



파일럿 규모 시스템에서 생산된 플라즈마 활성화수로 세척한 숙주의 미생물 저해

윤소희[†] · 권일령[†] · 민세철^{*}

서울여자대학교 식품생명공학과

Microbial decontamination of mung bean sprouts by washing with plasma-activated water produced using a pilot-scale system

Sohee Yoon[†], Il Ryeong Kwon[†] and Sea Cheol Min^{*}

Department of Food Science and Biotechnology, Seoul Women's University, Seoul 01797, Korea

Abstract

A pilot-scale plasma-activated water (PAW) generation system was developed, and PAW was used to wash mung bean sprouts to study the effects of PAW treatment on the inactivation of indigenous aerobic bacteria and quality of mung bean sprouts. When the mung bean sprouts were washed with PAW, the inactivation effect on indigenous bacteria increased as the treatment time increased from 1 min to 6, 10, and 30 min, with a maximum reduction of 1.5 log CFU/g. No significant differences were observed in the pH and color values of mung bean sprouts washed with PAW and those washed with distilled water or NaOCl solutions during storage for 14 days at 4°C ($p>0.05$). The ABTS^{•+} radical scavenging activity, total phenolic content (TPC), and total flavonoid content (TFC) of the mung bean sprouts did not initially differ among treatments. However, the PAW-washed samples showed higher TFCs than the NaOCl-washed samples after day 7 and higher ABTS^{•+} scavenging activities and TPCs on days 10 and 14 ($p<0.05$). These results show that the pilot-scale PAW treatment has the potential to replace conventional NaOCl washing for the microbial decontamination of mung bean sprouts.

Keywords: Cold plasma, Fresh vegetable, Large scale, Sodium hypochlorite, Antioxidant activity

서론

농산물과 신선 채소의 식중독균 오염으로 인한 식중독 위험이 증가하고 있으며 이에 따른 이들 식품에서의 효과적인 미생물 저해 기술개발이 요구되고 있다(Thomas et al., 2024). 숙주나물은 단백질, 비타민, 미네랄, 항산화 성분 등에 의해 영양 밀도가 높고, 소화가 용이하며, 다양한 조리에도 활용 가능하여 신선식품 소재로 많이 사용된다(Hou et al., 2019; Ebert, 2022). 그러나 가공 중 미생물에 오염되기 쉽고 저장 및 운송 중 오염된 미생물의 생장이 식중독 사고와 부패의 원인이 된다(Shomodder et al., 2022; Son et al., 2024).

차아염소산 나트륨(NaOCl) 용액은 오랫동안 신선 농산물의 미생

물 제어에 사용되어 왔다(Herianto et al., 2023). NaOCl 용액은 미생물의 세포막을 손상시키고 세포 내 구성 요소들을 산화시켜 제어하는데 효과적이다. 그러나 NaOCl은 식품의 표면에 잔류 염소를 남기며, 이러한 잔류물은 트리할로메탄과 할로아세트산과 같은 발암성 물질을 생성할 수 있는 위험성을 내포하고 있다(Khan et al., 2017). 이 문제는 소비자들에게 식품 안전성에 대한 우려를 불러일으키며, NaOCl의 사용을 제한하는 주요 요인이 된다. 또한 NaOCl은 처리 후에도 잔류물로 인해 농산물의 감각적 품질에 부정적인 영향을 미쳐 그 기호도를 낮출 수 있다는 보고가 발표된 바 있다(Al et al., 2024). 이러한 이유로 식품 산업에서는 NaOCl 용액을 대체할 수 있는 효과적인 미생물 제어 매체를 적극적으로 모색하고 있다(Evran et al., 2024).

Received: Mar 16, 2026 / Revised: Apr 23, 2026 / Accepted: Jun 15, 2026 / Published: Jul 21, 2026

Corresponding author: Sea Cheol Min, Department of Food Science and Biotechnology, Seoul Women's University, Seoul 01797, Korea

E-mail: smin@swu.ac.kr

Copyright © 2026 Korean Society for Food Engineering.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

최근 들어 활발히 연구되고 있는 플라즈마 활성화수(plasma-activated water, PAW)는 대기압 콜드 플라즈마(cold plasma, 플라즈마) 방전을 통해 생성된 활성 산소종(reactive oxygen species, ROS; 예, $\bullet\text{OH}$, H_2O_2) 및 활성 질소종(reactive nitrogen species, RNS; 예, NO_3^- , NO_2^-) 등이 용해된 물이며, 이는 미생물의 세포막을 산화하고, 세포 내부의 단백질, 지질, 핵산 등을 손상시켜 미생물을 저해한다(Liu et al., 2020; Rahman et al., 2022). PAW는 염소 소독제와 달리 처리 후 식품 표면에 잔류물을 남기지 않아 별도의 세척이 필요 없으며, 이는 물 사용량의 절감과 환경 보호에도 기여할 수 있다(Guo et al., 2021). 더욱이 PAW는 전압, 처리 시간, 그리고 플라즈마 발생 기체 등의 조건을 조절하여 다양한 농산물의 미생물 저해에 맞춤형으로 적용할 수 있는 유연성을 지니고 있다(Guo et al., 2021).

PAW의 미생물 저해 효과는 다양한 농산물에서 보고되어 왔다. Perinban et al. (2022a)은 10 kV의 PAW를 30분간 케일에 처리했을 때, 케일에 오염된 *E. coli* O157:H7를 3.48 log CFU/g만큼 저해시켰다고 보고하였다. 또한 5 kV의 전압에서 생성된 PAW를 5분간 루꼴라에 처리했을 때 루꼴라의 저온성 미생물(psychrotrophic bacteria)은 3.0 log CFU/g 만큼 저해되었고, 중온성 미생물(mesophilic bacteria)과 장내세균(Enterobacteriaceae)은 1.7~2.5 log CFU/g 만큼 감소하였다는 보고가 있었다(Laurita et al., 2021). 더 나아가 Han et al. (2024)는 파일럿 규모의 장비로 제조한 PAW를 이용해 로메인 상추의 토착 호기성 세균을 1.5 log CFU/g 저해할 수 있음을 보고하였다.

그러나, Han et al. (2024)이 사용한 파일럿 규모 PAW 생성 챔버는 개폐가 어려워 플라즈마 방전 중 부식된 전극을 관리하기 어려웠다. 이에 따라 기존 장비의 문제를 보완한 새로운 파일럿 규모의 PAW 제조장비 개발이 요구되었다. 따라서 본 연구의 목적은 (1) 개폐가 용이하여 전극의 관리가 용이한 파일럿 규모(pilot-scale)의 PAW 시스템을 개발하는 것이었고, (2) 파일럿 규모로 30분간의 플라즈마 방전을 통해 제조된 PAW를 이용해 숙주나물을 다양한 처리 시간으로 세척함으로써 PAW의 처리 시간이 숙주의 토착 호기성 세균의 저해에 미치는 영향을 연구하는 것이었으며, 그리고 (3) PAW 세척이 4℃에서 14일 동안 숙주나물의 토착 호기성 세균의 성장과 숙주나물의 색, pH, 항산화 성분 함량, 그리고 항산화 활성에 미치는 영향을 평가하는 것이었다.

재료 및 방법

숙주나물 시료 준비

본 연구에서 사용된 숙주나물은 지역 마트(Pulmuone, Seoul, Korea)에서 구입하였으며, 바로 사용하지 않을 경우 4℃에서 최대 3일 동안 냉장 보관하면서 사용하였다. 실험에 사용할 숙주나물은 생물안

전작업대(biological safety cabinet, BSC; HK-BSC12, S&I Corp., Hwaseong, Korea) 내부에서 포장을 제거한 후 사용되었다. 실험에 사용할 숙주나물 시료로 줄기(10.0±0.2 g)와 몸통(20.0±0.2 g)을 준비하였다. 미생물 저해 연구와 pH와 항산화능을 분석하는 연구에서는 숙주나물 줄기와 몸통 모두를 사용하였고, 숙주나물의 색도를 분석하는 실험에서는 줄기만을 사용하였다.

파일럿 규모의 PAW 제조 시스템 구축 및 PAW 생성

PAW는 본 연구에서 구축한 파일럿 규모의 PAW 제조 시스템을 사용하여 제조하였다(Fig. 1A). 방전 챔버 상단에는 전기 연결용 단자와 절연 보호용 단자 커버를 배치하였고, 그 하부에는 Al_2O_3 유전체 장벽을 갖는 8개의 surface dielectric barrier discharge (SDBD) 전극이 장착된 전극 지지대를 설치하였다(Fig. 1B, C). 방전 중 발생하는 열을 제어하기 위해 하단에 4개의 팬을 설치하였으며, 전극 주변에는 가스 누출 방지를 위한 실리콘 개스킷(gasket)을 장착하였다. PAW 저장조는 원통형 PVC로 제작하였고, 최대 용량은 20 L였다. 저장조 내부에는 PVC 구조물(각 5,000 cm^3)을 삽입하여 제조 부피를 조절할 수 있도록 하였다. 또한 이온화된 가스의 물 내 용존을 촉진하기 위해 다이어프램 펌프와 버블 발생 장치를 이용하여 물을 순환시켰다.

PAW를 제조하기 전 PAW 저장조(reservoir) (Fig. 1B)와 배수 밸브(drainage valve)를 1% (w/w) H_3PO_4 , 1% NaOH, 그리고 멸균증류수를 사용하여 세척하였다. PAW 저장조 내에 멸균 증류수를 담은 후, SDBD 전극(Fig. 1C)을 이용하여 플라즈마를 생성(Fig. 1D)시키고, 플라즈마 내 물질들이 멸균 증류수로 확산되도록 하여 PAW를 제조하였다. PAW 생성 챔버 내의 전극이 산화되는 것을 최소화하기 위해서 연구에 사용되기 전 후와 그리고 사용되지 않은 주에는 주 3회씩 건조한 바람으로 전극 표면의 수분을 제거하였다. 또한 실험에 사용되기 직전에는 약 1분 동안 작동시켜 전극이 플라즈마를 안정하게 발생시키는지 확인하였고, 만약 플라즈마가 불안정하게 생성되는 경우 전극을 교체하면서 실험하였다. 이 연구에 사용된 SDBD의 플라즈마 생성에 사용된 전압, 주파수, 그리고 전력은 각각 8.0 kV, 14.4 kHz, 51.7 W였다. 본 연구에서 한 번에 제조한 PAW의 양은 6 L였다.

PAW의 물리화학적 특성 분석

PAW의 물리화학적 특성 변화를 평가하기 위하여 플라즈마 방전 시간을 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60분으로 설정하여 PAW를 제조하였다. 플라즈마 방전 시간에 따른 pH, 산화환원전위(oxidation-reduction potential, ORP), 그리고 전기전도도(electrical conductivity, EC)를 측정하였다. pH 측정에는 pH 미터(FiveEasy™ Plus; Mettler Toledo, Schwerzenbach, Switzerland)를 사용하였고, ORP 및 EC 측정에는

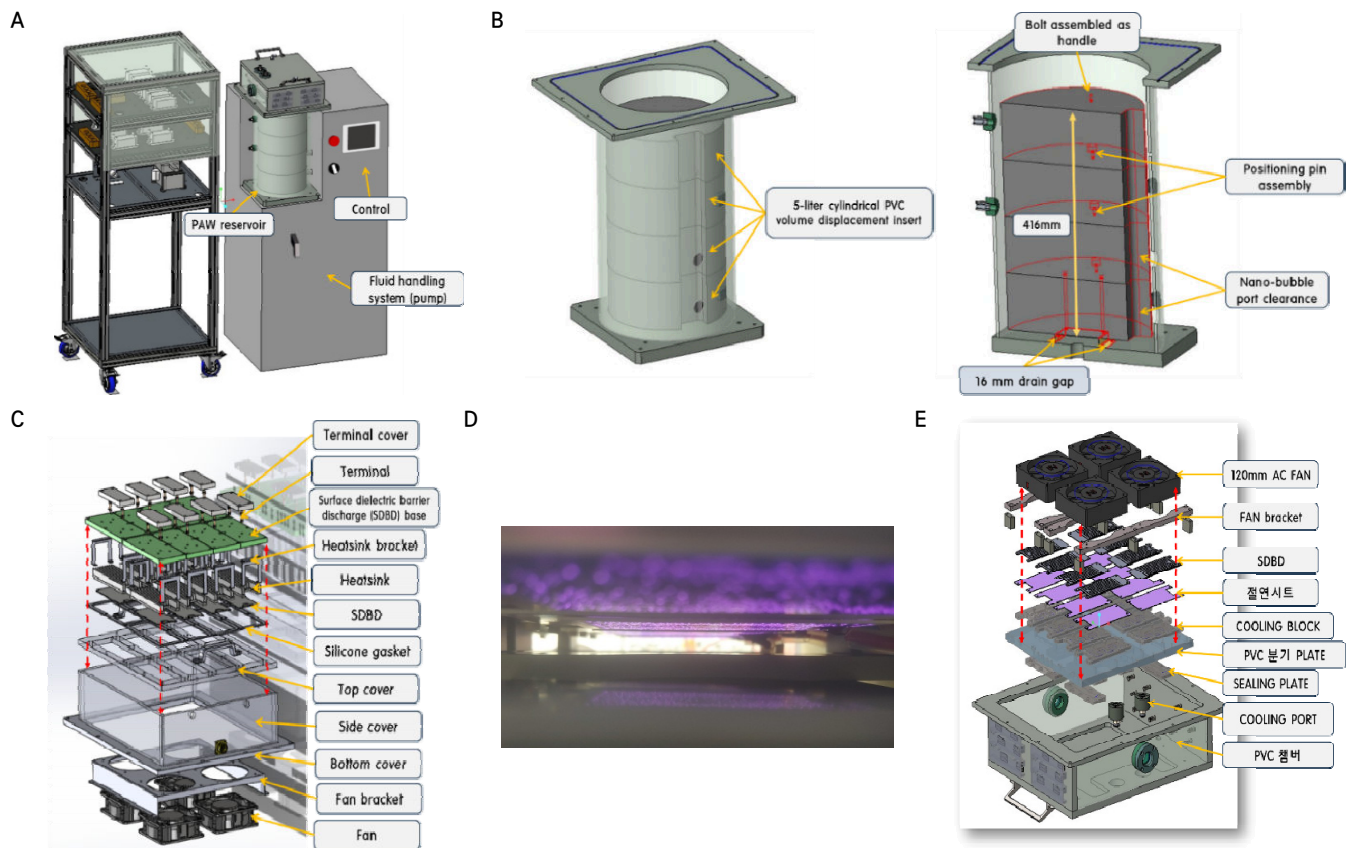


Fig. 1. Images of the whole pilot-scale plasma-activated water (PAW) treatment system used in this study (A), structure of the PAW reservoir containing a 5-L cylindrical PVC volume displacement insert for adjusting the water level (B), new PAW treatment chamber configuration developed for easier electrode access and maintenance (C), plasma formation between the surface dielectric barrier discharge electrodes (D), and the previous chamber configuration for comparison (E).

multimeter (K5000-CP; iSTEK, Seoul, Korea)를 사용하였다. 측정 온도는 $20.8 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 이었다.

처리

PAW 처리가 숙주나물의 토착 호기성 세균에 미치는 저해 효과를 평가하기 위해, 숙주나물 시료(10 g)를 30분 동안 플라즈마 방전을 시켜 생성된 PAW (100 mL)가 담긴 멸균 stomacher bag (710 mL; Whirl-Pak®, Nasco, Fort Atkinson, WI, USA)에 넣고, 셰이커 (MaXshake OB-2, Daihan Scientific, Wonju, Korea)에서 195 rpm으로 30분간 진탕하여 세척하였다. 또한 산업적으로 사용되는 세척 방법의 숙주나물 미생물 저해효과와 PAW 처리의 숙주나물 미생물 저해효과를 비교하기 위해서, 상기 서술된 세척 방법에서 PAW 대신 NaOCl (0.1 g/L)을 사용해 1, 6, 10, 30분 동안 세척하였다.

저장 실험

PAW, 멸균 증류수, 그리고 NaOCl 용액으로 숙주나물(20 g)을

각각 30분 동안 세척한 후, 4°C 에서 14일간 저장하면서 0, 3, 7, 10, 그리고 14일 차에 각각의 세척이 숙주나물의 토착 호기성 세균 성장과 품질 특성에 미치는 영향을 측정하였다. 토착 호기성 세균의 성장과 품질 특성 분석에 사용한 숙주나물의 양과 세척액의 양은 각각 10 g-100 mL와 20 g-200 mL였다. 처리된 숙주나물을 생물안전작업대 내(온도: $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도: $26 \pm 3\%$)에서 멸균된 거치대(rack) 위에 놓아 30분간 물기를 제거한 후, 멸균 집게를 사용해 뒤집어 추가로 30분 동안 추가로 표면 수분을 제거하였다. 이후 숙주나물을 ultraviolet (UV)-C 램프(130 kJ/m^2)로 30분 동안 살균된 나일론 저밀도 폴리에틸렌(nylon/low-density polyethylene) 파우치($15 \times 25 \text{ cm}$, 0.06 mm 두께; Hanmi Packaging, Busan, Korea)에 담고 열접합 밀봉 후 $4.0 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 에서 저장하였다.

미생물 분석

처리된 숙주나물의 토착 호기성 세균 수를 측정하기 위해, 시료(10 g)를 멸균된 0.1% (w/v) 펩톤수(90 g)가 담긴 멸균백(710 mL,

Nasco Whirl-Pak®, Fort Atkinson, WI, USA)에 넣고 패들식 균질기(LS-400A, BNF Korea Co., Gimpo, Korea)를 사용하여 3분간 균질화하였다. 균질화된 시료 현탁액을 0.1% 펩톤수로 단계 희석한 후, 각 희석액 100 µL를 표준한천배지(plate count agar; Difco, Sparks, MD, USA)에 도말하였다. 이후 36°C에서 48시간 동안 배양한 뒤 형성된 집락수를 계수하였다.

색도 및 pH 측정

200 mL의 PAW, NaOCl, 그리고 멸균 증류수로 세척된 숙주나물 줄기의 색도는 색차계(CR-400; Minolta Camera Co., Osaka, Japan)를 이용하여 측정하였다. 측정 조건은 D_{65} 및 표준 관측자 10° 로 설정하였으며, 색도 값은 CIELAB 색 공간의 L^* (명도), a^* (적색도), b^* (황색도)로 나타내었다.

숙주나물의 pH는 숙주나물(20 g)의 전체를 막자 사발로 분쇄하여 얻은 추출액을 pH 미터로 측정하였다.

항산화 성분 함량 및 활성 측정을 위한 숙주나물 추출물 준비

총 페놀 함량(total phenolic content, TPC), 총 플라보노이드 함량(total flavonoid content, TFC), 그리고 항산화 활성 분석을 위한 숙주나물 추출물 준비는 Huang et al. (2022)에 서술된 방법을 따라 이루어졌다. PAW, 멸균 증류수, 그리고 NaOCl 용액으로 처리된 숙주는 동결 건조기(ALPHA 1-4 LD plus; Christ, Osterode am Harz, Germany)를 사용하여 48시간 동안 건조된 후, 막자 사발로 3분 동안 분쇄되었다. 얻어진 동결 건조된 숙주 분말(0.5 g)을 acetone/water/acetic acid (70.0:29.5:0.5, v/v/v) 용액(5 mL)에 혼합시킨 후 25°C에서 150 rpm으로 3시간 동안 지속적으로 진탕하면서 추출액을 준비하였다. 이후, 추출액(5 mL)을 25°C에서 6,800×g로 10분간 원심 분리하였고, 얻어진 상층액을 acetone/water/acetic acid 용액(7 mL)로 두 번 더 원심분리하여 추출물을 얻어낸 후, 회수된 상층액을 합하여 최종 추출물로 사용하였다.

TPC와 TFC 측정

PAW, NaOCl, 그리고 멸균 증류수로 세척한 숙주나물 추출물의 TPC는 Folin-Ciocalteu 방법(Guo et al., 2012)을 사용하여 측정하였다. 숙주 추출물 0.1 mL을 증류수 0.4 mL와 Folin-Ciocalteu 시약 용액(0.1 mL; Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA)과 혼합하고, 혼합물을 실온에서 6분간 반응시켰다. 이후, 각 반응 혼합물에 7% (w/v) 탄산나트륨(Na_2CO_3) 용액 1 mL와 증류수 0.8 mL를 추가하여 실온에서 90분간 정치하였다. 그 후, 최종 혼합물 용액 250 µL의

흡광도를 분광광도계(Spectra Max 250; Molecular Devices, Sunnyvale, CA, USA)를 사용하여 760 nm에서 측정하였다. 측정 값은 Gallic acid (Sigma-Aldrich Co.)를 표준 용액으로 사용하여 준비된 검량 곡선을 사용하여 건조 중량 1 g당 gallic acid equivalent (GAE) mg으로 환산되었고, 이 값이 TPC (mg of GAE/g dry weight sample (DWS))으로 결정되었다.

숙주나물 추출물의 TFC는 추출물 1 mL를 NaNO_2 (5% w/v; 0.1 mL) 및 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ (10% w/v; 0.1 mL)와 혼합한 후, 실온에서 6분간 반응시켜 측정하였다. 이후 NaOH (1 mol/L; 1.125 mL)와 증류수 1.35 mL를 혼합물에 첨가한 후, 실온에서 30분간 반응시켰다. 최종 혼합물 용액 250 µL의 흡광도는 분광광도계를 사용하여 510 nm에서 측정하였다. 측정 값은 Rutin (Sigma-Aldrich Co.)을 표준 물질로 사용하여 준비된 검량 곡선을 통해 건조 중량 1 g당 rutin equivalent (RE) mg으로 환산되었고, 이 값은 TFC (mg of RE/g DWS)로 사용되었다.

항산화 활성 측정

PAW, NaOCl, 그리고 멸균 증류수로 세척한 숙주나물의 ABTS 라디칼 소거 활성은 Re et al. (1999)의 방법을 이용하여 측정하였다. ABTS 라디칼 소거 활성을 측정하기 위해, 7 mM ABTS (Sigma-Aldrich Co.) 용액과 2.45 mM 과황산칼륨($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$; Sigma-Aldrich Co.) 용액을 1:1 (v/v)로 혼합하여, 25°C에서 16시간 동안 어두운 곳에서 반응시켰다. 반응이 완료된 ABTS 혼합물을 85% 에탄올로 희석하여 734 nm에서 흡광도가 0.70 ± 0.02 에 도달하도록 조정하였다. 이후 숙주 추출물 40 µL를 $\text{ABTS}^{\bullet+}$ 용액 3 mL와 혼합하여 7분간 반응시킨 후, 734 nm에서 반응물의 흡광도를 측정하였다. 측정한 값은 Trolox를 표준물질로 사용한 검량곡선을 이용하여 환산하였으며, 항산화 활성은 건조중량 기준(mg of Trolox equivalent antioxidant capacity (TE)/g DWS)으로 나타내었다.

숙주나물의 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) 라디칼 소거 활성은 Cervato et al. (2000)의 방법에 따라 측정하였다. 각 숙주 추출물 300 µL를 85% 에탄올로 5배 희석한 후, DPPH (60 µM, Sigma-Aldrich Co.) 용액 3.9 mL와 혼합하였다. 혼합물을 어두운 곳에서 실온에서 30분간 반응시킨 후, 517 nm에서 흡광도를 측정하였다. DPPH 라디칼 소거 활성은 Cervato et al. (2000)에서 사용한 식을 이용하여 계산하였다.

통계 처리

본 연구의 실험 결과는 독립적으로 3회 반복 수행하여 얻은 값을 평균±표준편차(Mean±standard deviation)로 나타내었다. 각 반복 실험에서 미생물 분석을 위해 처리구 당 숙주나물의 줄기 시료 4개(각 10 g)와 몸통 시료 4개(각 20 g)를 사용하였다. 숙주나물의 색, pH,

항산화 성분 함량, 그리고 항산화 활성 분석을 위해서는 각 반복 실험에서 처리구 당 5개의 시료(각 10 g)를 사용하였다. 평균 간 차이는 일원 배치 분산분석(one-way ANOVA)을 통해 검정하였고, 유의적인 차이가 있을 경우 Tukey의 다중범위검정으로 사후 분석을 수행하였다($\alpha=0.05$). 모든 통계 분석은 SPSS 소프트웨어(ver. 29.0.0; IBM SPSS Inc., New York, NY, USA)를 사용하여 수행되었다.

결과 및 고찰

파일럿 규모의 PAW 제조 시스템 개선

본 연구에서 구축한 파일럿 규모 PAW 제조 시스템의 PAW 생성 챔버(Fig. 1C)는 기존 PAW 생성 챔버(Fig. 1E)의 개폐 및 접근성을 개선한 구조를 적용하였다. 기존 시스템은 전극 점검, 세척 및 교체 시 해체 범위가 상대적으로 크고 전극부 접근이 제한적이었던 반면, 본 시스템은 전극부를 보다 용이하게 개폐할 수 있도록 설계하여 전극 유지관리의 편의성을 높였다. 이러한 구조적 개선은 반복 운전 시 유지관리 부담을 줄이고 전극 관리의 일관성을 높이는 데 기여할 수 있다.

플라즈마 방전 시간이 PAW의 물리화학적 특성에 미치는 영향

본 연구에서는 플라즈마 방전 시간이 PAW의 물리화학적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 pH, EC, 그리고 ORP 값을 측정하였다(Table 1). 플라즈마 방전 중 생성되는 ROS와 RNS는 PAW의 산성화, 이온 농도 증가, 그리고 산화력 강화 등의 변화를 유도하며, 이러한 변화는 각각 pH, EC, 그리고 ORP 값을 통해 평가될 수 있다(Herianto et al., 2023). 본 연구 결과에서 PAW의 pH는 방전 시간이 증가함에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 10분 방전 시 pH는 7.05에서 시작하여 30분 방전 시 3.11, 60분 방전 시 2.37로 감소하였다. 이는 플라즈마 방전 중 생성된 H^+ 이온이 증가함에 따라 물의 산성도가 높아지는 결과로 해석된다(Wang et al., 2023). 또한 플라즈마 방전 시간이 30분을 초과한 시점부터는 pH 감소가 완만해졌으며, 30분 이후에는 급격한 변화를 보이지 않은 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 방전 초기에는 반응성 종의 빠른 생성으로 인해 급격한 pH 감소가 일어나지만, 방전 시간이 길어짐에 따라 H^+ 이온 농도가 포화 상태에 가까워지면서 pH 변화가 둔화되는 것으로 해석된다(Pandey et al., 2023). pH의 감소는 PAW의 산성화 정도를 나타내는 중요한 지표로, 미생물 제어에서 산성화된 환경은 미생물의 세포막 손상과 세포 내 활성 물질의 침투를 촉진하는데 기여한다(Xiang et al., 2018; Rahman et al., 2022). 방전 시간이 30분을 초과하면 pH가 거의 일정하게 유지되는 것으로 보아, 더 긴 방전

Table 1. Changes in the physicochemical properties of pilot-scale plasma-activated water during plasma discharge

Plasma discharge time (min)	pH	Oxidation reduction potential (mV)	Electrical conductivity ($\mu S/cm$)
0	6.1 $\pm$ 0.3 ^a	258.0 $\pm$ 21.1 ^a	5.0 $\pm$ 1.3 ^a
10	3.1 $\pm$ 0.1 ^b	432.3 $\pm$ 17.3 ^b	338.5 $\pm$ 9.8 ^b
20	2.8 $\pm$ 0.1 ^c	473.7 $\pm$ 18.9 ^c	919.5 $\pm$ 27.6 ^c
30	2.6 $\pm$ 0.1 ^d	503.6 $\pm$ 20.3 ^c	1,443.2 $\pm$ 43.8 ^d
40	2.6 $\pm$ 0.1 ^d	503.6 $\pm$ 16.2 ^c	1,805.3 $\pm$ 52.7 ^e
50	2.5 $\pm$ 0.1 ^{de}	499.2 $\pm$ 16.4 ^c	2,286.0 $\pm$ 66.5 ^f
60	2.4 $\pm$ 0.1 ^e	508.0 $\pm$ 18.2 ^c	2,961.6 $\pm$ 87.4 ^g

¹⁾Different lowercase letters within each column indicate significant differences among plasma discharge times ($p>0.05$).

시간이 추가적인 산성화에 크게 기여하지 않음을 알 수 있었다.

EC 값은 플라즈마 방전 중 물 속에서 생성된 이온성 물질의 농도를 반영하는 지표(Herianto et al., 2023), 방전 시간이 길어짐에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 10분 간의 플라즈마 방전 시 EC 값은 338.51 $\mu S/cm$ 였으며, 30분 간의 방전 시에는 1,443.2 $\mu S/cm$, 그리고 60분 간의 방전 시에는 2,961.6 $\mu S/cm$ 로 측정되었다. 이러한 EC 값의 증가는 플라즈마 방전 과정에서 질산염(NO_3^-), 아질산염(NO_2^-) 등과 같은 이온성 물질이 증가했기 때문으로 해석된다(Vlad & Anghel, 2017). 이온 농도가 증가하면 PAW 내 물질 이동성과 전하 운반 능력이 강화되며, 이는 PAW의 반응성을 높여 미생물 세포의 구조적 변화를 유도할 수 있다. 특히 높은 EC 값은 플라즈마 방전 중 생성된 이온성 물질의 축적을 반영하며, PAW의 전기적 특성이 미생물 비활성화 능력을 향상시키는 데 중요한 역할을 한다(Zhu et al., 2023).

ORP는 PAW의 산화력을 평가하는 중요한 지표(Herianto et al., 2023), 플라즈마 방전 시간이 길어짐에 따라 ORP 값도 상승하는 경향을 보였다. 10분 간의 플라즈마 방전 시 ORP 값은 432.3 mV에서 시작하여 30분 방전 시 503.6 mV로 상승하였으며, 이후 60분까지 방전 시간을 연장해도 ORP 값은 약 503.6 mV 부근에서 안정적으로 유지되었다. 이러한 결과는 30분 이후 더 긴 시간의 방전은 ROS와 RNS의 양 증가에 크게 도움이 되지 않음을 보여준다. 이는 아마도 30분간의 방전이 정해진 양의 물에 용출될 수 있는 최대 양에 가까운 ROS와 RNS를 생성시켰기 때문으로 판단되었다(Royintarat et al., 2019).

종합적으로, 플라즈마 방전 시간이 30분을 초과할 경우 pH 감소는 완만해지며, ORP 값 또한 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 이는 플라즈마 방전 시간이 충분히 길면 용액 내 활성종의 포화도가 이

루어지고 이로써 물리화학적 특성의 변화가 둔화된다는 것을 보여 준다. 이후 실험에서는 플라즈마 방전 시간으로 30분을 사용하였다.

PAW 처리 시간이 숙주나물의 미생물 저해에 미치는 영향

30분의 플라즈마 방전으로 생성된 PAW와 0.1 g/L의 NaOCl 용액으로 숙주나물을 1, 6, 10, 그리고 30분 동안 처리한 후 각 처리의 처리 시간의 토착 호기성 세균에 대한 저해 효과를 확인하고 동시에 두 처리의 효과를 비교하였다(Fig. 2). PAW로 1, 6, 10, 그리고 30분 동안 처리한 경우, 총 호기성 세균 수는 각각 0.1 ± 0.1 , 0.2 ± 0.1 , 1.0 ± 0.2 , 그리고 1.6 ± 0.2 log CFU/g 감소를 보였으며, NaOCl 용액으로 동일한 시간 동안 처리한 경우에는 각각 0.3 ± 0.1 , 0.9 ± 0.1 , 1.0 ± 0.1 , 그리고 1.1 ± 0.1 log CFU/g 만큼 감소하였다. 숙주나물을 30분 동안 처리했을 때, PAW의 미생물 불활성화 효과가 NaOCl 처리보다 유의미하게 더 우수하였다($p < 0.05$). 본 연구의 결과를 통해 PAW를 이용하여 NaOCl 용액 보다 높은 숙주나물의 토착 호기성 세균 저해 효과를 얻기 위해서는 상대적으로 긴 시간(30분 이상)의 세척 시간이 필요함을 알 수 있었다.

PAW, NaOCl, 그리고 멸균 증류수 세척이 저장 중 숙주나물의 토착 호기성 세균 증식에 미치는 영향

Fig. 3은 4°C에서 14일 동안 저장한 숙주나물의 세척 방식에 따른 토착 호기성 세균의 생장을 나타낸다. PAW로 30분간 숙주나물을 처리한 결과, 처리 직후 숙주나물의 토착 호기성 세균 수는 7.4 ± 0.1 log CFU/g에서 6.0 ± 0.2 log CFU/g로 감소하였으며, 저장 기간

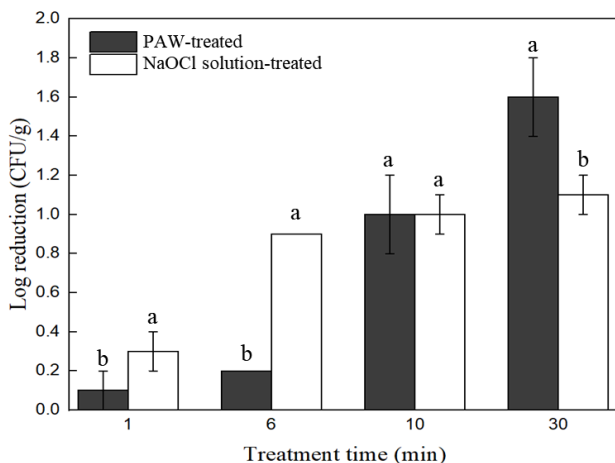


Fig. 2. Effect of pilot-scale plasma-activated water (PAW) treatment time on the inactivation of indigenous mesophilic bacteria in mung bean sprouts. Same letters around the error bars are not significantly different between the treatments ($p > 0.05$).

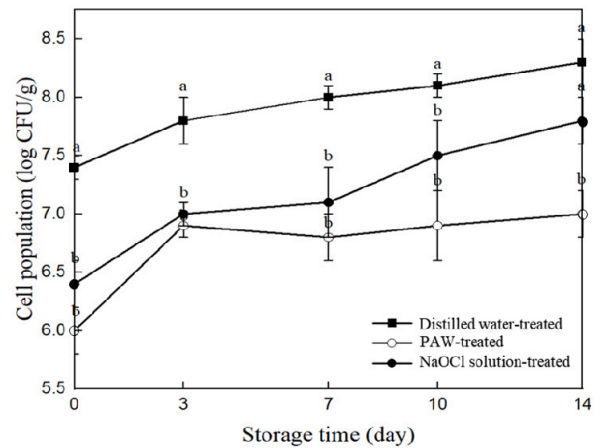


Fig. 3. Effect of pilot-scale plasma-activated water (PAW) on the growth of indigenous mesophilic bacteria in mung bean sprouts during storage at 4°C for 14 days. Plasma discharge time and treatment time were 30 min and 30 min, respectively. Same letters around the error bars are not significantly different between the treatments stored at each storage day ($p > 0.05$).

동안 PAW에 의한 저해 효과는 $1.1 \sim 1.4$ log CFU/g으로 일관되게 유지되었다. 반면, NaOCl로 처리한 숙주나물에서는 처리 직후 토착 호기성 세균 수가 6.4 ± 0.2 log CFU/g로 감소하였으며, 저장 기간 동안 토착 호기성 세균 수가 $0.5 \sim 1.0$ log CFU/g만큼 감소하여 저장 중 PAW에 비해 저해율이 낮았다(Fig. 3). 이러한 결과는 본 연구에 사용된 파일럿 규모의 장비로 준비된 PAW가 NaOCl 세척법에 비해 저장 중 토착 호기성 세균의 생장을 보다 효과적으로 억제함을 시사하며, PAW 처리가 염소 기반 소독제 사용을 대체할 수 있는 유망한 세척 방법임을 시사한다.

Kang et al. (2022)는 16 kV의 전압으로 약 30분간 방전하여 생성된 PAW가 유사한 pH의 조건(2.5)을 갖는 HCl 용액보다 떡볶이의 토착 호기성 세균에 대해 더 강력한 항균 효과를 가졌다고 보고 하였으며($p < 0.05$), PAW에 의한 미생물의 저해는 PAW의 낮은 pH에서만 기인된 것이 아니고 PAW 내 존재하는 ROS와 RNS들의 항균 작용 때문임을 증명했다. PAW 세척에 의한 숙주나물의 저장 중 토착 호기성 세균의 생장의 억제가 NaOCl 세척보다 더 뛰어난 것은, PAW 내 존재하는 장수명 활성종(long-lived species; 예, H_2O_2 , O_3 , NO_3^- , NO_2^-)은 미생물의 세포막에 지속적인 손상을 유도하여 치명적 손상(lethal-injury)을 증가시켰기 때문일 것으로 설명되었다(Kang et al., 2022; Wong et al., 2023).

PAW, NaOCl 그리고 멸균 증류수 세척이 저장 중 숙주나물의 색도 및 pH에 미치는 영향

숙주나물을 PAW, NaOCl, 그리고 멸균 증류수로 세척한 후 4°C에서 14일 동안 저장하면서 pH와 색도의 변화를 Table 2와 Table 3에

나타내었다. PAW로 처리한 숙주나물은 NaOCl로 처리한 숙주나물에 비해 저장 기간 동안 색도 변화가 적은 양상을 보였으며, 특히 황변 현상이 억제되어 색도가 안정적으로 유지되었다($p>0.05$; Table 3).

처리 직후(저장 0일차)에 3가지 처리 모두 유사한 밝기(L* 값)를 보였으나, 저장이 진행됨에 따라 NaOCl로 처리된 숙주나물의 L* 값은 67.05에서 65.20으로 유의하게 감소하였다($p<0.05$). 반면, PAW로 처리된 숙주나물의 처리 직후와 14일 후 L* 값, a* 값, 그리고 b* 값은 각각 66.46과 65.04, -0.53와 -0.50, 그리고 6.15와 6.01로 크게 다르지 않아, PAW로 처리된 숙주의 색도가 NaOCl로 처리된 숙주의 색도에 비해 저장 중 안정적이었음을 시사하였다. 이와 유사하게 Xiang et al. (2019)의 연구에서는 30초간 플라즈마 제트로 방전된 PAW를 사용하여 숙주나물을 30분 동안 세척한 후, 냉장온도에서 6일간 저장하였을 때 숙주나물의 색상이 변하지 않았다고 보고하였다.

또한, PAW로 처리된 숙주나물의 pH는 증류수로 처리된 숙주나물

의 그 값과 처리 직후에 유의적으로 다르지 않았다($p>0.05$; Table 2). 본 연구에 사용된 PAW의 pH는 2.63 ± 0.12 로 강한 산성을 나타냈지만, 처리 직후 숙주나물의 pH가 감소하지 않은 것은 짧은 침지 시간이 조직 내로 H⁺가 확산하는 데는 충분하지 않았기 때문으로 생각된다(Derossi et al., 2010). 채소 조직의 산성화는 단순 침지 조건에서 제한적일 수 있으며, 조직 구조와 처리 조건에 따라서 pH 감소 정도가 달라지는 것으로 보고되었다(Derossi et al., 2011). 본 연구의 결과와 유사하게 Wang et al. (2022)의 연구에서도 PAW (pH 2.8)로 처리된 케일과 증류수로 처리된 케일 간의 pH는 서로 다르지 않았다(6.3). 따라서 본 연구 결과는 PAW의 산성도가 세척수 자체의 특성으로는 작용하였으나, 실제 식물 조직의 pH를 변화시키는 효과는 제한적이었을 가능성을 시사한다. 반면 저장 중 NaOCl 처리군의 pH는 가장 작은 변화폭을 보였는데, 이는 염소계 세척이 신선절단 채소의 호흡률을 유의적으로 낮추어 저장 중 유기산의 소모를 지연시켰기 때문으로 판단된다(Cliffe-Byrnes & O'Beirne, 2005; Both et al., 2017).

Table 2. Effects of pilot-scale plasma-activated water (PAW) treatment on the pH of mung bean sprouts during storage at 4°C for 14 days

Storage time (day)	pH		
	Distilled water-treated	NaOCl-treated	PAW-treated
0	6.00 ± 0.14^{Ab}	5.95 ± 0.05^{Aa}	5.90 ± 0.10^{Ab}
3	6.10 ± 0.05^{Aab}	5.96 ± 0.06^{Ba}	6.00 ± 0.05^{Bab}
7	6.17 ± 0.02^{Aab}	5.98 ± 0.09^{Ba}	6.04 ± 0.09^{Ba}
10	6.17 ± 0.02^{Aa}	5.99 ± 0.08^{Aa}	6.04 ± 0.08^{Ba}
14	6.16 ± 0.01^{Aab}	6.01 ± 0.13^{Ba}	6.12 ± 0.02^{ABa}

¹)Plasma discharge time: 30 min, treatment time: 30 min.

²)Means followed by the same lowercase letter within a column are not significantly different between the same treatment, while those followed by the same uppercase letter within a row are not significantly different between the treatments stored at each storage day ($p>0.05$).

PAW, NaOCl, 그리고 멸균 증류수 세척이 저장 중 숙주나물의 항산화 성분 함량 및 항산화 활성에 미치는 영향

본 연구에서는 PAW로 세척한 숙주나물을 4°C에서 14일 동안 저장하며 항산화 성분의 농도 변화 및 항산화 활성을 평가하였다. Fig. 4에 보여진 바와 같이, 0일차에서의 PAW로 세척한 숙주나물의 TPC값은 18.44 mg/g 으로 멸균 증류수로 세척한 숙주나물(16.95 mg/g) 및 NaOCl로 세척한 숙주나물(18.67 mg/g)과 유의적인 차이를 보이지 않았으며($p>0.05$), 저장 3일차에도 PAW로 세척한 숙주나물의 페놀 함량은 NaOCl 또는 멸균 증류수로 세척한 숙주나물과 유의적인 차이를 보이지 않았다($p>0.05$). 반면에 저장 7일차부터는

Table 3. Effects of pilot-scale plasma-activated water (PAW) treatment on the color of mung bean sprouts during storage at 4°C for 14 days

Storage time (day)	Color								
	L*			a*			b*		
	Distilled water-treated	NaOCl-treated	PAW-treated ¹⁾	Distilled water-treated	NaOCl-treated	PAW-treated	Distilled water-treated	NaOCl-treated	PAW-treated
0	65.78 ± 0.20^{Ca}	67.05 ± 0.74^{Aa}	66.46 ± 0.28^{Ba}	-0.55 ± 0.03^{Aa}	-0.91 ± 0.06^{Ab}	-0.53 ± 0.14^{Aa}	6.17 ± 0.27^{Aa}	6.38 ± 0.20^{Aa}	6.15 ± 0.40^{Aa}
3	65.92 ± 0.44^{Ba}	66.48 ± 0.41^{ABa}	66.98 ± 0.68^{Aa}	-0.54 ± 0.02^{Aa}	-1.13 ± 0.20^{Bb}	-0.63 ± 0.18^{Aab}	6.20 ± 0.41^{Aa}	6.16 ± 0.43^{Aa}	6.29 ± 0.27^{Aa}
7	65.68 ± 0.69^{Ab}	65.65 ± 0.28^{Ab}	65.23 ± 0.96^{Ab}	-0.67 ± 0.04^{Ab}	-0.65 ± 0.11^{Aa}	-0.65 ± 0.09^{Aab}	6.25 ± 0.03^{Aa}	6.44 ± 0.24^{Aa}	6.40 ± 0.74^{Aa}
10	65.54 ± 0.53^{ABa}	65.20 ± 0.56^{ABb}	64.61 ± 0.82^{Bb}	-0.65 ± 0.04^{Ab}	-0.69 ± 0.55^{Aa}	-0.69 ± 0.06^{Ab}	6.35 ± 0.25^{Aa}	6.30 ± 0.51^{Aa}	6.25 ± 0.24^{Aa}
14	65.00 ± 0.62^{Aa}	65.51 ± 0.26^{Ab}	65.44 ± 0.23^{Ab}	-0.64 ± 0.03^{Ab}	-0.65 ± 0.03^{Aa}	-0.65 ± 0.04^{Aab}	6.23 ± 0.09^{Aa}	6.14 ± 0.27^{Aa}	6.01 ± 0.43^{Aa}

¹)Plasma discharge time: 30 min, treatment time: 30 min.

²)Means followed by the same lowercase letter within a column are not significantly different between the same treatment, while those followed by the same uppercase letter within a row are not significantly different between the treatments in the same property stored at each storage day ($p>0.05$).

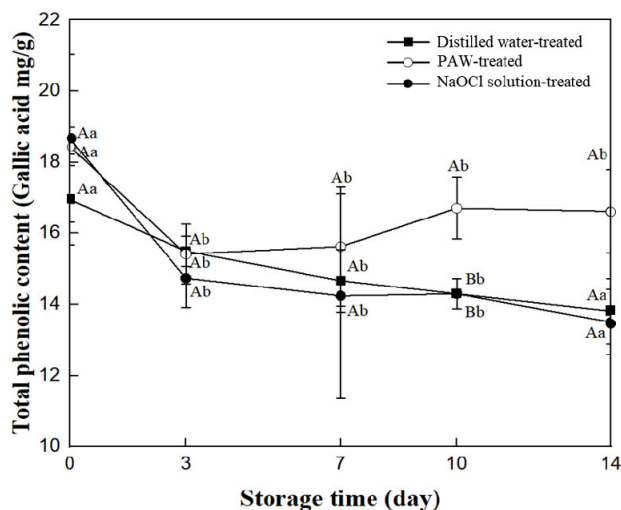


Fig. 4. Effect of pilot-scale plasma-activated water (PAW) treatment on total phenolic contents of mung bean sprouts during storage at 4°C for 14 days. Means followed by the same uppercase letter around the error bars are not significantly different among treatments at each storage time, whereas means followed by the same lowercase letter around the error bars are not significantly different within the same treatment ($p>0.05$).

PAW로 세척한 숙주나물의 TPC 함량은 NaOCl 또는 멸균 증류수로 세척한 숙주나물의 값들보다 유의적으로 높은 것을 확인할 수 있었다($p<0.05$). 선행연구에서는 PAW 내 ROS 및 RNS가 식물 조직에 경미한 스트레스 반응을 유도하여 페놀 화합물의 축적에 영향을 줄 수 있으며, 동시에 세포 구조 변화에 의해 일부 성분의 추출성이 증가할 수 있다고 보고하였다(Abouelenein et al., 2023; Kalisz et al., 2026).

PAW로 세척된 숙주나물의 TFC는 저장 7일 이후에서는 멸균 증류수와 NaOCl로 세척한 그 값보다 유의적으로 높게 나타나($p<0.05$; Fig. 5), 앞서 설명된 PAW 처리의 페놀성 항산화제 유지 효과를 뒷받침하였다. Perinban et al. (2022b)은 45분간의 플라즈마 방전(10 kV)을 통해 준비된 PAW로 사과 조각을 처리했을 때 사과의 항산화 활성이 유의하게 증가하였고, 이후 4±1°C에서 12일 동안 저장한 후에도 PAW로 세척한 사과 조각의 항산화 활성은 높게 유지되었다고 보고하여 본 연구 결과와 유사한 경향을 제시하였다. 하지만 장기 저장 중 PAW 처리된 숙주나물의 TFC는 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이는 저장 기간 동안 ROS와 RNS의 축적으로 인해 항산화 성분이 산화적 손상을 입었기 때문일 가능성이 있다(Sarangapani et al., 2020). Sarangapani et al. (2020)도 PAW로 세척한 딸기를 4°C에서 10일 동안 저장하였을 때 초기에는 항산화 성분과 활성이 증가하였으나 저장 후반부에는 항산화 성분 분해가 많이 이루어졌다고 보고하였다. 그럼에도 불구하고 본 연구 결과는 PAW로 세척된 숙주나물의 TFC가 NaOCl 처리된 숙주나물의 그 값보다 저장 14일차에

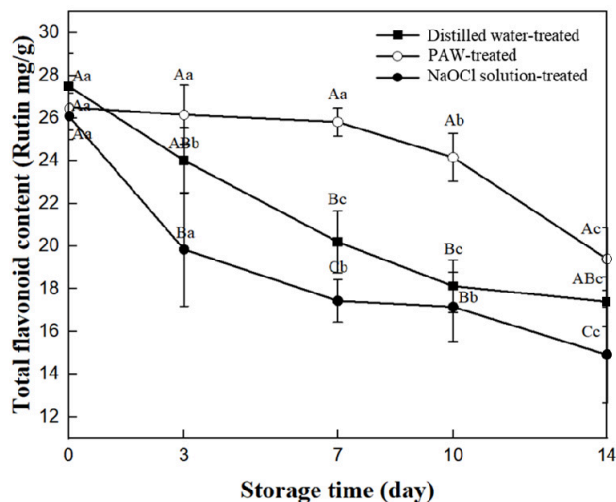


Fig. 5. Effect of pilot-scale plasma-activated water (PAW) treatment on total flavonoid contents of mung bean sprouts during storage at 4°C for 14 days (Plasma discharge time: 30 min, treatment time: 30 min). Means followed by the same uppercase letter around the error bars are not significantly different among treatments at each storage day, whereas means followed by the same lowercase letter around the error bars are not significantly different within the same treatment ($p>0.05$).

도 유의하게 높았으므로($p<0.05$; Fig. 5), PAW 처리가 염소계 세척에 비해 항산화 성분 보존에 유리한 가능성을 보여주었다.

PAW로 세척한 숙주나물의 ABTS•⁺ 라디칼 소거 활성은 저장 0일차에 39.58 mg Trolox/g으로 멸균 증류수로 세척한 숙주나물(39.66 mg Trolox/g) 및 NaOCl로 세척한 숙주나물(38.15 mg Trolox/g)과 유의적인 차이가 나타나지 않았다($p>0.05$; Fig. 6). 저장 7일차부터 PAW 처리군은 멸균 증류수 및 NaOCl 처리군보다 유의적으로 높은 항산화 활성을 나타냈으며, 이러한 경향은 저장 14일까지 지속되었다. 이는 저장 초기에는 처리군 간 TPC와 TFC 값의 차이가 없었으나, 저장 중 PAW 처리군에서 유의적으로 높은 TPC와 TFC 값이 유지된 결과와 그 양상이 같았다(Fig. 4, Fig. 5). 이는 PAW 처리가 polyphenol oxidase 및 peroxidase 등의 산화효소를 생성할 수 있는 부패 미생물군을 억제함으로써 비타민 C와 폴리페놀의 산화를 지연시켜 항산화 활성 유지에 기여했기 때문으로 생각된다(Ramazzina et al., 2015). 또한 PAW는 약산성의 pH와 높은 ORP를 가지는데, 이러한 환경은 비타민 C의 산화 속도를 감소시켜 저장 중 화학적 안정성을 향상시킬 수 있다고 알려져 있다(Thirumdas et al., 2018).

PAW로 세척한 숙주나물의 DPPH• 라디칼 소거 활성은 저장 초기(0일차)에 67.92%로 나타났으며, 이는 NaOCl로 세척한 숙주나물(65.25%) 및 증류수로 세척한 숙주나물(66.02%)보다 유의하게 높은 값을 보였다($p<0.05$; Table 4). 그러나 저장 3일부터 저장 기간은 14일까지 처리군 별로 그 활성에 있어서 유의적인 차이가 보이

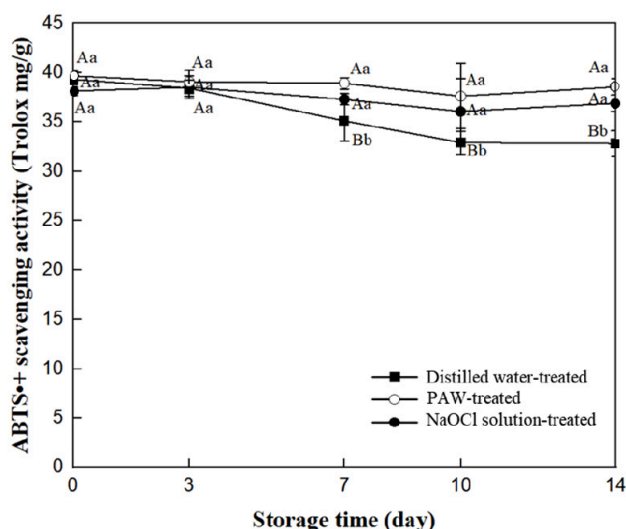


Fig. 6. Effect of pilot-scale plasma-activated water (PAW) treatment on 2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) radical scavenging activity of mung bean sprouts during storage at 4°C for 14 days (Plasma discharge time: 30 min, treatment time: 30 min). Means followed by the same uppercase letter around the error bars are not significantly different among treatments at each storage day, whereas means followed by the same lowercase letter around the error bars are not significantly different within the same treatment ($p > 0.05$).

지 않았다($p > 0.05$). DPPH• 라디칼 소거 활성이 ABTS•⁺ 라디칼 소거 활성과 다른 양상을 보인 이유는 분석법의 특성 차이에 기인한 것으로 판단된다. DPPH• 라디칼 소거 활성은 지용성 항산화 물질의 영향을 크게 받는 것으로 보고되었으며(Floegel et al., 2011), 처리에 따른 지용성 항산화 성분(예, 비타민 E, 카로티노이드 등) (Li et al., 2021)의 변화가 수용성 성분의 변화보다 더 컸기 때문으로 판단되었다. 추후 연구에서 PAW 처리의 극성이 다른 항산화 성분

Table 4. Effects of pilot-scale plasma-activated water (PAW) treatment on 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH•) scavenging activity (%) of mung bean sprouts during storage at 4°C for 14 days

Storage time (day)	DPPH• scavenging activity (%)		
	Distilled water-treated	NaOCl-treated	PAW-treated
0	66.02 ± 1.53 ^{Ba}	65.25 ± 1.35 ^{Ba}	67.92 ± 1.27 ^{Aa}
3	58.95 ± 1.30 ^{Ab}	58.84 ± 2.21 ^{Aa}	63.55 ± 3.15 ^{Aa}
7	35.84 ± 1.48 ^{Ac}	36.54 ± 0.25 ^{Ab}	37.24 ± 1.25 ^{Ab}
10	34.98 ± 2.21 ^{Ac}	29.47 ± 3.14 ^{Ab}	30.27 ± 3.10 ^{Ac}
14	33.88 ± 2.23 ^{Ac}	28.13 ± 2.11 ^{Ab}	28.39 ± 2.76 ^{Ad}

¹⁾Plasma discharge time: 30 min, treatment time: 30 min.

²⁾Means followed by the same lowercase letter within a column are not significantly different between the same treatment, while those followed by the same uppercase letter within a row are not significantly different between the treatments stored at each storage day ($p > 0.05$).

에 대한 영향을 밝힘으로써 이에 대한 확인이 이루어져야 할 것이다. 본 연구 결과는 PAW 처리가 숙주나물의 항산화 활성에 부정적인 영향을 미치지 않음을 보여주었다.

요약

본 연구에서는 PAW 생성 챔버 개폐가 용이하도록 하여 전극의 관리가 효율적인 새로운 파일럿 규모의 PAW 생성 장치를 개발하였다. 개발된 장치로 생성된 PAW으로 처리시간에 따른 숙주나물의 토착 호기성 세균을 저해시킨 결과, 30분 동안 처리 및 세척했을 때 가장 효과적으로 저해($1.5 \pm 0.2 \log \text{CFU/g}$) 효과가 있음을 확인하였다. 또한, PAW (플라즈마 방전시간: 30분)로 30분간 숙주나물을 세척한 후, 4°C에서 14일 동안 저장했을 때, PAW 세척에 의한 숙주나물의 토착 호기성 세균의 생장은 $1.1 \sim 1.4 \log \text{CFU/g}$ 내에서 억제되어 NaOCl 세척보다 그 생장 억제 효과가 높음을 알 수 있었다. 4°C 저장 중 PAW로 세척된 숙주나물의 TPC 값은 저장 10일차부터, TFC 값과 ABTS•⁺ 라디칼 소거 활성은 저장 7일차부터 다른 처리의 숙주나물의 그 값보다 더 높은 항산화 활성을 나타냈다. 또한, PAW 세척은 숙주나물의 DPPH• 라디칼 소거 활성을 저장 기간 동안 증류수로 세척된 숙주나물과 NaOCl로 세척한 숙주나물의 그 정도와 유사하게 하였고, pH 변화는 증류수로 세척한 숙주나물과 유사하였으며, 색도 변화는 NaOCl로 세척한 숙주나물보다 안정적으로 유지되었다. 본 연구는 PAW 세척 기술이 신선 채소의 품질 특성에 부정적인 영향을 주지 않는 동시에 미생물학적 안전성을 향상시킴으로써 염소계 기반의 살균 세척의 대안으로 활용될 수 있는 가능성을 보여주었다.

ORCID

Sea Cheol Min

<https://orcid.org/0000-0003-1312-358X>

Conflict of interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2026-25471251).

Data availability

Upon reasonable request, the datasets of this study can be available from the corresponding author.

Authorship contribution statement

Conceptualization: Min SC.

Data curation: Yoon S, Kwon IR.

Formal analysis: Yoon S.

Methodology: Yoon S, Min SC.

Software: Kwon IR.

Validation: Yoon S, Kwon IR.

Investigation: Yoon S.

Writing - original draft: Yoon S, Kwon IR.

Writing - review & editing: Yoon S, Kwon IR, Min SC.

Ethics approval

Not applicable.

References

- Abouelenein D, Mustafa AM, Kamgang Nzekoue F, Caprioli G, Angeloni S, Tappi S, Castagnini JM, Dalla Rosa M, Vittori S. 2023. The impact of plasma activated water treatment on the phenolic profile, vitamins content, antioxidant and enzymatic activities of rocket-salad leaves. *Antioxidants* 12: 28.
- Al F, Haskaraca G, Yildiz S. 2024. Ultrasound-assisted chilling to minimize sodium hypochlorite use while reducing pathogens and preserving quality in chicken breast meat. *LWT-Food Sci. Technol.* 213: 117107.
- Both V, Thewes FR, Brackmann A, Anese RO, Ferreira DF, Wagner R. 2017. Effects of dynamic controlled atmosphere by respiratory quotient on some quality parameters and volatile profile of 'Royal Gala' apple after long-term storage. *Food Chem.* 215: 483-492.
- Cervato G, Carabelli M, Gervasio S, Cittera A, Cazzola R, Cestaro B. 2000. Antioxidant properties of oregano (*Origanum vulgare*) leaf extracts. *J. Food Biochem.* 24: 453-465.
- Cliffe-Byrnes V, O'Beime D. 2005. Effects of chlorine treatment and packaging on the quality and shelf-life of modified atmosphere (MA) packaged coleslaw mix. *Food Control* 16: 707-716.
- Derossi A, De Pilli T, La Penna MP, Severini C. 2011. pH reduction and vegetable tissue structure changes of zucchini slices during pulsed vacuum acidification. *LWT-Food Sci. Technol.* 44: 1901-1907.
- Derossi A, De Pilli T, Severini C. 2010. Reduction in the pH of vegetables by vacuum impregnation: a study on pepper. *J. Food Eng.* 99: 9-15.
- Ebert AW. 2022. Sprouts and microgreens—novel food sources for healthy diets. *Plants* 11: 571.
- Evran E, Dasan BG, Tayyarcı EK, Boyacı IH. 2024. Effect of sequential treatment of plasma activated water and bacteriophage on decontamination of *Salmonella Typhimurium* in lettuce. *Food Bioprocess Technol.* 17: 3790-3799.
- Floegel A, Kim DO, Chung SJ, Koo SI, Chun OK. 2011. Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. *J. Food Compos. Anal.* 24: 1043-1048.
- Guo D, Liu H, Zhou L, Xie J, He C. 2021. Plasma-activated water production and its application in agriculture. *J. Sci. Food Agric.* 101: 4891-4899.
- Guo X, Li T, Tang K, Liu RH. 2012. Effect of germination on phytochemical profiles and antioxidant activity of mung bean sprouts (*Vigna radiata*). *J. Agric. Food Chem.* 60: 11050-11055.
- Han JY, Min SC, Lee HS, Eom S, Ryu S, Cho S, Kang DH. 2024. Pilot-scale plasma activated water treatment for decontaminating romaine lettuce and steamed rice cakes. *LWT-Food Sci. Technol.* 200: 116176.
- Herianto S, Arcega RD, Hou CY, Chao HR, Lee CC, Lin CM, Mahmudiono T, Chen HL. 2023. Chemical decontamination of foods using non-thermal plasma-activated water. *Sci. Total Environ.* 874: 162235.
- Hou D, Yousaf L, Xue Y, Hu J, Wu J, Hu X, Feng N, Shen Q. 2019. Mung bean (*Vigna radiata* L.): bioactive polyphenols, poly-saccharides, peptides, and health benefits. *Nutrients* 11: 1238.
- Huang PH, Cheng YT, Chan YJ, Lu WC, Li PH. 2022. Effect of heat treatment on nutritional and chromatic properties of mung bean (*Vigna radiata* L.). *Agronomy* 12: 1365.
- Kalisz A, Kornaś A, Gil J, Domagała B, Koudela M, Sękara A, Khachatryan K, Khachatryan G, Wajs-Bonikowska A, Kubica P, Krakowska A, Sałata A, Gawrońska K, Muszyńska B. 2026. Plasma-activated water as a solvent for foliar fertilizer: effects on the growth and biochemical properties of oregano (*Origanum vulgare* L.). *BMC Plant Biol.* 26: 139.
- Kang JH, Han JY, Lee HS, Ryu S, Kim SB, Cho S, Kang DH, Min SC. 2022. Plasma-activated water effectively decontaminates steamed rice cake. *LWT-Food Sci. Technol.* 157: 112838.
- Khan I, Tango CN, Miskeen S, Lee BH, Oh DH. 2017. Hurdle technology: a novel approach for enhanced food quality and safety: a review. *Food Control* 73: 1426-1444.
- Laurita R, Gozzi G, Tappi S, Capelli F, Bisag A, Laghi G, Gherardi M, Cellini B, Abouelenein D, Vittori S, Colombo V, Rocculi P, Dalla Rosa M, Vannini L. 2021. Effect of plasma

- activated water (PAW) on rocket leaves decontamination and nutritional value. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 73: 102805.
- Li J, Lu Y, Chen H, Wang L, Wang S, Guo X, Cheng X. 2021. Effect of photoperiod on vitamin E and carotenoid biosynthesis in mung bean (*Vigna radiata*) sprouts. *Food Chem.* 358: 129915.
- Liu C, Chen C, Jiang A, Sun X, Guan Q, Hu W. 2020. Effects of plasma-activated water on microbial growth and storage quality of fresh-cut apple. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 59: 102256.
- Pandey S, Jangra R, Ahlawat K, Mishra R, Mishra A, Jangra S, Prakash R. 2023. Selective generation of nitrate and nitrite in plasma activated water and its physicochemical parameters analysis. *Phys. Lett. A* 474: 128832.
- Perinban S, Orsat V, Lyew D, Raghavan V. 2022a. Effect of plasma activated water on *Escherichia coli* disinfection and quality of kale and spinach. *Food Chem.* 397: 133793.
- Perinban S, Orsat V, Raghavan V. 2022b. Influence of plasma activated water treatment on enzyme activity and quality of fresh-cut apples. *Food Chem.* 393: 133421.
- Rahman M, Hasan MS, Islam R, Rana R, Sayem ASM, As Sad MA, Matin A, Raposo A, Zandonadi RP, Han H, Ariza-Montes A, Vega-Muñoz A, Sunny AR. 2022. Plasma-activated water for food safety and quality: a review of recent developments. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19: 6630.
- Ramazzina I, Berardinelli A, Rizzi F, Tappi S, Ragni L, Sacchetti G, Rocculi P. 2015. Effect of cold plasma treatment on physico-chemical parameters and antioxidant activity of minimally processed kiwifruit. *Postharvest Biol. Technol.* 107: 55-63.
- Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic. Biol. Med.* 26: 1231-1237.
- Royintarat T, Seesuriyachan P, Boonyawan D, Choi EH, Wattanachariya W. 2019. Mechanism and optimization of non-thermal plasma-activated water for bacterial inactivation by underwater plasma jet and delivery of reactive species underwater by cylindrical DBD plasma. *Curr. Appl. Phys.* 19: 1006-1014.
- Sarangapani C, Scally L, Gulan M, Cullen PJ. 2020. Dissipation of pesticide residues on grapes and strawberries using plasma-activated water. *Food Bioprocess Technol.* 13: 1728-1741.
- Shomodder A, Thammawong M, Nakano K. 2022. Postharvest technologies for quality maintenance of sprouts. *Rev. Agric. Sci.* 10: 239-256.
- Son SB, Lee HK, Kim SJ, Yoon KS. 2024. Modeling behavior of *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* in raw and processed vegetables. *Foods* 13: 2972.
- Thirumdas R, Kothakota A, Annapure U, Siliveru K, Blundell R, Gatt R, Valdramidis VP. 2018. Plasma activated water (PAW): chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends Food Sci. Technol.* 77: 21-31.
- Thomas GA, Gil TP, Müller CT, Rogers HJ, Berger CN. 2024. From field to plate: how do bacterial enteric pathogens interact with ready-to-eat fruit and vegetables, causing disease outbreaks? *Food Microbiol.* 117: 104389.
- Vlad IE, Anghel SD. 2017. Time stability of water activated by different on-liquid atmospheric pressure plasmas. *J. Electrostat.* 87: 284-292.
- Wang H, Han R, Yuan M, Li Y, Yu Z, Cullen PJ, Du Q, Yang Y, Wang J. 2023. Evaluation of plasma-activated water: Efficacy, stability, physicochemical properties, and mechanism of inactivation against *Escherichia coli*. *LWT-Food Sci. Technol.* 184: 114969.
- Wang H, Li Y, Xi Q, Han R, Cullen PJ, Du Q, Yang Y, Forghani F, Zhang J, Wang J. 2022. Application of plasma-activated water for *Escherichia coli* decontamination and shelf-life extension of kale. *Food Qual. Saf.* 6: fyac041.
- Wong KS, Chew NS, Low M, Tan MK. 2023. Plasma-activated water: physicochemical properties, generation techniques, and applications. *Processes* 11: 2213.
- Xiang Q, Kang C, Niu L, Zhao D, Li K, Bai Y. 2018. Antibacterial activity and a membrane damage mechanism of plasma-activated water against *Pseudomonas deceptionensis* CM2. *LWT-Food Sci. Technol.* 96: 395-401.
- Xiang Q, Liu X, Liu S, Ma Y, Xu C, Bai Y. 2019. Effect of plasma-activated water on microbial quality and physico-chemical characteristics of mung bean sprouts. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 52: 49-56.
- Zhu W, Tan G, Han M, Bu Y, Li X, Li J. 2023. Evaluating the effects of plasma-activated slightly acidic electrolyzed water on bacterial inactivation and quality attributes of Atlantic salmon fillets. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 84: 103286.