



# 플라즈마 활성화수와 초음파를 병합한 처리가 무순의 미생물 저해 및 품질에 미치는 영향

조은준 · 민세철\*

서울여자대학교 식품공학과

## Effects of the integrated treatment of plasma-activated water and ultrasound on the microbial inactivation and quality of radish sprouts

Eun Joon Joe and Sea Cheol Min\*

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

### Abstract

This study evaluated the effects of ultrasound (US) treatment using plasma-activated water (PAW) as the medium (UP treatment) and a sequential treatment consisting of US followed by PAW (US→PAW treatment) on the inactivation of indigenous mesophilic aerobic bacteria and the color and antioxidant activity of radish sprouts. The PAW was generated by applying a surface dielectric barrier discharge to 1 L distilled water for 60 min. The UP treatment involved immersing 5 g of radish sprouts in 500 mL of PAW followed by ultrasound treatment (700 W, 19.8 kHz) for 10 min. In the US→PAW treatment, the sprouts were treated with ultrasound and then immersed in PAW for 5, 10, 20, or 30 min. The pH, electrical conductivity, and oxidation-reduction potentials of the PAW were  $2.15 \pm 0.1$ ,  $2,653.3 \pm 223.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ , and  $578.4 \pm 25.0 \text{ mV}$ , respectively. The UP treatment inactivated the indigenous microorganisms in radish sprouts by  $2.4 \pm 0.1 \log \text{ CFU}/\text{g}$  and the microbial reduction rates rose from 1.6 to 3.3 log CFU/g as the US→PAW treatment duration increased from 5 to 30 min. The UP-treated radish sprouts had similar colors and antioxidant activity to those treated with water ( $p > 0.05$ ). These results suggest that the UP treatment could potentially be used as an effective microbial decontamination method while maintaining the quality of radish sprouts.

**Keywords:** Cold plasma, Fresh vegetables, Non-thermal treatment, Food quality, Hygiene

## 서론

무순은 새싹 채소로서 다양한 요리에 활용할 수 있어 전세계적으로 널리 소비되는 신선 채소 중 하나이다(Yin et al., 2025). 또한 무순은 페놀성 화합물과 비타민 C 등의 항산화 성분을 풍부하게 함유하고 있다(Francis et al., 2022). 그러나 무순과 같은 새싹 채소는 높은 수분 함량과 연약한 조직 특성으로 인해 수확 후 품질이 빠르게 저하되는 문제를 가진다. 따라서 수확 후에도 새싹 채소의 품질을 안정적으로 유지하게 하는 가공기술의 개발이 요구되고 있

다(Shomodder et al., 2022).

한편, 무순을 포함한 새싹채소는 주로 추가적인 세척 및 가열 처리 없이 섭취되기 때문에(Gamba et al., 2021), 미생물 저감을 위한 새싹 채소 세척 공정의 중요성이 강조되고 있다(Yan et al., 2022). 현재 신선 채소의 세척에는 비용이 적게 들고 사용이 용이한 염소계 세척제가 주로 사용된다(Luo et al., 2018). 그러나 염소계 세척제는 식품 표면에 잔류할 수 있으며, 트리할로메탄과 같은 발암성 물질의 생성을 유발할 가능성이 있어 소비자의 건강 위해에 대한 우려가 제기되고 있다(Fan et al., 2021). 따라서, 염소계 세척제를 사용하는 세척 공정

Received: Mar 12, 2026 / Revised: Apr 9, 2026 / Accepted: Apr 23, 2026 / Published: May 21, 2026

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

E-mail: [smin@swu.ac.kr](mailto: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.

을 대체할 새로운 세척 공정의 개발이 필요하다(Choi et al., 2019).

세척 중 초음파(ultrasound, US) 처리는 공동현상(cavitation)을 유도하고, 공동현상에 의해 생성되는 전단력과 자유 라디칼은 식품에 오염된 미생물의 세포벽 구조를 손상시켜 미생물을 저해시킨다(Izadifar et al., 2017; Fan et al., 2021). 그러나 US 처리는 염소계 세척제를 사용한 세척과 유사한 수준의 미생물 저감을 달성하기 위해서는 높은 출력과 장시간 처리가 요구되어 온도 상승과 함께 식품의 품질 특성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Beitia et al., 2023).

플라즈마 활성화수(plasma-activated water, PAW)는 플라즈마 방전 시 생성되는 반응성 질소종(reactive nitrogen species, RNS)과 반응성 산소종(reactive oxygen species, ROS) 등이 용존된 물이다. PAW에는 hydroxyl radical ( $\text{OH}^\bullet$ )과 nitric oxide ( $\text{NO}^\bullet$ )와 같은 단수명 활성종(short-lived species)과 nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), 그리고 오존( $\text{O}_3$ )과 같은 장수명 활성종(long-lived species)이 포함되어 있다(Yoon et al., 2025). PAW의 미생물 불활성화 효과는 RNS와 ROS를 비롯한 다양한 활성종과 전자 및 이온의 존재에 기인한다(Zhao et al., 2020; Yoon et al., 2025). PAW를 이용한 세척 공정은 기존 염소계 살균제를 사용한 식품 세척의 살균 효과와 유사한 수준의 미생물 저해 효과를 가지면서도(Rothwell et al., 2023), 추가적인 세척을 요구하지 않아 사용되는 물을 절약할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Zhao et al., 2020). 그럼에도 불구하고 신선 농산물의 경우, 왁스층, 기공, 주름과 같은 채소 표면의 복잡한 미세 구조 때문에 활성종이 표면 전체에 균일하게 침투하지 못해 PAW의 미생물 저감 효과가 제한적일 수 있다(Wong et al., 2023; Yoon et al., 2025).

US와 PAW 처리를 병합하는 처리는 US 처리가 식품 표면에 부착된 미생물을 탈착시키고, 복잡한 구조를 가지고 있는 식품 표면의 곳곳으로 PAW 활성종을 효과적으로 전달 및 분산시켜 활성종의 미생물과의 반응 기회를 높이고, 또한 PAW 처리 전 미생물의 세포막을 손상시켜 PAW 활성종의 세포 내 침투를 용이하게 함으로써 US와 PAW를 단독으로 사용하는 처리보다 미생물 저해 효과를 향상시킬 수 있다(Sun et al., 2023). 따라서 본 연구의 목적은 1) US와 PAW를 이용한 단독 처리, 연속 처리, 그리고 동시 처리("UP 처리")에 따른 무순의 토착 호기성 미생물 저해 효과를 비교하고, 2) UP 처리가 무순의 색과 항산화능에 미치는 영향을 연구하는 것이었다.

## 재료 및 방법

### 재료

본 연구에서 사용된 무순은 팜에이트(Seoul, Korea)에서 구매하여 사용하였고, 바로 실험에 사용하지 못하는 경우 최대 2 일간 4°C에서

보관하였다. 실험에 사용된 무순 시료는 줄기와 잎 전체가 손상이 없는 것으로 선별하여 5.0±0.1 g으로 준비하였다. 미생물 분석 및 항산화능을 측정하는 실험에서는 무순의 줄기와 잎을 포함한 전체를 사용하였고, 무순의 색도를 측정하는 실험에서는 잎만을 사용하였다.

### 처리

본 연구에서 사용된 초음파 처리 장비와 PAW 제조 장비는 Yoon et al. (2025)에 자세히 기술되었다. PAW 생성 챔버는 내부 (14 L)에 전압 8 kV의 유전체 플레이트 2개를 연결하여 플라즈마를 발생하도록 구성되어 있으며, 온도 상승 방지와 활성종 확산을 위하여 팬이 장착되어 있다(Fig. 1(A)). PAW는 챔버 내부에 넣은 멸균 증류수 1 L를 51.7 W에서 1시간 동안 방전하여 제조되었다. 방전 중 물은 교반기(PC-420D, Corning Inc, Corning, NY, USA)를 이용해 300 rpm으로 교반되었다.

무순 시료 5.0±0.1 g을 500 mL의 PAW 또는 멸균 증류수(distilled water, DW)에 침지한 후 교반기를 이용해 100 rpm으로 10분간 교반하였다. 이것을 각각 PAW 처리와 DW 처리로 명명하였다(Table 1).

US 처리는 500 mL의 DW에 무순을 침지한 후 혼(horn) 형 프로브가 장착되어 있는 초음파 처리 장비(ULH-700N, Ulso Hitech, Chungju, Korea)를 사용하여 19.8 kHz, 700 W 조건에서 10분간 수행하였다(Fig. 1(B)). 처리 중에는 무순 시료의 온도 상승을 방지하기 위해 냉각 장치(JSCR-13, JS Research Inc., Gongju, Korea)에 연결된 쿨링 재킷을 사용해 냉각수를 순환시켰다.

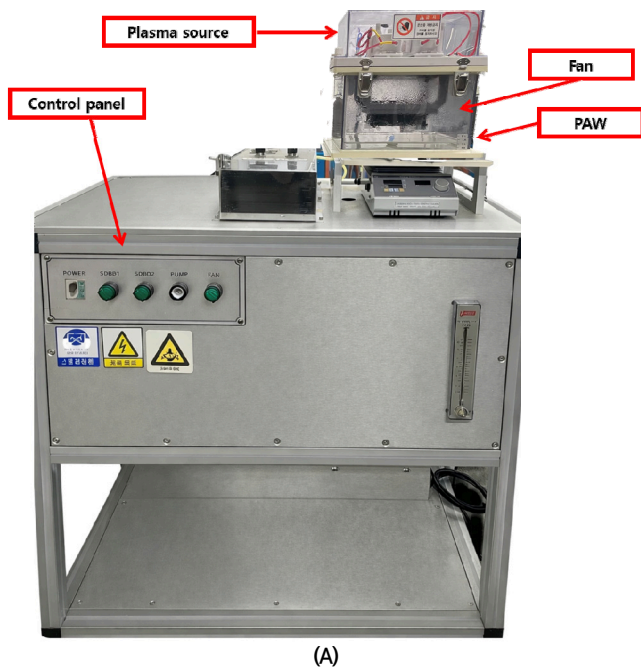
UP 처리는 US 처리와 동일한 조건에서 DW 대신 PAW를 사용하여 수행하였다(Table 1). US→PAW 연속 처리는 US 처리를 수행한 후 바로 PAW 처리를 연속적으로 실시하여 이루어졌으며, 이때 PAW 처리 시간을 5, 10, 20, 그리고 30분으로 설정하였다(Table 1).

### PAW의 물리화학적 특성 측정

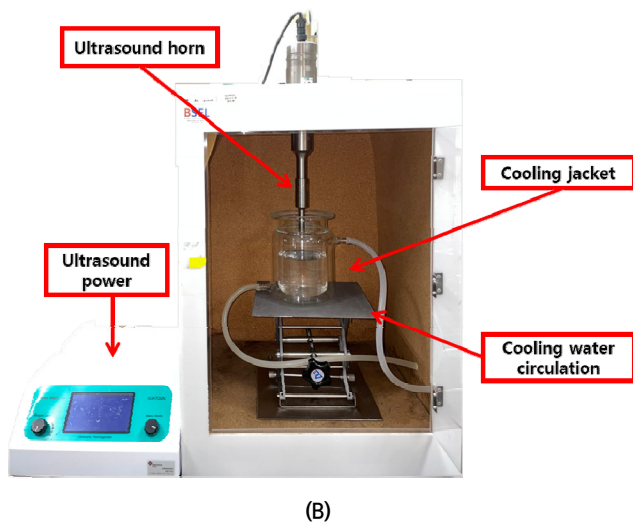
PAW의 pH는 pH meter (FiveEasy™ Plus, Mettler Toledo, Schwerzenbach, Switzerland)를 이용하여 측정하였고, 산화환원전위(oxidation-reduction potential, ORP)와 전기전도도(electrical conductivity, EC)는 multi meter (K5000-CP, iSTEK, Seoul, Korea)를 이용하여 측정하였다.

### 미생물 분석

처리하지 않은 무순 또는 DW 처리, US 처리, PAW 처리, UP 처리, 또는 US→PAW 연속 처리한 무순을 멸균 펩톤 수를 사용하여 1:10 (w/w) 비율로 stomacher bag에 넣고 패들식 균질기 (LS-400A, BNF Korea Co., Gimpo, Korea)를 이용하여 3분간 균질



(A)



(B)

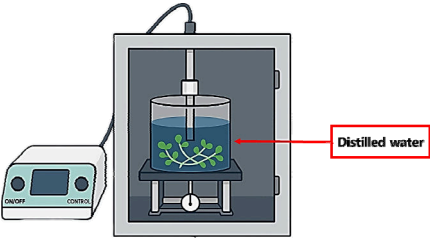
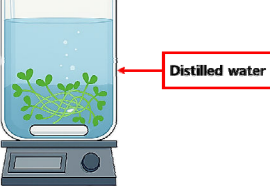
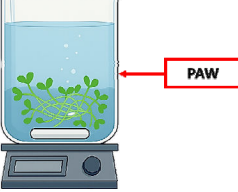
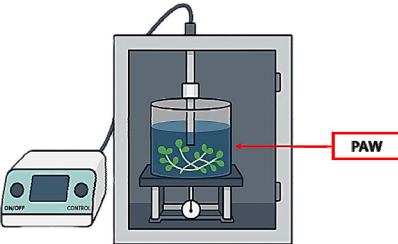
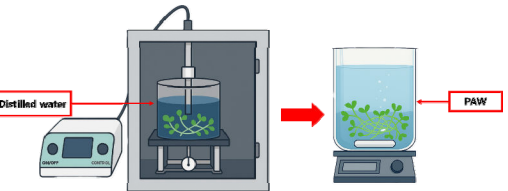
Fig. 1. Images of the plasma-activated water (PAW) generating system using dielectric-barrier discharge (A) and ultrasound treatment system (B) used in the study.

화하였다. 이후 멸균 펩톤 수로 단계 희석하여 표준 한천배지(plate count agar, PCA; Difco™)에 평판 도말하였고, 이를 37°C에서 48시간 배양한 뒤, 형성된 집락을 계수하여 중온 호기성 세균 수를 log CFU/g으로 나타내었다.

### 무순의 색과 항산화능 측정

무순의 색은 UP 처리하거나 처리하지 않은 무순을 백색 표준판 (Illuminate C, 2° standard observer) 위에 올린 후 색도계(Minolta

Table 1. Nomenclature of different treatment

Treatment	Configuration
Ultrasound (US) treatment	
Distilled water (DW) treatment	
Plasma-activated water (PAW) treatment	
US-assisted PAW (UP) treatment	
Sequential treatment with US followed by PAW (US→PAW treatment)	

Chroma Meter CR-400, Minolta Camera Co., Osaka, Japan)로 무순의 잎 부위를 5번 반복 측정하여 CIE L\*, a\*, 그리고 b\* 값으로 나타내었다.

항산화능은 Lee et al. (2024)의 방법을 따라 DPPH 라디칼 소거활성으로 평가하였다. UP 처리하거나 처리하지 않은 무순을 동결건조하여 분말화한 뒤, 이 중 0.6 g의 분말을 4 mL의 80%(v/v) 메탄올과 혼합한 후, 수조형 초음파 처리 장비(Powersonic 610, Hwashin Technology Company, Seoul, Korea)를 사용하여 20분간(400 W, 60 Hz) 처리하였다. 이후 원심분리기(TC-Spinplus-6, Topscien Instrumentco., Ltd, Ningbo, China)로 원심분리하여(1,110×g, 22°C) 상등액을 취해

추출물을 얻었다. 침전물을 같은 방법으로 원심분리하여 추가 추출물을 얻었고, 이후 한 번 더 추가 추출물을 얻은 뒤 모든 추출물들을 합하여 분석시료를 준비하였다. 분석시료 90  $\mu$ L와 DPPH 시약 110  $\mu$ L를 혼합하여 암소에서 30분간 반응시킨 뒤 517 nm에서의 흡광도를 측정하였다. DPPH 라디칼 소거 활성은 Lee et al. (2024)에서 보고된 식을 사용하여 계산하였다.

## 통계 분석

모든 실험은 총 2회 반복되었으며 1회 반복 실험 시 각 처리 당 3개의 시료(무순 5.0 g/시료)를 사용하여 수행하였다( $n=6$ ). 항산화능 측정과 색도 측정은 한 시료에서 각각 2회와 5회 반복 측정되었다. PAW와 DW의 물리화학적 특성을 측정하는 실험도 2회 반복되었으며, 처리 종류별로 3개의 측정 시료가 분석되었다. 실험 결과에 대하여 SPSS (Ver. 24.0.0; SPSS Inc., New York, NY, USA)의 일원배치 분산분석(ANOVA)으로 통계적 유의성을 검정한 뒤, Tukey's multiple range test를 사용하여 사후 검정하였다( $\alpha=0.05$ ).

## 결과 및 고찰

### 무순의 토착 호기성 미생물 저해 효과

DW, US, PAW, 그리고 UP 처리에 따른 무순의 토착 호기성 미생물에 대한 저해 효과를 비교하였다(Fig. 2). DW 처리, US 처리, PAW 처리 그리고 UP 처리는 무순의 토착 호기성 미생물을 각각  $0.5 \pm 0.2$ ,  $0.8 \pm 0.1$ ,  $1.7 \pm 0.4$ , 그리고  $2.4 \pm 0.1$  log CFU/g만큼 저해시켰고, 이를 통해 UP 처리가 무순의 토착 호기성 미생물을 가장 효과적으로 저해시킴을 알 수 있었다( $p<0.05$ ).

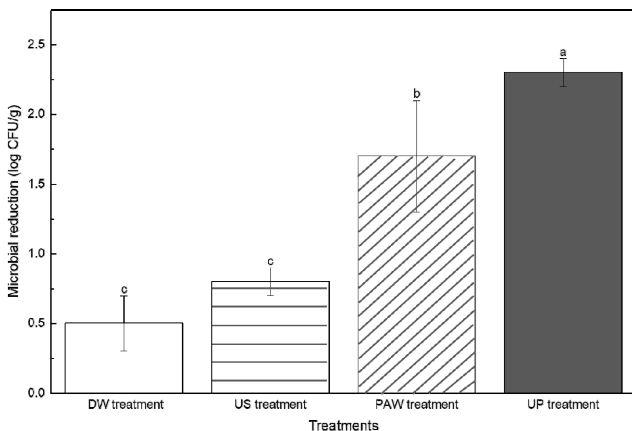
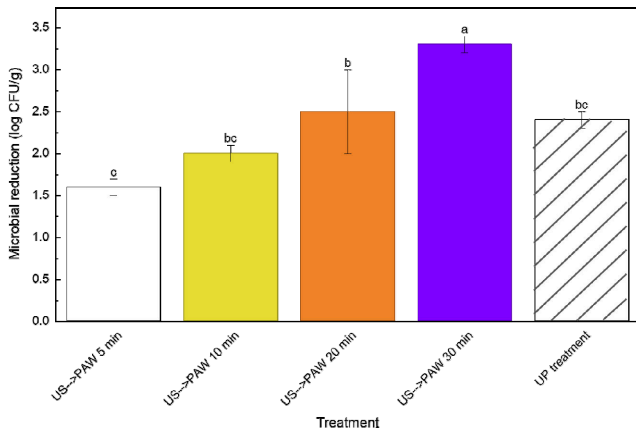


Fig. 2. Effects of distilled water (DW), ultrasound (US), plasma-activated water (PAW), and ultrasound-assisted PAW (UP) treatments on the inactivation of indigenous aerobic bacteria in radish sprouts. Different letters above the bars indicate significant differences in the inactivation levels ( $p<0.05$ ) based on ANOVA followed by Tukey's multiple range test.

본 연구에서 사용된 PAW의 물리화학적 특성을 DW와 비교한 결과, PAW와 DW의 pH는 각각  $2.15 \pm 0.1$ 과  $5.81 \pm 0.2$ 로 PAW에서 유의적으로 낮았으며( $p<0.05$ ), ORP는 각각  $578.4 \pm 25.0$ 과  $189.1 \pm 5.9$  mV, 그리고 EC는 각각  $2,653.3 \pm 223.1$ 과  $11.7 \pm 0.5$   $\mu$ S/cm 로 PAW에서 높게 나타났다( $p<0.05$ ). PAW의 pH가 낮은 이유는 플라즈마 방전 중 생성된 질산( $\text{HNO}_3$ )과 아질산( $\text{HNO}_2$ ) 등으로부터 생성된  $\text{H}^+$  이온 때문으로 알려져 있다(Jang & Min, 2025). ORP는 용액의 산화 또는 환원 능력을 나타내는 지표로, 높은 ORP 값은 PAW가 강한 산화 환경임을 의미한다(Thirumdas et al., 2018). EC는 용액 내 존재하는 이온의 농도와 전기 전도성을 반영하는 지표로, PAW 내 이온성 반응 생성물의 축적 정도를 나타낸다(Jang & Min, 2025). 본 연구에서 관찰된 PAW의 DW에 비해 상대적으로 낮은 pH와 높은 ORP 또는 EC값은 플라즈마 처리 과정에서 PAW 내에 반응성 산소종 및 질소종이 형성되었으며, PAW가 산화 환경을 가지고 있음을 보여준다(Yoon et al., 2025).

한편, PAW 처리 시 US 처리를 동시에 병합하면(UP 처리) US 처리가 식품 표면에 오염된 미생물을 효과적으로 탈착시키고, PAW 내 존재하는 활성종을 균일하게 분산시켜 PAW 처리의 향상된 미생물 저해 효과를 확인할 수 있다(Sun et al., 2023). 또한 이 경우 US 처리가 미생물의 세포막을 손상시키면, 손상된 세포막을 통해 PAW 활성종이 쉽게 세포 내로 들어갈 수 있으므로 효과적인 미생물 저해를 기대할 수 있다(Sun et al., 2023). 그리고 US는 PAW가 단순히 도달하기 어려운 식품의 복잡한 표면 부위까지 PAW를 이동시킬 수 있으므로 활성종과 미생물 간의 접촉을 증가시켜 PAW 처리의 미생물 저해 효과를 높일 수 있다(Sun et al., 2023). 이러한 US 처리의 PAW 미생물 저해 작용에 있어서의 도움을 통해 UP 처리가 무순의 토착 호기성 미생물을 가장 효과적으로 저해했음을 설명할 수 있을 것이다.

US→PAW 연속 처리와 UP 처리의 미생물 저해 효과를 Fig. 3에 나타내었다. 무순을 10분간 US 처리한 후, PAW에 5, 10, 20, 그리고 30분 동안 침지한 결과, US→PAW 연속 처리는 무순의 토착 호기성 미생물을 각각  $1.6 \pm 0.1$ ,  $2.3 \pm 0.2$ ,  $2.8 \pm 0.1$  그리고  $3.3 \pm 0.1$  log CFU/g 저해시키며 유의적인 차이를 보였다( $p<0.05$ ). 따라서 PAW 침지 시간이 길어질수록 무순의 토착 호기성 미생물 저해 효과가 증가한다는 것을 알 수 있었다. US와 PAW 처리를 각각 10분씩 진행한 US→PAW 연속 처리의 미생물 저해 효과는 UP 처리(처리 시간 10분)와 유사하였으며, US 및 PAW 단독 처리(각 10분 처리) 효과의 합과도 유의적인 차이가 없었다( $p>0.05$ ). UP 처리가 절반의 처리 시간에도 불구하고 이들 처리와 유사한 저해 효과를 나타낸 이유는 앞서 언급된 US와 PAW 병합 처리의 미생물 저해 기작이 US→PAW 연속 처리보다 UP 처리에서 더 효율적으로 이루어졌기 때문으로 판단되었다. 미생물 저해 결과를 통해 UP 처리가 비록



**Fig. 3.** Effects of UP treatment and a sequential treatment with ultrasound (US) followed by PAW (US->PAW treatment) on the inactivation of indigenous aerobic bacteria in radish sprouts. Different letters above the bars indicate significant differences in the inactivation levels ( $p < 0.05$ ) based on ANOVA followed by Tukey’s multiple range test.

US->PAW 연속 처리와 유사한 미생물 저해 효과를 보였다고 하더라도 공정 효율성 측면에서 우수한 처리임을 알 수 있었다.

무순을 100 ppm의 차아염소산으로 5분간 세척했을 때 무순의 토착 호기성 미생물이 0.6 log CFU/g 만큼 저해되었다고 보고된 바 있다(Alloggia et al., 2025). 이 결과를 본 연구의 결과와 비교했을 때 UP 처리가 차아염소산을 사용한 세척보다 우수한 미생물 저해 효과를 갖는다는 것을 알 수 있었고, 따라서 염소계 세척수 살균 대체 기술로서의 UP 처리의 가능성을 확인할 수 있었다.

DW 처리와 US 처리에 사용되었던 세척수의 잔존균 수는 계수 한계(300 CFU/g) 이상이었으나, PAW 처리와 UP 처리에 사용된 세척수의 잔존균 수는 검출한계(10 CFU/g) 미만이었다. 이 결과는 PAW 처리와 UP 처리가 미생물을 단순히 탈착하는 것이 아니라 미생물을 실제 저해시킨다는 것을 의미하며, 세척수로 이행된 미생물까지 저해시키므로 PAW 처리와 UP 처리가 세척을 통한 교차오염을 일으킬 가능성이 낮은 처리임을 보여준다.

### UP 처리에 따른 무순의 색과 항산화능에 대한 영향

UP 처리 여부에 따른 무순의 색도 변화를 Table 2에 나타내었다. UP 처리에 따른 무순의 CIE L\*, a\*, 그리고 b\* 값은 처리하지 않은 무순과 유의적인 차이를 보이지 않았다( $p > 0.05$ ). 식품에 가해지는 US는 처리 시간이 길어질 경우 클로로필 분해 및 세포 내 성분 방출을 유발할 수 있으며(Kutlu et al., 2022), PAW의 ROS는 무순의 클로로필을 파괴하여 식품의 색을 변화시킬 수 있다(Amorim et al., 2023). 본 연구에서 사용된 조건에서 적용된 US와 PAW는 무순의 색에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

**Table 2.** Effects of UP treatment on color and DPPH scavenging activity of radish sprouts

Samples	Quality properties			
	Color			DPPH* scavenging activity (%)
	CIE L*	CIE a*	CIE b*	
Untreated	42.34±1.8 <sup>a</sup>	-12.13±0.4 <sup>a</sup>	20.26±2.7 <sup>a</sup>	48.4±4.7 <sup>a</sup>
UP-treated	41.11±2.1 <sup>a</sup>	-12.93±0.8 <sup>a</sup>	20.90±1.4 <sup>a</sup>	44.8±5.5 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Data represent the means with standard deviations (n=6). Means followed by the same lower-case letter within a column are not significantly different ( $p > 0.05$ ) based on ANOVA followed by Tukey’s multiple range test.

본 연구에서 측정된 UP 처리가 무순의 DPPH 라디칼 소거능에 미치는 영향을 Table 2에 요약하였다. 무순의 항산화 활성은 처리 과정 중 물리적 또는 화학적 자극에 의해 변화할 수 있다(Liu et al., 2021). US 처리는 공동현상에 의해 활성산소종을 생성하여 식품 성분의 산화 반응을 유도할 수 있기 때문에 처리 조건에 따라 항산화 성분을 분해할 수 있다(Ooi et al., 2025). 또한 PAW는 반응성 산소종 및 질소종을 포함하여 높은 산화력을 가지기 때문에 처리 중 식품 내 페놀성 화합물이나 비타민 C가 파괴되어 식품의 항산화능이 감소할 수 있다(Abouelenein et al., 2022). 하지만 본 연구에서는 UP 처리 여부에 따라 DPPH 라디칼 소거 활성의 유의적인 차이는 보이지 않았다( $p > 0.05$ ). 이는 본 연구에 사용된 조건의 UP 처리에서는 무순의 색과 항산화 특성을 변화시킬 정도로 PAW 활성종과 무순 성분 간에 반응이 일어나지 않음을 알 수 있었다.

### 요약

UP 처리는 무순의 토착 호기성 미생물을 2.4±0.1 log CFU/g 만큼 저해시키면서 DW, US, 그리고 PAW 처리보다 우수한 미생물 저해 효과를 보여줬다. 처리 시간 10분의 UP 처리의 미생물 저해 정도는 US 처리를 10분 간 수행한 뒤 바로 PAW에 10분간 침지한 처리의 저해 정도와 단독 10분간의 US 처리와 10분간의 PAW 처리의 저해 정도를 합한 것과 다르지 않아 UP 처리가 공정 효율성 측면에서 우수한 처리임을 알 수 있었다. 또한 UP 처리에 사용되었던 세척수의 잔존균 수 분석을 통해 UP 처리가 세척을 통한 교차오염을 일으킬 가능성이 낮은 처리임을 확인할 수 있었다. UP 처리한 무순은 처리하지 않은 무순과 비교했을 때 색도와 DPPH 라디칼 소거 활성에 변화가 없었다. 본 연구를 통해 UP 처리가 품질에 대한 영향을 최소화하면서 미생물을 효과적으로 저해하는 새로운 무순 세척 방법으로 활용될 가능성을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과를 바탕으로, UP 처리된 무순의 저장 안정성을 확보하기 위해 저장 중 미생물 수 및 균집 변화와 이와 연관된 품질 저하 기작을 규명하는 후속 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## ORCID

Eun Joon Joe <https://orcid.org/0009-0009-0967-0506>  
 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 a research grant from Seoul Women's University (2026-0100).

## 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: Joe EJ, Min SC.  
 Formal analysis: Joe EJ.  
 Methodology: Joe EJ, Min SC.  
 Software: Joe EJ.  
 Validation: Joe EJ.  
 Investigation: Joe EJ.  
 Writing - original draft: Joe EJ.  
 Writing - review & editing: Joe EJ, Min SC.

## Ethics approval

Not applicable.

## References

- Abouelenein D, Mustafa AM, Nzekoue FK, Caprioli G, Angeloni S, Tappi S, Castagnini JM, Dalla Rosa M, Vittori S. 2022. The impact of plasma activated water treatment on the phenolic profile, vitamins content, antioxidant and enzymatic activities of rocket-salad leaves. *Antioxidants*. 12: 28.
- Alloggia FP, Bafumo RF, Ramírez DA, Maza MA, Camargo AB. 2025. Impact of ozone-based postharvest treatment on the quality and shelf life of radish (*Raphanus sativus* L.) microgreens. *Rev. Fac. Cienc. Agrar.* 57: 199-210.
- Amorim DS, Amorim IS, Chisté RC, Filho JT, Fernandes FAN, Godoy HT. 2023. Effects of cold plasma on chlorophylls, carotenoids, anthocyanins, and betalains. *Food Res. Int.* 167: 112593.
- Beitia E, Gkogka E, Chanos P, Hertel C, Heinz V, Valdramidis V, Aganovic K. 2023. Microbial decontamination assisted by ultrasound-based processing technologies in food and model systems: A review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 22: 2802-2849.
- Choi IL, Wang L, Lee JH, Han SJ, Ko YW, Kim Y, Kang HM. 2019. Effect of LED and QD-LED (Quantum Dot) treatments on production and quality of red radish (*Raphanus sativus* L.) sprout. *J. Bio-Environ. Control.* 28: 265-272.
- Fan K, Wu J, Chen L. 2021. Ultrasound and its combined application in the improvement of microbial and physicochemical quality of fruits and vegetables: A review. *Ultrason. Sonochem.* 80: 105838.
- Francis H, Debs E, Koubaa M, Alrayess Z, Maroun RG, Louka N. 2022. Sprouts use as functional foods. Optimization of germination of wheat (*Triticum aestivum* L.), alfalfa (*Medicago sativa* L.), and radish (*Raphanus sativus* L.) seeds based on their nutritional content evolution. *Foods*. 11: 1460.
- Gamba M, Asllanaj E, Raguindin PF, Glisic M, Franco OH, Minder B, Bussier W, Metzger B, Kern H, Muka T. 2021. Nutritional and phytochemical characterization of radish (*Raphanus sativus*): a systematic review. *Trends Food Sci. Technol.* 113: 205-218.
- Izadifar Z, Babyn P, Chapman D. 2017. Mechanical and biological effects of ultrasound: a review of present knowledge. *Ultrasound Med. Biol.* 43: 1085-1104.
- Jang GY, Min SC. 2025. Ultrasound treatment using plasma-activated water for aflatoxin B1 degradation in corn kernels. *Food Control.* 181: 111791.
- Kutlu N, Pandiselvam R, Kamiloglu A, Saka I, Sruthi NU, Kothakota A, Socol CT, Maerescu CM. 2022. Impact of ultrasonication applications on color profile of foods. *Ultrason. Sonochem.* 89: 106109.
- Lee HW, Bak JYJ, Min SC. 2024. Effects of ultrasound-assisted plasma-activated water washing on the inhibition of natural microorganisms on fresh-cut celery and celery quality properties. *Food Sci. Biotechnol.* 33: 3639-3650.
- Liu H, Li Z, Zhang X, Liu Y, Hu J, Yang C, Zhao X. 2021. The effects of ultrasound on the growth, nutritional quality and microbiological quality of sprouts. *Trends Food Sci. Technol.* 111: 292-300.

- Luo Y, Zhou B, Haute SV, Nou X, Zhang B, Teng Z, Turner ER, Wang Q, Millner PD. 2018. Association between bacterial survival and free chlorine concentration during commercial fresh-cut produce wash operation. *Food Microbiol.* 70: 120-128.
- Ooi EZH, Chan ES, Song CP, Pushpamalar J, Lee YY. 2025. Ultrasound-assisted extraction enhances recovery of antioxidant-rich carbohydrate fraction from mixed microalgae species. *Ultrason. Sonochem.* 123: 107656.
- Rothwell JG, Hong J, Morrison SJ, Vyas HKN, Xia B, Mai-Prochnow A, McConchie R, Phan-Thien KY, Cullen PJ, Carter DA. 2023. An effective sanitizer for fresh produce production: *in situ* plasma-activated water treatment inactivates pathogenic bacteria and maintains the quality of cucurbit fruit. *Microbiol. Spectr.* 11: e00034-23.
- Shomodder A, Thammawong M, Nakano K. 2022. Postharvest technologies for quality maintenance of sprouts. *Rev. Agric. Sci.* 10: 239-256.
- Sun R, Xu W, Xiong L, Jiang N, Xia J, Zhu Y, Wang C, Liu Q, Ma Y, Luo H. 2023. The combined effects of ultrasound and plasma-activated water on microbial inactivation and quality attributes of crayfish during refrigerated storage. *Ultrason. Sonochem.* 98: 106517.
- 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.
- Wong KS, Chew NS, Low M, Tan MK. 2023. Plasma-activated water: physicochemical properties, generation techniques, and applications. *Processes.* 11: 2213.
- Yan H, Li W, Chen H, Liao Q, Xia M, Wu D, Liu C, Chen J, Zou L, Peng L, Zhao G, Zhao J. 2022. Effects of storage temperature, packaging material and wash treatment on quality and shelf life of Tartary buckwheat microgreens. *Foods.* 11: 3630.
- Yin J, Xu H, Dai B, Zhang Z, Basharat Z, Cai M, Zhang H, Hu K, Duan Y. 2025. Varietal differences in nutritional profiles and functionality of radish sprouts: food application potential. *Food Res. Int.* 224: 117970.
- Yoon S, Lee HW, Bak JYJ, Min SC. 2025. Microbial decontamination of fresh-cut celery using simultaneous ultrasound and plasma-activated water treatment. *Int. J. Food Microbiol.* 432: 110912.
- Zhao YM, Patange A, Sun DW, Tiwari B. 2020. Plasma-activated water: physicochemical properties, microbial inactivation mechanisms, factors influencing antimicrobial effectiveness, and applications in the food industry. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 19: 3951-3979.