Check for updates

J East Asian Soc Diet Life
35(6): 676~683 (2025)
http://dx.doi.org/10.17495/easdl.2025.12.35.6.676

GABA 강화 토마토 열수 추출물(*Solanum lycopersicum*)의 항산화 및 미백 활성 평가

이유진[1] · 정민아[2] · 황지환[3] · 김교남[3†]

[1]경남대학교 대학원 건강과학과 석사과정, [2]순자네바른먹거리 대표이사, [3]경남대학교 제약공학과 교수

Evaluation of Antioxidant and Antimelanogenic Activities of GABA-Enriched Tomato (*Solanum lycopersicum*) Hot-Water Extract

Yu-Jin Lee[1], Min-A Jung[2], Ji-Hwan Hwang[3] and Gyo-Nam Kim[3†]

[1]Master Student, Dept. of Health Science, Graduate School, Kyungnam University, Changwon 51767, Republic of Korea
[2]Chief Executive Officer, Sunjane's Wholesome Foods Co., Ltd., Jinju 52842, Republic of Korea
[3]Professor, Dept. of Pharmaceutical Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Republic of Korea

ABSTRACT

This study compared the antioxidant activities and skin whitening effects of water extracts from GABA-enriched tomato (EGT) with those from conventional tomato (ECT). The antioxidant properties were evaluated through the total phenolic content (TPC), DPPH radical scavenging activity, and cupric ion-reducing capacity, while the antimelanogenic potential was assessed using a tyrosinase inhibitor. Both extracts showed comparable TPC values across all concentrations, indicating that GABA enrichment did not substantially alter the phenolic content of the tomato extracts. Consistent with the TPC results, EGT and ECT showed similar DPPH radical scavenging activities and concentration-dependent increases in the reducing capacity, with no substantial enhancement attributable to GABA enrichment. Neither extract exhibited concentration-dependent inhibition in the tyrosinase inhibition assay, and the overall inhibitory levels were low compared to the positive control. These findings suggest that the whitening-related effects of the tomato extracts may arise primarily from antioxidant-mediated indirect pathways rather than direct tyrosinase suppression. Overall, these findings indicate that EGT maintains comparable antioxidant and skin-related functional properties to ECT and that GABA enrichment does not significantly enhance the biochemical activities examined in this study. Nevertheless, the stable antioxidant characteristics of EGT support its potential application as a functional food material.

Key words: GABA, tomato, *Solanum lycopersicum*, antioxidant, antimelanogenic

서 론

활성산소종(reactive oxygen species; ROS)은 세포 호흡과 같은 정상적인 대사 과정에서 지속적으로 생성되고 다양한 내외부 요인에 의해 과도하게 축적될 경우 세포 구성 물질을 산화시켜 손상을 유발한다(LEE SY & Ahn TW 2007). 특히 ROS의 증가는 지질과산화, 단백질 산화, DNA 손상, 히알루론산 분해뿐 아니라 콜라겐 및 엘라스틴 등 주요 탄력 섬유의 변형을 초래하여 피부 탄력 저하와 주름 형성을 유발하는 것으로 알려져 있다. 이러한 산화적 손상을 억제하기 위하여 인체는 superoxide dismutase(SOD), catalase(CAT), glutathione peroxidase(GPX) 등 효소적 항산화 체계와 비타민C, 비타민E, β-카로틴 등 비효소적 항산화 성분을 통해 ROS를 제거하고 항상성을 유지한다(Kim JM 등 2010). 자외선은 ROS의 생성을 유도하는 대표적인 외부 요인으로, 피부는 자외선에 가장 직접적으로 노출되는 조직이기 때문에 그 영향을 가장 쉽게 받게 되고 자외선 조사로 인해 피부 내에서는 다양한 ROS가 생성된다(Wei M 등 2024). 멜라닌 색소는 피부 표피 기저층의 melanocyte에서 생성되어 자외선을 흡수함으로써 피부를 보호하지만 자외선 조사로 증가한 ROS는 멜라닌 합성을 촉진하여 과도하게 축적될 경우 기미나 주근깨와 같은 과색소침착을 유발할 수 있는 것으로 보고되어 있다(Park SN 1999).

식물 유래 항산화 소재 중 토마토(*Solanum lycopersicum*)는 리코펜, β-카로틴, 폴리페놀, 비타민 C 등을 풍부하게 함유하고 있으며 이러한 성분들은 높은 항산화 활성을 나타내는 것으로 보고되었다(Ahn JB 2018; Jeong JY 등 2024). In MJ 등(2024)은 토마토 껍질과 과육 추출물의 비교 연구에서 껍질 추출물이 과육 추출물보다 폴리페놀 및 플라보노이드 함량과 우수항산화 활성이 보임을 확인하였다. 또한 토마토

† **Corresponding author :** Gyo-Nam Kim, Tel: +82-55-249-6330, Fax: +82-505-999-2104, E-mail: gnkim@kyungnam.ac.kr

의 항산화 활성은 성숙 단계, 재배 조건 및 과피색 등에 의해 영향을 받으며, 성숙도가 증가할수록 리코펜과 비타민C 함량이 높아져 항산화 활성이 향상된다고 보고되었다(Jeong JY 등 2024).

ɣ-Aminobutyric acid(GABA)는 자연계에 널리 분포하는 비단백질 아미노산으로 혈압 강하, 이뇨 작용, 항우울 작용 및 항산화 활성 등 다양한 생리활성을 나타내며, glutamic acid decarboxylase(GAD)에 의해 glutamate가 탈탄산 반응을 거쳐 생성된다(Cho SC 등 2012). 토마토는 성숙 과정에서 glutamate와 GABA 함량이 높게 축적되는 것으로 보고되었다(Takayama M & Ezura H 2015), 이러한 특성을 활용하여 유산균 발효 기반 GABA 강화 토마토 소재가 개발되었고, 해당 소재는 원물 토마토 대비 활성산소 제거능이 향상된 것으로 보고되었다(Cho SC 등 2012).

토마토는 풍부한 항산화 성분과 높은 glutamate 함량을 통해 GABA 강화 기능성 소재로서 잠재력을 갖추고 있으나, GABA 증가가 토마토의 항산화 활성에 미치는 영향을 직접적으로 비교한 연구는 아직 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 GABA 함량이 증가된 토마토와 일반 토마토를 각각 열수 추출하여 항산화 활성 비교 평가와 *in vitro* 상의 tyrosinase 저해 효과를 측정함으로써, GABA 강화가 토마토의 항산화 및 미백 관련 기능성 향상에 기여하는지 규명하고 미용 기능성 식품 소재로서의 응용 가능성을 검토하고자 한다.

재료 및 방법

1. 실험 재료

본 실험에서 항산화 활성을 평가하기 위해 사용한 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl(DPPH), ascorbic acid, copper(II) chloride, neocuproine, folin-ciocalteu phenol reagent, sodium carbonate(Na_2CO_3), gallic acid와 tyrosinase 저해 활성을 평가하기 위해 사용한 sodium phosphate monobasic dehydrate, sodium phosphate dibasic, L-tyrosine, mushroom tyrosinase, arbutin은 Sigma Aldrich Co.(St. Louis, MO, USA)에서 구매하였다. Dimethyl sulfoxide(DMSO)는 Junsei Chemical Co., Ltd.(Chuo-ku, Tokyo)에서 구매하였고, 94.5% ethanol은 Daejung(Seoul, Korea)에서 구매하였다.

2. GABA 강화 토마토와 일반 토마토 추출물의 제조

GABA 강화 토마토와 토마토는 종자 파종 후 육묘 단계를 거쳐, 생육 기간 동안 적절한 온·습도, 광 조건 및 양·수분 관리를 통해 생장과 개화를 유도하였다. 이후 착과 및 과실 비대 과정을 거쳐 성숙기에 도달한 과실을 수확하여 사용하였다. GABA 강화 토마토와 일반 토마토는 순자네바른먹거리(Jinju, Korea)에서 동결건조 분말 형태로 제공받아 사용하였다. GABA 강화 토마토와 일반 토마토는 각각 98℃±1에서 열수 추출한 뒤, 회전 감압 농축 후 동결 건조하였다. GABA 강화 토마토의 추출 수율은 52.10%(w/w-dried weight), 일반 토마토의 추출 수율은 44.41%(w/w-dried weight)로 나타났다. 일반적으로 토마토의 GABA 함량은 약 219.86~404.90 mg/100g (dry weight)로 보고되었으며(Tilahun S 2021), 본 시험에 사용된 GABA 강화 토마토의 GABA 함량은 573.48 mg/100 g(dry weight)로 확인되었다. 본 연구에서 각각의 추출물은 EGT(water extract of GABA-enriched tomato) 및 ECT(water extract of conventional tomato)로 명명하였다. 모든 추출물은 동결건조 후 −20℃에서 보관하였으며, 실험 직전 DMSO에 적정 농도로 용해하여 사용하였다(Table 1).

3. 총 폴리페놀 함량 측정

총 폴리페놀 함량은 Folin-Denis 법(Singleton VL 등 1999)을 이용하여 분석하였다. EGT와 ECT 시료는 각각 1, 25, 50, 100 및 200 μg/mL의 농도로 희석하여 준비하였다. 시료 용액 200 μL, 94.5%(v/v) ethanol 100 μL, 증류수 1,000 μL 및 Folin-Ciocalteu phenol reagent(FCP) 100 μL를 2 mL microcentrifuge tube에 첨가한 후 잘 혼합하여 25℃에서 5 min 동안 반응시켰다. 이후 5%(w/v) Na_2CO_3 용액 200 μL를 첨가하여 vortex로 혼합한 뒤, 암조건에서 1 hr 동안 반응시켰다. 반응이 완료된 혼합액을 96-well plate에 200 μL씩 분주하고, microplate reader(VersaMax; Molecular Devices, Sunnyvale CA, USA)를 사용하여 725 nm에서 흡광도를 측정하였다. EGT와 ECT의 총 폴리페놀 함량은 gallic acid를 표준물질로 작성한 검량식(y=0.0383x−0.0243)에 대입하여 gallic acid equivalent (GAE)로 환산하였으며, 최종 결과는 μg GAE/mL 단위로 표현하였다.

4. DPPH 라디칼 소거 활성

EGT와 ECT의 항산화 활성을 평가하기 위해 DPPH 라디칼

Table 1. The extraction yield of GABA-enriched tomato and conventional tomato

Name	Extraction solvent	Extraction yield (%, w/w-dried weight)
EGT	Hot-water	52.10±2.67
ECT	Hot-water	44.41±1.94

EGT: Water extract of GABA-enriched tomato, ECT: Water extract of conventional tomato.

소거 활성을 측정하였다. DPPH 시약은 94.5%(v/v) ethanol에 용해한 뒤, 호일로 차광하여 냉장 조건에서 1 hr 안정화 후 사용하였다. EGT와 ECT는 각각 1, 25, 50, 100 및 200 μg/mL의 농도로 DMSO에 희석하여 준비하였다. 96-well plate에 안정화 시킨 200 μM DPPH 라디칼 용액 190 μL와 시료 10 μL를 첨가하고, 차광한 상태에서 37℃ incubator에서 30 min 동안 반응시켰다. 반응 종료 후, microplate reader(VersaMax; Molecular Devices, Sunnyvale CA, USA)를 사용하여 517 nm에서 흡광도를 측정하였다. 양성 대조군으로 ascorbic acid를 시료와 동일 농도로 희석하여 비교하였으며, 시료의 대조군으로는 DMSO를 20 μL 첨가하였다. EGT, ECT 및 ascorbic acid의 DPPH 라디칼 소거 활성은 아래의 식에 따라 계산하였다.

$$\text{DPPH 라디칼 소거능(\%)} = \frac{\text{EGT와 ECT 처리군의 흡광도}}{\text{대조군의 흡광도}} \times 100$$

5. 환원력 평가

EGT와 ECT의 환원력을 측정하고자 $CuCl_2$를 이용하여 Cu^{2+}에서 Cu^{1+}로 환원시키는 정도를 분석하였다. 1 mM $CuCl_2$ 용액은 증류수에 용해하여 제조하였고, 250 μM neocuproine 용액은 10 mM potassium phosphate buffer(pH 7.41)에 용해하여 준비하였다. EGT와 ECT는 각각 1, 25, 50, 100 및 200 μg/mL 농도로 DMSO에 희석하였다. 96-well plate에 1 mM $CuCl_2$ 20 μL, 10 mM photassium phosphate buffer 60 μL, 250 μM neocuproine 80 μL 그리고 농도별 시료를 40 μL 순서대로 첨가하여 25℃에서 1 hr 동안 반응시켰다. 반응 종료 후, microplate reader(VersaMax; Molecular Devices, Sunnyvale CA, USA)를 사용하여 454 nm에서 흡광도를 측정하였다. 양성대조군으로는 ascorbic acid를 시료와 동일한 농도로 희석하여 사용하였다. 얻어진 흡광도 값은 copper(Ⅰ)/neocuproine complex의 extinction coefficient(7.95×10^3 $M^{-1}cm^{-1}$)를 이용하여 copper(Ⅰ)의 농도로 환산하여 나타내었다.

6. Tyrosinase 저해 활성

Tyrosinase 저해 활성 분석을 통해 EGT와 ECT의 미백 활성을 평가하였다. 0.1 M sodium phosphate buffer(pH 6.5)에 L-tyrosine을 용해하여 1.5 mM L-tyrosine으로 제조한 후 기질로 사용하였다. 96-well plate에 EGT와 ECT를 각각 1, 25, 50, 100 및 200 μg/mL의 농도로 희석한 시료 20 μL, 1.5 mM L-tyrosine 40 μL, 0.1 M sodium phosphate buffer 220 μL를 분주한 후 마지막에 1,500 U mushroom tyrosinase 20 μL를 첨가하여 37℃ incubator에서 15 min 동안 반응시켰다. 반응 종료 후, microplate reader(VersaMax; Molecular Devices, Sunnyvale CA, USA)를 사용하여 490 nm에서 흡광도를 측정하였다. 양성 대조군으로는 tyrosinase 억제제로 잘 알려져 있는 arbutin을 시료와 같은 농도로 희석하여 사용하였고, 시료와 비교하기 위한 대조군은 시료의 용매인 DMSO를 20 μL 첨가하였다. Tyrosinase 저해 활성은 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Tyrosinase 저해활성(\%)} = \frac{\text{EGT와 ECT 처리군의 흡광도}}{\text{대조군의 흡광도}} \times 100$$

7. 통계분석

모든 데이터는 3회 반복 실험을 통해 얻었으며, 결과는 평균±표준편차로 나타내었다. 통계분석은 Statistical Package for Social Science software(version 18.0; SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하여 수행하였으며, 처리군 간 유의성 검정은 분산분석(ANOVA) 후 Duncan's multiple range test를 적용하여 $p<0.05$ 수준에서 유의성을 확인하였다.

결과 및 고찰

1. 총 폴리페놀 함량

페놀성 화합물은 식물에서 합성되는 대표적인 2차 대사산물로, 구조적 다양성과 분자량 범위가 매우 넓은 것으로 알려져 있다. 이들은 분자 내 phenolic hydroxyl기를 포함하고 있기 때문에 단백질 및 기타 고분자 물질과 결합하기 용이하고 항산화, 항암 등의 다양한 생리활성을 나타내는 것으로 보고되어 있다(Lee SO 등 2005). 식물성 식품에 존재하는 폴리페놀류는 이러한 구조적 특성을 바탕으로 산화환원 반응에 관여하여 라디칼을 안정화시키는 등 항산화 작용을 나타내며(Scalbert A 등 2005), 이에 따라 총 폴리페놀 함량은 식물 추출물의 항산화 특성을 평가하는 기본적인 지표로 활용되고 있다(Prior RL 등 2005).

본 연구에서는 EGT와 ECT의 총 폴리페놀 함량을 gallic acid 표준곡선을 기반으로 산출하여 Fig. 1에 제시하였다. 두 시료를 1, 25, 50, 100 및 200 μg/mL의 농도로 처리한 결과, EGT는 −0.10, −0.07, 0.01, 0.28 및 0.72 μg GAE/mL를 나타내었고, ECT는 −0.17, −0.08, 0.02, 0.28 및 0.69 μg GAE/mL의 값을 보였다. 모든 농도에서 EGT와 ECT는 농도 증가에 따라 총 폴리페놀 함량이 유의하게 증가하는 농도 의존적 양상을 보였으며, 이는 추출물 농도 상승에 따라 용액 내 페놀성 화합물의 함량이 비례적으로 증가했기 때문으로 판단된다.

한편 동일 농도에서 EGT와 ECT 사이에는 뚜렷한 차이가

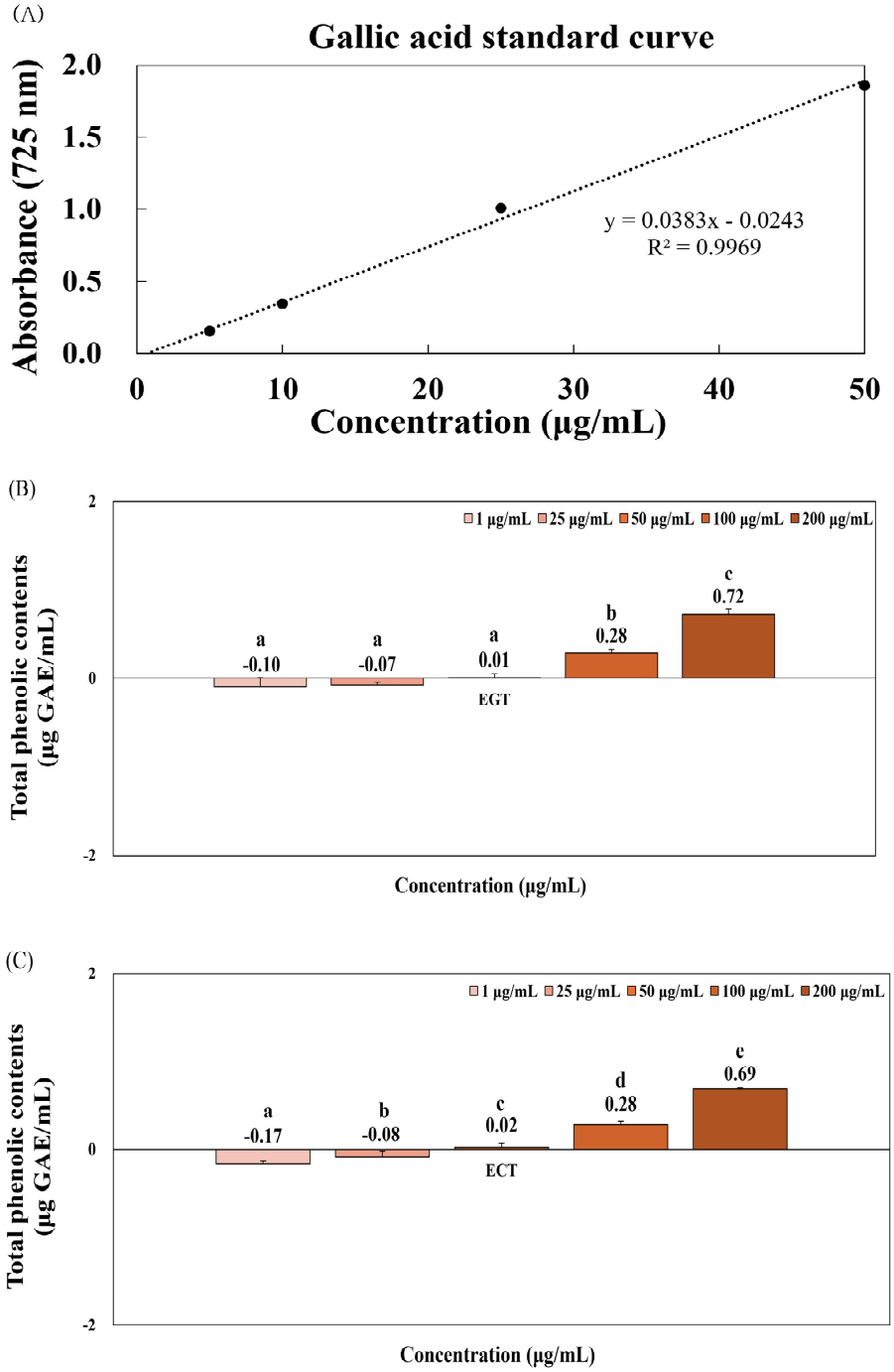

Fig. 1. The total phenolic content of EGT and ECT. The assay was conducted at concentrations of 1, 25, 50, 100, and 200 μg/mL. The results were expressed as gallic acid equivalents (GAE) using a gallic acid standard curve. (A) shows the standard curve of gallic acid, (B) represents the total phenolic content of EGT and (C) represents the total phenolic content of ECT. Different letters indicate significant differences by Duncan's test (p<0.05). EGT: Water extract of GABA-enriched tomato; ECT: Water extract of conventional tomato.

나타나지 않았다. 이는 GABA 함량을 증가시키는 과정이 토마토의 폴리페놀 축적에는 직접적인 영향을 미치지 않았을 가능성을 시사한다. 실제로 국내에서 재배되는 여러 토마토 품종(Rafito, Momotaro, Medsion)의 총 폴리페놀 함량을 비

교한 연구에서도 품종 간 유의한 차이가 나타나지 않았다고 보고된 바 있으며(Choi SH 2021), 토마토의 폴리페놀 함량은 품종 특성뿐 아니라 과피 비율, 과육 구성, 과일 크기 등 다양한 요인의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 특히 토마토의 폴리페놀 성분들은 과육보다 과피에 더 많이 분포하며, 방울토마토 같은 소형 과실에 더 높은 농도로 축적된다는 보고도 있다(Kim D 등 2020). 선행된 근거를 종합하면, EGT와 ECT는 동일한 원재료 특성을 보유하고 있기 때문에 두 시료의 총 폴리페놀 함량이 유사하게 나타난 것으로 보인다. 즉, GABA 강화 여부보다는 원재료 고유의 특성이 총 폴리페놀 함량을 결정하는 데 더 큰 영향을 미쳤을 가능성이 높다고 생각된다.

2. DPPH 라디칼 소거 활성

천연물의 항산화 활성을 평가하기 위해 다양한 분석법이 사용되며, 그중 DPPH 라디칼 소거 활성법은 안정한 자유라디칼을 활용한다는 점에서 널리 이용되는 대표적인 방법이다(Brand-Williams W 등 1995). DPPH는 짙은 보라색을 띠는 안정한 자유라디칼로 항산화 물질과 반응하여 전자나 수소를 전달받으면 환원되고, 이에 따라 흡광도가 감소하는 특성을 지닌다(Molyneux P 2004). 이러한 원리에 기반한 DPPH 분석법은 비교적 간단하고 재현성이 높아 식물성 소재의 항산화능 평가에 폭넓게 활용되고 있다(Prior RL 등 2005).

본 연구에서는 GABA 강화 토마토 추출물(EGT)과 일반 토마토 추출물(ECT)의 항산화 활성을 평가하기 위해 DPPH 라디칼 소거 활성 평가를 실시하였으며, 결과는 Fig. 2에 제시하였다. 두 시료를 각각 1, 25, 50, 100 및 200 μg/mL의 농도로 처리한 결과, EGT는 19.79%, 21.07%, 21.90%, 22.70% 및 25.19%의 DPPH 라디칼 소거능을 나타내었고, ECT는 19.38%, 21.66%, 21.89%, 22.62% 및 25.41%의 값을 보였다. 두 추출물 모두 농도 증가에 따라 DPPH 라디칼 소거능이 증가하는 경향을 보였으나, 동일 농도에서 EGT와 ECT 사이에는 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다. 양성 대조군으로 사용한 ascorbic acid는 동일 농도 조건에서 14.44%, 97.75%, 98.86%, 98.75% 및 98.94%의 높은 라디칼 소거능을 나타내었다. EGT와 ECT는 양성 대조군인 ascorbic acid에 비해 상대적으로 약한 DPPH 라디칼 소거 활성을 보였다. EGT와 ECT가 모든 농도에서 유사한 소거능을 나타낸 점은, 앞서 두 시료의 총 폴리페놀 함량이 비슷하게 나타난 결과와도 일치한다. 본 연구에서 사용된 농도 범위에서는 GABA 강화 여부가 DPPH 라디칼 소거 활성에 뚜렷한 영향을 미치지 않았으며, 두 추출물의 자유라디칼 소거 능력은 주로 공통적으로 함유된 폴리페놀 및 기타 항산화 성분의 영향으로 판단된다.

선행 연구에서도 토마토와 방울토마토가 기본적인 항산화 활성을 갖고 있으며, 리코펜 함량이 더 높은 방울토마토가 일반 토마토와 유사한 DPPH 라디칼 소거능을 보였다는 보고가 있다(Shahzad T 등 2014). 해당 연구는 항산화 활성이 리코펜뿐 아니라 β-carotene, xanthophyll 등 다양한 항산화 색소가 복합적으로 기여한 결과일 가능성을 제시한다. 이러한 결과는 본 연구에서 EGT와 ECT의 DPPH 라디칼 소거능에 유의한 차이가 나타나지 않은 결과와도 부합하며, GABA 강화 여부가 토마토의 자유라디칼 소거능 변화에 결정적 영향을 주지 않았음을 시사한다.

3. 환원력 평가

페놀류를 포함한 식물 추출물의 항산화 활성은 주로 식물이 지닌 산화환원 특성에 기인한다. Kähkönen MP 등(1999)

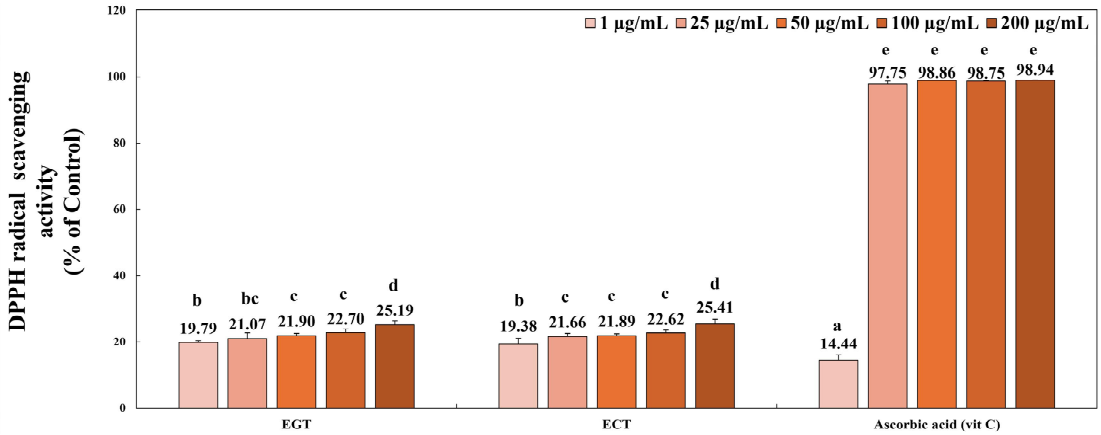

Fig. 2. The DPPH radical scavenging activities of EGT and ECT. The assay was conducted at concentrations of 1, 25, 50, 100, and 200 μg/mL. Ascorbic acid was used as a positive control. Different letters indicate significant differences by Duncan's test (p<0.05). EGT: Water extract of GABA-enriched tomato; ECT: Water extract of conventional tomato.

의 연구에서는 식물에 존재하는 페놀성 화합물이 전자를 주거나 받아들이는 능력을 가지고 있어 산화되기 쉬운 물질을 안정화시키고 활성산소종을 제거하는 데 기여한다고 보고하였다. 이러한 전자공여능은 환원력으로 표현되며 항산화 기능을 평가할 때 중요하게 사용된다. 환원력 측정은 시료가 산화된 금속이온을 환원시키는 정도를 확인하는 방식으로 항산화 능력이 높을수록 환원력도 높게 나타난다(Oyaizu M 1986).

본 연구에서는 GABA 토마토 추출물(EGT)와 일반 토마토 추출물(ECT)이 Cu^{2+}에서 Cu^{1+}로 환원시키는 환원력을 측정하기 위해 cupric ion-reducing capacity 실험을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. EGT와 ECT를 각각 1, 25, 50, 100 및 200 μg/mL의 농도로 처리하였을 때 EGT는 0.12, 0.40, 1.37, 3.27 및 4.44 μM의 환원력을 나타내었고, ECT는 −0.57, 1.04, 2.59, 2.89 및 5.93 μM을 나타내었다. EGT와 ECT 모두 농도가 증가함에 따라 Cu^{2+}를 Cu^{1+}로 환원시키는 능력이 점차 증가하였다. EGT는 50 μg/mL 이하에서는 환원력이 매우 낮았지만 100 μg/mL 이상에서는 뚜렷한 증가를 보였으며 ECT는 저농도에서 낮은 값을 보였지만 200 μg/mL에서 EGT보다 높은 환원력을 나타내었다. 이러한 결과는 두 추출물 모두 농도 의존적인 전자공여능을 가지고 있으나 고농도 조건에서는 ECT가 상대적으로 높은 환원능을 나타냄을 보여준다.

Rhim TJ(2022)의 연구에서도 토마토 품종에 따라 cupric ion reducing antioxidant capacity(CUPRAC) 값이 다르게 나타났으며, 방울토마토와 캄파리 토마토가 높은 환원력을 보이고 완숙 토마토는 상대적으로 낮은 환원력을 나타난 바가 있다. 본 연구에서 EGT가 ECT보다 환원력이 낮게 나온 것은 두 추출물 간 항산화 성분 조성의 미세한 차이 때문일 가능성이 있으며, GABA 함량 증가가 환원력 향상에 직접적으로 기여하지는 않은 것으로 보인다.

4. Tyrosinase 저해 활성

멜라닌 합성의 초기 단계는 tyrosinase에 의해 촉진되며, 이 효소는 tyrosine을 3,4-dihydroxyphenylalanine(DOPA)로, DOPA를 dopaquinone으로 산화시키는 반응을 수행한다(Prota G 1980). 특히 ultraviolet(UV)나 ROS 자극은 melanocyte에서 과도한 활성산소를 생성하여 tyrosinase 활성을 증가시키고 microphthalmia-associated transcription factor(MITF) 중심의 melanogenic signaling을 활성화함으로써 멜라닌 생합성을 촉진하는 것으로 알려져 있으며(Eberlein-König B 등 1998), 선행 연구에서 UV로 유발된 ROS가 멜라닌 생성을 증가시킨다고 보고된 바 있다(Lee SH 등 2019).

본 연구에서는 mushroom tyrosinase를 이용하여 EGT와 ECT의 tyrosinase 저해 활성을 평가하였다(Fig. 4). EGT와 ECT를 1, 25, 50, 100 및 200 μg/mL의 농도로 처리한 결과, EGT는 6.26%, 7.97%, 8.96%, 14.12% 및 9.25%의 저해율을 보였고, ECT는 10.74%, 10.12%, 9.21%, 11.26% 및 10.21%의 저해 활성을 나타내었다. EGT와 ECT는 양성 대조군인 arbutin에 비해 낮은 tyrosinase 저해 활성을 나타냈다. 두 추출물 모두 농도 의존적인 증가가 나타나지 않았지만 EGT는 100 μg/mL에서 14.12%로 가장 높은 저해율을 보였고, ECT는 200 μg/mL에서 11.26%로 가장 높은 tyrosinase 저해율을 나타내었다. 이러한 결과는 두 추출물의 tyrorinase 직접 저해 능력이 제한적이며, 고농도 처리에서도 효소 활성을 현저히 억제하지 못함을 시사한다. 토마토 잎 초임계 추출물을 사용한 연구에서는 추출물을 고농도로 처리하였을 시 tyrosinase의 활성이 억제되었으며, 세포 기반의 tyrosinase, tyrosinase

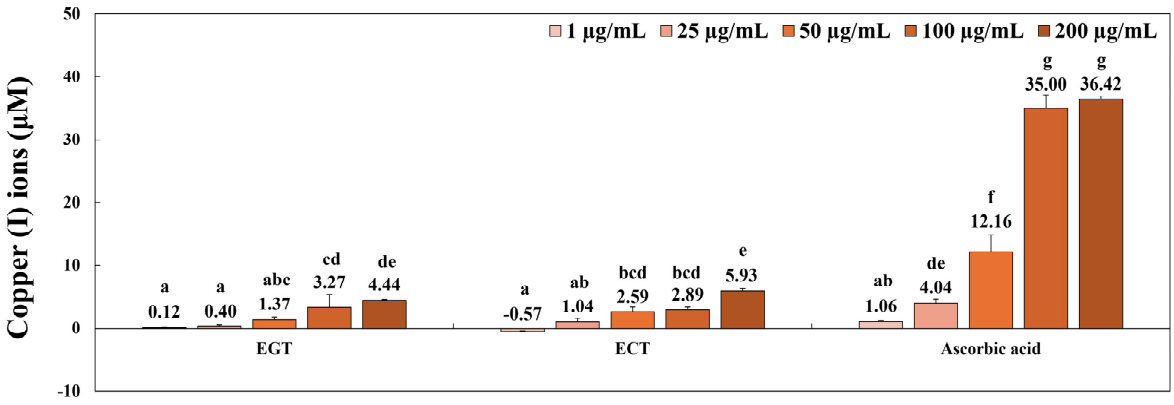

Fig. 3. The cupric ions-reducing capacity of EGT and ECT. The assay was conducted at concentrations of 1, 25, 50, 100, and 200 μg/mL. Ascorbic acid was used as a positive control. Different letters indicate significant differences by Duncan's test (p<0.05). EGT: Water extract of GABA-enriched tomato; ECT: Water extract of conventional tomato.

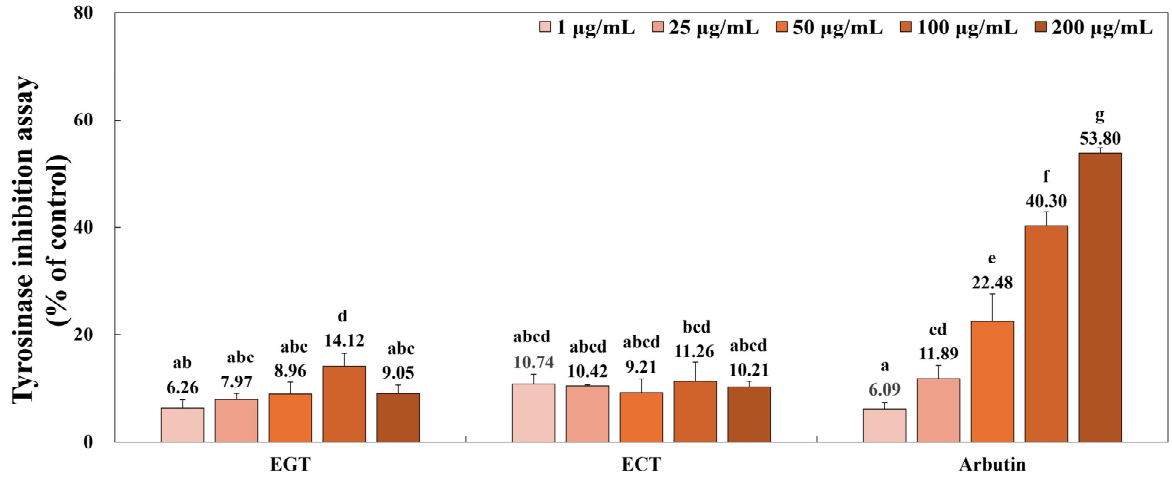

Fig. 4. The tyrosinase inhibition activities of EGT and ECT. The assay was conducted at concentrations of 1, 25, 50, 100, and 200 μg/mL. Arbutin was used as a positive control. Different letters indicate significant differences by Duncan's test (p<0.05). EGT: Water extract of GABA-enriched tomato; ECT: Water extract of conventional tomato.

related protein 1(TRP-1), tyrosinase related protein 2(TRP-2), MITF의 발현을 감소시키는 결과에서 더 큰 효과를 나타내었다(OH BY 등 2013). 이와 같은 선행 연구와 비교할 때, 본 연구에서 EGT와 ECT가 비교적 낮은 tyrosinase 저해율을 보인 것은 효소 수준에서의 직접적 저해 효과가 상대적으로 미약한 것으로 판단된다. 그러나 토마토에 존재하는 풍부한 카로티노이드, 폴리페놀류, 유기산 등의 항산화 성분이 멜라닌 생성 초기 과정을 조절하는 신호전달에 영향을 주는 간접적 기전이 더 큰 역할을 할 가능성이 있다. 이러한 점을 고려해 봤을 때, EGT와 ECT는 직접적인 tyrosinase 활성 억제보다는 항산화 및 세포 내 멜라닌 조절 신호에 미치는 영향이 주요 기전일 가능성이 높으며 추후 연구에서 세포나 동물 모델을 이용한 미백 실험을 진행하여 미백 화장품 소재로서의 가능성을 확인할 필요가 있다고 판단된다.

요 약

본 연구에서는 GABA 토마토 추출물(EGT)와 일반 토마토 추출물(ECT)의 항산화 및 미백 활성을 비교하기 위해 각 시료의 열수 추출물을 제조하고 이의 총 폴리페놀 함량, DPPH 라디칼 소거능, 환원력 및 tyrosinase 저해 활성을 평가하였다. 총 폴리페놀 함량은 두 시료 모두 농도가 증가함에 따라 값이 증가하였으나 동일 농도에서는 큰 차이를 보이지 않았다. DPPH 라디칼 소거능에서도 EGT와 ECT는 유사한 라디칼 소거 활성을 보였으며, 이는 GABA 강화 여부가 DPPH 라디칼 소거능에는 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 환원력 평가에서는 두 시료 모두 농도 의존적인 증가가 나타났고, 고농도에서는 ECT가 EGT보다 높은 환원력을 나타냈다. Mushroom tyrosinase 저해 활성 평가에서도 EGT와 ECT는 낮은 저해율을 보였으며, 이는 두 시료가 tyrosinase에 직접 결합하여 효소 활성을 억제하는 능력이 제한적임을 시사한다. 이러한 결과를 종합하면 GABA 강화가 토마토의 기본적인 항산화 특성과 효소 기반의 미백 활성에 미치는 영향은 제한적인 것으로 보인다. 따라서 본 연구는 GABA 강화 토마토가 기존 토마토와 유사한 생리활성을 유지함을 확인하였으며, 향후 세포 · 동물 모델을 활용한 추가 연구를 통해 미용 기능성 식품 소재로서의 활용 가능성을 보다 구체적으로 검토할 필요가 있음을 제시한다.

감사의 글

본 연구는 2025년도 교육부 및 경상남도의 재원으로 경상남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-16-005).

REFERENCES

Ahn JB (2018) Characterization of bioactive compounds of domestic tomato varieties. Culi Sci & Hos Res 24(1): 63-72.

Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C (1995) Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT-Food Sci Technol 28(1): 25-30.

Cho SC, Kim DH, Park CS, Koh JH, Pyun YR, Kook MC (2012) Production of GABA-rich tomato paste by *Lactobacillus* sp. fermentation. Korean J Food & Nutr

25(1): 26-31.

Choi SH (2021) Polyphenol and flavonoid contents, antioxidative and cancer cell inhibitory effects of domestic tomatoes. Jour of KoCon a 21(12): 879-887.

Eberlein-König B, Placzek M, Przybilla B (1998) Protective effect against sunburn of combined systemic ascorbic acid (vitamin C) and d-α-tocopherol (vitamin E). J Am Acad Dermatol 38(1): 45-48.

In MJ, Jo MY, Kim HJ, Shim JC, Jang YM, Kim DC (2024) Antioxidant effects of ethanolic extract from tomato (*Solanum lycopersicum* L.) peel. J Appl Biol Chem 67: 374-379.

Jeong JY, Choi HG, Kang NJ (2024) Bioactive compound accumulation and antioxidant activity in tomato fruit skin at different ripening stages. J Bio-Env Con 33(3): 129-138.

Kähkönen MP, Hopia AI, Vuorela HJ, Rauha JP, Pihlaja K, Kujala TS, Heinonen M (1999) Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds. J Agric Food Chem 47(10): 3954-3962.

Kim D, Son B, Choi Y, Kang J, Lee Y, Je B, Park Y (2020) Quantitative analysis of water-soluble vitamins and polyphenolic compounds in tomato varieties (*Solanum lycopersicum* L.). J Plant Biotechnol 47(1): 78-89.

Kim JM, Jeon SW, Lee WG, Nam HJ, Kim YB (2012) Study of preventing methods for skin aging and wrinkles. J Physiol & Pathol Korean Med 24(4): 533-542.

Lee SH, Jang TW, Choi JS, Mun JY, Park JH (2019) Inhibitory effects of pine cone (*Pinus densiflora*) on melanogenesis in B16F10 melanoma cells. Korean J Plant Res 32(4): 275-281.

Lee SO, Lee HJ, Yu MH, Im HG, Lee IS (2005) Total polyphenol contents and antioxidant activities of methanol extracts from vegetables produced in ullung island. Korean J Food Sci Technol 37(2): 223-240.

Lee SY, Ahn TW (2007) The anti-aging effect of oral administration of NokYongDaebotang(NYD) in rats. J Haehwa Med 16(2): 327-348.

Molyneux P (2004) The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity. Songklanakarin J Sci Technol 26(2): 211-219.

Oh BY, Lee YS, Kang JH, Nam SH, Lee SK, An IS, Kim EH, Jung KJ (2013) Inhibition effect of tomato leaves supercritical extracts on skin pigmentaion. Asian J Beauty Cosmetol 11(6): 1129-1136.

Oyaizu M (1986) Studies on products of browning reaction antioxidative activities of products of browning reaction prepared from glucosamine. Jpn J Nutr Diet 44(6): 307-315.

Park SN (1999) Effects of natural products on skin cells-action and suppression of reactive oxygen species. J Soc Cosmet Sci Korea 25(2): 77-127.

Prior RL, Wu X, Schaich K (2005) Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. J Agric Food Chem 53(10): 4290-4302.

Prota G (1980) Recent advances in the chemistry of melanogenesis in mammals. J Invest Dermatol 75(1): 122-127.

Rhim TJ (2022) Radical scavenging activities and anti-inflammatory effects of tomato extracts. Korean J Community Living Sci 33(1): 39-53.

Scalbert A, Johnson IT, Saltmarsh M (2005) Polyphenols: antioxidants and beyond. Am J Clin Nutr 81(1): 215S-217S.

Shahzad T, Ahmad I, Choudhry S, Saeed MK, Khan MN (2014) DPPH free radical scavenging activity of tomato, cherry tomato and watermelon: Lycopene extraction, purification and quantification. Int J Pharm Pharm Sci 6(2): 223-228.

Singleton VL, Orthofer R, Lamuela-raventos RM (1999) Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. Methods Enzymol 299: 152-178.

Takayama M, Ezura H (2015) How and why does tomato accumulate a large amount of GABA in the fruit? Front Plant Sci 6: 612.

Tilahun S, Choi HR, Baek MW, Cheol LH, Kwak KW, Park DS, Solomon T, Jeong CS (2021) Antioxidant properties, γ-aminobutyric acid (GABA) content, and physicochemical characteristics of tomato cultivars. Agronomy 11(6): 1204.

Wei M, He X, Liu N, Deng H (2024) Role of reactive oxygen species in ultraviolet-induced photodamage of the skin. Cell Div 19(1): 1.

Date Received Dec. 4, 2025
Date Revised Dec. 18, 2025
Date Accepted Dec. 18, 2025