

Nutritional analysis of amino acid composition and zinc bioavailability in plant-based meats

Seohyun Kang, Solmin Lee, Min Seo Chang, Soorin Kim, Young-gyun Lim,
Yujin Kim, and Wonhyeong Jang*

¹Department of Chemistry Education, Seoul National University, Gwanak-ro 1, Seoul 08826, Korea
(Received February 4, 2024; Revised May 1, 2024; Accepted May 13, 2024)

대체육의 아미노산 조성 및 아연 생체 이용률의 영양학적 분석

강서현 · 이솔민 · 장민서 · 김수린 · 임영균 · 김유진 · 장원형*

서울대학교 화학교육과

(2024. 2. 4. 접수, 2024. 5. 1. 수정, 2024. 5. 13. 승인)

Abstract: This study aimed to assess whether plant-based meat substitutes can effectively replace animal meat products in terms of amino acid composition and zinc bioavailability. The evaluation was conducted in response to the growing demand for meat substitutes, driven by the increasing vegan population and the expansion of vegan culture. For this purpose, a chicken product and two plant-based meat substitutes in tender form were selected. The amino acid content and composition were measured using HPLC, while the levels of trace elements like zinc and calcium were determined through ICP-AES. Additionally, the presence of phytic acid, which inhibits zinc bioavailability, was extracted and quantified using UV-Vis spectroscopy. The results were analyzed in the context of daily product consumption. The findings revealed that certain essential amino acids, such as valine and lysine, were found to be deficient in plant-based meat substitutes compared to animal meat products. It was challenging to meet the recommended daily intake of these amino acids solely through the use of meat substitutes. Regarding zinc bioavailability, the inhibitory effect of calcium on zinc bioavailability was expected to be minimal. The zinc bioavailability of the meat substitutes varied significantly depending on the zinc and phytic acid content of the ingredients. Therefore, ingredients of plant-based meat substitutes should be carefully modulated to reach appropriate zinc bioavailability by selecting and processing plant materials with high zinc and low phytic acid content.

요약: 본 연구는 비건 인구의 증가 및 비건 문화의 확대에 발맞추어 대체육 제품에 대한 시장의 요구가 커짐에 따라, 대체육의 영양학적인 부적합의 가능성이 제시된 아미노산 조성 및 아연 생체 이용률의 측면에서 대체육 제품이 동물성 육류 제품을 영양학적으로 대체할 수 있는지 평가하고자 수행되었다. 텐더 형태의 동물성 계육 제품 1종과 대체육 제품 2종을 선정하여 HPLC를 통한 아미노산 함량 및 조성

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)2-880-4012 Fax : +82-(0)2-889-0749

E-mail : arize14@snu.ac.kr

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.

측정, ICP-AES를 이용한 아연, 칼슘 등의 미량 원소 함량 측정, 아연 생체 이용률 저해 화학종인 피트산의 침전 추출 및 UV-Vis 분석을 통한 정량을 수행하고, 측정 결과를 실제 제품 섭취의 맥락에 맞추어 적용, 분석하였다. 연구 결과, 대체육 제품에서 valine, lysine 등 일부 필수 아미노산 함량이 동물성 육류 제품에 비해 부족하고, 제품을 통해 권장 섭취량을 달성하기 어려운 것으로 나타났다. 아연 생체 이용률의 경우, 칼슘에 의한 아연 생체 이용률 저해는 유의미하지 않을 것으로 분석되었으며, 같은 대체육이라 하더라도 제품 원재료의 아연 함량, 피트산 함량에 따라 낮은 단계에서부터 높은 단계까지 다양한 아연 이용률을 보였다. 따라서 아연 함량이 높고 피트산 함량이 낮은 식물성 원재료를 선정, 적절히 가공함으로 적절한 아연 생체 이용률을 달성하는 대체육 제품을 생산할 수 있을 것으로 보인다.

Key words: veganism, meat substitutes, essential amino acids, zinc bioavailability

1. 서 론

비거니즘(veganism)이란 육류, 어류, 어패류, 유제품 및 난류 등의 모든 동물성 식품을 배제하는 식습관을 의미한다.¹ 비거니즘에 동참하는 비건(vegan) 인구는 빠르게 증가하는 추세이며, 식품 시장에 큰 영향력을 행사하고 있다. 전 세계 비건 식품 시장 규모는 2030년에 654억 달러로 평가되었으며 2022년부터 2030년까지 연평균 10.41% 규모로 성장할 것으로 예측된다.² 그러나 일각에서는 비거니즘 식단에 대한 영양적 불균형에 대한 우려 또한 제기되고 있다. 단백질, 철분, 칼슘, 아연 등의 일부 무기질 미량 영양소들은 일반적인 잡식성 식습관에서 주로 동물성 식품을 통해 섭취된다고 알려져 있는데, 이러한 영양소들이 동물성 식품을 배제하는 비거니즘 식단을 통해 필요한 양만큼 섭취되기는 어렵다는 것이다.³

이러한 비건 인구의 수요에 따라 식물성 원료를 사용하여 동물성 육가공품의 성질을 모방한 식물성 대체육 제품이 개발되었다. 대체육은 곤충, 미생물, 배양, 식물성, 해조류를 기반으로 한 5개 유형으로 구분될 수 있는데, 이들 중 대체식품 시장을 주도하는 것은 식물성 대체육이라고 볼 수 있다.⁴ 식물성 대체육의 경우 개발 초기에는 우육을 모사하고자 하는 시도가 주로 이루어졌으나 계속적의 섬유 가닥을 재현하는 기술이 발달된 이후로는 식물성 대체육 업계를 중심으로 세계적으로 소비가 가장 많은 가금류 식품 시장으로의 진출이 이루어지는 추세이다.⁵ 대체식품 시장 규모는 2016년 이후 연평균 세계 9.5%, 국내 15.7% 규모로 지속적인 성장세를 보이고 있다.^{6,7} 이러한 덕분에 비건의 평균적인 단백질 섭취량은 잡식성 식습관을 가진 사람과 마찬가지로 일일 섭취 권장량을 상회하는 것으로 나타난다.⁸ 또한, 대부분의 식물성 식품이

9종의 필수 아미노산을 포함한 20종의 아미노산을 모두 함유하고 있는 것으로 알려져 있다.

하지만, 식물성 식품은 동물성 식품에 비하여 인간 신체 대사에 최적화되지 못한 아미노산 조성을 나타내는 것으로 알려져 있다.⁸ 예컨대 곡물 속 lysine은 필요 섭취량보다 유의미하게 적은 비율을 나타내며, 황을 포함한 아미노산인 methionine이나 cysteine은 콩류에서 적정량보다 낮은 조성을 나타낸다.⁸ 잡식성 식습관을 가진 성인 남성 집단과 비거니즘 식습관을 가진 성인 남성 집단의 혈장 속 아미노산 농도를 비교 분석한 연구에 따르면, 잡식성 식습관을 가진 사람에 비하여 비거니즘 식습관을 가진 사람에게서 필수 아미노산 9종 중 6종(lysine, methionine, leucine, valine, tryptophan, isoleucine)의 농도가 더 낮게 나타났으며, 그중 lysine, methionine, leucine, tryptophan에 대하여 아미노산 섭취량과 혈장 속 농도 사이의 유의미한 상관관계가 나타났다.⁹ 이러한 아미노산 조성 불균형 중 비거니즘 식습관을 가진 사람들이 적게 섭취하는 것으로 나타난 valine의 결핍은 조혈모세포 재생을 저해할 수 있으며, lysine의 부족은 성장 저해, 빈혈, 어지러움, 식욕 부진, 불안, 피로 등 다양한 증상의 원인으로 작용할 수 있다.^{10,11} 또한, methionine 부족은 지방간, 성장 부진, 부종이나 피부 병변 등 다양한 악영향을 발생시킬 수 있다.¹²

또 다른 비거니즘 식단의 한계점은 동물성 식단에 비해 철분, 칼슘, 아연 등의 무기질 미량 영양소가 부족해진다는 것이다. 이 중에서도 아연은 식물성 식품에 풍부하게 포함되어 있는 피트산(phytic acid, 이하 PA)의 작용에 의해 식품에 함유된 것보다 더 적은 양만이 체내로 흡수되므로 더욱 결핍 문제가 발생하기 쉽다. 실제로 비건의 일일 아연 섭취량은 잡식성 식습관을 가진 집단보다 평균적으로 1.5 mg 적다는 사실

이 다양한 채식 단계에 대한 메타 분석 연구를 통해 알려져 있다.¹ 이 차이는 국내의 일일 아연 섭취 권장량이 남성 10 mg, 여성 8 mg 내외인 것을 고려할 때 유의미한 차이라고 할 수 있다.¹³ 뿐만 아니라 비건의 혈청 속 아연 농도가 잡식성 식습관을 가진 집단에 비해 1 $\mu\text{mol/L}$ 이상 낮았다는 연구 결과도 제시된 바 있다.¹

아연의 결핍은 식욕 부진이나 성장 지연을 유발하며, 수포-농포성 피부염, 인후염, 탈모증, 정신장애, 세포 매개 면역능력 저하로 인한 반복적 감염, 간과 비장의 중량 감소의 원인으로 작용한다.¹⁴ 따라서 채식주의 식단에 의한 아연 섭취량을 조사하는 연구가 이루어질 필요성이 있으며, 이 과정에서 식품에 포함된 아연 대비 체내로 흡수 후 생명 활동에 이용되는 아연의 비율인 '생체 이용률'을 함께 고려할 필요가 있다.¹⁵ 각 식품에서의 아연 생체 이용률을 확인하기 위한 척도로는 세계 보건 기구(WHO)가 제시한 PA/아연의 물비가 있다. WHO는 PA/아연 비율이 5보다 작은 경우 높은 이용률, 5~15인 경우 중간 이용률, 15보다 큰 경우 낮은 이용률로 구분하였다.¹⁶

이렇듯 대체육 제품의 식물성 원료가 갖는 영양학적 한계와 대체육 제품이 추후 식품 시장에 미칠 영향력을 고려하였을 때, 대체육 제품을 대상으로 기본 영양성분 및 개별 영양성분을 분석하는 연구가 필요함을 알 수 있다. 이를 통해 타 비거니즘 식단의 식물성 식품에서 나타났던 영양학적 한계가 대체육 제품 내에서는 개선되었는지 점검하고 평가할 필요가 있다. 관련 선행 연구에서는 대체육 제품 13종과 동물성 육가공품 16종에 대한 기본 영양성분(열량, 탄수화물, 단백질, 지방, 나트륨, 콜레스테롤)과 무기질(칼슘, 철, 칼륨, 아연, 마그네슘)의 함량을 분석하였다. 특히 단백질과 지방 함량의 경우 지방산의 조성 및 개별 지방산의 함량, 필수/비필수 아미노산의 조성 및 개별 구성 아미노산의 함량까지 상세히 분석하여 제시하였다.¹⁷ 그러나 해당 연구에는 비교 분석 대상인 동물성 육가공품에 특정 아미노산이 공통적으로 부족할 경우 대체육 제품의 적절한 비교 대상이 되지 못한다는 한계점이 있다. 아연 함량 분석 또한 아미노산 함량 분석과 마찬가지로 동물성 육가공품과 대체육 제품의 절대적인 함량 비율만은 바탕으로 분석하였으며, 생체 이용률을 고려하지 않아 아연의 체내 실 흡수량을 정확히 비교할 수 없다는 문제가 있었다.

본 연구에서는 동물성 육류 1종과 대체육 2종에 대해서 아미노산 조성을 분석하고, 아연, 칼슘, PA의 함

량을 측정하였다. 아미노산 함량 분석에서는 보건복지부가 제시한 영양 성분 기준표를 바탕으로 각 제품에 대하여 필수 아미노산 권장량 충족 여부와 필수 아미노산의 상대적인 조성을 평가하였다. 아연 함량 분석에서는 WHO가 제시한 기준인 PA/아연의 물비를 이용하여 각 대체육 제품의 아연 생체 이용률을 구하고, 절대적인 아연 함유량과 함께 고려하여 평가에 반영하였다. 칼슘의 경우 식물성 식품에 부족한 또 다른 미량 영양소일 뿐 아니라, PA와 동시에 유의미한 농도로 존재할 때 칼슘에 의해 PA의 아연 생체 흡수 억제 효과를 증대시킬 수 있기 때문에 측정하여 평가에 반영하였다.^{11,16} 이러한 분석을 통해 시판 대체육 제품군이 실제 육류 제품군에 준하는 적절한 영양학적 조성을 갖추고 있는지를 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시약 및 기구

2.1.1. 시료 및 시약

동물성 육류로 (주)코코푸드의 '크리스피 안심 텐더한 마리'를, 대체육으로 비온드 미트 사의 '비온드 치킨 텐더'와 풀무원 사의 '식물성 지구식단 like 텐더'를 선정하여 분석하였다. '크리스피 안심 텐더 한 마리'(이하 시료 M)의 경우 국내산 안심으로 제조되었다. '비온드 치킨 텐더'(이하 시료 A1)의 경우 잠두단백을 주 성분으로 하며 밀글루텐, 압착카놀라유, 변성옥수수전분 등이 포함되었다. '식물성 지구식단 like 텐더'(이하 시료 A2)의 경우 대두를 이용하여 제조한 고단백겔두부를 주 성분으로 하며 식물성유지, 옥수수전분, 대두유 등이 포함되었다. 모든 시료는 제품 표면의 튀김옷을 제거한 후 내부 육류에 해당하는 부분만을 사용하였으며, 막자사발과 막자를 이용해 균질화 과정을 수행하였다. 본 연구에 사용한 시약은 perchloric acid (Daejung, 70.0~72.0%), potassium carbonate (Sigma-Aldrich, 99.0%), hydrochloric acid (Daejung, 35.0~37.0%), trichloroacetic acid (Thermo Scientific, 99%), iron (III) chloride hexahydrate (Sigma-Aldrich, 97%), sodium sulfate (Daejung, 99.0%), sodium hydroxide (Samchun, 98.0%), nitric acid (Daejung, 60%), potassium thiocyanate (Daejung, 99.0%), iron (III) nitrate nonahydrate (Daejung, 99.0%), hydrofluoric acid (Sigma-Aldrich, ACS reagent 48%)이다.

2.1.2. 분석기구 및 분석조건

푸리에 변환 적외선 분광기 (FT-IR)은 ALPHA II

(Bruker)를 활용하였다. 측정은 $4000\sim400\text{ cm}^{-1}$ 범위에서 감쇠 전반사 (ATR) 측정법을 통해 이루어졌으며, 투과도 (transmittance, %)에 대한 정규화 (normalization)을 실시하였다. 고성능 액체 크로마토그래피 (HPLC)는 서울대학교 농생명과학공동기기원에 소재한 Ultimate 3000 (Thermo Scientific)을 활용하였다. 전처리를 위해 샘플 1 g에 0.1 M perchloric acid + 0.1% meta phosphoric acid buffer 50 mL를 가한 뒤 1시간 동안 초음파 처리 후 1시간 동안 상온에서 shaking하였으며, 이렇게 추출된 아미노산 0.2 μL 를 필터 후 분석하였다. 분석조건인 경우 0.1 N HCl에 1 nmol/ μL 로 용해된 17종의 아미노산 표준품을 사용하였으며, 3차 증류수를 활용해 1000, 500, 100, 10 pmol/ μL 농도로 희석하여 표준곡선을 작성하였다. 또한 검출기로는 fluorescence detector를 사용하였으며 가드 컬럼으로는 Supelco 40 μm C18 column (50 mm \times 4.6 mm I.D.), 분석 컬럼으로는 Supelco 3 μm C18 column (150 mm \times 4.6 mm I.D.)를 사용하였다. 이동상으로는 pH 7의 40 mM sodium phosphate dibasic과 함께 증류수, acetonitrile, methanol을 10:45:45 부피비로 혼합한 용액을 사용하였다. Flow rate는 0.5 $\mu\text{L}/\text{min}$ 였으며 컬럼의 온도는 40 $^{\circ}\text{C}$, 샘플의 온도는 20 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지되었다. 자외선-가시광선 분광기 (UV-Vis)는 GENESYS 10S (Thermo Scientific)를 활용하였다. 측정은 200~800 nm 범위에서 이루어졌으며, 바탕 시료로는 증류수를 사용하였다. 유도결합플라즈마 원자방출분광기(ICP-AES)는 서울대학교 기초과학공동기기원에 소재한 OPTIMA 8300 (Perkin-Elmer)을 활용하였다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 아미노산 작용기 및 조성 분석

아미노산 작용기 및 조성 분석은 선행 연구의 방법을 변형하여 수행하였다.¹⁸ 분석 물질 5 g을 동결분쇄기(6875D, SPEX)로 분쇄 후 0.9 g을 취하여 1.5 M perchloric acid 4.5 mL를 가하고 초음파 분산 처리하였다. 이후 2 M potassium carbonate 0.75 mL를 가하여 7830 rpm에서 5분간 원심분리하고 상층액을 제거하였다. 여기서 얻어진 침전을 얇게 펴 25 $^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간 건조하여 펠릿을 제조하고 FT-IR 분석을 수행하였다. 이후 침전 250 mg를 6 M hydrochloric acid 10 mL와 혼합하여 초음파 분산 처리하였다. 이 용액에 1분 동안 Ar 기체를 주입하여 용존 산소를 제거한 후 밀폐 용기에서 110 $^{\circ}\text{C}$ 로 총 24시간 가열하였다. 가열 시작 후 2시간과 19시간이 지난 시점에 침전이 모두 부유하도록

부드럽게 혼합하였다. 가열 종료 후 용액을 100 mL로 희석하고, membrane filter로 여과하여 HPLC 분석을 실시하였다.

2.2.2. PA 정량을 활용한 아연의 생체이용률 분석

본 연구에서 활용한 PA 정량법은 식물성 식품 시료 내에 Fe^{3+} 와 반응하여 침전을 형성하는 물질이 PA 외에는 유의하지 않음을 가정한다.¹⁹⁻²² PA 외에 Fe^{3+} 와 반응하여 Fe 생체 이용률을 저해하는 물질에는 대표적으로 oxalic acid와 polyphenol이 있다.²³ 분석한 제품의 원재료 성분을 바탕으로 oxalic acid 함량을 추산한 결과 PA 정량 결과에 유의미한 영향을 줄 수준에는 도달하지 않았다.^{19,20} Polyphenol의 경우 일반적으로 알코올과 같은 극성 유기 용매를 이용하여 추출하며, 본 연구에서 사용한 수용액 추출 조건에서는 매우 낮은 추출률을 보인다.^{24,25} 또한 폴리페놀과 Fe^{3+} 가 착물을 형성하더라도 주로 상층액에 머물 뿐, pH 1에서 5% 이하의 침전 생성률을 보이기 때문에 역시 분석에 유의한 영향을 미치지 못할 것으로 판단하였다.²¹

Fe^{3+} 를 활용한 PA 정량 분석은 선행 연구의 방법을 변형하여 수행하였다.²⁶ 단백질을 PA를 분리한 뒤, 분리된 PA에 Fe^{3+} 를 가하여 PA를 침전시키고, 충분한 세척 과정을 거쳐 불순물을 제거해준 뒤 염기를 가하여 모든 Fe^{3+} 를 침전시켰다. 이후 산을 가하여 침전을 용해시키고, potassium thiocyanate을 지시약으로 활용하여 UV-Vis 정량을 수행하였다.

세부적으로는, 각각의 분석 물질을 70 $^{\circ}\text{C}$ 오븐에서 4시간 건조한 후, 믹서기를 이용하여 약 40 mesh 크기의 입자를 갖도록 분쇄하였다. 분쇄된 시료들을 5 g 씩 측정하여 비커에 담아 준비하였다. 다음으로 trichloroacetic acid 용액을 제조하고 pH를 0에서 1 사이의 범위로 조정하였다. 이후 시료가 담긴 비커에 trichloroacetic acid 용액 50 mL를 가하여 교반하며 45분간 추출하였다. 침전을 제외한 추출액을 바이알에 담아 10분간 7830 rpm에서 원심분리하고, 상층액 10 mL를 시료별로 별개의 바이알에 옮겨 담았다. 이후 iron (III) chloride hexahydrate 4 mL (2 mg Fe^{3+}/mL , 용매 pH 0.72 trichloroacetic acid) 용액을 각 바이알에 첨가하고, 혼합된 용액을 45분간 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 물중탕하였다. 이때, 침전 생성을 가속하기 위하여 물중탕 개시로부터 30분이 경과한 시점에서 3% sodium sulfate 용액 3방울을 가하였다. 모든 침전 용액을 담아 10분간 7830 rpm에서 원심분리하고, 상층액을 제거하였다. 이후 획득한 침전에 FT-IR 분석을 수행하였다. 이어서

침전을 앞서 제조한 trichloroacetic acid 25 mL에 잘 분산시켜 세척하고, 10분간 물중탕 하였다. 이후 15분간 7830 rpm에서 원심분리하였다. 그 다음 상층액을 제거하여 trichloroacetic acid를 이용한 세척, 물중탕 및 원심분리 과정을 1회 더 반복하였다. 침전을 증류수로 세척하고, 30 mL의 증류수와 1.5 M sodium hydroxide 3 mL에 가하였다. 혼합 용액을 30분간 물중탕한 뒤 깔때기와 여과지를 이용하여 용매를 제거한 뒤 여과지에 60 mL의 뜨거운 증류수를 부어 침전을 세척하고 여과액을 제거하였다. 이어서 침전을 100 mL 플라스크로 옮기고 뜨거운 3.2 M nitric acid 용액 40 mL를 가한 후 증류수를 가하여 100 mL 용액을 제조하였다. 이후, 다른 100 mL 부피 플라스크에 시료 용액 5 mL, 1.5 M potassium thiocyanate 20 mL를 혼합하여 눈금까지 끓힌 후 1분 내로 UV-Vis 분석을 수행하였다. 바탕 시료는 용액 5 mL를 potassium thiocyanate 용액의 투입 없이 100 mL로 끓힌 것을 사용하였다. 검정 곡선은 iron (III) nitrate nonahydrate를 이용하여 제조한 10^{-4} , 4×10^{-5} , 2×10^{-5} , 1.25×10^{-5} M Fe^{3+} 표준 용액을 바탕으로 작성하였다. 마지막으로 순수한 phytic acid에 과량의 iron (III) chloride hexahydrate를 가하여 Fe-PA 침전을 형성시키고, FT-IR 분석을 수행하였다.

2.2.3. ICP-AES 분석을 통한 원소 함량 측정

Ca과 Zn의 함량을 측정하기 위하여 시료 M, A1, A2를 각각 hydrofluoric acid로 전처리하였다. 세부적으로는, 흡 후드 내에서 각 시료를 20 mg 취하여 플라스틱 용기에 담은 뒤 100 μ L hydrofluoric acid를 가하여 완전히 용해시켰다. 이후 hydrofluoric acid 용액을 조심스럽게 유리 용기에 옮긴 뒤 DI water, 70% nitric acid를 1:1 부피비로 혼합한 용액 20 mL를 첨가하여 유리 용기의 뚜껑을 열고 가열하며 hydrofluoric acid가 충분히 기화되도록 하였다. 용액이 약 2 mL 정도 남았을 때 가열을 멈추고 증류수를 첨가하여 끓힌 후 ICP-AES 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. FT-IR을 통한 아미노산 작용기 분석

동물성 육류와 대체육 사이에 유의미한 아미노산 작용기의 차이가 있는지 확인하기 위하여 FT-IR을 활용한 분석을 수행하였다. Fig. 1은 순서대로 동물성 육류 시료 M, 대체육 시료 A1과 A2로 제작한 펠릿의

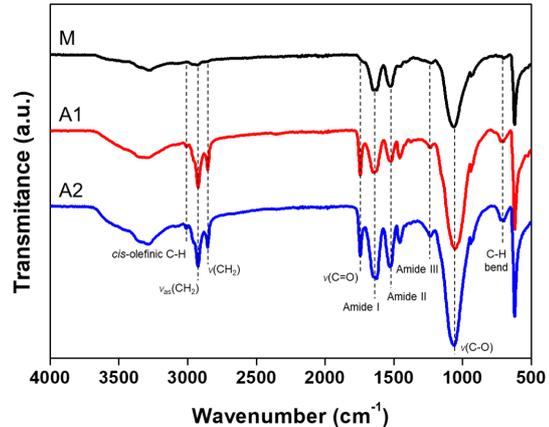


Fig. 1. FT-IR spectra of animal meat (M) and plant-based meat (A1, A2).

FT-IR 분석 결과이다. 세 시료에 공통적으로 나타나는 1633 cm^{-1} , 1523 cm^{-1} , 1234 cm^{-1} , 1052 cm^{-1} 피크는 순서대로 단백질의 amide I mode, amide II mode, amide III mode, 핵산의 C-O 신축에 대응된다.^{27,28} Amide I mode는 주로 C=O 신축에 기인하며, amide II mode는 N-H 평면 내 굽힘과 CN 신축의 out-of-phase 조합에서 대부분 유래한다. Amide III mode는 N-H 굽힘과 CH 신축의 in-phase 조합에서 주로 기인한다.²⁷ 시료 M에서는 잘 나타나지 않으나 대체육 시료 A1과 A2에서는 상대적으로 강하게 드러나는 3006 cm^{-1} , 2923 cm^{-1} , 2856 cm^{-1} , 1745 cm^{-1} , 1445 cm^{-1} , 720 cm^{-1} 피크는 순서대로 cis-olefinic C-H, CH_2 비대칭 신축, CH_2 대칭 신축, 콜레스테롤이나 triglyceride ester C=O 신축, CH_2 굽힘, CH_2 요동 및 C-H 굽힘에 대응된다.²⁷ 단백질과 핵산 유래 피크는 세 시료 모두에서 뚜렷하게 나타난 반면, 지방을 구성하는 지방산의 긴 탄화수소 사슬이나 triglyceride 유래 피크는 대체육 시료에서만 주로 나타났다. 이렇듯 지방산과 관련된 작용기의 경우 대체육에 불가결하게 포함된 식물성 유지로부터 유래하였을 것으로 보인다.

3.2. HPLC를 통한 아미노산 조성 분석

동물성 육류와 대체육 사이에 유의미한 아미노산 조성 차이가 있는지 확인하기 위하여 HPLC를 활용한 분석을 수행하였으며 Fig. 2에 HPLC의 크로마토그램을, Fig. 3과 Table 1에 아미노산의 종류에 따른 검량 곡선과 검량곡선에 대한 정보를 나타내었다.

Table 2는 HPLC 분석 결과 및 분석 결과를 바탕으로 계산한 제품 속 각 아미노산의 함량을 나타낸다. 20종

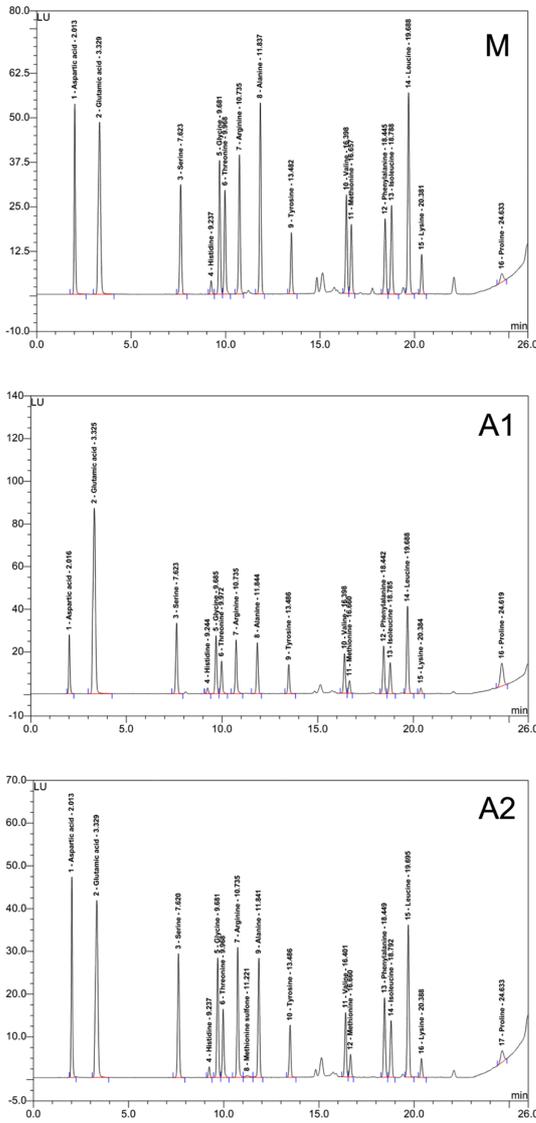


Fig. 2. HPLC Chromatogram of animal meat (M) and plant-based meat (A1, A2).

의 단백질 구성 아미노산 중 asparagine과 glutamine, tryptophan은 감지되지 않았는데, 산성 가수분해 과정에서 asparagine과 glutamine은 각각 aspartic acid와 glutamic acid로 변환되고 tryptophan은 파괴되기 때문이다.¹⁸ 아미노산 조성 비율 분석 결과 glutamic acid와 proline을 제외한 모든 아미노산에서 동물성 육류가 대체육보다 더 높은 함량을 보였다. 특히 분석된 필수 아미노산 8종 중 phenylalanine, histidine을 제외한 threonine, valine, methionine, isoleucine, leucine, lysine에서 동물성 육류와 대체육 사이의 함량 차이가 크게 나

Table 1. Calibration data of amino acids

	Retention time (min)	R ²	Slope
Aspartic acid	2.02	0.99999	0.0516
Glutamic acid	3.35	0.99997	0.0450
Serine	7.64	0.99997	0.0764
Histidine	9.27	0.99752	0.0193
Glycine	9.71	0.99994	0.1156
Threonine	10.00	0.99948	0.0660
Arginine	10.77	0.99994	0.0535
Alanine	11.89	0.99998	0.0945
Tyrosine	13.53	0.99973	0.0487
Valine	16.46	0.99986	0.0851
Methionine	16.72	0.99999	0.0688
Phenylalanine	18.52	0.99994	0.0595
Isoleucine	18.86	0.99986	0.0792
Leucine	19.78	0.99998	0.0797
Lysine	20.46	0.99845	0.0236
Proline	24.72	0.99866	0.0815

타났다. 이는 선행 연구와도 유사한 결과로, 해당 6종 중 threonine을 제외한 valine, methionine, isoleucine, leucine, lysine의 5종은 선행 연구에서 비건 집단의 혈장 속 농도가 낮다고 언급된 아미노산과 일치한다.⁹

Table 2에서 필수 아미노산 threonine, valine, methionine, isoleucine, leucine, lysine 6종의 함량이 동물성 시료보다 대체육 시료에서 현저히 적음을 확인하였다. 보건복지부에서 2020년 발간된 한국인 영양소 섭취 기준을 바탕으로 대체육 섭취를 통하여 해당 6종 아미노산의 일간 섭취 권장량을 만족하려면 제품을 얼마만큼 요구하는지 Table 3에 나타내었다.¹³ 분석한 제품으로만 아미노산을 섭취한다 가정하였을 때, 동물성 육류(M)의 경우 250~500 g 정도의 양에서 권장량을 충족할 수 있었다. 그러나 대체육(A1, A2)은 특히 valine과 lysine에 대해 필요량이 1 kg 이상 요구되는 등 높은 섭취 필요량을 보였다. 실제 식생활에서는 분석한 제품 이외의 식품으로도 단백질을 섭취할 것이므로 실질적인 섭취 필요량은 분석보다 적겠지만, 그 점을 고려하더라도 대체육 제품의 섭취 필요량은 큰 것으로 분석되었다.

Table 4는 보건복지부의 영양소 섭취 기준을 바탕으로, 단백질 100 g을 섭취할 때 각 아미노산을 몇 g씩 섭취해야 적절한지를 계산하여 분석된 결과와 비교한 것으로, 각 필수 아미노산의 상대적인 조성이 적절한지 평가하고자 하였다. 동물성 제품(M)에서는 분석 기준 기반 값보다 측정된 아미노산 함량이 더 높았다.

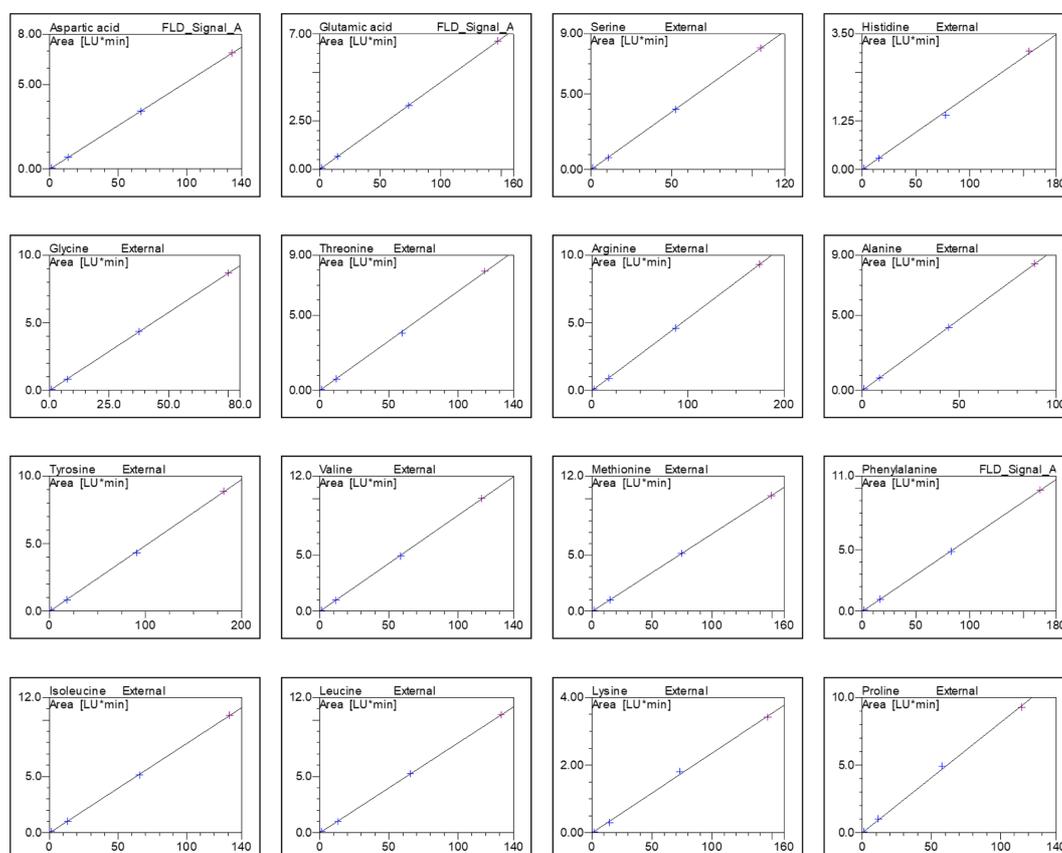


Fig. 3. Calibration curve of amino acids.

Table 2. HPLC analysis of animal meat (M) and plant-based meat (A1, A2)

	Concentration (mg/L)			Amino acid composition (wt%)		
	M	A1	A2	M	A1	A2
Threonine	43.7887	23.2154	24.3343	0.54	0.26	0.27
Valine	33.4436	22.4852	18.1842	0.41	0.25	0.2
Methionine	29.6746	8.8985	7.9475	0.37	0.10	0.09
Isoleucine	34.0556	19.7187	17.9289	0.42	0.22	0.2
Leucine	77.7708	55.6841	48.6805	0.96	0.62	0.54
Lysine	47.7891	11.7797	19.2711	0.59	0.13	0.21
Phenylalanine	37.7615	39.7836	33.1676	0.47	0.45	0.37
Histidine	18.1493	13.2211	12.1306	0.22	0.15	0.14
Aspartic acid	78.5868	39.7872	68.2757	0.97	0.45	0.76
Glutamic acid	156.0947	285.0819	135.6099	1.92	3.20	1.51
Serine	41.5206	44.8418	39.3823	0.51	0.50	0.44
Glycine	32.6794	23.5885	24.3041	0.4	0.26	0.27
Arginine	70.8946	47.7342	56.1347	0.87	0.54	0.63
Alanine	56.18	25.012	29.6068	0.69	0.28	0.33
Tyrosine	34.3897	27.4929	24.5034	0.42	0.31	0.27
Proline	5.5115	25.0161	6.3437	0.07	0.28	0.07

Table 3. Required amount for each product to reach the recommended amino acid daily intake (g/day)

	M	A1	A2
Threonine	247	512	492
Valine	419	1537	1731
Methionine	250	262	316
Isoleucine	290	550	609
Leucine	289	443	510
Lysine	478	2132	1312

Table 4. Amino acid composition ratio based on nutrient intake criteria

	Recommended amino acid intake per protein 100 g (g)	Amino acid intake per protein 100 g (g)		
		M	A1	A2
Threonine	2.29	5.49	3.25	4.28
Valine	2.63	4.19	3.15	3.20
Methionine	2.00	3.72	1.25	1.4
Isoleucine	2.09	4.27	2.76	3.16
Leucine	4.74	9.74	7.81	8.57
Lysine	4.83	5.99	1.65	3.39

그러나 대체육 제품(A1, A2)에서는 methionine과 lysine의 상대적 함량이 권장보다 낮은 것으로 나타났다. 특히 시료 A1의 경우 lysine이 권장 비율의 34%만을 섭취하여 lysine의 섭취가 특히 제한됨을 알 수 있었다.

종합하자면, Table 3에서 아미노산의 절대적인 섭취 권장량을 기준으로 분석하였을 때는 valine과 lysine이 부족하였고, Table 4에서 상대적인 함량을 기준으로 비교하였을 때는 methionine과 lysine이 부족한 것으로 나타났다. Valine 부족은 조혈모세포 재생을 저해할 수 있으며, lysine 부족은 성장 저해, 빈혈, 어지러움, 식욕 부진, 불안, 어지럼증, 피로 등 다양한 증상의 원인이 될 수 있다.¹⁰ 또 methionine 부족은 지방간, 성장 부진, 부종이나 피부 병변 등 다양한 악영향을 발생시킬 수 있다.¹² 이를 통해 생산 차원에서 특히 해당 세 아미노산의 함량 조정이 필요함을 알 수 있었다.

3.3. 아연의 생체이용률 분석

각 대체육 시료의 아연 생체이용률을 확인하기 위하여 Fe³⁺의 침전을 활용한 정량 분석을 수행하였다. 시료 M의 경우 육류 시료이므로 아연의 함량이 충분하며, PA가 포함되지 않은 시료이기에 PA 함유를 실험 과정을 통하여 확인하기 어렵다. 실제로 침전을 통한 PA 함유가 확인되지 않았으므로 해당 연구에서는

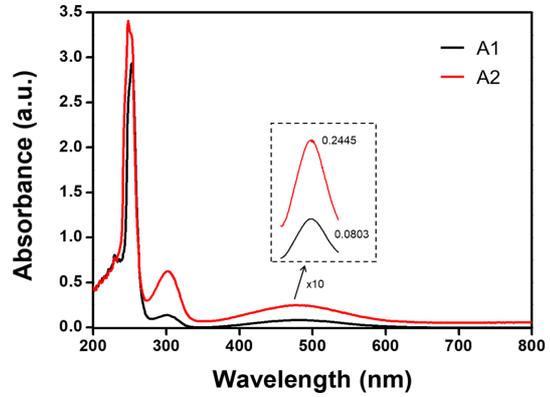


Fig. 4. UV-Vis spectra of plant-based meat (A1, A2) derived solution.

Table 5. Phytic acid content in plant-based meat (A1, A2) calculated by UV-Vis analysis

	Absorbance	Concentration of phytic acid (M)	Phytic acid content in product (wt%)
A1	0.0803	2.269×10^{-6}	0.3186
A2	0.2445	6.908×10^{-6}	0.9700

Table 6. Content of trace elements (Zn, Ca) measured by ICP-AES and PA/Zn ratio by sample

	M	A1	A2
Zn (wt%)	0.0031	0.0041	0.0059
Ca (wt%)	0.0482	0.1006	0.2431
PA/Zn ratio	-	7.71	16.29

시료 M에 대한 결과를 나타내지 않았다. Fig. 4는 시료 A1과 A2 유래 용액의 UV-Vis 분석 결과를 나타낸 그래프이다.

UV-Vis로 확인한 FeSCN²⁺의 흡수 피크는 480 nm에서 나타나며 이때의 흡광도 값은 시료 A1 유래 용액이 0.0803, 시료 A2 유래 용액이 0.2445였다. 이를 바탕으로 각 시료에서 PA의 질량 백분율을 계산한 결과를 Table 5에 나타냈다. 계산 과정에서 Fe³⁺와 PA의 평균적인 결합 비율을 4:1로 가정하였다.²⁶ 각 제품 내 PA의 질량 백분율은 시료 A1에서 0.3186%, 시료 A2에서 0.9700%로 시료 A1이 A2보다 3.045배 낮은 질량 백분율을 나타냈다.

Table 6은 시료별 미량 원소의 함량과 PA/아연의 물비를 나타낸 것이다. 미량 원소 함량은 ICP-AES로 측정된 분석 시료 내 각 미량 원소의 ppm 농도(mg/L) 값을 가공 전 제품을 기준으로 한 질량 퍼센트(wt%)

로 변환한 것이다. PA/아연의 몰비는 식품 속 아연의 생체 이용률을 평가하기 위해 세계보건기구가 제시한 지표로써, 앞서 Table 3에 나타낸 분석 시료별 PA의 함량 퍼센트를 바탕으로 계산하였다.

아연과 칼슘 모두 식물성 원료를 이용한 시료 A1, A2에서의 함량이 동물성 시료 M보다 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 특히 시료 A2에서 칼슘 함량이 높은 것으로 나타났는데, 시료 A2에서는 시료 A1의 주재료인 잠두에 비해 높은 칼슘 함량을 보이는 대두를 주재료로 활용하였기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 보인다.²⁹ 칼슘의 일일 섭취량이 1 g에 달할 경우 아연 생체 이용률에 부정적 영향이 나타난다는 선행 연구 결과를 고려하여 칼슘을 1 g 얻기 위해 섭취해야 하는 제품의 총질량을 계산하였을 때, 그 값은 각각 시료 M이 2074.69 g, 시료 A1이 994.04 g, 시료 A2가 411.35 g이었다. 모든 시료에서 칼슘 함량이 아연 함량에 비해 높게 나타났지만, 해당 제품들이 80~100 g 범위의 1회 제공량을 설정하고 있다는 점을 고려하면 제품의 단독적인 섭취에 의한 칼슘의 아연 생체 이용률 저해 효과는 거의 나타나지 않을 것으로 보인다.

세계보건기구가 제시한 기준에 따라 대체육 시료 2종의 아연 생체 이용률 단계를 추산하기 위하여 PA/아연 몰비를 계산한 결과 시료 A1의 경우 중간 아연 생체 이용률 단계인 5~15 사이의 값인 7.71의 몰비를 보인 반면, 시료 A2의 경우 낮은 아연 생체 이용률 단계의 경계값인 15를 넘어서는 수치인 16.29의 몰비를 보여 아연 생체 이용률이 높지 않은 것으로 나타났다. 즉 아연의 절대 함량이 시료 A1에 비하여 더 높은 시료 A2의 경우에서 실질적인 생체 내 아연 이용률이 더 낮은 것으로 나타났음을 알 수 있다. 두 제품 간의 차이는 시료 A1의 주재료인 잠두가 콩류 식품 중 특히 낮은 PA 함량을 나타내기 때문에 발생하는 것으로 볼 수 있다.^{30,31} 즉 같은 콩과 계열의 식물을 주재료로 하여 제조한 식물성 원료 대체육 제품이라 하더라도 아연과 PA의 양을 조절함에 따라 다양한 범위의 아연 생체 이용률이 나타날 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 대체육 제품이 동물성 육류 제품을 영양학적으로 대체할 수 있는지 평가하기 위해 동물성 계육을 사용한 제품 1종과 대체육 제품 2종을 아

미노산 함량 및 조성 측면과 아연 생체 이용률 측면에서 분석하고 영양학적 조성을 확인하였다. 아미노산 함량 분석 결과 glutamic acid와 proline을 제외한 모든 종류의 아미노산에서 동물성 육류 제품이 대체육 제품보다 높은 함량을 보였다. 특히, 필수 아미노산인 threonine, valine, methionine, isoleucine, leucine, lysine에 있어 동물성 육류 제품에서의 함량과 대체육 제품에서의 함량 간 비교적 큰 차이가 나타났다. 또한 한국인 영양소 섭취 기준을 바탕으로 아미노산 권장 섭취량을 만족하기 위해 요구되는 절대적인 제품 섭취량과 상대적인 아미노산 종류 별 섭취 권장 비율 충족 수준을 계산하여 분석한 결과, 대체육 제품 섭취를 통해 valine과 lysine의 권장 섭취량을 만족시키기 어려운 것으로 나타났다. Valine 부족은 조혈모세포 재생을 저해할 수 있으며, lysine 부족은 성장 저해, 빈혈, 어지러움, 식욕 부진, 불안, 어지럼증, 피로 등 다양한 증상의 원인이 될 수 있으므로 생산 차원에서 두 아미노산의 함량 증대가 필요할 것이다. 소비자의 관점에서는 valine과 lysine 모두 주로 식물보다는 육류에 많이 포함되어 있기 때문에 육류 섭취를 완전히 금지하지 않는 플렉시테리언이라면 육류 섭취량을 부분적으로만 대체육 섭취로 바꾸는 대안을 선택할 수 있다. 해산물까지 섭취하는 페스코 베지테리언은 두 아미노산의 섭취량을 늘리는 데에 효과적인 식품인 멸치를 식단에 도입하는 방안도 고려할 수 있다. 완전한 비건 식습관을 유지한다면, 곡류보다는 대두와 같은 콩류의 섭취를 늘림으로써 valine과 lysine을 보충하여야 할 것이다.

아연 생체 이용률의 측면에서는 아연의 절대량뿐만 아니라 칼슘, PA 등 아연의 생체 이용률을 저하시킬 수 있는 화학종들의 함량도 함께 확인하였다. 아연과 칼슘 모두 절대적인 함량이 동물성 육류 제품에서보다 대체육 제품에서 높게 나타났다. 모든 제품군에서 칼슘은 아연에 비해 높은 함량을 보였으나, 아연 생체 이용률을 저해할 정도의 칼슘을 섭취하기 위해서는 세 제품 모두에서 1회 제공량을 크게 넘어서는 양의 제품을 섭취해야 하는 것으로 나타났다. 따라서 칼슘의 아연 이용률 저해 효과는 크지 않을 것으로 보인다. 마지막으로, PA/아연 몰비를 통해 평가한 아연 생체 이용률은 두 대체육 제품 모두 WHO 기준으로 높지 않은 것으로 나타났다. 더 많은 아연이 함유된 대체육 시료가 오히려 낮은 아연 생체 이용률을 보였는데, 이는 아연의 함량과 아연 생체 이용률이 별도로 고려되어야 할 수치임을 분명히 하는 결과라 할 수

있다. 같은 콩과 계열의 식물성 원재료를 사용한 대체육 제품 간에서도 원재료의 PA 함량에 따라 상당한 아연 생체 이용률 차이가 나타났다는 점을 고려하였을 때, PA 함량이 적은 식물성 원재료를 파악하고 선별하는 과정이 대체육 제품의 영양학적 가치 결정에 있어 중요하다는 결론을 내릴 수 있다. 즉, 앞으로의 대체육 제품 제조 과정에서 식물성 원재료의 PA 함량을 면밀하게 조사하고 적용할 원재료를 신중히 선택하는 작업이 강조되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 4단계 두뇌한국 BK21 ‘인포스피어 과학교육연구단’의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

1. M. Foster and S. Samman, *Adv. Food. Nutr. Res.*, **74**, 93-131 (2015). <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2014.11.003>
2. Precedence Research. Vegan Food Market (By Product: Dairy Alternative, Meat Substitute, Others; By Distribution Channel: Offline Channels, Online Channels) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2022-2030. [cited 2023 Nov 11]. Available from: <https://www.precedenceresearch.com/vegan-food-market>.
3. Ş. Akbulut and B. Yeşilkaya, *Sağ. Aka. Derg.*, **8**(2), 163-168 (2021).
4. S. Y. Byun and D. I. Yoo, *Kor. J. Agr. Econ.*, **63**(4), 1-26 (2022). <https://doi.org/10.24997/KJAE.2022.63.4.1>
5. The Hankyoreh, Alternative Meat Market Expands To Chicken Beyond Beef [cited 2021 July 20]. Available from: <https://www.hani.co.kr/arti/science/future/1004220.html>
6. H. J. Park, H. I. Oh, J. Y. Yang, J. E. Oh, N. E. Kang, and M. S. Cho, *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.*, **49**(3), 270-278 (2020). <https://doi.org/10.3746/jkfn.2020.49.3.270>
7. J. Y. Lim and S. Y. Jin, *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.*, **50**(8), 849-857 (2021). <https://doi.org/10.3746/jkfn.2021.50.8.849>
8. F. Mariotti and C. D. Gardner, *Nutrients*, **11**(11), 2661-2679 (2019). <https://doi.org/10.3390/nu11112661>
9. J. A. Schmidt, S. Rinaldi, A. Scalbert, P. Ferrari, D. Achaintre, M. J. Gunter, P. N. Appleby, T. J. Key, and R. C. Travis, *Eur. J. Clin. Nutr.*, **70**(3), 306-312 (2016). <https://doi.org/10.1038/ejcn.2015.144>
10. Y. Taya, Y. Ota, A. C. Wilkinson, A. Kanazawa, H. Watarai, M. Kasai, H. Nakauchi, and S. Yamazaki, *Science*, **354**(6316), 1152-1155 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aag3145>
11. N. Mollakhalili-Meybodi, L. Mirmoghtadaie, Z. Sheidaei, and A. M. Mortazavian, *Curr. Nutr. Food Sci.*, **15**(7), 450-457 (2021). <https://doi.org/10.2174/1573401316999201001145814>
12. C. Tapia-Rojas, C. B. Linsay, C. Montecinos-Oliva, M. S. Arrazola, R. M. Retamales, D. Bunout, S. Hirsch, and N. C. Inestrosa, *Mol. Neurodegener.*, **10**, 1-17 (2015). <https://doi.org/10.1186/s13024-015-0057-0>
13. Ministry of Health and Welfare, The Korean Nutrition Society. Dietary reference intakes for Koreans 2020. 2020 [cited 2023 June 5]. Available from: https://www.kns.or.kr/FileRoom/FileRoom_view.asp?idx=108&BoardID=Kdr-373:131480.
14. J. S. Park and J. H. Chyun, *Kor. J. Nutr.*, **26**, 1110-1117 (1993).
15. M. Maares and H. Haase, *Nutrients*, **12**(3), 762-803 (2020). <https://doi.org/10.3390/nu12030762>
16. World Health Organization (WHO). Trace elements in human nutrition and health. Geneva: WHO, 1996.
17. I. S. Jeong, J. J. Kim, J. M. Lee, D. H. Lee, S. G. Kim, S. Y. Lee, and K. H. Park, *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.*, **52**(3), 276-290 (2023). <https://doi.org/10.3746/jkfn.2023.52.3.276>
18. Z. Dai, Z. Wu, S. Jia, and G. Wu, *J. Chromatogr. B*, **964**, 116-127 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2014.03.025>
19. L. K. Massey, R. G. Palmer, H. T. Horner, *J. Agric. Food Chem.*, **49**(9), 4262-4266 (2001). <https://doi.org/10.1021/jf010484y>
20. R. Siener, R. Hönow, A. Seidler, S. Voss, and A. Hesse, *Food Chem.*, **98**(2), 220-224 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.059>
21. S. Chethan and N. G. Malleshi, *Food Chem.*, **105**(2), 862-870 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.02.012>
22. R. Siener, A. Seidler, and R. Hönow, *Food Sci. Technol.*, **41**, 169-173 (2020). <https://doi.org/10.1590/fst.10620>
23. E. Piskin, D. Cianciosi, S. Gulec, M. Tomas, and E. Capanoglu, *ACS Omega*, **7**(24), 20441-20456 (2022).

- <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01833>
24. C. M. Librán, L. Mayor, E. M. Garcia-Castello, and D. J. Vidal Brotos, *Agric. Sci.*, **4**(9), 56-62 (2013). <https://doi.org/10.4236/as.2013.49B010>
25. T. Wiyono, R. Nurhayati, E. R. N. Herawati, and U. Laila, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **462**(1), 012029 (2020). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/462/1/012029>
26. E. L. Wheeler and R. E. Ferrel, *Cereal Chem.*, **48**(3), 312-320 (1971).
27. A. Barth, *Biochim. Biophys. Acta*, **1767**(9), 1073-1011 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.bbabbio.2007.06.004>
28. K. Candoğan, E. G. Altuntas, and N. İğci, *Food Eng. Rev.* **13**, 66-91 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09251-y>
29. H. F. Erbersdobler, C. A. Barth, and G. Jahreis, *Ernaehrungs Umsch. Int.*, **64**, 134-139 (2017). <https://doi.org/10.4455/eu.2017.034>
30. E. Carnovale, E. Lugaro, and G. Lombardi-Boccia, *Cereal Chem.*, **65**(2), 114-117 (1988).
31. D. B. Thompson and J. W. Erdman Jr., *Food Sci.*, **47**(2), 513-517 (1982). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb10114.x>

Authors' Positions

Seohyun Kang	: Undergraduate Student
Solmin Lee	: Undergraduate Student
Min Seo Chang	: Undergraduate Student
Soorin Kim	: Undergraduate Student
Young-gyun Lim	: Undergraduate Student
Yujin Kim	: Undergraduate Student
Wonhyeong Jang	: Graduate Student