

조식식물단백의 결합에 대한 농축잠두단백-음이온성 검 혼합물의 영향

배시연¹ · 양선혜¹ · 김현석^{1,2*}

¹경기대학교 일반대학원 식품생물공학과
²경기대학교 바이오융합학부 식품생물공학전공

Impact of Faba Bean Protein Concentrate-Anionic Gum Mixture on the Binding of Textured Vegetable Protein

Si-Yeon Bae¹, Seon Hye Yang¹, and Hyun-Seok Kim^{1,2*}

¹Department of Food Science and Biotechnology, Graduate School, Kyonggi University
²Major of Food Science and Biotechnology, Division of Bio-convergence, Kyonggi University

Abstract

This study investigated the physical, thermal, rheological, and binding properties of faba bean protein concentrate (FBC) and FBC-anionic gum mixtures. The anionic gums used in this study were sodium alginate (NaA), low-methoxyl amidated pectin (LMA), λ -carrageenan (λ CA), and gellan gum (GLG). The study found that FBC successfully incorporated the minced textured vegetable protein (TVP), but the formed TVP block had a fragile and soft texture. The water absorption index decreased in FBC-NaA and FBC-LMA mixtures but increased in FBC- λ CA and FBC-GLG mixtures. The water solubility index decreased by adding NaA, LMA, and λ CA, excluding GLG, to FBC. Adding anionic gums to FBC decreased solubility, while the swelling power was reversed in FBC-anionic gum mixtures, except for the FBC-LMA mixture. The addition of anionic gums to FBC increased melting onset and peak temperatures compared to FBC. The G' value of FBC and FBC-anionic gum mixtures increased with temperature, indicating their thermogelling characteristic. The hardness of hamburger patties prepared with minced TVP and FBC or FBC-anionic gum mixtures generally tended to increase upon reheating, refrigeration, and reheating after refrigeration. The study concluded that the FBC-anionic gum mixtures have significant potential for binding different types of TVPs, highlighting its practical application.

Key words: faba bean protein concentrate, anionic gum, plant-based binder, textured vegetable protein binding

서 론

반추동물과 조류 유래 고기는 풍부한 단백질과 필수 아미노산을 고르게 함유하고 있어 인류를 위한 양질의 단백질 공급원이다(Kwon & Kim, 2019; Lee & Jo, 2019). 동물 단백질 생산을 위한 동물 사육으로부터 야기되는 환경적(과도한 온실가스 배출, 산림 파괴 등), 종교적, 윤리적(동물 복지) 및 식품안전적(가축전염병, 살충제 및 항생제 남용 등) 문제 때문에 동물 단백질 및 이를 활용한 가공품의 대체재에 대한 요구가 전 세계적으로 대두되고 있다(Kwon & Kim, 2019; Lee & Jo, 2019). 이에 북미와 유럽 중심의 서구에서 대체육 산업은 지속해서 성장하고 있으며 국내 대체육 시

장도 점차 확대되고 있다(Hoek et al., 2011; Lee & Jo, 2019; Malek et al., 2019). 국내외 시장에서 대체육은 식물성 대체육(plant-based meat), 배양육(cultured meat), 곤충단백질 식품(insect protein food)이 대표적이다(Cho et al., 2022). 이 중 콩류, 곡류, 해조류, 버섯류, 미생물류(효모, 곰팡이, 조류 등) 등 비동물성 원료에서 단백질을 추출하여 실제 육류 및 육가공품과 유사하게 제조하는 식물성 대체육이 가장 빠르게 성장하고 있다(Kim, 2018; You et al., 2020). 국외에서 가장 큰 규모의 대체육 시장을 형성하고 있는 미국은 약 85개의 산업체가 콩류 및 곡류 단백질을 이용한 식물성 대체육 제품을 개발 및 판매하고 있고, 일부 자가 재생 세포를 이용한 배양육 등이 개발되고 있다(Cho et al., 2022). 국내에서도 식품 대기업, 중소기업과 스타트업 기업에서 다양한 식물성 대체육 제품을 개발하여 출시하고 있는 추세이다(Kim, 2018; You et al., 2020; Cho et al., 2022).

현재 다양한 식물성 대체육 제품들이 있지만 대부분 조직식물단백(TVP, textured vegetable protein)을 이용한 분쇄육가공품(떡갈비, 햄버거 패티, 소시지, 너겟 등)의 형태로 완전

*Corresponding author: Hyun-Seok Kim, Major of Food Science and Biotechnology, Division of Bio-convergence, College of Convergence and Integrated Science, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea
Tel: +82-31-249-1319; Fax: +82-31-249-9604
E-mail: khstone@kyonggi.ac.kr
Received August 1, 2024; revised August 16, 2024; accepted August 20, 2024

히 조리되어 냉동 및 냉장 상태로 판매되고, 소비자들은 단순 재가열 통해 섭취하는 방식이 주를 이루고 있다(Kwon & Kim, 2019; You et al., 2020). 이처럼 현재 시판 중인 식물성 대체육 제품들은 조리 방식 및 풍미에 관한 소비자들의 선택이 매우 제한적이어서 식물성 대체육 시장의 성장 및 확대가 제한되고 있다(Hoek et al., 2011; Kim, 2018; An, 2019; You et al., 2020; Park, 2021). 소비자 인식 개선 및 위생적 원료 생산 등의 해결이 선행되어야 하는 곤충단백질을 제외하고 현재 시판되는 식물성 대체육 제품들의 한계를 극복하기 위해 배양육, 3D 프린팅 기술과 고수분 압출성형기술에 의한 원육 형태의 대체육이 주목받고 있다(An, 2019; You et al., 2020; Lee et al., 2021; Cho et al., 2022; Jo et al., 2023). 배양육은 생산기술(원천세포 지속적 대량 공급, 배양액, 지지체, 대량생산 무균시설 등), 안전성(GMO, 유전 안정성, 독성, 알레르기 유발 등), 법적 규제, 소비자 인식, 경제성 등의 문제로(Jo et al., 2023), 3D 프린팅에 의한 대체육은 제한적인 3D 프린팅용 잉크 종류, 고가의 생산시설, 대량생산의 어려움 때문에(Lee et al., 2021), 현재까지 소비자들이 접하기 어려운 상태이다. 이들에 비해 고수분 압출성형기술에 의한 대체육(high-moisture meat analogue, HMMA)은 상대적으로 상용화에 근접하여 있다(You et al., 2020). 소고기와 닭고기 대체 HMMA는 원육 형태 대체육으로 시장 규모는 작지만 서구에서 이미 상용된 제품들이 있으며, 국내에서도 최근 스타트업 기업을 중심으로 닭고기 유사 HMMA를 상용화하였다(You et al., 2020; Park, 2021). 그러나 HMMA는 고기의 근육조직의 질감만 모사할 뿐이며, 근육조직 사이에 뚜렷한 지방층을 구현하지 못하고 있다(You et al., 2020). 특히 삼겹살과 목살 같은 두꺼운 지방층에 의해 근육조직들이 구분되는 돼지고기용 HMMA는 시도되지 못하고 있다. 그래서 육 고기의 구조적 특성을 모사하기 위해 HMMA와 식물성 대체지방 조직을 접합하여 적층 구조를 형성하는 연구가 시도되고 있다. Herz et al. (2021; 2023)은 분리대두단백(SPI)-응고제 혼합물, SPI-트랜스글루타미네이스(TG, transglutaminase) 혼합물, 또는 SPI-응고제-TG 혼합물을 결합, 접착제로 하여 HMMA-식물성 대체지방 적층 구조를 형성하였다. 그러나 냉장/냉동저장 및 재가열 시 HMMA-식물성 대체지방 적층 구조의 안정성에 관한 조사가 없어, 추가적인 조리를 통해 섭취해야 하는 식물성 원료육에 적용이 가능한지 알 수 없다.

전분을 함유한 펄스류(pulses) 작물인 잠두(faba bean)는 예로부터 북유럽과 같은 위도의 지역에서 사료용으로 재배해 왔지만, 식물단백의 관심 증대로 인해 잠두단백의 영양학적 우수성이 재조명되며 식품용 식물단백 공급원으로 주목받고 있다(Multari et al., 2015). 잠두가루로부터 공기분급법(air classification)에 의해 농축잠두단백(조단백질 55-60%)을, 알칼리추출-등전침전(alkaline extraction-isoelectric precipitation)에 의해 분리잠두단백(조단백질 85-90%)을 얻을 수 있다

(Multari et al., 2015; Bühler et al., 2020). 잠두단백은 열을 가하면 겔을 형성하는 열 겔화 단백질로 접착, 결합력이 우수한 것으로 알려져 파스타, 제빵, 육류 제품의 결합제 및 단백질 강화제 등으로 사용되었으며, 최근 식물성 소시지와 crab-free cake 같은 대체육(또는 대체 어육)가공품의 원료로 사용되고 있다. 그러나 식물성 대체육 제조를 위한 단백질성 결합제/접착제로서의 잠두단백의 기능에 관한 연구는 매우 부족하다.

따라서 본 연구는 농축잠두단백과 음이온성 겔 혼합물의 물리적, 열적 및 유변학적 특성을 조사하고, 이들을 이용한 조직화 식물단백 블록을 제조하여 가열, 냉장, 재가열 조건에서 조직화 식물단백 블록의 구조 안정성 평가를 통해 원육 형태의 식물성 대체육 제조를 위한 접착, 결합 소재로 활용가능성을 조사하였다.

재료 및 방법

재료 및 시약

농축잠두단백(FBC, faba bean protein concentrate)은 AGT Food and Ingredients (Regina, Saskatchewan, Canada)의 것을 구매하였다. 농축잠두단백의 조단백, 조지방, 조회분, 탄수화물, 총전분 및 비전분성 탄수화물고분자 함량은 건물 기준으로 각각 61.2±0.8%, 3.2±0.1%, 5.9±0.0%, 29.7±0.7%, 12.5±0.2% 및 17.2±0.7%이었다. 조직완두단백 밀칭크는 (주)케미믹스(Seongnam, Korea)에서, 분리대두단백, 겔란검(GLG), 람다카라기난(λ CA), 알긴산나트륨(NaA), 염화칼슘은 (주)ES식품원료(Gunpo, Korea)에서 구매하였다. 저메톡실 아미드 펙틴(LMA, low-methoxyl amidated pectin)은 아이에프에프코리아(주) (Seoul, Korea)로부터 제공받았다. 식물성 떡갈비의 시판 제품은 CJ제일제당(Seoul, Korea)으로부터 구매하였다. 이외 본 연구에 사용한 시약 및 용매는 ACS 등급의 것을 사용하였다.

수분흡수지수와 수분용해지수

음이온성 겔(0.2, 0.4 및 0.8 g)을 탈이온수(DIW)와 혼합하여 총 무게 100 g의 음이온성 겔 분산물을 제조하고 음이온성 겔이 용해될 때까지(약 3시간) 상온(25°C)에서 교반하였다. 음이온성 겔을 수화 및 용해하는 동안 증발된 수분은 탈이온수를 가하여 보충하였다. 준비된 음이온성 겔 용액(25 g)과 농축잠두단백(1 g, d.b)을 conical tube (50 mL)에 넣고 wrist action shaker (Asia testing machine Co., Gwangju, Korea)를 이용하여 1시간 동안 진탕하였다. 농축잠두단백과 음이온성 겔 혼합비율은 100:5, 100:10 및 100:20 (w/w)이었다. 이후 수화된 혼합물을 원심분리(3,000×g, 15 min)하여 상층액과 침전물로 분리한 후 침전물의 중량을 측정하였고, 상층액은 일회용 알루미늄 접시로 옮겨 105°C에서 건조하여 함량을 측정하였다. 수분흡수지수(water absorption index,

WAI)와 수분용해지수(water solubility index, WSI)는 다음의 계산식에 따라 결정하였다.

$$\text{수분흡수지수(g/g)} = \frac{\text{침전물의 무게 (g, w.b)}}{\text{농축잠두단백과 음이온성 검 혼합물의 초기 건조 중량 (g, d.b)}}$$

$$\text{수분용해지수(\%)} = \frac{\text{상층액 내 고형물의 함량 (g, d.b)}}{\text{농축잠두단백과 음이온성 검 혼합물의 초기 건조 중량 (g, d.b)}} \times 100$$

팽윤력과 용해도

농축잠두단백-음이온성 검 혼합물은 WAI 및 WSI 측정에서 제조한 방법에 따라 제조되었다. 농축잠두단백-음이온성 검 혼합물을 포함하는 conical tube는 끓는 물 수욕조(약 100°C)에서 5분 간격으로 vortexing하며 총 30분간 가열하였다. 이후 conical tube는 상온에서 30분간 방랭하고 원심분리(3,000×g, 15 min)하여 상층액과 침전물을 분리하였다. 회수된 침전물의 무게를 측정하고, 상층액은 일회용 알루미늄 접시에 옮겨 105°C에서 건조하여 함량을 측정하였다. 팽윤력과 용해도는 다음의 계산식에 따라 결정하였다.

$$\text{용해도(\%)} = \frac{\text{상층액 내 고형물의 함량 (g, d.b)}}{\text{농축잠두단백과 음이온성 검 혼합물의 초기 건조 중량 (g, d.b)}} \times 100$$

$$\text{팽윤력(g/g)} = \frac{\text{침전물의 무게 (g, w.b)}}{\text{농축잠두단백과 음이온성 검 혼합물의 초기 건조 중량 (g, d.b)}} \times \left(\frac{100 - \% \text{용해도}}{100} \right)$$

시차주사열량계(DSC)

농축잠두단백(20 g, d.b)에 음이온성 검(1, 2, 및 4 g)을 첨가하고 탈이온수를 가하여 총 무게 100 g의 농축잠두단백-음이온성 검 현탁액을 제조하고 상온(25°C)에서 3시간 동안 교반하였다. 농축잠두단백과 음이온성 검을 수화 및 용해하는 동안 증발된 수분은 탈이온수를 가하여 보충하였다. 제조된 농축잠두단백-음이온성 검 현탁액은 추가로 4°C에서 18시간 동안 방치한 후 열 특성을 시차주사열량계(DSC4000, PerkinElmer, Inc., Waltham, MA, USA)를 이용하여 분석하였다. 제조된 농축잠두단백-음이온성 검 현탁액 20 mg을 스테인리스강 팬에 칭량하여 기계적으로 밀봉하고 상온(25°C)에서 18시간 동안 방치한 후 25°C에서 150°C까지 5°C/min의 가열속도로 가열하였다. 대조군으로는 비어 있는 팬을 사용하였으며, Pyris software (version 11.1.0.0497, PerkinElmer Inc.)를 이용하여 DSC thermogram으로부터 용융(melting) 특성을 결정하였다.

온도에 따른 점탄 특성

DSC를 이용한 열 특성 분석에서 설명한 것과 같게 농축잠두단백-음이온성 검 혼합물을 제조하고 4°C에서 18시간 동안 수화시킨 후 parallel plate system이 장착된 dynamic rheometer (DHR1; TA Instruments, New Castle, DE, USA)를 이용하여 temperature sweep test를 수행하였다. Peltier plate와 plate geometry (지름 40 mm) 사이의 간격은 1 mm이었다. 농축잠두단백-검 혼합물을 Peltier plate에 놓고 1 Hz와 1% strain(선행연구에서 결정된 선형점탄성구간 내)에서 미리 결정된 온도 프로파일에 따라 저장탄성률(storage modulus, G')과 손실탄성률(loss modulus, G'')을 측정하였다. 점탄 특성 분석을 위한 온도 프로파일은 25°C에서 5분간 컨디션닝(conditioning)하고 2°C/min의 가열속도로 95°C까지 가열한 후 95°C에서 5분간 유지하고 2°C/min의 냉각속도로 5°C까지 냉각하는 것이었다. 점탄 특성 시험 중 혼합물로부터 수분의 증발은 실리콘 오일과 solvent trap module을 이용하여 제어하였다.

조식식물단백 블록의 제조

농축잠두단백과 음이온성 검은 건조중량 기준 8:2의 혼합 비율이 되도록 스테인리스강 그릇에 넣고 스파툴라로 싱글계 섞은 후 60 mesh 표준체를 3회 반복하여 통과시켜 농축잠두단백-음이온성 검 혼합물을 제조하였다. 조직원단백 밀청크(이하 조직식물단백)는 과량의 탈이온수에 넣어 상온에서 1시간 동안 침지한 후 수동착즙기를 이용하여 탈수시켜 수화된 조직식물단백(수분함량 70.1%)를 제조하였다. 수화된 조직식물단백 중량 대비 20%에 해당하는 분리대두단백(소재 대조군), 농축잠두단백과 농축잠두단백-음이온성 검 혼합물 각각을 수화된 조직식물단백과 반죽 볼에 넣고 비터(beater)가 장착된 반죽기(Model 5K5SS, KitchenAid, St. Joseph, MI, USA)를 이용하여 저속(setting 2)에서 5분간 반죽하였다. 반죽 200 g을 hamburger press (07-0301, Weston brands LLC., Cleveland, OH, USA)에 넣어 원형의 조직식물단백 블록(지름 115 mm, 두께 25 mm)을 제조하고 전기 스티م쿠키(Model DG6210, X.J. Electrics (Shenzhen) Co., Ltd., Xuchang, China)에서 30분간 증자(스티م 온도: 약 105-110°C)한 후 상온에서 30분간 방랭하였다. 농축잠두단백-음이온성 검 혼합물을 첨가한 조직식물단백 블록은 증자 전 2% CaCl₂ 용액에 5분간 담그고 표면 수분을 제거하였다. 시판 식물성 떡갈비(제품 대조군)도 동일 조건으로 증자하였다. 제품 대조군, 농축잠두단백 및 농축잠두단백-음이온성 검 혼합물에 의한 조직식물단백 블록은 증자, 방랭하고 재가열(윗면과 아래면을 각각 4분 30초간 fan-frying), 냉장 저장(4°C, 24 h), 냉장 저장(4°C, 24 h) 후 재가열(윗면과 아래면을 각각 4분 30초간 fan-frying)하였다. 본 연구에서 제조된 조직식물단백 블록의 제조과정, 재가열 및 저장 조건, 및 온도 측정을 위한 샘플링 계획을 Fig. 1에 제시하였다.

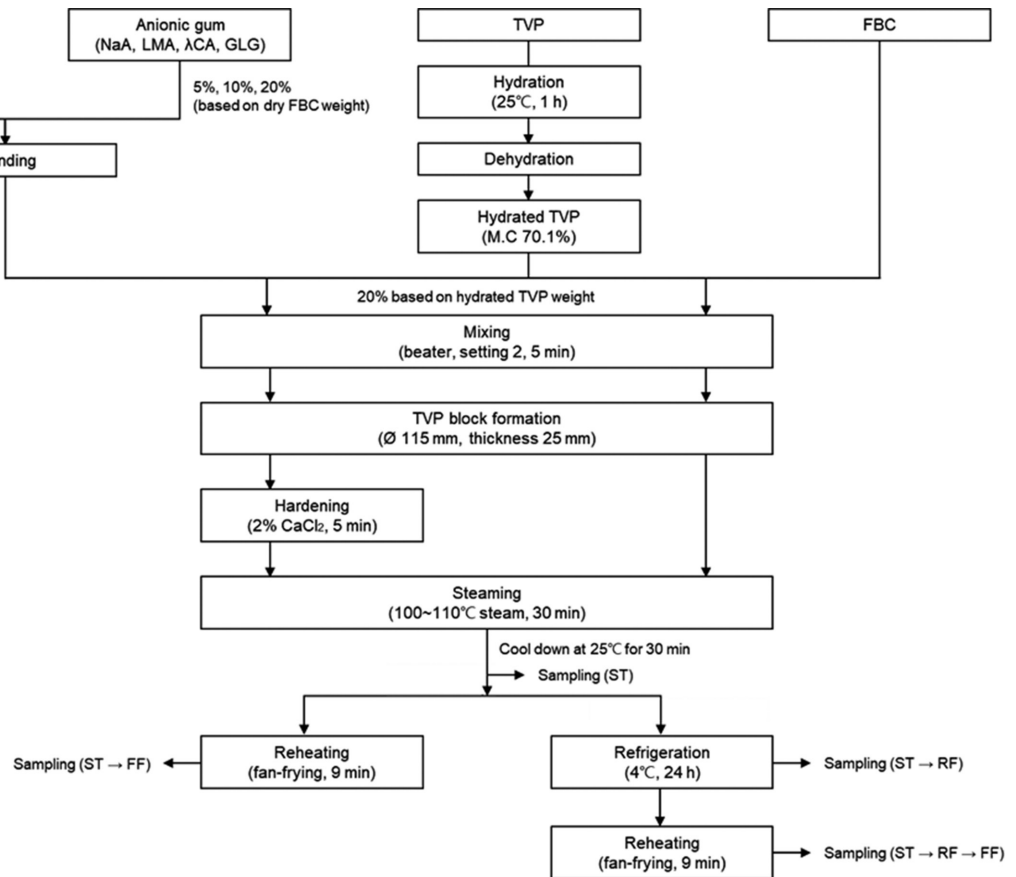


Fig. 1. Schematic diagram for manufacturing the textured vegetable protein (TVP) block using faba bean protein concentrate (FBC) and anionic gum (NaA, sodium alginate; LMA, low-methoxyl amidated pectin; λ CA, λ -carrageenan; GLG, gellan gum). ST, steaming; FF, fan-frying (reheating); RF, refrigeration.

조식식물단백 블록의 경도

조리된 조식식물단백 블록의 경도는 물성측정기(Zwick-roell Texture analyzer Z1.0, Ulm, Baden-Württemberg, Germany)를 이용하여 압착경도와 절단경도를 측정하였다. 조식식물단백 블록은 직경 22 mm와 높이 10 mm로 성형하였고, 시료 온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 조정된 후 경도를 측정하였다. 압착경도는 변형율 50%로 원형 probe (직경 100 mm)를 이용하여, 절단경도는 칼날형 probe (60° shear angle flat blade type)를 이용하여 test speed 60 mm/min의 속도로 1회 압착 및 절단하여 얻어진 force-time 그래프로부터 피크의 힘으로 결정하였다.

통계처리

농축잠두단백-음이온성 검 혼합물과 조식식물단백 블록은 적어도 3회 이상 제조하였고, 본 연구의 특성분석은 적어도 3회 이상 반복하여 측정하였다. 측정된 특성치는 SPSS (version 23.0, Statistics Package for Social Sciences, IBM-SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하여 일원배치분산분석(one-way ANOVA)을 수행하고 평균±표준편차로 나타내었다. 또

한 Tukey's HSD multiple range test를 이용하여 처리군의 특성치 평균값들 사이의 통계적 유의성을 $p < 0.05$ 수준에서 평가하였다.

결과 및 고찰

식물성 결착제로서 농축잠두단백

조식식물단백에 대한 농축잠두단백(FBC)의 결착 특성을 분리대두단백(SPI)을 대조군으로 하여 비교하였다(Fig. 2). 완두단백질-밀단백질 혼합물을 이용한 건식 조식식물단백(조식완두단백 밀청크)을 수화하고 이의 중량 대비 20%에 해당하는 FBC와 SPI를 각각 혼합하여 햄버거 패티 형태로 성형하였을 때, FBC는 수화된 조식식물단백을 성공적으로 결착하였으나 SPI는 그렇지 못하였다. FBC는 수화된 조식식물단백 중량의 20% 미만으로 첨가하였을 때도 조식식물단백을 결착할 수 있었으나 형성된 조식식물단백 블록의 경도가 너무 약하여 작업적성이 좋지 않았다. 따라서 FBC를 식물성 결착제로 사용 시 수화된 조식식물단백 중량의 20% 이상의 첨가가 필요한 것으로 보인다. 한편 Herz et al.

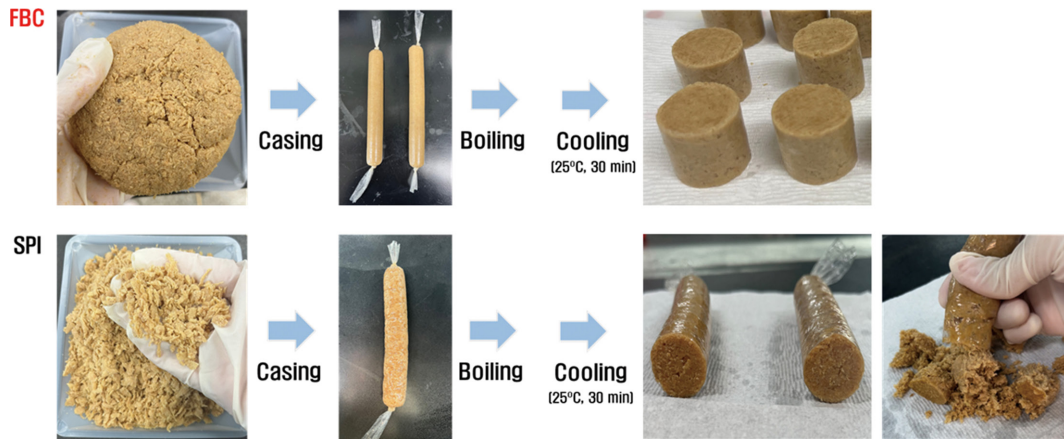


Fig. 2. Binding ability of faba bean protein concentrate (FBC) and soy protein isolate (SPI) on the hydrated textured vegetable protein.

(2021; 2023)은 SPI의 겔 형성 메커니즘을 이용하여 조직식물단백의 결합 및 접착에 관한 연구를 수행하였다. 그래서 수화된 조직식물단백에 FBC 및 SPI를 첨가하여 혼합하고 셀룰로스 케이싱에 충전하여 끓는 물에서 가열하고 찬물에서 식힌 후 케이싱을 제거하여 조직식물단백 블록이 형성되었는지를 조사하였다. FBC 첨가군은 소시지 모양의 조직식물단백 블록이 형성되었고 칼로 절단하였을 때도 블록 구조의 붕괴 없이 표면이 매끈하게 잘렸다. 이의 압착경도와 절단경도는 각각 43.7 N과 13.5 N이었다. 그러나 SPI 첨가군 대부분은 케이싱을 제거하며 소시지 모양이 붕괴하였고 일부 회수한 소시지 모양의 조직식물단백 블록을 칼로 절단할 때도 블록이 잘리는 것이 아니라 흐트러지거나 뭉개지는 현상이 발생하였다. 결과적으로 FBC는 조직식물단백의 재구조화를 위한 식물성 결합제나 접착제로 이용할 수 있을 것으로 판단되었다. 그런데도 FBC만 사용하는 것은 조직식물단백 재구조화 및 조리 후 질감이 견고하지 못하여 FBC의 결합력과 접착력의 향상이 필요하다.

수분흡수지수와 수분용해지수

FBC와 FBC-음이온성 검 혼합물의 수분흡수지수(WAI)와 수분용해지수(WSI)는 Table 1에 제시하였다. FBC(대조군)의 20% 농도로 GLG를 함유한 혼합물은 본 연구의 시험 조건에서 가해진 DIW를 혼합물이 전량 흡수하여 점조성이 매우 큰 페이스트를 형성하여 원심분리로 상층액과 침전물이 분리할 수 없어 WAI와 WSI를 측정할 수 없었다. FBC의 WAI는 1.8 g/g이었다. FBC-알긴산나트륨(NaA) 혼합물의 WAI는 1.5-2.0 g/g이었으며, NaA 함량이 증가하며 감소하는 양상을 보였다. FBC-저메톡시 아미드 펙틴(LMA) 혼합물의 WAI는 1.5-1.7 g/g이었으며, LMA 함량에 따라 유의적이지 않았다. FBC-람다카라기난(λ CA) 혼합물의 WAI는 2.4-5.5 g/g이었으며, λ CA 함량에 따라 유의적으로 증가하였다. FBC-겔란검(GLG) 혼합물의 WAI는 2.1-2.7 g/g이었고, GLG 함량에 따

Table 1. Water absorption index (WAI)¹ and water solubility index (WSI)¹ of faba bean protein concentrate (FBC) and FBC-anionic gum mixtures

Sample	Anionic gum addition (% based on dry FBC weight)	WAI (g/g)	WSI (% d.b)
FBC	-	1.8±0.2 ^{ef}	36.0±0.1 ^c
FBC-NaA ²	5	2.0±0.1 ^{dc}	37.9±0.0 ^{bc}
	10	1.9±0.1 ^{def}	38.4±0.4 ^b
	20	1.5±0.4 ^f	26.5±0.2 ^g
FBC-LMA ²	5	1.6±0.1 ^{ef}	37.2±0.1 ^{cd}
	10	1.7±0.0 ^{ef}	36.9±0.2 ^{cde}
	20	1.5±0.1 ^f	34.6±0.4 ^f
FBC- λ CA ²	5	2.4±0.0 ^{cd}	36.6±0.0 ^{dc}
	10	4.8±0.1 ^b	25.0±0.2 ^h
	20	5.5±0.0 ^a	20.5±0.1 ⁱ
FBC-GLG ²	5	2.1±0.0 ^{dc}	37.9±0.7 ^{bc}
	10	2.7±0.4 ^e	45.2±1.0 ^a
	20	N/D ³	N/D ³

¹Mean values of three replicate measurements; Values sharing the same lowercase letters within columns are not significantly different at $p < 0.05$.

²NaA, sodium alginate; LMA, low-methoxyl amidated pectin; λ CA, λ -carrageenan; GLG, gellan gum.

³Not detected.

라 증가하였다. 전반적으로 FBC의 WAI는 NaA와 LMA 첨가에 영향 받지 않거나 감소하였지만, λ CA과 GLG 첨가로 증가하였다. WSI에 있어, FBC(대조군)는 36.0%이었다. FBC-NaA 혼합물은 26.5-38.4%의 범위에, FBC-LMA 혼합물은 34.6-37.2%의 범위에, FBC- λ CA 혼합물은 20.5-36.6%의 범위에, FBC-GLG 혼합물은 37.9-45.2%의 범위에 있었다. FBC-GLG 혼합물을 제외한 모든 혼합물은 정도에 차이는 있지만, 음이온성 검 첨가량이 증가하며 WSI가 FBC보다 감소하는 양상을 나타내었다. 본 연구의 모든 음이온성 검들은

단백질의 양이온성 부분과의 정전기적 인력에 의한 복합체를 형성(코아세르베이션, coacervation)하는 것으로 알려져 있다(Gorji et al., 2018; Bakry et al., 2019; Chaux-Gutiérrez et al., 2019; Hu et al., 2023). 이러한 코아세르베이션은 하이드로콜로이드(단백질 및 음이온성 검)의 pH에 따른 전하 특성, 혼합비율, 분자구조, 용액에서 배열 및 거동 등에 영향을 받는다(Gorji et al., 2018; Bakry et al., 2019; Chaux-Gutiérrez et al., 2019; Hu et al., 2023). 본 연구에서 FBC-음이온성 검 혼합물의 pH를 일정하게 조정하지 않아 혼합물 사이의 직접 비교는 어렵지만, 음이온성 검 첨가량 증가로 인한 WSI의 감소는 음이온성 검과 FBC 사이의 코아세르베이션에 의한 복합체 형성의 결과로 생각되며, WAI에서 관찰된 양상이 음이온성 검에 따라 다른 것은 아마도 FBC와 음이온성 검 각각의 코아세르베이션 메커니즘 차이 때문으로 생각된다.

용해도와 팽윤력

FBC와 FBC-음이온성 검 혼합물의 용해도와 팽윤력은 Table 2에 제시하였다. FBC의 용해도는 45.2%이었고, Park et al. (2024)이 보고한 용해도의 결과와 유사하였다. Park et al. (2024)에 따르면 FBC의 높은 용해도는 상층액 내 가용화된 전분/비전분성 다당과 함께 고농도의 단백질 때문이며, 이는 열겔화 특성을 가진 잠두단백질(Multari et al., 2015; Nivala et al., 2021)이 용해도 분석을 위한 가열로 겔화되며 형성된 단백질 미립자들이 원심분리로 침전하지 않고 상층액 내 분산되어 있었기 때문이라 하였다. FBC-음이온성 검 혼합물의 용해도에 관해, FBC-NaA 혼합물은 38.4-44.4% 범위를, FBC-LAM 혼합물은 35.7-44.7% 범위를, FBC-λCA 혼합물은 26.3-47.1% 범위를, FBC-GLG 혼합물은 27.1-44.3%

범위를 나타내었다. 전반적으로 FBC-음이온성 검 혼합물의 용해도는 FBC보다 낮았고, 음이온성 검 첨가량이 증가하며 감소하였다. 이와 같은 결과는 FBC 과립이 정전기적 인력에 의해 음이온성 검으로 둘러싸여 가용성 고형물들이 FBC 과립으로부터 유출되지 못한 결과인 것으로 생각된다(Gorji et al., 2018; Bakry et al., 2019; Chaux-Gutiérrez et al., 2019; Hu et al., 2023).

FBC-음이온성 검 혼합물의 팽윤력은 NaA 첨가 시 4.8-5.5 g/g 범위를, LMA 첨가 시 4.6-4.7 g/g 범위를, λCA 첨가 시 5.5-8.6 g/g 범위를, GLG 첨가 시 4.7-6.1 g/g 범위를 나타내었다. FBC-LMA 혼합물을 제외하고 모든 FBC-음이온성 검 혼합물의 팽윤력은 FBC와 유사하거나 높았으며, 음이온성 검 첨가량이 증가하며 증가하는 양상을 보였다. 이와 같은 결과는 전술한 것처럼 음이온성 검이 정전기적 상호작용으로 FBC 과립을 둘러싸 FBC 과립을 구성하는 고분자들의 가용화 및 유출을 억제하면서 팽윤한 FBC 과립의 안정성을 높인 결과로 생각된다. 또한 음이온성 검이 FBC 과립들과 이온성 가교를 통해 3차원 매트릭스 형성하면서 물을 함유할 수 있는 공간이 확장된 것으로 생각된다(Morris et al., 2012). 한편 FBC-LMA 혼합물의 팽윤력은 FBC보다 작으면서, LMA 첨가량에 영향 받지 않았다. 이를 통해 LMA는 다른 음이온성 검보다 FBC 과립과 강하게 상호작용하며 FBC 과립이 수화되어 팽윤되는 것을 억제한다는 것을 유추할 수 있다(Bakry et al., 2019; Chaux-Gutiérrez et al., 2019).

열 특성

DSC를 이용하여 FBC 및 FBC-음이온성 검 혼합물의 용융(melting) 특성을 조사하여 Table 3에 나타내었다. FBC의

Table 2. Solubility¹ and swelling power¹ of faba bean protein concentrate (FBC) and FBC-anionic gum mixtures

Sample	Anionic gum addition (%, based on dry FBC weight)	Solubility (%, d.b)	Swelling power (g/g)
FBC	-	45.2±0.5 ^{abc}	4.8±0.3 ^{efgh}
FBC-NaA ²	5	44.4±0.2 ^{bcd}	4.8±0.1 ^{efgh}
	10	43.3±0.7 ^{bcd}	5.1±0.1 ^{efgh}
	20	38.4±0.4 ^{ij}	5.5±0.2 ^{cdef}
FBC-LMA ²	5	44.7±0.0 ^{abcd}	4.7±0.2 ^{efgh}
	10	42.4±0.4 ^{defg}	4.6±0.1 ^{gh}
	20	35.7±0.8 ^k	4.6±0.2 ^{gh}
FBC-λCA ²	5	47.1±0.1 ^a	5.5±0.1 ^{cd}
	10	44.7±0.9 ^{abcd}	6.1±0.2 ^{bcd}
	20	26.3±0.5 ^{lm}	8.6±0.1 ^a
FBC-GLG ²	5	44.3±0.1 ^{bcd}	4.7±0.1 ^{efgh}
	10	40.4±1.8 ^{ghi}	4.7±0.1 ^{efgh}
	20	27.1±0.9 ^l	6.1±0.8 ^{bcd}

¹Mean values of three replicate measurements; Values sharing the same lowercase letters within columns are not significantly different at $p < 0.05$.

²NaA, sodium alginate; LMA, low-methoxyl amidated pectin; λCA, λ-carrageenan; GLG, gellan gum.

Table 3. Thermal characteristic¹ of faba bean protein concentrate (FBC) and FBC-anionic gum mixtures

Sample	Anionic gum addition (% ²)	Melting temperature (°C)			Melting enthalpy (J/g)
		Onset	Peak	End	
FBC	0	82.6±2.6 ^{bcd}	91.9±0.1 ^{hijk}	100.1±0.2 ^{bcdefg}	2.4±0.4 ^{abcdef}
FBC-NaA ³	5	81.8±0.8 ^{bcd}	91.6±0.3 ^{ijk}	102.1±0.0 ^{abc}	2.8±0.7 ^{abcd}
	10	85.2±2.1 ^b	94.1±0.7 ^{de}	99.9±1.1 ^{bcdefg}	2.5±0.5 ^{abcde}
	20	89.8±2.8 ^a	97.9±0.0 ^a	102.9±1.5 ^{ab}	1.0±0.1 ^{fg}
FBC-LMA ³	5	82.1±0.7 ^{bcd}	91.4±0.7 ^{jk}	98.2±0.6 ^{cdefg}	2.3±0.3 ^{bcdef}
	10	83.2±0.8 ^{bcd}	92.6±0.2 ^{ghij}	99.5±1.2 ^{bcdefg}	3.0±0.0 ^{abc}
	20	85.3±0.2 ^b	94.3±0.0 ^{cd}	100.6±0.0 ^{bcdef}	2.9±0.1 ^{abc}
FBC-λCA ³	5	82.6±0.3 ^{bcd}	92.3±0.2 ^{ghij}	101.6±3.2 ^{abcd}	2.4±0.6 ^{bcdef}
	10	83.3±0.1 ^{bcd}	93.2±0.0 ^{defg}	99.5±0.0 ^{bcdefg}	3.3±0.0 ^{ab}
	20	85.6±0.8 ^b	95.3±0.4 ^{bc}	101.5±0.0 ^{abcd}	3.5±0.0 ^{ab}
FBC-GLG ³	5	81.0±0.8 ^{cd}	91.5±0.5 ^{ijk}	97.2±0.0 ^{efg}	1.5±0.3 ^{defg}
	10	84.0±0.6 ^{bcd}	93.7±0.1 ^{def}	100.1±0.0 ^{bcdefg}	3.5±0.3 ^{ab}
	20	85.3±0.4 ^b	96.3±0.2 ^b	105.2±0.4 ^a	3.8±0.2 ^a

¹Mean values of three replicate measurements; Values sharing the same lowercase letters within columns are not significantly different at $p < 0.05$.

²Based on dry FBC weight

³NaA, sodium alginate; LMA, low-methoxyl amidated pectin; λCA, λ-carrageenan; GLG, gellan gum.

용융은 82.6°C에서 개시되어 100.1°C에서 완료되었다. 음이온성 검을 FBC의 중량대비 5% 수준으로 첨가한 모든 FBC-음이온성 검 혼합물의 용융개시온도는 81.0-82.6°C, 용융최고온도는 91.4-92.3°C, 용융종결온도는 97.2-102.1°C의 범위에 있었고, FBC의 용융온도와 유사하거나 소폭 낮은 수준을 나타내었다. 이는 본 연구에서 적용된 음이온성 검을 FBC에 5% 첨가하는 것은 FBC의 용융 특성에 영향을 미치지 않는다는 것을 가리킨다. 그러나 음이온성 검을 FBC 건조중량 대비 10%와 20%를 첨가하였을 때, 용융개시온도는 각각 83.2-85.2°C 및 85.3-89.8°C, 용융최고온도는 각각 92.6-94.1°C 및 94.3-97.9°C, 용융종결온도는 각각 99.5-100.1°C 및 100.6-105.2°C의 범위를 나타내었다. FBC와 유의미한 차이를 보이지 않은 용융종결온도를 제외하고 용융개시온도와 용융최고온도는 FBC에 음이온성 검을 10% 이상 첨가하며 상승하였다. 이러한 결과는 FBC과 음이온성 검이 이들의 용융에 필요한 물의 이용에 관한 경쟁 때문으로 생각된다(Bae et al., 2020). 또한 FBC와 음이온성 검 사이의 정전기적 복합체 형성으로 FBC의 열안정성의 증가로 FBC-음이온성 검 혼합물 용융온도의 상승에 기여한 것으로 보인다(Ibanoglu, 2005). 그렇지만 FBC와 FBC-음이온성 검 혼합물의 용융은 일반적인 식품의 열처리(삶기, 굽기, 찌기, 살균 등) 온도에 도달하기 전에 개시되기 때문에 이들은 조직 식물단백 및 기타 부재료 사이에 고루 분포되어 서로를 겔착할 수 있을 것으로 생각된다. 한편 용융엔탈피는 FBC가 2.4 J/g이었고, FBC-NaA 혼합물이 1.0-2.8 J/g, FBC-LMA 혼합물이 2.3-3.0 J/g, FBC-λCA 혼합물이 2.4-3.5 J/g, FBC-GLG

혼합물이 1.5-3.8 J/g의 범위에 있었다. FBC-음이온성 검 혼합물의 용융엔탈피는 FBC보다 낮거나 높은 수준을 나타내었으나 큰 차이를 보이지 않았다. 음이온성 검 첨가량이 증가하며 용융엔탈피는 FBC-NaA 혼합물은 낮아졌으나, FBC-LMA, FBC-λCA와 FBC-GLG 혼합물들은 높아지는 양상을 나타내었다. FBC-NaA 혼합물의 낮은 용융엔탈피는 NaA의 존재로 인해 FBC의 물 이용성이 제한되어 부분적으로 용융(또는 변성)되었을 수 있다(Ibanoglu, 2005). 또한 FBC와 NaA의 강한 정전기적 복합체 형성으로 exothermic enthalpy로 나타나는 FBC의 단백질 응집으로 인해 상대적으로 낮은 용융엔탈피(endothermic enthalpy)가 산출된 것일 수 있다(Ibanoglu, 2005). 반면 이외의 FBC-음이온성 검 혼합물들의 용융엔탈피 증가는 음이온성 검의 입체장애(steric hindrance) 효과와 전하된 단백질 사이 또는 전하된 단백질과 음이온성 검 사이의 반발력으로 인해 FBC의 단백질 응집의 감소로 충분한 에너지를 소비하며 용융(또는 변성)된 결과인 것 같다(Ibanoglu, 2005). 따라서 FBC-NaA 혼합물은 다른 혼합물에 보다 적은 에너지 투입으로 겔-졸 상전이가 가능할 것으로 생각된다.

열유변학적 특성

FBC와 FBC-음이온성 검 혼합물의 온도에 따른 점탄 특성 프로파일을 Fig. 3에 제시하였다. FBC는 25°C에서 70°C까지 가열하는 동안 손실탄성계수(G'')가 저장탄성계수(G')보다 높은 수준을 유지하며 점진적으로 상승하였다. 이는 이 온도 구간에서 FBC 현탁액은 액체와 같은 거동하는 것

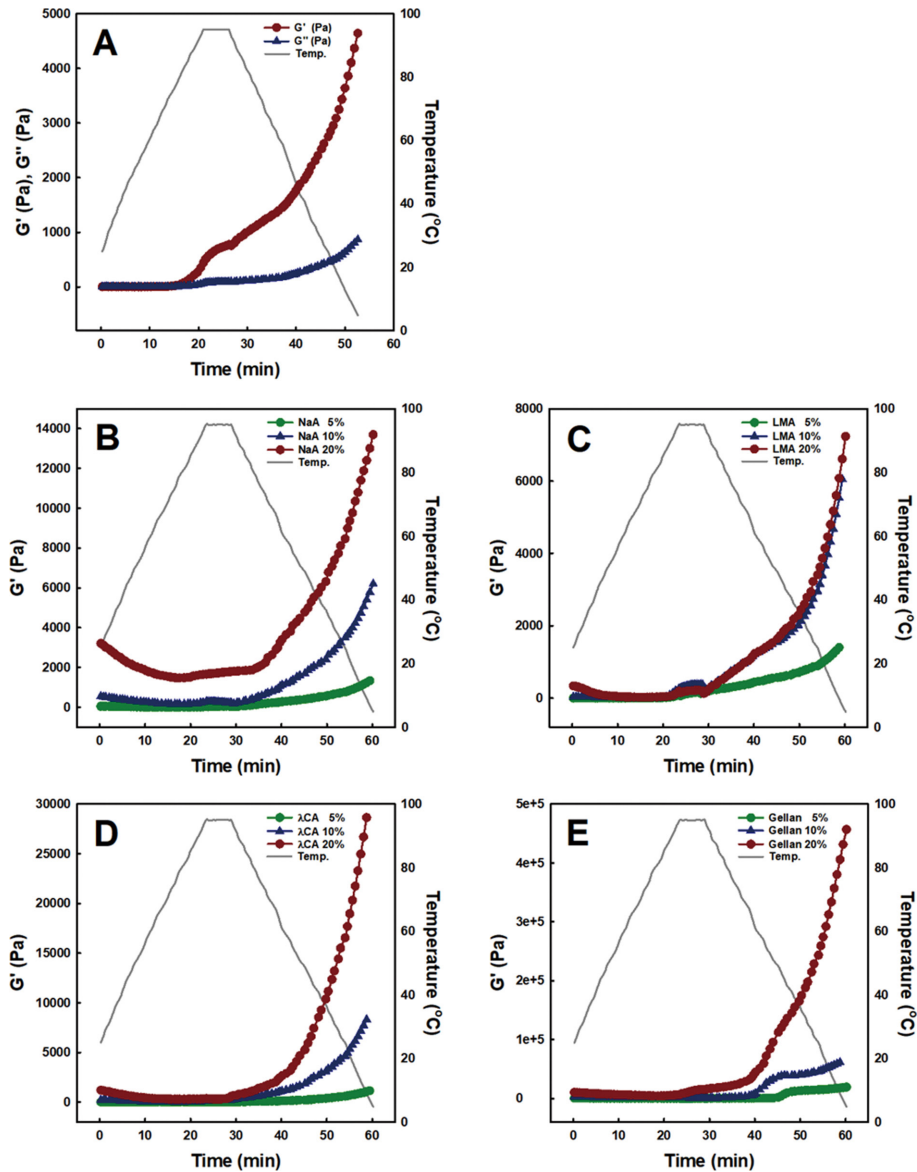


Fig. 3. Changes in storage modulus (G') of faba bean protein concentrate (FBC) and FBC-anionic gum (NaA, sodium alginate; LMA, low-methoxyl amidated pectin; λ CA, λ -carrageenan; GLG, gellan gum) mixtures at 20% solid content according to the predetermined temperature profile.

을 가리킨다. 그러나 70°C 를 초과하면서 G' 값은 G'' 값을 초과하였고, 이후의 온도 프로파일 걸쳐 급격한 증가를 나타내었다(Fig. 3A). 이것은 70°C 이상에서 FBC는 고체와 같은 거동을 한다는 것을 가리키며, Park et al. (2024)도 같은 현상을 보고하였다. 이러한 현상은 열 겔화 특성을 보유한 식물단백질에서 주로 관찰되며, FBC는 열 겔화 식물단백질이라는 것을 가리킨다(Multari et al., 2015; Nivala et al., 2021). FBC-음이온성 검 혼합물은 모든 음이온성 검 첨가량에서 $65\text{--}73^{\circ}\text{C}$ 범위까지 가열되면서 G' 값이 지속해서 감소하는 FBC와는 다른 양상을 나타내었다. 이는 FBC-음이온성 검 혼합물을 DIW와 혼합하여 현탁액 제조 시 음이온성 검이

빠르게 수화되며 점도를 발달시켰고, 가열하며 점도가 낮아졌기 때문이다. 그러나 이 온도 범위 이후부터 모든 FBC-음이온성 검 혼합물의 G' 은 상승하기 시작하였고, 95°C 에서 5°C 로 냉각되며 급격히 상승하였다. FBC의 5%에 해당하는 음이온성 검을 첨가한 모든 FBC-음이온성 검 혼합물의 G' 값은 FBC보다 낮은 수준을 나타내었다. 이는 아마도 5%의 음이온성 검 첨가는 FBC와 음이온성 검 사이의 정전기적 복합체 형성하기에는 적은 첨가량인 것으로 생각되며 (Bakry et al., 2019; Chaux-Gutiérrez et al., 2019), 오히려 음이온성 검이 입체장애(steric hindrance) 효과를 나타내어 FBC의 연속적인 겔 구조 형성을 방해한 것으로 여겨진다. 또한

모든 FBC-음이온성 검 혼합물의 G' 값은 음이온성 검의 첨가량이 증가하며 증가하였다. 이는 음이온성 검 첨가량이 증가할수록 FBC와 음이온성 검 사이의 정전기적 복합체 형성이 견고해지며 FBC와 음이온성 검 사이의 상분리 현상이 발생하지 않음을 암시한다(Gorji et al., 2018; Bakry et al., 2019; Chaux-Gutiérrez et al., 2019; Hu et al., 2023). 한편 10%와 20%의 음이온성 검 첨가량에서 5°C에 도달한 FBC-음이온성 검 혼합물 겔의 G' 값은 FBC-GLG 혼합물 > FBC-λCA 혼합물 > FBC-NaA 혼합물 > FBC-LMA 혼합물 순서로 높았다. 전반적으로 FBC 증량의 20%에 해당하는 음이온성 검을 첨가한 FBC-음이온성 검 혼합물이 FBC보다 조직식물단백과 견고한 결합 구조를 형성할 수 있을 것으로 판단된다.

결착 시험

FBC와 FBC-음이온성 검 혼합물 각각은 수화된 조직식물단백(청크형)과 혼합하여 Fig. 1에 제시된 절차에 따라 햄버거 패티 형태로 제조하였다(Fig. 4A). FBC와 모든 FBC-음이온성 검 혼합물들은 조직식물단백을 뭉치게 하였고, 햄버

거 프레스를 이용하여 햄버거 패티 형태로 성공적으로 성형할 수 있었다. 성형한 햄버거 패티는 스팀 처리를 통해 FBC와 FBC-음이온성 검 혼합물을 겔화시켰다. 모든 햄버거 패티의 외관은 유사하였으나, 칼로 절단하였을 때 FBC 첨가 햄버거 패티는 거칠고 상대적으로 성근 단면을 보였다. 그러나 FBC-음이온성 검 혼합물에 의한 햄버거 패티는 FBC보다 매끄럽고 치밀한 단면을 나타내었다. 따라서 FBC-음이온성 혼합물이 FBC보다 조직식물단백의 결합에 더욱 적합한 것으로 판단된다. 이후 햄버거 패티는 재가열(B→FF), 냉장(B→RF) 및 냉장 후 재가열(B→RF→FF) 처리하였을 때도 스팀처리를 통해 결합한 초기의 햄버거 패티의 형상을 그대로 유지하여, FBC와 FBC-음이온성 검 혼합물은 식물성 결합제로서 잠재력이 큰 것으로 생각된다. 한편 FBC 계열 식물성 결합제가 조직식물단백 블록의 결합에도 유효한지를 조사하기 위해 스틱형(1 cm × 1 cm × 5 cm) 조직식물단백을 FBC-NaA 혼합물을 이용하여 Fig. 1의 절차에 따라 처리하여 조직식물단백 결합 구조물을 형성하였다(Fig. 4B). 스틱형 조직식물단백은 FBC-NaA 혼합물을 매개로 하여 성공적

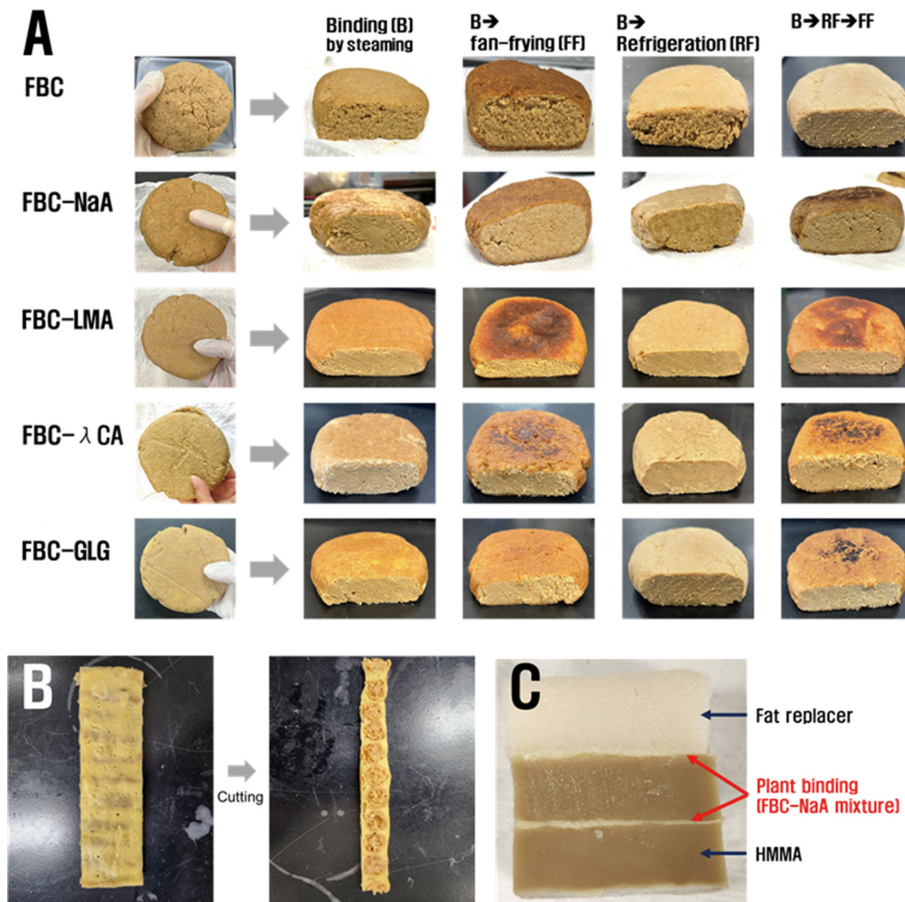


Fig. 4. Binding (A & B) and adhesion (C) tests of (A) minced textured vegetable protein (TVP), (B) TVP block, and (C) high-moisture meat analog (HMMA) and fat replacer using faba bean protein concentrate (FBC)-anionic gum (NaA, sodium alginate; LMA, low-methoxyl amidated pectin; λCA, λ-carrageenan; GLG, gellan gum) mixtures.

으로 결합되었으며, 형성된 결합 구조물을 칼로 절단하여도 결합된 조직식물단백 블록들이 분리되지 않고 결합 구조물 형태를 유지하였다. 게다가 FBC와 FBC-음이온성 검 혼합물이 조직식물단백 적층 구조물을 형성하는데 접착제로 이용할 수 있는지를 조사하였다(Fig. 4C). FBC를 물에 개어 고수분 조직식물단백(HMMA) 표면에 일정 두께로 바르고 다른 HMMA를 올려 스팀 처리했을 때 HMMA들 사이에 적층 구조물을 형성할 수 없었다. 그러나 FBC-음이온성 검 혼합물을 물에 개어 사용하였을 때는 HMMA들 사이에 적층 구조물을 형성하였고, 대체지방-HMMA도 성공적으로 적층 구조물이 형성됨을 알 수 있었다. 결과적으로 FBC-음이온성 검 혼합물은 식물성 접착제로의 잠재력이 가지는 것 같다.

조직식물단백 결합 구조물의 경도

Fig. 4A에 제시된 조직식물단백 결합 구조물의 결합 후 후처리에 따른 압착경도와 절단경도를 조사하여 각각 Table 4와 5에 제시하였다. 대조군은 햄버거 패티 형상의 시판중인 식물성 떡갈비로 하였고, 이것은 결합제로 메틸셀룰로스를 사용하였다. 조직식물단백 결합 구조물을 형성하기 위해 조직식물단백과 FBC 또는 FBC-음이온성 검 혼합물의 반죽을 햄버거 패티 형태로 성형하고 스팀 처리하여 조직식물단백 결합 구조물(B in Table 4 & 5)을 완성한 후 상온으로 식혀 경도를 측정하였을 때, 압착경도는 FBC-GLG 혼합물(54.4 N) > 대조군(53.2 N) > FBC-λCA 혼합물(43.8 N) > FBC-LMA 혼합물(43.4 N) > FBC-NaA 혼합물(26.7 N) > FBC (8.0 N)의 순서로 높았고, 절단경도는 대조군(11.0 N) > FBC-GLG 혼합물(5.3 N) > FBC-LMA 혼합물(4.8 N) ≈ FBC-NaA 혼합물(4.7 N) > FBC-λCA 혼합물(4.3 N) > FBC (2.2 N)의 순서로 높았다. 압착경도는 대조군과 FBC-GLG 혼합물이 유사하였고 나머지는 낮은 수준을 나타내었고, 절단경도는 대조군이 가장 높았으며 다른 것들은 유

Table 4. Hardness¹ (by a compression test) of textured vegetable protein (TVP) blocks prepared using FBC and FBC-anionic gum mixtures

Sample	Hardness (N)			
	B (by ST ²)	B→FF ²	B→RF ²	B→RF→FF
Control	53.2±1.1 ^a	54.2±1.8 ^b	64.2±1.9 ^c	165.3±3.4 ^a
FBC	8.0±0.3 ^d	9.2±0.7 ^c	62.8±1.0 ^c	41.0±0.4 ^d
FBC-NaA ³	26.7±1.7 ^c	38.9±1.5 ^c	35.3±0.4 ^d	33.8±1.9 ^c
FBC-LMA ³	43.4±2.5 ^b	30.7±1.0 ^d	86.8±4.5 ^a	46.3±1.4 ^c
FBC-λCA ³	43.8±2.7 ^b	36.2±1.1 ^c	58.8±1.6 ^c	48.1±1.8 ^c
FBC-GLG ³	54.4±2.7 ^a	87.9±4.1 ^a	80.9±2.8 ^b	72.4±2.5 ^b

¹Mean values of three replicate measurements; Values sharing the same lowercase letters within columns are not significantly different at $p < 0.05$.

²B, binding; ST, steaming; FF, fan-frying; RF, refrigeration.

³NaA, sodium alginate; LMA, low-methoxyl amidated pectin; λCA, λ-carrageenan; GLG, gellan gum.

Table 5. Hardness¹ (by a cutting test) of textured vegetable protein (TVP) blocks prepared using FBC and FBC-anionic gum mixtures

Sample	Hardness (N)			
	B (by ST ²)	B→FF ²	B→RF ²	B→RF→FF
Control	11.0±0.7 ^a	22.1±0.2 ^a	12.0±0.3 ^a	30.9±1.8 ^a
FBC	2.2±0.3 ^c	5.4±0.5 ^c	13.5±0.3 ^a	10.7±0.8 ^b
FBC-NaA ³	4.7±0.4 ^b	6.4±0.8 ^c	6.1±0.4 ^c	5.7±0.3 ^d
FBC-LMA ³	4.8±0.2 ^b	5.1±1.0 ^c	13.7±1.1 ^a	7.8±1.2 ^{cd}
FBC-λCA ³	4.3±0.2 ^b	9.1±0.8 ^b	7.6±0.5 ^{bc}	8.1±0.7 ^c
FBC-GLG ³	5.3±0.8 ^b	6.5±1.3 ^c	8.8±1.4 ^b	6.0±0.7 ^{cd}

¹Mean values of three replicate measurements; Values sharing the same lowercase letters within columns are not significantly different at $p < 0.05$.

²B, binding; ST, steaming; FF, fan-frying; RF, refrigeration.

³NaA, sodium alginate; LMA, low-methoxyl amidated pectin; λCA, λ-carrageenan; GLG, gellan gum.

의적으로 낮은 수준이었다. 스팀 처리한 식물성 햄버거 패티들은 fan-frying을 이용하여 재가열(B→FF in Table 4 & 5) 하였을 때, 압착경도는 대조군에서 큰 차이를 보이지 않았고, FBC, FBC-NaA 혼합물과 FBC-GLG 혼합물은 증가하였으며, FBC-LMA 혼합물과 FBC-λCA 혼합물은 감소하였다. FBC-GLG 혼합물은 대조군의 압착경도보다 유의적으로 높았으나, FBC와 다른 FBC-음이온성 검 혼합물은 여전히 대조군보다 낮은 수준이었다. 절단경도의 경우 재가열에 의해 대조군은 2배 이상 증가하였고, FBC와 모든 FBC-음이온성 검 혼합물도 역시 증가하였으나 대조군보다 여전히 낮은 수준이었다. 스팀 처리한 후 냉장 저장하였을 때(B→RF in Table 4 & 5), 압착경도는 모든 시료들에서 유의적으로 상승하였으나 FBC-NaA 혼합물에서 압착경도 상승이 가장 적었다. 절단경도는 냉장 저장 후 모두 상승하였으며, 대조군과 FBC-NaA 혼합물이 상대적으로 상승폭이 적었다. 스팀 처리하여 냉장 저장한 후 fan-frying을 이용하여 재가열하였을 때(B→RF→FF in Table 4 & 5), 대조군의 압착경도와 절단경도는 스팀 처리 직후보다 3배 이상의 상승하였다. FBC와 FBC-음이온성 혼합물의 경우도 스팀 처리 직후보다 압착경도와 절단경도가 모두 상승하였으나, 압착경도와 절단경도가 5배 이상 상승한 FBC를 제외한 모든 FBC-음이온성 혼합물들의 압착경도와 절단경도의 상승폭은 대조군과 FBC에 비해 현저히 낮은 수준이었다. 이상의 결과를 종합하면 FBC-NaA 혼합물을 이용한 조직식물단백 결합 구조물이 재가열, 냉장저장 및 냉장저장 후 재가열에 따른 질감특성 변화가 가장 적었다.

요 약

본 연구는 FBC와 FBC-음이온성 검 혼합물의 물리적, 열

적, 유연학적 및 결합 특성을 조사하여 식물성 대체육 개발 및 산업화에 이용할 수 있는 식물성 결합제를 개발하고자 하였다. FBC가 SPI보다 조직식물단백의 결합에 적합하였으나, FBC로 결합한 조직식물단백 블록은 경도가 낮아 작업 적성이 낮았다. 그래서 FBC의 물성을 개량하기 위해 음이온성 검을 FBC의 중량 대비 5-20% 첨가하여 FBC-음이온성 검 혼합물을 제조하고 이들의 특성을 분석하였다. WAI는 FBC에 NaA와 LMA를 첨가하며 낮아졌으나 λ CA와 GLG의 첨가는 높아졌다. WSI는 GLG를 제외한 음이온성 검을 첨가하며 낮아졌다. 용해도는 FBC에 음이온성 검의 첨가로 낮아졌으나, 팽윤력은 LMA를 제외한 음이온성 검을 FBC에 첨가하며 높아졌다. 용융개시온도와 용융최고온도는 음이온성 첨가로 FBC보다 상승하였으나 용융종결온도는 FBC와 큰 차이를 보이지 않았다. 열유변학적 특성에 있어 FBC와 FBC-음이온성 검 혼합물은 모두 열겔화 특성을 보였고, FBC-GLG 혼합물이 가장 높은 G' 값을 나타내었다. FBC와 FBC-음이온성 검 혼합물들은 청크형과 스틱형 조직식물단백을 성공적으로 결합시켰고, FBC-음이온성 검 혼합물들은 HMMA와 대체지방을 서로 접착할 수 있었다. FBC와 FBC-음이온성 검을 이용한 조직식물단백 결합 구조체는 재가열 시 FBC-LMA 및 FBC- λ CA 혼합물들을 제외하고 압착경도를 상승시켰고, 절단경도는 모든 처리군에서 재가열에 의해 상승하였다. 또한 냉장저장 및 냉장저장 후 재가열 시 압착경도와 절단경도는 결합 직후에 비해 상승하였다. 그렇지만 FBC-NaA 혼합물이 대조군(상업적 식물성 떡갈비), FBC 및 다른 FBC-음이온성 검 혼합물에 비해 재가열, 냉장저장 및 냉장저장 후 재가열에 따른 압착경도와 절단경도의 변화를 최소화하였다. 모든 결과를 고려할 때, FBC-음이온성 검 혼합물은 조직식물단백을 결합하는 식물성 결합제로 잠재력을 보유하고 있으며, 특히 FBC-NaA 혼합물은 재가열과 저장 및 유통 조건과 관계없이 식물성 대체육의 질감 특성 변화를 최소화할 수 있어 상용화 가능성이 가장 높은 식물성 결합제인 것으로 판단된다. 또한 FBC-NaA 혼합물은 식물성 대체육의 결합제로 보편적으로 사용되고 있는 메틸셀룰로스를 대체할 수 있는 소재인 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 기술사업화지원(R&D)사업(과제번호 RS-2022-IP122051)의 지원을 받아 연구되었습니다. 또한 본 연구는 2024년 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

An DH. 2019. Development and change of alternative meat. J.

Korean Soc. Food Sci. Nutr. 24: 1-6.
 Bae JE, Hong JS, Baik MY, Choi HD, Choi HW, Kim HS. 2020. Impact of starch granule-associated surface and channel proteins on physicochemical properties of corn and rice starch. Carbohydr. Polym. 250: 116908.
 Bakry AM, Huang J, Zhai Y, Huang Q. 2019. Myofibrillar protein with κ - or λ -carrageenans as novel shell materials for microencapsulation of tuna oil through complex coacervation. Food Hydrocolloid. 96: 43-53.
 Bühler JM, Dekkers BL, Bruins ME, Van der Goot AJ. 2020. Modifying faba bean protein concentrate using dry heat to increase water holding capacity. Foods. 9: 1077.
 Chaux-Gutiérrez AM, Pérez-Monterroza EJ, Mauro MA. 2019. Rheological and structural characterization of gels from albumin and low methoxyl amidated pectin mixtures. Food Hydrocolloid. 92: 60-68.
 Cho CJ, Lim HW, Kim BS, Jung HW, Park SK. 2022. Current status of research and market in alternative protein. Food and Life. 2022: 9-18.
 Gorji EG, Waheed A, Ludwig R, Toca-Herrera JL, Schleining G, Gorji SG. 2018. Complex coacervation of milk proteins with sodium alginate. J. Agric. Food Chem. 66: 3210-3220.
 Hoek AC, Luning PA, Weijzen P, Engels W, Kok FJ, De Graaf C. 2011. Replacement of meat by meat substitutes. A survey on person- and product-related factors in consumer acceptance. Appetite. 56: 662-673.
 Herz E, Herz L, Dreher J, Gibis M, Ray J, Pibarot P, Schmitt C, Weiss J. 2021. Influencing factors on the ability to assemble a complex meat analogue using a soy-protein binder. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 73: 102806.
 Herz E, Kinne T, Terjung N, Gibis M, Weiss J. 2023. Influence of extrudate to SPI-gel-binder ratios and transglutaminase crosslinking on texture of a plant-based salami analogue. Future Foods. 7: 100235.
 Hu X, Zhou H, McClements DJ. 2023. Impact of dispersion conditions and coacervation on fibril formation in gellan gum-potato protein mixtures. Food Hydrocolloid. 145: 109153.
 Ibanoglu E. 2005. Effect of hydrocolloids on the thermal denaturation of proteins. Food Chem. 90: 621-626.
 Jo HH, Kim YJ, Hwang J. 2023. Cultured meat: Recent advancements and technological challenges. Food Sci. Ind. 56: 162-174.
 Kim H. 2018. Effect of Duduk (*Codonopsis lanceolata* Radix) on the quality of beef hamburger patties. Korean J. Community Living Sci. 29: 507-519.
 Kwon TE, Kim YH. 2019. Food technology trends with alternative proteins. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr. 24: 7-14.
 Lee HJ, Jo CH. 2019. Trends in the development of alternative meat in the world. World Agriculture. 223: 51-67.
 Lee CH, Kim ME, Yang Y, Son YJ, Lee JA, Lyu ES, Jung UJ, Kang B, Lee SG. 2021. Optimization of the salt content in fish surimi ink for food 3D printing. Korean J. Food Sci. Technol. 53: 29-33.
 Malek L, Umberger WJ, Goddard E. 2019. Committed vs. uncommitted meat eaters: Understanding willingness to change protein consumption. Appetite. 138: 115-126.
 Morris ER, Nishinari K, Rinaudo M. 2012. Gelation of gellan-A

- review. *Food Hydrocolloid*. 28: 373-411.
- Multari S, Stewart D, Russell WR. 2015. Potential of fava bean as future protein supply to partially replace meat intake in the human diet. *Compr. Rev. Food Sci.* 14: 511-522.
- Nivala O, Nordlund E, Kruus K, Ercili-Cura D. 2021. The effect of heat and transglutaminase treatment on emulsifying and gelling properties of faba bean protein isolate. *LWT-Food Sci. Technol.* 139: 110517.
- Park SK. 2021. Current status of technologies for producing protein alternative foods. *Food Sci. Anim. Resour.* 10: 4-15.
- Park SW, Lee J, Kim HS. 2024. Physicochemical property of protein-fortified rice flour using *Bacillus subtilis*-fermented faba bean protein concentrate and chickpea flour. *Food Eng. Prog.* 28: 41-52.
- You GY, Yong HI, Yu MH, Jeon KH. 2020. Development of meat analogues using vegetable protein: A review. *Korean J. Food Sci Technol.* 52: 167-171.

Author Information

- 배시연:** 경기대학교 일반대학교 식품생물공학과 석사
양선혜: 경기대학교 일반대학원 식품생물공학과 석사과정
김현석: 경기대학교 바이오융합학부 식품생물공학전공 교수