대체 식품 제조를 위한 소재 및 활용

조하란[1‡] · 한나라[2,3‡] · 백수현[1] · 이상길[3] · 배지은[2,3*]

[1]국립부경대학교 스마트그린기술융합공학과, [2]국립부경대학교 수산과학연구원 식품연구소,
[3]국립부경대학교 수산과학대학 식품영양학과

Materials and applications to produce alternative foods

Haran Jo[1†], Na-Ra Han[2,3†], Su Hyeon Baek[1], Sang-gil Lee[3], Ji-Eun Bae[2,3*]

[1]Department of Smart Green Technology Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea
[2]Institute of Food Science, Fisheries Science Research Organization, Pukyong National University, Busan 48513, Korea
[3]Department of Food Science and Nutrition, College of Fisheries Science, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Abstract

The global increase in population and the resulting surge in meat consumption have raised critical concerns related to food resource depletion, environmental pollution, animal welfare, and public health. In response, interest in alternative foods is growing, particularly in the development of ingredients that support both health and environmental sustainability. This review explores the major components used in alternative food production—proteins, carbohydrates, and fats—by examining their chemical properties, functional roles, and potential applications. Protein sources include plant-based, cultured cell-based, microbial, insect-derived, and marine algae-derived materials, offering nutritional alternatives to conventional animal products while promoting sustainability. Carbohydrates complement proteins by enhancing binding, gelation, texture, viscosity, and moisture retention, thereby improving the physical and sensory qualities of alternative foods. Fats are essential for replicating the flavor and mouthfeel of traditional foods, with various plant- and marine-based lipids employed to mimic these characteristics. By offering an integrated understanding of ingredient functionality and interactions, this review supports advancements in alternative food quality and scalability, contributing to the development of a healthier and more sustainable global food system.

Key words: alternative proteins, sustainable food systems, meat substitutes, plant-based foods

† 이 저자들은 본 논문에 공동 제1저자로 기여하였음

Ⅰ. 서론

지난 50년 동안 전 세계 육류 소비량은 급격히 증가하였고, 인구 증가에 따라 이 추세는 더욱 가속화될 것으로 예상된다. 국제연합(UN DESA, 2024)에 따르면, 전 세계 인구는 2024년 81억 명에서 2050년 96억 명, 2100년 101억 명에 이를 것으로 예측된다. 세계 인구 증가와 함께 경제력 상승과 빈곤층 감소로 인해 1인당 육류 소비는 인구 증가보다 더 빠르게 증가할 것으로 보인다(FAO, 2017). 현재 전 세계에서 인간이 섭취하는 단백질 중 약 25%는 축산물을 통해 공급되지만(그림 1), 축산업은 증가하는 단백질 수요를 충족시키기 어려운 상황에 처해 있다(Alexander 등, 2017; FAO, 2012). 가축 생산은 동물의 장내 발효로 인한 메탄가스 발생과 목초지 비료 사용으로 인한 아산화질소 배출 등을 유발하며, 이로 인해 온실가스가 배출된다. 축산업은 전 세계 온실가스 배출량의 12-15%를 차지하며, 이는 모든 식품군 중에서 가장 높은 비율을 기록하고 있어 환경오염에 대한 우려를 불러일으킨다(Li 등, 2024). 이러한 온실가스 배출 추세가 지속될 경우, 축산업뿐만 아니라, 농업 및 어업이 가능한 지역은 2050년까지 10% 이상 감소할 것으로 전망되며, 이는 식량 안보에 심각한 위협을 초래할 것이다(IPCC, 2023). 또한, 육류 생산은 동물 윤리 문제와 더불어 과도한 동물성 식품 섭취로 인한 비만 및 심혈관 질환 등의 건강 문제를 초래하고 있어 한계가 명확하게 드러나고 있다(Alexander 등, 2017). 축산업뿐만 아니라 어업의 경우에도 최근 몇 년 동안 해양 생태계의 악화와 함께 지구상의 90%에 달하는 어류 자원이 한계에 도달한 상태이다(FAO, 2020; Li 등, 2024). 이는 해양 생물 다양성에도 심각한 영향을 미치고 있다.

전 세계적으로 심화되는 식량 위기와 환경 문제에 대응하기 위한 미래 식량 자원 확보 기술 및 대체 식품의 필요성이 더욱 부각되고 있다. 이에 따라 영국 등에서는 대체 식품에 대한 투자를 통해 축산물 소비를 줄이려는 정책을 시도하고 있다. 대체 식품은 제품의 건강성을 향상시키고, 환경 지속 가능성을 강화하며, 친환경적이고 건강을 고려한 소비를 촉진한다. 예를 들어, 기존 소고기를 대체 식품으로 교체할 경우 약 95%의 온실가스를 절감할 수 있다는 연구 결과가 있다(Choi 등, 2022). 대체 단백질 소비는 2021년 연간 1,300만 톤에서 2035년까지 연간 9,700만 톤으로 증가할 것으로 예측된다(Morach 등, 2021). 또한, 미국의 대체 단백질 시장규모는 2023년 112억 달러(약 16조 원)에서 2034년 275억 달러(약 19조 원)로 성장할 것으로 예상된다(그림 2; Grand View Research, 2022). 그 중 '임파서블 푸드(Impossible Foods)'와 '비욘드 미트(Beyond Meat)'는 식물성 대체육의 대표적인 브랜드로 자리잡고 있다. 이들 제품은 고기와 유

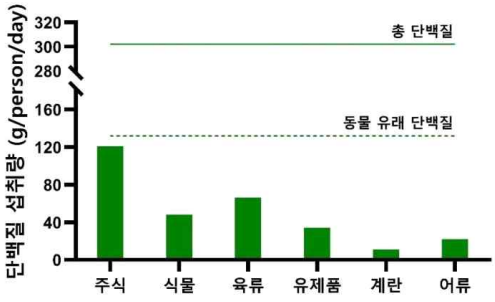


그림 1. 2021-2023 1일 1인당 평균 단백질 섭취량(FAO, 2012).

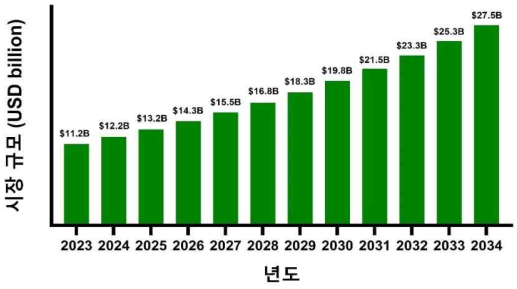


그림 2. 미국 대체 단백질 시장 규모 전망 (Grand View Research, 2022).

사한 맛과 질감을 제공하면서도 환경적으로 큰 장점이 있어, 지속 가능한 식품 생산에 대한 관심이 증가하는 현재, 큰 주목을 받고 있다. 또한, 한국에서도 대체 식품 시장이 빠르게 성장하고 있다. CJ제일제당의 '플랜테이블', 농심의 '베지가든', 동원F&B의 '마이플랜트' 등의 전문 브랜드가 대체 식품 시장에 진출했으며(표 1), 이들은 모두 환경 친화적인 생산 방식을 채택하여 소비자에게 건강하고 지속 가능한 식품을 제공하려고 노력하고 있다. 이러한 브랜드들은 소비자들의 관심을 끌고 있으며, 대체 식품의 다양성을 확장하고 있다. 대체 식품의 필요성과 잠재력을 인식한 식품 산업은 이 분야에서 중요성을 점차적으로 인정하고 있다.

대체 식품은 기존 식품을 대신하기 위해 새로운 원료나 제조 방법을 사용하여 해당 식품과 유사한 특성과 용도를 구현하는 것이 중요하다. 따라서 대체 식품의 제조에는 필요한 특성을 구현하기 위해 다양한 소재들이 활용된다. 특히 탄수화물, 단백질, 지방은 대체 식품 제조에서 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 대체 식품 제조에서 중요한 역할을 하는 탄수화물, 단백질, 지방 소재에 대해 자세히 소개하고, 각 소재들이 대체 식품의 영양적, 기능적 특성에 어떻게 기여하는지 설명하고자 한다. 이러한 소재에 대한 이해를 바탕으로, 대체 식품 제조를 통한 지속 가능한 미래 식품 시스템 구축에 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

Ⅱ. 본론

2.1. 단백질

단백질은 인간에게 필수적인 영양소로, 건강한 삶을 위해 반드시 섭취해야 하는 중요한 성분이다. 육류 및 어류와 같은 기존 단백질 식품의 지속 가능성에 대한 우려로 대체 단백질 소재에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 대체 단백질 소재들은 각기 다른 장점과 특성을 지니고 있으며, 지속 가능한 식품 생산을 위한 중요한 역할을 할 수 있다.

2.1.1. 식물성 단백 소재

현재 대체 단백질 시장에서 가장 널리 사용되는 핵심 원료는 식물성 단백 소재이다. 특히, 이 중 대두 단백질이 전체의 약 64%, 밀 글루텐이 약 20%를 차지한다(Kwon과 Kim, 2019). 식물 유래 단백질은 지속 가능성과 접근성 측면에서 많은 장점을 가지지만, 흙 냄새 및 풀 향 등 이취(off-flavor)로 인해 소비자 선호도가 낮은 것이 주요한 한계로 지적되고 있다. 이러한 식물성 단백 소재는 현대 기술과 결합되어 각종 향료 및 부재료의 첨가를 통해 풍미와 조직감을 육류와 유사하게 구현할 수 있다. 압출 성형기(extruder)를 이용해 고온·고압·전단력을 통해 제조한 조직화 식물성 단백(TVP, texturized vegetable protein)은 육류 섬유 조직의 구현에 우수한 기술로 많이 활용되고 있으며, 이외에도 전단셀(shear cell) 기술, 전기방사(electrospinning), 3D 프린팅 등 다양한 가공 기술들이 대체 식품 산업의 확장 가능성을 높이고 있다. 실제로 식물성 단백질을 중심으로 한 대체 단백질 시장은 급성장 중이며, 한국농촌경제연구원의 발표에 따르면 국내 시장도 2016년 약 640억 원에서 2026년 2,890억 원 규모로 성장할 것으로 예상된다.

대두 단백(Soybean protein). 대두는 인류가 가장 먼저 섭취한 식물성 단백질 공급원 중 하나이다. 대표적인 전통 단백질 식품인 두부(tofu)는 콩에서 단백질을 추출해 응고시킨 식품으로, 기원전 3세기 중국에서부터 식용으로 사용된 기록이 있다. 또한, 인도네시아의 전통 발효 식품인 템페(tempe)도 대두를 활용한 대체 식품이다. 대두 단백은 다양한 형태로 산업적으로 활용되고 있으며, 그 예로 콩가루(단백질 함량 약 50%), 농축대두단백(concentrated soybean protein, 단백질 함량 65-70%), 분리대두단백(isolated soybean protein, 단백질 함량 85-90%) 등이 있다(Cho, 2023a; Kwon과 Kim, 2019). 대두는 상업적 구매가용이하고 가격 경쟁력이 높아 대체 식품 생산에 널리

표 1. 국내외 식물성 대체육 제품의 유형 및 주요 원재료 정보

제품명	Beyond burger	Ultimate Plant-Based Chick'n Tenders	Plant-based TUNA	Plant-Based Burger
제조사	Beyond meat	Gardien	Wicked Kitchen	Lightlife
제품 유형	패티형	텐더형	참치형	패티형
제품 이미지				
주요 원재료	완두단백, 현미단백, 렌틸콩단백, 잠두콩단백, 메틸셀룰로오스, 감자전분, 완두전분, 아보카도 오일	밀글루텐, 대두단백, 완두단백, 밀가루, 타피오카전분, 밀전분, 메틸셀룰로오스, 잔탄검, 카놀라유, 해바라기유	완두단백, 대두단백, 잠두콩단백, 렌틸콩단백, 해조류 오일, 해바라기유	완두단백, 카놀라유, 코코넛 오일, 변형 셀룰로오스
제품 정보 출처	beyondmeat.com	gardein.com	wickedkitchen.com	lightlife.com
제품명	Plant-based Deli Slices (Roasted Turk'y)	Ultimate Plant-Based Crispy Breaded F'sh Filets	동원 마이플랜트 오리지널	동원참치 마이플랜트 오리지널
제조사	Tofurky	Gardien	동원F&B	동원F&B
제품 유형	슬라이스 햄형	필레형	통조림 햄형	통조림 참치형
제품 이미지				
주요 원재료	밀글루텐, 두부, 밀단백, 타피오카전분, 카라기난, 곤약, 아카시아검, 카놀라유	농축대두단백, 카놀라유, 밀가루, 감자전분, 타피오카전분, 밀 글루텐, 잔탄검, 대두유	대두단백, 카놀라유	대두단백, 밀글루텐, 귀리식이섬유, 쌀가루, 카놀라유
제품 정보 출처	tofurky.com	gardein.com	dongwonmall.com	dongwonmall.com
제품명	베지가든 후라이드 치킨	플랜테이블 미역국	언리미트 식물성 풀드바베큐 오리지널	Impossible® Beef From Plants
제조사	농심태경	CJ제일제당	지구인컴퍼니	Impossible Foods
제품 유형	프라이드 치킨형	고기 조각형	찢은 고기형	다진 고기형
제품 이미지				
주요 원재료	대두단백, 귀리식이섬유, 밀가루, 옥수수전분, 카놀라유, 팜유	밀글루텐, 대두단백, 해바라기씨유	대두단백, 밀단백, 밀전분, 옥수수전분, 대두유	대두단백, 해바라기유, 코코넛유, 변성 전분
제품 정보 출처	nongshimtk.com	cjthemarket.com	unlimeat.com	impossiblefoods.com

활용되는 주요 소재로 자리 잡고 있다. 대두 단백은 수분 흡수력, 겔 형성능, 유화성이 우수하여 다양한 제품에 응용된다. 또한, 지방을 끌어당기는 성질을 이용해 소시지와 같은 제품의 풍미를 향상시키는 데 기여하기도 한다(Fu 등, 2023). 대두 단백은 우육과 유사한 단백질 소화율-교정 아미노산가(protein digestibility-corrected amino acid score)를 보여 영양학적으로 고품질 단백질로 평가된다(Schaafsma, 2000). 이러한 특성 덕분에 대두 단백은 소시지, 햄버거 패티, 너겟 등 다양한 대체 식품 제조에 활용되고 있다. 예를 들어, 동원F&B의 '마이플랜트' 통조림 햄은 대두단백과 카놀라유를 혼합하여 제조되었으며, 농심의 '베지가든' 후라이드치킨과 동원참치의 '마이플랜트'도 대두 단백을 주 원료로 사용하고 있다(표 1). 하지만 대두 단백을 활용한 대체 식품은 기존 육류 및 어류 단백질 식품에 비해 관능적 기호가 낮고, 맛의 풍미 차이가 존재하여 오랫동안 '콩고기' 수준의 식품으로 인식되었다. 최근에는 가공 기술이 발전하여 기존 육류의 맛과 질감을 더욱 잘 구현할 수 있게 되었으나, 여전히 몇 가지 제한점이 존재한다. 대표적인 문제는 콩 특유의 비린내와 이취로 인한 관능적 기호성 저하, 트립신 억제제와 같은 항영양소의 존재로 인해 열처리가 필요하다는 점, 그리고 알레르기 유발 가능성과 유전자조작(GMO) 대두에 대한 소비자 거부감이 여전히 지속 가능한 소재로의 활용에 장애가 된다는 점이다. 또한, 한국은 대두를 수입에 의존하고 있어 GMO뿐만 아니라 안정적인 공급 확보 측면에서도 추가적인 고려가 필요하다(Fu 등, 2023).

밀 글루텐(Wheat gluten protein). 밀은 단백질 함량이 약 11-16%로, 단백질 함량이 높은 곡류 중 하나이며, 특히 점도, 신장성, 수분 흡수력, 유화성 등 우수한 기능성 특성을 지닌다. 이러한 밀의 기능성은 밀 단백질의 주요 성분인 글루텐에 기여하며, 글루텐은 글리아딘(gliadin)과 글루테닌(glutenin)으로 구성되어 열과 기계적 전단력에 반응해 가교 네트워크 구조를 형성하는 특징이 있다(Fu 등, 2023). 밀 글루텐은 주로 밀 전분 생산 후의 부산물로부터 얻어지며, 이는 경제적이면서도 산업적으로 효율적인 원료 공급을 가능케 한다. 글루텐 단백질 분자는 펩타이드 사슬에 소수성 아미노산이 다량 포함되어 있어 상당한 소수성 영역을 가지고 있으며, 이는 식품 내 다른 성분들과의 상호작용 및 조직화 과정에서 중요한 작용을 한다(Park, 2021). 밀 글루텐은 식물성 대체육에서 섬유질 구조를 형성하고, 점착성과 탄성 덕분에 결착제로 활용되어 대체육의 육질 재현에 기여한다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 글루텐 민감증과 같은 식이 제한 문제가 존재하며, 일부 소비자는 이를 기피하고 글루텐-프리(gluten-free) 트렌드에 따라 대체재를 선호한다.

대두 단백과 밀 글루텐 외에도, 완두 단백은 알레르기와 GMO 이슈가 적어 점차 많이 활용되는 소재로 주목받고 있다. 미국의 '비욘드미트(Beyond Meat)'는 완두 단백을 주요 단백질 원료로 사용해 제품을 생산하고 있다(표 1). 그러나 완두 단백은 가공 과정에서 손상되기 쉬우며, 겔 형성 능력이 낮다는 한계가 있다(Cho, 2023a). 또한, 감자, 쌀, 귀리, 녹두, 루핀 등 다양한 식물성 단백질 소재의 사용이 증가하고 있는 추세다.

2.1.2. 배양세포(Cultured Cells)

배양세포 기반 대체 식품은 동물과 어류로부터 직접 고기를 얻는 방식이 아닌, 동물의 줄기세포를 체외에서 증식 및 분화시켜 생산한 대체 식품이다. 이 기술은 조직공학과 생명공학을 융합한 기술로, 줄기세포가 자랄 수 있는 배양틀(지지체)과 배양액을 활용해 체외에서 근육 조직을 생성한다. 배양육 생산 과정은 다음과 같다: (1) 가축으로부터 근육줄기세포(또는 위성세포)를 채취하고, (2) 이를 세포배양기 또는 생물반응기에 넣어, (3) 지지체를 통해 증식 및 분화시킨다. 완성된 조직은 매우 얇은 근섬유층 형태로 배양되며, 이후 가공 과정을 거쳐 최종 식품 제품으로 제조된다(Bhat 등, 2014). 최근에는 배아줄기세포, 유도만능줄기세포, 섬

유아세포 등 다양한 세포를 활용하려는 연구도 진행 중이다. 초기 기술 도입 당시에는 햄버거 패티 한 개를 생산하는 데 약 32만 5천 달러가 소요되었으나, 최근에는 100 g당 약 8달러 수준으로 비용이 급격히 낮아졌다고 한다(Jeong과 Jo, 2018). 배양육은 동물의 생리적 유지에 필요한 장기나 면역계 등 부수적인 조직 없이 근육 세포만 배양하기 때문에 에너지 요구량이 적고, 성장 속도가 빠르며 소요 시간도 짧은 장점이 있다. 최근에는 3D 프린팅 기술을 활용해 조직 구조를 더 실제 고기처럼 재현하려는 시도도 이어지고 있다(Bhat 등, 2014; Jeong과 Jo, 2018).

하지만, 세포 증식에 필수적인 배양액은 초기에는 소 태아 혈청(fetal bovine serum; FBS)과 같은 동물 유래 성분에 크게 의존했으며, 이는 동물 자원의 사용과 윤리적 문제를 동반했다. 특히, FBS는 소 태아를 도축하여 채취되며, 대량 생산 시 도축 증가와 같은 윤리적 비판을 받는다. 이에 따라 새로운 배양액에 대한 연구가 진행 중이다. 예를 들어, 국내 '씨위드(Seaweed)' 기업에서는 해조류 유래 배양액을 활용하여 동물성 대체 배양액을 개발하고 있다. 배양액 외에도, 배양육의 환경적 지속 가능성에 대한 논란도 존재한다. 일부 연구에서는 온실가스 배출량이 기존 육류 생산보다 낮지 않거나 오히려 높을 수 있다는 비판이 제기되기도 했다(Lynch와 Pierrehumbert, 2019). 따라서 상용화를 위해서는 배양액의 동물성 대체, 에너지 효율 개선, 지속 가능한 생산 공정 구축 등의 기술적 과제가 남아 있다.

2.1.3. 마이코프로테인(Mycoprotein)

마이코프로테인은 단일세포 단백질(single cell protein, SCP)의 일종으로, 약 40여 년 전부터 식품 산업에서 사용되어 왔다. 이 단백질은 *Fusarium venenatum*과 같은 식용 사상균을 발효시켜 얻는다. 마이코프로테인은 콜레스테롤이 없고, 지방 함량이 낮으며, 약 2%의 식이섬유(키틴, β-글루칸 등)를 함유하고 있어 건강 지향 식품으로 주목받고 있다(Ahmad 등, 2022). 마이코프로테인은 일반적으로 포도당과 물을 기질로 사용하고, 칼슘, 마그네슘, 인산염 등을 첨가한 후 *F. venenatum*을 접종하여 발효시킨다. 이후 원심분리 및 건조 공정을 거쳐 반죽 형태의 바이오매스를 제조하고, 증기 처리, 냉각, 냉동 단계를 통해 근섬유와 유사한 식감과 구조를 형성한다(Jeong과 Jo, 2018). 최근에는 상업용 콩, 리그노셀룰로오스, 파인애플 폐기물 등 다양한 농업 부산물을 활용한 마이코프로테인 생산 시도가 활발히 이루어지고 있다(Ahmad 등, 2022).

현재까지 인간 섭취용으로 상업화에 성공한 마이코프로테인은 영국의 'Quorn'이 유일하며, 이는 다양한 식용 미생물 자원의 활용 가능성을 여는 중요한 사례로 평가된다(Amara와 El-Baky, 2023). Quorn은 1985년 영국 농림수산식품부(The Ministry of Agriculture, Fisheries and Food)로부터 판매 승인을 받았고, 2002년 미국 식품의약국(Food and Drug Administration)으로부터 GRAS (Generally Recognized As Safe) 인정을 받은 이후 미국 시장에 진출했다(Ahmad 등, 2022). 해당 회사의 제품은 난백을 결착제로 사용하고, 식물성 향신료를 첨가하여 닭가슴살, 스테이크, 소시지 등 다양한 형태로 판매되고 있다. 마이코프로테인는 전 세계적인 단백질 수요 증가에 대응할 지속가능한 단백질 공급원으로서 큰 잠재력을 지닌다. SCP의 특성상 마이코프로테인은 높은 생산성, 빠른 성장 속도, 계절성에 대한 독립적인 특성을 갖고 있어 산업적으로 활용 가능하다. 또한, 환경 지속 가능성 측면에서도 뛰어난 이점을 보인다(Amara와 El-Baky, 2023). 소고기 대비 이산화탄소 발생량, 물 사용량, 토지 사용량이 낮다. 탄소 발자국은 소고기보다 10배, 닭고기보다 4배 낮다. 물 발자국 역시 소고기보다 20배, 닭고기보다 6배 낮아, 기후 변화 대응 및 자원 절약형 식품 소재로 부각되고 있다(Cho, 2023a; Majumder 등, 2024). 기능적 측면에서도 마이코프로테인 바이오매스는 상업용 유청단백보다 표면장력이 낮고, 에멀전 내 작은 오일 방울 크기를 보이며 유화 및 발포 특성에서 우수한 계

면활성 성능을 보였다(Lonchamp 등, 2019). 생리적 기능성 역시 주목할 만하다. 마이코프로테인을 식단에 포함시키면 혈중 인슐린 수치와 장 운동 속도를 조절하는 소화 생리적 효과를 가져, 건강식 대체 단백질원으로서의 가능성을 제시한다. 그러나 미생물 독소 생성 가능성, 알레르기 유발 사례 등 해결해야 할 과제가 남아 있으며, 이에 대한 추가 연구와 규제 기반 마련이 필요하다(Ahmad 등, 2022; Amara와 El-Baky, 2023; Majumder 등, 2024).

2.1.4. 식용 곤충(Edible Insects)

곤충은 예전부터 민간요법과 약용으로 많이 사용되어 왔으며, 이에 대한 기록은 동의보감, 본초강목, 약용동물지 등에서 찾아볼 수 있다. UN 식량농업기구는 2013년에 식량위기를 경고하며, 그 대안으로 '식용 곤충'을 제시했으며(FAO, 2013), 고단백, 고영양의 미래형 대체 단백질 공급원으로 주목받고 있다. 국내에서도 2010년 곤충산업육성법을 시행하고, 2020년까지 시장 규모 5,000억 원 목표로 설정하는 등 정부 차원의 산업 기반이 마련되어 왔다. 이에 따라 곤충 자원을 신소득 작목으로 육성하고, 관련 연구 및 기능성 활용에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 전 세계적으로 일본, 벨기에, 프랑스 등에서도 곤충 사육 기술, 위생법, 식품화 표준 작업이 활발히 이루어지고 있다(Park과 Yun, 2018).

곤충은 단백질, 지방, 미량 영양소가 풍부하고, 온실가스 배출량과 자원 소비가 적어 환경 친화적인 식재료로 분류된다(Alexander 등, 2017; Cho, 2023a). 특히, 메뚜기류는 단백질 함량이 77%에 달하고, 기존 육류는 가식 부위가 40–55%인 반면, 귀뚜라미는 가식 부위 비율이 80%에 달하는 등 식용 곤충은 효율적인 식용 자원으로 주목 받고 있다. 또한, 곤충은 사육 면적이 작고 번식 속도가 빠르며, 소, 돼지, 닭 등 기존 가축에 비해 생산성과 지속 가능성이 매우 높다(Alexander 등, 2017). 국내에서는 2021년 기준으로 식약처에서 공식 식용 곤충 10종을 인정하고 있다. 메뚜기, 백강잠, 누에 유충, 번데기, 갈색거저리 유충(고소애), 쌍별 귀뚜라미, 흰점박이꽃무지 유충(꽃벵이), 장수풍뎅이 유충이 일반 원료로 인정되고 있으며, 아메리카 왕거저리 유충(탈지 분말), 수벌번데기, 풀무치는 한시인정원료로 포함된다. 이 중 누에 번데기는 레시틴과 티로신이 풍부하여 발육과 뇌 기능에 긍정적인 영향을 미치며, 흰점박이꽃무지 유충은 비타민 B 및 항산화 성분이 풍부하여 간 기능 개선 및 숙취 해소에 도움을 준다고 알려져 기능성 제품 개발에 활용되고 있다(국내 '보간해소' 및 '벵주야'). 갈색거저리 유충은 올레산이 풍부하고 항치매 효능이 보고된 바 있고, 대량사육시스템이 체계적으로 발달되어 이미 중국, 스위스, 네덜란드 등 여러 나라에서 식용으로 사용되고 있다(Kim 등, 2022; Park과 Yun, 2018). 갈색거저리 유충을 상업적으로 판매 중인 제품으로는 스위스의 'Essento insect burger'와 국내의 'Better 프로틴바'가 있다. 이처럼, 식용 곤충은 이미 단백질 보충용 식품 소재, 건강 기능 식품, 간편식 등으로 다양한 형태로 활용되고 있다.

하지만, 곤충은 외골격이 키틴에 포함되어 있어 난소화성 부위는 소화장애를 유발할 수 있어 섭취 시 전처리 또는 제거가 필요하고, 날개와 다리를 제거하고 섭취하도록 명시되어 있다. 식품 안전성 측면에서도 독성, 미생물 오염, 알레르기 반응, 중금속 잔류 등에 대한 정밀한 평가가 필요하다(Kim 등, 2022). 또한, 가공에 있어 겔화력, 유화성, 발포력 등 전통 축산물과는 다른 이화학적 특성을 가진다는 점에서 별도의 물리·화학적 가공기술 개발이 요구된다. 현재는 가열, 초고압, 방사선 조사, 플라즈마 처리 등을 통해 품질 개선 시도가 이루어지고 있다. 이 밖에도, 곤충 단백질의 소비자 수용성은 아직 제한적이다. 특히 서구권을 중심으로 곤충에 대한 기호성 부족 및 곤충 혐오증(entomophobia)이 식용화에 가장 큰 장애 요인으로 지적되었으나, 유럽과 북아메리카에서 곤충 농업 기술에 대한 상당한 투자 덕분에 2030년 43억 8천만 달러의 규모로 성장할 것으

로 예측되었다(Grand View Research, 2024).

2.1.5 조류 단백질(Algal Proteins)

조류 단백질은 거대 조류(macroalgae)와 미세조류(microalgae)에서 유래하며, 기존 육상 식물성 단백질과는 분자 구조 및 아미노산 서열에서 차별성을 가진 독특한 영양 및 기능적 특성을 보유하고 있다. 거대 조류 또는 해조류는 다세포로 이루어진 거시적인 조류를 말하며, 홍조류(*Rhodophyta*), 녹조류(*Chlorophyta*), 갈조류(*Phaeophyta*)로 분류된다. 품종에 따라 단백질 함량이 달라지며, 예를 들어 김은 건조 중량 기준 33-47%의 단백질 함량을 가져 대두와 유사하거나 더 높은 단백질 함량을 자랑한다(Cao 등, 2016). 또한, 조류 단백질은 아미노산 조성이 우수해 달걀 단백질과 유사한 품질을 보인다(Janssen 등, 2022; Li 등, 2024). 해조류는 고단백, 고기능성 생리활성 물질(카로티노이드, 페놀, 비타민 등)을 포함하고 있으며, 특유의 향미 성분과 감칠맛 펩타이드를 통해 대체 식품의 풍미를 강화할 수 있다(Baek 등, 2024; Fu 등, 2023). 미세조류는 크기가 50 m 이하의 단세포 생물로, 건조 중량 기준 최대 70%까지 단백질을 함유하는 품종이 있어 고단백 공급원으로 주목받고 있다. 그 중 스피루리나는 60-70%의 고단백 함량뿐만 아니라 저지방, 저탄수화물, 다양한 비타민과 미량 원소를 포함하고 있다(Janssen 등, 2022). 또한, 세포벽이 얇아 약 95%의 소화율을 보이며, 높은 생체 이용률을 자랑한다. 같은 면적에서 동물보다 더 많은 양의 단백질을 생산할 수 있어 효율적인 자원으로 평가된다(Fu 등, 2023).

이러한 다양한 이점과 잠재력 덕분에 조류 단백질은 단백질 격차(protein gap) 해소를 위한 유망한 공급원으로 주목받고 있으며, 인류의 필수 영양 요구를 충족하고 식품 시스템의 전환을 이끌 수 있는 고성능 자원으로 평가된다. 또한, 많은 동물 유래 식품에 비해 환경 발자국이 더 작다는 장점이 있다(Li 등, 2024). 글로벌 해조류 시장은 빠르게 성장하고 있으며, 2028년까지 약 54조 원 규모에 이를 것으로 예측된다. 미국 농무부(USDA)는 해조류 양식 산업에 약 50만 달러를 투자하고 있으며(World Bank, 2023), 한국은 해조류를 전략 수출 품목으로 육성 중이다. 이러한 산업 성장과 함께, 해조류는 지속 가능한 식품 단백질 공급원으로서 온실가스 배출 감소, 경작지 및 수자원 절감 등의 환경적 이점도 함께 제공할 수 있을 것이다.

그러나 조류 단백질에는 몇 가지 제약 요인도 존재한다. 조류는 특유의 색, 이취, 풍미로 인해 가공식품 원료로서 기호성을 저하시킬 수 있다. 거대 조류와 일부 미세조류는 견고하고 소화되지 않는 세포벽 성분 때문에 낮은 소화성과 단백질 추출 수율을 보인다. 이에 따라 최근에는 초음파, 고압 균질화, 펄스 전기장, 효소처리 등 다양한 추출 및 전처리 기술을 통해 해조류 단백질의 상업적 이용 가능성을 확대하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(Li 등, 2024). 또한, 최근 몇 년 동안 수질 오염으로 미세 플라스틱과 수은을 포함한 독성 물질로 오염되면서 건강 위험이 제기되고 있고, 핵산 함량이 높아 과잉 섭취 시 요산 증가 등의 건강 문제를 유발할 수 있다고 한다. 따라서 섭취량 조절이 필요하다는 제한점이 있다(Janssen 등, 2022).

2.2. 탄수화물

탄수화물은 대체 식품의 중요한 구성 요소로, 특히 단백 소재의 한계를 보완하는 역할을 한다. 많은 단백질 소재가 자체적인 결합력과 겔화력이 제한적이기 때문에, 이를 보완할 수 있는 탄수화물 소재의 활용이 중요하다. 다음은 대체 식품 제조에 주로 사용되는 탄수화물 소재에 대한 내용이다.

2.2.1. 카라기난(Carrageenan)

카라기난은 홍조류에서 유래한 황산화 다당류로, 기본적으로 4-결합 α-D-galactopyranose, 3-결합 β-D-glucopyranose, 그리고 3,6-anhydro-α-D-galactopyranose로 구성된 당 단위가 반복 결합하여 사슬

을 형성한다. 황산기 치환 정도와 위치에 따라 κ(카파)-, ι(아이오타)-, λ(람다)-카라기난으로 분류된다(BeMiller, 2018). 이러한 카라기난의 독특한 화학 구조와 물리적 특성 덕분에 다양한 기능성을 발휘한다. 특히, 수분 보유, 농후화(thickening), 겔화(gelling), 유화 안정성을 부여하는 능력이 뛰어나다(Palanisamy 등, 2018; Taghian Dinani 등, 2023).

카라기난의 이러한 특성은 대체 식품의 조직감과 수분 유지 능력을 개선하는 데 중요한 역할을 한다. Taghian Dinani 등(2023)은 고온전단가공 공정을 이용해 완두콩 단백질과 밀 글루텐 기반의 식물성 대체육을 제조하는 과정에서 ι-카라기난이 수분 보유력과 인장 강도를 증가시킨다고 보고하였다. 특히, 칼슘염($CaCl_2$)과 함께 적용할 경우, 고기 질감 재현을 위한 섬유질(fibrous) 구조 형성이 더욱 뚜렷해진다고 덧붙였다. 또한, Palanisamy 등(2018)은 농축대두단백에 ι-카라기난을 첨가하여 고수분 압출성형을 통해 대체육을 제조하였다. 높은 수분은 섬유질 구조 형성을 저해할 수 있으나, 카라기난의 농도 증가에 따라 제품의 섬유질 구조 형성을 향상시켜 단백질의 질감을 개선하는 데 중요한 역할을 했다고 밝혔다. 이렇듯, 카라기난은 대체 식품의 조직감 개선과 수분 유지에 중요한 역할을 하며 효과적인 기능성 소재로 활용될 수 있다.

2.2.2. 구아검(Guar Gum)

구아검은 구아콩(*Cyamopsis tetragonoloba*) 씨앗의 배유에서 추출한 수용성 비이온성 다당류로, 만노오스와 갈락토오스로 구성된 갈락토만난(galactomannan) 구조를 가진다. 구아검은 고분자 구조로 물과 빠르게 반응하여, 저농도에서도 높은 점도를 나타낸다. 이러한 특성 덕분에 구아검은 대체 식품 제조 시 안정제, 결합제, 지방 대체재 등의 기능성 소재로 적용되고 있다(BeMiller, 2018).

Dinani 등(2023)은 고온 전단 가공 공정을 적용한 식물성 대체육 제조에서 구아검이 섬유질 구조 형성과 특정 방향으로 배열된 구조 형성을 유도하여 육류의 결을 더욱 잘 재현할 수 있도록 한다고 보고했다. 또한, 고농도의 구아검 첨가는 갈변도(browning degree)를 증가시켜 제품의 외관과 조직감 개선에도 영향을 미쳤다고 밝혔다. Nanta 등(2021)은 분리대두단백을 기반으로 한 글루텐-프리 식물성 대체육에 구아검을 첨가할 경우 제품의 경도, 탄력성, 응집성이 증가함을 확인하였다. 또한, 구아검 6%와 잔탄검 1%를 혼합하여 사용하면 밀 글루텐을 대체할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 이 외에도 대체 식품의 조직감 및 저장성 개선에 기여한다는 연구 결과가 보고되었다(Tahmouzi 등, 2023). 그러나 구아검의 수분 보유력 증진이나 관능적 품질 향상과 같은 일부 기대 기능은 제한적으로 나타났으며, 특정 농도 이상에서는 과도한 점도로 인해 가공성이 저하될 수 있다는 점도 고려되어야 한다(Lei 등, 2022; Peèivová 등, 2014).

2.2.3. 잔탄검(Xanthan Gum)

잔탄검은 *Xanthomonas campestris* 균주에 의한 발효 과정에서 생성되는 이종 다당류(exopolysaccharide)로, 1,4-β-D-글루코오스 기반의 주사슬과 매 2개의 당마다 존재하는 측쇄(branch)의 구조로 이루어진 고분자 탄수화물이다. 이 측쇄는 만노오스와 글루쿠론산으로 구성되며, 아세틸기와 피루브산기가 결합된 특수한 구조를 가진다(BeMiller, 2018). 잔탄검은 낮은 농도에서도 매우 높은 점도를 나타내며, 수분을 포획하는 겔 네트워크를 형성한다. 또한, 단백질, 다른 친수성 콜로이드와의 상호작용 능력이 뛰어나 복합적인 점탄성 조절이 가능하다(Xu 등, 2013).

잔탄검은 대체 식품 제조 시 증점제, 수분 보유제, 안정화제뿐만 아니라, 색상 및 풍미 유지에도 활용될 수 있다(Demirci 등, 2014). 잔탄검을 첨가한 식물성 패티 제조에서, 잔탄검을 첨가한 그룹은 조리 후 수율이 증가한 것으로 확인되었다. 그러나 과도한 잔탄검 첨가는 과도한 수분 흡수로 인한 텍스처 약화를 가져왔

다(Han 등, 2023b). Dinani 등(2023)은 고온 전단 가공 공정을 이용해 대두 단백 기반의 식물성 대체육 제조 시 잔탄검을 추가하여 단백질 매트릭스 내 응집성을 증가시키고, 제품의 조직감과 섬유질 구조 형성을 향상시켰다고 보고하였다. 또한, 잔탄검과 구아검을 병용할 경우 단독 사용보다 더 높은 조직감과 감각 품질을 달성할 수 있어, 대체 식품 가공에서 하이드로콜로이드 간의 시너지 효과가 유효한 전략임을 시사한다(Murtaza 등, 2024). 잔탄검은 단독으로도 대체 식품의 점도 조절, 조직감 부여, 수분 보유력 향상 등에 기여할 수 있지만, 다른 하이드로콜로이드와의 복합 적용을 통해 보다 정교한 텍스처 조절이 가능할 것으로 기대된다.

2.2.4. 감자 전분(Potato Starch)

감자 전분은 주로 α-1,4 및 α-1,6 글루코시드 결합으로 이루어진 아밀로오스(amylose)와 아밀로펙틴(amylopectin)으로 구성된 고분자 탄수화물이며, 다른 전분에 비해 입자 크기가 크고 인산기를 가진다(BeMiller, 2018). 이러한 구조적 특성으로 감자 전분은 상대적으로 낮은 호화 온도(약 60-65℃)를 가지며, 우수한 수분 결합력과 팽윤력을 바탕으로 높은 점도와 투명한 겔 형성 능력을 나타낸다(BeMiller, 2018; Han 등, 2025). 감자 전분은 식물성 단백질과의 수소결합을 통해 제품의 조직 안정성 및 구조 밀도 향상에 기여하며(Han 등, 2025), 점탄성 부여 및 수분 결합 특성은 수분 보유력과 다즙성 개선에도 긍정적인 영향을 미친다(Baig 등, 2024).

이러한 특성 덕분에 감자 전분은 대체 식품에 널리 활용되고 있다. Oh 등(2024)의 연구에서 완두콩 단백질 기반 식품 잉크에 감자 전분을 첨가하였을 때, 전기적 반발력, 점탄성, 점도 회복성이 향상되며 연속적인 네트워크 구조 형성이 촉진되어 3D 프린팅 구조물의 적층 정밀도가 개선되었다고 보고하였다. Yun 등(2023)과 Han 등(2025)의 연구에 따르면, 감자전분은 전복 단백질이나 굴 단백질 기반의 3D 프린팅 잉크에 첨가되어 저장 탄성률(G′) 증가와 미세구조의 균일성 향상을 유도함으로써 조직 안정성과 출력물 구조 개선에 기여하였다. 특히, 감자전분의 농도 증가에 따라 점탄성과 인쇄성이 향상되는 반면, 과도한 첨가는 점도 상승으로 인해 유동성이 저하되는 경향이 보고되었다. 감자전분은 상업적 대체 식품에도 널리 활용되고 있다. 예를 들어, 국내 '삼육'의 채식 치킨너겟, 미국의 'Sophie's Kitchen'의 Vegan Fish Fillets 및 'Gardein'의 Fishless Fillets 등 다양한 대체 식품에서 감자 전분이 원료로 사용되고 있으며(표 1), 이는 감자전분이 대체 식품 가공에 있어 상업적으로도 기능성 소재로서의 상업적 가치를 입증하고 있음을 보여준다.

2.2.5. 곤약 글루코만난(Konjac Glucomannan, KGM)

곤약글루코만난은 곤약(*Amorphophallus konjac*)의 뿌리줄기에서 추출한 수용성 고분자 다당류로, β-1,4-글리코시드 결합으로 연결된 만노오스와 글루코오스로 구성되어 있다(BeMiller, 2018). 분자 사슬에 포함된 아세틸기(-$COCH_3$)는 KGM의 수분 보유력과 겔 형성 능력에 중요한 역할을 하며, 낮은 농도에서도 고점도를 발현할 수 있는 점증제로 작용한다. 이는 수소결합 등 다양한 분자 간 상호작용을 통해 겔 네트워크 형성을 가능하게 한다(Cui 등, 2022; Ran 등, 2022; Ran과 Yang, 2022). KGM으로 형성된 겔은 다양한 pH 및 이온 조건에서도 안정적인 물성을 유지하며, 열처리나 알칼리 환경 하에서도 강한 열가역적 겔을 형성할 수 있다. 또한, KGM은 다양한 단백질 및 다당류와 상호작용하여 복합 겔 시스템을 형성할 수 있어, 하이드로콜로이드 기반 구조 형성의 핵심 소재로 평가된다(Ran 등, 2022).

Zhang 등(2023)은 KGM이 근섬유 단백질과 혼합될 때, 다양한 농도에서 시너지 효과를 나타내며 겔의 탄성과 점도를 향상시킨다고 보고하였다. 특히, 특정 농도에서는 단백질과 다당류가 상호작용하여 안정적인 네트워크 구조가 형성되어 겔의 물리적 특성이 개선되

었다. 이러한 결과는 KGM이 단백질 기반 겔 시스템에서 물성 개선에 기여할 수 있음을 보여주며, 식물성 단백질을 포함한 다양한 단백질 매트릭스에서도 유사한 적용 가능성을 시사한다. 실제로, KGM은 식물성 단백질과의 상호작용에서도 유사한 구조적 기여를 하는 것으로 보고된 바 있다. 예를 들어, Cui 등(2023)은 KGM이 밀 단백질과의 상호작용을 통해 열처리 중 글루텐 네트워크의 형성과 안정성을 촉진하고, 반죽의 탄성 및 텍스처 특성을 향상시킨다고 보고하였다. 이는 KGM이 식물성 단백질 기반 제품의 구조적 품질 개선에 기여할 수 있음을 시사한다. 또한, Ran과 Yang (2022)은 대두 단백 기반 대체육 반죽에 KGM을 소량 첨가하여 겔 강도, 수분 유지력, 탄성을 향상시켰으며, 최종 제품의 저작 특성이 개선되었다고 보고하였다. 이러한 연구들은 KGM이 식물성 단백질과의 상호작용을 통해 점탄성 부여, 수분 유지, 조직감 개선 등 다양한 기능을 수행할 수 있음을 보여주며, 식물성 대체 식품 가공에 유효한 구조 개질 소재로서의 가능성을 뒷받침한다.

또한, Lv 등(2024)은 탈아세틸화(degree of deacetylation, DD) 정도가 다른 네 종류의 KGM을 이용하여, 식물성 대체육의 조직감, 소화율, 유변학적 특성 및 미세구조에 미치는 영향을 비교하였다. 그 결과, 부분적으로 탈아세틸화된 KGM (DD=80.01%)이 가장 우수한 물성 개선 효과를 나타냈으며, 단백질 네트워크 형성을 촉진하고 소화율을 향상시키는 것으로 보고되었다. 반면, 비탈아세틸화 KGM은 과도한 팽윤으로 인해 단백질 가교를 방해했으며, 고도로 탈아세틸화된 KGM (DD=89.07%)은 불용성 입자 형태로 존재하여 단백질 시스템 내에서 겔 형성에 불리한 특성을 보였다. 이러한 결과는 KGM이 탈아세틸화 정도를 조절함으로써 단백질과의 상호작용을 세밀하게 조정할 수 있는 기능성 소재임을 시사한다. 따라서 KGM을 대체 식품에 효과적으로 적용하기 위해서는 제품의 물성 요구에 맞는 적절한 탈아세틸화 수준을 선택하고, 단백질 유형 및 가공 조건과의 조합을 고려한 응용 전략이 필요하다.

2.3. 지방

대체 식품 제조에서 중요한 요소는 풍미와 식감을 구현하는 것이다. 특히 지방은 풍미와 식감에 큰 영향을 미친다. 이러한 이유로 대체 식품 제조에서 지방 유사체를 사용해 육류의 맛과 질감을 모사하려는 시도가 계속되고 있다. 이 과정에서 지방 소재는 단순히 물성을 구현하는 것에 그치지 않고, 제품의 영양학적 적합성, 지속 가능성, 그리고 소비자 건강 요구까지 고려해야 하는 중요한 역할을 한다.

2.3.1. 코코넛 오일(Coconut Oil)

코코넛 오일은 라우르산(lauric acid)을 비롯한 포화지방산이 풍부하여 실온에서 고체 상태로 존재하는 특성이 있다. 이는 소나 돼지 기름과 유사한 성질로, 코코넛 오일의 포화지방산이 고체 상태를 유지함으로써 대체 식품 제조에 물성적 이점을 제공한다(McClements과 Grossmann, 2021; Sha와 Xiong, 2020). 또한, 열 응력 하에서도 구조적 안정성을 유지하는 데 기여하며, 다양한 대체 식품에서 지방 대체 소재로 활용 가능성을 제시한다(Lam 등, 2020).

코코넛 오일은 동물성 지방과 유사한 질감과 구강 내 식감(mouthfeel)을 구현하기 위해 단독으로 사용되거나 카놀라유와 같은 액상 오일과 혼합하여 사용된다(McClements과 Grossmann, 2021; Sha와 Xiong, 2020). 식물성 고기 패티 제조 시, 코코넛 오일 기반 유화액을 지방 유사체로 적용한 연구에 따르면(Lee 등, 2023), 코코넛 오일이 대조군(땅콩 오일, MCT 오일)보다 조밀성, 표면 색상, 콩 이취에 대한 소비자 기호도를 보완하며, 경도, 검성, 씹힘성 등의 물성이 증가하고 조직감 개선에 기여하는 것으로 보고되었다. 또한, 코코넛 오일의 중쇄지방산은 조밀한 조직감과 향미 유지에 기여한다는 연구 결과도 제시되었다(Lee 등, 2020).

그러나, Lee 등(2020)에 따르면, 패티의 감각 평가에서 경도의 증가는 오히려 소비자 기호도를 낮출 수 있어 고체 지방인 코코넛 오일을 액체 식물 오일과 혼합하여 사용하는 경우가 많다(Hu와 McClements, 2022). 주요 대체육 기업도 이 방식을 채택하여 제품을 개발하고 있다. 미국의 '임파서블 푸드(Impossible Foods)'는 코코넛 오일과 해바라기유를 사용하고, 미국의 '라이트라이프(Lightlife)'는 코코넛 오일과 카놀라유의 혼합을 통해 대체육 제품의 육즙감 및 조직감 향상을 시도해 왔다(표 1).

하지만, 코코넛 오일의 중쇄 포화지방산을 과도하게 섭취할 경우 심혈관계 질환의 위험 인자로 작용할 수 있다는 역학적 근거가 존재하며(Eyres 등, 2016; Lu 등, 2024), 이로 인해 건강 지향적인 식물성 오일 소재를 모색하고 있다. 또한 영양학적으로 우려가 있는 코코넛 오일을 대체하기 위해 해바라기유 기반 올레오겔(Oleogel)을 사용한 지방유사체가 제시되었다(Flores Llovera 등, 2025). 이러한 변화에 맞추어, 대체육 제품 기업으로 유명한 '비욘드 미트(Beyond Meat)'는 기존의 코코넛 오일과 카놀라유 기반 조성을 탈피하여, 포화지방산 함량이 낮고 단일 불포화지방산이 풍부한 아보카도 오일을 주 지방원으로 사용하는 제품을 최근 출시하였다(표 1). 이처럼 단순히 육류의 물성과 맛을 구현하는 것을 넘어, 소재의 영양학적 적합성, 지속 가능성, 그리고 소비자 건강 요구까지 고려한 제품에 대한 고찰이 필요하다.

2.3.2. 팜유(Palm Oil)

팜유의 주요 지방산은 팔미트산(C16:0), 올레산(C18:1), 리놀레산(C18:2)으로, 포화지방산과 단일불포화지방산의 비율이 균형 있게 분포한 오일로 알려져 있다(Odia 등, 2015). 또한, 포화지방산이 풍부하여 산화안정성이 우수하며, 실온에서 반고체 상태로 존재하는 물리적 특성은 대체 식품에서 제품의 조직감과 형태 유지에 효과적으로 활용될 수 있다(Benković 등, 2023). 이러한 특성 덕분에, 팜유는 대체 식품의 고형 지방 원료로 활용되어 보존성과 육즙 특성을 개선하는 데 효과적이라는 결과가 보고되었다(Cho 등, 2023b). Youssef와 Barbut (2010)는 팜유와 소고기 지방의 물리화학적 특성이 유사하여 수분 손실에는 차이가 없다고 밝혔다. 또한, 에멀젼 형태로 가공하면 물성 조절이 용이하고, 다른 식물성 오일과 조합해 영양 균형과 조직감 개선을 동시에 달성할 수 있다는 연구도 있다(Nor Aini 등, 2005). Gu 등(2009)은 팜유가 대두 단백 기반 에멀젼 겔의 계면에서 단백질을 흡착해 높은 경도에 영향을 미친다고 밝혔다. 이처럼, 팜유는 다양한 형태로 가공 및 적용 가능하며, 대체 식품의 지방 구조 및 물성 개선을 위한 유망한 소재로 평가된다.

그러나 팜유는 생산 과정에서 환경적 지속 가능성에 대한 우려가 제기된다. 팜유의 주요 생산국인 인도네시아와 말레이시아 등지에서는 플랜테이션 확장을 위한 대규모 열대우림 벌채와 이로 인해 산림 생태계 파괴, 생물다양성 감소, 대기 중 온실가스 배출 증가 등의 문제가 지속적으로 발생하고 있다(Khatiwada 등, 2021; Ramdani와 Hino, 2013). 따라서 팜유는 대체 식품 적용 가능성이 있음에도 불구하고, 지속 가능성 확보를 위해 지속 가능한 팜유 협의체(Roundtable on Sustainable Palm Oil) 인증을 받은 친환경 원료의 사용이 요구된다.

2.3.3. 대두유(Soybean Oil)

대두유는 세계적으로 널리 소비되는 식물성 기름 중 하나로, 생산량이 높고 경제적인 소재로 평가받는다(Subroto 등, 2020). 이러한 특성으로 인해 대두유는 마가린, 마요네즈, 샐러드 드레싱 등 다양한 식품에 활용되며, 대체 식품에서도 지방 소재로 자주 사용된다. 대두유는 다불포화지방산, 특히 오메가-3 지방산인 리놀렌산과 오메가-6 지방산인 리놀레산이 풍부하여 염증 완화와 심혈관 질환 위험 감소에 도움이 되는 것으로 알려져 있다(Hu, 2003; Subroto 등, 2020). 이러한

영양학적 특성 덕분에, 국내 '지구인컴퍼니'는 대두유 기반 무콜레스테롤 대체육 제품을 상용화한 바 있다(표 1). 대두유는 실온에서 액상 형태로 존재하여, 압출 성형 대체육에 포함 시 단백질 구조의 유연성을 증가시키고 풍미를 향상시킬 수 있다. 그러나, 대두유가 조직 단백의 섬유질 구조 형성을 방해할 수 있다는 연구가 보고되었다(Zhang 등, 2024). 이처럼 대두유의 단독 사용은 고체 지방의 구조 모사가 어려워 동물성 지방의 물성을 구현하기 위해 오일 구조화 기술이 필요하다. 최근 연구에 따르면, 대두유를 활용하여 올레오겔 형태로 구조화하는 기술이 제시되었다(Han 등, 2023a; Teng과 Campanella, 2023). 이러한 구조화 기술은 물성학적 개선뿐만 아니라 대두유의 산화 안정성 문제를 해결하는 데에도 중요한 역할을 한다. 대두유는 산화 안정성이 낮아 보존성에 한계가 있으며(Subroto 등, 2020), 이로 인해 대체 식품 제조 시 항산화제나 보조 지질 성분이 필요하다. 최근에는 하이드록시프로필 메틸셀룰로스와 메틸셀룰로스를 활용한 대두유 기반 올레오겔 구조화 기술이 제시되었으며, 이는 다공성 겔 네트워크와 계면 장벽 구조에 의해 산화 안정성이 개선에 효과적이라고 보고되었다(Meng 등, 2018).

그럼에도 불구하고, 대두유는 '클린 라벨(Clean Label)' 요구에 부합하지 않는 소재로 분류되는 경우가 많다(Boukid, 2021). 대두유는 유전자변형작물(GMO)에 대한 우려와 유기용매(헥산)를 사용하는 정제 과정으로 인해 일부 소비자에게 부정적으로 인식될 수 있어 '클린 라벨' 구현에 제약이 된다(Cheng 등, 2018; Wunderlich와 Gatto, 2015). 이로 인해 주요 대체 식품 기업들은 대두유보다 산화 안정성이 높고 소비자 인식이 긍정적인 카놀라유, 해바라기유 등의 식물성 오일을 선호하는 경향을 보인다(표 1). 따라서 대두유는 대체 식품의 지방 소재로 활용 가능성이 있지만, 클린 라벨 요구와 산화 안정성 확보 등의 한계를 해결하기 위한 구조화 기술 및 보완 전략에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

2.3.4. 카놀라유(Canola Oil)

카놀라유는 단일불포화지방산과 α-리놀렌산이 균형 있게 포함된 저포화 지방으로, 식물성 기름 중 유화성 및 산화 안정성이 뛰어나다고 알려져 있다(Alejandre 등, 2019; Hu, 2003). 카놀라유는 대체 치즈의 제조에 사용되는 팜유를 대체하여 포화지방 함량을 낮추거나, 카놀라유 기반 하이드로겔을 활용해 소 지방 대체재로 사용되며, 이를 통해 포화지방의 양을 감소시키는 데 활용된다(Alejandre 등, 2019; Moon 등, 2021). 이러한 방향에 맞추어, 대체육의 지방을 전체 또는 일부 카놀라유로 대체하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, Selani 등(2016)은 카놀라유를 소 지방 대신 첨가한 버거가 실제 소고기 버거와 조리 손실에서 유의미한 차이가 없으며, 응집성과 탄력성이 향상되었다고 보고했다. 이는 카놀라유가 동물성 지방보다 작은 지방구를 형성하여, 오일 구형과 단백질의 아미노산 간의 소수성 상호작용을 강화시켜 매트릭스와의 결합력이 높아지고, 결과적으로 더 단단한 경도의 대체 식품을 형성할 수 있다고 설명했다(Benković 등, 2023; Youssef와 Barbut, 2010). 이 경향은 Barbut 등(2016)에서도 확인되었으며, 카놀라유는 육류 단백질 기질 내에서 미세한 지방 구형을 형성해 경도를 증가시키고, 구조화된 지방 유사체는 동물성 지방과 유사한 미세구조 및 물성학적 특징(응집성, 씹힘성 등)을 구현할 수 있음을 나타냈다. 이러한 특성 덕분에, 단순히 액상 오일 형태로 사용되는 것뿐만 아니라, 하이드로겔 또는 단백질 소재와 통합하여 구조화된 지방 형태로 첨가하는 연구도 활발히 진행되고 있다(Dreher 등, 2020).

또한, 카놀라유는 '클린 라벨' 요구를 충족하는 소재로 소비자의 선호도가 높으며(Boukid, 2021), 이에 따라 미국의 'Gardien', 국내 '동원F&B'와 '농심' 등 여러 대체 식품 제조 업체에서 주요 지방 원료로 사용하고 있다(표 1). 이러한 특성 덕분에, 카놀라유는 대체

식품에서의 활용 가능성이 높으며, 지속 가능한 대체 식품 개발을 위한 유망한 원료로 평가된다.

2.3.5. 조류 오일(Algae Oil)

조류는 담수와 해양을 포함한 다양한 수생 환경에서 서식하는 광합성 다세포 또는 단세포 생물로, 김, 파래, 클로렐라, 스피루리나 등이 대표적인 종으로 알려져 있다(El-Sheekh와 Abomohra, 2021). 이러한 조류는 총 지방산 조성 중 오메가-3 지방산(DHA, EPA 등)을 풍부하게 함유한 기능성 지질원으로, 대체 식품의 지방 소재로서 활용 가능성이 높은 소재로 평가받고 있다(Doughman 등, 2007). 특히, 식물성 오일에 부족한 필수 지방산을 충족할 수 있는 대체 소재로 주목받고 있다(Zhu 등, 2024). 또한, 미세조류는 폐쇄형 배양 시스템 등을 통해 안정적인 대량 생산이 가능하여 지속 가능한 공급원으로 인정받고 있다(Koyande 등, 2019; Sun 등, 2022). 실제로 Wicked Kitchen사는 식물성 참치 제품에 해조류 오일을 주요 지질원으로 적용하며 비GMO 제품을 상용화한 사례가 보고된 바 있다(표 1).

그러나, 조류의 총 지질 함량은 일반적으로 건조 중량 기준 20wt% 이하로 보고되고 있다(Becker, 2007; Zhu 등, 2024). 반면, 실제 육류의 지방 함량은 약 4-36% 수준(한우육; 5.25-35.94%, 돈육; 4.16-18.47%)이며, 대체육 제조 시에도 약 10-30% 정도의 지방 함량이 되도록 배합한다(Cho 등, 2023b; Jang 등, 2017; Lee 등, 2023). 이에 따라, 미세조류의 지방 추출 수율을 극대화하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, Breuer 등(2012)은 질소 결핍 조건을 유도하여 미세조류의 총 지방산 함량을 건조 중량 기준 43-46wt%까지 증가시키는 연구를 수행한 바 있다. 이에, 최근에는 식물성 오일과의 혼합을 통해 지방산 조성의 균형을 맞추고, 총지방 함량을 보완하고자 하는 접근이 제시되고 있다(Zhu 등, 2024).

그러나 유기용매를 활용한 오일 추출 방식은 가연성 및 독성 등 안정성 문제와 조류 기반 오일 특유의 이취로 인해 식품 원료로서 활용에 한계가 있다(Mercer와 Armenta, 2011; Sun 등, 2022). 따라서 조류 오일은 건강 기능성 부여, 식품 안정성 확보, 지속 가능성 측면에서 대체 식품 산업의 유망한 차세대 지질 소재로 활용되기 위해 다양한 기술적 제약을 극복하는 연구가 필요하다.

Ⅲ. 결론

대체 식품은 전 세계적인 식량 위기와 환경 문제에 대응하는 중요한 대안으로 떠오르고 있다. 대체 식품은 단백질, 탄수화물, 지방 등 다양한 원재료가 균형을 이루어 식감과 풍미를 구현한 식품으로, 소비자의 기호와 영양 요구를 충족시키는 방향으로 지속적으로 발전할 것이다. 이를 위해서는 각 원재료의 기능적 특성과 관능적 특성을 이해하고, 이를 바탕으로 최적화된 대체 식품을 개발하는 것이 필요하다. 하지만, 원재료를 혼합하여 사용할 경우 그 특성이 달라질 수 있기 때문에 추가적인 연구가 필요하며, 현재까지도 꾸준하게 새로운 단백질, 탄수화물, 지방 소재가 개발되고 있는 상황이므로 최신 정보를 지속적으로 수집하는 것이 중요하다. 이러한 정보는 원재료와 기술을 융합하여 더 나은 영양 가치, 환경적 지속 가능성, 소비자 만족도를 제공하는 대체 식품을 개발하는 것은 지속 가능한 식품 시스템 구출을 위한 핵심적인 열쇠가 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 부경대학교 연구비 지원을 받아 수행되었음 (202404770001).

참고문헌

Ahmad MI, Farooq S, Alhamoud Y, Li C, Zhang H. A review on mycoprotein: History, nutritional composition, production methods, and health benefits. Trends Food

Sci Technol, 121, 14-29 (2022)
Alejandre M, Astiasarán I, Ansorena D, Barbut S. Using canola oil hydrogels and organogels to reduce saturated animal fat in meat batters. Food Res Int, 122, 129-136 (2019)
Alexander P, Brown C, Arneth A, Dias C, Finnigan J, Moran D, Rounsevell MD. Could consumption of insects, cultured meat or imitation meat reduce global agricultural land use?. Glob Food Sec, 15, 22-32 (2017)
Amara AA, El-Baky, NA. Fungi as a source of edible proteins and animal feed. J Fungi, 9(1), 73 (2023)
Baek S, Bae JE, Miao Y, Kim G, Ryu B, Lee BH, Lee S. Optimized extraction of sargahydroquinoic acid, major bioactive substance, from sargassum yezoense using response surface methodology. Mar Drugs, 22(12), 543 (2024)
Baig MA, Mostafa H, Sivapragasam N, Aslam R, Zhou W, Maqsood S. Investigating the role of starch in the structuring of meat alternatives from mung bean and pea protein isolates via heat-induced gelation. Front Sustain Food Syst, 8, 1473663 (2024)
Barbut S, Wood J, Marangoni A. Potential use of organogels to replace animal fat in comminuted meat products. Meat Sci, 122, 155-162 (2016)
Becker EW. Micro-algae as a source of protein. Biotechnol Adv, 25(2), 207–210 (2007)
BeMiller JN. Carbohydrate chemistry for food scientists. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press (2018)
Benković M, Jurinjak Tušek A, Sokač Cvetnić T, Jurina T, Valinger D, Gajdoš Kljusurić J. An overview of ingredients used for plant-based meat analogue production and their influence on structural and textural properties of the final product. Gels, 9(12), 921 (2023)
Bhat ZF, Bhat H, Pathak V. Prospects for *in vitro* cultured meat–a future harvest. In Principles of tissue engineering (Fourth Edition), Academic Press, 1663-1683 (2014)
Boukid F. Plant-based meat analogues: From niche to mainstream. Eur Food Res Technol, 247, 297-308 (2021)
Breuer G, Lamers PP, Martens DE, Draaisma RB, Wijffels RH. The impact of nitrogen starvation on the dynamics of triacylglycerol accumulation in nine microalgae strains. Bioresour Technol, 124, 217-226 (2012)
Cao J, Wang J, Wang S, Xu X. Porphyra species: a mini-review of its pharmacological and nutritional properties. J Med Food, 19(2), 111-119 (2016)
Cheng MH, Sekhon JJ, Rosentrater KA., Wang T, Jung S, Johnson LA. Environmental impact assessment of soybean oil production: Extruding-expelling process, hexane extraction and aqueous extraction. Food Bioprod Process, 108, 58-68 (2018)
Cho SJ. Materials and technologies for manufacturing alternative protein foods. Food Sci Indus, 56(3), 175-185 (2023a)
Cho Y, Bae J, Lee J, Choi MJ. Storage stability of meat analogs supplemented with vegetable oils. Foods, 12(19), 3586 (2023b)
Choi Y, Park G, Nam JJ. Effect of alternative protein food market growth on greenhouse

gas emissions in livestock sector. J Climate Change Res, 13(3), 299-304 (2022)
Cui T, Zhou X, Sui W, Liu R, Wu T, Wang S, Jin U, Zhang M. Effects of thermal-induced konjac glucomannan-protein interaction on structural and rheological properties of wheat dough. Food Struct, 33, 100288 (2022)
Demirci ZO, Yılmaz I, Demirci AŞ. Effects of xanthan, guar, carrageenan and locust bean gum addition on physical, chemical and sensory properties of meatballs. J Food Sci Technol, 51, 936-942 (2014)
Dinani ST, Broekema NL, Boom R, van der Goot AJ. Investigation potential of hydrocolloids in meat analogue preparation. Food Hydrocoll, 135, 108199 (2023)
Doughman SD, Krupanidhi S, Sanjeevi CB. Omega-3 fatty acids for nutrition and medicine: Considering microalgae oil as a vegetarian source of EPA and DHA. Curr Diabetes Rev, 3(3), 198-203 (2007)
Dreher J, Blach C, Terjung N, Gibis M, Weiss J. Formation and characterization of plant-based emulsified and crosslinked fat crystal networks to mimic animal fat tissue. J Food Sci, 85(2), 421-430 (2020)
El-Sheekh M, Abomohra AEF. (Eds.). Handbook of algal biofuels: Aspects of cultivation, conversion, and biorefinery. Elsevier (2021)
Eyres L, Eyres MF, Chisholm A, Brown RC. Coconut oil consumption and cardiovascular risk factors in humans. Nutr Rev, 74(4), 267-280 (2016)
FAO. Edible insects: Future prospects for food and feed security. Report of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (2013)
FAO. Livestock and Landscapes. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2012)
FAO. The future of food and agriculture –Trends and challenges. Report of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (2017)
FAO. The state of world fisheries and aquaculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020)
Flores Llovera M, Belloch C, Salvador A. Sunflower oil oleogels as alternative fat in hybrid meat patties. J Agric Food Res, 19, 101728 (2025)
Fu Q, Zhao J, Rong S, Han Y, Liu F, Chu Q, Wang S, Chen S. Research advances in plant protein-based products: Protein sources, processing technology, and food applications. J Agric Food Chem, 71(42), 15429-15444 (2023)
Grand View Research. Edible Insects Market Size, Share & Growth Report, 2030 (2024)
Grand View Research. Protein Supplements Market Size and Share Report, 2030 (2022)
Gu X, Campbell LJ, Euston SR. Effects of different oils on the properties of soy protein isolate emulsions and gels. Food Res Int, 42(8), 925-932 (2009)
Han C, Wang G, Guo J, Wang J, Yang X. Oral oil release improves lubrication and sensory properties of meat analogs with protein-stabilized oleogel. Food Hydrocoll, 142, 108788 (2023a)

Han JH, Keum DH, Hong SJ, Kim YJ, Han SG. Comparative evaluation of polysaccharide binders on the quality characteristics of plant-based patties. Foods, 12(20), 3731 (2023b)

Han NR, Bae JE, An HW, Yun HJ, Retnoaji B, Lee S, Lee SG. Influence of potato starch on the 3d printing of senior-friendly foods enriched with oyster powder. LWT – Food Sci Technol, 224, 117886 (2025)

Hu FB. Plant-based foods and prevention of cardiovascular disease: An overview. Am J Clin Nutr, 78(3), 544S-551S (2003)

Hu X, McClements DJ. Development of plant-based adipose tissue analogs: Freeze-thaw and cooking stability of high internal phase emulsions and gelled emulsions. Foods, 11(24), 3996 (2022)

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and IIIto the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 35-115 (2023)

Jang HL, Park SY, Lee JH, Hwang MJ, Choi YM, Kim SN, Kim JH, Hwang JB, Seo DW, Nam JS. Comparison of fat content and fatty acid composition in different parts of Korean beef and pork. J Korean Soc Food Sci Nutr, 46(6), 703-712 (2017)

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

Jeong JY, Jo C. The application of meat alternatives and ingredients for meat and processed meat industry. Food Sci Anim Resour Indus, 7(1), 2-11 (2018)

Khatiwada D, Palmén C, Silveira S. Evaluating the palm oil demand in Indonesia: Production trends, yields, and emerging issues. Biofuels, 12(2), 135-147 (2021)

Kim TK, Kim YJ, Cha JY, Shin DM, Lee JH, Kang MC, Choi YS. Current states and future prospects of edible insects in food tech industry. Food Indus Nutr, 27(2), 1-7 (2022)

Koyande AK, Chew KW, Rambabu K, Tao Y, Chu DT, Show PL. Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans. Food Sci Hum Wellness, 8(1), 16-24 (2019)

Kwon T, Kim Y. Food technology trends with alternative proteins. Food Indus Nutr, 24(2), 7-14 (2019)

Lam HY, Roy PK, Chattopadhyay S. Thermal degradation in edible oils by surface enhanced Raman spectroscopy calibrated with iodine values. Vib Spectrosc, 106, 103018 (2020)

Lee J, Kim H, Choi MJ, Cho Y. Improved physicochemical properties of pork patty supplemented with oil-in-water nanoemulsion. Food Sci Anim Resour, 40(2), 262 (2020)

Lee J, Song H, Seo KH, Lee HG, Kim H, Choi MJ. Physicochemical and sensory properties of plant-based meat patties using oil-in-water emulsion. Food Biosci, 56, 103084 (2023)

Lei Y, Zhao X, Li D, Wang L, Wang Y. Effects of κ-carrageenan and guar gum on the

rheological properties and microstructure of phycocyanin gel. Foods, 11, 734 (2022)
Li Y, Xiang N, Zhu Y, Yang M, Shi C, Tang Y, Sun W, Sheng K, Liu D, Zhang X. Blue source-based food alternative proteins: Exploring aquatic plant-based and cell-based sources for sustainable nutrition. Trends Food Sci Technol, 147, 104439 (2024)
Lonchamp J, Clegg PS, Euston SR. Foaming, emulsifying and rheological properties of extracts from a co-product of the Quorn fermentation process. Eur Food Res Technol, 245, 1825-1839 (2019)
Lu Y, Zhang Y, Wang S. From palm to plate: Unveiling the potential of coconut as a plant-based food alternative. J Agric Food Chem, 72(27), 15058-15076 (2024)
Lv Y, Zhang M, He X, Du F, Xiao Y, Wang J, Xin Y, Yang Y. Impact of konjac glucomannan with varied deacetylation degrees on plant-based meat analogue: Study on the gel properties, digestibility, and microstructure. Int J Biol Macromol, 277, 134377 (2024)
Lynch J, Pierrehumbert R. Climate impacts of cultured meat and beef cattle. Front Sustain Food Syst, 3, 421491 (2019)
Majumder R, Miatur S, Saha A, Hossain S. Mycoprotein: Production and nutritional aspects: A review. Sustain Food Technol, 2(1), 81-91 (2024)
McClements DJ, Grossmann L. The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs. Compr Rev Food Sci Food Saf, 20(4), 4049-4100 (2021)
Meng Z, Qi K, Guo Y, Wang Y, Liu Y. Physical properties, microstructure, intermolecular forces, and oxidation stability of soybean oil oleogels structured by different cellulose ethers. Eur J Lipid Sci Technol, 120(6), 1700287 (2018)
Mercer P, Armenta RE. Developments in oil extraction from microalgae. Eur J Lipid Sci Technol, 113(5), 539-547 (2011)
Moon K, Choi KO, Jeong S, Kim YW, Lee S. Solid fat replacement with canola oil-carnauba wax oleogels for dairy-free imitation cheese low in saturated fat. Foods, 10(6), 1351 (2021)
Morach B, Witte B, Walker D, von Koeller E, Grosse-Holz F, Rogg J, Brigl M, Dehnert N, Obloj P, Koktenturk S, Schulze U. Food for thought: The protein transformation. Ind Biotechnol, 17(3), 125-133 (2021)
Murtaza G, Habib MM, Abdullah M. Formulation of soy patties using hydrocolloids: Creating a viable plant-based meat alternative. Biol Times, 3(10), 38-40 (2024)
Nanta P, Skolpap W, Kasemwong K. Influence of hydrocolloids on the rheological and textural attributes of a gluten-free meat analog based on soy protein isolate. J Food Process Preserv, 45(3), e15244 (2021)
Nor Aini I, Hasmadi M, Mamot S, Radzuan J. Palm oil and sunflower oil: Effect of blend composition and stirrer types during fractionation on the yield and physicochemical properties of the oleins. J Food Lipids, 12(1), 48-61 (2005)
Odia OJ, Ofori S, Maduka O. Palm oil and the heart: A review. World J Cardiol, 7(3),

144-149 (2015)
Oh Y, Lee S, Lee NK, Rhee JK. Improving the three-dimensional printability of potato starch loaded onto food ink. J Microbiol Biotechnol, 34(4), 891 (2024)
Palanisamy M, Töpfl S, Aganovic K, Berger RG. Influence of iota carrageenan addition on the properties of soya protein meat analogues. LWT – Food Sci Technol, 87, 546-552 (2018)
Park S, Yun E. Edible insect food: Current scenario and future perspectives. Food Sci Anim Resour Indus, 7(1), 12-20 (2018)
Park SK. Current status of technologies for producing protein alternative foods. Food Sci Anim Resour Indus, 10(1), 4-15 (2021)
Pečivová PB, Kubáň V, Mlček J, Juríková T, Balla Š, Sochor J, Baroň M. The influence of guar gum on textural and sensory properties of rolls made from semi-finished frozen products. Potravinarstvo, 8(1), 201–206 (2014)
Ramdani F, Hino M. Land use changes and GHG emissions from tropical forest conversion by oil palm plantations in Riau Province, Indonesia. PLoS One, 8(7), e70323 (2013)
Ran X, Lou X, Zheng H, Gu Q, Yang H. Improving the texture and rheological qualities of a plant-based fishball analogue by using konjac glucomannan to enhance crosslinks with soy protein. Innov Food Sci Emerg Technol, 75, 102910 (2022)
Ran X, Yang H. Promoted strain-hardening and crystallinity of a soy protein-konjac glucomannan complex gel by konjac glucomannan. Food Hydrocoll, 133, 107959 (2022)
Schaafsma G. Criteria and significance of dietary protein sources in humans: The protein digestibility–corrected amino acid score. J Nutr, 130(7), 1865S-1867S (2000)
Selani MM, Shirado GAN, Margiotta GB, Saldaña E, Spada FP, Piedade SMS, Contreras-Castillo CJ, Canniatti-Brazaca SG. Effects of pineapple byproduct and canola oil as fat replacers on physicochemical and sensory qualities of low-fat beef burger. Meat Sci, 112, 69-76 (2016)
Sha L, Xiong YL. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges. Trends Food Sci Technol, 102, 51-61 (2020)
Subroto E, Pangawikan AD, Yarlina VP, Isnaeni NF. Characteristics, purification, and the recent applications of soybean oil in fat-based food products: A review. Int J Emerg Trends Eng Res, 8(7), 3003-3011 (2020)
Sun M, Li X, McClements DJ, Xiao M, Chen H, Zhou Q, Xu S, Chen Y, Deng Q. Reducing off-flavors in plant-based omega-3 oil emulsions using interfacial engineering: Coating algae oil droplets with pea protein/flaxseed gum. Food Hydrocoll, 122, 107069 (2022)
Taghian Dinani S, Charles Carrillo MF, Boom R, Van Der Goot AJ. Quality improvement of plant-based meat alternatives by addition of iota carrageenan to pea protein–wheat gluten blend. Eur Food Res Technol, 249(6), 1637-1654 (2023)
Tahmouzi S, Meftahizadeh H, Eyshi S, Mahmoudzadeh A, Alizadeh B, Mollakhalili-Meybodi N, Hatami M. Application of guar

(*Cyamopsis tetragonoloba* L.) gum in food technologies: A review of properties and mechanisms of action. Food Sci Nutr, 11(9), 4869-4897 (2023)

Teng C, Campanella OH. A plant-based animal fat analog produced by an emulsion gel of alginate and pea protein. Gels, 9(5), 393 (2023)

UN DESA. World population prospects 2024: Highlights. New York (US): United Nations Department for Economic and Social Affairs, Online Edition (2024)

WorldBank. Global Seaweed New and Emerging Markets Report 2023 (2023)

Wunderlich S, Gatto KA. Consumer perception of genetically modified organisms and sources of information. Adv Nutr, 6(6), 842-851 (2015)

Xu L, Xu G, Liu T, Chen Y, Gong H. The comparison of rheological properties of aqueous welan gum and xanthan gum solutions. Carbohydr Polym, 92(1), 516-522 (2013)

Youssef MK, Barbut S. Physicochemical effects of the lipid phase and protein level on meat emulsion stability, texture, and microstructure. J Food Sci, 75(2), S108-S114 (2010)

Yun HJ, Jung WK, Kim HW, Lee S. Embedded 3D printing of abalone protein scaffolds as texture-designed food production for the elderly. J Food Eng, 342, 111361 (2023)

Zhang T, Chen S, Xu X, Zhuang X, Chen Y, Xue Y, Xue C, Jiang N. Effects of konjac glucomannan on physical properties and microstructure of fish myofibrillar protein gel: Phase behaviours involved. Food Hydrocoll, 134, 108034 (2023)

Zhang W, Hui B, Li X, Guo Z, Ma J, Li J. Effects of different soybean and coconut oil additions on the physicochemical and sensory properties of soy protein–wheat protein mixture subjected to high-moisture extrusion. Foods, 13(14), 2263 (2024)

Zhu J, Xiao X, Du W, Cai Y, Yang Z, Yin Y, Wakisaka M, Wang J, Zhou Z, Liu D, Fang W. Leveraging microalgae as a sustainable ingredient for meat analogues. Food Chem, 450, 139360 (2024)