Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 3, pp. 241-246, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.3.241

Original article

감마선 조사에 따른 커피박에서 생리활성 물질의 추출 수율 및 활성 비교

Dan He[1] · 최종일[2,*]

[1]치치하얼대학교 생명과학 및 농림대학, [2]전남대학교 생물공학과

Effect of Gamma Irradiation of Spent Coffee Grounds on Extraction Yield and Activity of Extractant

Dan He[1] and Jong-il Choi[2,*]

[1]College of Life Science and Agriculture Forestry, Qiqihar University, Qiqihar, 161006, Heilongjiang, China
[2]Department of Biotechnology and Bioengineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea

ABSTRACT This study aimed to explore the industrial potential of spent coffee grounds (SCG) as high-value functional materials by applying gamma irradiation. The effects of gamma irradiation on the extraction yield and bioactivity of functional components were comprehensively evaluated. Results showed that the protein extraction yield from irradiated SCG significantly increased in a dose-dependent manner, with over 26% improvement compared to the non-irradiated control. Furthermore, the extracted proteins exhibited enhanced antioxidant activity, with 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging capacity increasing by approximately 27% at the same concentration. Moreover, the content of phenolic compounds, key bioactive substances in SCG, also rose significantly with increasing irradiation dose, showing up to a 38% increase in extraction yield. These findings demonstrate that gamma irradiation can physically and chemically enhance the extraction of functional components from SCG, offering a promising strategy to elevate its value as a material for functional foods or cosmetics.

Key words: Spent Coffee Grounds, Irradiation, Proteins, Phenolic Compounds

1. 서 론

커피는 세계에서 가장 널리 소비되는 기호식품 중 하나로, 매일 약 20억 잔 이상이 전 세계적으로 소비되고 있다. 그러나 커피 소비의 증가는 동시에 막대한 양의 커피박(Spent Coffee Grounds, SCG)을 유발하며, 이는 환경적·산업적 측면에서 새로운 도전과 기회를 동시에 제시하고 있다. 커피박은 커피 원두를 추출하거나 인스턴트 커피를 제조하는 과정에서 발생하는 고형 부산물로, 커피 가공산업의 불가피한 부산물로 간주된다. 국제커피기구(International Coffee Organization)에 따르면, 전 세계 커피 생산량을 기준으로 연간 약 600만 톤 이상의 커피박이 발생하며, 이들 대부분은 폐기물로 처리되고 있는 실정이다[1]. 국내 상황 역시 마찬가지로, 커피 소비량의 지속적인 증가에 따라 커피박 발생량이 빠르게 늘고 있다. 실제로 통계청 및 환경부 자료에 따르면, 한국인의 1인당 연간 커피 소비량은 약 405잔으로, 이는 세계 평균인 약 160잔에 비해 2.5배 이상 많은 수치이다. 이에 따라 국내 커피박 발생량도 2018년 약 31만 6천 톤에서 2020년 약 35만 3천 톤으로 매년 꾸준히 증가하고 있다[2].

이처럼 대량으로 발생하는 커피박은 환경적 부담 요인으로 작용할 수 있으며, 특히 매립 또는 소각 처리 시 온실가스 배출, 토양 오염, 악취 발생 등의 환경 문제를 초래할 수 있다. 하지만 커피박은 단순한 폐기물이 아니라 고부가가치의 바이오 자원으로 활용될 수 있는 잠재력을 지닌 물질이다. 이는 커피 추출 후에도 다량 잔존하는 다양한 유효 성분들, 특히 생리활성 화합물 덕분이다. 여러 연구에 따르면, 커피박은 단백질, 페놀 화합물(phenolic compounds), 카페인, 클로로겐산(chlorogenic acid), 식이섬유, 지방산 등 다양한 생리활성 물질을 함유하고 있으며, 이들은 항산화, 항균, 항염증, 미백, 항암 등 다양한 건강 기능성을 나타낼 수 있다[1-3].

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Jong-il Choi
Tel: +82-62-530-1846, E-mail: choiji01@jnu.ac.kr

Received 5 August 2025 **Revised** 12 August 2025 **Accepted** 20 August 2025

커피에 존재하는 단백질은 일반적으로 커피 원두 내 전체 구성 성분 중 약 10~13%를 차지하는 비교적 적지 않은 비율의 성분이며, 이들은 단순한 영양소로서의 역할을 넘어 항산화 활성, angiotensin-converting-enzyme (ACE) 억제 활성, 항염증 등의 여러가지 생리활성 기능을 가지고 있다고 알려져 있다[4]. 또한, 페놀계 화합물은 커피박에 가장 풍부하게 존재하는 기능성 물질로, 이들은 활성산소(reactive oxygen species, ROS)를 제거하는 라디칼 소거 능력이 뛰어나며, 인체 내 산화 스트레스 완화에 기여할 수 있다[5]. 이러한 연구 결과들은 커피박이 단순한 폐기물이 아니라, 식품첨가물, 기능성 화장품 원료, 제약 보조소재 등 다양한 산업 분야에서 활용될 수 있는 가능성을 열어주고 있다.

이러한 잠재력을 실현하기 위해서는 커피박에 존재하는 유효성분들을 효율적으로 추출하고, 그 생리활성을 유지하거나 증대시키는 기술이 필수적이다[6]. 기존에는 고온·고압을 활용한 열수추출법(hot-water extraction), 유기용매 추출법, 초음파 보조 추출법(ultrasound-assisted extraction), 효소 처리법 등이 주로 사용되었으며, 이들 각각의 방법은 추출 수율, 에너지 효율, 시간 소요, 성분의 안정성 측면에서 차이를 보인다. 그러나 최근에는 보다 효율적이고 친환경적인 추출을 위해 방사선 조사(radiation treatment)가 주목받고 있다.

방사선 조사는 감마선(γ-ray), 전자선(e-beam) 또는 X선 등을 이용하여 식품이나 바이오 소재에 에너지를 전달함으로써 물리적·화학적 변화를 유도하는 기술이다. 이 기술은 식품의 영양학적 손상을 최소화하면서도 병원성 미생물 제거, 저장성 향상, 기능성 성분의 안정화 및 추출 효율 증진에 효과적이라는 점에서 식품 및 의약, 화장품 산업 전반에 걸쳐 폭넓게 적용되고 있다[7]. 특히, 고분자 구조를 가진 생리활성 물질의 구조 변형을 통해 용해도 향상 및 세포 흡수율 개선 등 기능성을 향상시킬 수 있다는 연구 결과들이 보고되고 있다[8]. 최근에는 방사선 조사가 폴리페놀, 플라보노이드, 당류 등 기능성 성분의 추출 수율을 향상시키는 데 효과적이라는 연구가 증가하고 있으며, 이는 기존 물리·화학적 추출법에 비해 환경적·경제적 장점도 지닌다.

이에 본 연구에서는 방사선 조사 기술을 커피박에 적용함으로써 생리활성 물질의 추출 효율 향상 및 기능성 증대 가능성을 탐색하고자 한다. 구체적으로는, 방사선 조사 선량이 커피박으로부터 추출되는 단백질 및 페놀 화합물의 수율에 미치는 영향을 평가하고, 이 후 추출물의 항산화 활성 변화 여부를 분석함으로써 커피박의 고부가가치 자원화 가능성을 규명하는 것을 목표로 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 커피박 감마선 조사

본 실험에서 사용된 커피박은 광주광역시 소재의 커피 전문점에서 제공받아 사용하였다. 사용된 커피의 품종은 Arabica 종이다. 커피 입자의 크기는 대략 300~700 μm 정도이며 수분 함량은 약 65%이다. 제공된 커피박은 상온에서 건조하여 향후 실험을 위해 보관하였다. 감마선 조사는 전라북도 정읍에 위치한 한국원자력연구원 첨단방사선연구소에서 진행하였다. 방사선 연구소 내 선원 10만 Ci의 cobalt-60 감마선 조사 시설(point source AECL, IR-79, MDS Nordin International Co., Ltd., Ottawa, ON, Canada)을 이용하여 실온에서 시간당 10 KGy의 선량률로 각각 0, 10, 30, 50 kGy의 총 흡수선량을 얻도록 하였다. 흡수선량 확인은 알라닌 방사선량계(alanine dosimeter, Bruker Instruments, Rheinstetten, Germany)를 사용하였다.

2.2. 커피박에서의 단백질 추출

감마선 조사된 커피박은 건조 후 다음의 방법으로 단백질을 추출하였다[4]. 지질 성분을 제거하기 위해 건조된 커피박 100 g을 헥산 1 L를 이용해 담금 처리한 뒤, 혼합물을 상온에서 16시간 동안 교반기(Vari-Mix, ThermoFisher, USA)를 이용하여 교반하였다. 그 다음, 시료를 15,000 × g에서 15분간 원심분리하였으며, 침전물은 다음의 순서로 원심분리 세척을 진행하였다: 먼저 아세톤에 녹인 트리클로로아세트산(trichloroacetic acid) 10% (w v^{-1}) 용액 20 mL로 세척한 후, 메탄올 80% (v v^{-1})에 녹인 0.2 mol L^{-1} 아세트산암모늄(ammonium acetate) 용액으로 세척하고, 아세톤 80% (v v^{-1})로 최종 세척을 진행하였다. 모든 세척 단계는 동일한 원심분리 조건(15,000 × g, 15분)을 적용하였고, 상등액이 무색으로 될 때까지 이 과정을 반복하였다.

단백질 추출을 위해, 최종 침전물(약 1 ± 0.1 g)을 추출 완충용액 I [0.01 mo L^{-1} $CaCl_2$, 0.01 mol L^{-1} $MgCl_2$, 0.001 mol L^{-1} PMSF] 20 mL에 재현탁시킨 후, 상온에서 12시간 동안 교반하였다. 그 후, 시료를 4°C에서 15,000 × g로 30분간 원심분리하여 상등액을 회수하였다. 남은 침전물은 추출 완충용액 II [0.1 mol L^{-1} Tris-HCl (pH 8.0), 0.17 mol L^{-1} $NaCl_2$, 0.001 mol L^{-1} PMSF, 0.01 mol L^{-1} EDTA] 10 mL와 혼합하여 8시간 동안 반응시킨 후, 동일한 원심분리 조건으로 상등액을 다시 회수하였다. 두 번의 추출에서 얻어진 상등액은 혼합하였다. 이 혼합 상등액으로부터 단백질을 침전시키기 위해, −20°C에서 8시간 동안 0.1 mol L^{-1} 아세트산암모늄이 포함된 메탄올 용액(2배 부피)을 첨가하였으며, 이후 4°C에서 3,000 × g로 10분간 원심분리하여 단백질 침전물을 회수하였다. 회수된 단백질 침전물은 순수 메탄올로 세척한 후, 아세톤 80% (v v^{-1})로 다시 세척하고, 용매를 제거하기 위해 건조하였다. 건조된 단백질 침전물은 탈이온수 1 mL에 재현탁시켜 4°C에서 3일간 증류수로 투석(dialysis)하였다. 건조된 단백질의 무게를 측정하여 건조된 커피박의 질량에 대한 추출된 단백질의 질량을 백분율(%)로 나타내었다.

2.3. 커피박에서의 페놀 화합물 추출

감마선 조사된 100 g의 커피박을 정량하여 500 mL 삼각플라스크에 넣고 300 mL ethyl acetate를 부은 후에 상온에서 24시간

정치하였다. 여과를 통하여 여과액과 찌꺼기를 분리하였고, 여과 후 남은 찌꺼기는 다시 300 mL ethyl acetate를 수용액을 가하여 동일한 방법으로 총 3회에 걸쳐서 추출을 하였다. 여과한 용액은 합하여 감압하에 로터리 농축기에서 농축하였고, 농축액은 더 이상의 정제과정 없이 실험에 사용하였다.

총 페놀 화합물 함량 측정은 Folin-Ciocalteu법에 따라 측정하였다 [9]. 추출한 시료는 100배 희석하여 실험에 사용하였다. 이 희석액 0.4 mL를 취하여 증류수 3.0 mL와 혼 합한 후에 Folin-Ciocalteu reagent 0.2 mL를 넣었고, 이 용액에 포화 Na_2CO_3 용액 0.4 mL를 넣고 강하게 저어준 다음 1시간 정치시켰다. 총 페놀 화합물 함량의 측정하기 위하여 UV spectrophotometer (UV-1280, Shimadzu Co., Kyoto, Japan)를 이용하여 725 nm에서 흡광도를 측정하였다. 총 페놀 화합물 함량의 산출은 표준물질로 gallic acid를 사용하여 표준 검량선을 구하였고, 검량선으로부터 총 페놀 화합물 함량을 gallic acid equivalents (GAE μg mL^{-1} extract)로 환산하였다.

2.4. DPPH 라디칼 소거능 측정

DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)의 free radical에 대한 추출 시료의 전자공여능 측정은 Lim 등[10]의 방법을 이용하여 측정하였다. 단백질의 DPPH 라디칼 소거능은 단백질의 농도를 1 g L^{-1}의 농도로 일정하게 희석한 시료로 진행하였다. 95% 에탄올에 용해시킨 0.2 mM DPPH 용액 4 mL에 시료 0.1 mL를 첨가하여 혼합한 후, 37°C의 항온조에서 30 min 동안 반응시켰다. 추출물의 전자공여능은 UV spectrophotometer를 사용하였으며, 517 nm에서 흡광도를 측정하였고, 전자공여능(%)은 다음 식에 의하여 구하였다.

전자공여능(%)
= [1 − (시료첨가군의 흡광도/시료무첨가군의 흡광도)] × 100

2.5. 통계처리

모든 실험결과는 Statistical Package for the Social Science Program (SPSS, version 21)을 사용하여 분산분석(one-way analysis of variance, ANOVA)을 실시하였고, 실험 분석은 3회 반복 해서 실행한 평균 ± 표준편차로 분석하였다. 통계적 유의성은 유의 수준 $p < 0.05$를 기준으로 분석하였으며, 대조군과의 비교에서 통계적 유의성이 확인된 경우 * 기호로 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 감마선 조사에 따른 단백질 추출 수율

감마선 조사에 따른 커피박에서의 단백질 추출 수율을 비교하였다. Fig. 1은 감마선 조사된 커피박에 대한 추출된 단백질의 함량을 나타낸 것이다. 감마선 조사하지 않은 대조구 커피박 경우 단백질의 추출 수율은 11.2% 였으나, 10 kGy의 흡수 선량으로 감마선 조사된 커피박에서 추출된 단백질의 함량은 13.1%, 30 kGy의 흡수 선량으로 감마선 조사된 커피박에서 추출된 단백질의 함량은 13.7%, 그리고 50 kGy의 흡수 선량으로 감마선 조사된 커피박에서 추출된 단백질의 함량은 14.1%로 나타났다. 즉, 커피박을 감마선 조사할 경우 감마선 조사에 따라 추출되는 단백질의 수율이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 감마선 조사에 따른 단백질등의 수율 증가는 이전의 선행 연구에서도 보고되었다. Khattak 등[11]의 선행 연구에서 Nigella sativa seed에 감마선을 조사할 경우 추출물의 추출 수율, DPPH 라디칼 소거능이 증가하였다고 보고 하였다. Abolhasani 등[12]의 연구에서도 Pistachio green hull을 감마선 조사함에 따라 추출물의 수율이 흡수선량에 따라 증가하였다. 최근에는 rice bran에 감마선 조사를 할 경우 추출되는 단백질의 함량이 증가하다는 결과도 보고되었다[13]. Sesame seed에서도 감마선 조사에 따라 albumins, globulins, prolamins 등의 단백질 수율이 증가한 결과가 확인되어졌다[14].

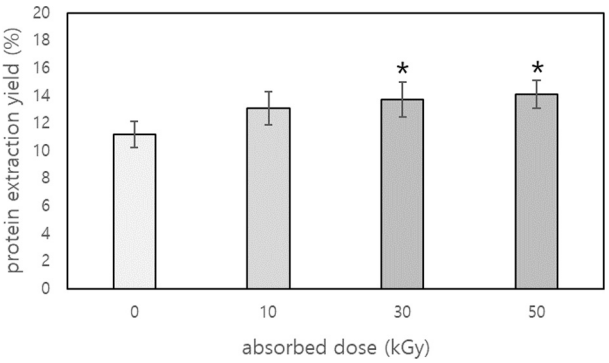

Fig. 1. Protein extraction yields (%) of spent coffee grounds at various doses of gamma-ray.

방사선 조사는 직접적인 효과와 간접적인 효과를 통해서 물질의 물리적, 화학적 변환을 야기한다고 알려져 있다. 때문에 커피박을 감마선 조사할 경우 커피박 내부에 있는 단백질들이 구조 변화를 일으켜 추출 수율이 증대된 것으로 사료된다. 하지만, 이러한 방사선 조사의 효과는 방사선 조사의 선량과 추출 용매 들에 따라 다르게 나타날 수 있는 것으로 알려져 있다[15]. 이러한 커피박의 감마선 조사에 따른 추출 수율의 영향뿐 만 아니라 추출된 단백질의 변형을 확인하기 위하여 추출된 단백질의 DPPH 라디칼 소거능을 측정하였다.

3.2. 단백질 추출물의 라디칼 소거능

Fig. 2은 감마선 조사된 커피박에서 추출된 단백질을 동일한 농도로 희석한 용액의 DPPH 라디칼 소거능을 나타낸 것이다. 감마선 조사하지 않은 대조구 커피박에서 추출된 단백질의 DPPH 라디칼 소거능은 19.8% 였으나, 10 kGy의 흡수 선량으로 감마선 조사된 커피박에서 추출된 단백질의 DPPH 라디칼 소거능은

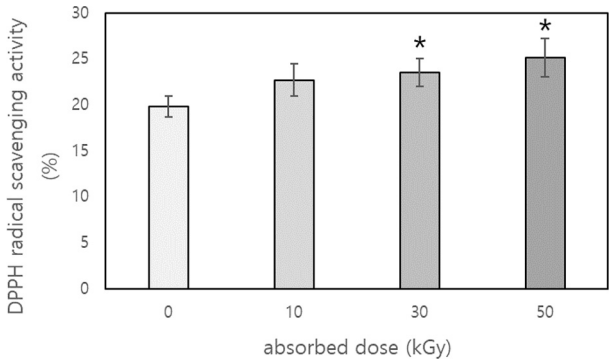

Fig. 2. DPPH radical scavenging activity (%) of protein extractants.

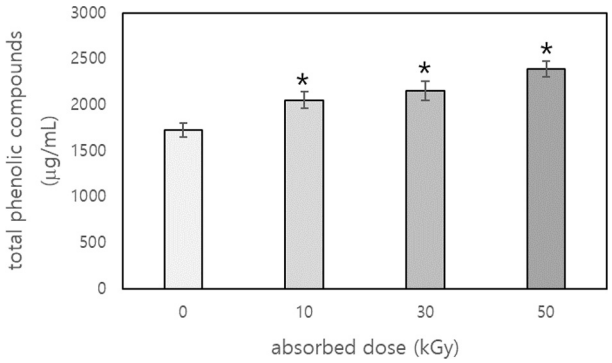

Fig. 3. Extraction yield of total phenolic compounds (μg/mL) from spent coffee grounds at various doses of gamma-ray.

22.7%, 30 kGy의 흡수 선량으로 감마선 조사된 커피박에서 추출된 단백질의 DPPH 라디칼 소거능은 23.5%, 그리고 50 kGy의 흡수 선량으로 감마선 조사된 커피박에서 추출된 단백질의 DPPH 라디칼 소거능은 25.1%로, 커피박에서 감마선 조사에 따라 추출되는 단백질의 DPPH 라디칼 소거능, 즉 항산화 활성이 증가하는 경향을 보였다.

이러한 단백질의 방사선 조사에 따른 라디컬 소거능의 증가는 많은 선행 연구 결과들이 보고 되어 있다. Liu 등[16]은 egg white protein에 전자선을 조사할 경우 항산화 활성이 최대 1.5배 증가하였는데, 전자선 조사에 의하여 S-S 결합이 깨어지고 hydrophobic amino acids이 외부로 노출되는 단백질 구조의 변형 때문이라고 보고 하였다. Wang 등[17]은 전자선 조사에 의하여 pea protein의 가수분해가 일어나서 항산화 활성이 증가한다고 보고하였다. Wheat germ protein hydrolysate에서도 전자선 조사에 의하여 surface hydrophobicity와 분자량이 감소하고 이에 따라서 항산화 활성이 증가한다는 것이 보고되었다[18].

3.3. 감마선 조사에 따른 총 페놀 화합물 추출 수율

커피 또는 커피박에는 다양한 페놀 화합물 성분이 풍부하게 잔존해 있다고 알려져 있다. 이러한 페놀 화합물 성분은 항산화 효과, 항염증 작용 등의 기능성을 가지고 있어서 식품 첨가제나 화장품 원료로서 활용가치가 매우 높다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 커피박에서 감마선 조사에 따른 페놀 화합물의 추출 수율에 대한 영향을 평가하였다. 다양한 선량에서 감마선 조사된 커피박으로부터의 추출물의 총 페놀 화합물 함량은 Fig. 3에 나타내었다. 감마선 조사가 이루어지지 않은 대조구의 경우 약 1,727 μg mL^{-1}의 총 페놀 화합물 함량이 확인되어 졌으나, 감마선 조사에 따라 추출된 총 페놀 화합물의 함량은 증가하는 경향을 보였다. 10 kGy의 감마선 조사 선량에서는 2,051 μg mL^{-1}, 30 kGy와 50 kGy의 선량으로 감마선을 조사할 경우 총 페놀 화합물 함량은 각각 2,153, 2,391 μg mL^{-1}로 확인되어졌다(Fig. 3). 최근 커피박 추출물을 감마선 조사한 결과 클로로겐산과 카페산이 감마선 조사선량이 증가함에 따라 감소한 것이 보고되었다[3]. 위의 선행 연구에서는 커피박 추출물에 감마선을 조사할 경우 추출물의 색도가 개선이 되었으며, 추출물에 포함된 클로로겐산은 커피의 탄닌의 대표적인 성분으로 커피박 추출물의 색도에 영향을 끼친다. 따라서 감마선 조사에 따른 색도 개선의 원인으로 클로로겐산의 분해로 파악된다. 최근의 연구에서 crude olive pomace에 전자선을 조사한 결과 총 페놀 화합물의 함량이 증가한다는 결과가 보고되었다[19]. 하지만, Salem 등[20]의 연구에서는 감마선 조사에 따라 Salvia leaves에서 추출되는 페놀 화합물 함량이 감소한다고 보고되었다. 이러한 결과는 감마선 조사에 따라 페놀 화합물 성분이 분해된 결과이다. 이처럼 방사선 조사 대상이나 조사 환경에 따라 페놀 화합물 함량의 변화가 다양하게 나타날 수 있는 것으로 사료된다. 즉, 방사선 조사 단계에서의 흡수 선량, 시료 내 화합물의 농도와 다른 화합물의 존재 유무 등에 따라 다른 결과가 나타날 수 있다. 감마선 조사가 단백질에 영향을 미치는 메커니즘은 일반적으로 방사선 조사에 의하여 생기는 ·OH (하이드록실 라디칼), ·H (수소 라디칼) 등에 의해 단백질의 아미노산 잔기를 직접 이온화하여 공유결합을 절단화 하여 펩타이드 사슬을 절단하거나 방향족 아미노산의 경우 고리 구조를 변화시키는 것으로 알려져 있다. 간접효과로는 disulfide 결합을 변화시키거나 단백질의 3차 구조를 변화시킬 수 있다. 페놀 화합물의 경우에는 ·OH 라디칼이 페놀의 OH기를 공격하여 퀴논(quinone) 구조 형성하고, 퀴논은 다른 분자와 축합 반응거나 ring opening을 통하여 저분자화 되는 것으로 알려져 있다. 방사선 조사뿐만 아니라 최근에 커피박을 alcalase로 효소 처리한 후 추출물의 페놀 화합물의 수율이 증가한 연구 결과도 보고되었다[21].

4. 결 론

본 연구는 폐기물로 간주되어온 커피박의 고부가가치 기능성 소재로서의 산업적 활용 가능성을 모색하고자, 방사선 처리 기술 중 하나인 감마선 조사를 적용하여 기능성 성분의 추출 수율 및 생리활성 변화에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다. 커피박

은 커피 산업의 부산물로서 대량으로 발생하고 있으나, 기능성 성분이 다량 함유되어 있음에도 불구하고 대부분이 단순 폐기되어 왔다. 이에 따라, 본 연구는 커피박의 자원화 가능성을 극대화할 수 있는 친환경적이고 효율적인 전처리 기술로서 방사선 조사의 활용성을 제시하는 데 목적을 두었다. 연구 결과, 감마선 조사에 따른 커피박 내 단백질의 추출 수율은 조사 선량에 비례하여 유의미하게 증가하는 경향을 보였으며, 특히 대조군(비조사 커피박)에 비해 약 26% 이상의 추출 수율 향상이 관찰되었다. 이는 방사선에 의해 조직 내 단백질 성분이 보다 용이하게 용출될 수 있었기 때문으로 해석된다. 뿐만 아니라, 방사선 조사에 의해 추출된 단백질은 DPPH 자유라디칼 소거능(항산화 활성) 또한 증가하였으며, 동일한 농도 기준에서 약 27%의 항산화 활성이 증가하였다. 이는 구조적으로 변화된 단백질 또는 가수분해된 펩타이드 단위들이 보다 높은 전자공여능을 발휘하여 라디칼 소거 반응에 효과적으로 기여하였음을 시사한다. 단백질 자체의 추출량 증가뿐 아니라, 기능성 또한 향상되었다는 점에서 산업적 활용 가치가 더욱 높다고 할 수 있다. 이와 함께, 커피박 내 주요 생리활성 물질인 페놀 화합물 함량 역시 방사선 선량 증가에 따라 뚜렷한 상승을 보였으며, 최대 38%의 추출 수율 증가가 확인되었다. 이는 방사선이 페놀 화합물 복합체의 결합 구조를 해리시켜 보다 많은 자유형의 페놀 성분을 추출 가능하게 했기 때문으로 해석된다.

따라서, 본 연구에서는 감마선 조사가 커피박 내 기능성 성분의 추출을 물리·화학적으로 촉진할 수 있으며, 이는 기능성 식품 또는 화장품 소재로서 커피박의 산업적 가치 향상에 중요한 전환점을 제공할 수 있음을 입증하였다.

사 사

This work was supported by the Research Supporting Program by Chonnam National University and by the “Regional Innovation System & Education (RISE)” through the Gwangju RISE Center, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Gwangju Metropolitan Government (2025-RISE-05-011).

참고문헌

1. Franca AS and Oliveira LS. 2022. Potential uses of spent coffee grounds in the food Industry. Foods **11**(14):2064. https://doi.org/10.3390/foods11142064.
2. In MJ, Jang YM, Jo MY, Kim HJ and Kim DC. 2023. Antioxidant and anticariogenic activities of enzymatic hydrolysate from spent coffee grounds. Journal of Applied Biological Chemistry **66**:462-466. https://doi.org/10.3839/jabc.2023.061.
3. Song HY, Kim HM, Kim WS, Yang M, Byun EF, Jang B, Choi DS and Byun EB. 2017. Effect of gamma irradiation on the color values and physiological properties of spent coffee ground extraction. Korean Journal of Food Science and Technology **49**(5):544-549. https://doi.org/10.9721/KJFST.2017.49.5.544.
4. Valdés A, Castro-Puyana M and Marina ML. 2020. Isolation of proteins from spent coffee grounds. Polyphenol removal and peptide identification in the protein hydrolysates by RP-HPLC-ESI-Q-TOF. Food Research International **137**:109368. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109368.
5. Ramón-Gonçalves M, Gómez-Mejía E, Rosales-Conrado N, León-González ME and Madrid Y. 2019. Extraction, identification and quantification of polyphenols from spent coffee grounds by chromatographic methods and chemometric analyses. Waste Management **96**:15-24. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.009.
6. Bouhzam I, Cantero R, Margallo M, Aldaco R, Bala A, Fullana-i-Palmer P and Puig R. 2023. Extraction of bioactive compounds from spent coffee grounds using ethanol and acetone aqueous solutions. Foods **12**: 4400. https://doi.org/10.3390/foods12244400.
7. Chmielewski AG. 2023. Radiation technologies: The future is today. Radiation Physics and Chemistry **213**:111233. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111233.
8. Madureira J, Barros L, Cabo Verde S, Margaça FMA, Santos-Buelga C and Ferreira ICFR. 2020. Ionizing radiation technologies to increase the extraction of bioactive compounds from agro-industrial residues: A review. Journal of Agricultural and Food Chemistry **68**(40):11054-11067. https://doi: 10.1021/acs.jafc.0c04984.
9. Choi J, Kim HJ, Kim JH, Chun BS, Ahn DH, Kim GH and Lee JW. 2010.Changes in colour and antioxidant activities of *Hizikia fusiformis* cooking drips by gamma irradiation. LWT - Food Science and Technology **43**(7):1074-1078. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.02.012.
10. Lim S, Choi J and Park H. 2015. Antioxidant activities of fucoidan degraded by gamma irradiation and acidic hydrolysis. Radiation Physics and Chemistry **109**:23-26. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.12.008.
11. Khattak KF, Simpson TJ and Ihasnullah. 2008. Effect of gamma irradiation on the extraction yield, total phenolic content and free radical-scavenging activity of *Nigella staiva* seed. Food Chemistry **110**(4):967-72. https://doi: 10.1016/j.foodchem.2008.03.003.
12. Abolhasani A, Barzegar M and Sahari MA. 2018. Effect of gamma irradiation on the extraction yield, antioxidant, and antityrosinase activities of pistachio green hull extract. Radiation Physics and Chemistry **144**:373-378. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.09.025.
13. Masamran S, Chookaew S, Tepsongkroh B and Supawong S. 2023. Impact of gamma irradiation pre-treatment before subcritical water extraction on recovery yields and antioxidant properties of rice bran extract. Radiation Physics and Chemistry **207**:110834. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110834.
14. Hassan AB, Mahmoud NS, Elmamoun K, Adiamo OQ and Ahmed IAM. 2018. Effects of gamma irradiation on the protein characteristics and functional properties of sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds. Radiation Physics and Chemistry **144**:85-91. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.11.020.
15. Hota S, Shams R, Dash KK, Pawase PA, Mukarram SA and Kovács B. 2025. A comprehensive review on the potential role of irradiation technique on techno-functional properties of plant-based proteins. Journal of Agriculture and Food Research 102095. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102095.
16. Liu X, Liu J, Zhang W, Han S, Zhang T and Liu B. 2019. Electron beam irradiation-induced structural changes increase the antioxidant activities of egg white protein. LWT - Food Science and Technology **111**:846-852. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.066.

17. Wang L, Zhang X, Liu F, Ding Y, Wang R, Luo X, Li Y and Chen Z. 2017. Study of the functional properties and anti-oxidant activity of pea protein irradiated by electron beam. Innovative Food Science & Emerging Technologies **41**:124-129. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.01.005.
18. Wang L, Li T, Sun D, Tang M, Sun Z, Chen L, Luo X, Li Y, Wang R, Li Y, Li J and Chen Z. 2019. Effect of electron beam irradiation on the functional properties and antioxidant activity of wheat germ protein hydrolysates. Innovative Food Science & Emerging Technologies **54**:192-199. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.09.003.
19. Madureira J, Gonçalves I, Cardoso J, Dias MI, Santos, PMP, Margaça FMA, Santos-Buelga C, Barros L and Cabo Verde S. 2024. Effects of electron beam radiation on the phenolic composition and bioactive properties of plive pomace extracts. Antioxidants **13**:558. https://doi.org/10.3390/antiox13050558.
20. Salem IB, Fekih S, Sghaier H, Bousselmi M, Saidi M, Landoulsi A and Fattouch S. 2013. Effect of ionising radiation on polyphenolic content and antioxidant potential of parathion-treated sage (*Salvia officinalis*) leaves. Food Chemistry **141**(2):1398-1405. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.04.008.
21. In MJ, Jang YM, Jo MY, Kim HJ and Kim DC. 2023. Antioxidant and anticariogenic activities of enzymatic hydrolysate from spent coffee grounds. Journal of Applied Biological Chemistry **66**(61): 462-466. http://dx.doi.org/10.3839/jabc.2023.061.