

갈산과 타닌산의 자동산화에 미치는 식품 감광성분의 영향

이은빈¹ · 이효원¹ · 홍정일^{1,*}

¹서울여자대학교 자연과학대학 식품응용시스템학부

The effects of dietary photosensitizers on auto-oxidation of gallic and tannic acids

Eunbin Lee¹, Hyowon Lee¹, and Jungil Hong^{1,*}

¹Division of Applied Food System, College of Natural Science, Seoul Women's University

Abstract Polyphenols are chemically unstable, and their bioactivities are reduced through oxidation. Photosensitizers (PS) induce photo-oxidation in various food systems. In this study, effects of dietary PS such as riboflavin (Rb), erythrosin B (EB), and zinc protoporphyrin on the auto-oxidation of polyphenols, gallic acid (GA) and tannic acid (TA) were evaluated under a fluorescent light. The formation of oxidation products from GA and TA increased in a PS concentration- and irradiation time-dependent manner. In addition, Rb and EB induced significant reduction in the polyphenols contents and ABTS radical scavenging activity of GA and TA under light. PS significantly enhanced the amount of reactive oxygen species generated from GA and TA. Therefore, the interaction of polyphenols with PS under light results in acceleration of polyphenol oxidation. This phenomenon should be carefully considered during food processing and storage.

Keywords: polyphenol, gallic acid, tannic acid, auto-oxidation, photosensitizer, reactive oxygen species

서 론

폴리페놀은 다양한 식물체에서 발견되는 방향족 알코올 화합물로서 분자내 둘 이상의 페놀그룹이나 벤젠고리에 둘 이상의 -OH를 보유하여 라디칼에 대한 뛰어난 소거활성을 가진 산화방지제로 알려져 있으며 식품, 의료, 화장품산업 등에서 다양하게 활용되고 있다(Scalbert 등, 2007). 그 중 타닌산(tannic acid)은 대표적인 식품 폴리페놀 성분으로서 타닌이라는 관용명으로도 불리며 다양한 용도의 식품첨가물로 사용되고 있다. 타닌산은 중심의 glucose 분자에 10개의 galloyl기가 연결된 기본적인 형태를 지니고 있는데, 전자를 공여하고 공명구조에 의해 스스로 안정화될 수 있는 페놀그룹의 성질로 인해 강력한 환원력과 산화방지활성을 나타낸다(Foti, 2010; Gülçin 등, 2010). 타닌산이 가수분해되어 생성되는 갈산(gallic acid)은 벤젠고리에 3개의 -OH기를 지닌 페놀산 류로서, 타닌산과 유사하게 짙은 맛을 내는 특징을 가진다. 갈산 역시 superoxide anion (O₂⁻)을 비롯한 다양한 라디칼에 대한 소거능이 보고된 바 있으며(Kroes 등, 1992), 이러한 산화방지활성은 노화방지, 항염증, 항암 활성 등 생리활성 발현의 기작과 직접적으로 연관되어 있다고 보고되었다(Verma 등, 2013). 한편, 폴리페놀 성분들은 주변의 산소분자 또는 금속이온과 반응하여 활성산소종을 생

성하는 산화촉진 활성을 나타내며, 이에 연쇄적으로 자신이 산화되는 자동산화 과정을 거치는 것으로 알려졌다(Akagawa 등, 2003). 또한 폴리페놀이 풍부한 코코아, 녹차, 홍차 등의 식품은 상온에서 H₂O₂를 생성하며 커피섭취 시 소변의 H₂O₂ 수준이 증가한다는 연구가 보고된 바 있다(Long과 Halliwell, 2000).

감광제(photosensitizer)는 빛 에너지를 주변의 산소 분자나 특정 기질에 전달하면서 물리적, 화학적 변화를 유도하는 성분으로, 암, 피부질환, 구내염 등 다양한 질환의 개선과 치료를 위한 photodynamic therapy (PDT)에 활용된다(Agostinis 등, 2011). 이는 감광제가 빛에 의해 감작되면서 발생하는 활성산소종을 통해 타깃 세포의 DNA, lysosome, mitochondria 및 membrane 등에 직접적인 손상이나 사멸을 유도하고 면역체계를 조절하는 활성을 이용한 것이다(Agostinis 등, 2011; Macdonald와 Dougherty, 2000). 감광제는 식품에서 감광활성을 통해 식품에서 단백질 분해, 지질 산패, 비타민 산화 등과 같은 품질의 저하를 나타내는 역할을 한다(Cardoso 등, 2012). 하지만 식품의 품질저하를 방지하기 위한 방법으로 청색광과 감광제 처리를 통해 폴리페놀 산화효소(polyphenol oxidase)의 비활성화를 유도하는 등(Bhavya 등, 2021), 감광제를 유용하게 활용하기 위한 연구도 다양하게 진행되고 있다(Damyeh 등, 2020).

이와 같이 감광제는 식품에서 다양한 성분과 반응하며 광범위한 산화 반응을 유도하지만, 식품의 주요 생리활성 성분인 폴리페놀과의 직접적인 상호작용에 대해서는 거의 연구된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 pH 7.4 생리적 완충액(phosphate buffered-saline, PBS) 조건에서 대표적인 폴리페놀 성분인 갈산과 타닌산의 자동산화에 미치는 감광제의 영향과 이들에 의한 산화방지활성 등의 변화를 분석하여, 폴리페놀, 빛과 감광제의 상호작용의 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

*Corresponding author: Jungil Hong, Division of Applied Food System, College of Natural Science, Seoul Women's University, Seoul 01797, Korea
Tel: +82-2-970-5639
Fax: +82-2-970-5977
E-mail: hjil@swu.ac.kr
Received May 25, 2022;
accepted June 8, 2022

재료 및 방법

실험재료 및 시약

폴리페놀 성분인 갈산(gallic acid, GA)과 타닌산(tannic acid, TA), 3종의 감광제 riboflavin (Rb), zinc protoporphyrin (ZnPP), erythrosin B (EB)는 Sigma-Aldrich Co. (St. Louis, MO, USA)에서 구입하였으며, PBS는 Ameresco (Framingham, MA, USA)에서 구입하였다. Folin-Ciocalteu (F-C) 시약을 비롯한 기타 반응 시약은 Sigma-Aldrich Co.에서 구입하였다.

폴리페놀 자동산화 측정

폴리페놀의 자동산화와 이에 미치는 감광제의 영향은 10 W/m² (4300 lx) 형광등(ARS-3300PL; Aris Co., Seoul, Korea) 조사 조건 또는 암소에서 0-24시간 동안 반응시키면서 평가하였다. Rb, ZnPP 및 EB등 3종의 감광제는 서로 다른 농도(1-4 μM)로 갈산 또는 타닌산과 혼합하고, 이 혼합액에 대한 빛 조사 시간 경과에 따른 흡광 스펙트럼의 변화와 폴리페놀 산화의 척도인 갈변 정도를 405 nm에서 마이크로플레이트 판독기(Spectra Max M2; Molecular device, Sunnyvale, CA, USA)로 분석하였다. 한편, 각 조사 시간별 시료를 수집하여 -20°C의 냉동고에서 보관하면서 분석에 사용하였다.

총 폴리페놀 측정

Total polyphenol content (TPC)의 변화는 Folin-Denis 방법으로 측정했다(Park 등, 2015). 즉, 시간별로 시료를 취하여 갈산은 20 배, 타닌산은 4배 희석한 시료용액 80 μL에 1 N F-C시약 20 μL를 첨가하여 암소에서 3분간 반응시킨 후, 2% Na₂CO₃ 용액을 100 μL씩 가해 주었다. 이 후, 상온의 암소에서 30분간 추가로 반응시키고, 마이크로 플레이트 판독기를 이용하여 750 nm에서 흡광도를 측정하였다(Spectra Max M2). 각각 타닌산과 갈산을 표준물질로 검광곡선을 작성하여 폴리페놀 함량을 정량한 후 희석 배수를 고려하여 계산하였다.

산화방지활성 측정

광원 노출 및 시간 경과에 따른 갈산과 타닌산의 산화방지활성 변화는 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS)를 사용한 Lee 등(2013)의 방법을 약간 변형하여 분석하였다. 즉, 10 mM ABTS와 10 mM potassium persulfate를 7.4:2.6의 비율로 혼합한 뒤 상온, 암소에서 24시간 반응시켜 ABTS 라디칼을 생성시켰다. 이 ABTS 라디칼을 증류수에 30배 희석한 용

액 150 μL와 시간별로 채취한 갈산 또는 타닌산을 각각 100 또는 20배 희석한 시료 용액 50 μL를 섞어 상온의 암소에서 30분간 반응시킨 후, 734 nm에서 흡광도를 측정하였다(Spectra Max M2).

ROS 생성량 측정

갈산 및 타닌산의 산화 중 생성된 ROS를 ferrous oxidation-xylenol orange (FOX) assay로 분석하였다(Long과 Halliwell, 2000). 증류수에 녹인 400 μM xylenol orange와 200 mM 황산에 녹인 800 mM D-sorbitol을 1:1 비율로 섞어 제조한 용액에 1 mM ammonium ferrous sulfate를 포함시켜 working solution을 준비하였다. 갈산은 20배, 타닌산은 16배 희석하여 준비한 시료 40 μL에 working solution 160 μL를 가해 상온 암소에서 45분간 반응시킨 후 550 nm에서 흡광도를 측정하였으며, H₂O₂를 표준물질로 하여 정량한 후 희석배수를 고려하여 계산하였다.

통계처리

모든 실험 결과는 3회 이상 분석하여 평균±표준편차로 나타났다. 각 실험군 별 유의차는 일원 배치 분산분석(one-way ANOVA)을 사용하였고(SPSS Inc., Chicago, IL, USA), 사후 검정은 Tukey's HSD test를 사용하여 95% 유의수준에서 검정하였다.

결과 및 고찰

폴리페놀의 자동산화와 감광제의 영향

폴리페놀의 산화과정 중 페놀구조 상의 수소 또는 전자의 공여가 진행되면서 퀴논(quinone) 구조가 형성되며, 이는 스스로 혹은 이된 성분 등과의 중합에 의해 갈변 물질을 형성한다(Schieber, 2018). 이러한 갈변화 정도는 405 nm 부근의 흡광도 증가로 측정할 수 있으며, 실제 선행연구에서 페놀산 류나, EGCG 등 폴리페놀 성분의 산화정도를 측정하는 척도로 사용된 바 있다(Lee 등, 2022; Kim 등, 2011). 본 연구에서도 갈산과 타닌산의 자동 산화를 유도하기 위해 pH 7.4 생리적 완충액 상에서 광조사를 진행한 결과, 시간의 경과에 따라 400 nm 영역에서의 흡광도 증가와 갈변물질의 생성을 확인하였다(Fig. 1). 또한 빛 조사에 의해 감광제의 peak 흡광도 감소가 관찰되었으나 폴리페놀과 갈변 물질의 흡광특성과는 무관하였다.

갈산을 pH 7.4 조건에서 빛 조사 조건과 암소에 두고 반응시켰을 때 시간의 경과에 따라 갈변물질의 생성으로 인한 405 nm 영역에서 흡광도의 현저한 증가가 관찰되었다(Fig. 2). 이 반응계

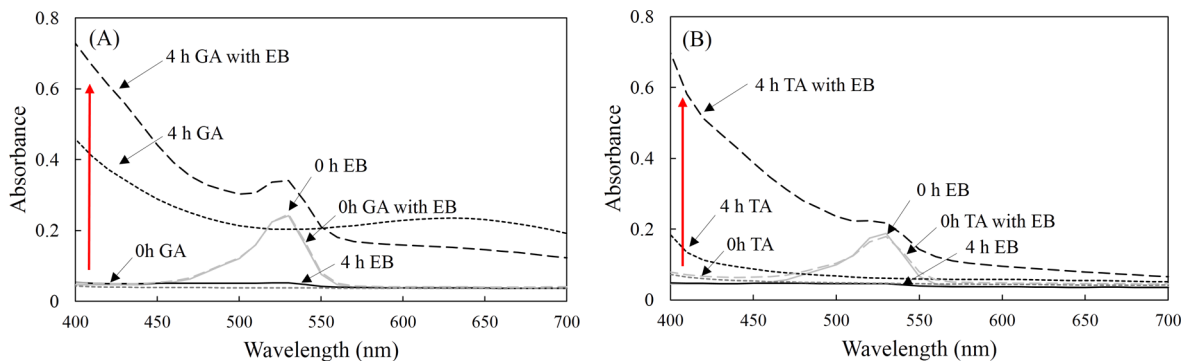


Fig. 1. Changes in absorbance spectra of gallic acid or tannic acid incubated with erythrosin B under light. Absorbance spectra of 2 mM gallic acid (GA) (A) and 200 μM tannic acid (TA) (B) incubated with 4 μM erythrosin B (EB) dissolved in PBS (pH 7.4) under fluorescent light irradiation for 4 h were analyzed within 400-700 nm.

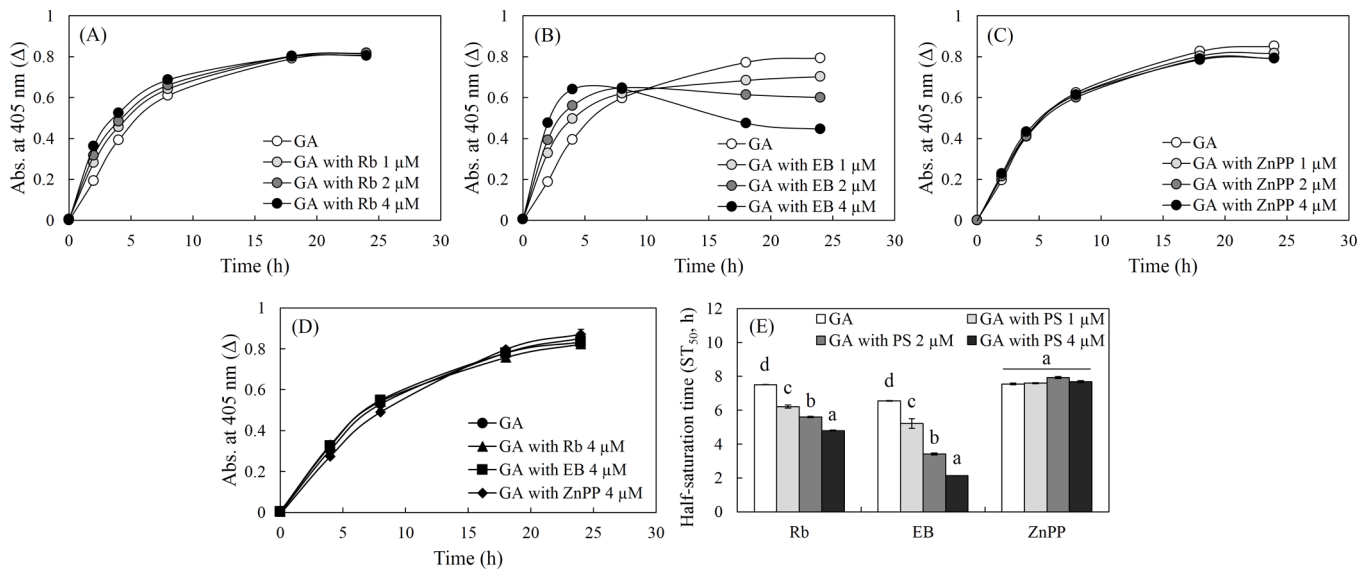


Fig. 2. Effects of different photosensitizers on gallic acid oxidation under light. Gallic acid oxidation was induced in PBS (pH 7.4) in the absence or presence of different concentrations of Rb (A), EB (B), and ZnPP (C) under a fluorescent light or in a dark (D). The formation of oxidation products was analyzed at absorbance at 405 nm, and half-saturation time (the time required for 50% maximum absorbance of oxidation products, ST_{50}) were also calculated (E). Each value represents the mean \pm SD (n=4). Different letters indicate significant difference ($p<0.05$) based on one way ANOVA and the Tukey's HSD test.

에 각각 1-4 μ M Rb와 EB를 첨가하였을 때 유의적으로 갈산으로부터의 갈변물질 생성이 가속화되었으며, 그 영향은 첨가된 감광성분의 농도에 의존적이었다(Fig. 2A, B). 감광성분 중에서는 EB에 의한 산화가 가장 두드러졌으나 빛 조사 8시간 이후에는 오히려 갈변물질의 탈색이 진행되는 것으로 나타났으며(Fig. 2B), ZnPP에 의한 유의적인 갈산의 산화촉진 현상은 관찰되지 않았다(Fig. 2C). 한편, 암소에서는 각 감광제 최대농도 4 μ M을 처리한 상황에서도 갈산으로부터의 산화물질 생성 촉진현상은 관찰되지 않았다(Fig. 2D). 각 반응제 별 폴리페놀의 산화속도 비교를 위해 갈변반응이 직선적으로 진행되는 구간에서의 선형회귀식을 구하고, 최대 갈변 흡광도 값을 기준으로 하여 50%의 산화가 진행되는 데 필요한 시간(half-saturation time, ST_{50})을 계산하였다. 암소와 명소에서 갈산의 ST_{50} 값은 각각 8.74와 7.20으로 빛 조사에 의해 갈산의 산화가 더욱 빠르게 진행되었다(data not shown). 한편, 갈산의 산화는 빛 조사 시 같이 존재하는 Rb와 EB농도의 존재적으로 가속화되어 ST_{50} 의 감소를 나타냈으나, ZnPP를 첨가한 반응계에서는 유의적인 차이가 발견되지 않았다(Fig. 2E).

타닌산의 경우에도 pH 7.4 생리적 완충 조건에서 갈변물질 생성을 통한 자동산화 과정이 진행되었으며, 405 nm에서 0.46의 흡광도를 보인 암소에 비해 빛 조사 시에는 0.70 수준을 보여 현저한 산화반응 촉진현상이 관찰되었다(Fig. 3). 또한 첨가된 감광제 농도가 증가함에 따라 타닌산의 갈변속도가 현저하게 가속화되었으며 갈산에서 보다 큰 산화촉진 효과를 나타냈다(Fig. 3A-C). 감광제 중에서는 갈산과 동일하게 EB에 의한 타닌산 산화행의 가속화 효과가 가장 크게 나타났으며, ZnPP에 의한 가속화 현상도 관찰되었다. 하지만 암소에서는 감광제에 의한 산화 촉진 효과는 나타나지 않았다(Fig. 3D). 빛 조사 시 감광제 유무에 따른 타닌산의 ST_{50} 을 계산한 결과, Rb, EB 및 ZnPP의 농도가 증가할수록 유의적으로 ST_{50} 이 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 3E).

폴리페놀 성분은 빛 조사 시 Rb와 같은 감광제에 의해 유도되는 산화과정에서 전자 공여 등을 통해 직접적으로 관여하여 여 기상태의 Rb를 빠르게 안정시킨다고 보고된 바 있다(Cardoso 등,

2012). 따라서 본 연구 결과는 빛에 의해 여기된 감광제를 안정화 시키는 과정에서 폴리페놀에 의한 전자 공여와 산화가 촉진되며, 특히 약 알칼리조건인 pH 7.4에서 진행되는 갈산과 타닌산의 자동 산화의 가속화를 유도한 것으로 판단된다.

감광제에 의한 폴리페놀의 특성 변화

Fig. 2과 3에서 갈산과 타닌산의 갈변화를 통해 산화가 유도됨을 확인하였고, 이러한 갈변반응은 OH의 손실과 quinone기의 형성 및 이들의 중합반응에 의한 것으로 보고된 바 있다(Schieber, 2018). 따라서 이들의 산화반응이 진행됨에 따라 Folin-Denis 폴리페놀 측정 반응계에서 폴리페놀 양의 변화가 예상되며, 이를 통해 감광제에 의한 갈산과 타닌산의 산화반응 정도를 평가할 수 있을 것으로 판단되었다. 갈산과 타닌산은 pH 7.4 조건에서 시간이 지남에 따라 폴리페놀 함량이 유의적으로 감소하였으며, 명소에서의 감소가 더욱 두드러졌다. 또한, 갈산과 타닌산 모두 명소에서 Rb와 EB와 함께 4시간 동안 노출되었을 때 농도 의존적으로 유의적인 폴리페놀 함량의 감소가 나타났으며 특히 EB에 의한 폴리페놀 함량 감소는 24시간에 더욱 현저하게 나타났다(Table 1). 한편, 24시간 빛 조사 후 Rb와 ZnPP의 농도에 따른 갈산 및 타닌산의 폴리페놀 함량 변화가 크게 나타나지 않았으며, 암소에서 감광제에 의한 폴리페놀 함량 또한 큰 변화가 관찰되지 않았다. Table 1의 결과에서 갈산과 타닌산의 갈변 산화생성물의 정도가 폴리페놀 함량의 감소와 정확하게 일치하지 않았는데, 특히 24시간 빛 조사 시 EB에 의한 갈산으로부터의 갈변도의 감소에도 불구하고(Fig. 2B) 폴리페놀 함량에서는 현저한 감소양상이 나타난 결과 등을 고려할 때 다양한 방법의 교차평가를 통한 산화도의 측정이 필요할 것으로 보인다.

자유라디칼은 비공유전자를 보유한 불안정한 구조이며, 대부분의 reactive oxygen species (ROS)는 자유라디칼을 포함하는 산소 분자로 세포 호흡과 생물학적 대사과정에서 필연적으로 생성된다(Yang과 Lian, 2020). 생체 내 발생하는 ROS는 생성과 제거의 순환이 지속되지만, ROS의 균형이 깨지면 산화스트레스가 유발

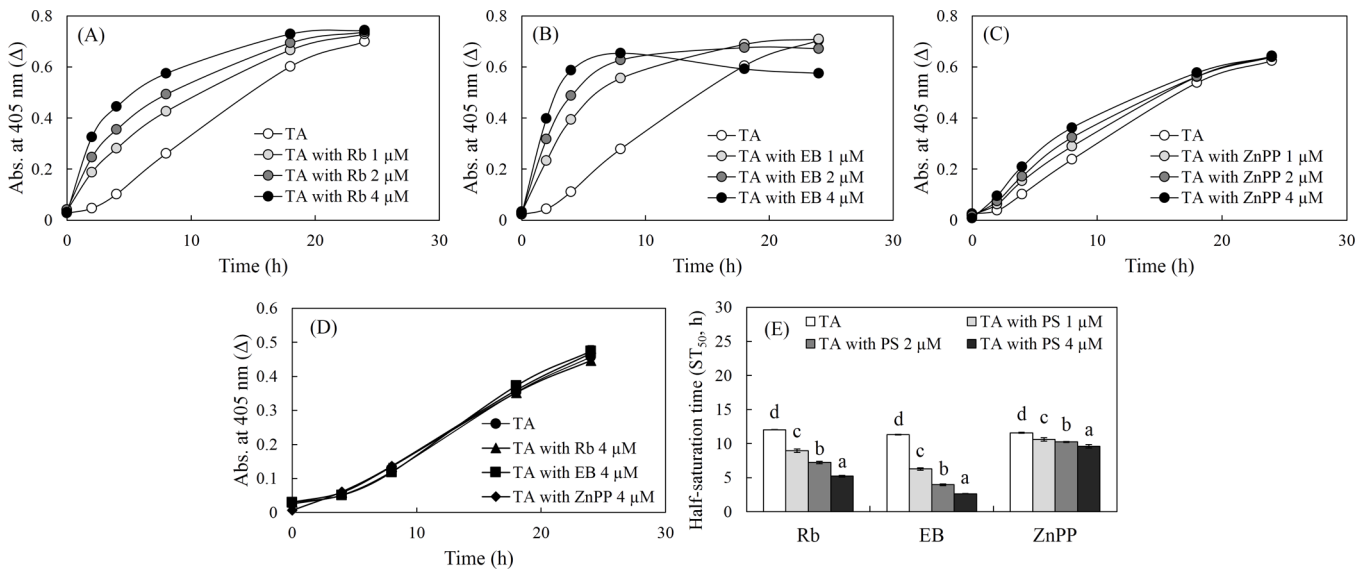


Fig. 3. Effects of different photosensitizers on tannic acid oxidation under light. Gallic acid oxidation was induced in PBS (pH 7.4) in the absence or presence of different concentrations of Rb (A), EB (B), and ZnPP (C) under a fluorescent light or in a dark (D). The formation of oxidation products was analyzed at absorbance at 405 nm, and half-saturation time (ST₅₀) were also calculated (E). Each value represents the mean±SD (n=4). Different letters indicate significant difference (*p*<0.05) based on one way ANOVA and the Tukey's HSD test.

되고 세포와 조직에 손상을 주어 질병을 유발할 수 있다. 일반적으로 폴리페놀은 자유라디칼 소거활성을 통해 다양한 신체조직에서 ROS에 의한 손상을 방지하며, 체내에서 다양한 분해산물 형태로 존재하여 산화스트레스를 개선한다(Williamson와 Manach, 2005). 갈산과 타닌산은 ROS를 비롯한 다양한 라디칼에 대한 소거활성이 보고된 바(Foti, 2010), 자동산화 및 감광제에 의한 산화반응의 가속화에 의해 초래되는 이들 성분들의 산화방지활성의 변화를 ABTS 법을 통해 평가하였다(Table 2). 갈산과 타닌산 모두 시간에 따라 명소와 암소에서 ABTS 라디칼 소거활성이 감소하였으며, 명소에서 더 큰 저하를 나타냈다. 특히 EB와 함께 명소 노출 시, EB 농도 의존적인 ABTS 소거활성 감소를 보인 반면, ZnPP 및 암소에서는 감광제에 의한 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 이는 Table 1의 폴리페놀 함량변화와 일치하는 결과로 폴리페놀 함량의 감소에 의한 산화방지활성의 감소로 사료된다.

폴리페놀의 자동산화가 진행되면서 superoxide anion, hydrogen peroxide, semiquinone 및 quinone이 생성된다고 보고된 바 있어(Canada 등, 1990), 본 반응계에서 갈산과 타닌산의 산화와 함께 병행되는 ROS 생성량을 측정하였다(Fig. 4). 그 결과, 갈산과 타닌산에서 모두 처음보다 4시간에서 H₂O₂ 생성이 유의적으로 증가하였으며, 암소보다 빛 조사 시에 더 높은 H₂O₂ 생성량을 보였다. 또한 감광제와 함께 4시간 동안 빛에 노출되었을 때 H₂O₂ 생성량은 갈산에서 Rb와 EB에 의한 농도 의존적인 증가를 보였다(Fig. 4). 명소에서 4시간 동안 Rb, EB 및 ZnPP 1 μM과 함께 노출되었을 때 타닌산은 단독 존재 시 보다 각각 1.91, 2.15, 1.24 배 증가를 보였으며, 1.14, 1.15, 0.98배 변화한 갈산에 비해 두드러진 H₂O₂ 생성량의 증가를 나타냈다(Fig. 3C). 폴리페놀의 산화에 의해 ROS가 생성되는 결과는 이전 보고와 일치했으며(Lee 등, 2022), 본 연구에서는 감광제에 의해 ROS의 생성이 촉진되는 것을 추가로 확인했다.

폴리페놀은 주변 산소분자에 대한 직접적 전자공여를 통해 ROS를 생성하고 연쇄반응을 통해 자동산화가 진행된다고 보고된 바

있으며(Eghbaliferiz와 Iranshahi, 2016; Hou 등, 2005), 감광제에 의한 폴리페놀 자동산화의 촉진은 Fig. 4에서처럼 ROS 생성 증가를 또한 초래하는 것으로 판단된다. 최근 암 치료를 위해 폴리페놀 기반 나노복합체와 함께 광감작제를 처리한 후 레이저를 조사하여 암세포의 사멸을 유도하는 등 다양한 분야에서 감광제가 폴리페놀과 함께 활용되고 있는데(Zhang 등, 2021), 폴리페놀과 감광제를 병행처리 시 과량의 ROS가 생성되어 정상세포에도 손상을 유도할 수 있을 것으로 예상되어 폴리페놀 및 감광제의 종류와 농도 등에 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에 사용된 3종의 감광제 중 ZnPP는 protoporphyrin IX의 중심에 Zinc 원자가 배위결합된 효율적인 감광제로 알려졌으나(Murakami 등, 2003), ZnPP에 의한 산화촉진 효과가 가장 낮게 나타났다. ZnPP는 수용성 용매에 대한 용해도가 낮아 polyethylene glycol과 같은 수송수단(carrier vehicle)을 통해 활용성을 높여 사용하므로(Lyer 등, 2007), pH 7.4 생리적 완충액 상에서 진행된 본 실험에서는 ZnPP의 낮은 용해도로 인해 낮은 감광활성을 보인 것으로 판단된다.

본 결과는 폴리페놀의 자동산화에 의해 갈변화, 폴리페놀의 함량 감소 및 산화방지활성의 감소가 유도되고, 빛 조사 시 감광제에 의해 관련 산화과정이 촉진됨을 보여준다. 본 연구는 식품 내 풍부하게 존재하는 폴리페놀이 같이 존재하는 식품 감광성분과의 상호작용을 통해 자동산화의 촉진, 갈변화 등 식품의 미관에 부정적인 영향 유도, 산화방지활성 등을 포함한 생리활성의 감소 및 ROS생성 유도 가능성을 제시하며, 식품의 가공 저장 시 이에 대한 고려가 필요하다는 것을 시사한다.

요 약

본 연구에서는 감광제에 의한 폴리페놀의 갈변 정도 및 폴리페놀 함량의 변화와 산화방지활성과 ROS 생성을 분석하였다. 그 결과 감광제에 의해 갈산과 타닌산의 자동산화가 현저히 가속화되었으며, 타닌산에서 그 효과가 더욱 두드러졌다. 폴리페놀 함

Table 1. Changes in total polyphenol content of gallic and tannic acids incubated with different photosensitizers under light or in a dark condition for 0, 4, and 24 h

Sample	Gallic acid (mM)						Tannic acid (μ M)							
	Time (h)		Light		Dark		Light		Dark		Light		Dark	
	0	4	4	24	4	24	0	4	24	4	24	4	24	
Polyphenol only	1.62 \pm 0.04 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.37 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.78 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.78 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.39 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.09 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	212.65 \pm 25.50 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	200.68 \pm 1.10 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	147.67 \pm 0.81 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	184.06 \pm 3.12 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	162.74 \pm 4.44 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	170.72 \pm 11.64 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	167.73 \pm 1.35 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	
With riboflavin (μ M)	1.59 \pm 0.04 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.34 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.72 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.72 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.35 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.05 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	196.26 \pm 0.57 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	186.91 \pm 0.84 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	146.78 \pm 0.59 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	197.39 \pm 2.59 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	170.72 \pm 11.64 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	167.73 \pm 1.35 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	167.73 \pm 1.35 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	
	1.47 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.28 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.64 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.64 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.50 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.08 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	209.81 \pm 5.40 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	185.35 \pm 0.85 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	130.44 \pm 0.77 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	194.05 \pm 1.92 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	167.73 \pm 1.35 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	167.73 \pm 1.35 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	167.73 \pm 1.35 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	
	1.57 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.24 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.69 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.69 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.45 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.07 \pm 0.04 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	205.47 \pm 5.53 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	168.26 \pm 1.40 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	147.42 \pm 1.33 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	191.73 \pm 3.21 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	173.79 \pm 8.10 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	173.79 \pm 8.10 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	173.79 \pm 8.10 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	
Polyphenol only	1.59 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.32 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.82 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.82 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.60 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.04 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	216.61 \pm 16.72 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	188.91 \pm 7.70 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	137.24 \pm 7.67 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	187.83 \pm 0.99 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	172.48 \pm 13.57 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	172.48 \pm 13.57 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	172.48 \pm 13.57 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	
	1.62 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.20 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.65 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.65 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.62 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.06 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	183.90 \pm 2.12 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	165.16 \pm 1.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	127.80 \pm 0.14 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	201.64 \pm 16.93 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	169.22 \pm 11.81 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	169.22 \pm 11.81 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	169.22 \pm 11.81 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	
With erythrosin B (μ M)	1.59 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.11 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.53 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.53 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.59 \pm 0.03 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.16 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	187.09 \pm 4.57 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	146.41 \pm 0.43 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	109.23 \pm 0.89 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	186.35 \pm 2.66 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	173.31 \pm 7.36 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	173.31 \pm 7.36 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	173.31 \pm 7.36 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	
	1.60 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.98 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.29 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.29 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.60 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.99 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	185.43 \pm 3.31 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	126.46 \pm 0.49 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	81.03 \pm 1.22 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	186.47 \pm 3.23 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	169.87 \pm 4.96 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	169.87 \pm 4.96 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	169.87 \pm 4.96 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	
Polyphenol only	1.56 \pm 0.02 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.47 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.77 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.77 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.51 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.03 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	174.34 \pm 1.24 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	174.82 \pm 1.78 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	134.73 \pm 1.22 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	175.64 \pm 6.49 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	149.31 \pm 0.85 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	149.31 \pm 0.85 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	149.31 \pm 0.85 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	
	1.61 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.45 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.76 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.76 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.51 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.97 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	169.40 \pm 1.39 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	167.62 \pm 0.61 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	137.98 \pm 1.91 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	180.06 \pm 7.87 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	150.76 \pm 2.30 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	150.76 \pm 2.30 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	150.76 \pm 2.30 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	
With zinc-protoporphyrin (μ M)	1.61 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.45 \pm 0.03 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.76 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.76 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.53 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.02 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	171.91 \pm 0.87 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	165.33 \pm 1.74 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	139.35 \pm 0.41 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	172.24 \pm 1.35 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	149.72 \pm 0.51 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	149.72 \pm 0.51 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	149.72 \pm 0.51 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	
	1.65 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.43 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.77 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	0.77 \pm 0.00 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.54 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	1.03 \pm 0.01 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	174.51 \pm 1.17 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	163.00 \pm 0.88 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	136.04 \pm 0.57 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	175.91 \pm 3.99 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	154.23 \pm 0.69 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	154.23 \pm 0.69 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	154.23 \pm 0.69 ¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	

¹⁾Each value represents the mean \pm SD (n=3).²⁾Different uppercase and lowercase letters indicate significant difference ($p < 0.05$) among different incubation time and different photosensitizer concentrations, respectively, based on one way ANOVA and the Tukey's HSD test.

Table 2. Changes in ABTS scavenging activities of gallic and tannic acids incubated with different photosensitizers under light or in a dark condition for 0, 4, and 24 h

Sample	Time (h)	Gallic acid (mM)						Tannic acid (μM)							
		Light		Dark		0		Light		Dark		0			
		4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24		
Polyphenol only	0	36.54±1.04 ^{D1,2a3)}	33.09±1.03 ^{CDab)}	17.05±3.22 ^{Aa)}	32.17±1.30 ^{Ca)}	22.78±0.52 ^{Ba)}	89.85±1.85 ^{Db)}	83.95±1.33 ^{Cc)}	72.55±0.59 ^{Ac)}	83.35±0.39 ^{Cb)}	76.50±1.67 ^{Ba)}	83.95±1.33 ^{Cc)}	72.55±0.59 ^{Ac)}	83.35±0.39 ^{Cb)}	76.50±1.67 ^{Ba)}
	1	36.61±0.92 ^{Ca)}	34.24±2.29 ^{Cb)}	15.12±0.57 ^{Aa)}	34.10±1.12 ^{Ca)}	23.59±0.05 ^{Bab)}	92.56±1.25 ^{Db)}	82.22±0.49 ^{Bc)}	63.60±0.41 ^{Aa)}	87.68±0.16 ^{Cc)}	86.15±0.75 ^{Cd)}	82.22±0.49 ^{Bc)}	63.60±0.41 ^{Aa)}	87.68±0.16 ^{Cc)}	86.15±0.75 ^{Cd)}
	2	36.40±0.83 ^{Ea)}	30.12±0.55 ^{Ca)}	16.51±0.79 ^{Aa)}	34.46±0.34 ^{Da)}	24.04±0.07 ^{Bb)}	93.09±0.71 ^{Db)}	80.38±0.65 ^{Bb)}	62.78±0.56 ^{Ba)}	83.95±0.26 ^{Cb)}	79.58±0.76 ^{Bb)}	80.38±0.65 ^{Bb)}	62.78±0.56 ^{Ba)}	83.95±0.26 ^{Cb)}	79.58±0.76 ^{Bb)}
With riboflavin (μM)	4	37.88±0.79 ^{Ea)}	31.10±0.29 ^{Cab)}	14.50±1.58 ^{Aa)}	34.75±1.10 ^{Da)}	24.07±0.61 ^{Bb)}	84.68±1.23 ^{Da)}	74.99±0.09 ^{Ba)}	65.73±0.62 ^{Ab)}	81.04±0.99 ^{Ca)}	83.21±0.64 ^{Dc)}	74.99±0.09 ^{Ba)}	65.73±0.62 ^{Ab)}	81.04±0.99 ^{Ca)}	83.21±0.64 ^{Dc)}
	0	36.91±0.92 ^{Da)}	34.64±0.16 ^{Dc)}	18.04±0.30 ^{Ad)}	32.85±0.47 ^{Ca)}	23.53±0.50 ^{Ba)}	76.94±1.13 ^{Ba)}	81.90±1.98 ^{Cd)}	66.76±0.75 ^{Ad)}	82.62±1.97 ^{Ca)}	83.06±0.09 ^{Cb)}	81.90±1.98 ^{Cd)}	66.76±0.75 ^{Ad)}	82.62±1.97 ^{Ca)}	83.06±0.09 ^{Cb)}
	1	38.05±1.26 ^{Ea)}	31.82±0.96 ^{Cb)}	15.94±0.30 ^{Ac)}	35.50±1.01 ^{Dab)}	23.07±0.92 ^{Ba)}	76.33±0.90 ^{Ba)}	73.87±1.73 ^{Bc)}	57.88±0.62 ^{Ac)}	85.32±4.21 ^{Ca)}	86.97±3.09 ^{Cbc)}	73.87±1.73 ^{Bc)}	57.88±0.62 ^{Ac)}	85.32±4.21 ^{Ca)}	86.97±3.09 ^{Cbc)}
With erythrosin B (μM)	2	39.99±0.38 ^{Eb)}	30.39±1.56 ^{Cb)}	12.87±0.52 ^{Ab)}	34.68±0.27 ^{Dab)}	23.41±1.27 ^{Ba)}	76.36±1.17 ^{Ca)}	66.97±0.71 ^{Bbb)}	51.77±0.35 ^{Ab)}	83.87±2.56 ^{Da)}	88.29±1.43 ^{Ec)}	66.97±0.71 ^{Bbb)}	51.77±0.35 ^{Ab)}	83.87±2.56 ^{Da)}	88.29±1.43 ^{Ec)}
	4	41.56±0.58 ^{Eb)}	27.67±1.29 ^{Ca)}	6.99±0.50 ^{Aa)}	36.16±2.12 ^{Db)}	24.24±0.92 ^{Ba)}	77.60±0.25 ^{Ca)}	58.19±0.61 ^{Ba)}	37.46±0.81 ^{Aa)}	85.00±4.51 ^{Da)}	78.47±1.52 ^{Ca)}	58.19±0.61 ^{Ba)}	37.46±0.81 ^{Aa)}	85.00±4.51 ^{Da)}	78.47±1.52 ^{Ca)}
	0	29.10±0.48 ^{Da)}	25.51±0.89 ^{Ca)}	13.16±1.20 ^{Aa)}	28.40±0.78 ^{Db)}	17.33±0.36 ^{Ba)}	62.74±6.46 ^{Ba)}	73.65±0.49 ^{Cc)}	52.99±1.68 ^{Aa)}	72.68±0.49 ^{Ca)}	65.43±1.35 ^{Ba)}	73.65±0.49 ^{Cc)}	52.99±1.68 ^{Aa)}	72.68±0.49 ^{Ca)}	65.43±1.35 ^{Ba)}
With zinc-protoporphyrin (μM)	1	29.02±0.58 ^{Da)}	25.27±0.18 ^{Ca)}	13.04±0.32 ^{Aa)}	25.73±0.31 ^{Ca)}	17.29±0.47 ^{Ba)}	68.81±0.16 ^{Ca)}	69.57±1.47 ^{Cbb)}	56.45±1.72 ^{Ab)}	73.73±0.66 ^{Da)}	65.26±0.80 ^{Ba)}	69.57±1.47 ^{Cbb)}	56.45±1.72 ^{Ab)}	73.73±0.66 ^{Da)}	65.26±0.80 ^{Ba)}
	2	30.13±0.26 ^{Da)}	26.09±0.20 ^{Ca)}	12.60±0.63 ^{Aa)}	27.53±0.75 ^{Cb)}	18.42±1.04 ^{Ba)}	67.21±0.48 ^{Ca)}	71.68±0.44 ^{Dbc)}	56.86±0.52 ^{Ab)}	74.09±2.22 ^{Da)}	64.15±0.42 ^{Ba)}	71.68±0.44 ^{Dbc)}	56.86±0.52 ^{Ab)}	74.09±2.22 ^{Da)}	64.15±0.42 ^{Ba)}
	4	28.84±0.75 ^{Ea)}	25.91±0.31 ^{Ca)}	13.16±0.47 ^{Aa)}	27.58±0.29 ^{Db)}	17.40±0.78 ^{Ba)}	67.68±0.33 ^{Ca)}	68.09±1.31 ^{Ca)}	55.63±1.04 ^{Abb)}	70.21±1.87 ^{Ca)}	64.18±1.30 ^{Ba)}	68.09±1.31 ^{Ca)}	55.63±1.04 ^{Abb)}	70.21±1.87 ^{Ca)}	64.18±1.30 ^{Ba)}

¹⁾Each value represents the mean±SD (n=3).

^{2,3)}Different uppercase and lowercase letters indicate significant difference ($p<0.05$) among different incubation time and different photosensitizer concentrations, respectively, based on one way ANOVA and the Tukey's HSD test.

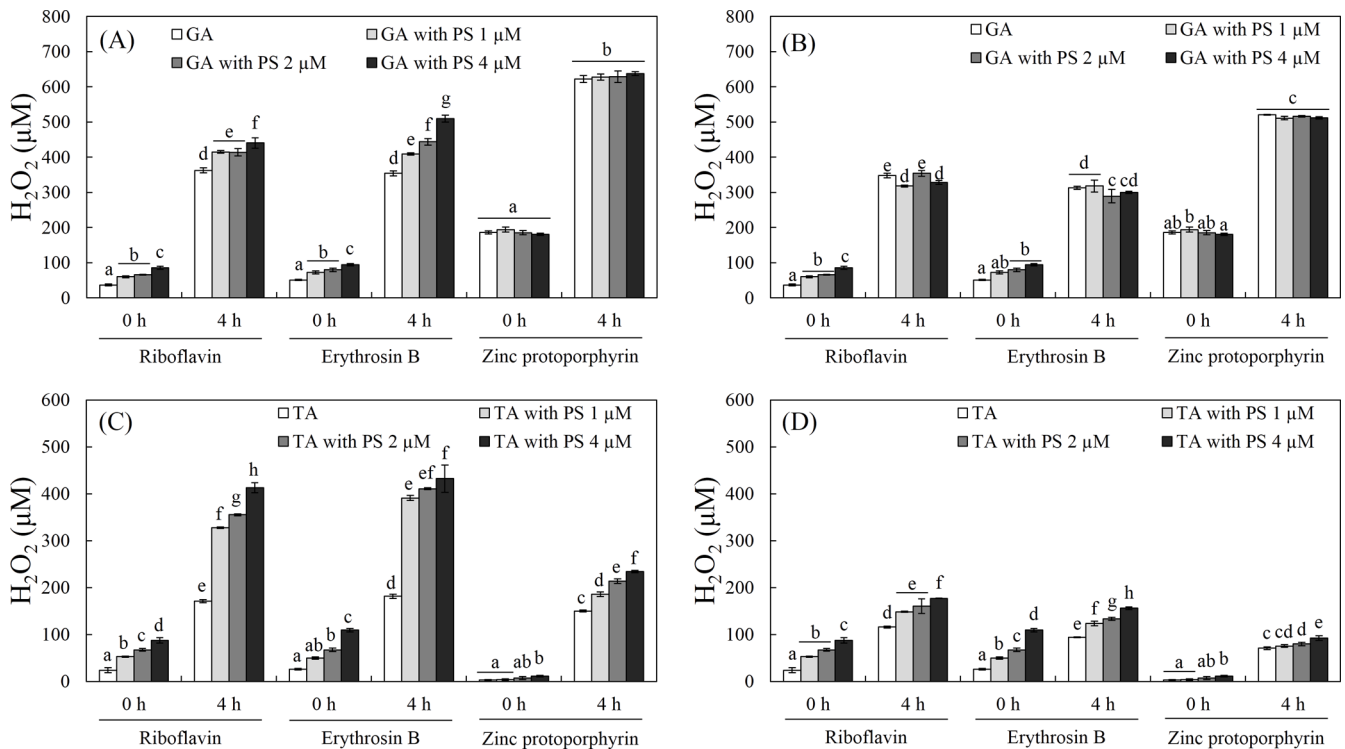


Fig. 4. Effects of different photosensitizers on hydrogen peroxide formation from gallic acids and tannic acid under light or in a dark. Gallic (A and B) and tannic (C and D) acids were incubated with different concentrations of photosensitizers for 4 h under light (A and C) or in a dark (B and D), and formation of hydrogen peroxide was analyzed. Each value represents the mean \pm SD (n=3). Different letters indicate significant difference ($p < 0.05$) based on one way ANOVA and the Tukey's HSD test.

량은 산화가 진행됨에 따라 유의적으로 감소하였으나, 감광제에 농도에 의한 유의적인 차이는 EB에 의해서만 나타났으며, ABTS 라디칼 소거능 변화에서도 유사한 양상을 보였다. 갈산과 탄닌산에서 ROS 생성의 증가는 명소에서 감광제 존재 하에 농도 유의적으로 증가하였다. 본 연구 결과는 폴리페놀이 감광제와 함께 빛에 노출 시 폴리페놀의 산화를 촉진시키며, 식품의 가공 및 저장 시 이들의 상호작용을 통한 품질저하 및 생리활성 변화에 주의할 필요가 있음을 시사한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원의 한국연구재단 일반연구자 지원사업 (2021R1F1A1051466)과 서울여대 산학협력특별연구비(2022-0088) 지원에 의해 수행되었음.

References

- Agostinis P, Berg K, Cengel KA, Foster TH, Girotti AW, Gollnick SO, Hahn SM, Hamblin MR, Juzeniene A, Kessel D, Korbelik M, Moan J, Mroz P, Nowis D, Piette J, Wilson BC, Golab J. Photodynamic therapy of cancer: An update. *CA Cancer J Clin.* 61: 250-281 (2011)
- Akagawa M, Shigemitsu T, Suyama K. Production of hydrogen peroxide by polyphenols and polyphenol-rich beverages under quasi-physiological conditions. *Biosci. Biotech. Bioch.* 67: 2632-2640 (2003)
- Bhavya ML, Shewale SR, Rajoriya D, Hebbar UH. Impact of blue LED illumination and natural photosensitizer on bacterial pathogens, enzyme activity and quality attributes of fresh-cut pineapple slices. *Food. Bioprocess Tech.* 14: 362-372 (2021)
- Canada AT, Giannella E, Nguyen TD, Mason RP. The production of reactive oxygen species by dietary flavonols. *Free Radic. Biol. Med.* 9: 441-449 (1990)
- Cardoso DR, Libardi SH, Skibsted LH. Riboflavin as a photosensitizer. Effects on human health and food quality. *Food Funct.* 5: 487-502 (2012)
- Damyeh MS, Mereddy R, Netzel ME, Sutanbawa Y. An insight into curcumin-based photosensitization as a promising and green food preservation technology. *Compr. Rev. Food Sci. F.* 19: 1-33 (2020)
- Eghbalifer S, Iranshahi M. Prooxidant activity of polyphenols, flavonoids, anthocyanins and carotenoids: Updated review of mechanisms and catalyzing metals. *Phytother. Res.* 30: 1379-1391 (2016)
- Foti MC. Antioxidant properties of phenols. *J. Pharm. Pharmacol.* 59: 1673-1685 (2010)
- Gülçin I, Huyut Z, Elmastaş M, Aboul-Enein HY. Radical scavenging and antioxidant activity of tannic acid. *Arab. J. Chem.* 3: 43-53 (2010)
- Hou Z, Sang S, You H, Lee MJ, Hong J, Chin KV, Yang CS. Mechanism of action of (-)-epigallocatechin-3-gallate: auto-oxidation-dependent inactivation of epidermal growth factor receptor and direct effects on growth inhibition in human esophageal cancer KYSE 150 cells. *Cancer Res.* 65:8049-8056. (2005)
- Kim MR, Kang S, Hong J. Modulation of chemical stability and cytotoxic effects of epigallocatechin-3-gallate by different types of antioxidants. *Korean J. Food Sci. Technol.* 43: 483-489 (2011)
- Kroes BH, Van Den Berg AJJ, Quarles Van Ufford HC, Van Dijk H, Labadie RP. Anti-inflammatory activity of gallic acid. *Planta Med.* 58: 499-504 (1992)
- Lee BH, Choi HS, Hong J. Roles of anti-and pro-oxidant potential of cinnamic acid and phenylpropanoid derivatives in modulating growth of cultured cells. *Food Sci. Biotechnol.* 31: 463-473 (2022)
- Lee BH, Kim HJ, Hong J. Antioxidant and cytotoxic activities of

- curcumin and its analogs: An exploration of structure-activity relationships. *Korean J. Food Sci. Technol.* 53: 463-469 (2013)
- Long LH, Halliwell B. Coffee drinking increases levels of urinary hydrogen peroxide detected in healthy human volunteers. *Free Radical Res.* 32: 463-467 (2000)
- Lyer AK, Greish K, Fang J, Murakami R, Maeda H. High-loading nanosized micelles of copoly (styrene-maleic acid)-zinc protoporphyrin for targeted delivery of a potent heme oxygenase inhibitor. *Biomaterials* 28: 1871-1881 (2007)
- Macdonald IJ, Dougherty TJ. Basic principles of photodynamic therapy. *J. Porphyr. Phthalocyanines* 5: 105-129 (2001)
- Murakami H, Nomura T, Nakashima N. Noncovalent porphyrin-functionalized single-walled carbon nanotubes in solution and the formation of porphyrin-nanotube nanocomposite. *Chem. Phys. Lett.* 378: 481-485 (2003)
- Park KA, Choi Y, Kang S, Kim M-R, Hong J. Effects of proteins on the reactivity of various phenolic compounds with the Folin-Ciocalteu reagent. *Korean J. Food Sci. Technol.* 47: 299-305 (2015)
- Scalbert A, Manach C, Morand C, Rémésy C, Jiménez L. Dietary polyphenols and the prevention of diseases. *Crit. Rev. Food Sci.* 45: 287-306 (2007)
- Schieber A. Reactions of quinones-mechanisms, structures, and prospects for food research. *J. Agr. Food Chem.* 66: 13051-13055 (2018)
- Verma S, Singh A, Mishra A. Gallic acid: Molecular rival of cancer. *Environ. Toxicol. Pharmacol* 35: 473-485 (2013)
- Williamson G, Manach C. Bioavailability and bioefficacy of polyphenols in humans. II. Review of 93 intervention studies. *Am. J. Clin. Nutr.* 81: 243S-255S (2005)
- Yang S, Lian G. ROS and diseases: role in metabolism and energy supply. *Mol. Cell. Biochem.* 467: 1-12 (2020)
- Zhang Z, Sang W, Xie L, Li W, Li B, Li J, Tian H, Yuan Z, Zhao Q, Dai Y. Polyphenol-based nanomedicine evokes immune activation for combination cancer treatment. *Angew. Chem. Int. Edit.* 60: 1967-1975 (2021)