연구논문
Food Preserv Process Ind 2025;24(2):131-145
https://doi.org/10.11002/fppi.2025.24.2.131

식품저장과 가공산업
Food Preservation and Processing Industry
pISSN: 1598-7418, eISSN: 3092-0116

참깨박 단백질 효소가수분해물의 이화학적, 기능적 및 영양학적 특성

박보연 · 서재민 · 이은채 · 강민지 · 윤경영*
영남대학교 식품영양학과

Physicochemical, functional, and nutritional characteristics of sesame meal protein hydrolysates produced by enzymatic hydrolysis

Bo Yeon Park*, Jae Min Seo, Eun Chae Lee, Min Ji Kang, Kyung Young Yoon
Department of Food and Nutrition, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

Abstract

This study investigated the physicochemical, functional, and nutritional characteristics of sesame meal protein hydrolysates prepared using four proteases—Alcalase, Protamex, Neutrase, and Flavourzyme—to enhance the utilization of sesame meal, an underused by-product of oil extraction. Enzymatic extraction significantly increased protein yield (33.33–36.84%) and crude protein content (43.54–53.91%) compared to the control, with the highest values observed in Alcalase-treated samples. Water solubility and degree of hydrolysis also increased markedly following enzyme treatment, improving protein functionality. Enzymatic extracts exhibited superior ABTS radical scavenging activity compared to non-enzymatic extract, indicating enhanced antioxidant potential. Amino acid analysis showed that enzymatic hydrolysis increased both total and essential amino acid contents, with lysine and methionine showing notable improvement. The amino acid score of enzymatic sesame meal protein hydrolysate (ESPH) exceeded 85 in all cases, confirming high nutritional quality. These findings demonstrate that enzymatic biotransformation, particularly using Alcalase, effectively enhances the functional and nutritional properties of sesame meal protein. Therefore, ESPH could serve as promising sustainable protein ingredients for functional foods and dietary supplements.

Key words: Sesame meal, Enzymatic hydrolysis, Protein hydrolysate, Amino acid score

Date Received: Oct. 1, 2025, **Date Revised:** Nov. 12, 2025, **Date Accepted:** Nov. 17, 2025
***Corresponding author:** Kyung Young Yoon, Tel: +82-53-810-2878, E-mail: yoonky2441@ynu.ac.kr

Copyright © 2025 The Korean Society of Food Preservation. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서론

최근 건강과 영양에 대한 관심이 증가함에 따라 단백질 식품 시장이 꾸준히 성장하고 있다. 과거 단백질 보충 식이는 주로 운동선수나 이른바 '헬스족'들의 전유물로 여겨졌으나, 최근에는 일반 소비자들 사이에서도 필수 영양소 보충 및 균형 잡힌 식단을 위한 일상적인 보조식품으로 활용되는 추세이다. 단백질 섭취는 근육 유지뿐 아니라 면역력 강화, 노화 방지, 뼈 건강 유지 등 다양한 생리적 기능에 관여하며, 특히 고령화 사회로 접어들면서 단백질의 중요성은 더욱 강조되고 있다(Harris 등, 2025).

글로벌 리서치 기관 Technavio (2025) 보고서에 따르면, 단백질 시장 규모는 2024년부터 2029년까지 연평균 3.3%의 성장률로 증가하여, 2029년에는 약 939억 달러로 성장할 것으로 전망했다. 이러한 성장은 건강, 환경, 윤리적 소비를 중시하는 트렌드와 맞물려 식물성 원료 기반 단백질 제품의 수요가 빠르게 증가하고 있기 때문이다. 식물성 단백질은 원료에 따라 대두, 밀, 완두콩, 감자, 해조류 등으로 구분되며, 그중 대두 단백질은 2025년 기준 약 115억 9천만 달러로 전체 식물성 단백질 시장에서 가장 높은 비중을 차지하고 있다(The Business Research Company, 2025). 그러나 세계 식물성 단백질 시장의 급속한 확장에도 불구하고, 최근 팬데믹으로 인한 국경 폐쇄, 물류 차질, 무역 장벽 등으로 인해 다양한 식물성 원료의 안정적인 조달이 어려워지고 있다. 이로 인해 국내외 식품 공급망의 불안정성이 커지고 있으며, 국내 단백질 산업 역시 수입 원료 의존도가 높아지는 문제를 안고 있다(FAO, 2025). 또한 콩에 대한 높은 의존도는 인구 증가 속에서 세계 식량 안보를 위한 식물성 단백질 공급원의 다각화를 저해하고 있다(Aniam 등, 2025). 따라서 식품 산업의 지속가능한 발전을 위해서는 국내에서 안정적으로 확보 가능한 식물성 단백질 대체 원료의 발굴과 산업화가 절실하다.

우리나라 국가데이터처의 2024년 생산 통계에 따르면, 우리나라 참깨의 연간 생산량은 약 9,000톤에 달하며, 주요 생산지는 전라북도와 경상북도이다(Ministry of Data and Statistics, 2024). 참깨는 대표적인 유지작물로, sesamin, sesamolin, sesamol 등 다양한 리그난(lignan) 계열의 생리활성 물질을 많이 함유하고 있어 항산화, 항염, 항암, 콜레스테롤 저하 등 다양한 기능성을 가진다(Dossou 등, 2023). 참깨박은 참깨유를 압착하는 과정에서 생성되는 부산물로, 참깨박은 유지가 제거된 상태이므로, 오히려 단백질 함량이 높고(약 30% 이상), 필수아미노산 중 대두에서 부족한 메티오닌(methionine)을 다량 함유하고 있어 영양학적으로 매우 우수한 소재이다(Yüzer와 Genccelep, 2023). 그러나 참깨박은 기호성과 가공 특성(용해도 등)이 낮고, 잠재적인 항 영양인자와 알레르기 유발 물질을 포함하여 식품 산업에서의 활용이 제한적이다(Fan 등, 2023). 이와 같이 참깨박이 높은 영양성과 다양한 기능성 성분을 함유하고 있음에도 불구하고, 사료나 비식용 분야에 일부 이용되고 있을 뿐, 대부분이 버려지고 있어, 식품 소재로 개발하기 위한 연구가 필요하다.

최근에는 산업 부산물의 재활용 및 식품 자원의 효율적 활용 측면에서 농산 부산물을 활용한 단백질 자원화 가능성에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 생물전환(biotransformation) 기술과 같은 단백질 추출 효율을 향상시키고, 아미노산 조성을 개선하여 기능성이 강화된 단백질 원료를 생산할 수 있는 방법이 모색되고 있다. 생물전환 공정은 미생물 또는 효소의 작용을 통해 단백질 구조를 부분적으로 분해하여 소화 흡수율을 높이고, 동시에 항산화 펩타이드 등의 생리활성 물질을 생성할 수 있다는 장점이 있다(Aguilar 등, 2019; Park과 Yoon, 2018). 특히, 효소적 가수분해는 고분자의 단백질을 저분자의 펩타이드 혹은 유리아미노산으로 분해하여 소화 흡수율 개선에 따른 영양적 가치 향상, 단백질 용해도 증가에 의한 가공 특성 개선 및 항 알레르기성의 잠재적 감소 등을 기대할 수 있다(Son 등, 2023; Tavano, 2013).

이에 본 연구에서는 폐기되고 있는 참깨박을 고부가가치 식품소재로 활용하기 위한 방안으로, 생물전환 공정을 이용한 단백질 가수분해물을 제조하기 위하여 다양한 단백질 가수분해 효소를 이용하여 참깨박 단백질 추출물을 제조하였다. 또한 이들 단백질 추출물의 이화학적, 물리적 및 기능적 특성을 평가하여 수율 효율을 향상시킬 수 있는 효소를 선정하였다. 마지막으로 선정된 효소를 이용하여 참깨박 단백질 효소 가수분해물을 제조하고, 이들 단백질 가수분해물의 아미노산 조성, 아미노산 스코어를 분석하여, 효소를 이용한 생물전환 공정이 참깨박의 영양적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구의 결과는 국내 자생 원료를 활용한 식물성 단백질 대체 소재 개발의 기초자료로서, 향후 지속가능한 단백질 산업 및 기능성 식품 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Ⅱ. 본론

2.1. 재료 및 방법

2.1.1. 실험 재료

본 실험에서 사용한 참깨박은 경북 예천 지보농협에서 착유하고 남은 부산물을 제공받았다. 참깨박은 동결건조 후 food mixer (FM-681C, Hanil, Incheon, Korea)를 사용하여 마쇄하고, 45 mesh (Chung Gye Indus, MFG, Co., Seoul, Korea)로 체질하였다. 참깨박 분말은 실험 전까지 -30℃의 deep freezer (MDF, Sanyo, Tokyo, Japan)에 보관하였다.

2.1.2. 효소를 이용한 참깨박 추출물 제조

참깨 효소 추출물을 제조하기 위하여 4종의 단백질 분해효소(Flavourzyme, Protamex, Alcalase, Neutrase)를 사용하였으며, 이들 효소는 0.1 M sodium phosphate buffer (pH 7.0)에 용해시켜 반응 효소액으로 사용하였다. 먼저, 탈지 참깨박 분말 100 g에 증류수 2 L를 넣어 섞은 후, 효소액을 반응액 부피의 1%가 되도록 첨가하였으며, pH는 각 효소의 최적 pH에 맞게 0.1 N NaOH 혹은 0.1 N HCl을 이용하여 조정하였다. 참깨박과 효소액의 혼합물을 50℃의 shaking water bath (DAIHAN Scientific Co. MaXturdy)에서 3시간 반응시킨 후, 90℃에서 10분간 가열하여 효소 반응을 정지시켰다. 이후 반응물을 원심분리하여 얻은 상층액을 동결건조하여 참깨박 효소 추출물로 사용하였다. 이때 효소 추출의 효율을 측정하기 위하여 효소 추출과 동일한 조건에서 효소와 동량의 증류수를 넣고 추출하여 얻은 추출물을 대조군으로 사용하였으며, 대조군과 각 효소를 이용하여 얻은 추출물의 사진은 Fig. 1과 같다.

2.1.3. 참깨박 효소 추출물의 이화학적 특성

2.1.3.1. 추출 수율, 조단백질 함량 및 가용성 단백질 함량 측정

추출 수율은 추출된 사용된 참깨박의 건조중량에 대한 추출 후 얻은 추출물의 건조중량에 대한 백분율로

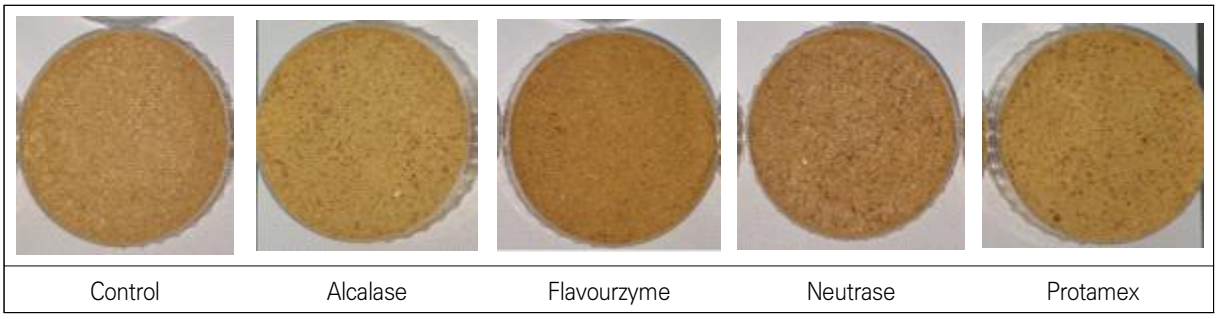


Fig. 1. Sesame meal extracts obtained by different proteases.

나타내었다. 참깨박 효소 추출물의 조단백질 함량은 식품공전의 일반성분시험법의 Kjeldahl법에 따라 micro kjdeldahl 장치(BUCHI Distillation unit K-350, Flawil, Switzerland)를 사용하여 측정하였다.

추출물의 가용성 단백질 함량은 Lowry법(Lowry 등, 1951)에 따라 측정하였다. 즉, 시료용액 0.5 mL와 Lowry reagent 2.5 mL와 혼합하여 실온에서 10분간 반응시켰다. 이후 증류수와 1:1 비율로 희석한 Folin-Ciocalteu reagent 0.25 mL를 반응물에 가한 뒤 30분간 실온에서 방치시킨 후 750 nm에서 흡광도를 측정하였다. 단백질 함량은 bovine serum albumin (Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA)으로 작성한 표준곡선으로부터 산출하였다.

2.1.3.2. 가수분해도 측정

참깨박 효소 추출물의 가수분해도(degree of hydrolysis, DH)는 효소 추출물에 20% trichloroacetic acid (TCA)을 동량 첨가하여 실온에서 30분 동안 방치시켰다. 이후 원심분리(Supra-21K, Hanil)하여 얻은 상등액을 일정량 취하여, bicinchoninic acid (BCA)법에 따라 10% TCA 가용성 단백질량을 측정하였다. 가수분해도는 아래의 식을 사용하여 산출하였다.

$$DH\ (\%) = \frac{\text{10\% TCA-soluble N in sample}}{\text{Total N in sample}} \times 100$$

2.1.3.3. pH 및 색도 측정

참깨박 효소 추출물의 pH는 증류수와 시료를 10% (w/v)의 현탁액으로 만들고, 원심분리 후 시료의 상층액을 pH meter (Orion 3 starBenchtop, Thermo Orion, Beverly, MA, USA)로 측정하였다.

각 추출물의 색도는 일정량의 시료를 투명한 플라스틱 용기에 담아 색차계(CM-3600D, Minolta, Tokyo, Japan)를 이용하여 Hunter값(L=명도, a=적색도, b=황색도)으로 표시하였다. 이때 사용된 표준 백색판의 L, a 및 b 값은 각각 93.20, 0.46,-1.13이었다.

2.1.3.4. 수분흡수력 및 유지흡수력 측정

추출물의 수분흡수력(water holding capacity, WHC) 측정을 위해 시료 2 g에 증류수 20 mL를 혼합하였다. 혼합물을 30초 동안 볼텍스 믹서를 이용하여 교반하고 10분간 정치시킨 다음, 이 과정을 5번 반복한 후 3,000 rpm에서 20분간 원심분리하고 상층액을 따라낸 뒤, 그 상태에서 10분간 정치시킨 후 침전물의 중량을 측정하여 아래와 같이 계산하였다.

$$WAC\ (\%) = \frac{\text{Weight of sample after removing supernatant (g)}}{\text{Weight of dry sample (g)}} \times 100$$

유지흡수력(oil holding capacity, OHC) 측정을 위해 시료 1 g에 10 mL의 카놀라유를 혼합하고, 혼합물 60초 동안 볼텍스 믹서를 이용해 교반하였다. 현탁액을 실온에서 10분간 방치한 후, 4,000 rpm에서 30분간 원심분리한 다음 상층액을 따라내고, 10분간 방치 후 침전물의 중량을 측정하여 아래의 계산식으로 계산하였다.

$$OHC\ (\%) = \frac{\text{Weight of sample after removing supernatant (g)}}{\text{Weight of dry sample (g)}} \times 100$$

2.1.3.5. 수분용해도

수분용해도(water solubility)는 시료 1 g을 증류수 30 mL와 혼합하여 25℃에서 30분간 용해하고, 3,000 rpm에서 20분간 원심분리한 후 얻은 상등액을 120℃의 dry oven에서 건조시켜, 고형물 무게를 활용하여 아래의 계산식으로 나타냈었다.

$$Water\ solubility\ (\%) = \frac{\text{Weight of dried supernatant (g)}}{\text{Weight of dry sample (g)}} \times 100$$

2.1.3.6. 겉보기 밀도

겉보기 밀도(bulk density)는 시료 일정량의 무게를

측정한 후, 10 mL cylinder에 시료를 넣어 계속 가볍게 두드려 부피가 일정하게 될 때까지 넣은 후 다음 식으로 계산하였다.

$$\text{Bulk density (g/mL)} = \frac{\text{Weight of sample (g)}}{\text{Volume of sample (mL)}}$$

2.1.4. 참깨박 효소 추출물의 기능성 측정

2.1.4.1. 총 폴리페놀 함량

총 폴리페놀 함량은 Folin과 Denis (1912)의 방법을 변형하여 측정하였다. 추출물에 Folin-Ciocalteu's phenol reagent를 첨가하여 혼합한 뒤 Na_2CO_3을 첨가한 증류수를 혼합하여 725 nm에서 흡광도를 측정하였다. 총 폴리페놀 함량은 gallic acid (Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA) 용액으로 작성한 표준곡선으로부터 함량을 구하였다.

2.1.4.2. ABTS 라디칼 소거 활성 측정

2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS, Sigma-Aldrich Co.) 라디칼 소거능은 Kim과 Yoon (2020)의 방법을 이용하여 측정하였다. 7 mM ABTS와 2.45 mM potassium persulfate를 증류수에 용해하여 12-14시간 동안 냉암소에 보관하여 ABTS cation radical ($ABTS^+$)을 형성시킨 후 734 nm에서 0.700±0.002의 흡광도가 되도록 80% ethanol로 희석하여 사용하였다. 96-well plate에 농도별로 희석한 시료 15 μL와 희석한 ABTS 용액 300 μL를 첨가하고, 6분간 반응시킨 후 microplate reader (Epoch, BioTek, Instrument Inc.)로 734 nm에서 흡광도를 측정하였다.

2.1.5. 참깨박 단백질 효소 가수분해물의 영양성 분석

2.1.5.1. 알칼리 추출과 등전점 침전을 이용한 참깨박 단백질 추출

참깨박 분말 100 g에 증류수 2 L를 가하고, 0.1 N NaOH를 이용하여 pH 10으로 조정하여 상온에서 3시간 단백질을 용출시킨 후, 7,000 rpm으로 30분간 원심분리하여 상등액을 취하였다. 알칼리 추출한 참깨박 단백질에 pH 4.0이 되도록 0.1N HCl을 가한 후 상온에서 3시간 단백질을 침전시킨 후, 10,000 rpm에서 30분간 원심분리하여 단백질을 얻었다. 침전 단백질은 증류수를 이용하여 균질화하여 0.1 N NaOH를 이용하여 pH를 7.0으로 중화한 후 동결건조하였다.

2.1.5.2. 참깨박 단백질 효소 가수분해물 제조

알칼리 침전에 의해 얻은 참깨박 단백질 5 g을 0.1 M sodium phosphate buffer (pH 7.0)를 가한 후 Alcalase를 1%가 되도록 첨가하고, 50℃의 shaking water bath (DAIHAN Scientific CO. MaXturdy)에서 3시간 반응시켰다. 이후 반응물을 90℃에서 10분간 가열하여 효소 반응을 정지시킨 후 원심분리하여 상등액을 취한 후, 동결건조하여 얻은 건조물을 참깨박 단백질 가수분해물로 사용하였다.

2.1.5.3. 일반 성분 분석

수분함량은 수분자동측정기(FD-720, Kett, Tokyo, Japan)를 이용하여 측정하였으며, 조회분 함량은 550℃의 회화로(F48000, ThermolyneTM/Barnstead, Dubuque, IA, USA)를 이용하여 직접회화법으로 측정하였다. 조단백은 식품공전의 일반성분시험법의 Kjeldahl 법에 따라 micro-kjdeldahl 장치(BUCHI Distillation unit K-350, Flawil, Switzerland)를 사용하여 측정하였다. 조지방 함량은 조지방 자동추출기(Soxtec 2050, Foss, Hoganas, Sweden)를 이용하여 시료 중의 지방을 diethyl ether로 추출하여 측정하였다. 탄수화물 함량(%)은 시료 전체 함량인 100%에서 수분, 조지방, 조회분, 조단백 함량을 뺀 값으로 하였다.

2.1.5.4. 유리아미노산 함량 및 아미노산스코어 분석

시료에 0.2 N HCl을 가하여 혼합한 후 0.45 μL syringe filter로 여과하여 사용하였으며, High Speed

Amino Acid Analyzer (LA8080 Amino SAYA, Hitachi High-Tech, Tokyo, Japan)로 아미노산을 정량하였다. 아미노산은 ninhydrin 반응으로 발색시켜 570 nm와 440 nm에서 분석하였으며, column은 이온교환수지 column (4.6 mm ID×60 mm)을 사용하였고, 시료 주입량은 20 μL이었다. 아미노산 스코어(amino acid score, AAS) 분석은 WHO/FAO/UNU (2007)가 제시한 기준 패턴(protein reference pattern)에 따라 다음 식으로 산출하였다.

$$AAS\ (\%) = \frac{\text{mg of amino acid in 1 g test protein}}{\text{mg of amino acid in 1 g reference protein}} \times 100$$

2.1.6. 통계처리

수율, 일반성분 및 유리아미노산 함량을 제외한 모든 실험의 결과는 3회 반복으로 수행된 평균값과 표준편차로 나타냈으며, SPSS (ver. 27, Chicago, IL, USA) 통계프로그램을 이용하여 $p<0.05$ 수준에서 일원배치 분산분석법을 실시하였다. 실험의 평균치 간의 유의적 차이는 Duncan's multiple range test로 검증하였다.

2.2. 결과

2.2.1. 효소 종류에 따른 참깨박 효소 추출물의 이화학적 특성

2.2.1.1. 추출 수율, 조단백질 및 가용성 단백질 함량

효소 종류에 따른 참깨박 효소 추출물의 수율과 조단백질 함량을 측정한 결과는 Table 1과 같다. 추출 수율은 대조군은 26.66%로 나타났으며, 효소 추출물의 수율은 33.33-36.84%으로 효소에 의해 추출 수율이 크게 증가되었다. 그 중 Alcalase 추출물의 수율이 36.84%로 가장 높았으며, Flavourzyme 추출물의 수율이 33.33%으로 가장 낮게 나타났다.

Table 1. Yield and crude protein contents of sesame meal extracts obtained by different proteases

Sample	Yield (%)	Crude protein content (%)
Control	26.66	37.29
Alcalase	36.84	53.91
Flavourzyme	33.33	43.54
Neutrase	34.56	50.33
Protmex	35.42	51.96

조단백질 함량은 대조군이 37.29%로 나타났으며, 효소 추출물의 조단백질 함량은 43.54-53.91%로 높게 나타났다. 그 중 Alcalase 추출물의 조단백질 함량이 53.91%로 가장 높았으며, Flavourzyme 추출물이 43.54%로 가장 낮게 나타났다. 이와 같이 효소 추출에 의해 수율 및 조단백질 함량이 증가했으며, 효소처리가 참깨박으로부터 단백질을 추출하는 데 효과적임을 알 수 있었다.

2.2.1.2. 가용성 단백질 함량 및 가수분해도

효소 추출물의 가용성 단백질 함량 및 가수분해도를 측정한 결과는 Table 2와 같다. 가용성 단백질 함량을 측정한 결과, 조단백질 함량과 유사한 경향으로 효소에 의해 가용성 단백질의 함량이 크게 증가되었다. 즉, 효소처리하지 않은 참깨박 추출물의 가용성 단백질 함량이 399.54 mg/g으로 가장 낮았으며, Alcalase 추출물에서 726.46 mg/g으로 유의적으로 가장 높았으며, 다음으로는 Flavorzyme 추출물(574.15 mg/g), Neutrase 추출물(548.00 mg/g), Protamex 추출물(533.38 mg/g) 순으로 높게 나타났다. 이와 같이 가용성 단백질 함량은 효소 처리 추출물에서 무처리 추출물에 비해 크게 증가하여, 효소처리가 참깨박으로부터 단백질을 추출하는 데 효과적임을 알 수 있었다. 이는 단백질 분해효소, 특히 Alcalase의 proteolytic 작용으로 단백질 입자 내 결합이 분해되어 수용성 펩타이드가 증가한 결과로 해석된다. 따라서 Alcalase가 참깨박으

Table 2. Soluble protein contents and degree of hydrolysis of sesame meal extracts obtained by different proteases

Sample	Soluble protein content (mg/g)	Degree of hydrolysis (%)
Control	399.54±6.71[1)d2)]	13.21±0.18[e]
Alcalase	726.46±3.08[a]	73.80±0.45[c]
Flavourzyme	574.15±14.62[b]	86.94±0.71[a]
Neutrase	548.00±12.09[c]	63.53±1.10[d]
Protmex	533.38±10.00[c]	77.07±0.43[b]

1) Mean±standard deviations (n=3).
2) Different superscripts within a column indicate significant differences (α(0.05).

로 단백질 추출에 가장 효율적인 효소임을 확인하였으며, 이후 참깨박 단백질 가수분해물 제조를 위한 효소로 선정하였다.

효소 종류에 따른 참깨박 효소 추출물의 가수분해도는 모든 추출물이 대조군에 비해 유의적으로 높게 나타났으며, Flavourzyme 추출물의 가수분해도가 가장 높았고, 다음으로 Protamex, Alcalase, Neutrase 순으로 높은 가수분해도를 나타내었다. 높은 가수분해도는 단백질 분해로 인한 펩타이드 형성 증가를 의미하며, 기능성 펩타이드 생성에도 긍정적인 영향을 준다(Aguilar 등, 2019). 따라서 효소에 의해 참깨박의 단백질이 분해되어 기능성과 맛을 가지는 다양한 펩타이드와 아미노산이 생성되었을 것으로 판단된다.

2.2.1.3. pH 및 색도

참깨박 효소 추출물의 품질 특성을 확인하기 위하여 효소 종류에 따라 pH를 측정한 결과를 Table 3에 나타내었다. 대조군의 pH가 6.45로 가장 낮았고, 그 다음으로 Flavourzyme 추출물에서 6.48, Protamex 추출물에서 6.60, Alcalase 추출물에서 6.65였으며, Neutrase 추출물에서 6.71으로 유의적으로 가장 높게 나타났다.

참깨박 효소 추출물의 색도는 색차계를 사용하여 L값(lightness), a값(+redness, -greeness), b값(+yellowness, -blueness)을 측정하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다. L값은 대조군에서 63.64이었으며, Alcalase 추출물에서 65.26, Flavourzyme 추출물에서 57.92, Neutrase 추출물에서 59.42, Protamex 추출물에서 62.57이었다. L값은 Alcalase 추출물을 제외하고, 대조군에 비해 유의적으로 낮게 측정되어 효소 추출에 의해 어두워진 반면, Alcalase 추출물만 유의적으로 밝게 나타났다. 적색도를 나타내는 a값은 Alcalase 추출물에서 5.96으로 가장 낮게 측정되었으며, Flavourzyme 추출물에서 8.05로 가장 높게 측정되었다. 황색도를 나타내는 b값은 Flavourzyme 추출물에서 32.05로 가장 높게 측정되었으며, Neutrase 추출물에서 29.20으로 가장 낮게 측정되었다.

Table 3. pH of sesame meal extracts obtained by different proteases

Samples	pH
Control	6.45±0.05[1)d2)]
Alcalase	6.65±0.01[b]
Flavourzyme	6.48±0.02[d]
Neutrase	6.71±0.01[a]
Protamex	6.60±0.01[c]

1) Mean±standard deviations (n=3).
2) Different superscripts within a column indicate significant differences (α(0.05).

2.2.1.4. 수분흡수력 및 유지흡수력

효소 종류에 따른 참깨박 효소 추출물의 수분흡수력

Table 4. Hunter's color of sesame meal extracts obtained by different proteases

Samples	Hunter' color		
	L	a	b
Control	63.64±0.17[1)b2)]	6.78±0.05[c]	30.09±0.04[d]
Alcalase	65.26±0.02[a]	5.96±0.05[e]	30.23±0.01[c]
Flavourzyme	57.92±0.02[e]	8.05±0.02[a]	32.05±0.02[a]
Neutrase	59.42±0.24[d]	7.23±0.03[b]	29.20±0.12[e]
Protamex	62.57±0.05[c]	6.58±0.02[d]	30.49±0.01[b]

[1)] Mean±standard deviations (n=10).
[2)] Different superscripts within a column indicate significant differences (p<0.05).

과 유지흡수력을 측정한 결과는 Table 5와 같다. 수분흡수력은 대조군에서 91.00%로 유의적으로 가장 높았으며, 효소 처리에 의해 감소되었다. 즉, Alcalase 추출물에서 39.67%, Flavourzyme 추출물에서 81.33%, Neutrase 추출물에서 63.33%, Protamex 추출물에서 45.00%로 나타났다. 단백질의 기능성 특성인 수분흡수력은 단백질의 기능적의 하나로, 단백질의 분자의 크기, 모양, 구조적 특성, 단백질 분자 내 아미노산의 친수성 및 소수성의 균형 이외에 지질 및 탄수화물과 같은 다양한 매개 변수의 영향을 받는다. 일반적으로 수분흡수력이 높을수록 수분을 잘 붙잡아 제품의 다즙성(juiciness)과 텍스처 안정성이 향상되며, 조리나 저장 중 수분 손실을 줄여 수율과 신선도 유지에 도움이 된다(Kinsella와 Kinsella, 1976). 그러나 가수분해물의 수분흡수율이 지나치게 높을 경우, 제품의 점도 증가와 끈적임으로 인해 가공성 및 분말의 흐름성이 저하되고, 건조・보관 중 응집이나 재수화 불균형이 발생할 수 있다(Kristinsson과 Rasco, 2000). 따라서 단백질 가수분해물을 식품소재로 사용할 경우, 그 용도에 따라 적절한 수분흡수력의 조절 및 균형이 필요하다.

참깨박 추출물의 유지흡수력은 대조군에서 535.00%로 나타났으며, Alcalase 추출물에서 325.00%, Flavourzyme 추출물에서 297.67%, Neutrase 추출물에서 387.67%, Protamex 추출물에서 398.33%로 나타났다. 효소 추출물 중 가장 높은 수분흡수력을 나타낸 Flavourzyme 추출물이 가장 낮은 유지흡수력(297.67%)을 나타내었다. 이러한 결과는 참깨박 가수분해물로부터 얻은 펩타이드 분획의 수분흡수력이 낮을수록 높은

Table 5. Water absorption and oil absorption capacities of sesame meal extracts obtained by different proteases

Samples	Water absorption capacity (%)	Oil absorption capacity (%)
Control	91.00±1.00[1)a2)]	535.00±7.00[a]
Alcalase	39.67±1.53[d]	325.00±5.57[c]
Flavourzyme	81.33±4.16[b]	297.67±5.77[c]
Neutrase	63.33±6.66[c]	387.67±3.32[b]
Protamex	45.00±1.00[d]	398.33±5.03[b]

[1)] Mean±standard deviations (n=3).
[2)] Different superscripts within a column indicate significant differences (p<0.05).

유지흡수율을 보인 Park과 Yoon (2019)의 연구 결과와 유사하였다. 일반적으로 단백질 가수분해물의 유지흡수율은 식품에서 지방 성분이 단백질 매트릭스에 안정적으로 포집되어 유화 안정성 향상에 영향을 주며, 풍미 유지 및 크리미한 질감 형성에 관여한다(Shahidi 등, 1995). 따라서 유지흡수율이 높은 단백질 가수분해물은 소시지, 마요네즈, 드레싱 등 지방 함유 가공식품의 점도 유지와 지방 분리 방지에 효과적으로 활용될 수 있다.

2.2.1.5. 수분용해도 및 겉보기 밀도

참깨박 효소 추출물의 수분용해도와 겉보기 밀도를 측정한 결과는 Table 6과 같다. 수분용해도는 대조군에서 77.67%로 가장 높게 나타났으며, 효소 추출에 의해 수분활성도의 유의적인 증가를 보였다. 즉, Alcalase 추출물과 Protamex 추출물에서 각각 101.67%과 100.67%로 용해도를 보였으며, 다음으로 Flavourzyme 추출물에서 92.00%, Neutrase 추출물에서 91.33%로 나타났다. 단백질 가수분해물의 수분용해도가 높을수록 물이나 음료 등 액상 매트릭스 내에서 분산성이 우수하고 침전이 적어, 단백질 보충제의 제조 효율 및 기호성이 향상된다. 또한 높은 용해도는 소화 흡수율을 높이고 단백질 손실을 줄여, 고영양 단백질 제품(instant protein supplements) 개발에 유리하다(Chalamaiah, 2012; Panyam과 Kilara, 1996). 따라서 참깨박 효소 추출물은 효소 분해에 의해 용해도가 크게 증가하여 다양한 식품 소재로의 활용이 가능할 것으로 기대된다.

겉보기 밀도는 같은 질량의 시료라도 입자 크기나 구조에 따라 차지하는 부피가 달라지므로, 분말의 다공성을 정량적으로 측정하는 지표이다. 대조군의 겉보기 밀도는 0.18 g/mL로 유의적으로 가장 낮았으며, 효소 분해에 의해 증가되었다. 즉, Alcalase 추출물에서 0.32 g/mL, Flavourzyme 추출물에서 0.39 g/mL, Neutrase 추출물에서 0.29 g/mL, Protamex 추출물에서 0.28 g/mL로 나타났다. 일반적으로 겉보기 밀도가 낮을수록 기공이 많아, 물이나 유지가 침투할 공간이 커지므로 흡수력이 커져 겉보기 밀도와 유지흡수력과의 관계는 음의 상관관계를 나타낸다(Okezie와 Bello, 1988). Dench (1982)는 낮은 겉보기 밀도를 보인 winged bean 단백질 아이소레이트가 높은 유지흡착력을 보였다고 보고하였는데, 이는 겉보기 밀도가 가장 낮았던 대조군이 가장 높은 유지흡수력을 보인 본 연구와 같았다. 낮은 밀도를 가진 단백질 분말은 유지흡수성·보습성 기능이 우수해 유화제, 결착제, 제빵 첨가물 등으로 유용하지만, 음료용 단백질 파우더 제조 시 낮은 밀도는 분산성 저하, 부유 입자 발생을 야기할 수 있다(Seo, 2022). 따라서 겉보기 밀도가 낮은 시료는 유지흡수력이 높아 유화제나 결착제 역할에 유리할 것으로 보이며, 반면 분말형 단백질 제품에서는 분산성 저하 우려가 있으므로 가수분해물의 사용 용도에 따른

Table 6. Water solubility and bulk density of sesame meal extracts obtained by different proteases

Samples	Water solubility (%)	Bulk density (g/mL)
Control	77.67±2.08[1)c2)]	0.18±0.00[d]
Alcalase	101.67±6.03[a]	0.32±0.03[b]
Flavourzyme	92.00±2.00[b]	0.39±0.00[a]
Neutrase	91.33±4.62[b]	0.29±0.00[c]
Protamex	100.67±5.86[a]	0.28±0.00[c]

1) Mean±standard deviations (n=3).
2) Different superscripts within a column indicate significant differences (p<0.05).

적절한 효소의 선택이 필요할 것으로 판단된다.

2.2.2. 참깨박 효소 추출물의 기능성

2.2.2.1. 폴리페놀 함량

참깨박 발효 추출물의 총 폴리페놀 함량은 Fig. 2와 같이 Alcalase 추출물에서 24.42 mg GAE/g으로 가장 높게 나타났으며, 다음으로는 Neutrase, Protamex 추출물에서 21.78 mg GAE/g으로 같았다. 효소처리하지 않은 대조군의 총 폴리페놀 함량은 20.43 mg GAE/g으로 나타나 Flavourzyme 추출물을 제외하고는 효소에 의해 총 폴리페놀 함량이 증가된 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 효소 추출 시 폴리페놀의 함량이 증가한 것은 식물단백질 성분과 약하게 결합한 불용성의 폴리페놀이 효소에 의해 분해되어 가용성으로 전환되었기 때문으로 판단된다(Rakariyatham 등, 2020).

2.2.2.2. ABTS 소거 활성

ABTS 양이온(ABTS · $^{+}$) 소거 활성은 ABTS 용액과 과황산칼륨과의 반응에 의해 생성된 ABTS 양이온이 분획물의 항산화력에 의해 제거되어 라디칼 특유의 색인 청록색이 탈색되는 것을 이용한 측정 방법으로 DPPH assay와 함께 항산화 활성 측정에 주로 사용된다. 참깨박 효소 추출물의 ABTS radical 소거 활성은 Fig. 3과 같이, 효소 추출물이 대조군에 비해 높은 ABTS 소거 활성을 나타내었으며, 추출물의 농도가 증가함에 따라 소거 활성도 증가하였다. 각 농도에서 가장 높은 소거 활성을 가지는 추출물은 차이를 보였는데, 250 μg/mL에서는 Protamex 추출물의 소거 활성이 가장 높았으나, Flavourzyme을 제외한 다른 추출물과 유의적인 차이는 없었다. 500과 1,000 μg/mL에서도 Protamex 추출물의 소거 활성이 각각 27.67%와 43.96%로 가장 높았으나, 1,000 μg/mL에서는 모든 추출물에서 유의적인 차이는 없었다. 반면

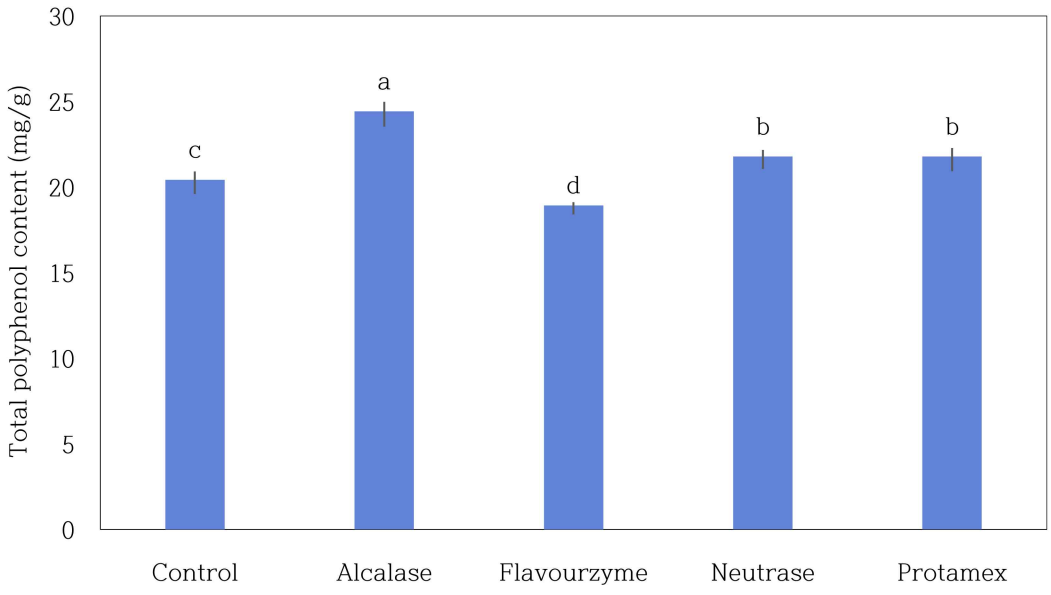


Fig. 2. Total polyphenol content of sesame meal extracts obtained by different proteases. Bars represents the mean and standard deviation (n=3). Values with different letters are significantly different at $p<0.05$ by Duncan's multiple range test.

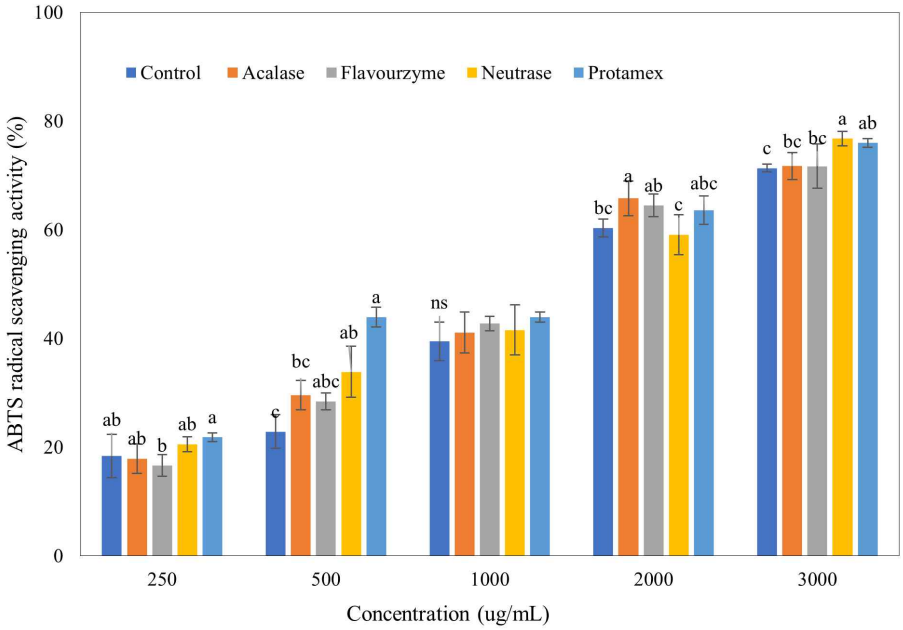


Fig. 3. ABTS radical scavenging activity of sesame meal extracts obtained by different proteases. Bars represents the mean and standard deviation (n=3). Values with different letters are significantly different at $p<0.05$ by Duncan's multiple range test. ns, not significant.

고농도인 2,000과 3,000 μg/mL에서는 각각 Acalase 추출물(65.79%)과 Neutrase 추출물(76.789%)이 가장 높은 소거 활성을 나타내었다. 이상과 같이 대조군에 비해 추출물의 소거 활성이 증가된 것은 효소 가수분해에 의해 단백질 내 결합이 절단되면서 페놀성 화합물과의 상호작용이 약화되어, 폴리페놀의 가용화가 촉진된 것으로 생각된다(Rakariyatham 등, 2020). 또한 단백질 가수분해에 생성된 항산화 활성을 가지는 저분자 펩타이드가 라디칼 소거에 직접 관여했을 것으로 판단된다(Aderinola 등, 2018).

2.2.3. 참깨박 단백질 가수분해물의 영양성

2.2.3.1. 일반성분

효소 추출 및 가수분해에 의해 얻어진 참깨박 단백질 가수분해물의 단백질 함량을 비롯하여 영양성분을 평가하기 위하여 효소 처리 전 탈지 참깨박과 일반성분을 비교하였으며, 그 결과는 Table 7과 같다. 탈지 참깨박의 일반성분의 측정한 결과, 수분함량 32.89%, 조단백질 42.77%, 조지방 11.55%, 탄수화물 9.86%, 회분 2.94%이었다. 알칼리 추출 및 Acalase 분해에 의해 제조된 참깨박 단백질 가수분해물의 일반성분은 수분함량 7.14%, 조단백질 81.93%, 조지방 0.12%, 회분 5.02% 및 탄수화물 5.91%로 측정되었다. 이상의 결과에서 참깨박 단백질 가수분해물의 단백질 함량이 탈지 참깨박에 비해 약 2배 이상 높은 것으로 나타나, 알칼리 침전 및 효소 추출이 참깨박 단백질의 추출에 매우 효과적임을 알 수 있었다.

2.2.3.2. 유리아미노산 함량

탈지 참깨박과 참깨박 단백질 가수분해물의 유리아미노산 함량을 비교한 결과는 Table 8과 같다. 총 유

Table 7. Comparison of proximate composition of deffated sesame meal and sesame meal protein hydrolysate

Samples	Composition (%)	
	Deffated sesame meal	Sesame meal protein hydrolysate
Moisture	32.89	7.12
Crude protein	42.77	81.83
Crude lipid	11.55	0.12
Crude ash	2.94	5.02
Carbohydrate	9.86	5.91

Table 8. Comparison of free amino acid content of deffated sesame meal and enzymatic sesame meal protein hydrolysate

Free amino acids		Content (mg/100 g)	
		Deffated sesame meal	Sesame meal protein hydrolysate
Essential amino acid	Leucine	4,394.31	9443.13
	Valine	2,883.26	3,588.29
	Phenylalanine	2,811.62	2,789.75
	Lysine	798.16	6,785.31
	Threonine	2,087.28	2,715.60
	Trytophan	-	-
	Histidine	1,175.88	1,288.94
	Isoleucine	2,337.73	3,316.19
	Methionin	1,119.91	1,513.17
Total essential amino acid		17,608.15	31,440.38
Nonessential amino acid	Alanine	3,184.20	2,442.75
	Aspartic acid	4,309.63	1,790.33
	Cystine	236.72	4,339.70
	Glutamic acid	1,036.55	725.40
	Glycine	3,295.91	10,944.09
	Proline	2,656.39	1,778.27
	Serine	2,389.34	4,690.25
	Tyrosine	1,575.04	2,813.57
Total nonessential amino acid		18,683.78	29,524.36
Total amino acids		36,291.93	60,964.74

리아미노산 및 총 필수아미노산 함량이 효소 가수분해 에 의해 크게 증가되었는데, 특히 필수아미노산의 함량

이 효소 가수분해에 의해 17,608.15 mg/100 g에서 31,440.38 mg/100 g으로 약 1.8배 증가하였다. 또한 leucine, lysine, isoleucine의 함량이 각각 약 2배, 8배, 1.5배 증가하여, 참깨박 단백질 가수분해물은 곡류에 부족한 lysine을 보완할 수 있는 효과적인 소재로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

2.2.3.3. 아미노산 스코어(AAS)

참깨박 단백질 가수분해물의 질적 영양평가를 위해 AAS를 계산한 결과(Table 9), 알칼리 침전과 효소 분해에 의해 얻은 참깨박 단백질 가수분해물의 모든 AAS가 85점 이상임을 확인하였다. 또한 리신(lysine), 메티오닌(methionine), 트레오닌(threonine) 및 methionine+cystine의 AAS가 향상되었으며, 특히 methionine+cystine의 AAS가 265.98로 매우 높은 값을 나타내었다. 이는 효소 처리로 인해 단백질 내 결합이 절단되어 소수성 잔기 노출과 아미노산 회수율이 증가한 결과로 보인다. 이상과 같이 참깨박 단백질 가수분해물의 AAS는 WHO/FAO/UNU (2007)가 제시한 기준이 되는 단백질에 비해 높은 값을 나타내어 효소를 이용한 생물전환 공정이 단백질을 질적으로 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 참깨박 단백질 가수분해물은 대두보다 methionine 함량이 풍부하므로, 대두 단백질의 제한아미노산 보완을 위한 소재로 활용성이 매우 높을 것으로 기대된다.

Ⅲ. 결론

본 연구는 산업 부산물인 참깨박을 식품소재로 활용하기 위하여 효소 가수분해 공정을 통해 참깨박 단백질 가수분해물을 제조하고, 이들의 기능적 및 영양적 특성을 평가하였다. 효소 추출에 의해 조단백질 및 가용성 단백질의 함량 증가했을 뿐만 아니라, 폴리페놀 함량 및 항산화 활성이 크게 증가되었다. 특히, Alcalase 처리군은 다른 효소에 비해 단백질 추출 수율과 조단백질 함량이 가장 높았으며, 가용성 단백질 함량 또한 높게 나타났다. 따라서 Acaclase 효소를 이용하여 참깨박 단백질 가수분해물을 제조하고, 이들의 영양성을 분석한 결과, 조단백질 함량, 필수아미노산 함량 및 아미노산스코어가 향상되어 참깨박 단백질 가수분해물이 질적으로 매우 우수한 식품소재임을 확인하였다. 특히 참깨박 단백질 가수분해물은 lysine과 methionine의 아미노산 스코어가 높아, 곡류 및 대두를 비롯한 식물성 단백질의 제한아미노산을 보완할 수 있는 소재뿐만 아니라, 고단백 식품, 노인용 영양식, 건강기능식품 등 식품 산업에서의 활용 가능성이 높을 것으로 기대된다. 또한 농산물 부산물을 원료로 활용함으로써 수입 대체 효과와 식품 자원 순환 측면에서도 긍정적인 파급효과가 기대된다.

Table 9. Amino acid score of sesame meal protein hydrolysate

	Amino acid content (mg/g)	Reference pattern (mg/g protein)	Amino acid score
Histidine	12.88	15	85.86
Isoleucine	33.16	30	110.53
Leucine	94.43	59	160.05
Lysine	67.85	45	150.78
Methionine + Cystine	58.52	22	265.95
Phenylalanine + Tyrosine	56.02	38	147.42
Threonine	27.15	23	118.04
Valine	35.88	39	91.66

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

ORCID

Kyung Young Yoon
https://orcid.org/0000-0003-0626-5563
Bo Yeon Park
https://orcid.org/0009-0009-6985-9917
Jae Min Seo
https://orcid.org/0009-0008-1437-1589
Eun Chae Lee
https://orcid.org/0009-0001-7442-6552
Min Ji Kang
https://orcid.org/0009-0007-7231-5801

참고문헌

Adrinola TA, Fagbemi TN, Enujiugha VN, Alashi AM, Aluko RE. Amino acid composition and antioxidant properties of *Moringa oleifera* seed protein isolate and enzymatic hydrolysates. Heliyon, 4, e00877 (2018)

Aguilar JGS, Cason VG, de Castro RJS. Improving antioxidant activity of black bean protein by hydrolysis with protease combinations. Int J Food Sci Technol, 54, 34–41 (2019)

Aniam PN, Phongthai S, Grossmann L, Jung YH, Sai-Ut S, Onsaard E, Rqwdkuen S. Potential plant proteins for functional food ingredients: Composition, utilization and its challenges. NFS J, 38, 100216 (2025)

Chalamaiah M, Dinesh KB, Hemalatha R, Jyothirmayi T. Fish protein hydrolysates: Proximate composition, amino acid composition, antioxidant activities and applications: A review. Food Chem, 35, 3020-3038 (2012)

Dench JE. Extraction of nitrogenous material from winged bean [*Psophocarpus tetragonolobus* (L.) DC] flour and the preparation and properties of protein isolates. J Sci Food Agric, 33, 173-184 (1982)

Dossou SSK, Xu FT, Dossa K, Zhou R, Zhao YZ, Wang LH. Antioxidant lignans sesamin and sesamolin in sesame (*Sesamum indicum* L.): A comprehensive review and future prospects. J Integr Agric, 22, 14-30 (2023)

Fan J, Gao A, Zhan C, Jin Y. Degradation of soybean meal proteins by wheat malt endopeptidase and the antioxidant capacity of the enzymolytic products. Front Nutr, 10, 1138664 (2023)

FAO. The State of Agricultural Commodity Markets 2022. The geography of food and agricultural trade: Policy approaches for sustainable development. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy (2022)

Folin O, Denis W. On phosphotungstic-phosphomolybdic compounds as color reagents. J Biol Chem, 12, 239-243 (1912)

Harris S, DePalma J, Barkoukis H. Protein and aging: Practicalities and practice. Nutrients, 17, 2461 (2025)

Kim JM, Yoon KY. Determination of protein extraction and trypsin hydrolysis conditions for producing hydrolysates with antioxidant activity from perilla seed meal. Korean J Food Preserv, 27, 791-799 (2020)

Kinsella JE, Melachouris N. Functional properties of proteins in foods: A survey. Crit Rev Food Sci Nutr, 7, 219-280 (1976)

Kristinsson HG, Rasco BA. Fish protein hydrolysates: Production, biochemical, and functional properties. Crit Rev Food Sci Nutr, 40, 43-81 (2000)

Ministry of Data and Statistics. Results of the Production Survey on Red Pepper, Sesame, and Highland Potatoes (2024). Available from: https://mods.go.kr/board.es?mid=a10301010000&bid=228&list_no=433869&act=view&mainXml=Y. Accessed Nov. 10, 2025.

Okezie BO, Bello AB. Physicochemical and functional properties of winged bean flour and isolate compared with soy isolate. J Food Sci, 53, 450-454 (1988)

Panyam D, Kilara A. Enhancing the functionality of food proteins by enzymatic modification. Trends Food Sci Technol, 7, 120-125 (1996)

Park BY, Yoon KY. Conditions for hydrolysis of perilla seed meal protein for producing hydrolysates and ultrafiltered peptides and their antioxidant activity. Food Sci Preserv, 25, 605-612 (2018)

Park BY, Yoon KY. Functional properties of enzymatic hydrolysate and peptide fractions from perilla seed meal protein. Pol J Food Nutr Sci, 69, 119-127 (2019)

Rakariyatham K, Liu X, Liu Z, Wu S, Shahidi F, Zhou D, Zhu B. Improvement of phenolic contents and antioxidant activities of longan (*Dimocarpus longan*) peel extracts by enzymatic treatment. Waste Biomass Valor, 11, 3987-4002 (2020)

Seo CW. Improved flowability and wettability of whey protein-fortified skim milk powder via fluidized bed agglomeration. Food Sci Anim Resour, 42, 915-927 (2022)

Shahidi F, Han XQ, Synowiecki J. Production and characteristics of protein hydrolysates from capelin (*Mallotus villosus*). Food Chem, 53, 285-293 (1995)

Son WY, Yang NE, Kim DN, Hwang J, Kim HW. Comparison of antioxidant activities of the enzymatic hydrolysate fractions derived from oilseed meals. Resour Sci Res, 5, 61-71 (2023)

Tavano OL. Protein hydrolysis using proteases: An important tool for food biotechnology. J Mol Catal B Enzym, 90, 1-11 (2013)

Technavio. Protein market analysis, size, and forecast 2025-2029: North America (US), Europe (France, Germany, Italy, and UK), APAC (Australia, China, India, Japan, and South Korea), and rest of world (ROW). Available from: https://www.technavio.com/report/protein-market-industry-analysis. Accessed Oct. 25, 2025.

The Business Research Company. Soy protein global market report 2025. Available from: https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/soy-protein-global-market-report. Accessed Nov. 1, 2025.

WHO/FAO/UNU. Protein and Amino Acid Requireents in Human Nutrition. WHO Technical Report Series No. 935, World Health Organization, Geneva, Switzerland (2007)

Yüzer MO, Genccelep H. Sesame seed protein: Amino acid, functional, and physicochemical profiles. Foods and Raw Materials, 11, 72-83 (2023)