 아니라 발효 과정에서 형성되는 군사 네트워크 자체가 기능성 발현에
 403 중요한 역할을 한다. 군사체는 세포벽 성분과 군사 구조를 포함하는
 404 복합적인 미세구조를 형성하며, 이러한 구조는 높은 점도와 구조적 안정성을
 405 제공한다(Lonchamp et al., 2019; Lonchamp et al., 2022). 따라서 사상균
 406 단백질의 기능성은 단순히 단백질이 계면에 흡착하는 현상으로
 407 설명되기보다, 분자 수준의 계면활성, 입자 기반 안정화, 그리고 거대
 408 구조체에 의한 물리적 안정화가 동시에 작용하는 시스템으로 이해할 필요가
 409 있다.

410 이러한 구조적 특성은 특히 유화 및 기포 안정성에서 중요한 장점으로
 411 작용한다. 군사 네트워크는 지질 액적과 기포의 이동 및 병합(coalescence)을
 412 제한하여 장기간 안정성을 유지하는 역할을 한다(Lonchamp et al., 2019;
 413 Lonchamp et al., 2022). 또한 cerato-platanin과 같은 계면활성 단백질,
 414 phospholipid와 같은 세포 유래 성분은 안정한 계면막 형성에
 415 기여한다(Pitocchi et al., 2020; Risse et al., 2025). 더 나아가 hyphal

416 fragments와 포자는 Pickering 입자와 유사하게 계면에 배열되어 물리적으로
417 기포와 유적을 안정화할 가능성이 제시되고 있다(Binks et al., 2005;
418 Lonchamp et al., 2020). 이러한 특징은 사상균 단백질이 기존 단백질
419 유화제와 차별화되는 구조적 기능성 소재임을 의미한다.

420 그러나 균사체 구조는 기능성에 긍정적·부정적 영향을 동시에 미칠 수
421 있다. 지나치게 치밀한 균사 네트워크는 구조적 안정성을 높이는 반면,
422 공기와 유적의 분산을 제한하여 초기 기포 형성능과 유화활성을 감소시킬
423 수 있다(Lonchamp et al., 2019). 따라서 사상균 단백질의 기능성은 단순히
424 균사 구조를 유지하는 것이 아니라, 균사 크기와 응집 정도를 적절히
425 조절하여 분산성과 안정성 사이의 균형을 확보하는 것이 핵심이다.

426 이러한 관점에서 가공공정은 사상균 단백질의 기능을 조절하는 중요한
427 수단이 된다. 초음파 처리는 균사 응집체를 미세화하고 세포벽 유래
428 계면활성 성분의 방출을 증가시켜 기포형성능과 유화활성을 향상할 수
429 있음이 보고되었다(Lonchamp et al., 2020). 반면 발효 공정 중 열처리하는 균사
430 간 상호작용과 점탄성을 증가시켜 유화 및 기포 안정성을 높이는 방향으로
431 작용할 수 있다(Lonchamp et al., 2022). 따라서 사상균 단백질은 구조적
432 특성을 유지하면서도 공정을 통해 기능을 조절할 수 있는 독특한 식품

구조화 소재로 활용될 수 있으며, 육류 대체식품, 저지방 식품 및 유제품 대체식품에서 천연 유화제 및 조직 형성제로서 높은 잠재력을 가진다.

5.3. 미세조류 단백질

미세조류 단백질은 종과 추출·정제 조건에 따라 다양한 기능적 특성을 나타내며, 용해도, 유화성, 기포성, 수분보유력 및 유지흡착능 등의 측면에서 식품 소재로서의 활용 가능성이 보고되고 있다(Chen et al., 2019; Bertsch et al., 2021). 이 가운데 용해도는 단백질이 수상에서 충분히 분산되고 계면으로 이동할 수 있도록 하는 중요한 기능적 지표이며, 일반적으로 유화 및 기포 형성과 같은 계면 기능의 발현에 유리한 조건을 제공한다(Lam and Nickerson, 2013; Bertsch et al., 2021). 미세조류 단백질의 용해도는 pH, 미세조류 종, 세포 파괴 및 추출 조건에 따라 크게 달라진다. 일반적으로 단백질은 등전점에서 멀어질수록 전하와 수화력이 증가하여 용해도가 높아지며, 특히 알칼리 조건에서 높은 용해도를 나타낸다. Pereira et al. (2018)은 *Spirulina* sp. LEB 18 단백질 추출물의 용해도가 pH 11에서 최대에 도달한다고 보고하였다. 반면 pH가 낮아지면 단백질의 표면전하가 감소하여 분자 간 응집이 증가하고 용해도가 감소할 수 있다. 그러나 이러한 용해도

특성은 미세조류 종에 따라 차이를 보인다. Grossmann et al. (2019)은 *Nannochloropsis oceanica*, *Chlorella sorokiniana*, *Phaeodactylum tricornutum*의 단백질 용해도가 산성 조건에서 감소하였지만, 특정 pH에서 완전히 침전되지는 않았으며 상당한 수준의 용해도를 유지한다고 보고하였다. 이는 미세조류 단백질의 산성 조건에서의 용해도가 일반적인 식품 단백질과 다르게 나타날 수 있음을 보여준다. 또한 세포 파괴 및 고압 처리는 세포 내 단백질의 방출과 가용화를 향상시키는 데 효과적이다. Ursu et al. (2014)은 *Chlorella vulgaris*에서 알칼리 처리만으로는 단백질 가용화가 제한적이었으나, pH 12에서 2.7 kbar의 고압 처리를 병행할 경우 전체 단백질의 약 98%까지 가용화할 수 있음을 보고하였다. 따라서 미세조류 단백질의 식품 소재 활용을 위해서는 적용 식품의 pH와 미세조류 종뿐만 아니라 세포 파괴 및 추출 조건을 종합적으로 고려할 필요가 있다.

유화 및 기포 특성 역시 미세조류 단백질의 주요 기능적 특성이다. Hong et al. (2024)의 연구에서 *Euglena gracilis*를 포함한 네 종류의 미세조류 단백질을 비교한 결과, *E. gracilis* 단백질이 높은 표면 소수성과 함께 우수한 수분보유력, 유화능, 유화안정성을 나타냈으며, 높은 기포형성능도 관찰되었다. 따라서 용해도는 중요한 기능성 지표이지만 우수한 계면

467 기능성을 확보하기 위해서는 단백질의 표면 특성과 구조적 특성을 함께
468 고려할 필요가 있다.

469 미세조류 단백질의 기능적 특성은 종 특성뿐만 아니라 추출 및 정제
470 공정에 의해서도 크게 달라질 수 있다. 알칼리 추출과 등전점 침전은
471 단백질의 가용화와 회수에 널리 활용되지만, 강한 pH 조건과 침전·건조
472 과정은 단백질 구조와 응집 상태에 영향을 미쳐 기능성을 변화시킬 수
473 있다(Bertsch et al., 2021). Muccio et al. (2025)은 *Arthrospira platensis*
474 단백질의 알칼리 추출과 고압 균질화를 비교한 결과, 50 MPa 처리에서는
475 추출수율과 유지보유력 및 겔 형성능이 향상된 반면, 100 MPa에서는 단백질
476 응집과 함께 용해도가 감소함을 보고하였다. 반면 알칼리 추출물은
477 수분보유력과 용해도가 더 높았다. 이는 추출 및 물리적 처리의 강도가
478 단백질 기능성에 차별적인 영향을 미치며, 과도한 처리 조건에서는 오히려
479 기능성이 저하될 수 있음을 보여준다(Muccio et al., 2025).

480 막 기반 분획화는 미세조류 단백질의 기능성을 선택적으로 조절할 수
481 있는 방법이다. Ursu et al. (2014)은 *Chlorella vulgaris* 단백질을 가용화한 후
482 등전점 침전과 접선희름식 한외여과를 적용한 결과, 추출 조건과 분획에
483 따라 수율과 기능적 특성이 달라짐을 확인하였다. 특히 pH 7에서 가용화한

단백질은 알칼리 조건보다 수율은 낮았지만 유화능이 높았으며, 한외여과로 얻은 특정 분획에서도 우수한 유화 특성이 나타났다(Ursu et al., 2014). 따라서 막 기반 정제법은 단순히 단백질 구조를 보존하거나 기능성을 향상시키는 공정이라기보다 분자량·조성 및 비단백질 성분의 분포를 선택적으로 조절하여 특정 기능성 분획을 확보하는 방법으로 이해하는 것이 적절하다.

6. 미생물 단백질의 안전성

미생물 단백질은 지속가능한 단백질 공급원으로 높은 잠재력을 가지지만 식품 원료로 활용하기 위해서는 영양학적 가치뿐 아니라 생산 균주의 안전성, 독성 및 오염물질, 알레르기 가능성, 핵산 함량, 생산공정의 위생관리 및 최종 제품의 노출량을 종합적으로 평가해야 한다. 특히 새로운 미생물 종·균주 또는 생산공정으로 제조된 SCP는 관할 지역의 규정에 따라 novel food 또는 이에 준하는 사전 안전성 평가의 대상이 될 수 있다. 유럽연합에서는 1997년 5월 이전에 상당한 수준으로 소비되지 않았거나 새로운 생산방법으로 제조된 식품이 novel food에 해당하며 미생물 유래 식품 역시 생산공정, 조성, 영양학적 특성, 독성 및 알레르기 가능성에 대한

501 평가가 요구됨을 보고하였다(EFSA, 2026a). 실제로 EFSA는 *Rhizomucor*
502 *pusillus* biomass powder에 대해 생산공정과 조성, 유전독성, 반복투여 독성
503 및 알레르기 가능성을 종합적으로 평가하고 있다. 따라서 미생물 단백질의
504 안전성은 단백질 자체뿐 아니라 생산 균주부터 제조공정 및 최종 제품까지
505 전 과정의 위해요소를 고려하는 접근이 필요하다.

506 주요 안전성 요소 중 하나는 상대적으로 높은 핵산 함량이다. 미생물
507 바이오매스에 포함된 RNA와 DNA의 퓨린 염기인 adenine과 guanine은
508 체내에서 요산으로 대사되므로, 핵산 함량이 높은 원료를 과량 섭취할 경우
509 고요산혈증 및 통풍 위험에 영향을 줄 수 있다(Ritala et al., 2017). 다만 핵산
510 함량은 미생물의 종류와 균주, 성장조건 및 수확·가공방법에 따라
511 달라지므로 일률적으로 높은 함량을 가정해서는 안 된다. **식품용 미생물**
512 **단백질 개발 시에는** 핵산 함량을 정량적으로 평가하고, 필요한 경우 열처리,
513 효소 처리 또는 추출·분리공정을 통해 이를 저감할 수 있다(Ritala et al.,
514 2017; Pobiega et al., 2024). 이때 핵산 저감공정이 단백질 회수율과 기능적
515 특성에 미치는 영향도 함께 고려해야 한다.

516 독성물질과 오염물질의 관리 역시 중요하다. 일부 사상균은 특정 조건에서
517 mycotoxin을 생성할 수 있으므로 균주 선정 단계에서 독소 생성 가능성을

518 평가하고 생산공정과 최종 제품에서 관련 독소가 안전한 수준으로
519 관리되는지를 확인해야 한다. 이와 함께 배지 및 원료에서 유래할 수 있는
520 중금속, 잔류 용매 등의 화학적 오염물질도 원료 규격관리와 공정 검증 및
521 최종 제품 시험을 통해 관리해야 한다(Ayele et al., 2026).

522 알레르기 가능성 또한 균주별로 평가할 필요가 있다. 특히 균류 유래
523 단백질은 기존 fungal sensitization과 식품 섭취에 따른 면역반응 사이의
524 교차반응 가능성이 제기되어 왔으며, Xing et al. (2022)은 *Aspergillus*,
525 *Cladosporium*, *Alternaria* 등의 곰팡이 알레르겐과 일부 fungal food 및
526 mycoprotein 사이의 잠재적 교차반응 가능성을 보고하였다. 그러나 이러한
527 결과만으로 모든 mycoprotein이 곰팡이 알레르기 환자에게 임상적으로
528 유의한 반응을 유발한다고 일반화할 수는 없다. 따라서 균주별
529 allergenicity와 기존 알레르겐과의 서열·구조적 유사성, 단백질의 소화 안정성
530 및 필요한 경우 면역학적 평가를 종합적으로 고려해야 한다.

531 생산 균주의 선정과 공정관리는 안전성 확보의 핵심이다. 식품용 미생물은
532 병원성, 독소 생성 가능성 및 항생제 내성 등의 특성을 평가한 후 선정해야
533 하며, 규제체계에 따라 안전성이 확립된 미생물 또는 적절한 안전성 평가를
534 거친 균주를 사용하는 것이 중요하다. 미국에서는 GRAS(Generally

Recognized as Safe) 제도가, 유럽연합에서는 QPS(Qualified Presumption of Safety) 체계가 활용된다. 다만 QPS는 미생물의 분류학적 동정과 기존 안전성 지식을 바탕으로 안전성 우려를 사전 평가하는 체계이므로, GRAS와 동일한 개념으로 간주해서는 안 되며 각 관할권의 규제체계에 따라 구분하여 적용해야 한다(EFSA, 2026b).

생산공정에서는 배양배지와 원료의 규격관리, 생산균주의 순수성 유지, 외부 미생물 오염 방지 및 배양·수확·정제조건의 관리가 중요하다. 최종 제품에서는 미생물학적 오염, 핵산, mycotoxin 및 기타 독소, 중금속 등의 화학적 오염물질과 알레르기 가능성을 제품 특성에 따라 평가해야 한다. 필요한 경우 반복투여 독성시험 등을 통해 NOAEL(No Observed Adverse Effect Level)과 같은 독성학적 기준점을 확보하고, 예상 섭취량과 비교하여 안전여유(margin of exposure, MoE)를 평가할 수 있다(EFSA et al., 2025). 실제 EFSA의 *Rhizomucor pusillus* biomass powder 평가에서도 90일 반복투여 독성시험과 예상 섭취량을 바탕으로 안전여유를 평가하였으며, 제안된 사용조건에서 안전성 우려가 없다고 결론내렸다(EFSA, 2025). 반면 ADI(Acceptable Daily Intake)는 모든 미생물 단백질에 일률적으로 적용되는 기준이 아니므로, 물질의 특성과 규제 목적에 따라 적절한 독성학적

552 평가방법을 선택해야 한다.

553 종합하면 미생물 단백질의 안전성은 생산 균주의 특성뿐 아니라 배양조건,
554 원료 및 배지, 수확·정제과정, 핵산 함량, 독소 및 오염물질, 알레르기 가능성
555 및 예상 섭취량에 의해 종합적으로 결정된다. 따라서 균주 선정부터 배양,
556 수확, 가공 및 최종 제품에 이르는 전 과정에서 위해요소를 확인하고
557 관리하는 체계적인 접근이 필요하다. 향후 새로운 미생물 균주와
558 발효·정제기술의 식품 적용이 확대됨에 따라, 개별 균주와 제조공정에 대한
559 독성 및 알레르기 평가와 장기 섭취 안전성 연구가 지속적으로 요구된다.
560 또한 국가 및 규제기관별 안전성 기준의 차이를 고려하여 위해요소 정의,
561 분석방법, 노출평가 및 안전성 판정기준의 표준화도 필요하다.

562

563 7. 결론

564 본 리뷰에서는 효모, 사상균 및 미세조류 유래 단백질의 영양학적 품질과
565 기능적 특성 및 식품 소재로서의 활용 가능성을 종합적으로 고찰하였다.
566 단백질 소재들은 효모, 사상균, 미세조류 등 생산 미생물에 따라 서로 다른
567 구조적 기반과 기능성을 가진다. 효모 단백질은 만노단백질과 같은 계면활성
568 성분 및 가공기술을 활용하여 유화·기포 기능성을 조절할 수 있으며, 사상균

569 단백질은 균사 네트워크와 세포 유래 성분이 결합된 독특한 구조적
570 기능을 제공한다. 미세조류 단백질은 높은 용해도와 계면 특성을 기반으로
571 다양한 식품 시스템에 적용 가능한 범용성을 가진다.

572 따라서 미생물 단백질의 식품 원료화 전략은 단순히 기존 단백질을
573 대체하는 것이 아니라 각 미생물 단백질이 가진 고유한 구조와 기능을
574 활용하여 목적 식품에 맞는 특성을 설계하는 방향으로 접근해야 한다.
575 향후에는 균주 선택, 추출 및 정제과정, 물리·효소적 개질 기술을 통합적으로
576 최적화함으로써 미생물 단백질을 천연 유효제, 구조화 소재 및 고기능성
577 식품 원료로 활용하는 가능성이 더욱 확대될 것으로 판단된다.

578 향후에는 단백질 품질과 생체이용률 향상, 식품 기능성 개선, 안전성 평가
579 및 소비자 수용성 확보를 위한 연구가 지속되어야 하며, 관련 규제 체계와
580 과학적 근거가 함께 마련되어야 한다. 이러한 노력이 뒷받침된다면 미생물
581 단백질은 미래 식품산업에서 지속가능하고 영양학적으로 우수한 식품
582 원료로 폭넓게 활용될 것으로 기대된다.

583

References

- Andreeva A, Budenkova E, Babich O, Sukhikh S, Ulrikh E, Ivanova S, Dolganyuk V. 2021. Production, purification, and study of the amino acid composition of microalgae proteins. *Molecules* 26(9):2767.
- Ayele G, Admassu H, Mosisa G, Desalegn A, Abeje M. 2026. Nutritional, functional, and safety aspects of single-cell protein produced via microbial fermentation from fruit-processing waste: A comprehensive review. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 25(3):e70464.
- Bajić B, Vučurović D, Vasić Đ, Jevtić-Mučibabić R, Dodić S. 2022. Biotechnological production of sustainable microbial proteins from agro-industrial residues and by-products. *Foods* 12(1):107.
- Bertsch P, Böcker L, Mathys A, Fischer P. 2021. Proteins from microalgae for the stabilization of fluid interfaces, emulsions, and foams. *Trends Food Sci Technol* 108:326-342.
- Bertolo AP, Biz AP, Kempka AP, Rigo E, Cavaleiro D. 2019. Yeast (*Saccharomyces cerevisiae*): Evaluation of cellular disruption processes, chemical composition, functional properties and digestibility. *J Food Sci Technol* 56(8):3697-3706.
- Binks BP, Clint JH, Mackenzie G, Simcock C, Whitby CP. 2005. Naturally occurring spore particles at planar fluid interfaces and in emulsions. *Langmuir* 21(18):8161-8167.
- Brown MR. 1991. The amino-acid and sugar composition of 16 species of microalgae used in mariculture. *J Exp Mar Biol Ecol* 145(1):79-99.
- Cha JY, Kim YJ, Kim JH, Kum DH, Han J, Choi YS. 2025. Edible insect larvae as sustainable sources of chitosan: Influence of species and drying method on functional and structural properties. *Food Chem X* 103133.

- Chen C, Gao Y, Xu H, Yang D, Huang J, Deng B, Ye K. 2025. Comparative analysis of enzymatic hydrolysis kinetics and bioactive peptide release during in vitro digestion of mycoprotein and conventional meat. *Food Chem* 146452.
- Chen Y, Chen J, Chang C, Chen J, Cao F, Zhao J, Zhu J. 2019. Physicochemical and functional properties of proteins extracted from three microalgal species. *Food Hydrocoll* 96:510-517.
- Choi YS, Lee JH, Cha JY, Kim YJ. 2026. Use of insects and/or insect-derived compounds as ingredients in food formulation. In: *Insects for Human Consumption*. CRC Press. p 139-177.
- Delgado-Andrade C, Rufián-Henares JA, Morales FJ. 2007. Lysine availability is diminished in commercial fibre-enriched breakfast cereals. *Food Chem* 100(2):725-731.
- EFSA Scientific Committee, Hougaard Bennekou S, Allende A, Bearth A, Casacuberta J, Castle L, Schrenk D. 2025. Statement on the use and interpretation of the margin of exposure approach. *EFSA J* 23(8):e9606.
- EFSA. 2025. Safety of *Rhizomucor pusillus* biomass powder as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA J* 23(12):9707. doi:10.2903/j.efsa.2025.9707.
- EFSA. 2026a. Novel Food application procedure / Novel Food. <https://www.efsa.europa.eu/en/applications/novel-food>.
- EFSA. 2026b. Qualified Presumption of Safety (QPS). <https://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/qualified-presumption-safety-qps>.
- FAO. 2013. Dietary protein quality evaluation in human nutrition: report of an FAO expert consultation. FAO, Rome, Italy, p. 66.
- Grossmann L, Hinrichs J, Weiss J. 2019. Solubility of extracted proteins from *Chlorella sorokiniana*, *Phaeodactylum tricornutum*, and *Nannochloropsis oceanica*: Impact of

pH-value. LWT 105:408-416.

Hadi J, Brightwell G. 2021. Safety of alternative proteins: technological, environmental and regulatory aspects of cultured meat, plant-based meat, insect protein and single-cell protein. *Foods* 10(6):1226.

Hong X, Fan L, Yan X, Li J. 2024. Structural and functional properties of proteins isolated from four species of microalgae and their application in air-water interface stabilization. *Int J Biol Macromol* 283:137531.

Jach ME, Serefko A, Ziája M, Kieliszek M. 2022. Yeast protein as an easily accessible food source. *Metabolites* 12(1):63.

Jaeger A, Nyhan L, Sahin AW, Zannini E, Meehan D, Li J, Arendt EK. 2025. In vitro digestibility of bioprocessed brewer's spent yeast: Demonstrating protein quality and gut microbiome modulation potential. *Food Res Int* 202:115732.

Janssen M, Wijffels RH, Barbosa MJ. 2022. Microalgae based production of single-cell protein. *Curr Opin Biotechnol* 75:102705.

Jin S, Cui R, Zhu Y, Wang Y, Zhang C, Hua Y, Kong X. 2025. Enhancing structure, functionality, in vitro digestibility and bioactivity of yeast protein by pH-shifting assisted ultrasonication treatment. *Int J Biol Macromol* 146322.

Jung SY, Choi S, Kim JW, Jeong E, Cho MS, Lee SY. 2026. Microbial foods as scalable platforms toward a circular protein economy for sustainable nutrition. *One Earth* 9(7).

Kang MC, Im ST, Kim TK, Park MK, Yong HI, Ahn G, Choi YS. 2026. Solvent-dependent biological activities of aqueous and ethanolic extracts from edible insect larvae. *Food Sci Nutr* 14(5):e71848.

Khan R, Brishti FH, Arulrajah B, Goh YM, Abd Rahim MH, Karim R, Saari N. 2024. Mycoprotein as a meat substitute: Production, functional properties, and current challenges-a review. *Int J Food Sci Technol* 59(1):522-544.

- Kim TK, Cha JY, Yong HI, Jang HW, Jung S, Choi YS. 2022. Application of edible insects as novel protein sources and strategies for improving their processing. *Food Sci Anim Resour* 42(3):372.
- Kim YJ, Choi YJ, Kim JH, Cha JY, Kim TK, Jung S, Choi YS. 2026. Enhancing technofunctional properties of an emulsion-type meat analog formulated with mealworm and TVP: Mushroom incorporation at the optimal concentration. *Food Sci Biotechnol* 35(2):347-357.
- Kose A, Ozen MO, Elibol M, Oncel SS. 2017. Investigation of in vitro digestibility of dietary microalga *Chlorella vulgaris* and cyanobacterium *Spirulina platensis* as a nutritional supplement. *3 Biotech* 7(3):170.
- Kwon HC, Jung HS, Kothuri V, Han SG. 2024. Current status and challenges for cell-cultured milk technology: A systematic review. *J Anim Sci Biotechnol* 15(1):81.
- Lam RS, Nickerson MT. 2013. Food proteins: A review on their emulsifying properties using a structure–function approach. *Food Chem* 141(2):975-984.
- Lee JH, Kim TK, Kang MC, Park M, Choi YS. 2024. Methods to isolate muscle stem cells for cell-based cultured meat production: A review. *Animals* 14(5):819.
- Lee JH, Cha JY, Lee S, Kim YJ, Kim JH, Keum DH, Choi YS. 2026. Allergenicity of edible insect proteins: Cross-reactivity, processing effects, and food safety considerations. *Food Chem* 150124.
- Li T, Liu S, Jia Y, Li Z, Zorn H, Xin F. 2026. Mycelial protein as a novel alternative protein: A comparative study on the nutritional, digestible and processing quality with soy and yeast proteins. *Food Res Int* 118978.
- Lonchamp J, Stewart K, Munialo CD, Evans L, Akintoye M, Gordon S, Euston SR. 2022. Mycoprotein as novel functional ingredient: Mapping of functionality, composition and structure throughout the Quorn fermentation process. *Food Chem*

396:133736.

Lonchamp J, Akintoye M, Clegg PS, Euston SR. 2020. Sonicated extracts from the Quorn fermentation co-product as oil-lowering emulsifiers and foaming agents. *Eur Food Res Technol* 246(4):767-780.

Lonchamp J, Clegg PS, Euston SR. 2019. Foaming, emulsifying and rheological properties of extracts from a co-product of the Quorn fermentation process. *Eur Food Res Technol* 245(9):1825-1839.

Luo J, Liang L, Bi Y, Liu X, Qiao K, Liu Z, Zhang Y. 2025. Synergistic effects of mannoprotein and ultrasound on the interfacial properties, flavor, and structure of yeast protein. *Ultrason Sonochem* 118:107372.

Muccio E, Lanza RF, Marra F, Albanese D, Malvano F. 2025. Proteins extraction and characterization in *Spirulina* biomass: A comparative study of high-pressure homogenization and alkaline methods. *Foods* 14(22):3942.

Nath S. 2026. Integration of microbial proteins into traditional food systems: innovations, challenges, and future perspectives. *Food Rev Int* 42(3):1532-1557.

Nirmal N, Anyimadu CF, Khanashyam AC, Bekhit AEDA, Dhar BK. 2025. Alternative protein sources: addressing global food security and environmental sustainability. *Sustainable Development* 33(3):3958-3969.

Oh SM, Lee JH, Kim TK, Park J, Kang MC, Park MK, Choi YS. 2025. Evaluation of scaffold properties for cell-cultured food based on protein sources and their mixtures. *J Anim Sci Technol*.

Paterson S, Majchrzak M, Alexandru D, Di Bella S, Fernández-Tomé S, Arranz E, Hernández-Ledesma B. 2024. Impact of the biomass pretreatment and simulated gastrointestinal digestion on the digestibility and antioxidant activity of microalgae *Chlorella vulgaris* and *Tetraselmis chuii*. *Food Chem* 453:139686.

Pereira AM, Lisboa CR, Costa JAV. 2018. High protein ingredients of microalgal origin: Obtainment and functional properties. *Innov Food Sci Emerg Technol* 47:187-194.

Pitocchi R, Cicatiello P, Birolo L, Piscitelli A, Bovio E, Varese GC, Giardina P. 2020. Cerato-platanins from marine fungi as effective protein biosurfactants and bioemulsifiers. *Int J Mol Sci* 21(8):2913.

Pobiega K, Sękul J, Pakulska A, Latoszewska M, Michońska A, Korzeniowska Z, Nowacka M. 2024. Fungal proteins: Sources, production and purification methods, industrial applications, and future perspectives. *Appl Sci* 14(14):6259.

Risse K, Bridot JL, Yang J, Sagis L, Drusch S. 2025. Tuning interfacial properties of phospholipid stabilised oil–water interfaces by changing the phospholipid headgroup or fatty acyl chain. *J Colloid Interface Sci* 686:203-217.

Ritala A, Häkkinen ST, Toivari M, Wiebe MG. 2017. Single cell protein—State-of-the-art, industrial landscape and patents 2001-2016. *Front Microbiol* 8:300587.

Robinson TP, Thornton PK, Francesconi GN, Kruska RL, Chiozza F, Notenbaert AMO, See L. 2011. Global livestock production systems. FAO and ILRI.

Santiago-Díaz P, Rivero A, Rico M, Gómez-Pinchetti JL. 2021. Characterization of novel selected microalgae for antioxidant activity and polyphenols, amino acids, and carbohydrates. *Mar Drugs* 20(1):40.

Sharifian P, Amiri A, McClements DJ, Kubiak M, Favaro L, Maggo S, Pratap-Singh A. 2025. Single-cell proteins: Fermentation pathways, nutritional quality and digestibility, and a techno-economic and environmental outlook for sustainable scale-up. *Crit Rev Food Sci Nutr* 1-29.

Shokri S, Hashemi Z, Hassan SA, Chuck CJ. 2026. A review of yeast-derived emulsifiers developed through microbial fermentation for the food sector. *Front Microbiol* 16:1745931.

- Timira V, Chen X, Zhou P, Wu J, Wang T. 2024. Potential use of yeast protein in terms of biorefinery, functionality, and sustainability in food industry. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 23(3):e13326.
- Ursu AV, Marcati A, Sayd T, Sante-Lhoutellier V, Djelveh G, Michaud P. 2014. Extraction, fractionation and functional properties of proteins from the microalgae *Chlorella vulgaris*. *Bioresour Technol* 157:134-139.
- Volk V, Wötzel L, Reinmuth E, Ewert J, Jekle M, Dombrowski J. 2026. White spots and gaps of microbial single cell proteins for food applications: yeasts, bacteria and filamentous fungi. *Food Res Int* 119763.
- Wang S, Huang F, Zhao Y, Ouyang K, Xie H, Xiong H, Zhao Q. 2023a. Slow-digestive yeast protein concentrate: An investigation of its in vitro digestibility and digestion behavior. *Food Res Int* 174:113572.
- Wang R, Sar T, Mahboubi A, Fristedt R, Taherzadeh MJ, Undeland I. 2023b. In vitro protein digestibility of edible filamentous fungi compared to common food protein sources. *Food Biosci* 54:102862.
- Wikandari R, Tanugraha DR, Yastanto AJ, Gmoser R, Teixeira JA. 2023. Development of meat substitutes from filamentous fungi cultivated on residual water of tempeh factories. *Molecules* 28(3):997.
- Wild KJ, Steingaß H, Rodehutsord M. 2018. Variability in nutrient composition and in vitro crude protein digestibility of 16 microalgae products. *J Anim Physiol Anim Nutr* 102(5):1306-1319.
- Xing H, Wang J, Sun Y, Wang H. 2022. Recent advances in the allergic cross-reactivity between fungi and foods. *J Immunol Res* 2022(1):7583400.
- Yamada EA, Sgarbieri VC. 2005. Yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) protein concentrate: Preparation, chemical composition, and nutritional and functional properties. *J Agric*

759 Food Chem 53(10):3931-3936.

760 Zhou Z, Jin Y, Wu X, Tu Y, Li J, Chen J, Liu X. 2025. Enhanced mycoprotein extraction

761 via cell wall disruption: A promising alternative protein with preferable digestibility

762 and lubrication over soy protein. Food Chem 146123.

763

764

Accepted