Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 1, pp. 17-22, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.1.17

Original article

감마선 조사된 Baicalin으로부터 항산화 플라바논의 분리

이하늬[1] · 정경한[1] · 이승식[1] · 정병엽[1] · 배형우[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소

Isolation of Antioxidant Flavanones from Baicalin Induced by Gamma-Irradiation

Hanui Lee[1], Gyeong Han Jeong[1], Seung Sik Lee[1], Byung Yeoup Chung[1], and Hyoung-Woo Bai[1,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute (ARTI), Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Jeongeup 56212, Republic of Korea

ABSTRACT Gamma irradiation is widely used to induce structural modifications in natural products, thereby enhancing their biological activities. In this study, baicalin was irradiated to generate potential antioxidant compounds, and its radical scavenging activity was evaluated using DPPH and $ABTS^+$ assays. Gamma irradiation transformed baicalin into three newly formed flavanone derivatives: baicalinols C (**1**), A (**2**), and B (**3**). The structures of these compounds were elucidated through detailed analysis of NMR and mass spectroscopic data. Among them, baicalinol C (**1**), which contains two hydroxymethyl groups, exhibited markedly enhanced DPPH and $ABTS^+$ scavenging activity with SC_{50} values of 6.3±0.1 and 12.9±0.6 μM, respectively, outperforming the parent baicalin. These findings demonstrate that gamma irradiation effectively produces hydroxymethylated baicalin derivatives (**1**-**3**) with significantly improved antioxidant properties.

Key words: Gamma-Irradiation, Baicalin, Degradation, Radical Scavenging, Flavanone

1. 서 론

인체는 에너지 생성 과정에서 산소를 필수적으로 이용하지만, 자외선 노출, 흡연, 대기오염, 약물, 방사선 등 다양한 환경적 요인에 의해 superoxide (O_2^-), nitric oxide (NO), nitrogen dioxide (NO_2), hydroxyl radical (OH), peroxynitrite ($ONOO^-$)와 같은 활성산소종(reactive oxygen species, ROS)이 과도하게 생성될 수 있다[1,2]. 이러한 ROS는 산화적 스트레스를 유발하여 세포의 지질, 단백질, 당, DNA 등 주요 구성성분을 손상시키며, 결과적으로 노화, 암, 심혈관계 질환, 뇌신경계 질환, 피부 질환 등 다양한 만성 질환의 발생과 밀접한 관련이 있다[3,4]. 생체는 superoxide dismutase, catalase, peroxidase와 같은 항산화 효소 및 비타민 C 및 E, 글루타티온(glutathione) 등 내인성 항산화 물질을 통해 이러한 산화 손상을 억제할 수 있으나[5], 스트레스 요인에 의해 ROS가 과도하게 증가할 경우 이러한 체내 방어체계만으로는 충분한 보호가 이루어지지 않는다. 따라서 활성산소종 및 자유라디칼을 감소시키고, 이를 통해 노화와 만성질환을 예방할 수 있는 외부 항산화 성분의 보충이 필요하다[6]. 한편, butylated hydroxyanisole (BHA), butylated hydroxytoluene (BHT), tertiary butylhydroquinone (TBHQ) 등 합성 항산화제가 개발되어 사용되어 왔으나, 독성 및 잠재적 발암성 등의 부작용이 보고되면서 그 사용이 제한되고 있다[7]. 이에 따라 보다 안전성이 높고 부작용이 적은 천연 유래 항산화제 개발의 필요성이 더욱 강조되고 있다[8].

Baicalin (5,6,7-trihydroxyflavone glucuronide)은 *Scutellaria baicalensis*, *Scutellaria lateriflora* 및 *Oroxylum indicum* 등 여러 약용 식물에서 발견되는 대표적인 플라보노이드 성분으로 알려져 있다[9]. 이전 연구에 따르면 baicalin은 prolyl endopeptidase를 억제하는 활성을 가지며, 췌장암 세포에서 세포사멸(apoptosis)을 유도하는 효과가 보고된 바 있다[10,11]. 또한 이 화합물은 GABAA (γ-aminobutyric acid type A) 수용체의 benzodiazepine 결합 부위뿐만 아니라 비-benzodiazepine 부위에도 작용하는 양성 알로스테릭 조절자로 기능한다는 연구 결과가 제시되어 있다[12]. 최근에는 미생물적 생체전환(biotransforma-

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

Copyright© 2026 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Hyoung-Woo Bai
Tel: +82-63-570-3334, Fax: +82-63-570-3339, E-mail: hbai@kaeri.re.kr

Received 8 December 2025 **Revised** 25 March 2026 **Accepted** 30 March 2026

tion)을 통해 baicalin의 구조가 변형될 경우, 항종양 및 항균 활성 등이 더욱 향상될 수 있다는 보고들이 이어지고 있다[13]. 이러한 연구들은 baicalin이 다양한 생리활성을 지닌 유망한 천연물 기반 소재일 뿐만 아니라, 구조 변환을 통해 기능성 향상이 가능한 잠재적 리드 화합물임을 시사한다.

감마선 조사는 가열처리를 가하지 않고도 식품의 살균, 멸균 및 저장성 향상 등에 활용할 수 있는 기술로, 전 세계적으로 식품 품질 개선을 목적으로 널리 적용되고 있다[14,15]. 최근에는 감마선이 식품 및 천연물의 물리·화학적 특성에 미치는 영향을 규명하려는 연구가 증가하고 있으며[16], 여러 소재에서 기능성의 향상 사례가 보고되고 있다. 잔디(*Eremochloa ophiuroides*) 추출물의 경우, 감마선 조사 후 미백 및 주름 개선과 연관된 tyrosinase 및 elastase 저해활성 효과 증가 및 색소 제거 메커니즘이 보고되어 있다[17]. 또한 오미자(*Schizandra chinensis*)에 존재하는 anthocyanidin 계열의 cyanidin-3-*O*-xylosylrutinoside가 감마선 조사 과정에서 분해되며 신규 물질이 생성되었고, 이러한 변화가 LC-MS 분석을 통해 구조적으로 규명되며 색소 제거 메커니즘이 밝혀진 연구도 있다[18]. 이외에도 여러 천연 페놀성 화합물에서 감마선 조사 후 새로운 화합물이 생성되고[19,20], 이들 신규 화합물이 다양한 기능성 활성을 나타낸다는 결과들이 축적되고 있다. 이러한 연구들은 감마선 조사가 천연물 구조 변환을 유도하여 생리활성을 강화하는 유효한 도구가 될 수 있음을 시사한다.

본 연구에서는 천연 플라보노이드인 baicalin에 감마선을 조사하여 생성된 신규 화합물을 HPLC 분석을 통해 확인하였으며, 조사산물의 항산화 활성을 평가하기 위해 DPPH 및 $ABTS^+$ 라디칼 소거능을 측정하였다. 이후 칼럼크로마토그래피와 다양한 기기분석을 이용하여 신규 생성된 화합물의 구조를 규명하였고, 분리된 유도체들이 강력한 라디칼 소거활성을 나타냄을 확인하였다. 본 논문에서는 이러한 신규 화합물의 분리 및 항산화 활성 결과를 보고한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시약 및 기기

본 연구에서 사용된 baicalin, 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) 및 2,2′-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) radical cation ($ABTS^+$) 등의 시약은 Sigma Chemical Co. (St. Louis, MO, USA)에서 구입하여 실험에 사용하였다. 역상분리 분석에는 Shimadzu사의 HPLC 시스템(LC-10A, Tokyo, Japan)을 적용하였다. ^1H 및 ^{13}C NMR, ^1H–^1H COSY, NOESY, HSQC, HMBC 등의 핵자기공명 스펙트럼은 acetone-d_6 (δ_H 2.04 δ_C 29.9)를 용매로 하여 Avance NEO-600 instrument (Bruker, Karlsruhe, Germany) 로 측정하였다. 또한 모든 분석과 컬럼 크로마토그래피에는 특급 시약 등급의 용매를 사용하였다. 분자량 분석은 ESIMS 기법을 이용하였으며, 이를 위해 Vanquish UPLS System (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)를 사용하였다. 화합물 분리·정제는 YMC Co. (Kyoto, Japan)의 YMC-gel ODS AQ 120S를 충전제로 사용한 컬럼 크로마토그래피로 수행하였다. 흡광도 측정은 ELISA reader (Infinite F200, Tecan Austria GmbH, Grödig, Austria)를 사용하여 진행하였다.

2.2. 감마선 조사

감마선 조사는 첨단방사선연구소 내 cobalt-60 감마선 조사장치(point source AECL IR-79, 100 kCi, MDS Nordion International Co. Ltd., Ottawa, ON, Canada)를 이용하여 수행하였다. 조사 조건은 선량률 10 kGy/h (320 kCi 기준)로 설정하였으며, 흡수선량은 Bruker Instruments (Rheinstetten, Germany)의 5 mm alanine dosimeter를 사용하여 확인하였다. 해당 dosimeter는 국제원자력기구(IAEA) 표준 절차에 따라 교정 후 실험에 적용하였다. Baicalin (0.5 g)은 메탄올(0.5 L)에 용해한 뒤 직경 5.0 cm, 높이 15.0 cm의 코니컬 튜브에 담아 총 50 kGy 선량으로 조사하였다[19]. 조사된 시료의 항산화능을 평가하기 위해 DPPH 및 $ABTS^+$ 라디칼 소거활성을 측정한 결과, SC_{50} 값은 각각 40.1±0.7와 38.9±1.1 μg/mL로 나타나 우수한 활성 특성이 확인되었다. 이후 동일 시료를 대상으로 다양한 컬럼 크로마토그래피 및 기기분석을 통해 단일 화합물을 성공적으로 분리·정제하였다.

2.3. 화합물 분리 및 구조동정

50 kGy로 감마선을 조사한 baicalin으로부터 얻은 조사산물(405 mg)은 YMC gel ODS AQ 120-50S column (1.5 cm i.d. × 35 cm)을 이용한 컬럼크로마토그래피와 ODS column (YMC gel ODS A-323, 4.6 mm × 150 mm)을 사용한 semi-preparative HPLC를 순차적으로 적용하여 분리 정제하였다. 그 결과, baicalinol C (**1**) (20.1 mg, t_R 2.1 min), baicalinol A (**2**) (101.1 mg, t_R 4.2 min), baicalinol B (**3**) (95.6 mg, t_R 4.8 min)를 확보하였다. HPLC 분석은 1% formic acid를 함유한 water를 solvent A로, acetonitrile을 solvent B로 사용하여 28% acetonitrile 조건의 isocratic 방식으로 20분간 수행하였고, 유속은 1.0 mL/min으로 유지하였다. 화합물 검출은 280 nm에서 진행하였다. 분리된 화합물들은 NMR을 포함한 다양한 기기분석을 바탕으로 구조를 동정하였다.

Baicalinol C (**1**): Yellow amorphous powder, ESIMS *m/z* 531 $[M+Na]^+$; ^1H-NMR (600 MHz, acetone-d_6): δ 7.52 (2H, dd, *J* = 7.8, 1.2 Hz, H-2′, 6′), 7.36 (2H, t, *J* = 7.8 Hz, H-3′, 5′), 7.26 (1H, dd, *J* = 7.8, 1.2 Hz, H-4′), 6.55 (1H, s, H-8), 5.07 (1H, d, *J* = 7.8 Hz, H-1″), 3.95 (1H, d, *J* = 12.0 Hz, H-11a), 3.85 (1H, d, *J* = 12.0 Hz, H-11b), 3.83 (1H, d, *J* = 9.0 Hz, H-5″), 3.76 (1H, dd, *J* = 11.4, 8.4 Hz, H-12a), 3.62 (1H, overlap, H-2″), 3.60 (1H, overlap, H-4″), 3.58 (1H, overlap, H-3″), 3.54 (1H, overlap,

H-12b); ^{13}C-NMR (150 MHz, acetone-d_6): δ 199.3 (C-4), 174.0 (C-6″), 153.5 (C-5), 153.5 (C-7), 153.5 (C-9), 149.0 (C-5), 138.7 (C-1′), 128.6 (C-7), 128.5 (C-3′, 5′), 127.7 (C-4′), 125.7 (C-2′, 6′), 103.3 (C-10), 101.0 (C-1″), 95.7 (C-8), 86.5 (C-2), 75.5 (C-5″), 75.4 (C-3″), 72.8 (C-2″), 71.8 (C-4″), 66.0 (C-11), 58.4 (C-12), 53.0 (C-3).

Baicalinol A (**2**): Yellow amorphous powder, ESIMS *m/z* 501 [M+Na]$^+$; ^{1}H-NMR (600 MHz, acetone-d_6) δ 7.37 (2H, dd, J=7.8, 1.2 Hz, H-2′, 6′), 7.19 (2H, t, J=7.8 Hz, H-3′, 5′), 7.12 (1H, dd, J=7.8, 1.2 Hz, H-4′), 6.40 (1H, s, H-8), 5.13 (1H, d, J=7.8 Hz, H-1″), 3.76 (1H, d, J=12.0 Hz, H-11a), 3.48 (1H, d, J=12.0 Hz, H-11b), 3.65 (1H, t, J=9.0 Hz, H-4″), 3.62 (1H, t, J=9.0 Hz, H-3″), 3.59 (1H, m, H-2″), 4.11 (1H, d, J=9.0 Hz, H-5″); ^{13}C-NMR (150 MHz, acetone-d_6): δ 198.0 (C-4), 170.4 (C-6″), 153.6 (C-9), 153.0 (C-7), 149.0 (C-5), 139.1 (C-1′), 128.6 (C-3’, 5′), 128.2 (C-4′), 127.7 (C-6), 126.3 (C-2′, 6′), 104.0 (C-10), 100.4 (C-1″), 95.4 (C-8), 85.9 (C-2), 75.2 (C-5″), 75.1 (C-3″), 72.7 (C-2″), 71.3 (C-4″), 68.9 (C-11), 40.7 (C-3).

Baicalinol B (**3**): Yellow amorphous powder, ESIMS *m/z* 501 [M+Na]$^+$; ^{1}H-NMR (600 MHz, acetone-d_6) δ 7.34 (2H, dd, J=7.8, 1.2 Hz, H-2′, 6′), 7.22 (2H, t, J=7.8 Hz, H-3′, 5′), 7.15 (1H, dd, J=7.8, 1.2 Hz, H-4′), 6.40 (1H, s, H-8), 5.14 (1H, d, J=7.8 Hz, H-1″), 3.76 (1H, d, J=12.0 Hz, H-11a), 3.50 (1H, d, J=12.0 Hz, H-11b), 3.57 (1H, overlap, H-3″), 3.60 (1H, t, J=9.0 Hz, H-4″), 3.55 (1H, m, H-2″), 4.07 (1H, d, J=9.0 Hz, H-5″); ^{13}C-NMR (150 MHz, acetone-d_6): δ 198.0 (C-4), 170.6 (C-6″), 153.7 (C-9), 152.9 (C-7), 149.0 (C-5), 139.3 (C-1′), 128.5 (C-3’, 5′), 128.1 (C-4′), 127.7 (C-6), 126.4 (C-2′, 6′), 104.0 (C-10), 100.1 (C-1″), 94.9 (C-8), 86.0 (C-2), 75.3 (C-5″), 75.2 (C-3″), 72.4 (C-2″), 71.4 (C-4″), 69.0 (C-11), 40.7 (C-3).

2.4. 라디칼 소거활성 측정

감마선이 조사된 baicalin 조사산물과 분리된 단일 화합물의 DPPH 라디칼 소거능은 Blois 보고한 방법을 참고하여 변형 및 적용하였다[21]. 시료용액 120 μL에 0.45 mM DPPH 용액 60 μL을 혼합한 후 충분히 교반하고, 상온에서 15분간 반응시켰다. 이후 ELISA reader (Infinite F200, Tecan Austria GmBH, Grödig, Austria)를 사용하여 517 nm에서 흡광도를 측정하였다.

ABTS$^+$ 라디칼 소거활성은 Re 등의 방법을 기초로 하여 다음과 같이 수행하였다[22]. 7 mM ABTS와 2.4 mM 과황산칼륨을 동일한 부피비로 혼합한 뒤 암조건에서 약 12시간 동안 반응시켜 ABTS$^+$ 라디칼을 생성하였다. 생성된 용액은 734 nm에서의 흡광도가 0.7-0.8 수준이 되도록 희석하여 실험에 사용하였다. 희석한 ABTS$^+$ 용액 100 μL에 각 조사산물 또는 단일 화합물 100 μL을 첨가하여 실온에서 7분간 반응시킨 후, ELISA reader를 이용하여 734 nm에서 흡광도를 측정하였다.

DPPH 및 ABTS$^+$ 라디칼 소거활성의 양성대조군은 천연 항산화제로 널리 활용되는 (+)-catechin을 사용하였다. 각 시료의 라디칼 소거능은 무처리군 대비 흡광도 감소 비율로 평가하였으며, SC_{50} (half maximal scavenging activity concentration)는 시료가 해당 라디칼을 50% 소거하는 데 필요한 농도로 정의하였다.

2.5. 통계처리

실험결과는 SPSS package program (version 20.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하여 각 실험군 간의 유의성을 검증한 후 Ducan’s multiple range test에 의해 실험군 간의 차이를 p<0.05 유의수준에서 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 감마선 조사된 baicalin 조사산물로부터 활성 물질의 분리

선행 연구에서 baicalin에 30, 50, 70 kGy의 선량을 각각 조사하여 NO 생성 억제 활성을 평가한 결과, 50 kGy 조사산물이 가장 우수한 생리활성을 나타냈으며, 이는 모화합물 대비 약 2배 향상된 수치였다[23]. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서도 구조 변환 효율과 항산화 활성이 가장 최적화된 50 kGy를 실험 선량으로 채택하였다. 이후 연구에서는 감마선이 조사된 baicalin 조사산물의 항산화 활성을 평가하기 위해 DPPH 및 ABTS$^+$ 라디칼 소거능을 측정하였다. 그 결과, SC_{50} 값은 각 40.1±0.7 및 38.9±1.1 μg/mL로 나타나, 모 화합물 대비 항산화 활성의 뚜렷한 향상이 확인되었다. 이후 ODS gel을 고정상으로 적용한 column chromatography를 통해 세 종류의 신규 flavanone 유도체를 분리하였으며, 각 단일 화합물에 대해 동일한 라디칼 소거활성 평가를 수행하였다. 분리된 세 화합물은 1D·2D NMR 및 ESIMS 스펙트럼을 측정하고 문헌값[23]과 비교하여, 화합물 **1**은 baicalinol C, 화합물 **2**는 baicalinol A, 화합물 **3**은 baicalinol B로 동정하였다. 또한 감마선 조사 baicalin의 HPLC chromatogram과 비교한 결과, baicalinol C (t_R 2.1 min), baicalinol A (t_R 4.2 min), baicalinol B (t_R 4.8 min)이 모두 조사산물 내에서 검출됨을 확인하였다(Fig. 1). 감마선이 메탄올 용액에 조사될 때 용매로부터 하이드록시메틸 라디칼(•CH_2OH)을 포함한 다양한 라디칼이 생성된다. 생성된 하이드록시메틸 라디칼이 baicalin의 C-2 및 C-3 위치에 존재하는 이중결합에 친핵적으로 부가 반응을 일으키며, 이 과정에서 C-ring의 이중결합이 포화되면서 flavanone 골격의 baicalinol 유도체가 형성되는 것으로 판단된다.

3.2. 분리된 단일물질의 DPPH 및 ABTS$^+$ 라디칼 소거활성

50 kGy 조건에서 감마선을 조사한 baicalin의 라디칼 소거활성을 평가한 결과, SC_{50} 값이 각각 40.1±0.7 및 38.9±1.1 μg/mL로 나타났으며, 이는 비조사군(SC_{50}>200 μg/mL)에 비해 상당히

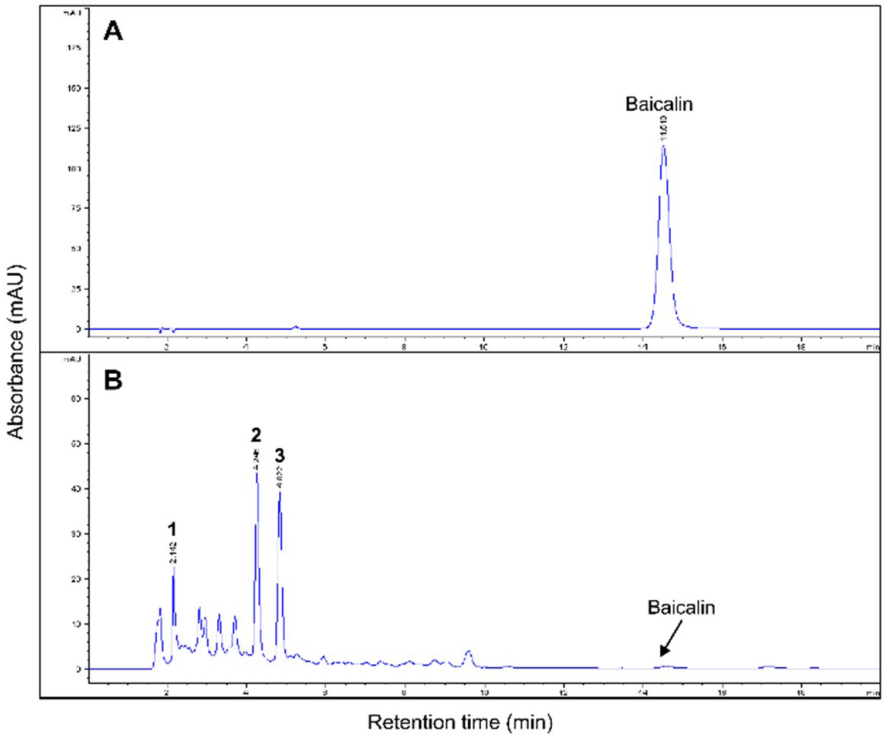

Fig. 1. HPLC chromatogram of baicalin (**A**) and irradiated mixtures (**B**) at 50 kGy. **1**, baicalinol C; **2**, baicalinol A; **3**, baicalinol B.

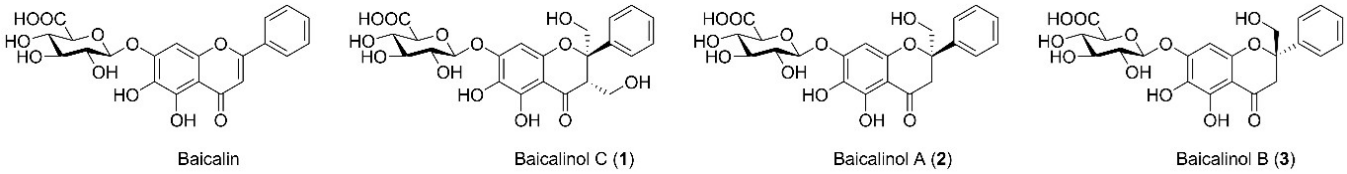

Fig. 2. Chemical structures of newly generated flavanones **1-3** of baicalin.

향상된 항산화 활성을 보였다. 조사산물은 column chromatography와 HPLC 분석을 통해 분리하였으며, 각 단일 화합물의 구조는 NMR 및 MS 분석을 바탕으로 baicalinol C (**1**), baicalinol A (**2**), baicalinol B (**3**)로 확인되었다(Fig. 2). 분리된 화합물의 DPPH 라디칼 소거능을 평가한 결과(Table 1), C-2 및 C-3의 이중결합이 소실되고 두 개의 hydroxymethyl기가 도입된 baicalinol C (**1**)은 SC_{50} 6.3±0.1 μM으로 가장 뛰어난 활성을 나타내었다. C-2 위치에 하나의 hydroxymethyl기가 결합된 baicalinol A (**2**)은 SC_{50} 15.9±0.7 μM으로 모화합물인 baicalin보다 우수한 활성을 보였으며, baicalinol A (**2**)의 입체이성질체인 baicalinol B (**3**)도 SC_{50} 15.2±0.6 μM으로 유사한 수준의 소거능을 나타내었다. 다만, baicalinol A (**2**)와 B (**3**)의 활성은 hydroxymethyl기가 두 개 존재하는 baicalinol C (**1**)보다는 낮게 나타나, hydroxymethyl기의 도입 수가 항산화 활성에 중요한 영향을 미침을 확인하였다. $ABTS^{+}$ 라디칼 소거능 평가에서도 baicalinol C (**1**)은 SC_{50} 12.9±0.6 μM으로 가장 높은 활성을 보였으며, 이는 양성대조군으로 사용된 천연 항산화제 (+)-catechin (SC_{50} 19.7±0.9 μM)보다도 우수한 결과이다. 최근 연구에서도 유사한 경향이 보고된 바 있으며, 대표적으로 콩의 주요 isoflavonoid인 genistein은 감마선 조사 시 C-2 위치에서 hydroxymethyl화된 신규 화합물이 생성되는 것으로 알려져 있다[24]. 또한 메밀의 주요 플라보노이드인 rutin에서도 방사선 조사에 의해 C-2 위치에 hydroxymethyl기가 도입된 radiorutinol 및 isoradiorutinol이 형성된다는 결과가 보고된 바 있다[25]. 본 연구에서도 메탄올 용액 환경에서 감마선 조사 시 다량의 라디칼[20]이 생성되며, 이러한 라디칼 반응에 의해 baicalin의 구조 변형 및 신규 산물의 생성이 유도되었음을 확인하였다. 생성된 신규 화합물들은 모화합물 대비 뛰어난 라디칼 소거활성을 나타내어 감마선 유도 분자변환의 활용 가능성을 시사한다.

천연물의 구조를 변형하여 기능성을 증진시키는 연구가 다양한 소재에서 보고되고 있다. 예를 들어, 사과와 배 등에 풍부하게 존재하는 phloridzin을 대상으로 방사선 조사를 적용한 결과, 신규

Table 1. Radical scavenging activities of newly generated flavanones from baicalin induced by gamma irradiation

Compounds	SC_{50} values (μM)[a]	
	DPPH radical	$ABTS^+$ radical
Baicalin	>200[z]	>200[z]
IR-Baicalin	40.1±0.7[b]	38.9±1.1[b]
Baicalinol C (**1**)	6.3±0.1[w]	12.9±0.6[w]
Baicalinol A (**2**)	15.9±0.7[x]	32.3±1.1[y]
Baicalinol B (**3**)	15.2±0.6[x]	31.2±1.1[y]
(+)-Catechin[c]	23.8±1.0[y]	19.7±0.9[z]

[a]The values (μM) are defined as the concentration that results in a 50% decrease of DPPH and $ABTS^+$ radicals. Activity data are mean±Standard deviation (SD) from triplicate experiments. Different letters (w-z) within the same column indicate significant differences (p<0.05).
[b]The values for the IR-Baicalin are expressed in μg/mL
[c](+)-Catechin was used as a positive control.

cyclization 반응을 통해 neolignan 계열의 phlorocyclin 및 isophlorocyclin이 생성되었으며, 각각 SC_{50} 45.1 및 58.6 μM으로 모 화합물 대비 우수한 DPPH 라디칼 소거활성을 보이는 것으로 확인되었다 [26]. 또한 진피의 주요 쓴맛 성분인 naringin에 플라즈마 처리를 적용하였을 때 methoxymethyl화된 신규 naringin 유도체가 생성되었으며, 이들 중 narinplamin A와 B는 SC_{50}가 각각 57.3 및 148.2 μM으로 보고되어 기능성이 향상된 것으로 나타났다[27]. 본 연구에서는 baicalin에 감마선을 조사하여 3종의 신규 flavanone 유도체를 분리·동정하였으며, 각 화합물은 모두 모 화합물 대비 우수한 라디칼 소거능을 나타냄을 확인하였다. 이러한 결과들은 감마선 조사 기술을 활용하여 천연물의 구조를 변환함으로써 신규 생리활성 물질을 도출할 수 있음을 시사하며, 향후 고기능성 소재 개발을 위한 기반 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 나아가 본 연구에서 확인된 신규 화합물의 생리활성에 대해서는 *in vitro* 및 *in vivo* 수준에서의 추가적인 효능 검증이 필요할 것으로 보인다.

4. 요 약

감마선 조사로 생성되는 신규 물질 중 우수한 항산화 활성을 지닌 소재를 탐색하고자 본 연구를 수행하였다. 그 결과, 50 kGy 조건에서 감마선을 조사한 baicalin은 비조사군(SC_{50}>200 μg/mL) 대비 현저히 증가된 항산화 활성을 나타내었으며, SC_{50} 값은 각각 40.1±0.7 및 38.9±1.1 μg/mL로 확인되었다. 조사산물은 ODS 컬럼크로마토그래피와 HPLC 분석을 통해 baicalinol C (**1**), baicalinol A (**2**), baicalinol B (**3**) 등 세 종류의 신규 flavanone 유도체로 분리 및 구조 동정되었으며, 이들 화합물 모두 baicalin 조사산물 내에서 실제로 생성되는 것이 HPLC 분석을 통해 입증되었다. 분리된 화합물의 DPPH 및 $ABTS^+$ 라디칼 소거능을 평가한 결과, 두 개의 hydroxymethyl기가 도입된 baicalinol C (**1**)은 SC_{50} 6.3±0.1 μM (DPPH), 12.9±0.6 μM ($ABTS^+$)으로 가장 우수한 활성을 나타냈으며, 양성대조군인 (+)-catechin보다도 뛰어난 항산화 능력을 보였다. 또한 baicalinol A (**2**)와 baicalinol B (**3**) 역시 모화합물인 baicalin보다 높은 활성을 나타냈고, 특히 hydroxymethyl기 도입 수가 증가할수록 항산화 활성이 향상되는 구조-활성 상관성이 관찰되었다. 종합적으로 본 연구 결과는 감마선 기반 구조변환이 새로운 생리활성 화합물을 발굴하는 데 효과적인 전략임을 보여주며, 확보된 신규 화합물은 고기능성 항산화 소재 개발의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 *in vitro* 및 *in vivo* 실험을 통한 추가적인 효능 평가가 필요할 것으로 보인다.

사 사

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Ministry of Science and ICT (Grant No. RS-2025-02613113).

참고문헌

1. Sies H, Belousov VV, Chandel NS, Davies MJ, Jones DP, Mann GE, Murphy M, Yamamoto M, Winterbourn C. 2022. Defining roles of specific reactive oxygen species (ROS) in cell biology and physiology. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* **23**(7):499-515.
2. Sies H and Jones DP. 2020. Reactive oxygen species (ROS) as pleiotropic physiological signalling agents. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* **21**(7):363-383.
3. Raza MH, Siraj S, Arshad A, Waheed U, Aldakheel F, Alduraywish S and Arshad M. 2017. ROS-modulated therapeutic approaches in cancer treatment. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology* **143**(9):1789-1809.
4. Liou GY and Storz P. 2010. Reactive oxygen species in cancer. *Free Radical Research* **44**(5):479-496.
5. Vives-Bauza C, Starkov A and Garcia-Arumi E. 2007. Measurements of the antioxidant enzyme activities of superoxide dismutase, catalase, and glutathione peroxidase. *Methods in Cell Biology* **80**:379-393.
6. Bolwell GP and Wojtaszek P. 1997. Mechanisms for the generation of reactive oxygen species in plant defence–a broad perspective. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **51**(6):347-366.
7. Zhang XJ, Diao MN and Zhang YF. 2023. A review of the occurrence, metabolites and health risks of butylated hydroxyanisole (BHA). *Journal of the Science of Food and Agriculture* **103**(13):6150-6166.
8. López-Alarcón C and Denicola A. 2013. Evaluating the antioxidant capacity of natural products: a review on chemical and cellular-based assays. *Analytica Chimica Acta* **763**:1-10.
9. Akao T, Sato K, He JX, Ma CM and Hattori M. 2013. Baicalein 6-*O*-β-D-glucopyranuronoside is a main metabolite in the plasma after oral administration of baicalin, a flavone glucuronide of *Scutellariae Radix*, to rats. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*

36(5):748-753.
10. Tarragó T, Kichik N, Claasen B, Prades R, Teixidó M and Giralt E. 2008. Baicalin, a prodrug able to reach the CNS, is a prolyl oligopeptidase inhibitor. *Bioorganic & Medicinal Chemistry* **16**(15):7516-7524.
11. Huang Q, Zhang J, Peng J, Zhang Y, Wang L, Wu J, Ye L, Fang C. 2019. Effect of baicalin on proliferation and apoptosis in pancreatic cancer cells. *American Journal of Translational Research* **11**(9):5645-5654.
12. Wang F, Xu Z, Ren L, Tsang SY and Xue H. 2008. GABAA receptor subtype selectivity underlying selective anxiolytic effect of baicalin. *Neuropharmacology* **55**(7):1231-1237.
13. Ji XL, Xiao YN, Sun RM, Tan ZW, Zhu YQ, Li XL, Li LF, Hou SY. 2024. Identification and characterization of *Lacticaseibacillus rhamnosus* HP-B1083-derived β-glucuronidase and its application for baicalin biotransformation. *Heliyon* **10**(18):eXXXXX.
14. Kang SW, Hwang JH, Jung AH, Park E, Park S, Yoon Y and Park SH. 2021. Effect of non-thermal pasteurization on minced chicken meat based pet food and its quality attributes through gamma ray and electron beam irradiation. *Food Engineering Progress* **25**(2):139-146.
15. Maherani B, Harich M, Salmieri S and Lacroix M. 2019. Antibacterial properties of combined non-thermal treatments based on bioactive edible coating, ozonation, and gamma irradiation on ready-to-eat frozen green peppers. *European Food Research and Technology* **245**(5):1095-1111.
16. Kim KI, Song HY, Han JM, Lim S, Seo HS and Byun EB. 2022. Gamma irradiation on genistein: enhancement of antioxidant property through structural transformation. *Radiation Physics and Chemistry* **193**:109962.
17. Lee EM, Lee SS, Bai HW, Cho JY, Kim TH and Chung BY. 2013. Effect of gamma irradiation on the pigments and the biological activities of methanolic extracts from leaves of centipedegrass (*Eremochloa ophiuroides* Munro). *Radiation Physics and Chemistry* **91**:108-113.
18. Lee SS, Lee EM, An BC, Kim TH, Lee KS, Cho JY, Yoo SH, Bae JS, Chung BY. 2011. Effects of irradiation on decolourisation and biological activity in *Schizandra chinensis* extracts. *Food Chemistry* **125**(1):214-220.
19. Jeong GH, Cho JH, Jo C, Lee S, Lee SS, Bai HW, Chung BY, Kim TH. 2018. Gamma irradiation-assisted degradation of rosmarinic acid and evaluation of structures and anti-adipogenic properties. *Food Chemistry* **258**:181-188.
20. Jeong GH, Lee H, Chung BY and Bai HW. 2025. A new class of hybrid anti-inflammatory agents of silibinin A modified using gamma irradiation. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin* **73**(4):401-411.
21. Blois MS. 1958. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature* **181**(4617):1199-1200.
22. Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M and Rice-Evans C. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine* **26**(9-10):1231-1237.
23. Jeong GH, Lee H, Lee HK, Choi HJ, Chung BY and Bai HW. 2023. Inhibitory effect of γ-ray-modified hydroxymethylated baicalins on NO production. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters* **96**:129491.
24. Jung HJ, Park HR, Jung U and Jo SK. 2009. Radiolysis study of genistein in methanolic solution. *Radiation Physics and Chemistry* **78**(6):386-393.
25. Jeong GH and Kim TH. 2017. Hydroxymethylation of rutin induced by radiolysis as novel α-glucosidase inhibitors. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin* **65**(7):678-682.
26. Jeong GH and Kim TH. 2020. Radiolytic cyclization products of phloridzin as potent anti-glycation agents. *Chemistry & Biodiversity* **17**(9):e2000305.
27. Kim TH, Jang SJ, Chung HW, Kim HJ, Yong HI, Choe W and Jo C. 2015. Enhancement of antioxidant effects of naringin after atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma treatment. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters* **25**(6):1236-1239.