Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 3, pp. 221-229, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.3.221

Original article

감마선 및 전자선 조사에 따른 옻나무 추출물 내 우루시올 제거 및 플라보노이드 성분 변화 비교

송하연[1] · 변의백[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소

Comparison of Urushiol Removal and Flavonoid Component Changes in Rhus verniciflua Stokes Extract by Gamma and Electron Beam Irradiation

Ha-Yeon Song[1] and Eui-Baek Byun[1,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup 56212, Republic of Korea

ABSTRACT *Toxicodendron vernicifluum* (Stokes) F.A. Barkley, also known as *Rhus verniciflua Stokes* (RVS), has been traditionally used in East Asia as a durable lacquer and medicinal plant. Urushiol, one of its most distinctive bioactive components, is known to cause severe allergic contact dermatitis, leading to strict regulations by the Ministry of Food and Drug Safety on the detection of five types of urushiol. This study investigated the effects of gamma and electron beam (e-beam) irradiation on the removal of urushiol and the stability of flavonoid components in Rhus verniciflua Stokes extract (RVSE). RVSE samples were irradiated at doses of 1, 3, 5, and 10 kGy using cobalt-60 gamma rays or a 10 MeV e-beam. The contents of urushiols (urushiol I, urushiol II, urushiol III, urushiol V, and laccol) were quantified using liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS), and flavonoids (corilagin, fustin, fisetin, sulfuretin, and butein) were analyzed by high-performance liquid chromatography (HPLC) analysis. Both gamma and e-beam irradiation effectively removed urushiol, with e-beam irradiation reducing all five types of urushiol below detection limits at a low dose of 1 kGy, compared to gamma irradiation, which required 10 kGy for complete removal. In contrast, among the flavonoids, corilagin, fustin, fisetin, and butein remained stable post-irradiation, likely due to their aromatic structures and resonance stabilization, which confer resistance to free radicals generated by irradiation. However, exhibited a dose-dependent decrease, possibly due to the cleavage of the C2=C3 double bond linking its benzofuranone ring and catechol structure. Furthermore, electron beam irradiation at 5 kGy effectively removed urushiol in commercial RVSE pouch products while preserving beneficial flavonoids. These findings demonstrate that gamma and e-beam irradiation can be utilized as effective processing techniques for removing urushiol from RVSE while preserving most bioactive flavonoid components. Notably, e-beam irradiation offers superior efficiency at lower doses, highlighting its potential for industrial applications in producing safe biomaterials from RVSE.

Key words: E-beam, Gamma irradiation, Rhus verniciflua Stokes Extract, Urushiol, Flavonoid

1. 서 론

옻나무(*Toxicodendron vernicifluum* (Stokes) F.A. Barkley, 또는 *Rhus verniciflua* Stokes, RVS)는 동아시아 지역에서 전통적으로 내구성이 높은 도료뿐만 아니라 약용 식물로도 널리 사용되어 왔다[1]. 특히, 국내 고의서인 『동의보감』에서는 옻나무가 복통과 자궁암 치료에 효과가 있다고 기술되어 있으며, 15세기부터 복통, 소화불량, 복부 감염, 속쓰림 등의 복부 질환뿐 아니라 관절염, 신경통, 기관지염과 같은 염증성 질환의 치료를 위한 전통 한약재로 사용되어 왔다[2]. 최근 다양한 약리학적 연구를 통해 옻나무의 항염, 항산화, 항암, 항균 등의 생리활성이 과학적으로 입증되고 있으며, 이러한 효과는 옻나무에 함유된 주요 생리활성 성분에 기인한다[3,4]. 옻나무 내에는 플라보노이드(flavonoid), 페놀산(phenolic acid), 우루시올(urushiol), 탄닌(tannin) 등을 포

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

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Eui-Baek Byun
Tel: +82-63-570-3245, E-mail: ebbyun80@kaeri.re.kr

Received 27 June 2025 Revised 29 July 2025 Accepted 30 July 2025

함하는 페놀화합물이 가장 풍부하게 함유되어있으며, 그 외 테르페노이드(terpenoid), 스테로이드(steroid), 락카아제(laccase), 다당체(polysaccharide) 성분들도 함유되어 있다[5]. 그러나 옻나무의 가장 독특한 생리활성 성분 중 하나인 우루시올(Urushiol)은 피부에 강한 알레르기성 접촉 피부염을 유발하는 것으로 알려져 있으며, 인체 적용에 있어 가장 큰 제약 요인으로 작용한다[6]. 우루시올은 C15-C17의 알킬 또는 알켄기(1~3개의 이중 결합 포함)가 결합된 구조를 가지며, 이러한 구조적 특성이 강한 면역반응을 유도하는 것으로 보고되고 있다[7]. 이에 따라, 식품의약품안전처에서는 우루시올의 불검출을 명시하고 있다[8]. 이에 따라 옻나무 추출물의 내 우루시올을 효과적으로 제거하면서도, 생리활성 성분들은 유지하는 가공기술에 대한 연구들이 많이 보고되고 있다[9-11]. 대표적으로 발효 공정은 우루시올 제거에 효과적인 방법으로 보고되었으나, 장시간의 발효 기간, 온도·습도·pH 등 다변수 제어 필요성, 균주에 따른 효율 편차, 그리고 기능성 성분의 손실 우려 등 여러 한계점이 함께 지적되고 있다[10,11].

방사선 조사 기술은 천연물 가공 분야에서 미생물 제어, 독성물질 분해, 살균·멸균 등에 널리 활용되고 있으며, 최근에는 신규 식의약 및 바이오 소재 연구로 응용 범위가 확장되고 있다[12,13]. 이러한 방사선 조사는 물의 방사선분해(radiolysis)에 따른 이온화 작용을 기반으로 하며, 천연물 추출물에 적용 시, 유효성분 변화, 생리적 효능 증진, 가공학적 특성개선 등에 기여하는 것으로 보고되고 있다[14,15]. 기존 연구에서 cobalt-60 유래 감마선을 이용하여 옻나무 수액 내 우루시올을 효과적으로 분해하고 알레르기 유발 가능성을 감소시킨 연구 사례도 보고되었다[16]. 최근에는 전자선이 감마선에 비해 단시간 조사, 공정 자동화, 공정 연속성, 방사성 동위원소 불필요 등의 장점을 가지며, 산업 적용 가능성 측면에서 더욱 주목받고 있다[17,18]. 따라서, 본 연구에서는 감마선 및 전자선을 이용한 옻나무 추출물 내 우루시올 제거효과와 생리활성 성분 변화를 비교분석함으로써, 방사선 기반 가공기술의 유효성과 적용가능성을 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

본 실험에 사용된 옻나무 열수 추출물(RVS Extracts, RVSE)은 ㈜비플럭스파머(Seoul, Korea)로부터 제공받아 사용하였다. 플라보노이드 및 페놀성 표준물질 중, corilagin (CFN90176) 및 rhoifolin (CFN99814)은 ChemFaces (Wuhan, China)에서 구입하였으며, butein (1103S) 및 fustin (1339S)은 ExtraSynthesis (Shanghai, China)에서, urushiol I (CAS No. 492-89-7) 및 laccol (5862-27-1)은 BOC Sciences (Shirley, NY, USA)에서 구입하였다. 또한, urushiol II (80180), urushiol III (80181), urushiol V (80182)는 PhytoLab (Vestenbergsgreuth, Germany)에서, fisetin (SML4119) 및 sulfuretin (SML3002)은 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA)에서 구입하여 분석에 사용하였다.

2.2. 방사선 조사

시료의 방사선 조사는 한국원자력연구원 첨단방사선연구소 내 시설을 활용하였다. RVSE를 15 mL conical tube에 10 mL씩 분주한 후, 실시하였다. 감마선은 cobalt-60 감마선 조사 시설(Point source AECL, IR-79, MDS Nordion International Co. Ltd., Ottawa, ON, Canada)을 이용하여 진행하였다. 시간 당 10 kGy의 선량률로 총 흡수선량이 1,3, 5, 10 kGy가 되도록 하였다. 전자선 조사는 10 MeV linear electron accelerator (MB10-30, Mevex Corp., Stittsville, Canada)를 이용하여 상온, air 상태에서 조사하였으며, 빔 전류를 0.6 mA로 고정하여 총 흡수선량이 1, 3, 5, 10 kGy이 되도록 조사하였다.

2.3. 우루시올 함량 분석

각 조건별로 처리된 RSVE 내 알레르기 유발 성분인 urushiol I, II, III, V 및 laccol의 잔류 여부를 확인하기 위하여 liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) 분석을 수행하였다. 정량 분석은 Shimadzu사의 Nexera X2 UPLC 시스템과 LCMS-8050 triple quadrupole mass spectrometer (Shimadzu, Kyoto, Japan)를 이용하였다. 이온화 방식은 negative electrospray ionization ($[M-H]^-$) 모드였으며, multiple reaction monitoring (MRM) 방법으로 정량하였다. 정량 분석을 위한 표준물질의 검량곡선은 Supple. Fig. 1에 제시되었다. 데이터 분석은 LabSolutions software (Shimadzu)를 이용하였다. Table 1에 본 연구의 LC-MS/MS 분석조건을 수록하였다.

2.4. 플라보노이드 함량분석

각 조건별로 처리된 RVSE 내 주요 플라보노이드 성분인 corilagin, fustin, rhoifolin, fisetin, sulfuretin, butein의 함량을 분석하기 위하여 고성능 액체 크로마토그래피(HPLC) 분석을 수행하였다. 분석에는 Agilent 1260 Infinity II LC system (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)이 사용되었으며, 검출기는 diode array detector (DAD)를 이용하여 280 nm 파장에서 검출하였다. 분리용 컬럼은 ZORBAX Eclipse XDB-C18 column (4.6×250 mm, 5 μm, Agilent Technologies)을 이용하였으며, 이동상A는 0.1% formic acid 함유 증류수, 이동상 B는 90% Acetonitrile (ACN)으로 구성하였다. 유속은 1.0 mL/min, 주입량은 10 μL, 컬럼 오븐 온도는 30°C로 설정하였다. Elution은 gradient 방식으로 진행되었으며, 시간에 따른 용매 B의 농도 변화는 다음과 같다: 0-3분 5%, 3-20분 80%까지 증가, 20-30분 80% 유지, 30-35분 5%. 이 조건에서 각 분석 대상 플라보노이드 화합물의 머무름 시간(RT)을 기준으로 피크를 분리하고 정량하였다. 정량분석을 위한 표준물질의 검량곡선은 Supple. Fig. 2에 제시되었다.

Table 1. Operating conditions for LC-MS/MS

LC Method				
Column	ACQUITY BEH C18, 1.7 μm, 100*2.1 mm			
Solvent	A: DW (0.1% Formic acid), B: Methanol			
Elution condition (Sovlent B %)	80% (0 min), 80% (2 min), 100 % (4 min), 100% (11 min), 80% (11.5 min), 80% (16 min)			
Flow rate	0.25 mL/min			
Injection Vol.	2 μL			
MS Method				
Interface Voltage	4.0 kV			
Interface Temp.	300 ℃			
MRM				
Compound	RT (min)	Precursor ion (m/z)	Products ion (m/z)	Collision Energy (eV)
Urushiol I	9.086	319.1	122.1/135.0/80.95	-33
Urushiol II	8.509	317.1	121.9/134.95/113.0	-32
UrushiolIII	8.090	315.1	121.9/134.9/87.0	-30
Urushiol V	7.791	313.3	121.9/135.15/245.05	-28
Laccol	9.846	347.1	121.9/134.9/279.0	-36

2.5. 통계처리

RVSE pouch 시제품을 이용한 실험결과는 3회 반복 측정된 값의 평균±표준편차로 표시하였다. 각 그룹 간의 유의미한 차이를 비교하기 위해 GraphPad Prism 8.0 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA) 소프트웨어를 사용하여 Two-way analysis of variance (ANOVA) 분석을 수행하였다. 사후 검정으로는 Tukey's test를 적용하였으며, $p<0.05$일 때 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 간주하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 감마선 및 전자선 처리에 따른 RVSE 내 우루시올 함량 변화

방사선 처리에 따른 RSVE 내 알레르기 유발성분인 urushiol I, urushiol II, urushiol III, urushiol V 및 laccol의 잔류량 함량을 LC-MS/MS 분석을 통해 확인하였다. 표준물질 분석 시, urushiol V, III, II, I 및 laccol순으로 검출되었으며, MRM 값은 MRM 값은 urushiol V (319.1→122.1), urushiol III (317.1→121.9), urushiol II (315.1→121.9), urushiol I (313.3→121.9), laccol (347.1→121.9)로 확인되었다(Fig. 1). 각 표준물질을 이용한 검량선을 작성한 결과, correlation efficiency 값들은 모두 0.99 이상으로 나타났다(Supple. Fig. 1).

표준품과 비교하였을 때, 조사하지 않은 RVSE에서는 5종 모두가 높은 농도로 검출되었으며, 특히 urushiol I의 경우 약 3458.7 ng/mL, laccol은 약 1617.2 ng/mL 수준으로 분석되었다(Table 2). 한편, 방사선 조사 처리 시 성분별로 뚜렷한 감소 경향을 보였다. 감마선 조사(GI)의 경우 1 kGy에서 urushiol I과 laccol이 각각 554.1 및 201.3 ng/mL 수준으로 잔류하였으나, 조사 선량이 증가함에 따라 점차 감소하였고, 10 kGy에서는 모든 성분이 검출한계 이하(*N.D.*)로 감소하였다. 전자선 조사(EB)는 더 낮은 선량에서도 강력한 제거 효과를 나타냈다. 전자선 1 kGy 조건에서도 urushiol 5종 모두 검출되지 않았으며, 이는 감마선에 비해 전자선은 이차 전자를 생성하여 짧은 침투 깊이 내에서 스퍼를 형성하는 특성을 가져, 단시간 고밀도 에너지를 전달할 수 있으며, 이러한 물리적 특성에 기인한 것으로 판단된다[19]. 즉, 전자선은 더 높은 밀도의 이온화 및 여기를 유발하여 다량의 자유 라디칼을 국소적으로, 생성하여, urushiol 분해효율이 우수한 것으로 사료된다. Urushiol 계열 화합물은 공통적으로 카테콜(catechol) 골격에 긴 알킬/알켄기를 가지며(Fig. 2), 이 측쇄에 포함된 다중 이중결합은 구조적 특성상 산화 및 분해에 민감하다. Urushiol의 주요 반응성 부위는 카테콜의 두 인접한 페놀성 하이드록실기, 전자가 풍부한 벤젠 고리, 그리고 알켄기 측쇄의 불포화 이중결합으로, 이들 부위는 화학적 반응성이 높아 다양한 산화 반응에 취약하다[20]. 특히, 카테콜 그룹의 하이드록실기는 친핵체로서 기능하여 세미퀴논 또는 퀴논으로 산화되며, 이는 Michael 첨가 및 Schiff-base 반응과 같은 후속 반응을 촉진할 수 있다. 이 과정에서 laccase 또는 라디칼이 존재하면 카테콜의 하이드록실기가 산소 라디칼로 전환되어 다른 urushiol 분자의 측쇄 내 불포화 이중결합을 효과적으로 공격한다[20,21]. 따라서, 방사선 조사 시 생성되는 자유 라디칼(·OH, ·H 등)과의 반응성이 높아, 전자선과 같은 고선량 고속 입자선에 의해 빠르게 분해된 것으로 판단된다. 특히 불포화 이중결합이 많은 urushiol III, urushiol V와 같은 성분이

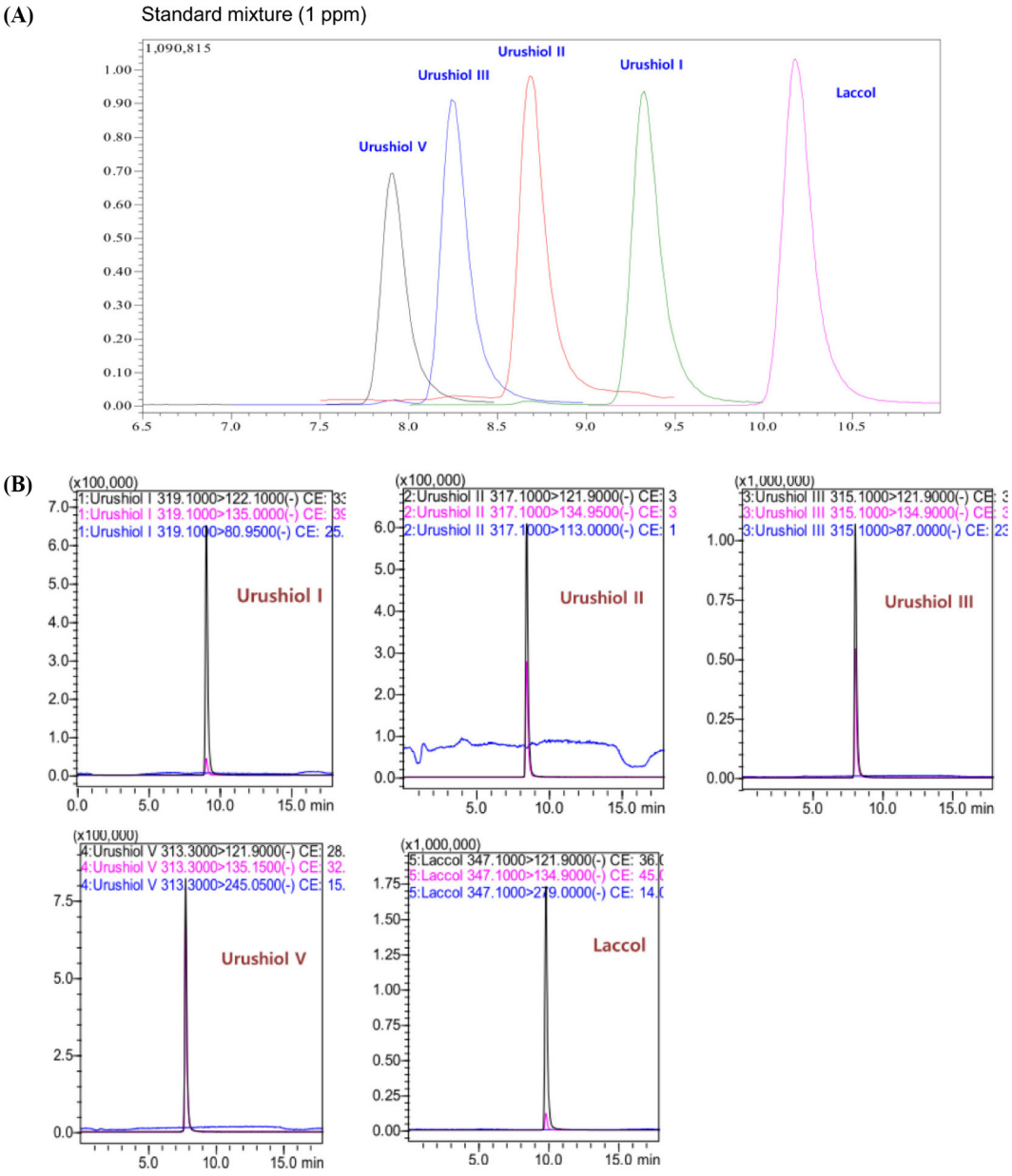

Fig. 1. Representative LC-MS/MS chromatograms of urushiol components in RVSE. (A) Standard mixture of urushiols and (B) multiple reaction monitoring (MRM) peaks of individual urushiol compounds (Urushiol I, Urushiol II, Urushiol III, Urushiol V, and Laccol)

선량에 비례하여 우선적으로 제거되는 경향이 나타났다. 전반적으로, 감마선과 전자선 조사 모두 RSVE 내 우루시올의 효과적인 제거 기술로 활용 가능함을 보여주며, 전자선은 감마선 대비 낮은 선량으로도 동일하거나 더 우수한 제거 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 감마선 및 전자선 처리에 따른 RVSE 내 플라보노이드 함량 변화

감마선 및 전자선 처리 후 RVSE 내 플라보노이드 함량 변화를 HPLC로 정량분석하였다. Corilagin은 머무름 시간 10.3 min, fustin은 12.4 min, rhoifolin은 12.9 min, fisetin은 14.1 min, sulfuretin은 14.8 min, butein은 16.4 min으로 관찰되었으며 (Fig. 3), 각 표준물질을 이용한 검량선의 correlation efficiency 값들은 모두 0.994 이상으로 나타났다. RVSE 내 rhoifolin은 검출되지 않았으며, fustin, fisetin, corilagin, sulfuretin, butein 순으로 함량이 많았다(Table 3). 모든 방사선 조사조건에서 플라보노이드의 분해가 관찰되지 않았으며, 흥미롭게도 fisetin은 감마선과 전자선 모두 조사 후 미량 증가하는 경향이 나타났다. co-

Table 2. Changes in contents of urushiol components in RVSE by gamma irradiation and electron-beam irradiation

Contents (Ppb, ng/mL)					
Sample	Urushiol V	Urushiol III	Urushiol II	Urushiol I	Laccol
RVSE	1340.347	1358.829	1364.505	3458.743	1617.195
RVSE GI 1 kGy	N.D	N.D	N.D	554.0727	201.2728
RVSE GI 3 kGy	N.D	N.D	N.D	122.6936	5.24813
RVSE GI 5 kGy	N.D	N.D	N.D	N.D	29.3937
RVSE GI 10 kGy	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
RVSE EB 1 kGy	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
RVSE EB 3 kGy	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
RVSE EB 5 kGy	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
RVSE EB 10 kGy	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D

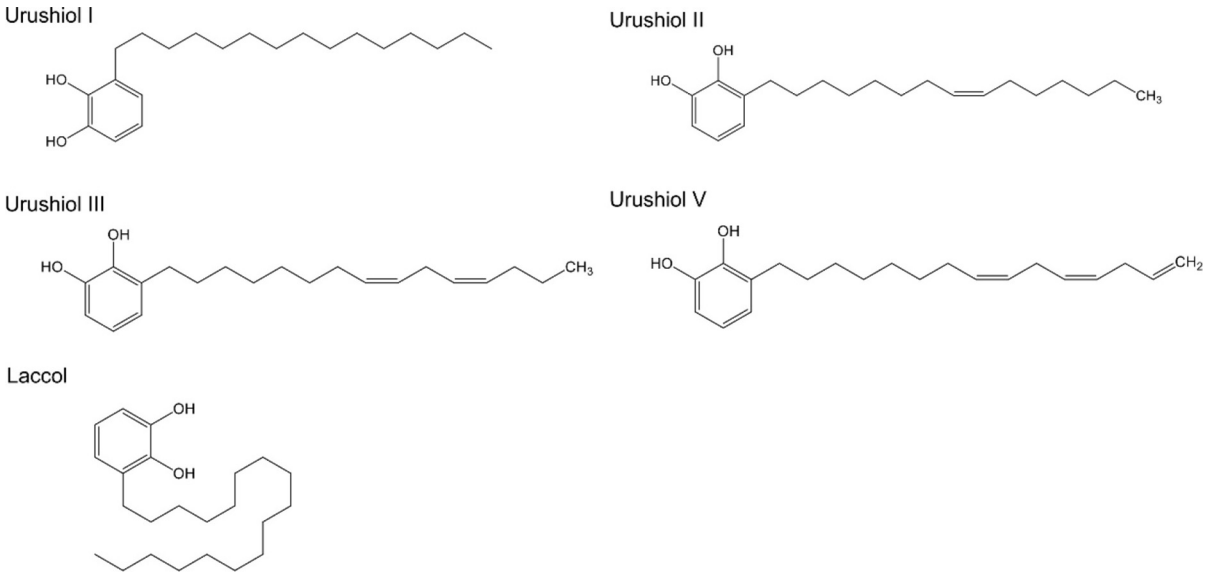

Fig. 2. Chemical structures of urushiol I, urushiol II, urushiol III, urushiol V, and laccol

rilagin, fustin, butein은 조사 조건에 따라 약간의 변동을 보였으나 큰 변화는 없었으며, sulfuretin이 선량 증가에 따라 가장 많이 감소하는 경향을 보였다.

플라보노이드는 구조적 특성상 방향족 구조와 공명 안정화로 인해 방사선에 의해 생성된 자유 라디칼(·OH, ·H 등)에 대한 저항성을 제공하기 때문에, 우루시올 대비 방사선에 의한 분해에 비교적 안정된 것으로 판단된다[22,23]. Sonwani 등은 100 kGy 흡수선량에서 플라보노이드의 구조별 방사선 분해 반응을 비교한 결과, 방사선 저항성에서 B 링과 C 링의 히드록실기 치환 패턴이 중요하다고 보고했다. 특히 3-OH가 없는 플라보노이드의 경우 C 링 분해가 억제되어 방사선에 대한 안정성이 더 높음을 확인하였다[24]. 이러한 이유로 corilagin, fustin, fisetin과 같은 플라보노이드는 감마선 및 전자선 조사에도 불구하고 완전히 분해되지 않고 비교적 잘 유지되었다. Fig. 4와 같이 fisetin은 3-OH를 갖지만, Marković 등은 fisetin의 C4'-OH가 라디칼 반응의 주요 시작점이라고 제시하고 있으며, 3-OH와 2,3-이중결합을 동시에 가지고 있어 C 링 분해 가능성이 있음에도 불구하고, B 링의 3',4'-OH 카테콜 구조가 공명 안정화를 제공하여 방사선 조사에 의해 생성된 자유 라디칼(OH^+, O_2^- 등)을 효과적으로 소거하여 분해가 되지 않은 것으로 추론된다[25,26]. Corilagin은 elagitannin 계열의 폴리페놀 화합물로, glucose 중심에 갈로일과 헥사하이드록시디페노일 그룹이 결합된 복합 구조를 가진다[27]. 플라보노이드의 C2-C3 이중결합은 전기화학적 산화에서 p-퀴논 메타이드 및 benzofuranone 유도체 형성을 촉진을 통해 라디칼 반응성을 높이는 요인이며, 플라바논 계열인 Fustin도 C2-C3 이중결합이 없어 방사선 분해가 억제된 것으로 판단된다[28]. Sulfuretin의 경우 방사선 흡수선량이 증가함에 따라 뚜렷한 분해 경향을 나타냈다. 이는 Sulfuretin 구조의 벤조푸라논 링과 카테콜 구조를 연결하고

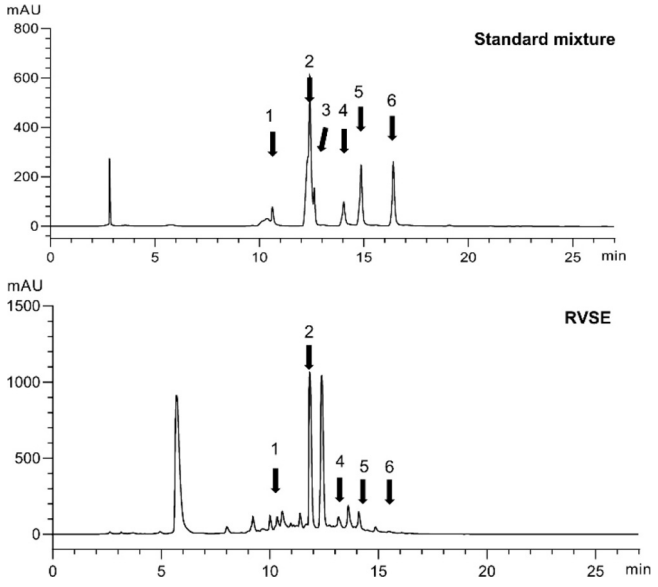

Fig. 3. HPLC chromatogram of a standard mixture of flavonoids and RVSE showing peaks for 1: Corilagin (RT 10.3 min), 2: Fustin (RT 12.4 min), 3: Rhoifolin (RT 12.9 min), 4: Fisetin (RT 14.1 min), 5: Sulfuretin (RT 14.8 min), and 6: Butein (RT 16.4 min)

있는 C2-C3 이중결합 그룹이 분해되었기 때문으로 판단된다.

3.3. 전자선 처리에 따른 RVSE 시제품 내 우루시올 및 플라보노이드 함량변화

예비실험에서 전자선 처리가 감마선에 비해 우루시올 제거효과가 우수하였다. 따라서, 판매 중인 RVSE 100 mL 용량의 pouch에 전자선 조사를 적용하여 우루시올 함량 변화를 LC-MS/MS로 정량분석하였다. 전자선 1 kGy 조사 후, pouch 내 urushiol V, urushiol III은 검출되지 않았지만, urushiol II, urushiol I, laccol이 각각 77.03±49.51, 240.70±204.433, 2.49±1.318 ng/mL로 검출되었다. 총 흡수선량을 5 kGy로 높였을 때, 우루시올 5종 모두 효과적으로 제거되었다(Table 4). 예비실험 대비 시제품에서 이러한 우루시올 제거 효율의 차이는 샘플의 용량(부피) 증가에 따른 전자선의 침투 깊이 한계에 기인하는 것으로 판단된다. 10 MeV 전자선의 평균 침투 깊이는 약 3~5 cm로 알려져 있다[29]. 100 mL 파우치의 두께가 약 3~3.5 cm인 것을 고려할 때, 1 kGy의 낮은 선량에서는 파우치 내부까지 우루시올 분해를 위한 충분한 자유 라디칼 생성을 위한 에너지 전달이 다소 부족했을 것으로 추정된다. 반면, 5 kGy의 흡수선량에서는 충분한 에너지가 전달되어 우루시올의 효과적인 제거가 가능했던 것으로 사료된다. 이어서, 전자선 처리된 RVSE 파우치 내 플라보노이드 함량 변화를 HPLC로 정량분석하였다. 예비실험 결과와 유사하게, RVSE 파우치에 1 kGy의 전자선 조사를 했을 때, corilagin (166.61±4.376 μg/mL)과 fisetin (258.91±5.077 μg/mL) 함량은 비조사군(corilagin: 154.82±5.925 μg/mL, fisetin: 233.66±1.382 μg/mL) 대비 통계적으로 유의미하게 증가하였다(p<0.05). Fustin 함량 역시 1 kGy 조사 시 360.18±5.732 μg/mL로 비조사군(337.83±3.617 μg/mL)보다 통계적으로 유의미하게 증가하였다 (p<0.05). 반면, sulfuretin은 비조사군 34.37±0.525 μg/mL에서 1 kGy 조사 시 20.56±2.402 μg/mL로, 5 kGy 조사 시 14.36±9.076 μg/mL로 유의미하게 감소하는 경향을 보였다. Butein 함량은 전자선 조사에 따른 통계적으로 유의미한 변화를 보이지 않았다(Table 5).

결론적으로, 상업용 RVSE 시제품에 5 kGy의 전자선 조사를 적용했을 때, 알레르기 유발 성분인 우루시올은 모두 효과적으로 제거되면서도, 대부분의 유익한 플라보노이드 성분(corilagin, fustin, fisetin, butein)은 그 함량이 비교적 높은 수준으로 안정적으로 유지되는 것을 확인하였다. 이는 전자선 조사가 대용량 옻나무 추출물 제품의 안전성을 확보하고 기능성을 보존하는 데 효과적인 가공 기술임을 시사한다. 다만, 방사선 조사된 옻나무 추출물을 식품 및 바이오 소재로 안전하게 활용하기 위해서는 향후 방사선 조사 후 새롭게 생성될 수 있는 분해산물이나 대사체에 대한 후속 분석 연구가 필수적이다. 또한, 방사선 조사의 실용화를

Table 3. Changes in contents of flavonoid components in RVSE by gamma irradiation and electron-beam irradiation

	Contents (μg/mL)				
Sample	Corilagin	Fustin	Fisetin	Sulfuretin	Butein
RVSE	141.37	410.59	273.65	37.49	4.88
RVSE GI 3 kGy	144.64	400.87	276.31	31.65	4.82
RVSE GI 5 kGy	136.00	399.02	284.31	28.40	5.00
RVSE GI 10 kGy	145.36	391.02	287.71	18.82	4.28
RVSE EB 1 kGy	151.39	397.37	283.88	37.79	5.24
RVSE EB 3 kGy	144.83	392.39	281.14	32.58	4.85
RVSE EB 5 kGy	145.09	390.25	284.95	18.19	4.50
RVSE EB 10 kGy	144.63	376.99	281.40	8.97	3.42

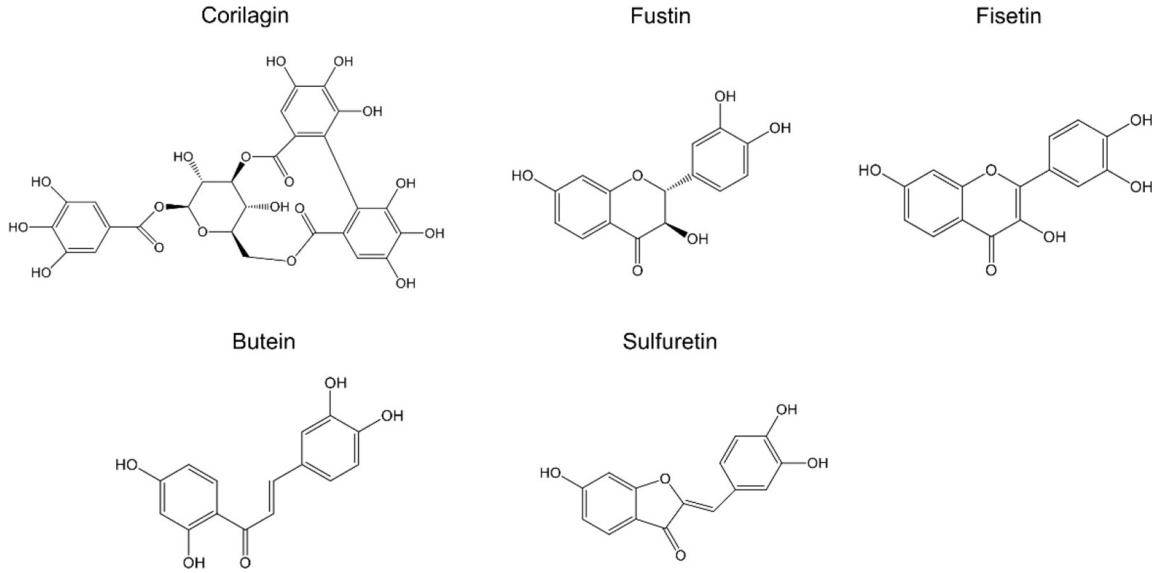

Fig. 4. Chemical structures of flavonoids in RVSE including corilagin, fustin, fisetin, butein, and sulfuretin

Table 4. Changes in contents of urushiol components in RVSE pouches by electron-beam irradiation

Contents (Ppb, ng/mL)					
Sample	Urushiol V	Urushiol III	Urushiol II	Urushiol I	Laccol
RVSE pouch	985.42±187.752^{a}	773.21±127.230^{a}	1970.86±106.414^{a}	5179.72±167.999^{a}	1551.46±94.817^{a}
RVSE pouch EB 1 kGy	N.D^{b}	N.D^{b}	77.03 49.51^{b}	240.70±204.433^{b}	2.49±1.318^{b}
RVSE pouch EB 5 kGy	N.D^{b}	N.D^{b}	N.D^{b}	N.D^{c}	N.D^{ab}

Data represent the mean±standard deviation of three replicates; values with different letters in the same column differ statistically (p<0.05).

Table 5. Changes in contents of flavonoid components in RVSE pouches by electron-beam irradiation

Contents (μg/mL)					
Sample	Corilagin	Fustin	Fisetin	Sulfuretin	Butein
RVSE pouch	154.82±5.925^{b}	337.83±3.617^{b}	233.66±1.382^{b}	34.37±0.525^{a}	4.75±0.347^{a}
RVSE pouch EB 1 kGy	166.61±4.376^{a}	360.18±5.732^{a}	258.91±5.077^{a}	20.56±2.402^{b}	4.05±0.126^{a}
RVSE pouch EB 5 kGy	151.06±7.218^{b}	320.37±2.037^{c}	206.6±8.352^{c}	14.36±9.076^{b}	2.92±0.586^{a}

Data represent the mean±standard deviation of three replicates; values with different letters in the same column differ statistically (p<0.05).

위해서는 조사 후 일정 기간이 경과한 시료에 대한 장기적인 안전성 및 유효 성분 안정성 평가가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 감마선 및 전자선 조사를 통해 옻나무 추출물(RVSE) 내 우루시올 제거 효과와 플라보노이드 성분의 변화를 비교 분석하였다. 감마선과 전자선 조사 모두 RVSE 내 알레르기 유발 성분인 우루시올(urushiol I, II, III, V, laccol)을 효과적으로 제거하는 것으로 확인되었다. RVSE 10 mL 용량으로 진행된 예비실험에서, 감마선은 10 kGy의 흡수선량에서 우루시올 5종이 완전 제거된 반면, 전자선 조사는 1 kGy의 낮은 선량에서도 우루시올 5종을 모두 검출 한계 이하로 감소시켜, 더 효율적인 제거 효과를 나타냈다. 이는 전자선의 단시간 고밀도 에너지 전달 특성에 기인한 것으로 판단된다. 더 나아가, 실제 판매용 RVSE 파우치 시제품에 전자선 조사를 적용한 결과, 1 kGy 조사 시 일부 우루시올 성분이 잔류하였으나, 5 kGy의 흡수선량에서는 용량(부피) 증가에 따른 전자선 침투 깊이 문제를 극복하고 우루시올 5종 모두를 효과적으로 검출 한계 이하로 제거할 수 있었다.

한편, RVSE 내 주요 플라보노이드 성분인 corilagin, fustin, fisetin, butein은 방사선 조사 후에도 안정적으로 유지되었으나,

sulfuretin은 선량 증가에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. sulfuretin의 경우 벤조푸라논 링과 카테콜 구조를 연결하는 C2-C3 이중결합이 방사선에 의해 생성된 자유 라디칼의 공격을 받아 분해된 것으로 보인다. 반면, corilagin, fustin, fisetin, butein은 방향족 구조와 공명 안정화, 그리고 C 링 개열 억제 구조적 특징으로 인해 방사선에 의한 자유 라디칼에 대한 저항성을 유지한 것으로 판단된다. 결론적으로, 감마선과 전자선 조사는 RVSE 내 우루시올을 효과적으로 제거하면서도 주요 플라보노이드 성분을 비교적 안정적으로 유지하는 가공 기술로 활용 가능함을 확인하였다. 특히, 전자선 조사는 감마선 대비 낮은 선량에서 더 우수한 제거 효율을 보이며, 실제 대용량 시제품 적용 가능성 또한 확인되어 옻나무 추출물의 안전한 식품 및 바이오 소재화를 위한 산업적 응용 가능성이 더 높은 것으로 평가된다.

사 사

옻나무 추출물을 제공해주신 ㈜비플럭스파머의 류재춘 대표님께 감사드립니다. 본 연구는 한국원자력연구원의 기관고유사업(523320) 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Hu X, Wang M, Cai F, Liu L, Cheng Z, Zhao J, Zhang Q and Long C. 2024. A comprehensive review of medicinal Toxicodendron (Anacardiaceae): Botany, traditional uses, phytochemistry and pharmacology. *J Ethnopharmacol* **318**(Pt A):116829.
2. Yan G and Feng J. 2002. Study on Wang Ruzun's hand - written copy of Dongyi Bogam (Precious mirror of oriental medicine). *Zhonghua Yi Shi Za Zhi*, **32**(3):151-154, Bejing, China.
3. Kim JH, Shin YC and Ko SG. 2014. Integrating traditional medicine into modern inflammatory diseases care: multitargeting by Rhus verniciflua Stokes. *Mediators Inflamm* **2014**:154561.
4. Choi W, Jung H, Kim K, Lee S, Yoon S, Park J, Kim S, Cheon S, Eo W and Lee S. 2012. Rhus verniciflua stokes against advanced cancer: a perspective from the Korean Integrative Cancer Center. *J Biomed Biotechnol* **2012**:874276.
5. Li MC, Zhang YQ, Meng CW, Gao JG, Xie CJ, Liu JY and Xu YN. 2021. Traditional uses, phytochemistry, and pharmacology of Toxicodendron vernicifluum (Stokes) F.A. Barkley – A review. *J Ethnopharmacol* **267**:113476.
6. An N, Pourzal S, Luccioli S and Vukmanovic S. 2020. Effects of diet on skin sensitization by nickel, poison ivy, and sesquiterpene lactones. *Food Chem Toxicol* **137**:111137.
7. Hodgson E. 2012. Toxins and venoms. *Prog Mol Biol Transl Sci* **112**:373-415.
8. Ministry of Food and Drug Safety. 2024. Notice No. 2024-71. Food Code 2. Common Standards and Specifications for General Foods. Available from: https://various.foodsafetykorea.go.kr/fsd/?idx=12097#/ext/Document/FC?searchNm=%EC%9A%B0%EB%A3%A8%EC%8B%9C%EC%98%AC&itemCode=F-C0A003001002A015.
9. Lee SO, Kim SJ, Kim JS, Ji H, Lee EO and Lee HJ. 2018. Comparison of the main components and bioactivity of Rhus verniciflua Stokes extracts by different detoxification processing methods. *BMC Complement Altern Med* **18**(1):242.
10. Lee JH, Jeong ST, Kang JE and Choi HS. 2019. Effect of Perenniporia fraxinea on Eliminating Urushiol from Rhus verniciflua Stokes Stem Bark. *Kor J Mycol* **47**(4):347-357.
11. Choi HS, Yeo SH, Jeong ST, Choi JH, Park HS and Kim MK. 2012. Preparation and characterization of urushiol free fermented Rhus verniciflua stem bark (FRVSB) extracts. *Korean J Food Sci Technol* **44**(2):173-178.
12. Song HY, Kim KI, Han JM, Park WY, Seo HS, Lim S and Byun EB. 2022. Ionizing radiation technology to improve the physicochemical and biological properties of natural compounds by molecular modification: A review. *Radiat Phys Chem* **194**:110013.
13. Calado T, Fernandez-Cruz ML, Cabo Verde S, Venancio A and Abrunhosa L. 2018. Gamma irradiation effects on ochratoxin A: Degradation, cytotoxicity and application in food. *Food Chem* **240**:463-471.
14. Kang JA, Song HY, Byun EH, Ahn NG, Kim HM, Nam YR, Lee GH, Jang BS, Choi DS, Lee DE and Byun EB. 2018. Gamma-irradiated black ginseng extract inhibits mast cell degranulation and suppresses atopic dermatitis-like skin lesions in mice. *Food Chem Toxicol* **111**:133-143.
15. Chang KA, Chew LY, Law KP, Ng JF, Wong CS, Wong CL and Hussein S. 2022. Effect of gamma irradiation on the physicochemical properties of sodium alginate solution and internally crosslinked film made thereof. *Radiat Phys Chem* **193**:109963.
16. Jeong IY, Park YD, Jin CH, Choi DS, Byun MW, Ryu HW, Kim DY and Baek JY. 2011. Reduction of Skin Allergy of Rhus verniciflua Sap Utilizing Radiation Technology. *Journal of Radiation Industry* **5**(1):25-33.
17. Li C, Zhang R, Sogore T, Feng J, Liao X, Wang X, Zhang Z and Ding T. 2025. Electron beam irradiation in food processing: Current applications and strategies for commercial scale implementation. *Sustainable Food Technology*.
18. IAEA (International Atomic Energy Agency). 2022. Development of Electron Beam and X Ray Applications for Food Irradiation (DEXA-FI).
19. Mehnert R. 1995. Electron beams in research and technology. *Nucl Instrum Methods Phys Res B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **105**(1-4):348-358.
20. Chen S, Wang L, Lin X, Ni P, Liu H and Li S. 2023. Catechol derivative urushiol's reactivity and applications beyond traditional coating. *Ind Crops Prod* **197**:116598.
21. Lee B, Han H, Hahn HG, Doh JM, Park SH, Lee E, Lee SS, Park C, Lim HS and Lim JA. 2020. Ecofriendly catechol lipid bioresin for low-temperature processed electrode patterns with strong durability. *ACS Applied Materials & Interfaces* **12**(14):16864-16876.
22. Hosseinimehr SJ. 2010. Flavonoids and genomic instability induced by ionizing radiation. *Drug Discov Today* **15**(21-22):907-918.
23. Kumar S and Pandey AK. 2013. Chemistry and biological activities of flavonoids: an overview. *Sci World J* **2013**:162750.
24. Sonwani S and N R. 2020. Gamma radiation induced changes in antioxidant and radioprotective activities of flavonoids differing mainly with respect to–OH substitution pattern in B and C rings. *J Radioanal Nucl Chem* **326**(1):801-811.
25. Marković JMD, Milenković D, Amić D, Mojović M, Pašti I and Marković ZS. 2014. The preferred radical scavenging mechanisms of fisetin and baicalein towards oxygen-centred radicals in polar protic

and polar aprotic solvents. *RSC Advances* **4**(61):32228-32236.
26. Jiménez M, Escribano-Cebrián J and García-Carmona F. 1998. Oxidation of the flavonol fisetin by polyphenol oxidase. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects* **1425**(3):534-542.
27. Clifford MN and Scalbert A. 2000. Ellagitannins–nature, occurrence and dietary burden. *J Sci Food Agric* **80**(7):1118-1125.
28. Naróg D and Sobkowiak A. 2023. Electrochemistry of flavonoids. Molecules **28**(22):7618.
29. Lazurik V, Moskvin V and Tabata T. 1998. Average depths of electron penetration: use as characteristic depths of exposure. *IEEE Trans Nucl* **45**(3):626-631.