

유채 품종 및 생육단계별 식물체의 항산화 성분 및 항산화 특성

유경단 · 황엄지 · 박유진 · 정재희 · 안다희 · 김현주* · 송연상** · †우관식***

농촌진흥청 국립식량과학원 바이오에너지작물연구소 농업연구사, *농촌진흥청 국립식량과학원 중부작물부 농업연구사, **농촌진흥청 국립식량과학원 바이오에너지작물연구소 농업연구관, ***농촌진흥청 국립식량과학원 기획조정과 농업연구관

Antioxidant Compounds and Antioxidant Activities of Rapeseed Plants according to Cultivar and Growth Stage

Gyeong-dan Yu, Eom-ji Hwang, You-jin Park, Jae Hee Jeong, Da Hee An,
Hyun-Joo Kim*, Yeon-Sang Song** and †Koan Sik Woo***

Researcher, Bioenergy Crop Research Institute, National Institute of Crop Science, RDA, Muan 58545, Korea

*Researcher, Dept. of Central Area Crop Science, National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 16613, Korea

**Senior Researcher, Bioenergy Crop Research Institute, National Institute of Crop Science, RDA, Muan 58545, Korea

***Senior Researcher, Planning and Coordination Div., National Institute of Crop Science, RDA, Wanju 55365, Korea

Abstract

This study investigated phenolic compounds and radical scavenging activities of rapeseed plants according to cultivar and growth stage. For 1st, 2nd, and 3rd harvested rapeseed plants, total polyphenol contents were 12.56~15.85, 10.28~13.17, and 9.94~16.01 mg gallic acid equivalents/g sample, respectively; total flavonoid contents were 9.86~11.05, 10.41~13.06, and 8.18~16.64 mg catechin equivalents/g sample, respectively; total chlorophyll contents were 17.26~21.66, 19.31~24.95, and 22.16~38.39 mg/g sample, respectively; and total glucosinolates contents were 31.13~46.22, 28.51~34.72, and 22.18~30.58 mg SE/g sample, respectively. DPPH and ABTS radical scavenging activities of rapeseed plants were 3.26~5.91 and 10.69~17.17 mg trolox equivalents/g sample, respectively. FRAP activities of 1st, 2nd, and 3rd harvested rapeseed plants were 142.88~63.93, 37.97~61.24, and 32.93~52.36 mM/g sample, respectively. Phenolic compounds and radical scavenging activities of rapeseed plants were found to be high in Halla, Yuryeo, and Yeongsan cultivars. Overall, phenolic compounds and radical scavenging activities of rapeseed plants tended to decrease as the harvest time was delayed. These results indicate that more research on functional ingredients and physiological activities of rapeseed plants is needed to diversify their fields of use.

Key words: rapeseed (*Brassica napus* L.) plants, cultivars, growth stages, phenolic compound, antioxidant activity

서론

최근 환경변화로 인한 호흡기 질환, 혈액순환 관련 질환 등이 증가하면서, 건강한 삶을 유지하기 위한 천연소재의 효능에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Park 등 2018). 이러한 상황에서 유채는 다양한 활성 물질을 함유하고 있으며, 전 식물체가 식품 원료로 인정받고 있어 그 활용성을 증진하기 위해 식물체의 특성 검정이 필요하다. 유채(*Brassica napus*

L.)는 십자화과의 작물 중 하나로 식용유 생산을 목적으로 재배되고 있으며, 우리나라에서는 경관용으로 많이 재배되고 있다(An 등 2023). 국내에서는 재배 목적에 따라 다양한 유채 품종을 개발하고 있다. 중모7001(cv. Jungmo 7001)은 꽃잎이 크기 때문에 경관용으로 적합하며(Kim 등 2014), 중모7002(cv. Jungmo 7002)는 꽃이 일시적으로 개화하는 특성이 있어 개화 균일도가 좋다고 보고되었다(Kim 등 2015). 유려(cv. Yuryeo) 품종은 올레산의 함량이 74%로 높은 것으로 보

† Corresponding author: Koan Sik Woo, Senior Researcher, Planning and Coordination Div., National Institute of Crop Science, RDA, Wanju 55365, Korea. Tel: +82-63-238-5111, Fax: +82-63-238-5118, E-mail: wooks@korea.kr

고되었으며(Jeong 등 2024), 영산(cv. Yeongsan) 품종은 올레산 함량과 수량성이 높은 것으로 보고되었다(Roh 등 2011). 한라(cv. Halla)와 내한(cv. Naehan) 품종은 올레산과 리놀레산이 80% 이상으로 양질의 지방산을 함유하고 있으며, 탐라(cv. Tamra) 품종은 수량성이 높고 제주와 남부지역에 적합한 품종으로 보고되었다(Rural Development Administration 2008). 또한 목포135호(cv. Mokpo 135)는 현재 육성 중인 계통으로 올레산 함량이 약 67%로 높고 수량성도 우수하다. 그러나 유채 연구는 대부분 종자와 식용유 특성에 집중되어 있어, 다양한 유채 품종의 식물체에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다.

유채 식물체의 주요성분 중 하나인 glucosinolate는 황(sulfur)을 포함하는 β -D-glucoside로 배추, 양배추, 브로콜리, 콜리플라워 등 십자화과 채소에 함유된 물질이며, 다양한 생리활성을 지닌 것으로 보고되었다(Fenwick 등 1983; Shim 등 1992; Hwang ES 2010). Glucosinolate가 들어있는 채소를 섭취하면 조직이 파괴되면서 조직 내의 효소에 의해 isothiocyanate, nitrile, thiocyanate와 같은 물질로 분해되고 이들 물질에 의해 십자화과 채소 특유의 냄새 및 맛을 낸다고 보고되었다(Fenwick 등 1983; Stoewsand GS 1995). 특히 indole-3-carbinol, sulforaphane, phenylisothiocyanate 등은 항암 효능이 있는 것으로 알려져 있다(Hwang & Lee 2006; Clarke 등 2008; Hayes 등 2008).

본 연구에서는 유채의 활용성 확대를 위하여 국내에서 육성된 품종의 식물체에 대한 주요 항산화 성분 및 활성을 검정하여, 유채의 이용 분야 다양화를 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 유채 품종별 식물체 시험재료 제조

본 연구에 사용한 유채는 한라(*Brassica napus* L. cv. Halla; HL), 중모7001(cv. Jungmo 7001; JM1), 중모7002(cv. Jungmo 7002; JM2), 목포135호(cv. Mokpo 135; M135), 내한(cv. Naehan; NH), 탐라(cv. Tamra; TR), 유려(cv. Yuryeo; YR), 영산(cv. Yeongsan; YS) 품종을 사용하였다. 유채 종자를 2023년 11월 20일 전남 무안 소재의 국립식량과학원 바이오에너지작물연구실 온실에 파종(20×20 cm)하였으며, 2023년 12월 7일에 1차 수확(약 10 cm), 2024년 1월 4일 2차 수확(약 20 cm), 2024년 1월 31일에 3차 수확(약 40 cm)하였다. 수확된 시료는 10개 개체에 대해 지상부의 길이를 측정하였으며, 동결건조(FDTA-5050, Operon, Gimpo, Korea) 및 분쇄(Micro Hammer-Cutter Mill, Cullati MFC grinder CZ 13, Culatti AG, Zurich, Switzerland)하여 분석용 시료로 사용하였다. 동결건조 후 분쇄한 1차, 2차 및 3차 수확 시료의 수분함량을 측정

(MA-100, Sartorius, Sartorius Lab Instruments GmbH & Co., Goettingen, Germany)한 결과 각각 93.82~95.05, 93.50~94.58 및 90.91~92.36 g/100 g으로 조사되었다. 유채 식물체의 항산화 성분 함량과 항산화활성의 계산은 수분함량을 보정하여 산출하였다.

2. 유채 품종별 식물체의 총 폴리페놀 및 플라보노이드 함량 분석

유채 품종별 식물체의 페놀성 화합물 함량 분석을 위해 동결건조한 시료에 80% 에탄올(Daejung Chemical & Metals, Siheung, Korea)을 넣고 homogenizer (HG-15A, Daihan Scientific Co., Ltd., Wonju, Korea)로 균질화하였다. 이후 24시간 동안 상온 진탕추출(Wise-Cube WIS-RL010, Daihan Scientific Co., Ltd.)하고, 4°C, 1,500×g에서 10분간 원심분리(Sorvall ST-40R, Thermo Fisher Scientific)하여 상등액을 취하였다. 3회 반복 추출한 후 합친 시료를 -20°C 냉동고에 보관하며 분석용으로 사용하였다. 추출물에 대한 총 폴리페놀 및 플라보노이드 함량은 Hwang 등(2022)의 방법으로 분석하였다. 총 폴리페놀 함량은 추출물 50 μ L에 2% sodium carbonate (Na_2CO_3 ; Sigma-Aldrich) 용액 1 mL를 가한 후 3분간 방치하고 50% Folin-Ciocalteu reagent (Sigma-Aldrich) 50 μ L를 가하였다. 30분 후, 반응액의 흡광도를 UV/VIS spectrophotometer (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)를 사용하여 735 nm에서 측정하였다. 표준물질로 gallic acid (Sigma-Aldrich)를 사용하여 검량선을 작성하였으며, 건조 시료 g 중의 mg gallic acid equivalents (GAE, dry basis)로 계산하여 표시하였다. 총 플라보노이드 함량은 추출물 250 μ L에 증류수 1 mL와 5% sodium nitrite(NaNO_2 ; Sigma-Aldrich) 75 μ L를 가한 후, 5분 뒤에 10% aluminum chloride hexahydrate($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; Sigma-Aldrich) 150 μ L를 가하여 6분 동안 방치하였다. 이후 1 N sodium hydroxide(NaOH ; Sigma-Aldrich) 500 μ L를 첨가하고 11분 후 반응액의 흡광도 값을 510 nm에서 측정하였다. 표준물질로 catechin(Sigma-Aldrich)을 사용하여 검량선을 작성하였으며, 건조 시료 g당 mg catechin equivalents(CE, dry basis)로 계산하여 표시하였다.

3. 유채 품종별 식물체의 총 chlorophyll 및 glucosinolate 함량 분석

유채 품종별 식물체의 총 chlorophyll 함량은 Woo 등(2009)의 방법에 따라 시료 20 mg을 100% DMSO(dimethyl sulfoxide, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 5 mL에 침지하여 65°C 항온수조에서 6시간 증탕한 후, 665 nm와 648 nm의 파장에서 흡광도를 측정하였다. 총 chlorophyll 함량은 Total chlorophyll = $20.29A_{648} + 8.02A_{665}$ 식을 이용하여 계산하였다. 유채 품종별

식물체의 총 glucosinolate 함량은 80% 에탄올 추출물 100 μ L에 증류수 0.3 mL와 2 mM sodium tetrachloropalladate(58.5 mg sodium tetrachloropalladate + 170 μ L concentrated HCl + 100 mL D.W) 3 mL를 가하여 실온에서 1시간 반응시킨 후 425 nm에서 흡광도를 측정하였다. 표준물질 sinigrin(Sigma-Aldrich)을 사용하여 농도별 표준용액에 대한 흡광도로 표준 검량선을 작성하였으며, 건조 시료 g 중의 mg sinigrin equivalents (SE, dry basis)로 계산하여 표시하였다(Hwang ES 2010).

4. 유채 품종별 식물체의 radical 소거활성 및 FRAP 활성 측정

유채 품종별 식물체의 radical 소거활성은 DPPH(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, Sigma-Aldrich) 및 ABTS(2,2'-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid, Sigma-Aldrich) radical 소거활성을 측정하였다(Hwang 등 2023). DPPH radical 소거활성은 0.2 mM DPPH 용액(99.9% 에탄올에 용해) 0.8 mL에 시료 추출물 0.2 mL를 첨가한 후, 30분 뒤 520 nm에서 흡광도 감소치를 측정하였으며, trolox(Sigma-Aldrich)를 사용하여 검량식을 작성하여, 건조 시료 g당 mg trolox equivalent antioxidant capacity (TE, dry basis)로 계산하여 표시하였다. ABTS radical 소거활성 측정을 위해 ABTS 7.4 mM과 potassium persulphate (Sigma-Aldrich) 2.6 mM을 혼합하여 하루 동안 암소에 방치하여 ABTS 양이온을 형성시킨 후, 용액의 흡광도 값이 735 nm에서 1.4~1.5가 되도록 에탄올로 희석하여 사용하였다. 희석된 ABTS 용액 1 mL에 시료 추출물 50 μ L를 가하고 30분 후에 흡광도의 변화를 측정하였으며, trolox(Sigma-Aldrich)를 사용하여 검량식을 작성하여 건조 시료 g당 mg trolox equivalent antioxidant capacity(TE, dry basis)로 계산하여 표시하였다.

Ferric-reducing antioxidant power(FRAP)는 Han 등(2022)의 방법에 따라 FRAP reagent 0.18 mL에 시료 추출물 0.03 mL, 증류수 0.09 mL를 가하여 37°C에서 10분 동안 반응시킨 후 UV/VIS spectrophotometer를 이용하여 593 nm에서 흡광도를 측정하였다. FRAP reagent는 300 mM sodium acetate buffer (pH 3.6) 2.5 mL를 37°C에서 가온한 후 40 mM HCl로 용해한 10 mM 2,4,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine 2.5 mL와 20 mM iron (III) chloride($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 2.5 mL를 가하여 제조하였다. 표준 물질로 FeSO_4 를 사용하여 활성을 환산하였다.

5. 통계분석

모든 데이터는 3회 반복 측정하였으며, 평균 \pm 표준편차로 제시하였다. 얻어진 결과는 통계프로그램(Statistical Analysis System; version 9.4, SAS Institute, Cary, NC, USA)을 사용하여 one-way ANOVA 분석 후, 신뢰수준 $p < 0.05$ 에서 Duncan's multiple range test를 통해 유의성을 검정하였으며, 각 분석항목 간의 상관관계도 분석하였다(Park 등 2024). 유채 품종별 항산화 성분 및 항산화활성 측정 결과의 정규화 heatmap은 MetaboAnalyst 5.0(<https://www.metaboanalyst.ca>) 프로그램을 이용하여 품종별 조사항목을 정규화한 후, 군집 분류하여 heatmap을 작성하였다. 정규화 값은 -1.86~2.00의 범위였으며, 각 항목의 수치는 파란색(음수)과 빨간색(양수)의 척도로 나타내었다(Han 등 2022).

결과 및 고찰

1. 유채 품종별 식물체 생육 및 페놀성 화합물 함량

유채의 다양한 활용 가능성을 평가하기 위해 식물체를 재배하고 생육상태를 조사한 결과 Fig. 1과 같이 생육단계에 따

Table 1. The length of rapeseed plants according to different cultivars and growth stages

Cultivars	Length according to growth stages (harvesting times, unit: cm)		
	1 st harvest	2 nd harvest	3 rd harvest
Halla (HL)	9.73 \pm 1.27 ^c	19.00 \pm 1.50 ^c	39.25 \pm 3.25 ^{bc}
Jungmo 7001 (JM1)	11.83 \pm 1.13 ^a	22.28 \pm 1.68 ^{bc}	38.90 \pm 3.94 ^{bc}
Jungmo 7002 (JM2)	11.20 \pm 0.97 ^{ab}	21.53 \pm 1.81 ^{cd}	37.13 \pm 2.91 ^c
Mokpo 135 (M135)	10.45 \pm 0.74 ^{bc}	21.28 \pm 1.91 ^{cd}	41.10 \pm 3.79 ^{ab}
Nachan (NH)	11.20 \pm 1.13 ^{ab}	23.85 \pm 1.51 ^a	42.15 \pm 2.54 ^a
Tamra (TR)	10.13 \pm 2.13 ^c	18.98 \pm 1.79 ^c	37.30 \pm 2.63 ^c
Yuryeo (YR)	11.45 \pm 0.84 ^a	23.30 \pm 1.56 ^{ab}	40.85 \pm 4.10 ^{ab}
Yeongsan (YS)	8.68 \pm 0.87 ^d	20.45 \pm 1.22 ^d	42.75 \pm 3.05 ^a

All values are expressed as the mean \pm S.D. of twenty measurements. Means with different letters within a column (^{a-c}) are significantly different at $p < 0.05$ by a Duncan's multiple range test.

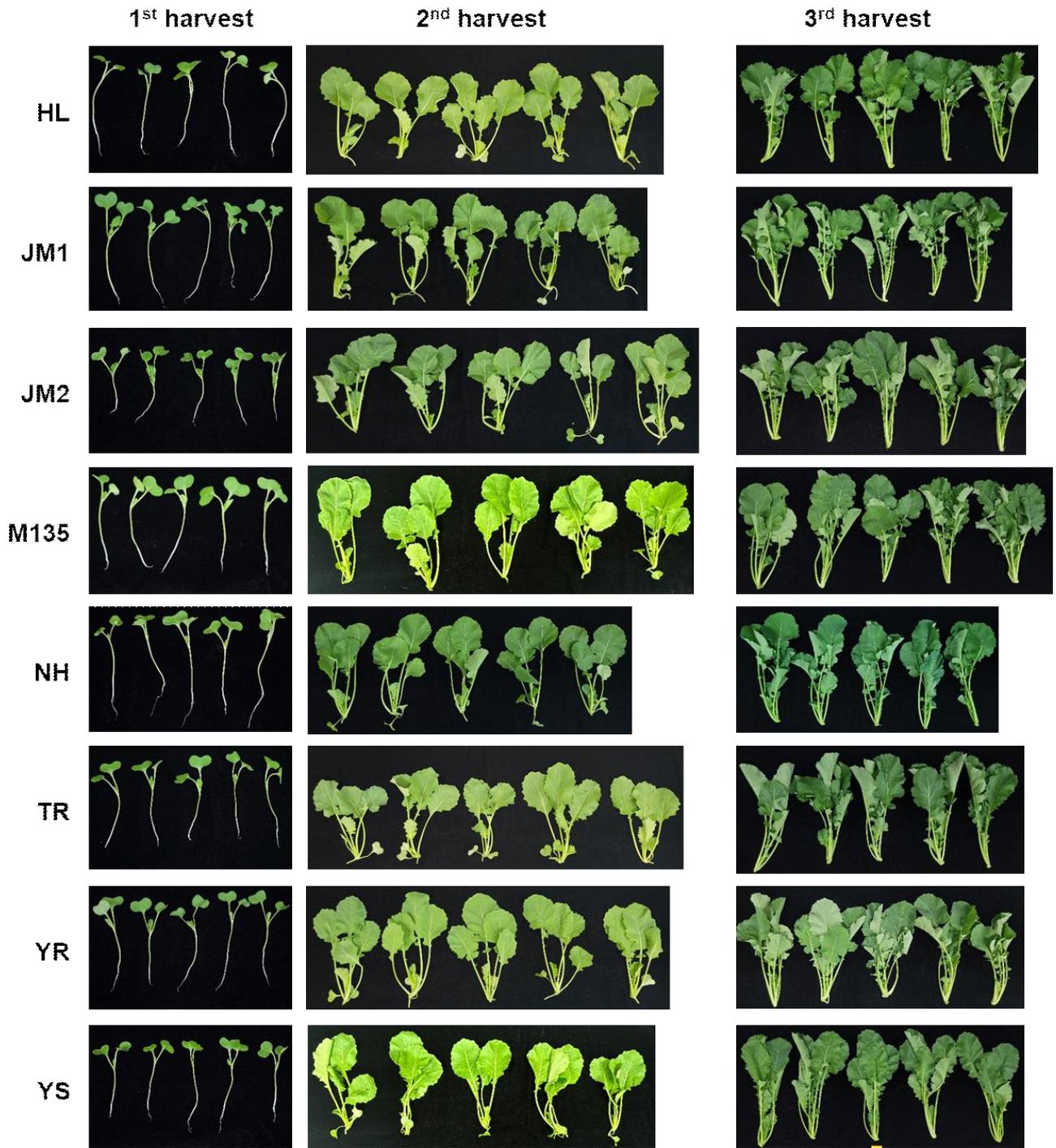


Fig. 1. Photograph of rapeseed plants according to different cultivars and growth stages. HL: *Brassica napus* L. cv. Halla, JM1: cv. Jungmo 7001, JM2: cv. Jungmo 7002, M135: cv. Mokpo 135, NH: cv. Naehan, TR: cv. Tamra, YR: cv. Yuryeo, YS: cv. Yeongsan.

라 품종 간에 생육량의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 1차 (약 10 cm), 2차(약 20 cm) 및 3차(약 40 cm) 수확시기에 따른 식물체 크기를 조사한 결과 Table 1과 같이 품종 간에 차이를

보였다. 특히, 식물체 이용성을 고려하여 2차 및 3차 수확한 시료의 생육 정도를 분석한 결과, 내한(NH)과 유려(YR) 품종이 다른 품종에 비해 생육 정도가 유의하게 높은 것을 확인

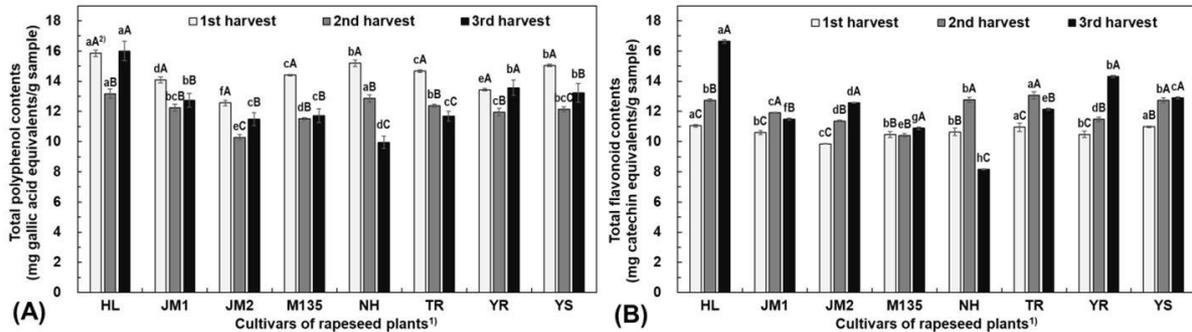


Fig. 2. Total polyphenol (A) and flavonoid (B) contents of rapeseed plants according to different cultivars and growth stages. ¹⁾ HL: *Brassica napus* L. cv. Halla, JM1: cv. Jungmo 7001, JM2: cv. Jungmo 7002, M135: cv. Mokpo 135, NH: cv. Naehan, TR: cv. Tamra, YR: cv. Yuryeo, YS: cv. Yeongsan. ²⁾ All values are expressed as the mean±S.D. of triplicate determinations. Means with different letters within a column (^{a-h} different cultivars or ^{A-C} growth stages) are significantly different at $p < 0.05$ by a Duncan's multiple range test.

하였다.

유채 품종별로 식물체의 총 폴리페놀 및 플라보노이드 함량을 측정된 결과 Fig. 2에서와 같이 유의한 차이가 나타났다 ($p < 0.05$). 식물성 페놀성 화합물은 phenolic hydroxyl 그룹을 가지고 있어 높은 항산화활성을 나타낸다(Woo 등 2013). 유채 품종 및 생육단계별 총 폴리페놀 함량(Fig. 2A)은 유의한 차이를 보였으며($p < 0.05$), 품종별로 1차, 2차 및 3차 수확한 식물체의 총 폴리페놀 함량은 각각 12.56~15.85, 10.28~13.17 및 9.94~16.01 mg GAE/g sample로 나타났다. 특히 한라(HL) 품종은 각각 15.85, 13.17 및 16.01 mg GAE/g sample로 다른 품종에 비해 높은 폴리페놀 함량을 보였다. 특히 품종에 따라 차이는 있으나 대부분 1차 수확이 2차 수확보다 유의미하게 높았고, 3차 수확에서 다시 증가하는 경향을 보였다. 식물의 초기 생육단계에서는 외부 스트레스에 대한 방어가 매우 중요하기 때문에 방어 물질로서 폴리페놀이 활발하게 합성된다고 알려져 있다(Rice-Evans 등 1997). 이는 어린 식물이 충분히 발달하지 않은 상태에서 외부 환경으로부터 더 많은 방어가 필요하기 때문으로 생각되며, 본 연구에서 1차 수확이 2차 수확보다 유의미하게 높았던 결과와도 일치한다. 이러한 결과는 유채 식물체의 항산화 성분 함량을 최적화하기 위해서는 품종 및 수확시기의 선택이 중요하다는 것을 시사한다. 다른 십자화과 작물의 연구 결과에 따르면 브로콜리의 경우, 풍부한 황 비료와 더 긴 햇빛 노출이 일반적으로 더 높은 페놀 화합물 농도를 유도한다고 보고되었다(Vallejo 등 2003). *Tronchuda* 양배추의 경우, 8월 포장에 이식된 후 첫 번째 수확시기인 11월 중순에서 모든 내엽의 개별 페놀 화합물인 3-*p*-coumaroylquinic acid와 4-*p*-coumaroylquinic acid의 농도가 유의미하게 높았지만, 11월 중순, 12월 중순, 1월 중순

의 수확시기에 따라 총 페놀 함량에서는 유의한 차이가 없었다고 보고되었다(Sousa 등 2008). 봄에 파종된 녹양배추의 외엽 부위는 가을 파종된 녹양배추의 외엽 부위보다 페놀산이 유의미하게 더 높은 수준으로 존재했고, 적양배추의 경우 외엽 부위에서 페놀산 함량이 더 높았지만, 계절적 요인은 유의미하지 않아 품종, 재배 환경에 따른 페놀산 함량이 차이가 있는 것으로 보고되었다(Park 등 2014). 또한 배추 4품종을 수확 후 4°C와 20°C에서 6일 동안 저장한 결과, 페놀 함량이 증가하였다고 보고되었다(Harbaum 등 2008).

유채 품종 및 생육단계별 총 플라보노이드 함량(Fig. 2B)은 생육단계가 진행될수록 유의적으로 증가하는 경향을 보였으며($p < 0.05$), 1차, 2차 및 3차 수확한 시료에서 각각 9.86~11.05, 10.41~13.06 및 8.18~16.64 mg CE/g sample로 나타났다. 특히 3차 수확한 한라(HL)와 유려(YR) 품종이 각각 16.64 및 14.32 mg CE/g sample로 높은 플라보노이드 함량을 나타내었다. 천연 페놀성 화합물은 항산화 활성뿐만 아니라, 그 구조에 따라 항균성과 같은 다양한 생리활성을 갖는 것으로 알려져 있으며(Middleton E 1994; Woo 등 2021), 그 중 플라보노이드는 식물에서 자외선 차단, 스트레스 보호, 생리적 기능 강화에 중요한 역할을 한다고 보고되었다(Samanta 등 2011). 이번 연구 결과는 식물이 성숙하면서 환경 스트레스에 대한 방어 기작이 강화되어 플라보노이드의 합성이 촉진된다는 점으로 해석될 수 있으며, 십자화과 작물 중 하나인 배추에서 어린잎보다 성숙 잎에서 플라보노이드 함량이 더 높았다는 연구 결과와도 일치한다(Šola 등 2020). 브로콜리와 콜리플라워의 경우, 총 플라보노이드 함량은 꽃 부위보다 잎 부위에서 유의하게 높으며(Bhandari & Kwak 2015), 청경채와 잎겨자에서 hydroxycinnamic acid와 플라보노이드, 결합형 페

놀 화합물은 잎자루보다 잎에 더 많이 존재한다고 보고되었다(Harbaum 등 2008). 또한, 순무의 경우, 페놀화합물 함량이 잎에서 51.71 $\mu\text{mol/g}$ 으로 어린 싹에서의 38.99 $\mu\text{mol/g}$ 보다 더 높았으며, 플라보놀 화합물이 주요성분이라고 보고되었다(Francisco 등 2009). 이러한 결과는 본 연구에서 관찰된 식물체의 생육단계가 진행됨에 따라 플라보노이드 함량이 유의하게 증가하는 경향과 일치하며, 유채의 주요 유용성분에 대한 수확시기와 재배환경의 영향에 관한 추가적인 연구가 필요함을 시사한다.

2. 유채 품종별 식물체의 총 chlorophyll 및 glucosinolate 함량

유채 품종별 식물체의 총 chlorophyll 함량을 측정한 결과 Fig. 3A와 같이 품종 및 생육단계에 따라 유의적인 차이를 보였다($p < 0.05$). 전체적으로 수확시기가 늦을수록 엽록소 함량이 유의적으로 증가하는 경향을 보였으며($p < 0.05$), 1차, 2차 및 3차 수확한 시료에서 각각 17.26~21.66, 19.31~24.95 및 22.16~38.39 mg/g sample로 조사되었다. 특히 한라(HL), 중모 7001(JM1), 중모 7002(JM2), 유려(YR), 영산(YS) 품종이 3차 수확 시 높은 함량을 나타내었으며, 3차 수확한 한라 품종의 총 chlorophyll 함량은 38.39 mg/g sample로 가장 높은 값을 보였다. 중모 7002(36.31 mg/g sample)와 유려(34.89 mg/g sample) 품종 또한 높은 함량을 보였다.

유채 품종별 식물체의 총 glucosinolate 함량을 측정한 결과, Fig. 3B와 같이 품종 및 생육단계에 따라 유의적인 차이를 보였다($p < 0.05$). 전체적으로 수확시기가 늦어짐에 따라 총 glucosinolate 함량은 감소하는 경향을 보였으며, 1차, 2차, 3차 수확 시료에서 각각 31.13~46.22, 28.51~34.72 및 22.18~

30.58 mg SE/g sample로 나타나 1차 수확한 시료에서 높은 함량을 보였다. 십자화과 채소에 함유된 glucosinolate는 섭취 시 조직이 파괴되면 효소에 의해 분해되어, 십자화과 채소 특유의 냄새와 맛을 낸다(Fenwick 등 1983; Stoewsand GS 1995). 품종별로는 1차 수확한 한라(HL) 품종이 46.22 mg SE/g sample로 가장 높았으며, 2차 수확한 중모 7001(JM1)과 한라(HL) 품종이 각각 34.72 및 34.38 mg SE/g sample, 3차 수확한 영산(YS) 품종과 중모 7001(JM1)이 각각 30.58 및 30.28 mg SE/g sample로 조사되었다. 브로콜리와 콜리플라워 6품종의 경우, 잎 부위보다 꽃 부위에서 글루코시놀레이트 함량이 유의하게 높았다고 보고되었다(Bhandari & Kwak 2015). 순무에서는 글루코시놀레이트 함량이 잎에서 26.84 $\mu\text{mol/g}$, 어린 싹에서 29.11 $\mu\text{mol/g}$ 으로 나타났으며, 그중 글루코나핀(gluconapin) 함량이 23.2 $\mu\text{mol/g}$ 으로 주요 글루코시놀레이트로 확인되었다(Francisco 등 2009). 이러한 결과는 본 연구에서 1차 수확 단계인 새싹에서 가장 높은 글루코시놀레이트 함량을 보인 것과 동일한 경향이었다. 이외에도 순무(*Brassica rapa* ssp. *rapa*)의 형질전환체에서는 털부리의 글루코시놀레이트와 페놀화합물의 함량이 증가함에 따라 항산화, 항균 및 항암 활성이 높아졌다고 보고된 바 있다(Chung 등 2016).

3. 유채 품종별 식물체의 radical 소거활성 및 FRAP 활성

식물 유래 천연 추출물은 인체 내 활성 radical에 의한 노화를 억제하여 만성 염증, 암 등 질병과 노화 예방에 도움을 주며(Bystrom 등 2014; Kim 등 2018; Hwang 등 2023), 페놀성 화합물 함량이 높을수록 항산화성이 높다고 보고되었다(Duval & Shetty 2001). 항산화 성분에 의한 전자공여능을 측

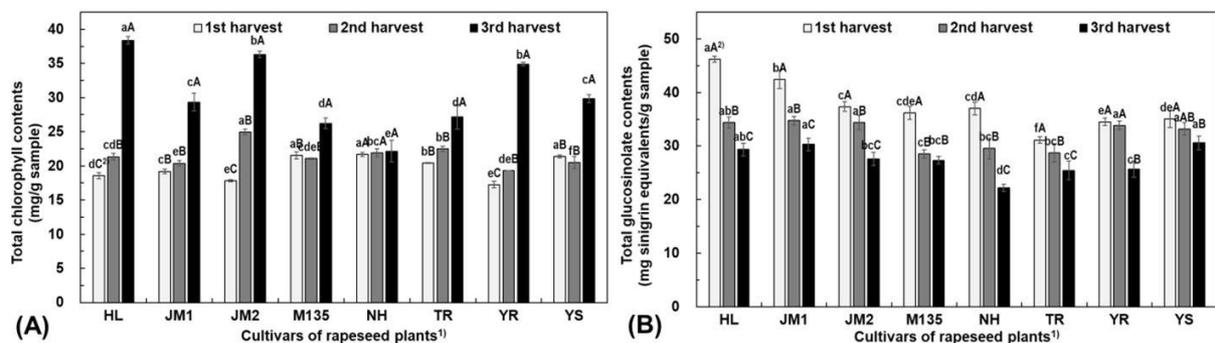


Fig. 3. Total chlorophyll (A) and glucosinolate (B) contents of rapeseed plants according to different cultivars and growth stages. ¹⁾ HL: *Brassica napus* L. cv. Halla, JM1: cv. Jungmo 7001, JM2: cv. Jungmo 7002, M135: cv. Mokpo 135, NH: cv. Naehan, TR: cv. Tamra, YR: cv. Yuryeo, YS: cv. Yeongsan. ²⁾ All values are expressed as the mean \pm S.D. of triplicate determinations. Means with different letters within a column (^{a-f} different cultivars or ^{A-C} growth stages) are significantly different at $p < 0.05$ by a Duncan's multiple range test.

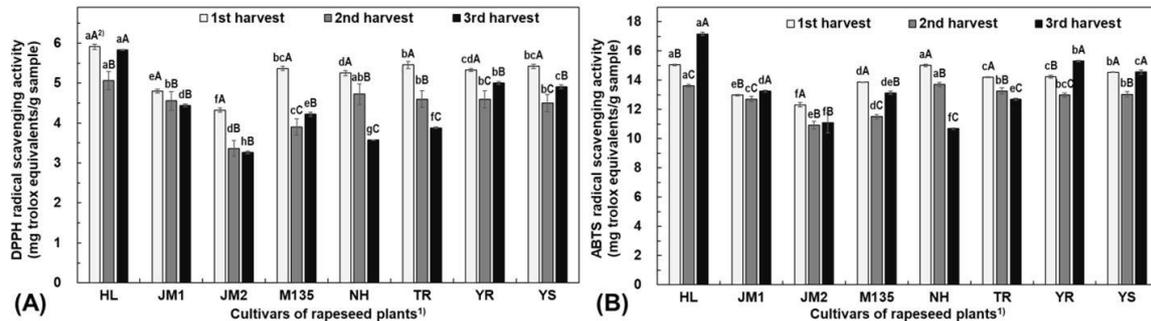


Fig. 4. DPPH radical (A) and ABTS radical scavenging activities of rapeseed plants according to different cultivars and growth stages. ¹⁾ HL: *Brassica napus* L. cv. Halla, JM1: cv. Jungmo 7001, JM2: cv. Jungmo 7002, M135: cv. Mokpo 135, NH: cv. Naehan, TR: cv. Tamra, YR: cv. Yuryeo, YS: cv. Yeongsan. ²⁾ All values are expressed as the mean \pm S.D. of triplicate determinations. Means with different letters within a column (^{a-h} different cultivars or ^{A-C} growth stages) are significantly different at $p < 0.05$ by a Duncan's multiple range test.

정하는 방법(Moreno 등 2000)으로 유채 품종별 식물체의 DPPH radical 소거활성을 측정된 결과, Fig. 4A와 같이 유의적인 차이를 보였다($p < 0.05$). 수확시기에 따라 1차, 2차 및 3차 수확한 시료 추출물에서 각각 4.32~5.91, 3.37~5.06 및 3.26~5.83 mg TE/g sample로 나타났으며, 전체적으로 1차 수확한 시료에서 높은 활성을 보였다. 품종에 따라서는 1차, 2차 및 3차 수확한 한라(HL) 품종이 각각 5.91, 5.06 및 5.83 mg TE/g sample로 높은 활성을 나타냈으며, 1차 수확한 탐라(TR), 영산(YS), 목포135호(M135), 유려(YR) 품종도 각각 5.46, 5.42, 5.36 및 5.32 mg TE/g sample로 비교적 높은 활성을 보였다.

항산화성을 가지는 물질에 의해 ABTS radical이 억제되는 성질을 이용한 방법(Kim 등 2009)으로 유채 품종별 식물체 추출물의 radical 소거활성을 측정된 결과 Fig. 4B와 같이 유의적인 차이를 보였다($p < 0.05$). 1차, 2차 및 3차 수확시기에 따른 추출물의 ABTS radical 소거활성은 각각 12.31~15.04, 10.92~13.70 및 10.69~17.17 mg TE/g sample로 나타났으며, 품종별로 차이는 있었으나 전체적으로 1차와 3차 수확 시료에서 높은 활성을 보였다. 품종에 따라서는 3차 수확한 한라(HL), 영산(YS), 유려(YR) 품종이 각각 17.17, 15.31 및 14.56 mg TE/g sample로 활성이 높게 나타났으며, 1차 수확한 한라, 내한, 영산, 유려, 탐라 품종도 각각 15.04, 15.02, 14.55, 14.23 및 14.21 mg TE/g sample로 비교적 높은 활성을 보였다. 유채 종자를 파종하여 자엽이 확장될 때까지 NaCl 농도에 따라 배양한 결과, 중간 정도의 염분(25~50 mM NaCl) 조건에서 재배한 식물체의 페놀 함량과 항산화 활성이 가장 높았다는 연구 결과(Falcinelli 등 2017)와 양배추의 경우 유기농법으로 생산된 잎이 전통적 재배 방법으로 생산된 잎보다 총 페놀 함

량이 더 높았다는 연구 결과(Ferreres 등 2005)는 적절한 스트레스 조건이 항산화물질의 합성을 촉진할 수 있음을 시사한다. 향후 유채 식물체의 페놀 성분 등을 기능성 소재로 활용하기 위해서는 다양한 환경 요인에 따른 반응을 평가하고, 최적의 재배 환경 조건을 구명하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

FRAP 활성은 낮은 pH 조건에서 환원제에 의해 ferric tripyridyltriazine(Fe^{3+} -TPTZ) 복합체가 ferrous tripyridyltriazine(Fe^{2+} -TPTZ)으로 환원되는 원리를 이용하여 활성을 측정하는 방법으로, 혈장의 항산화제 농도 의존적으로 FRAP 값이 증

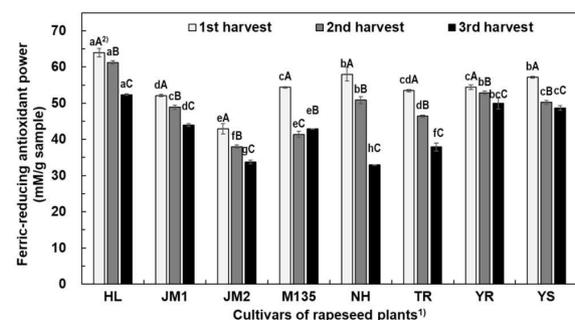


Fig. 5. Ferric-reducing antioxidant power (FRAP) of rapeseed plants according to different cultivars and growth stages. ¹⁾ HL: *Brassica napus* L. cv. Halla, JM1: cv. Jungmo 7001, JM2: cv. Jungmo 7002, M135: cv. Mokpo 135, NH: cv. Naehan, TR: cv. Tamra, YR: cv. Yuryeo, YS: cv. Yeongsan. ²⁾ All values are expressed as the mean \pm SD of triplicate determinations. Means with different letters within a column (^{a-h} different cultivars or ^{A-C} growth stages) are significantly different at $p < 0.05$ by a Duncan's multiple range test.

Table 2. Correlation coefficients among antioxidant compounds and antioxidant activities of rapeseed plants according to different cultivars and growth stages

Factor	Flavonoid	Chlorophyll	Glucosinolate	DPPH	ABTS	FRAP
Polyphenol	0.2947	0.0080	0.5358**	0.9292***	0.8804***	0.8162***
Flavonoid	1.0000	0.6809***	-0.2114	0.2701	0.5569**	0.1738
Chlorophyll	-	1.0000	-0.5457**	-0.1469	0.2243	-0.3498
Glucosinolate	-	-	1.0000	0.4964*	0.2383	0.6633***
DPPH	-	-	-	1.0000	0.9025***	0.9058***
ABTS	-	-	-	-	1.0000	0.7404***

Significant at * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

가하는 특징이 있어 총 항산화활성을 직접적으로 측정할 수 있다고 보고되어 있다(Moon 등 2003; Lee 등 2021). 유채 품종별 식물체 추출물의 FRAP 활성을 측정한 결과, Fig. 5와 같이 품종 및 생육단계에 따라 유의적인 차이를 보였다($p < 0.05$). 수확시기에 따라 1차, 2차 및 3차 수확한 시료 추출물에서 각각 42.88~63.93, 37.97~61.24 및 32.93~52.36 mM/g sample로 나타났으며, 전체적으로 수확시기가 늦어질수록 활성이 감소하는 경향을 보였다. 품종에 따라서는 한라(HL) 품종이 1차, 2차 및 3차 수확에서 각각 63.93, 61.24 및 52.36 mM/g sample로 높은 활성을 나타냈었다. 또한 1차 수확한 내

한(NH), 영산(YS), 유려(YR) 품종도 각각 57.99, 57.13 및 54.46 mM/g sample로 비교적 높은 활성을 보였다.

유채 식물체 추출물의 주요 항산화물질인 폴리페놀 함량과 DPPH와 ABTS radical 소거활성 및 FRAP 활성 간의 상관관계를 분석한 결과, Table 2와 같이 상관계수(r)는 각각 0.9292, 0.8804 및 0.8162로 항산화 활성과 총 폴리페놀 함량 간 높은 양의 상관관계($p < 0.001$)를 보였다. 브로콜리와 콜리플라워 품종의 연구에서도 DPPH radical 소거 활성은 총 페놀($r = 0.698^{**}$) 및 플라보노이드 함량($r = 0.456^{**}$) 함량과 유의한 양의 상관관계를 보이는 것으로 보고하였고(Bhandari & Kwak 2015), 콜리플라워 부산물 추출물에서 페놀 함량과 radical 소거 활성, FRAP 활성이 선형적인 상관관계를 보이는 것으로 보고하였다(Llorach 등 2003). 유채 식물체 추출물의 항산화 활성은 함유된 총 폴리페놀 함량에 비례된 것으로 보인다. 이러한 결과는 10개의 유채(*Brassica napus* L.) 품종의 탈지 박을 대상으로 한 연구에서, 총 페놀 함량이 항산화 활성과 높은 상관관계를 보였다고 보고된 결과와 유사하였다(Zhang 등 2019). 본 연구의 heatmap 분석 결과, 한라(HL) 품종이 높은 총 페놀성 화합물 함량과 항산화 활성으로 특징적으로 분류됨을 확인했으며(Fig. 6), 이를 통해 한라(HL) 품종의 높은 항산화성을 기능성 소재로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

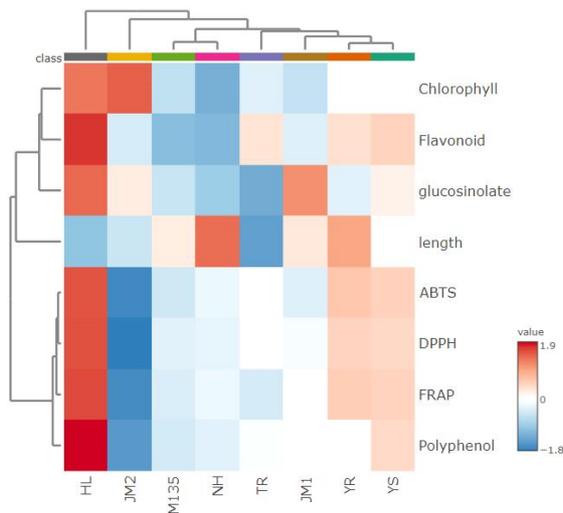


Fig. 6. Normalized response of antioxidant compounds and antioxidant activities from various cultivars of rapeseed plants.

The level of individual parameters corresponds to the color scale. A color gradient from blue (-1.86) to red (2.00) represents a low to high level of the normalized response. HL: *Brassica napus* L. cv. Halla, JM1: cv. Jungmo 7001, JM2: cv. Jungmo 7002, M135: cv. Mokpo 135, NH: cv. Naehan, TR: cv. Tamra, YR: cv. Yuryeo, YS: cv. Yeongsan.

요약 및 결론

유채의 활용성 증진을 위해 국내에서 육성된 품종의 식물체에 대한 주요 항산화 성분 및 활성을 검정하였다. 품종은 한라, 중모7001, 중모7002, 목포135호, 내한, 탐라, 유려, 영산 품종을 사용하였으며, 수확시기는 1차(약 10 cm), 2차(약 20 cm) 및 3차로 수확(약 40 cm)하여 조사하였다. 1차, 2차 및 3차 수확한 식물체의 총 폴리페놀 함량은 각각 12.56~15.85, 10.28~13.17 및 9.94~16.01 mg GAE/g sample이었으며, 총 플

라보노이드 함량은 각각 9.86~11.05, 10.41~13.06 및 8.18~16.64 mg CE/g sample로 나타났다. 총 chlorophyll 함량은 수확시기가 진전됨에 따라 유의적으로 증가하였으며, 1차, 2차 및 3차 수확한 시료에서 각각 17.26~21.66, 19.31~24.95 및 22.16~38.39 mg/g sample로 조사되었다. 총 glucosinolate 함량은 수확시기가 진전됨에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 1차, 2차 및 3차 수확한 시료에서 각각 31.13~46.22, 28.51~34.72 및 22.18~30.58 mg SE/g sample로 나타났다. DPPH radical 소거활성은 1차, 2차 및 3차 수확한 시료에서 각각 4.32~5.91, 3.37~5.06 및 3.26~5.83 mg TE/g sample로 나타났으며, 전체적으로 1차 수확한 시료에서 높은 활성을 보였다. FRAP 활성은 각각 42.88~63.93, 37.97~61.24 및 32.93~52.36 mM/g sample로 나타났으며, 전체적으로 수확시기가 진전됨에 따라 감소하는 경향을 보였다. 전체적으로 한라(HL) 품종이 높은 총 페놀성 화합물 함량과 항산화활성을 가지는 것으로 확인되었으며, 이를 기능성 소재로 활용할 가능성이 있다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 시험연구사업(과제번호: PJ017422 042024)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- An DH, Yu GD, Kim KS, Cha YL, Jeong JH, Choi JB, Woo KS, Hwang EJ, Park YJ. 2023. Quality characteristics of rapeseed oils according to different roasting temperatures. *Korean J Food Nutr* 36:479-488
- Bhandari SR, Kwak JH. 2015. Chemical composition and antioxidant activity in different tissues of *Brassica* vegetables. *Molecules* 20:1228-1243
- Bystrom LM, Guzman ML, Rivella S. 2014. Iron and reactive Oxygen species: Friends or foes of cancer cells? *Antioxid Redox Signaling* 20:1917-1924
- Chung IM, Rekha K, Rajakumar G, Thiruvengadam M. 2016. Production of glucosinolates, phenolic compounds and associated gene expression profiles of hairy root cultures in turnip (*Brassica rapa* ssp. *rapa*). *3 Biotech* 6:175
- Clarke JD, Dashwood RH, Ho E. 2008. Multi-targeted prevention of cancer by sulforaphane. *Cancer Lett* 269:291-304
- Duval B, Shetty K. 2001. The stimulation of phenolics and antioxidant activity in pea (*Pisum sativum*) elicited by genetically transformed andise root extract. *J Food Biochem* 25:361-377
- Falcinelli B, Sileoni V, Marconi O, Perretti G, Quinet M, Lutts S, Benincasa P. 2017. Germination under moderate salinity increases phenolic content and antioxidant activity in rapeseed (*Brassica napus* var. *oleifera* Del.) sprouts. *Molecules* 22:1377
- Fenwick GR, Heaney RK, Mullin WJ. 1983. Glucosinolates and their breakdown products in food and food plants. *Crit Rev Food Sci Nutr* 18:123-201
- Ferreres F, Valentão P, Llorach R, Pinheiro C, Cardoso L, Pereira JA, Sousa C, Seabra RM, Andrade PB. 2005. Phenolic compounds in external leaves of tronchuda cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *costata* DC). *J Agric Food Chem* 53:2901-2907
- Francisco M, Moreno DA, Cartea ME, Ferreres F, García-Viguera C, Velasco P. 2009. Simultaneous identification of glucosinolates and phenolic compounds in a representative collection of vegetable *Brassica rapa*. *J Chromatogr A* 1216:6611-6619
- Han N, Woo KS, Lee JY, Song SB, Lee YY, Kim M, Kang MS, Kim HJ. 2022. Comparison of physicochemical characteristics, functional compounds, and physiological activities in adzuki bean cultivars. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 51:428-438
- Harbaum B, Hubbermann EM, Zhu Z, Schwarz K. 2008. Free and bound phenolic compounds in leaves of pak choi (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *communis*) and Chinese leaf mustard (*Brassica juncea* Coss). *Food Chem* 110:838-846
- Hayes JD, Kelleher MO, Eggleston IM. 2008. The cancer chemopreventive actions of phytochemicals derived from glucosinolates. *Eur J Nutr* 47:73-88
- Hwang EJ, Kim S, Kim HJ, Jeong J, Lee YH, Ha TJ, Woo KS. 2022. Quality and antioxidant characteristics according to different harvest periods and steaming treatment of apios (*Apios americana* Medikus) cultivated in Korea. *Korean J Food Nutr* 35:445-452
- Hwang EJ, Kim TH, Park W, Lee KH, Nam SS, Park YJ, Kim S, Lee HU, Chung MN, Ha TJ, Woo KS. 2023. Antioxidant characteristics of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) according to different plant parts and drying methods. *Korean J Food Nutr* 36:327-333
- Hwang ES. 2010. Changes in myrosinase activity and total glucosinolate levels in Korean Chinese cabbages by salting

- conditions. *Korean J Food Cookery Sci* 26:104-109
- Hwang ES, Lee HJ. 2006. Phenylethyl isothiocyanate and its *N*-acetylcysteine conjugate suppress the metastasis of SK-Hep1 human hepatoma cells. *J Nutr Biochem* 17:837-846
- Jeong J, An DH, Cha YL, Choi JB, Kim SY, Kim KS. 2024. ‘Yuryeo’: A rapeseed with high oleic acid, resistant to Sclerotinia stem rot and lodging. *Korean J Breed Sci* 56:53-61
- Kim HJ, Lee JH, Lee BW, Lee YY, Jeon YH, Lee BK, Woo KS. 2018. Quality and physicochemical characteristics of the Korean cowpea cultivars grown in different seeding periods. *Korean J Food Nutr* 31:502-510
- Kim JE, Joo SI, Seo JH, Lee SP. 2009. Antioxidant and α -glucosidase inhibitory effect of tartary buckwheat extract obtained by the treatment of different solvents and enzymes. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 38:989-995
- Kim KS, Jang YS, Lee YH, Kim CW, Choi KH, Kang DS, Kim ST, Choi IH. 2014. A rapeseed intermediate parent ‘Jungmo 7001’ with wide adaptable and large flower. *Korean J Breed Sci* 46:302-306
- Kim KS, Jang YS, Lee YH, Seo TC, Choi KH, Kang DS, Kim ST, Lee KB. 2015. A rapeseed intermediate parent ‘Jungmo 7002’ with flowering uniformity and lodging tolerance. *Korean J Breed Sci* 47:276-280
- Lee JY, Woo KS, Seo JH, Lee YY, Lee BW, Kim MH, Kang MS, Kim HJ. 2021. Physicochemical qualities and physiological activities of black soybeans by cultivation area and cultivars. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 50:29-35
- Llorach R, Espín JC, Tomás-Barberán FA, Ferreres F. 2003. Valorization of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) by-products as a source of antioxidant phenolics. *J Agric Food Chem* 51:2181-2187
- Middleton E. 1994. Potential health-promoting properties of citrus flavonoids. *Food Technol* 48:115-119
- Moon GS, Kwon TW, Ryu SH. 2003. Comparison of antioxidative activities of soybean components by different assays. *Korean Soybean Dig* 20:28-36
- Moreno MIN, Isla MI, Sampietro AR, Vattuone MA. 2000. Comparison of the free radical-savenging activity of propolis from several regions of Argentina. *J Ethnopharmacol* 71:109-114
- Park BH, Koh KM, Jeon ER. 2018. Quality characteristics of wet noodles added with sword bean powder. *J Korean Soc Food Cult* 33:374-381
- Park S, Arasu MV, Jiang N, Choi SH, Lim YP, Park JT, Al-Dhabi NA, Kim SJ. 2014. Metabolite profiling of phenolics, anthocyanins and flavonols in cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*). *Ind Crops Prod* 60:8-14
- Park YJ, Hwang EJ, Yu GD, Woo KS. 2024. Quality characteristics and antioxidant characteristics of sword bean tea distributed in domestic markets. *Korean J Food Nutr* 37:100-109
- Rice-Evans C, Miller N, Paganga G. 1997. Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends Plant Sci* 2:152-159
- Roh KH, Kwak BK, Kim HU, Lee KR, Kim SH, Suh MC, Kim H, Kim JB. 2011. Production of transgenic plants in *Brassica napus* winter cultivar ‘Youngsan’. *J Appl Biol Chem* 54:26-32
- Rural Development Administration. 2008. Standard Farming Textbook-167. Rapeseed Cultivation. pp.52-69. Rural Development Administration
- Samanta A, Das G, Das SK. 2011. Roles of flavonoids in plants. *Int J Pharm Sci Tech* 6:12-35
- Shim KH, Sung NK, Kang KS, Ahn CW, Seo KI. 1992. Analysis of glucosinolates and the change of contents during processing and storage in *Cruciferous* vegetables. *J Korean Soc Food Nutr* 21:43-48
- Šola I, Vujčić Bok V, Dujmović M, Rusak G. 2020. Developmentally-related changes in phenolic and *L*-ascorbic acid content and antioxidant capacity of Chinese cabbage sprouts. *J Food Sci Technol* 57:702-712
- Sousa C, Pereira DM, Pereira JA, Bento A, Rodrigues MA, Dopico-García S, Valentão P, Lopes G, Ferreres F, Seabra RM, Andrade PB. 2008. Multivariate analysis of tronchuda cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *costata* DC) phenolics: Influence of fertilizers. *J Agric Food Chem* 56:2231-2239
- Stoewsand GS. 1995. Bioactive organosulfur phytochemicals in *Brassica oleracea* vegetables: A review. *Food Chem Toxicol* 33:537-543
- Vallejo F, Tomás-Barberán FA, García-Viguera C. 2003. Effect of climatic and sulfur fertilisation conditions, on phenolic compounds and vitamin C, in the inflorescences of eight broccoli cultivars. *Eur Food Res Technol* 216:395-401
- Woo KS, Bae HH, Jung GH, Son BY, Kim HJ. 2021. Quality and physicochemical characteristics of Korean maize hybrids according to the seed and pollen parent. *Korean J*

Food Nutr 34:407-414

Woo KS, Ko JY, Kim HY, Lee YH, Jeong HS. 2013. Changes in quality characteristics and chemical components of sweet potatoes cultivated using different methods. *Korean J Food Sci Technol* 45:305-311

Woo KS, Song SB, Oh BG, Seo MC, Ko JY, Lee JS, Kang JR, Nam MH, Jeong HS. 2009. Antioxidant activity of ethanol extraction from horseweed (*Erigeron canadensis* L.) with pretreatment conditions. *J Korean Soc Food Sci Nutr*

38:1279-1283

Zhang M, Zheng C, Yang M, Zhou Q, Li W, Liu C, Huang F. 2019. Primary metabolites and polyphenols in rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars in China. *J Am Oil Chem Soc* 96:303-317

Received 03 September, 2024

Revised 13 September, 2024

Accepted 07 October, 2024