

발효 클로렐라 분말(*Chlorella pyrenoidosa* extract powder)을 첨가한 조식대두단백 패티의 품질 특성

조범수[†] · 김민상[†] · 김민웅 · 김영목 · 양지영*

국립부경대학교 식품공학과

Quality Characteristics of Textured Vegetable Protein Patties Supplemented with Fermented *Chlorella pyrenoidosa* Extract Powder

Beom-Su Cho[†], Min-Sang Kim[†], Min-Ung Kim, Young-Mog Kim and Ji-Young Yang*

Department of Food Science and Technology, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

We investigated how fermented *Chlorella pyrenoidosa* powder (FCP) may improve the quality of textured vegetable protein (TVP) patties. FCP was prepared by FCP with *Bacillus amyloliquefaciens* MU2, followed by centrifugation, freeze-drying, and pulverization of the supernatant. We prepared TVP patties with different combinations of transglutaminase and glucono- δ -lactone, and incorporated 0%, 5%, and 10% FCP. The 5% FCP treatment resulted in the highest hardness, adhesiveness, springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness, and cutting force. In contrast, the texture values were lower for the 10% FCP treatment, indicating that a higher FCP level may interfere with protein matrix formation. Higher FCP level decreased lightness and increased yellowness. Additionally, treatment with 5% FCP increased the levels of taste-related free amino acids, including glutamic acid, aspartic acid, alanine, and proline. Total polyphenol content and 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical scavenging activity increased from 49.06 mg gallic acid equivalent (GAE)/100 g and 28.74% in the control to 67.84 mg GAE/100 g and 37.52%, respectively, in the 5% FCP treatment. These results suggest that 5% FCP treatment improves the textural properties, free amino acid composition, and antioxidant activity of TVP patties.

Keywords: Fermented *Chlorella pyrenoidosa* extract powder, Physicochemical properties, Textured vegetable protein

서론

최근 세계적인 인구 증가, 소득 수준 향상 및 식생활의 서구화로 인해 동물성 단백질에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 경제협력개발기구(Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD)와 국제연합식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)의 2025년 농업 전망 보고서에 따르면 2034년까지 가금육, 양고기, 쇠고기 및 돼지고기 소비가 각각 약 21, 16, 13 및 5% 증가할 것으로 전망하였으며, 이러한 증가는 인구 및 소득 증가가 빠른 지역을 중심으로 지속될 것으로 보고하였다(OECD and FAO, 2025). 그러나 전통적인 축산 기반 육류 생산은 온실가스 배출, 토지 및 수자원 이용, 사료 생산, 분뇨 처

리 등과 밀접하게 관련되어 있어 환경적 지속가능성 측면에서 한계를 가진다. 또한 건강 측면에서도 적색육 및 가공육의 과다 섭취에 대한 우려가 제기되고 있으며, 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 가공육을 인간에게 발암성이 있는 Group 1로, 적색육을 발암 가능성이 있는 Group 2A로 분류하였다(Bouvard et al., 2015). 이에 따라 환경 부담을 저감할 뿐 아니라 안정적인 단백질 공급이 가능한 대체 단백질 및 육류 대체 식품에 대한 관심이 증가하고 있다.

대체육은 기존 축산육을 부분적 또는 전면적으로 대체하기 위해 개발된 식품군으로, 식물성 대체육, 배양육 및 식용 곤충 기반 식품 등이 포함된다. 이 중 식물성 대체육은 대두, 밀, 완두, 버섯류 등에서 유래한 식물성 단백질 또는 식품 소재를 활용하

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5828 Fax: +82. 51. 629. 5824

E-mail address: jyyang@pknu.ac.kr

[†]Contributed equally.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2026.0419>

Korean J Fish Aquat Sci 59(4), 419-428, August 2026

Received 15 June 2026; Revised 23 July 2026; Accepted 4 August 2026

저자 직위: 조범수(대학원생) · 김민상(대학생) · 김민웅(대학원생) · 김영목(교수) · 양지영(교수)

여 육류의 조직감, 형태 및 관능 특성을 모사한 제품으로, 현재 상업화 수준과 소비자 접근성이 비교적 높은 대체육 유형에 해당한다(Kim et al., 2021; Lee et al., 2023). 특히 조직대두단백(textured vegetable protein, TVP)은 압출성형 공정을 통해 식물성 단백질에 열, 압력 및 전단력을 가하여 육류와 유사한 섬유상 구조를 형성한 소재로, 패티, 너겟 및 소시지 등 다양한 육류 유사 제품에 활용되고 있다(Cho et al., 2023).

이 중 패티는 대체육 제품 중에서도 소비자 접근성이 높고, 육류 저감 효과를 구현하기 용이한 대표적인 제품군이다. 패티의 품질은 원료의 종류, 배합비, 지방 및 수분 함량, 결합력, 가열 중 수분 보유력, 조직감 및 풍미 등에 의해 결정되며, 특히 다즙성, 경도, 응집성, 씹힘성 및 가열감량은 소비자 기호도와 밀접하게 관련된다(Petrat-Melin and Dam, 2023). 그러나 식물성 대체육은 여전히 전통 육류와 비교하여 풍미, 색, 다즙성 및 조직감 측면에서 한계가 있으며, 식물성 단백질 원료에서 유래하는 콩 비린내, 풋내, 쓴맛 및 뚫은맛 등은 소비자 수용성을 저하시킬 수 있다(Wang et al., 2024). 따라서 식물성 대체육 패티의 품질을 개선하기 위해서는 단백질 소재의 단순 대체를 넘어, 조직감 및 영양적 가치를 함께 향상시킬 수 있는 부재료의 탐색이 필요하다.

이러한 소재 중 하나로 미세조류가 주목받고 있다. 미세조류는 높은 광합성 효율과 빠른 생장 특성을 가지며, 비경작지 및 비식용 수자원을 활용할 수 있어 지속가능한 단백질 공급원으로 평가된다(Safi et al., 2014; Kumar et al., 2022). 특히 클로렐라(*Chlorella* spp.)는 단세포 녹조류로, 단백질, 지질, 탄수화물, 비타민 및 무기질을 함유하고 있으며, *Chlorella vulgaris*의 경우 건물 기준 약 43–58% 수준의 단백질을 포함하는 것으로 보고되었다(Wang et al., 2024). 또한 클로렐라는 필수아미노산, 불포화 지방산, 다당류, 클로로필, 카로티노이드 및 페놀 화합물 등 다양한 영양·생리활성 성분을 함유하고 있어 영양원으로서의 활용 가능성이 높다(Bito et al., 2020).

클로렐라 및 미세조류 단백질은 영양학적 가치뿐만 아니라 유화 안정성, 계면 안정화 및 식품 매트릭스 형성에 기여할 수 있는 기능적 특성을 가진다. 이러한 특성은 수분 및 지방 보유, 결합력, 다즙성 및 조직감이 중요한 식물성 대체육 패티에 적용 가능성이 높은 요소이다. 그러나 클로렐라는 녹색 색소와 특유의 해조류 유사 향미를 가지며, 단단한 세포벽으로 인해 세포 내 단백질 및 생리활성 성분의 이용성이 제한될 수 있다(Hildebrand et al., 2020; Weber et al., 2022). 따라서 클로렐라의 식품 소재화를 위해서는 세포벽 구조를 완화하고 단백질 및 수용성 성분의 추출성과 이용성을 향상시킬 수 있는 기술이 필요하다.

이러한 기술 중에 친환경 기술로 불리는 발효는 미생물이 생산하는 효소 작용을 통해 식품 소재의 고분자 성분을 분해하고, 단백질의 저분자화 및 유리 아미노산 생성을 유도할 수 있는 생물학적 전처리 방법이다. 특히 *Bacillus* 속 균주는 protease, amylase 등 다양한 세포 외 효소를 생산할 수 있어 소재의 성분

이용성 개선에 활용될 수 있다. 이에 따라 클로렐라의 발효를 통해 세포벽으로 인해 제한되던 단백질 및 생리활성 성분의 용출이 촉진되고, 단백질 저분자화에 따른 소화성 및 기능적 특성이 개선될 수 있다. 따라서 발효 클로렐라 분말을 식물성 대체육 패티에 적용하는 것은 클로렐라의 영양·기능성 성분을 보강하는 동시에 패티의 외관 및 조직감 개선 가능성을 평가할 수 있는 의미 있는 접근법으로 판단된다.

이러한 배경을 바탕으로 발효 클로렐라 분말 첨가량에 따른 식물성 대체육 패티의 이화학적 품질 특성을 비교하고, 발효 클로렐라의 대체육 식품 소재로서의 활용 가능성을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

실험 재료

본 실험에서 사용한 발효 클로렐라 분말의 원재료인 클로렐라 분말(*Chlorella pyrenoidosa*)은 (주)정우당(Jeongwoodang Co., Ltd., Seoul, Korea)에서 구매하여 실험에 사용하였다. 또한 식물성 패티 제조를 위한 조직대두단백(TVP)은 Bob's Red Mill Natural Foods, Inc. (Milwaukie, OR, USA)에서 구매하였으며, 유화액 제조에 사용된 분리대두단백(soy protein isolate, SPI)은 Shandong Yuxin Bio-Tech Co., Ltd. (Binzhou, China)에서 구입하였으며, 카놀라유는 (주)오투기(Ottogi Co., Ltd., Seoul, Korea) 제품을 사용하였다. 패티의 결합제(binding agent)로 사용된 glucono- δ -lactone (GDL)과 transglutaminase (TG)는 각각 Anhui Xingzhou Pharma Co., Ltd. (Anhui, China) 및 (주)쿠커페이스(Cookerface Co., Ltd., Gwangju, Korea)에서 구입하여 사용하였다.

균주 및 스타터 제조

본 실험에서는 발효 클로렐라 분말 제조를 위해 *Bacillus amyloliquefaciens* MU2 (KCTC 15499BP)를 사용하였다. 균주는 nutrient agar 배지에서 활성화시켰으며, 활성화된 균주는 nutrient broth 배지에 1 백금이 접종 후 37°C에서 24시간 동안 150 rpm으로 진탕배양하여 스타터로 사용하였다.

발효 클로렐라 분말 제조

본 실험에서 사용한 클로렐라의 발효는 클로렐라 내 펩타이드 및 유용성분을 추출하기 위해 사용되었으며, Cho et al. (2025)의 방법을 참고하였다. 클로렐라 5% (w/v), yeast extract 1% (w/v) 및 증류수를 첨가한 배지에 *B. amyloliquefaciens* MU2 스타터를 1% (v/v) 접종하여 37°C에서 24시간 동안 150 rpm에서 진탕배양하여 사용하였다. 발효가 종료된 클로렐라는 3,134 × g에서 30 min 원심분리하여 잔사를 제거한 상등액을 회수하였으며, 회수한 상등액은 동결건조 후 막자사발로 분쇄하여 발효 클로렐라 분말(fermented *Chlorella pyrenoidosa* ex-

tract powder, FCP)을 제조하였다.

패티 제조

TVP는 상온의 증류수에 1시간 침지하여 충분히 수화시킨 후, 손으로 압착하여 과잉 수분을 제거하였다. SPI, 카놀라유, 증류수, FCP 및 결합제인 GDL 또는 TG를 수동 혼합하여 유화 및 결합제 혼합제를 제조하였다. 제조된 혼합제는 수화된 TVP와 혼합한 뒤, 핸드 블렌더를 이용하여 균질화하였다.

최종 혼합물은 약 80 g씩 분할하여 직경 9.8 cm, 높이 1.8 cm의 원통형 패티틀에 성형하였다. 성형된 패티는 TG 매개 가교 반응을 위해 50°C에서 30분간 반응시킨 후, 효소 반응 종료 및 단백질 겔 네트워크 안정화를 위해 80°C 수욕에서 1시간 가열하였다. 가열 후 시료는 랩으로 밀봉 후 4°C에서 5시간 냉장한 뒤 물성 및 품질 평가에 사용하였다.

실험은 2단계로 수행하였다. 1차 실험에서는 모든 처리구의 기본 배합비를 TVP 100 g, SPI 10 g, 카놀라유 20 g 및 증류수 30 g으로 동일하게 고정하고, GDL 및 TG의 첨가 농도를 달리한 5개의 처리구(TG 4.8 g, GDL 4.8 g, GDL 1.6 g+TG 4.8 g, GDL 4.8 g+TG 1.6 g, GDL 4.8 g+TG 4.8 g)를 비교하였다(Table 1). 이를 통해 후속 실험에 적용할 결합제 조건을 선별하였다. 2차 실험에서는 1차 실험에서 선정된 결합제 조건을 고정한 상태에서 FCP 첨가량을 0, 5 및 10% (w/w)로 달리한 3개의 처리구를 비교하여 FCP 첨가 수준에 따른 TVP 패티의 품질 특성을 분석하였다(Table 2).

조직감 측정

제조한 TVP 패티의 조직감은 Texture analyzer (CT3; Brookfield Engineering Laboratories, Inc., Middleboro, MA, USA)를 사용하여 평가하였다. 조직감 분석을 위해 제조한 패티를 가로×세로×높이 각각 20 mm×20 mm×15 mm의 직육면체 모양으로 절단한 뒤, 원통형 프로브(TA25/1000, 직경 50.8 mm, 길이 20 mm)를 사용하여 각 패티 시료를 테스트 속도 1.0

mm/s로 50% 변형률까지 2회 압착하였다. 얻어진 힘-시간 곡선으로부터 경도(hardness), 탄력성(springiness), 응집성(cohesiveness), 부착성(adhesiveness), 검성(gumminess), 씹힘성(chewiness)을 산출하였다. 절단 강도(cutting force)는 커팅 와이어 프로브(TA53, 와이어 직경 0.3 mm, 길이 40 mm)를 사용하여 테스트 속도 1.0 mm/s로 측정하였으며, 시료를 완전히 절단하는 데 필요한 최대 힘을 기록하였다.

색도 측정

발효 클로렐라 첨가 여부에 따른 식물성 패티의 색(color) 차이를 측정하기 위해 Lovibond RT series reflectance tintometer (SP60; The Tintometer Ltd., Amesbury, UK)를 사용하여 측정하였다. 측정 전 제조사에서 제공한 표준 백색 보정판(white calibration plaque, serial no. 24174)과 black trap을 이용하여 백색 및 흑색 보정을 순차적으로 수행하였다. 교정 완료 후 기기의 calibration status를 확인한 뒤, D65 광원 및 10° 표준관찰자 조건에서 명도(lightness)를 의미하는 L*, 적색도(redness)를 나타내는 a*, 황색도(yellowness)의 b*를 측정하였다. 결과값은 각 처리구당 서로 다른 3개의 패티에 대하여 3회 반복 측정한 값의 평균으로 나타내었다.

총 폴리페놀 함량 분석

조직대두단백 패티의 총 폴리페놀 함량은 Lanzoni et al. (2023)의 방법을 변형한 Folin-Denis법으로 측정하였다. 표준 물질을 0.1% (w/v) gallic acid로 하여 각 농도 구간을 0, 20, 40, 60, 80 및 100 µg/mL가 되도록 표준용액을 제조하여 표준곡선을 작성하였다. 이후 시료를 희석한 용액 60 µL에 2배 희석한 Folin reagent 60 µL를 가하여 3분 동안 반응시킨 후, 10% Na₂CO₃ 용액 60 µL를 첨가하여 반응을 정지시켰다. 이후 30°C에서 1시간 암실에서 보관한 뒤 microplate reader (Epoch 2; BioTek Instruments, Inc., Winooski, VT, USA)로 700 nm에

Table 1. Ingredient composition of TVP patties formulated with different combinations of binding agents (TG and GDL)

Ingredients (g)	TG 4.8 g	GDL 4.8 g	GDL 1.6 g +TG 4.8 g	GDL 4.8 g +TG 1.6 g	GDL 4.8 g +TG 4.8 g
TVP			100		
SPI			10		
Canola oil			20		
Water			30		
TG	4.8	—	4.8	1.6	4.8
GDL	—	4.8	1.6	4.8	4.8
Total (g)	164.8	164.8	166.4	166.4	169.6

TVP, textured vegetable protein; TG, transglutaminase; GDL, glucono-δ-lactone; SPI, soy protein isolate; —, not added. Values are expressed as grams per batch.

Table 2. Ingredient composition of TVP patties formulated with different contents of FCP

Ingredients (g)	FCP 0%	FCP 5%	FCP 10%
TVP		100	
SPI		10	
Canola oil		20	
Water		30	
FCP	—	8.76	18.49
TG		1.6	
GDL		4.8	
Total (g)	166.4	175.16	184.89

FCP, fermented *Chlorella pyrenoidosa* extract powder; TVP, textured vegetable protein; SPI, soy protein isolate; TG, transglutaminase; GDL, glucono-δ-lactone; —, not added. Values are expressed as grams per batch.

서 흡광도를 측정하였으며, 최종 단위는 gallic acid equivalent (mg GAE/100 g)으로 나타내었다. 모든 분석은 독립적으로 제조한 3개의 시료에 대하여 각각 3회 반복 수행하였다.

DPPH 라디칼 소거에 의한 항산화 활성 측정

발효 클로렐라를 첨가한 패티의 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) 라디칼 소거능은 Joo and Choi (2014)의 방법을 참고하여 측정하였다. 패티와 ethanol을 1:9로 혼합한 후 상온에서 5시간 정치하여 추출한 패티 추출물(w/w) 4 mL에 1.5×10^{-4} M DPPH 용액을 1 mL 가하여 잘 혼합한 후 실온-암소 조건에서 30분간 반응시킨 후 517 nm에서 흡광도를 측정하였다. 대조구는 시료 추출액 대신 ethanol을 첨가하여 동일한 조건에서 반응시킨 후 흡광도를 측정하였다. DPPH 라디칼 소거능은 다음 식에 따라 산출하였다.

$$\text{DPPH radical scavenging activity (\%)} = (1 - \text{OD}_{\text{sample}} / \text{OD}_{\text{control}}) \times 100$$

여기서 OD_{sample}은 시료 추출액과 DPPH 용액을 반응시킨 혼합액의 흡광도이며, OD_{control}은 ethanol과 DPPH 용액을 반응시킨 대조구의 흡광도를 의미한다.

유리 아미노산 분석

발효 클로렐라 첨가에 따른 맛 성분의 변화 및 발효 과정에서 생성된 저분자 질소화합물의 변화를 평가하기 위해 유리 아미노산 분석을 실시하였으며, 분석법은 Cho et al. (2024)의 연구를 참고하여 수행하였다. 시료 1 g에 동일 부피의 16% trichloroacetic acid 용액을 첨가한 후 15분간 진탕하였으며, 3,134×g

에서 20 min 원심분리하였다. 회수한 상층액은 0.02 N HCl로 2배 희석한 뒤, 0.20 µm syringe filter (PTFE; Advantec Toyo Kaisha, Ltd., Tokyo, Japan)로 여과하여 분석 시료로 사용하였다. 유리 아미노산은 자동 아미노산 분석기(L-8900; Hitachi High-Tech Corporation, Tokyo, Japan)를 이용하여 이온교환 크로마토그래피 방식으로 분석하였다. 분석에는 이온교환 컬럼(#2622SC-PF; Hitachi High-Tech Corporation)을 사용하였으며, 반응 온도는 135°C, 시료 주입량은 500 µL, syringe 속도는 50 µL/s, 검출파장은 570 nm로 설정하였다. 분석 시약으로는 완충용액(buffer for biological fluid; PF-1, PF-2, PF-3, PF-4 및 PF-RG), ninhydrin coloring solution set (R1 및 R2), high range amino acids mixture standard solution type B 및 type AN-II를 사용하였다.

통계 분석

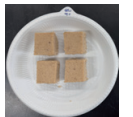
모든 실험은 3회 수행하였으며, 평균±표준편차로 표기하였다. 통계 분석은 GraphPad Prism software (version 10.4.2; GraphPad Software, LLC, San Diego, CA, USA)를 이용하여 실험 값의 평균값을 일원분산분석(one-way ANOVA) 후 Tukey's multiple comparison test를 이용해 P<0.05 수준으로 진행하였다. 또한 발효 클로렐라 미첨가구와 첨가구 간의 비교는 paired t-test를 이용하여 P<0.05 수준으로 분석하였다.

결과 및 고찰

TG 및 GDL 함량에 따른 조직대두단백 패티의 조직감

TG와 GDL 첨가에 따라 조직대두단백 패티의 texture 특성

Table 3. Texture analysis of TVP patties according to the addition levels of TG and GDL

Patty	TG 4.8 g	GDL 4.8 g	GDL 1.6 g+TG 4.8 g	GDL 4.8 g+TG 1.6 g	GDL 4.8 g+TG 4.8 g
Hardness 1 (kgf)	3.27±0.13 ^{ab}	2.63±0.31 ^b	2.55±0.04 ^b	4.33±0.59 ^a	2.95±0.35 ^b
Hardness 2 (kgf)	2.43±0.08 ^{ab}	1.76±0.18 ^b	1.83±0.02 ^b	3.07±0.44 ^a	2.07±0.21 ^b
Adhesiveness (mJ)	0.06±0.03 ^b	2.15±0.26 ^a	0.64±0.03 ^b	2.18±0.03 ^a	1.70±0.94 ^a
Springiness (mm)	4.42±0.07 ^{ab}	5.19±0.21 ^a	3.78±0.11 ^b	4.87±0.38 ^a	3.84±0.43 ^b
Cohesiveness	0.23±0.02 ^{bc}	0.29±0.02 ^a	0.22±0.01 ^c	0.26±0.01 ^{ab}	0.22±0.00 ^{bc}
Gumminess (kgf)	1.11±0.11 ^a	0.76±0.06 ^b	0.56±0.02 ^b	0.74±0.03 ^b	0.66±0.06 ^b
Chewiness (mJ)	52.69±2.84 ^a	38.49±1.53 ^b	20.69±1.20 ^d	32.08±0.57 ^{bc}	25.02±5.06 ^{cd}
Cutting force (kgf)	0.33±0.00 ^a	0.27±0.04 ^a	0.15±0.01 ^b	0.32±0.02 ^a	0.16±0.05 ^b
Visual appearance					

TVP, textured vegetable protein; TG, transglutaminase; GDL, glucono-δ-lactone; Hardness 1, hardness in the first compression cycle; Hardness 2, hardness in the second compression cycle. Hardness, gumminess, and cutting force values are presented in kilogram-force (kgf), the force unit directly output by the texture analyzer. All patty samples were uniformly cut to 20 mm×20 mm×15 mm (length×width×thickness). Values are expressed as mean±SD. Different lowercase letters within the same row indicate significant differences among samples (P<0.05). SD, standard deviation.

은 처리구별로 뚜렷한 차이를 보였다(Table 3). GDL 4.8 g+TG 1.6 g 처리구는 hardness와 cutting force에서 가장 높은 값을 나타내었고, springiness와 chewiness 또한 전체 처리구 중 상위 값의 수준을 나타내어, 조직감 지표를 조합하였을 때, 가장 균형 잡힌 조직 특성을 형성하는 것으로 확인되었다. 이는 GDL에 의해 형성된 산 응고성 gel network가 1차 구조 골격을 제공하고, 소량의 TG가 단백질 내 glutamine residue와 lysine residue 사이의 ϵ -(γ -glutamyl)lysine 결합을 촉진하여 추가적인 가교결합으로 network를 보강한 결과로 판단된다(Gaspar and de Góes-Favoni, 2015). 즉, GDL의 산 유도 겔화와 TG의 효소적 가교결합이 상호보완적 상승효과를 나타낸 것으로 해석할 수 있다.

GDL은 수용액에서 gluconic acid로 서서히 전환되어 매질의 pH를 대두단백의 등전점($pI \approx 4.5$) 부근까지 점진적으로 저하시키며, 이 과정에서 단백질 간 정전기적 반발력이 감소하고 소수성 상호작용이 강화되어 균일한 산 유도 겔(acid-induced gelation) 네트워크를 유도하는 것으로 알려져 있다(Campbell et al., 2009). 이후 TG는 glutamine 잔기와 lysine 잔기의 ϵ -amino기 사이에 ϵ -(γ -glutamyl)lysine 공유결합을 형성하여, 1차 겔 망상구조에 열·기계적 안정성이 높은 가교를 추가로 도입한다(Gaspar and de Góes-Favoni, 2015). 즉, GDL의 산 응고로 확보된 단백질 간 물리적 근접성 위에 TG의 효소적 가교가 순차적으로 진행되는 이중 겔화 기전(dual gelation mechanism)이 작동함으로써 두 결합체가 상호보완적 상승효과를 나타낸 것으로 해석된다. 다만 겔 망상구조 및 가교결합량을 직접 측정하지 않았으므로, 위 해석은 조직감 결과와 선행 문헌에 근거한 가능성으로 제시된 것이며, 이를 검증하기 위해서는 주사전자현미경(scanning electron microscopy)을 이용한 미세구조 관찰, 가교결합도 정량 및 sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis를 통한 단백질 분자량 분포 분석 등의 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. GDL 단독 처리구는 springiness와 cohesiveness가 가장 높게 나타났는데, 이는 산 응고성 gel network가 탄성 및 내부 결합성에 기여하였으나, hardness와 cutting force가 낮고 외관상 가장자리가 부스러지는 형태를 보여 충분한 지지체 형성을 위해서는 추가적인 가교결합체의 보강이 필요한 것으로 판단된다. 반면 TG 단독 처리구는 강한 가교결합으로 hardness와 chewiness가 높았으나, chewiness가 과도하게 높아 질긴 조직감을 나타낼 수 있으며, 매우 낮은 adhesiveness는 패티 내부의 결합성 부족으로 이어져 조리 시 형태 안정성에 부정적으로 작용할 수 있다.

두 결합제(TG, GDL)를 가장 높은 수준으로 첨가한 GDL 4.8 g+TG 4.8 g 처리구는 GDL 4.8 g+TG 1.6 g 처리구에 비해 hardness, cutting force 및 adhesiveness 등 대부분의 조직감 지표에서 상대적으로 낮은 값을 보였다. 두 처리구의 GDL 첨가량은 4.8 g으로 동일하여 산 유도 겔화에 의한 pH 저하 정도는 유사할 것으로 예상되므로, 두 처리구 간의 차이는 산성화 정도보다는 TG 첨가량 증가에 따른 과도한 효소적 가교결합에

기인한 것으로 판단된다. 즉, 산 응고가 진행되는 동안 과량의 TG가 동시에 작용할 경우 단백질이 국소적으로 급속히 가교되어 겔 네트워크가 불균일하게 형성될 수 있으며(Gaspar and de Góes-Favoni, 2015), 그 결과 조직의 연속성과 내부 결합성이 저하되었을 것으로 판단된다.

식물성 패티에서 결합제는 결합성 및 조직감 개선에 활용될 수 있으나, 그 효과는 첨가량과 조합비에 의존하는 것으로 보고된 바 있다(Lee and Hong, 2020; Kim et al., 2022). 따라서 GDL 4.8 g+TG 1.6 g 처리구가 GDL에 의한 산 응고성 gel network를 1차 구조로 하고 소량의 TG로 가교결합을 보강하는 것이 적절한 지지체 형성 전략으로 판단된다. 1차 실험에서 작용 기전이 상이한 두 결합제의 단독 및 혼합 첨가 조건에 따른 조직감 변화를 비교하여 FCP 첨가량에 적용할 결합제 조합을 선별하였다. 특히 GDL 4.8 g+TG 4.8 g 처리구의 hardness, cutting force 및 adhesiveness가 GDL 4.8 g+TG 1.6 g 처리구보다 낮게 나타난 결과는 결합제의 단순 증량이 반드시 조직감 형성으로 이어지는 것이 아닌, 적절한 비율 조합이 조직 형성에 결정적인 요인임을 시사한다. 이에 GDL 4.8 g+TG 1.6 g 조합을 후속 FCP 첨가 실험의 결합제 조건으로 선정하였다.

발효 클로렐라 첨가량에 따른 조직대두단백 패티의 조직감

발효 클로렐라 분말(FCP)의 첨가량에 따른 조직대두단백(TVP) 패티의 조직감 특성은 Table 4에 나타내었다. FCP 0%, 5% 및 10% 첨가구의 hardness는 각각 4.32, 4.82 및 4.36 kgf로 나타났으며, FCP 5% 첨가구에서 가장 높은 값을 보였다. Adhesiveness 역시 FCP 5% 첨가구에서 1.73 mJ로 가장 높았으며, FCP 0%와 10% 첨가구는 각각 0.61 및 0.58 mJ로 유사한 수준을 나타내었다. Springiness는 FCP 5% 첨가구에서 5.83 mm로 가장 높았고, FCP 0%와 10% 첨가구는 각각 3.78 및 4.14 mm로 나타났다.

Table 4. Texture analysis of TVP patties according to the addition levels of FCP

Patty	FCP 0%	FCP 5%	FCP 10%
Hardness 1 (kgf)	4.32±0.04 ^b	4.82±0.06 ^a	4.36±0.06 ^b
Hardness 2 (kgf)	1.26±0.38 ^a	1.38±0.15 ^a	1.36±0.13 ^a
Adhesiveness (mJ)	0.61±0.11 ^b	1.73±0.35 ^a	0.58±0.12 ^b
Springiness (mm)	3.78±0.30 ^b	5.83±0.94 ^a	4.14±0.18 ^b
Cohesiveness	0.23±0.01 ^c	0.47±0.01 ^a	0.33±0.02 ^b
Gumminess (kgf)	0.57±0.01 ^c	0.78±0.04 ^a	0.65±0.03 ^b
Chewiness (mJ)	21.44±1.67 ^b	38.11±5.19 ^a	28.47±2.12 ^b
Cutting force (kgf)	0.16±0.03 ^b	0.38±0.05 ^a	0.23±0.03 ^b

TVP, textured vegetable protein; FCP, fermented *Chlorella pyrenoidosa* extract powder. Values are expressed as mean±SD. Different lowercase letters within the same row indicate significant differences among samples ($P < 0.05$). SD, standard deviation.

Cohesiveness는 FCP 0%, 5% 및 10% 첨가구에서 각각 0.23, 0.47 및 0.33으로 측정되어, FCP 5% 첨가 시 패티 내부의 결합 성이 가장 크게 향상되는 경향을 보였다. Gumminess와 chewiness 또한 FCP 5% 첨가구에서 각각 0.78 kgf 및 38.11 mJ로 가장 높았으며, cutting force 역시 FCP 5% 첨가구에서 0.38 kgf로 가장 높은 값을 나타냈다. 반면 FCP 10% 첨가구는 FCP 5% 첨가구에 비해 대부분의 조직감 지표가 감소하였으나, cohesiveness, gumminess, chewiness 및 cutting force는 무첨가구보다 높은 값을 유지하였다.

이러한 결과는 적정 수준의 FCP 첨가가 TVP 패티의 조직 형성과 결합력 향상에 기여할 수 있음을 시사한다. FCP에는 클로렐라 유래 단백질, 식이섬유 및 발효 과정에서 생성된 저분자 성분이 포함되어 있을 가능성이 있으며, 이들 성분은 패티 제조 과정에서 수분 보유력과 단백질 매트릭스 형성에 영향을 줄 수 있다. 특히 FCP 5% 첨가구에서 hardness, springiness, cohesiveness, chewiness 및 cutting force가 모두 증가한 것은 FCP가 TVP와 분리대두단백(SPI) 기반 구조 내에서 충전재 또는 결합 보조 성분으로 작용하여 보다 조밀한 네트워크 형성을 유도했기 때문으로 판단된다(Marti-Quijal et al., 2019).

그러나 FCP 첨가량이 10%로 증가하면 조직감 개선 효과가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 감소 경향은 과도한 FCP 첨가가 TVP-SPI 단백질 매트릭스의 연속적인 구조 형성을 방해하거나, 클로렐라 세포벽 및 불용성 식이섬유가 단백질 간 결합을 물리적으로 저해했기 때문으로 사료된다(De Gol et al., 2023). 또한 FCP의 높은 고형분 함량이 수분 분포와 단백질 수화 특성을 저하시켰거나, 발효 유래 저분자 peptide 및 유리 아미노산이 단백질 간 상호작용을 약화시키는 가소화 현상이 나타났을 가능성도 배제할 수 없다(Ji et al., 2023). 위 해석은 하나의 가능성으로 제시된 것이며, 각 요인의 기여도를 규명하기 위해서는 보수력 측정 및 미세구조 관찰 등의 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 FCP 5% 첨가가 조직대두단백 패티의 물성 개선에 가장 효과적인 첨가 수준으로 판단된다.

발효 클로렐라 첨가량에 따른 조직대두단백 패티의 색도

FCP 첨가량에 따른 조직대두단백 패티의 색도 변화는 Table 5에 나타내었다. 명도를 나타내는 L^* 값은 FCP 0%, 5% 및 10% 첨가구에서 각각 73.70, 67.98 및 65.03으로 나타나, FCP 첨가량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 FCP 자체가 클로렐라 유래 색소 및 발효 유래 갈변 성분을 포함하고 있어 패티의 밝기를 감소시킨 것으로 판단된다.

적색도를 나타내는 a^* 값은 FCP 0%, 5% 및 10% 첨가구에서 각각 12.09, 12.21 및 12.62로 처리구 간 유의적인 차이는 나타나지 않았다($P>0.05$). 이는 FCP 첨가가 패티의 적색도에 미치는 영향은 제한적인 것으로 판단된다. 반면 황색도를 나타내는 b^* 값은 FCP 0% 첨가구에서 25.25였으나, FCP 5%와 10% 첨가구에서 각각 27.63 및 30.84로 증가하였다. 이는 FCP 첨가가 패티의 황색 또는 갈색 계열 색조를 강화하는 데 영향을 미쳤음을 의미한다.

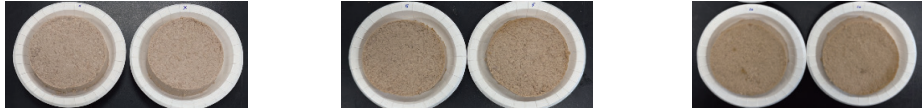
FCP 첨가에 따른 색도 변화는 클로렐라에 존재하는 chlorophyll, carotenoids 및 기타 색소 성분과 관련이 있는 것으로 판단된다. 클로렐라는 녹색 색소인 chlorophyll뿐만 아니라 lutein 등 carotenoid 계열 색소를 함유하고 있어 식품 매트릭스에 첨가될 경우 명도 감소와 황색도 증가를 유도할 수 있다(Gouveia et al., 2007).

외관상으로도 FCP 첨가량이 증가할수록 패티의 색은 무첨가구에 비해 더 진하고 황갈색에 가까운 색조를 보였다. 이러한 색 변화는 FCP가 기능성 소재로서 패티에 도입될 때 제품의 시각적 특성에 직접적인 영향을 줄 수 있음을 보여준다.

발효 클로렐라 첨가에 따른 조직대두단백 패티의 총 폴리페놀 함량 및 항산화 활성

발효 클로렐라 분말(FCP) 첨가유무에 따른 TVP 패티의 총 폴리페놀 함량 및 DPPH radical 소거능은 Fig. 1에 나타내었다. 총 폴리페놀 함량은 FCP 무첨가구에서 49.06 ± 2.48 mg GAE/100 g, FCP 5% 첨가구에서 67.84 ± 1.63 mg GAE/100 g으로 나타나, FCP 첨가에 의해 유의적으로 증가하였다($P<0.05$). DPPH radical 소거능 또한 FCP 무첨가구에서 28.74%, FCP 5% 첨가구에서 37.52%로 증가하여, FCP 첨가가 TVP 패티의 항산화활

Table 5. Color properties and visual appearances of TVP patties supplemented with FCP

Patty	FCP 0%	FCP 5%	FCP 10%
L^*	73.70±0.96 ^a	67.98±0.43 ^b	65.03±0.65 ^c
a^*	12.09±0.17 ^a	12.21±0.34 ^a	12.62±0.31 ^a
b^*	25.25±0.35 ^c	27.63±0.55 ^b	30.84±0.60 ^a
Visual appearance			

TVP, textured vegetable protein; L^* , lightness; a^* , redness; b^* , yellowness; FCP, fermented *Chlorella pyrenoidosa* extract powder. All patties were uniformly shaped using a cylindrical mold measuring 9.8 cm in diameter and 1.8 cm in height. Different lowercase letters within the same row indicate significant differences among samples ($P<0.05$). Values are expressed as mean±SD. SD, standard deviation.

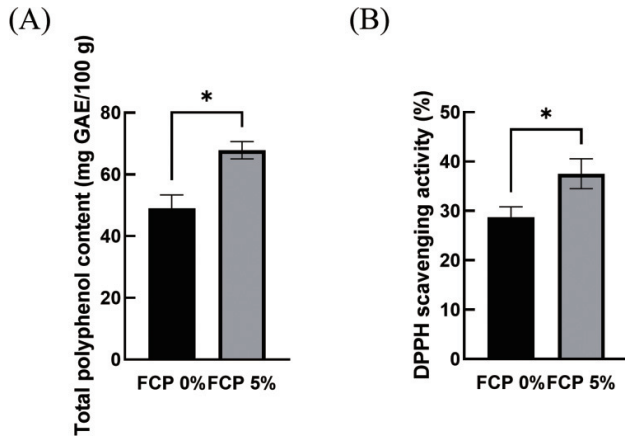


Fig. 1. Effects of fermented *Chlorella pyrenoidosa* extract powder addition on the antioxidant properties of textured vegetable protein patties. A, total polyphenol content; B, DPPH radical scavenging activity. Values are expressed as mean $\pm$ SD. *P<0.05. DPPH, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl; GAE, gallic acid equivalent; SD, standard deviation.

성 향상에 영향을 미친 것으로 판단된다.

FCP 첨가구에서 총 폴리페놀 함량이 증가한 것은 클로렐라에 함유된 항산화 관련 생리활성 성분이 패티에 보강되었기 때문으로 사료된다. 미세조류는 페놀 화합물, 색소 및 펩타이드 등 다양한 항산화 관련 성분을 함유하는 것으로 알려져 있으며, 특히 발효 과정은 세포벽 및 고분자 성분의 분해를 통해 폴리페놀 혹은 저분자 펩타이드의 용출을 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(Adebo and Medina-Meza, 2020; Coulombier et al., 2021). 실험에 사용한 FCP는 발효 후 상층액을 회수하여 분말화한 소재이므로, 발효 과정에서 생성되거나 용출된 수용성 항산화 성분이 상대적으로 포함되었을 가능성이 있다. 또한 실험에 사용된 FCP와 동일한 균주 및 배지 조건으로 제조된 발효 클로렐라는 발효 전 대비 총 폴리페놀 함량이 $9.34 \pm 0.37 \mu\text{M GAE/mL}$ 에서 $139.95 \pm 2.11 \mu\text{M GAE/mL}$ 로 약 15배 유의적으로 증가한 것으로 보고되어 있다(P<0.0001; Cho et al., 2026). 이러한 증가는 *B. amyloliquefaciens* MU2의 protease 및 세포벽 분해 작용에 의해 클로렐라 세포 내에 결합 형태로 존재하던 페놀 화합물이 유리·용출된 결과로 해석되며, FCP 첨가 패티에서 관찰된 총 폴리페놀 함량 증가 또한 이러한 발효 클로렐라 유래 폴리페놀의 유입이 반영된 결과로 판단된다.

DPPH radical 소거능의 증가는 총 폴리페놀 함량 증가와 관련된 것으로 판단된다. 일반적으로 페놀 화합물은 수산기를 통해 라디칼에 전자 또는 수소를 공여함으로써 항산화 활성을 나타내며, 식품 내 총 폴리페놀 함량은 DPPH radical 소거능과 밀접한 관련을 보이는 경우가 많다(Wojdyło et al., 2007; Leopoldini et al., 2011). FCP 5% 첨가구에서 총 폴리페놀 함량과 DPPH radical 소거능이 모두 유의적으로 증가한 결과는 FCP

유래 항산화 성분이 TVP 패티의 radical 소거능 향상에 기여한 것으로 판단된다.

따라서 FCP 5% 첨가는 TVP 패티의 총 폴리페놀 함량을 증가시키고, 이에 따라 DPPH radical 소거능을 향상시키는 효과를 나타낸 것으로 판단된다. 이는 FCP가 식물성 패티의 기능성을 개선할 수 있는 소재로 활용될 가능성을 보여준다.

발효 클로렐라 첨가에 따른 조직대두단백 패티의 유리 아미노산 함량

발효 클로렐라 분말(FCP) 첨가 유무에 따른 TVP 패티의 유리 아미노산 조성은 Table 6에 나타내었다. 개별 성분 중 arginine은 두 처리구 모두에서 가장 높은 함량을 보였으며, FCP 무첨가구와 FCP 5% 첨가구에서 각각 31.2 및 33.6 mg/100 g으로 나타났다. 또한 glutamic acid는 4.7 mg/100 g에서 13.0 mg/100 g으로, alanine은 1.8 mg/100 g에서 10.9 mg/100 g으로 크게 증가하였으며, aspartic acid, serine, cystine, isoleucine, leucine, phenylalanine, β -alanine, β -aminoisobutyric acid 및 proline도 FCP 첨가에 따라 유의적으로 증가하였다(P<0.05).

FCP 첨가구에서 유리 아미노산 함량이 증가한 것은 발효 클로렐라 분말 자체의 풍부한 아미노산에 의한 결과로 판단된다. 클로렐라는 glutamic acid, aspartic acid, alanine, glycine, leucine, lysine 및 arginine 등 다양한 아미노산을 함유하는 단백질 소재로 보고되어 있으며(Ursu et al., 2014), *Bacillus* 속 미생물은 단백질을 저분자 peptide 및 유리 아미노산으로 분해하여 수용성 질소화합물을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Kiers et al., 2000). 실험에 사용한 FCP는 발효 후 상층액을 회수하여 분말화한 소재로, 발효 과정에서 생성된 수용성 저분자 peptide 및 유리 아미노산이 상대적으로 포함되었을 것으로 판단된다. 따라서 FCP 첨가에 따른 유리 아미노산 함량의 증가는 발효 클로렐라 유래 아미노산의 유입 및 단백질 분해에 의해 생성된 저분자 질소화합물의 영향이 복합적으로 작용한 결과로 사료된다.

맛 특성과 관련하여 glutamic acid와 aspartic acid는 대표적인 감칠맛 관련 아미노산으로 알려져 있으며(Kawai et al., 2002), 두 성분의 합은 FCP 무첨가구 8.2 mg/100 g에서 FCP 5% 첨가구 19.0 mg/100 g으로 증가하였다. 또한 alanine, serine, threonine 및 proline과 같은 단맛 관련 아미노산도 FCP 첨가구에서 증가하였다(Kawai et al., 2012). 따라서 FCP 첨가에 의해 증가한 glutamic acid, aspartic acid, alanine 및 proline 등의 맛 관련 유리 아미노산은 TVP 패티의 풍미 특성 향상에 기여할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

한편, FCP 첨가구에서는 valine, isoleucine, leucine, phenylalanine, methionine, histidine 및 arginine과 같은 쓴맛 관련 아미노산도 함께 증가하였다. 이러한 아미노산은 식품 매트릭스 내 농도 및 다른 맛 성분과의 상호작용에 따라 쓴맛 또는 복합적인 후미에 영향을 줄 수 있다(Joo et al., 2022). Ammonia 함량 역시 FCP 무첨가구에서 7.0 mg/100 g, FCP 5% 첨가구에서

Table 6. Comparison of free amino acid composition in TVP patties formulated with or without FCP

Free amino acids and related compounds (mg/100 g)	FCP 0%	FCP 5%	Significance
Phosphoserine	0.8±0.1 ^b	4.2±0.1 ^a	***
Taurine	—	—	ns
Phosphoethanolamine	— ^b	1.0±0.1 ^a	**
Urea	—	—	ns
Aspartic acid	3.5±0.1 ^b	6.0±0.2 ^a	***
Threonine	0.1±0.0 ^b	0.7±0.1 ^a	**
Serine	0.3±0.1 ^b	1.9±0.1 ^a	***
Glutamic acid	4.7±0.2 ^b	13.0±0.3 ^a	***
Sarcosine	—	—	ns
Glycine	1.6±0.1 ^b	2.7±0.1 ^a	****
Alanine	1.8±0.1 ^b	10.9±0.3 ^a	***
Citrulline	0.2±0.1	0.6±0.1	ns
α-Amino- <i>n</i> -butyric acid	—	—	ns
Valine	0.9±0.1 ^b	1.8±0.1 ^a	**
Cystine	5.6±0.2 ^b	9.1±0.2 ^a	***
Methionine	0.3±0.1 ^b	1.3±0.1 ^a	**
Cystathionine	—	—	ns
Isoleucine	0.2±0.0 ^b	2.4±0.1 ^a	***
Leucine	0.4±0.1 ^b	1.8±0.1 ^a	***
Tyrosine	0.6±0.1 ^b	1.1±0.1 ^a	**
Phenylalanine	1.1±0.1 ^b	2.9±0.1 ^a	***
β-Alanine	0.5±0.1 ^b	3.4±0.1 ^a	***
β-Aminoisobutyric acid	0.1±0.0 ^b	7.9±0.2 ^a	***
γ-Amino- <i>n</i> -butyric acid	0.6±0.1	0.4±0.1	ns
Ethanolamine	—	—	ns
Ammonia	7.0±0.2 ^b	11.5±0.3 ^a	***
Hydroxylysine	—	—	ns
Ornithine	— ^b	0.4±0.1 ^a	**
Lysine	1.0±0.1 ^b	3.0±0.1 ^a	****
1-Methylhistidine	—	—	ns
Histidine	— ^b	0.7±0.1 ^a	**
3-Methylhistidine	—	—	ns
Anserine	—	—	ns
Carnosine	—	—	ns
Arginine	31.2±0.7 ^b	33.6±0.7 ^a	****
Hydroxyproline	0.3±0.1	0.3±0.1	ns
Proline	3.6±0.1 ^b	6.3±0.2 ^a	***

TVP, textured vegetable protein; FCP, fermented *Chlorella pyrenoidosa* extract powder; FCP 0%, without FCP; FCP 5%, with 5% FCP; ns, not significant; * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$; **** $P<0.0001$; —, not detected. Different letters within a row indicate significant differences. Values are expressed as mean±SD. SD, standard deviation.

11.5 mg/100 g으로 유의적으로 증가하였다($P<0.05$). 이는 발효 중 아미노산의 탈아미노화 또는 단백질 분해에 의해 생성된 질소화합물의 증가와 관련된 것으로 판단된다.

이상의 결과로 볼 때, FCP 5% 첨가는 TVP 패티의 유리 아미노산 함량을 증가시켰으며, 특히 glutamic acid, aspartic acid 및 alanine 등 맛 관련 아미노산의 증가를 통해 식물성 패티의 풍미 개선에 기여할 가능성이 있는 것으로 판단된다. 다만 식품의 맛은 유리 아미노산으로 결정되는 것이 아니라, 5'-nucleotide (IMP, GMP 등), 유리당, 유기산, 무기질 및 휘발성 향기성분들의 상호작용에 의해 복합적으로 형성되며, 특히 glutamic acid는 5'-nucleotide와 공존 시 감칠맛이 상승하는 것으로 알려져 있다(Fuke and Konosu, 1991). 따라서 유리 아미노산이 맛에 미치는 영향을 명확히 해석하기 위해서는 향후 묘사분석 또는 유리 아미노산 조성과의 관련 특성 간의 상관관계분석이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

발효 클로렐라 분말(FCP)의 첨가 수준에 따른 조직대두단백(TVP) 패티의 품질 특성을 평가하고, 식물성 대체육 소재로서 FCP의 활용 가능성을 검토하였다. 결착제 조합 실험에서는 GDL 4.8 g+TG 1.6 g 처리구가 조직감 지표 전반에서 균형 있는 특성을 나타내어 TVP 패티의 지지체 형성에 가장 적합한 조건으로 선정되었다. 이는 GDL에 의한 산 유도 gel network가 기본적인 구조 골격을 형성하고, 소량의 TG에 의한 효소적 가교결합이 이를 보강함으로써 두 결착제의 상호보완적 상승효과에 기인한 것으로 판단된다.

선정된 결착제 조건에서 FCP 첨가량에 따른 품질 특성을 비교한 결과, FCP 5% 첨가구가 대부분의 조직감 지표에서 가장 우수한 값을 나타냈으며, 색도에서 FCP 첨가량이 증가할수록 명도는 감소하고 황색도는 증가하여, FCP 첨가가 패티의 시각적 특성에 직접적인 영향을 미친 것으로 확인되었다.

특히 FCP 첨가구에서 총 폴리페놀 함량과 DPPH radical 소거능, 그리고 감칠맛 및 단맛 관련 아미노산이 유의적으로 증가하여 풍미 개선에 기여할 가능성을 보였다. 이러한 기능성 및 풍미 관련 지표의 향상은, 동일 균주 및 기질 조건에서 제조된 소재에서 발효 후 클로렐라의 조단백질, 총 폴리페놀, 총 유리 아미노산 및 항산화 활성이 발효 전 대비 유의적으로 증가하는 결과(Cho et al., 2026)에 부합하는 것으로, 소재 수준에서 검증된 발효의 효과가 패티에 이행된 것으로 사료된다.

종합적으로 TVP 기반 식물성 패티의 지지체 형성에 적합한 결착제 조건으로 GDL과 TG의 적절한 조합을 제시하였으며, 해당 조건에서 FCP 첨가가 조직감, 색도, 항산화 활성 및 유리 아미노산 조성 측면에서 가장 우수한 결과를 나타냄을 확인하였다. 이는 발효 클로렐라 분말이 식물성 대체육 패티의 물성 및 기능성을 동시에 개선할 수 있는 유망한 소재임을 시사한다. 다만 이화학적 품질 특성을 중심으로 평가가 이루어졌으며, 비발효 클로렐라를 동일 농도로 첨가한 패티 대조구를 설정하지 않아 패티 수준에서 발효 자체의 순 기여도와 클로렐라 성분의 단

순 첨가 효과를 정량적으로 분리하지 못한 한계를 지닌다. 따라서 향후 클로렐라 및 발효 클로렐라를 비교하는 실험 설계를 통해 발효 공정 자체의 기여도에 대한 정량적 규명이 필요하며, 정밀한 관능평가 및 저장 안정성 평가 등 추가 연구를 통해 FCP 첨가 TVP 패티의 산업적 활용 가능성을 보다 구체적으로 검증할 필요가 있다.

사 사

본 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2024년)에 의하여 연구되었음. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Adebo OA and Medina-Meza IG. 2020. Impact of fermentation on the phenolic compounds and antioxidant activity of whole cereal grains: A mini review. *Molecules* 25, 927. <https://doi.org/10.3390/molecules25040927>.
- Bito T, Okumura E, Fujishima M and Watanabe F. 2020. Potential of *Chlorella* as a dietary supplement to promote human health. *Nutrients* 12, 2524. <https://doi.org/10.3390/nu12092524>.
- Bouvard V, Loomis D, Guyton KZ, Grosse Y, Ghissassi FE, Benbrahim-Tallaa L, Guha N, Mattock H and Straif K. 2015. Carcinogenicity of consumption of red and processed meat. *Lancet Oncol* 16, 1599-1600. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(15\)00444-1](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(15)00444-1).
- Campbell LJ, Gu X, Dewar SJ and Euston SR. 2009. Effects of heat treatment and glucono- δ -lactone-induced acidification on characteristics of soy protein isolate. *Food Hydrocoll* 23, 344-351. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.03.004>.
- Cho KJ, Kim MU, Jeong GJ, Khan F, Jo DM and Kim YM. 2024. Optimization of protease treatment conditions for *Chlorella pyrenoidosa* protein extraction and investigation of its potential as an alternative protein source. *Foods* 13, 366. <https://doi.org/10.3390/foods13030366>.
- Cho KJ, Kim MU, Jeong GJ, Oh DK, Kang JH, Yoon DH, Khan F and Kim YM. 2025. Protein extraction from *Chlorella pyrenoidosa* using *Bacillus* spp. isolated from jeotgal: Strain isolation, characterization, and fermentation. *J Microbiol Biotechnol* 35, e2411070. <https://doi.org/10.4014/jmb.2411.11070>.
- Cho KJ, Kim MU, Kim DK, Jeong GJ, Jo DM, Park SK, Kim MJ, Kim YS and Kim YM. 2026. *Bacillus amyloliquefaciens* MU2 fermentation enhances protein extraction and sensory quality of *Chlorella pyrenoidosa*. *npj Sci Food*. <https://doi.org/10.1038/s41538-026-00949-7>.
- Cho SY, Kwon H, Park Y, Joo B, Cho M, Gu BJ and Ryu GH. 2023. Comparison of the quality characteristics of plant-based burger patties prepared using low- and high-moisture meat analogs. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 52, 1153-1159. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2023.52.11.1153>.
- Coulombier N, Jauffrais T and Lebouvier N. 2021. Antioxidant compounds from microalgae: A review. *Mar Drugs* 19, 549. <https://doi.org/10.3390/md19100549>.
- De Gol C, Snel S, Rodriguez Y and Beyrer M. 2023. Gelling capacity of cell-disrupted *Chlorella vulgaris* and its texture effect in extruded meat substitutes. *Food Struct* 37, 100332. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2023.100332>.
- Fuke S and Konosu S. 1991. Taste-active components in some foods: A review of Japanese research. *Physiol Behav* 49, 863-868. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(91\)90195-T](https://doi.org/10.1016/0031-9384(91)90195-T).
- Gaspar ALC and de Góes-Favoni SP. 2015. Action of microbial transglutaminase (MTGase) in the modification of food proteins: A review. *Food Chem* 171, 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.019>.
- Gouveia L, Batista AP, Miranda A, Empis J and Raymundo A. 2007. *Chlorella vulgaris* biomass used as colouring source in traditional butter cookies. *Innov Food Sci Emerg Technol* 8, 433-436. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.03.026>.
- Hildebrand G, Poojary MM, O'Donnell C, Lund MN, Garcia-Vaquero M and Tiwari BK. 2020. Ultrasound-assisted processing of *Chlorella vulgaris* for enhanced protein extraction. *J Appl Phycol* 32, 1709-1718. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02105-4>.
- Ji Y, Wang Z, Deng Q, Chen J, He Z, Zeng M, Qin F and Pan H. 2023. Soy protein hydrolysates affect the structural and mechanical properties of soy protein-wheat gluten extrudates using high moisture extrusion. *Foods* 12, 912. <https://doi.org/10.3390/foods12050912>.
- Joo ST, Choi JS, Hur SJ, Kim GD, Kim CJ, Lee EY, Bakhsh A and Hwang YH. 2022. A comparative study on the taste characteristics of satellite cell cultured meat derived from chicken and cattle muscles. *Food Sci Anim Resour* 42, 175-185. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2021.e72>.
- Joo SY and Choi HY. 2014. Antioxidant activity and quality characteristics of pork patties added with saltwort (*Salicornia herbacea* L.) powder. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 43, 1189-1196. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2014.43.8.1189>.
- Kawai M, Okiyama A and Ueda Y. 2002. Taste enhancements between various amino acids and IMP. *Chem Senses* 27, 739-745. <https://doi.org/10.1093/chemse/27.8.739>.
- Kawai M, Sekine-Hayakawa Y, Okiyama A and Ninomiya Y. 2012. Gustatory sensation of L- and D-amino acids in humans. *Amino Acids* 43, 2349-2358. <https://doi.org/10.1007/s00726-012-1315-x>.
- Kiers JL, Van Laeken AEA, Rombouts FM and Nout MJR. 2000. In vitro digestibility of *Bacillus* fermented soya bean. *Int J Food Microbiol* 60, 163-169. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00308-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00308-1).
- Kim H, Lee MY, Lee J, Jo YJ and Choi MJ. 2022. Effects of glucono- δ -lactone and transglutaminase on the physico-chemical and textural properties of plant-based meat patty.

- Foods 11, 3337. <https://doi.org/10.3390/foods11213337>.
- Kim JY, Hwang HJ and Shin KO. 2021. Development of an alternative meat patty using leghemoglobin extracted from soybean root nodules. *J East Asian Soc Diet Life* 31, 258-267. <https://doi.org/10.17495/easdl.2021.8.31.4.258>.
- Kumar R, Hegde AS, Sharma K, Parmar P and Srivatsan V. 2022. Microalgae as a sustainable source of edible proteins and bioactive peptides – current trends and future prospects. *Food Res Int* 157, 111338. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111338>.
- Lanzoni D, Skřivanová E, Rebucci R, Crotti A, Baldi A, Marchetti L and Giromini C. 2023. Total phenolic content and antioxidant activity of in vitro digested hemp-based products. *Foods* 12, 601. <https://doi.org/10.3390/foods12030601>.
- Lee EJ and Hong GP. 2020. Effects of microbial transglutaminase and alginate on the water-binding, textural and oil absorption properties of soy patties. *Food Sci Biotechnol* 29, 777-782. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00713-6>.
- Lee KH, Lee CY, Jang HB, Choi YS and Jang HW. 2023. A study on the quality characteristics of plant-based patties with *Tremella fuciformis*. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 52, 301-306. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2023.52.3.301>.
- Leopoldini M, Russo N and Toscano M. 2011. The molecular basis of working mechanism of natural polyphenolic antioxidants. *Food Chem* 125, 288-306. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.08.012>.
- Marti-Quijal FJ, Zamuz S, Tomašević I, Gómez B, Rocchetti G, Lucini L, Remize F, Barba FJ and Lorenzo JM. 2019. Influence of different sources of vegetable, whey and microalgae proteins on the physicochemical properties and amino acid profile of fresh pork sausages. *LWT* 110, 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.097>.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) and FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2025. OECD-FAO Agricultural Outlook 2025–2034. OECD Publishing, Paris, France and FAO, Rome, Italy. <https://doi.org/10.1787/601276cd-en>.
- Petrat-Melin B and Dam S. 2023. Textural and consumer-aided characterisation and acceptability of a hybrid meat and plant-based burger patty. *Foods* 12, 2246. <https://doi.org/10.3390/foods12112246>.
- Safi C, Zebib B, Merah O, Pontalier PY and Vaca-Garcia C. 2014. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 35, 265-278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.007>.
- Ursu AV, Marcati A, Sayd T, Sante-Lhoutellier V, Djelveh G and Michaud P. 2014. Extraction, fractionation and functional properties of proteins from the microalgae *Chlorella vulgaris*. *Bioresour Technol* 157, 134-139. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.071>.
- Wang CA, Onyeaka H, Miri T and Soltani F. 2024. *Chlorella vulgaris* as a food substitute: Applications and benefits in the food industry. *J Food Sci* 89, 8231-8247. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17529>.
- Weber S, Grande PM, Blank LM and Klose H. 2022. Insights into cell wall disintegration of *Chlorella vulgaris*. *PLoS One* 17, e0262500. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262500>.
- Wojdyło A, Oszmiański J and Czemerys R. 2007. Antioxidant activity and phenolic compounds in 32 selected herbs. *Food Chem* 105, 940-949. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.04.038>.