

저장 온도에 따른 신선편이 브로콜리의 유효성분 및 생리활성 변화

박민성¹ · 허수형¹ · 허 웅² · 고광호² · 부경환^{1,3} · 김창숙^{1,3}

¹제주대학교 생명공학부

²제주테크노파크 바이오융합센터

³제주대학교 농생명소재안전성연구센터

Changes in Active Compounds and Biological Activities of Fresh-Cut Broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) according to Storage Temperature

Min Seong Park¹, Su Hyeong Heo¹, Woong Heo², Kwang Hyo Ko²,
Kyung-Hwan Boo^{1,3}, and Chang Sook Kim^{1,3}

¹Faculty of Biotechnology and ³Agricultural and Biomaterial Safety Research Center,
Jeju National University ²Biocenter, Jeju Technopark

ABSTRACT This study examined the changes in the active components and biological activities of fresh-cut broccoli according to the storage temperature. Fresh-cut broccoli was packed with polyethylene film and stored at different temperatures (4°C, 10°C, and 20°C) for 25 days to test its quality. The total chlorophyll content decreased proportionally as the temperature and storage period were increased. The total phenol and flavonoid contents did not change significantly until 20 days at 4°C but decreased to approximately 33~47% on the 10th day at 10°C and to approximately 50% on the fifth day at 20°C. The vitamin C content maintained the initial value until the 20th day of storage at 4°C, but decreased to approximately 20% on the fifth day and approximately 57% on the 10th day at 10°C. The total glucosinolate content remained at its initial value until day 15 of storage at 4°C. The DPPH radical scavenging activity of fresh-cut broccoli maintained the initial value range until the 25th day at 4°C, decreased by approximately 40% on the 10th day at 10°C, and was inhibited by approximately 50% on the fifth day at 20°C. These results were related to the changes in total phenol and flavonoid contents. The acetylcholinesterase inhibitory activity of fresh-cut broccoli extracts did not vary with the storage temperature. Hence, the qualities of fresh-cut broccoli do not significantly change in appearance quality, functional ingredients, and physiological activities until approximately 10 days when stored at 4°C, and it maintains its initial qualities until three to four days at 10°C.

Keywords: antioxidant activity, fresh-cut broccoli, physicochemical characteristics, storage temperature

서 론

신선편이 농산물은 원물을 수확한 후에 박피와 세척, 절단 등의 가공 과정을 거쳐 원료 특유의 신선함을 유지하면서도 간편성을 제공하는 제품류로, 조리가공용과 즉석 섭취용으로 크게 구분되고 있다(Kim과 Yang, 2024). 신선편이 농산물의 국내 시장 규모는 2020년 기준 약 1조 1천억 원으로 매년 계속 성장하는 추세이며, 유럽 및 미국에서도 신선편이 식품의 시장은 전체 식품시장의 약 20%를 차지하고 있을 정도로 큰 시장 규모를 형성하고 있다.

한편, 신선편이 농산물은 절단 등의 물리적 가공 과정에

서 조직이 파괴되고, 생리적, 생화학적 변화와 더불어 미생물 오염에 의한 부패 등으로 품질이 떨어질 수 있다. 즉, 신선편이 농산물은 절단 과정에서 기계적 손상을 입을 뿐만 아니라 상처 호흡, 효소 분비, 수분 손실 등의 품질 저하 반응 등이 발생하는 문제를 갖고 있다(Guan 등, 2023). 이에 신선편이 농산물은 미생물 오염에 대한 안전성과 성분 변화 등의 품질 변화 문제가 소비 시장을 활성화하는 데 큰 장애 요인으로 작용하고 있다. 이런 측면에서 신선편이 농산물의 품질 유지 및 선도유지 기간을 늘리고자 하는 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 예컨대 미생물 오염을 감소시켜 저장성을 늘리는 가공 방법, 유통기간 동안 품질 변화를 최소화하기

Received 3 April 2025; Revised 18 April 2025; Accepted 20 April 2025

Corresponding author: Chang Sook Kim, Faculty of Biotechnology, Jeju National University, 102, Jejudaehak-ro, Jeju-si, Jeju 63243, Korea, E-mail: cskim1225@jejunu.ac.kr

© 2025 The Korean Society of Food Science and Nutrition.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

위한 처리기술 개발 및 포장 방법 개선 등과 같은 연구들이 이루어지고 있다(Bae 등, 2016; Kim 등, 2011; Kim 등, 2012).

브로콜리(*Brassica oleracea* var. *italica*)는 다른 녹색 채소류에 비해 항산화 물질의 함량이 높아서 소비자에게 고 영양원을 제공하고 있는 십자화과 채소이다(King과 Morris, 1994; Wang 등, 2021). 특히, 브로콜리에는 비타민 C, α -토코페롤 및 β -카로틴과 같은 항산화 물질뿐만 아니라 glucobrassicin과 같은 glucosinolates, sulforaphane, indole-3-carbinol 등의 유효성분들을 포함하고 있어서 항암 및 해독작용 등의 효능을 갖는 건강 채소로 알려져 있으며, 세계 10대 건강식품 중의 하나로 인식되고 있다(Ares 등, 2013; Fahey 등, 2001). 이에 브로콜리의 소비량이 급증하고 있는데, 특히 샐러드용 신선편이 브로콜리 소비가 계속 늘어나고 있다. 한편, 브로콜리는 일반적으로 작은 꽃봉오리가 다발로 이루어진 꽃송이 부위를 주로 식용하고 있는데, 브로콜리는 호흡률이 매우 높아서 수확 후 품질 수명이 짧은 단점을 갖고 있다(Brennan과 Shewfelt, 2010; Choi 등, 2011). 절단에 의한 브로콜리의 노화는 대부분 조직의 탈수, 꽃의 황변 및 개방, 연화 및 바람직하지 않은 냄새 발생 등의 생리적 변화들이 생겨난다고 보고하고 있다(Forney 등, 1993). 또한 고온 및 저온 저장에 따른 브로콜리의 품종별 항산화 물질 변화, 가공 형태에 따른 신선편이 브로콜리의 성분 변화 등의 연구를 통해 저장 여건에 따라 브로콜리의 성분 함량 변화가 일어난다고 보고하고 있다(Balouchi 등, 2011; Guan 등, 2020). 궁극적으로 신선편이 브로콜리는 절단에 의한 노화가 빨리 진행되어 품질이 저하될 뿐만 아니라 미생물 오염 문제 등으로 유통기간이 짧다. 따라서 브로콜리의 유통과정에는 포장 방법과 저장 온도가 품질 및 신선도에 미치는 가장 중요한 요인으로 여겨지고 있다.

현재 국내에서는 꽃송이 부위를 절단하여 가공된 신선편이 브로콜리를 플라스틱 용기에 담거나 PE 필름으로 포장하여 약 4°C 또는 10°C 내외의 저장고나 진열장에 보관하여 유통 판매하고 있다. 어떤 경우에는 상온에서 보관 유통되는 경우도 종종 일어나고 있는데, 이런 유통과정에서 신선편이 브로콜리는 변색, 이취 발생 등으로 상품성이 상실되어 폐기되는 경우가 발생하고 있다. 이런 측면에서 신선편이 브로콜리의 품질 변화에 영향을 미치는 저장 온도 및 기간 등의 최적 유통 환경에 관한 정보가 필요한 상황이나, 이에 대한 기초자료는 매우 미흡한 실정이다. 특히 제주지역에서 가장 많이 생산되는 유일 2호 브로콜리 품종을 대상으로 한 정보는 전혀 없는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 신선편이 브로콜리를 가공하는 기업체 또는 유통업체뿐만 아니라 소비자들도 활용할 수 있는 정보를 구축하는 일련의 과정 중에서, 일차적으로 저장 온도가 유효성분 및 생리활성 변화에 미치는 영향을 조사하고자 하였다.

재료 및 방법

재료 및 신선편이 브로콜리 가공

본 실험에 이용한 브로콜리는 2024년 2월 제주특별자치도 애월읍에서 수확하여 저온 저장고($0\pm 2^\circ\text{C}$)에 보관 중인 유일 2호 품종을 구입하여 가공 처리하였다. 외관이 청결하고 무게가 약 920~940 g 내외의 균일한 브로콜리를 선발하였으며, 세척 후 다발로 이루어진 꽃봉오리(whole flower)를 절단하여 꽃송이(floret) 부위만을 이용하였다. 가공된 신선편이 브로콜리 꽃송이 4~5개를 polyethylene 필름 포장재(PE, 50 μm , 300×260 mm, 숨구멍 2개, 신선야채, 디에스팩)에 넣은 후, 형광등(약 50 lux)이 설치된 4°C, 10°C 및 20°C 저장고에 보관하면서 기간에 따른 이화학적 특성 변화를 조사하였다. 각각의 온도에서 저장된 신선편이 브로콜리는 절단한 후 동결건조기를 이용하여 건조한 후 분쇄하여 분말 형태로 제조한 후에 -80°C 보관하면서 사용하였다.

품질 특성(외관, 색소) 분석

각각의 저장 온도에 보관한 신선편이 브로콜리의 물리적 상태(변색, 이취, 진물립) 조사와 클로로필 색소 함량을 측정하였다. 총 클로로필, 클로로필 a, 클로로필 b 함량 측정은 Kozukue와 Friedman(2003)의 방법에 준하였다. 시료 0.5 g에 80% 아세톤을 첨가하여 색소가 전부 빠질 때까지 마쇄한 후 필터링하여 최종 부피 25 mL로 정용한 후 663 nm와 645 nm에서 흡광도를 측정하고, 다음식을 이용하여 클로로필 함량을 측정하였다.

$$\text{Chlorophyll a} = 12.72\text{OD}_{663} - 2.58\text{OD}_{645}$$

$$\text{Chlorophyll b} = 22.88\text{OD}_{645} - 5.50\text{OD}_{663}$$

$$\text{Total chlorophyll} = 7.22\text{OD}_{663} + 20.30\text{OD}_{645}$$

유효성분 분석

총 페놀 및 총 플라보노이드 함량: 신선편이 브로콜리 동결건조 분말(2 g)에 70% 에탄올을 40 mL 첨가 후 24시간 동안 3회 추출한 후 감압 농축하고 동결 건조하여 고형분을 제조하였다. 총 페놀 함량 분석은 Folin-Denis 방법(1912)을 사용하였다. 시료액 100 μL 를 증류수 400 μL 와 혼합한 후 1 N Folin-Ciocalteu reagent(Sigma Aldrich)를 200 μL 를 첨가하고 교반하여 3분간 암소에서 반응시켰다. 반응이 끝난 후 10% Na_2CO_3 용액 300 μL 를 가하여 혼합한 후 암소에서 30분간 반응시켰다. 반응액을 96-well plate에 옮긴 후 microplate spectrophotometer(Multiskan Sky, Thermo Scientific)를 이용하여 750 nm에서 흡광도를 측정하였다. 표준검량선은 gallic acid를 사용하여 농도별 표준용액에 대한 흡광도로 작성하였으며, 총 페놀 함량은 건조 시료 g당 mg gallic acid equivalent[mg GAE/g, dry weight(DW)]로 표기하였다. 총 플라보노이드 함량은 aluminum chloride 발색법을 응용하여 측정하였다(Moreno

등, 2000). 96-well plate에 시료액 40 μ L와 증류수 140 μ L를 혼합한 후 10% AlCl_3 용액 20 μ L를 첨가하여 암소에서 10분간 반응시킨 다음 410 nm에서 흡광도를 측정하였다. 표준물질로는 quercetin을 사용하여 검량선을 작성하였으며, 최종 플라보노이드 함량은 건조 시료 g당 mg quercetin equivalent(mg QE/g, DW)로 표기하였다.

비타민 C(L-ascorbic acid) 함량: 신선편이 브로콜리의 비타민 C 함량은 Heo 등(2021)의 방법에 따라서 HPLC를 이용하여 분석하였다. 브로콜리 동결건조 시료(0.5 g)에 1 mM ethylenediaminetetraacetic acid가 포함된 5% metaphosphoric acid(HPO_3) 용액 25 mL를 가하고 균질화시켰다. 균질화된 시료는 원심분리(5,000 \times g, 10 min)한 후 상등액을 25 mL로 정용하였다. 추출물은 0.45 μ m polytetrafluoroethylene(PTFE) syringe filter(ϕ 13 mm, Advantec)로 여과한 후 비타민 C 분석에 사용하였다. 비타민 C 정량분석은 Shim-pack GIS C18 컬럼(4.6 \times 250 mm, 5 μ m, Shimadzu)을 장착한 HPLC(Lc-20A, Shimadzu)를 사용하였다. 이동상은 0.1% trifluoroacetic acid를 사용하였으며, 유속은 0.6 mL/min, 시료 주입량은 20 μ L, 컬럼 온도는 20 $^{\circ}\text{C}$ 였고, 검출은 UV detector를 사용하여 254 nm에서 분석하였다. 표준물질은 L-ascorbic acid(Sigma Aldrich)를 사용하였으며, 시료의 비타민 C 함량은 표준물질의 농도에 따른 피크의 면적을 이용하여 정량 분석하였다.

총 글루코시놀레이트(glucosinolate) 및 개별 글루코시놀레이트 함량: 신선편이 브로콜리의 총 글루코시놀레이트 함량은 Heo 등(2021)의 방법에 따랐다. 신선편이 브로콜리 동결건조 분말(0.1 g)에 80% 메탄올 1 mL를 가하여 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 15분씩 추출을 3회 반복하였다. 분석용 시료는 추출물을 원심분리(5,000 \times g, 5 min)한 후 상등액만을 취하여 이용하였다. 2배 희석된 상등액 100 μ L에 3차 증류수 300 μ L와 2 mM sodium tetrachloropalladate(58.5 mg sodium tetrachloropalladate+170 μ L concentrated HCl+100 mL DW) 3 mL를 첨가하여 상온에서 1시간 반응시킨 다음에 425 nm에서 흡광도를 측정하였다. 총 글루코시놀레이트 함량은 μ mol sinigrin equivalent(μ mol SE/g DW)로 표기하였다. 신선편이 브로콜리의 개별 글루코시놀레이트(single glucosinolate) 분석은 Jeon 등(2022)의 방법에 따랐다. 브로콜리 시료(0.1 g)에 70% 메탄올 1 mL를 첨가하여 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 5분간 가열한 후 원심분리(5,000 \times g, 10 min)하여 상등액을 취하였다. 이 과정을 2회 반복하여 추출하고 상등액을 모아 사용하였다. 1 mL 피펫 팁에 DEAE-Sephadex A-25를 채워 만든 미니 컬럼에 글루코시놀레이트 추출물을 가한 다음, aryl sulfatase(29 units, 75 μ L)를 첨가하여 실온에서 12시간 반응시켰다. 이후 증류수 1.5 mL를 가하여 desulfoglucosinolates를 용출시킨 다음 0.45 μ m PTFE syringe filter를 이용하여 여과한 후 HPLC 분석시료로 사용하였다. 단일 글루코시놀레이트 정량분석을 위해 C18 컬럼을 장착한 HPLC를 사용하였다. 분석 조건으로는 컬럼 온도

온도 40 $^{\circ}\text{C}$, 유속 1.0 mL/min, 이동상으로는 acetonitrile(A)과 증류수(B)를, 시료 주입량 20 μ L, PDA 검출기를 이용하여 229 nm에서 검출하였다. 이동상의 gradient는 100% B로 시작하여 30분 후에 30% A와 70% B, 35분에 0% A와 100% B가 되도록 조절하였다.

생리활성 측정

항산화 활성: 신선편이 브로콜리 추출물의 항산화 활성은 DPPH(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) 라디칼 소거능으로 측정하였다(Blois, 1958). 신선편이 브로콜리 추출액을 3배 희석한 시료 40 μ L에 300 μ M DPPH 용액 160 μ L를 첨가하여 혼합한 후 암소에서 30분간 반응시킨 뒤 517 nm에서 흡광도를 측정하여 산출하였다. 항산화 활성은 다음과 같은 식에 의해 계산하여 백분율(%)로 나타내었다.

$$\text{DPPH 라디칼 소거 활성} = \left(1 - \frac{A}{B}\right) \times 100$$

A: 시료의 흡광도, B: 대조구의 흡광도

Acetylcholinesterase(AChE) 활성: 신선편이 브로콜리 추출물의 AChE 효소 저해 활성은 Ellman's coupled assay 방법에 따라 측정하였다(Ellman 등, 1961). 96-well plate에 0.1 M sodium phosphate buffer(pH 7.3) 110 μ L와 시료 10 μ L를 첨가하고 AChE(0.8 U, Sigma Aldrich) 30 μ L를 넣어 10분간 반응시켰다. 2 mM acetylthiocholine chloride(Sigma Aldrich) 30 μ L와 2 mM DTNB[5,5'-di-thiobis(2-nitrobenzoic acid)]를 처리한 뒤, 15분간 반응시키고 415 nm에서 흡광도를 측정하였다. AChE 저해 활성은 다음의 수식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{AChE 저해 활성}(\%) = \left(1 - \frac{A}{B}\right) \times 100$$

A: 시료의 흡광도, B: 대조구의 흡광도

통계분석

각 분석에 대한 실험은 3~5회 반복하여 평균 \pm 표준편차(mean \pm SD)로 나타냈으며, 각 실험군 간의 유의성은 통계분석용 소프트웨어 IBM SPSS Statistics 20을 이용하여 일원분산분석(one-way ANOVA) 및 최소유의차 검정(LSD)을 통해 $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$ 수준에서 분석하였다.

결과 및 고찰

신선편이 브로콜리의 품질 변화

농장에서 수확 후 저온 저장고(0 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$)에 3개월 동안 저장하였던 브로콜리 유일 2호 품종을 대상으로 꽃송이 부위만을 절단한 후 PE 필름에 밀봉 포장하여 4 $^{\circ}\text{C}$, 10 $^{\circ}\text{C}$ 및 20 $^{\circ}\text{C}$ 에 저장 보관하면서 품질 변화를 조사하였다. 4 $^{\circ}\text{C}$ 에 저장된 신선편이 브로콜리의 중량은 10일째에 약 2%, 20일째에 약 4% 수준으로 약간 감소하였으며, 외형적 변화는 10일까지

는 크게 나타나지 않았으나 15일째부터는 외관이 노랗게 변하기 시작하였다. 한편, 10°C 및 20°C에 저장한 경우는 각각 6일과 2일째부터 외관 색상이 노란색으로 변색하기 시작하고 곰팡이가 생겨났으며, 8일과 4일째부터는 악취가 나고 물러지는 현상이 일어났다(자료 미제시). 이 결과는 신선편이 브로콜리를 4°C 조건에서 유통하는 경우 약 10일 전후까지는 수확 초기의 물리적 상태를 어느 정도 유지하고 있음을 보여주는 것이고, 10°C 조건에서는 4일 이후부터 상품 가치가 크게 떨어지고 있음을 보여주고 있다.

브로콜리 등의 십자화과 채소류의 클로로필은 독특한 녹색을 나타내어서 채소류의 품질을 평가하는 중요한 요소로 여겨지고 있다(Guan 등, 2020). 이에 저장 온도에 따른 신선편이 브로콜리의 총 클로로필, 클로로필 a와 b 함량 변화를 측정하여 Table 1에 표기하였다. 4°C에 저장 보관된 신선편이 브로콜리의 총 클로로필 함량은 5일 및 10일 후에 초깃값에 비해 각각 27% 및 33% 수준으로 감소하였고, 20일 이후에는 약 55~70% 수준으로 떨어졌다. 반면에 10°C와 20°C에 저장한 신선편이 브로콜리의 총 클로로필 함량은 2일째부터는 대조구 대비 각각 약 68%와 81% 수준으로 크게 감소하였다. 이 결과는 브로콜리의 클로로필 파괴가 상온보다는 저온에서 천천히 진행되고 있음을 보여주고 있는데, 이는 Starzynska 등(2003)의 결과와 비슷하였다. 또한, Wei 등(2020)은 4°C에 저장한 신선편이 브로콜리의 총 클로로필 함량이 초깃값 대비 5일째, 10일째, 15일째에 각각 약 37%, 48% 및 58% 수준으로 감소한다고 하였고, Guan 등(2020)은 20°C에 저장한 신선편이 브로콜리의 총 클로로필 함량이 48시간 후 약 18% 감소하였고, 클로로필 b가 클로로필 a보다 빠르게 파괴된다고 보고하고 있다. 또한, Balouchi 등(2011)은 브로콜리의 총 클로로필 함량과 저장 온도에 의한

클로로필의 파괴는 품종에 따라 차이가 크다고 보고하고 있다. 따라서 우리의 결과가 이전의 연구 결과와 비슷하거나 부분적으로 차이가 나는 것은 품종, 브로콜리 절단 방법, 포장 방법 등에 의한 차이에서 비롯된 것으로 사료된다.

신선편이 브로콜리의 유효성분 변화

페놀 화합물은 식물의 이차대사 경로를 통해 합성되는 2차 대사물질로 플라보노이드, phenolic acid, 타닌, 카테킨 등 8,000여 개의 유도체들을 갖고 있으며, 이것들은 항염증, 항암, 고혈압 억제 등의 다양한 기능성과 더불어 강력한 항산화 활성을 갖는 항산화 물질로 평가되고 있다(Cosme 등, 2020). 특히, 식물체의 플라보노이드는 anthoxanthin, anthocyanidin, isoflavone 등으로 크게 나누어지는데, 이것들 역시 항알레르기, 항염증, 항균 활성, 항암, 심장 질환 예방 등의 생리활성을 갖는 것으로 알려져 있다(Hertog 등, 1992). 이에 저장 온도에 따른 신선편이 브로콜리의 항산화 물질의 함량 변화를 조사하고 항산화 활성과의 연관성을 확인하고자 하였다. 저장 온도별 기간에 따른 신선편이 브로콜리의 총 페놀 화합물 및 총 플라보노이드 함량을 측정하여 Fig. 1에 나타내었다.

신선편이 브로콜리 추출물의 초기 총 페놀 함량은 10.3 mg GAE/g DW로 나타났다. 4°C에 저장한 경우 15일째까지는 유의적으로 증가하는 경향을 보였으며($P<0.001$), 그 후 20일째까지도 약 11.0 mg GAE/g DW 수준을 유지하여 초깃값 대비 큰 변화가 나타나지 않았다. 반면에 10°C에 저장한 경우는 4일 이후 10일까지 약 30~33% 수준으로 감소하였고, 20°C에서는 저장 1일째부터 감소하여 3일째에는 약 38% 수준으로 떨어졌다. 한편, 신선편이 브로콜리의 초기 총 플라보노이드 함량은 약 5.7 mg QE/g DW 수준이었고,

Table 1. Changes in total chlorophyll, chlorophyll a, and chlorophyll b contents of fresh-cut broccoli throughout storage at 4°C, 10°C, and 20°C

Storage temperature (°C)	Storage period (d)	Total chlorophyll (mg/100 g, FW)	Chlorophyll a (mg/100 g, FW)	Chlorophyll b (mg/100 g, FW)	Chlorophyll a/b
4	0	26.24±2.47	19.61±1.12	6.63±1.35	3.02±0.38
	5	19.17±0.63***	14.32±0.86***	4.86±0.61***	2.99±0.45
	10	17.54±0.83***	12.96±1.06***	4.58±0.23***	2.84±0.30
	15	15.30±0.21***	11.28±0.33***	4.02±0.46***	2.82±0.23
	20	11.85±0.99***	8.72±0.76***	3.13±0.42***	2.79±0.08
	25	7.79±1.17***	5.39±0.74***	2.40±0.75***	2.41±0.73
10	2	9.58±0.60***	7.08±0.80***	2.50±0.93***	3.15±1.10
	4	8.49±1.08***	6.71±1.17***	1.78±0.33***	3.89±0.88
	6	6.07±0.44***	4.27±0.83***	1.80±0.46***	2.54±0.83
	8	4.01±0.47***	2.72±0.23***	1.29±0.42***	2.26±0.57
	10	3.83±0.24***	2.75±0.14***	1.08±0.26***	2.68±0.62
20	1	7.07±0.33***	4.89±0.18***	2.18±0.20***	2.25±0.15
	2	4.92±0.40***	3.36±0.32***	1.56±0.28***	2.20±0.37
	3	4.00±0.21***	2.69±0.17***	1.31±0.03***	2.05±0.08
	4	3.77±0.52***	2.57±0.35***	1.20±0.20***	2.16±0.21
	5	3.25±0.09***	2.20±0.07***	1.02±0.13***	2.11±0.28

Data were expressed as mean±SD for three tests. A significant difference was determined by one-way ANOVA with LSD test. *** $P<0.001$; compared with control (0 day sample).

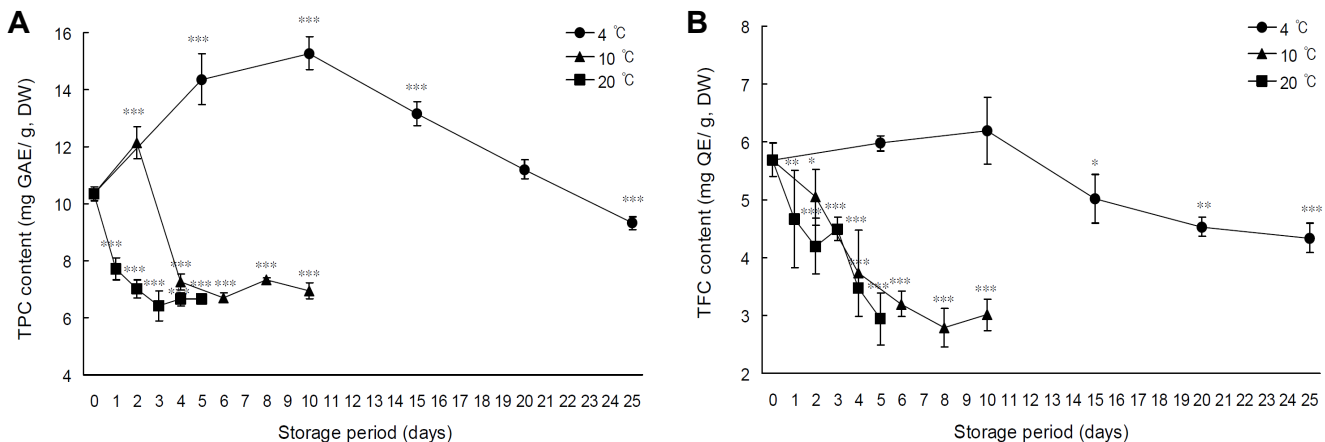


Fig. 1. Changes in total phenols (A) and flavonoids (B) contents in fresh-cut broccoli throughout storage at 4°C, 10°C, and 20°C. Data were expressed as mean±SD for three tests. A significant difference was determined by one-way ANOVA with LSD test. * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$; compared with control (0 day sample). TPC, total phenolic content; TFC, total flavonoid content; GAE, gallic acid equivalent; QE, quercetin equivalent.

4°C 저장 시에는 10일째까지는 약 5~18% 정도로 증가 추세를 보이다가 15일째부터는 감소하여 25일째는 초깃값 대비 약 18% 감소하였다. 10°C에서는 2일째 이후부터 감소하여 10일째에는 약 47% 수준으로 낮아졌고, 20°C에서는 1일째에 약 22%, 5일째에 약 49% 수준으로 감소하였다.

채소류에서 페놀 화합물의 분해는 세포 구획막의 완전성과 효소 활동의 저하와 관련되는데, 특히 polyphenoloxidase와 peroxidase가 직접적으로 관련되는 것으로 알려져 있다(Baltacioglu 등, 2011). 즉, 저장기간이 길어지면 세포는 점진적으로 막 시스템의 완전성을 잃게 되어서, 그 결과 구획이 없어져 효소가 기질에 쉽게 작용할 수 있게 된다는 것이다. 따라서 저장기간이 길어져서 세포막이 손상되고 페놀 화합물의 산화가 일어나게 되어 세포 내 페놀 함량은 줄어든다고 한다(Yang 등, 2011). 더불어 저장 온도에 따른 브로콜리의 총 페놀 함량은 품종에 따라 차이가 크게 나타나기도 한다. 예컨대, 20°C에 저장한 Liberty와 Revolution 품종의 총 페놀 함량은 저장기간에 따라 증가하는 반면에 General과 Millady 품종은 감소한다고 보고하고 있다(Balouchi 등, 2011). 한편, 브로콜리는 카테킨, hydroxybenzoic acid, chlorogenic acid, caffeic acid, ferulic acid, rutin, cinnamic acid 등과 같은 다양한 페놀성 화합물을 함유하고 있는데, 이들 페놀 화합물의 합성은 상처 스트레스(wounding stress)에 의해 유도되어 결과적으로 총 페놀 화합물의 함량은 증가한다고 보고하고 있다(Guan 등, 2019). 더불어 브로콜리뿐만 아니라 용과, 당근 및 버섯인 경우도 절단 등의 상처 스트레스에 의해 총 페놀 함량이 일정 시간 동안은 증가한다고 보고하고 있다(Kenny와 O'Beirne, 2010; Oms-Oliu 등, 2010). 따라서 본 연구의 결과도 절단 스트레스에 의한 페놀성 화합물이 유도되는 것과 페놀 화합물의 산화되는 반응이 반영된 것으로, 저장 온도가 높고 저장기간이 길어질수록 브로콜리의 페놀 화합물들이 쉽게 산

화되어 함량이 감소하는 것으로 여겨진다.

일반적으로 수확 후의 과일 또는 채소류의 비타민 C 함량은 저장 온도와 기간에 따라 차이가 나는데, 높은 온도에서 저장기간이 길수록 비타민 C 함량은 급격히 떨어진다고 보고하고 있다(Lee와 Kader, 2000). 이에 저장 온도에 따른 신선편이 브로콜리의 비타민 C 함량 변화를 조사하였다(Fig. 2). 꽃송이 부위를 절단시킨 초기 상태의 신선편이 브로콜리의 비타민 C 함량은 약 1.32 mg/g DW 수준으로 나타났으며, 4°C에서는 20일까지 크게 변하지 않았으나 그 후부터는 감소하기 시작하여 25일째는 초깃값 대비 약 46% 수준으로 떨어졌다. 10°C에서는 5일째에 약 20%가, 10일째에는 약 57% 수준으로 감소하였다. 20°C에서는 1일째부터 급격히 감소하여 5일째에는 약 56% 범위로 감소하였다. 이상의 결과는 4°C에서 25일 동안 저장한 브로콜리의 비타민 C 함량

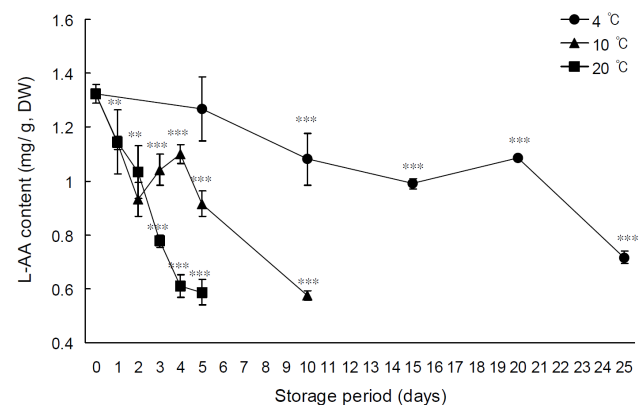


Fig. 2. Changes in vitamin C contents in fresh-cut broccoli throughout storage at 4°C, 10°C, and 20°C. Data were expressed as mean±SD for three tests. A significant difference was determined by one-way ANOVA with LSD test. ** $P<0.01$, *** $P<0.001$; compared with control (0 day sample). L-AA, L-ascorbic acid.

이 초깃값 대비 약 30% 감소하였다는 이전의 보고와 비슷하였고(Wei 등, 2020), 궁극적으로는 신선편이 브로콜리의 비타민 C 함량 감소율이 온도가 높을수록 저장기간이 길수록 증가함을 보여주었다. 또한, 이 결과는 높은 저장 온도에서 농산물의 비타민 C 함량 감소는 oxidase에 의해 ascorbic acid의 분해가 쉽기 때문이라는 연구 결과(Thomas와 Oke, 1980)와 부합되는 것이라 여겨진다.

글루코시놀레이트는 티오글루코사이드의 일종으로 유효 함유 β -D-glucoside의 유기황화합물이며, 자연적으로는 브로콜리, 비트 및 양배추 등과 같은 십자화과 채소류에서 풍부하게 생성되는 2차 대사산물이다(Connolly 등, 2021).

식물체의 글루코시놀레이트는 생합성 과정에서 약 200가지의 개별 유도체들이 합성되며, myrosinase 효소 작용으로 isothiocyanate 및 thiocyanate와 같은 생리활성 물질로 가수분해되어 다양한 약리적 효과를 유도한다(Al-Gendy 등, 2010; Barba 등, 2016). 특히, 최근에는 글루코시놀레이트가 인지기능 개선 효과와의 관련성이 보고되면서 더욱 관심이 늘어나고 있다(Kamal 등, 2022; Lee 등, 2014). 더불어 십자화과 채소류의 글루코시놀레이트 함량은 품종별 차이는 물론 재배 조건 등의 외부 요소들에 의해서도 영향을 받을 뿐만 아니라 수확 후 저장 및 가공 조건에 따라 달라진다고 보고하고 있다(Jones 등, 2006). 이에 저장 온도에

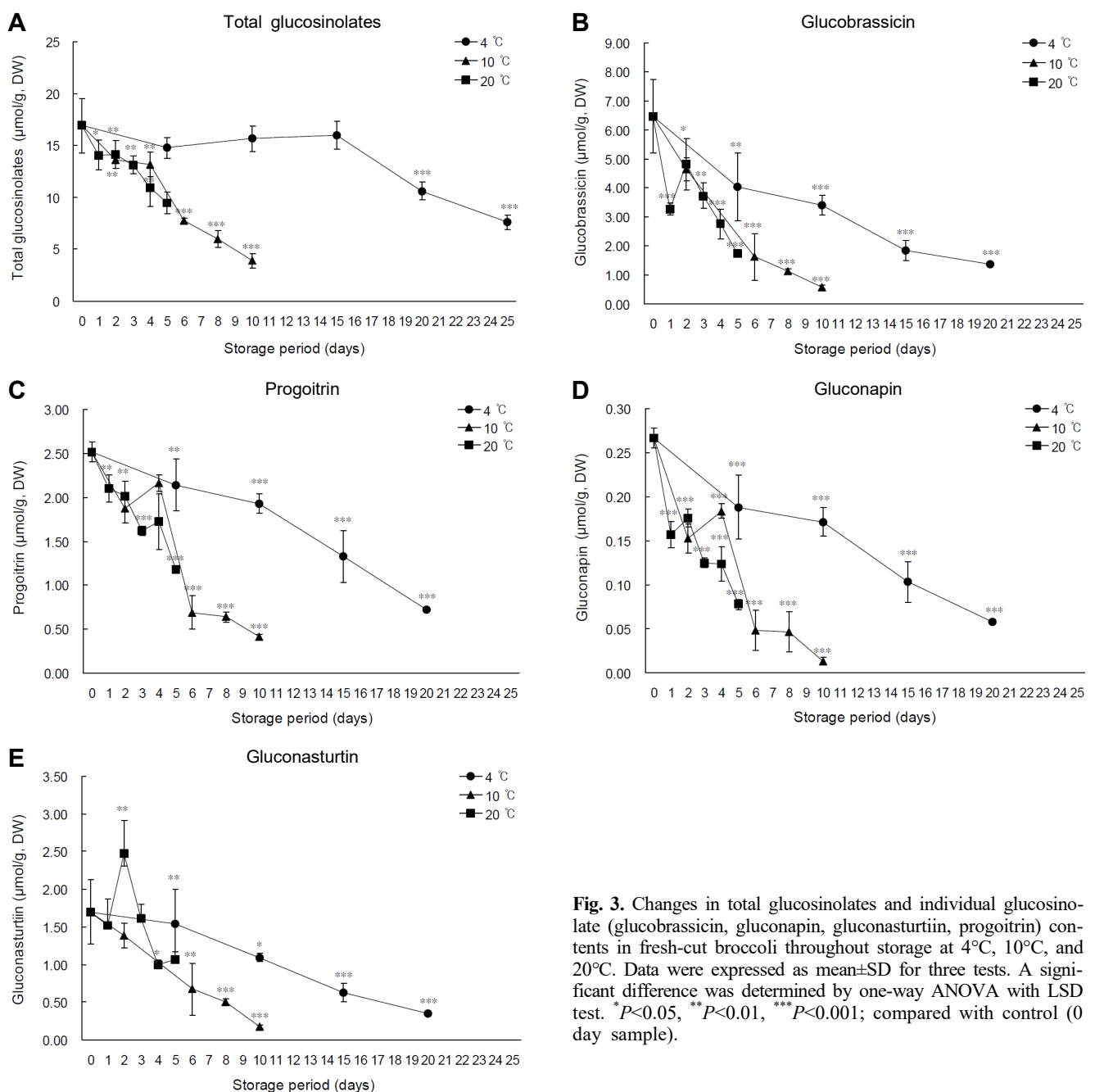


Fig. 3. Changes in total glucosinolates and individual glucosinolate (glucobrassicin, gluconapin, gluconasturtiin, progoitrin) contents in fresh-cut broccoli throughout storage at 4°C, 10°C, and 20°C. Data were expressed as mean±SD for three tests. A significant difference was determined by one-way ANOVA with LSD test. * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$; compared with control (0 day sample).

따른 신선편이 브로콜리의 총 글루코시놀레이트 함량 및 개별 글루코시놀레이트 성분인 glucobrassicin, gluconasturtin, gluconapin 및 progoitrin의 함량 변화를 조사하였다(Fig. 3). 총 글루코시놀레이트 함량은 4°C에 저장한 경우 15일 동안은 유의적으로 큰 변화가 없었으나 20일째부터는 약 40~55% 수준으로 감소하였다. 이 결과는 브로콜리 꽃송이를 MAP 조건에서 4°C에 보관할 경우 21일까지는 총 글루코시놀레이트 함량이 유의적으로 크게 변하지 않는다는 Paulsen 등(2018)의 결과와 유사하였다. 반면 4개의 개별 글루코시놀레이트 함량은 저장기간이 길수록, 온도가 높아질수록 빠르게 감소하였는데, 특히 총 글루코시놀레이트 함량 중 약 50%를 차지하는 것으로 알려진 glucobrassicin 함량 변화는 4°C에서도 5일째에 약 38%, 10일째에 약 45% 감소하여 전체 글루코시놀레이트 함량 변화와는 다른 패턴을 보였다. 따라서 향후 저장 온도에 따른 전체적인 glucosinolate profiling은 필요하다고 여겨진다.

신선편이 브로콜리의 생리활성 변화

저장 온도에 따른 신선편이 브로콜리 에탄올 추출물의 항산화 활성을 DPPH 라디칼 소거능으로 평가하였다(Table 2). 4°C에서의 브로콜리 항산화 활성은 25일까지 큰 변화 없이 초기 상태를 유지하는 경향을 보였으나, 10°C에서는 6일째에 약 33%, 10일째에는 약 40%가 감소하였다. 20°C에서는 1일째부터 시간 경과에 따라 유의적($P<0.05$)으로 감소하여 5일째에는 약 50%가 저해되었다.

농산물에 함유된 항산화 물질 등의 생리활성 성분은 저장

Table 2. Changes in DPPH radical scavenging activity and acetylcholinesterase inhibition activity of fresh-cut broccoli throughout storage at 4°C, 10°C, and 20°C

Storage temperature (°C)	Storage period (d)	DPPH radical scavenging activity (%)	AChE inhibition activity (%)
4	0	34.97±1.39	38.89±3.20
	5	30.68±0.68*	36.61±3.01
	10	38.43±1.81*	34.44±1.60
	15	34.42±1.96	30.76±2.54**
	20	33.54±2.00	33.83±1.21*
	25	37.90±3.92	32.19±1.23**
10	2	31.11±0.40*	37.30±6.17
	4	30.84±1.86*	35.57±5.50
	6	23.43±1.12***	34.75±2.04
	8	25.27±0.55***	35.93±1.88
	10	20.88±0.40***	34.25±1.01
20	1	27.63±1.57***	34.27±1.10
	2	22.34±0.40***	30.17±2.52**
	3	23.83±1.71**	26.46±2.73***
	4	22.23±0.22**	33.24±2.79*
	5	17.77±1.79***	27.49±1.56***

Data were expressed as mean±SD for three tests. A significant difference was determined by one-way ANOVA with LSD test. * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$; compared with control (0 day sample). AChE, acetylcholinesterase.

조건에 따라 달라지는 것으로 알려져 있는데, 냉동 또는 저온 조건에서는 항산화 성분의 보존율이 높고, 온도가 높을수록 저장기간이 길수록 항산화 성분의 손실률이 높다고 보고하고 있다(Kevers 등, 2007; Llorach 등, 2008). 또한 항산화 활성과 총 페놀 함량과는 높은 상관성을 갖는다고 알려져 있으나 항산화 물질인 비타민 C와 glutathione 함량과 항산화 활성과의 직접적 연관성은 불분명하다고 여겨지고 있다(Guan 등, 2020). 따라서 Fig. 1 및 Table 2에서 나타나는 것처럼 저장 온도 및 저장기간에 따른 신선편이 브로콜리의 항산화 활성 변화에는 총 페놀 및 플라보노이드 함량 감소가 반영되어 나타난 것으로 여겨진다.

십자화과 채소류에 풍부한 sulforaphane은 유기황 화합물의 isothionates 그룹에 속하는 화합물로, 식물체가 손상을 입었을 때 myrosinase 효소가 분비되어 글루코시놀레이트 종류인 glucoraphanin을 sulforaphane으로 변환시켜 생겨난다. 이렇게 생성된 sulforaphane은 인지능력 향상에 도움을 주어 치매 개선 효과를 초래한다고 보고하고 있다. 즉 sulforaphane은 scopolamine이 처리된 일차 피질 뉴런에서 acetylcholine 수준을 증가시키고 AChE 활성을 감소시킨다고 보고하며, 이는 sulforaphane이 콜린성 결핍 및 인지 장애에 상당한 신경보호 효능을 갖는다고 제안하고 있다(Lee 등, 2014). 이런 측면에서 저장 온도에 따른 브로콜리 추출물의 AChE 활성 억제 능력을 조사하여 Table 2에 나타내었다. AChE 저해 활성은 4°C에서 10일째와 25일째에 각각 약 11%와 17% 수준으로 감소하여 큰 변화는 없으나, 20°C 저장인 경우는 2일째와 5일째에 각각 약 22%와 39% 수준으로 감소하였다. Fig. 3에서 보여주는 저장 온도에 따른 신선편이 브로콜리의 총 글루코시놀레이트 함량 변화와 AChE 저해 활성과의 상관성은 높지 않은 것으로 나타났다. 따라서 앞으로는 glucoraphenin 함량과 함께 myrosinase 효소 작용으로 생성되는 sulforaphane 함량 측정과 이에 따른 AChE 저해 활성과의 연관성 연구는 추가로 진행되어야 할 것으로 여겨진다.

이상의 결과는 저장 온도에 따른 신선편이 브로콜리의 총 페놀, 플라보노이드 및 비타민 C 등의 항산화 물질 감소가 항산화 활성 감소에 반영되어 나타나고 있음을 보여주고 있고, 다양한 기능성을 보유하는 글루코시놀레이트 함량도 저장 온도와 기간에 따라 감소함을 제시하고 있다. 궁극적으로 신선편이 브로콜리는 외형적 변화, 유효성분 및 생리활성 변화 측면을 고려하면 4°C에서는 10일 내외까지, 10°C에서는 3~4일까지 유통 판매가 가능함을 제시하고 있고, 20°C에서는 유통이 어렵다는 것으로 보여주고 있다. 본 연구 결과는 신선편이 농산물 유통 시에 품질관리와 기능성 물질의 활용화 연구에 중요한 기초자료가 될 것이며, 신선편이 가정 간편식(HMR) 개발에도 활용 가능성이 높다고 여겨진다. 향후 여러 형태의 유통 조건에 따른 신선편이 농산물의 유효성분 및 기능성 변화에 관한 연구는 계속되어야 할 것으로 사료된다.

요 약

브로콜리의 꽃송이 부위만 절단된 신선편이 브로콜리의 최적 유통기간 설정과 기능성 활용에 필요한 정보를 제공하고, 저장 온도에 따른 신선편이 브로콜리의 색소(총 클로로필, 클로로필 a, b), 유효성분(총 페놀, 총 플라보노이드, 비타민 C, 총 글루코시놀레이트 및 개별 글루코시놀레이트) 및 생리활성 변화를 조사하였다. 신선편이 브로콜리를 상온에 저장하는 경우는 저장 2일째부터 외관 색깔이 크게 변하기 시작하였고, 유효성분 함량 및 항산화 활성이 급격히 감소하였다. 또한, 10°C 저장 시에는 4일째부터 유효성분 함량 및 생리활성 감소가 나타났다. 반면 4°C의 신선편이 브로콜리에서는 10일째까지 외형적 품질 변화뿐만 아니라 유효성분 및 항산화 활성 변화가 크게 나타나지 않았다. 즉, 총 페놀 함량은 15일째까지 유의적으로 증가하는 경향을 보였으며 20일째까지는 초깃값 10.3 mg GAE/g DW 수준을 유지하였다. 총 플라보노이드 함량 역시 초기에는 증가하다 15일째부터는 감소하였다. 비타민 C 및 총 글루코시놀레이트 함량은 4°C에서는 15일째까지 크게 변화하지 않았다. 신선편이 브로콜리의 DPPH 라디칼 소거능은 4°C에서 25일까지 초기 상태를 유지하였으나, 10°C에서는 10일째에 약 40%, 20°C에서는 5일째에 약 50%가 저해되었다. 저장 온도에 따른 항산화 활성 변화는 항산화 물질의 함량 변화가 반영되어 나타났다. 향후 유통 조건에 따른 신선편이 브로콜리의 영양성분 및 기능성 변화 등의 연구는 계속 진행되어야 할 것으로 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2024RIS-009).

REFERENCES

- Al-Gendy AA, El-gindi OD, Hafez AS, et al. Glucosinolates, volatile constituents and biological activities of *Erysimum corinthium* Boiss. (Brassicaceae). *Food Chem.* 2010. 118:519-524.
- Ares AM, Nozal MJ, Bernal J. Extraction, chemical characterization and biological activity determination of broccoli health promoting compounds. *J Chromatogr A.* 2013. 1313:78-95.
- Bae YS, Choi HJ, Lee JS, et al. Effect of packing type and storage temperature on microbial growth and quality of fresh-cut onions (*Allium cepa* cv. turbo). *Korean J Food Preserv.* 2016. 23:623-630.
- Balouchi Z, Peyvast GA, Ghasemnezhad M, et al. Changes of antioxidant compounds of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *Italica*) during storage at low and high temperatures. *Southwest J Horticult Biol Environ.* 2011. 2:193-212.
- Baltacıoğlu C, Velioğlu S, Karacabey E. Changes in total phenolic and flavonoid contents of rowanberry fruit during post-harvest storage. *J Food Qual.* 2011. 34:278-283.
- Barba FJ, Nikmaram N, Roohinejad S, et al. Bioavailability of glucosinolates and their breakdown products: Impact of processing. *Front Nutr.* 2016. 3:24. <https://doi.org/10.3389/fnut.2016.00024>
- Blois MS. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature.* 1958. 181:1199-1200.
- Brennan PS, Shewfelt RL. Effect of cooling delay at harvest on broccoli quality during postharvest storage. *J Food Qual.* 2010. 12:13-22.
- Choi JW, Lee WM, Kwak JH, et al. Recent research status of postharvest management of broccoli. *Korean J Intl Agri.* 2011. 23:497-502.
- Connolly EL, Sim M, Travica N, et al. Glucosinolates from cruciferous vegetables and their potential role in chronic disease: Investigating the preclinical and clinical evidence. *Front Pharmacol.* 2021. 12:767975. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.767975>
- Cosme P, Rodriguez AB, Espino J, et al. Plant phenolics: Bioavailability as a key determinant of their potential health-promoting applications. *Antioxidants.* 2020. 9:1263. <https://doi.org/10.3390/antiox9121263>
- Ellman GL, Courtney KD, Andres Jr V, et al. A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. *Biochem Pharmacol.* 1961. 7:88-95.
- Fahey JW, Zalcmann AT, Talalay P. The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry.* 2001. 56:5-51.
- Folin O, Denis W. On phosphotungstic-phosphomolybdic compounds as color reagents. *J Biol Chem.* 1912. 12:239-243.
- Forney CF, Hildebrand PD, Saltveit ME. Production of methanethiol by anaerobic broccoli and microorganisms. *Acta Hort.* 1993. 343:100-104.
- Guan Y, Hu W, Jiang A, et al. Effect of methyl jasmonate on phenolic accumulation in wounded broccoli. *Molecules.* 2019. 24:3537. <https://doi.org/10.3390/molecules24193537>
- Guan Y, Hu W, Jiang A, et al. Influence of cut type on quality, antioxidant substances and antioxidant activity of fresh-cut broccoli. *Int J Food Sci Technol.* 2020. 55:3019-3030.
- Guan Y, Ji Y, Yang X, et al. Antioxidant activity and microbial safety of fresh-cut red cabbage stored in different packaging films. *LWT.* 2023. 175:114478. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114478>
- Heo SH, Boo KH, Han SH, et al. Changes in physicochemical properties and biological activities of kohlrabi (*Brassica oleracea* var. *gongylodes*) according to storage conditions. *J Korean Soc Food Sci Nutr.* 2021. 50:699-706.
- Hertog MGL, Hollman PCH, Venema DP. Optimization of a quantitative HPLC determination of potentially anticarcinogenic flavonoids in vegetables and fruits. *J Agric Food Chem.* 1992. 40:1591-1598.
- Jeon KW, Kim MG, Heo SH, et al. Comparative analysis of active components and antioxidant activities of Brussels sprouts (*Brassica oleracea* var. *gemmifera*) and cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*). *J Appl Biol Chem.* 2022. 65:413-419.
- Jones RB, Faragher JD, Winkler S. A review of the influence of postharvest treatments on quality and glucosinolate content in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) heads. *Postharvest Biol Technol.* 2006. 41:1-8.
- Kamal RM, Razis AFA, Sukri NSM, et al. Beneficial health effects of glucosinolates-derived isothiocyanates on cardiovascular and neurodegenerative diseases. *Molecules.* 2022. 27:624. <https://doi.org/10.3390/molecules27030624>
- Kenny O, O'Beirne D. Antioxidant phytochemicals in fresh-cut carrot disks as affected by peeling method. *Postharvest Biol*

- Technol. 2010. 58:247-253.
- Kevers C, Falkowski M, Tabart J, et al. Evolution of antioxidant capacity during storage of selected fruits and vegetables. J Agric Food Chem. 2007. 55:8596-8603.
- Kim JG, Nimitkeatkai H, Choi JW, et al. The effects of calcinated calcium solution washing and heat treatment on the storage quality and microbial growth of fresh-cut broccoli. J Bio-Env Con. 2012. 21:411-418.
- Kim KA, Yang SR. Consumers' willingness-to-pay for the fresh-cut agricultural products by processing stage. Korean Journal of Food Marketing Economics. 2024. 41:111-125.
- Kim SJ, Sun SH, Kim GC, et al. Quality changes of fresh-cut leafy and condiment vegetables during refrigerated storage. J Korean Soc Food Sci Nutr. 2011. 40:1141-1149.
- King GA, Morris SC. Early compositional changes during post-harvest senescence of broccoli. J Amer Soc Hort Sci. 1994. 119:1000-1005.
- Kozukue N, Friedman M. Tomatine, chlorophyll, β -carotene and lycopene content in tomatoes during growth and maturation. J Sci Food Agric. 2003. 83:195-200.
- Lee S, Kim J, Seo SG, et al. Sulforaphane alleviates scopolamine-induced memory impairment in mice. Pharmacol Res. 2014. 85:23-32.
- Lee SK, Kader AA. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. Postharvest Biol Technol. 2000. 20:207-220.
- Llorach R, Martínez-Sánchez A, Tomás-Barberán FA, et al. Characterisation of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole. Food Chem. 2008. 108: 1028-1038.
- Moreno MIN, Isla MI, Sampietro AR, et al. Comparison of the free radical-scavenging activity of propolis from several regions of Argentina. J Ethnopharmacol. 2000. 71:109-114.
- Oms-Oliu G, Aguilo-Aguayo I, Martin-Belloso O, et al. Effects of pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of fresh-cut mushrooms (*Agaricus bisporus*). Postharvest Biol Technol. 2010. 56:216-222.
- Paulsen E, Barrios S, Baenas N, et al. Effect of temperature on glucosinolate content and shelf life of ready-to-eat broccoli florets packaged in passive modified atmosphere. Postharvest Biol Technol. 2018. 138:125-133.
- Starzyńska A, Leja M, Mareczek A. Physiological changes in the antioxidant system of broccoli flower buds senescing during short-term storage, related to temperature and packaging. Plant Sci. 2003. 165:1387-1395.
- Thomas P, Oke MS. Technical note: Vitamin C content and distribution in mangoes during ripening. Int J Food Sci Technol. 1980. 15:669-672.
- Wang J, Mao S, Yuan Y, et al. Effect of storage conditions and cooking methods on chlorophyll, glucosinolate, and sulforaphane content in broccoli florets. Horticulturae. 2021. 7: 519. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7120519>
- Wei L, Liu C, Wang J, et al. Melatonin immersion affects the quality of fresh-cut broccoli (*Brassica oleracea* L.) during cold storage: Focus on the antioxidant system. J Food Process Preserv. 2020. 44:e14691. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14691>
- Yang Y, Wang J, Xing Z, et al. Identification of phenolics in Chinese toon and analysis of their content changes during storage. Food Chem. 2011. 128:831-838.